



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文



基于分项计量的公建空调系统  
夏季运行故障诊断算法研究



姓名：姬颖

学号：1210024

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：工学

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：许鹏教授



二〇一七年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

**FDD Method of HVAC System in Summer in  
Large Public Buildings with Submetering  
Electricity Data**

Candidate: Ying Ji

Student Number: 1210024

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Engineering

Major: HVAC

Supervisor: Prof. Peng Xu

March, 2017

基于分项计量的公建空调系统夏季运行故障诊断算法研究

姬颖

同济大学

同济大学暖通空调课题组

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济许鹏课题组

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济许鹏课题组



## 摘要

建筑能耗约占全球总能耗的三分之一，在建筑能耗中占比最大的是采暖、通风及空调（HVAC）系统能耗，由于运行管理不当、设备故障或者老化等因素，导致空调系统实际运行状况往往和设计或者调试初期的状况相距甚远，造成能耗浪费。所以空调系统故障诊断尤为重要。现有的空调系统故障诊断算法主要依赖于温度、流量、压力和阀门开度等参数，需要的参数种类多、数量大，传感器安装难度大且容易发生漂移，在实际建筑中流量参数更是难以获得。近十年来，我国的很多城市都在推行建筑电耗分项计量，积累了大量建筑的历史电耗数据，已有不少学者从事能耗拆分方法和建筑能耗指标的研究。然而，使用建筑分项计量电耗数据进行空调系统故障诊断的研究很少，几乎没有成形的研究成果。

本文以既有建筑的实测数据为基础，通过理论分析、数值模拟和数据挖掘等方法，进行了基于分项计量的公建空调系统夏季运行故障诊断算法的研究。本文提出的空调系统故障诊断算法相比于现有的诊断算法而言，有两个明显的优势：1) 电耗的计量精度比温度、流量、压力等参数的计量精度高，而且不容易发生漂移；2) 我国的很多城市已经有大量的公建安装了分项计量系统，该空调系统故障诊断算法可以直接在这些建筑中应用，实用性强。该空调系统故障诊断算法由三个子算法构成：1) 空调系统末端设备逐时能耗拆分算法，2) 空调系统逐时负荷估算算法，3) 空调系统逐时故障诊断算法。

1) 空调系统末端逐时能耗拆分算法。由于配电设计因素，空调系统的冷热源、水泵、冷却塔等设备是可以直接独立计量的，而空调系统末端设备能耗往往掺混在照明插座分项或者动力分项之中，这是现有分项计量系统的一大弊端。该部分研究工作建立了不同日类型下以天为周期，以小时为变量的傅里叶模型，对空调系统末端设备能耗进行拆分，将拆分模型应用于上海市 4 栋实际建筑并且对拆分结果进行了验证，这 4 栋建筑的空调系统末端设备具有直接独立计量。拆分结果非常好，平均相对误差可以控制在 10% 以内，拆分结果最好的一栋建筑平均相对误差只有 1%。

2) 空调系统逐时负荷估算算法。在空调系统故障诊断领域，除了能耗数据，冷量数据也是很重要的，本文给出了两种空调系统逐时负荷估算方法。

方法一：模拟法。通过建立实际建筑模型获得建筑负荷的工作重点是建筑模型的建立和校核，因为在建筑的实际运行阶段，建筑中各种用电设备的能耗是逐时变化的，与设计阶段差异很大，如果没有逐时的运行数据用于模型校核，很难获得准确的模型。现有的模型校验方法可以实现总能耗数据的吻合，但是由于输

入参数成百上千，这是一个多解问题，无法确定模型是否与实际建筑相符。本研究提出一种基于逐时分项计量电耗数据的模型校验方法，并且给出了具体的校验过程和实际案例分析，空调系统逐时负荷的模拟结果与实测冷量相比，变异系数和平均相对误差分别为 14%和 9%。

方法二：基于分项计量能耗数据和 RC 传热模型的空调系统逐时负荷估算方法。本文在现有“RC 模型”的基础上提出了改进“RC-S”模型，用来估算逐时冷负荷，在该模型中通过建筑外围护结构的传热继续沿用 3R2C 模型计算，针对建筑内部蓄热体的计算本文提出了一种新的并联 3R3C 模型，而建筑内部的照明、设备等得热则由分项计量的能耗数据计算而得，通过模拟和实测两种方法对“RC-S”模型进行了验证，估算结果平均相对误差可以控制在 12%。

3) 空调系统逐时故障诊断算法。构建了空调系统的故障诊断体系。该空调系统故障诊断算法由基于规则的简单限值诊断和基于模型的深入诊断组成。基于规则的诊断：本文在现有典型工况能效限值的基础上推导得到了适用于逐时工况的能效限值计算方法。基于模型的故障诊断：由于现有的模拟软件通用性较差，即针对不同的建筑都需要建立新的模型；而且在模拟空调系统时针对管网阻力和水泵扬程的压力平衡求解过程略显薄弱，所以本文使用 MATLAB 自主编写了空调系统理想能耗计算模型。通过模拟数据与实测数据的对比分析对空调系统主要设备进行诊断。两种方法共可以诊断出常见故障 30 余种，具有较强的实用性。

本文建立的基于分项计量的公建空调系统夏季运行故障诊断算法可以开发为独立的或者集成于分项计量平台的软件，应用于大型公建，对空调系统的实际运行进行逐时诊断，使空调系统保持良好的运行状态。

**关键词：**分项电耗，大型公建，空调系统，能耗拆分，模型校核，负荷估算，理想空调系统模型，故障诊断

## ABSTRACT

Energy consumption from the building sector accounts for one-third of the total energy consumption and the HVAC system consumes the largest proportion in the building energy. The actual operating condition of the HVAC system is often biased to the initial commissioning status due to the poor control and management, equipment degradation and aging, leading to the huge amounts of waste. Therefore, the fault detection and diagnosis (FDD) is particularly pivotal. However, the current HVAC system FDD algorithms have heavy reliance on the various parameters, such as temperature, flowrate, pressure, valve opening and fan speed, etc. which are difficult to measure. In the last decade, China as well as large cities all over the world have implemented the submetering systems in buildings. In China, overwhelming power data are accumulated in the large commercial buildings. By far, many researchers have conducted studies on the classification and disaggregation of the submetering data and the building energy indicators based on the submetered data. However, there exists few studies on the HVAC fault detection and diagnosis, let alone the corresponding research results.

In this thesis, the research on the HVAC FDD method in the large commercial buildings using submetering data is conducted through the theoretical analysis, modelling and simulation and data mining techniques. The proposed HVAC FDD algorithms have two obvious edges compared to the existing FDD methods in the HVAC systems. The advantages lie in 1) The power metering is more accurate than the measurement of temperature, flowrate, pressure and other operating parameters. 2) Major cities in China have already established submetering platform in large commercial buildings. Accordingly, the algorithm can be directly applied in these buildings. The main contents of the thesis are as follows: 1) The disaggregation algorithm of HVAC terminals energy-use 2) The hourly cooling load estimation algorithm 3) The hourly FDD algorithm in the HVAC systems.

1) The disaggregation algorithm of HVAC terminals energy-use. Generally speaking, the power consumption of the cold and heat source, pumps and cooling towers can be measured independently. However, the power consumption of HVAC end-use are often mixed with the lightning-plus or power submeters, which is one of the tricky problems in the submetering systems. In this context, the Fourier models in

the daily cycle using hour as the variable are set up for different day types in order to disaggregate the HVAC terminal energy use from the other submeters. The models are validated by four real buildings in Shanghai where the HVAC terminal consumption is gauged independently. The results demonstrate that the HVAC terminal energy consumption disaggregated by the Fourier models fits quite well with the real measured data, which validates the disaggregation model has a high accuracy and wide application.

2) The hourly cooling load estimation algorithm. Since the first part of the research solve the data acquisition problem of the power data, another essential research foundation in the HVAC FDD is the cooling load data. In this part of study, two approaches in cooling load estimation are presented.

Scheme 1: Using simulation software (such as Energyplus) to estimate the hourly cooling load. Modelling setup and calibration are the focus in this approach. In the actual operation phase, the hourly power consumption of the equipment is always changing and have a large bias to the design parameters. An accurate model is hard to establish unless the models are calibrated using the real hourly power data. Existing calibration methods are able to achieve the good fitting of the total power consumption, however it is still ambiguous to determine whether the model setting is in accordance with the real buildings because the hundreds of input parameters makes the calibration procedure multi-solution. In this context, a model calibration method is proposed based on the hourly submetering power consumption. The detailed calibration procedure and the case analysis are also presented in this thesis. The CV (coefficient of variation) and MBE (mean bias error) are 14% and 9% respectively, which is quite satisfactory.

Scheme 2: Using RC heat transfer model based on the submetering data to estimate the hourly cooling load. In this study, a RC-S model is established to predict the hourly cooling load in buildings. The model calculates the building envelope using the conventional 3R2C models while calculates the internal mass using a new proposed 3R3C parallel model. The heat gain from lightening is calculated using the submetering platform. The model is validated by the simulated and real measured data and the result shows that the MSE can be controlled within 15%.

3) The hourly FDD algorithm in the HVAC systems. Power consumption of each HVAC equipment and hourly cooling load are obtained from the above studies. In this phase, the HVAC FDD algorithm is built up, which consists of a rule-based direct

calculation diagnosis and a model-based optimal calculation diagnosis. MATLAB is adopted to establish the ideal HVAC system model. Under that framework, more than 30 faults can be diagnosed and the FDD algorithm has a strong application and extrapolation.

The HVAC FDD algorithm based on the submetering data can be developed into the toolkit or incorporated into the submetering system. The algorithm is able to be applied to large commercial buildings and conduct hourly diagnosis on the operation of the HVAC system, which ensures a good performance of the HVAC system.

**Key Words:** electricity submetering data, large public buildings, HVAC system, HVAC terminals energy-use disaggregation, model calibration, cooling load estimation, ideal HVAC system, FDD method

同济许鹏课题组

## 目录

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	III
目录 .....	VII
主要符号表 .....	XI
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题研究的背景及意义 .....	1
1.1.1 大型公建及空调系统能耗现状 .....	1
1.1.2 分项计量的发展及现状 .....	2
1.1.3 分项计量数据的分类及采集 .....	3
1.1.4 分项计量数据存在的问题 .....	4
1.1.5 空调系统故障诊断的意义 .....	4
1.2 国内外研究现状 .....	6
1.2.1 诊断领域概念辨析 .....	6
1.2.2 空调系统故障诊断方法国内外研究现状 .....	8
1.2.3 能耗拆分方法国内外研究现状 .....	18
1.2.4 空调系统负荷预测方法国内外研究现状 .....	21
1.3 本课题的主要研究工作 .....	24
1.3.1 本课题的主要研究内容 .....	24
1.3.2 研究内容界定和基本假设 .....	27
1.3.3 本课题研究的方法和技术路线 .....	27
1.3.4 文章结构与章节关系 .....	29
1.4 本章小结 .....	30
第 2 章 空调系统末端能耗拆分算法 .....	31
2.1 概述 .....	31

2.2 傅里叶拆分模型的介绍.....	31
2.2.1 傅里叶级数介绍.....	31
2.2.2 傅里叶拆分模型的建立.....	32
2.3 具体傅里叶拆分模型的建立.....	35
2.3.1 日类型的确定.....	35
2.3.2 情景 I 拆分模型的建立.....	36
2.3.3 情景 II 拆分模型的建立.....	39
2.3.4 数据的选取.....	42
2.4 应用拆分算法的计算过程.....	44
2.5 案例分析.....	45
2.5.1 建筑描述.....	45
2.5.2 情景 I 案例分析.....	46
2.5.3 情景 II 案例分析.....	51
2.6 特殊情况分析.....	54
2.7 本章小结.....	56
第 3 章 空调系统逐时负荷模拟法.....	59
3.1 概述.....	59
3.2 空调系统负荷的实测方法.....	59
3.3 空调系统负荷模拟.....	60
3.3.1 基本建筑信息校验.....	61
3.3.2 外围护结构校验.....	62
3.3.3 建筑内部蓄热体校验.....	62
3.3.4 非空调设备能耗校验.....	62
3.3.5 非用电设备参数校验.....	63
3.3.6 空调系统末端能耗校验.....	63
3.3.7 空调系统负荷校验.....	64
3.4 案例分析.....	64

3.4.1 建筑描述 .....	65
3.4.2 空调系统负荷模拟计算 .....	67
3.5 本章小结 .....	77
第 4 章 空调系统逐时负荷估算法 .....	79
4.1 概述 .....	79
4.2 RC 模型的介绍 .....	79
4.3 RC-S 空调系统逐时负荷估算算法的建立 .....	82
4.3.1 模型假设 .....	82
4.3.2 建筑外围护结构的参数优化 .....	86
4.3.3 建筑内部得热的计算 .....	89
4.3.4 建筑内部蓄热体的参数优化 .....	89
4.3.5 模型输入参数汇总 .....	90
4.3.6 遗传算法优化过程 .....	91
4.4 案例分析 .....	93
4.4.1 建筑描述 .....	94
4.4.2 数据的获取 .....	94
4.4.3 建筑外围护结构的参数优化 .....	94
4.4.4 建筑内部得热的计算 .....	98
4.4.5 建筑内部蓄热体的参数优化 .....	98
4.4.6 结果分析与讨论 .....	101
4.5 本章小结 .....	102
第 5 章 空调系统故障诊断算法 .....	105
5.1 概述 .....	105
5.2 故障诊断算法框架 .....	105
5.3 基于规则的故障诊断算法 .....	107
5.3.1 部分负荷能效限值的修正 .....	108
5.3.2 诊断规则的建立 .....	112

5.3.3 诊断流程的建立 .....	113
5.3.4 输入/输出参数汇总 .....	114
5.4 基于模型的故障诊断算法 .....	115
5.4.1 理想空调系统模型建立 .....	116
5.4.2 诊断方法的建立 .....	122
5.4.3 诊断流程的建立 .....	125
5.4.4 输入/输出参数汇总 .....	125
5.5 案例分析 .....	128
5.5.1 建筑描述 .....	128
5.5.2 基于规则的故障诊断 .....	129
5.5.3 基于模型的故障诊断 .....	135
5.6 本章小结 .....	140
第 6 章 结论与展望 .....	143
6.1 主要结论 .....	143
6.2 主要创新点 .....	144
6.3 工作局限性 .....	144
6.4 工作展望 .....	145
致谢 .....	147
参考文献 .....	148
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	160

## 主要符号表

缩略词	全称
HVAC	采暖、通风及空调系统
MOHURD	中国住房和城乡建设部（住建部）
CPUC	美国加州公共事业委员会（California Public Utilities Commission）
NIST	美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology）
EMSD	香港机电工程署（Electrical And Mechanical Services Department）
EMCS	能源管理与控制系统（Energy Management and Control System）
IEA	国际能源组织（International Energy Agency）
ASHRAE	美国采暖、制冷与空调工程师学会（American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers）
AHU	空气处理机组（Air Handling Unit）
FAU	新风机组（Fresh Air Unit）
FCU	风机盘管（Fan Coil Unit）
DOAS	独立新风系统（Dedicated Outdoor Air Systems）

整体符号	含义	单位
$E_t$	空调系统末端设备能耗	kWh
$E_L$	照明插座分项能耗	kWh
$E_p$	动力分项能耗	kWh
$E_{L\_Office}$	办公建筑的照明插座分项能耗	kWh
$E_{L\_Shopping}$	商场建筑的照明插座分项能耗	kWh
$E_{p\_Shopping}$	商场建筑的电力分项能耗	kWh
$E_{LM}$	混合有空调末端的照明插座分项能耗	kWh
$E_{pM}$	混合有空调末端的动力分项能耗	kWh
$E_{mi}$	第 i 个数据点的实际测量能耗	kWh
$E_{si}$	第 i 个数据点的预测/拆分能耗	kWh
$N$	样本数据点的总数	
$\alpha_m, \beta_m, \delta_n, \eta_n, \gamma_m, \lambda_m, \mu_n, \kappa_n$	傅里叶模型中的参数	
$\omega_m, \omega_n$	傅里叶模型中的频率	
$m, n$	谐波次数	

$d$	一年当中的当前天数	
$h$	一天当中的当前小时	
$a$	常数项	
$\varepsilon$	残差	
$SD_m$	以年为周期、天数为变量的 $m$ 次正弦	
$CD_m$	以年为周期、天数为变量的 $m$ 次余弦	
$SH_m$	以天为周期、小时为变量的 $m$ 次正弦	
$CH_m$	以天为周期、小时为变量的 $m$ 次余弦	
$Pow$	功率	W 或 kW
$Pow_i$	瞬时功率	W 或 kW
CV	变异系数 (Coefficient of Variation)	%
RE	相对误差 (Relative Error)	%
MRE	平均相对误差 (Mean Relative Error)	%
$t$	数据采集的周期	min
$n$	冷机的数量	
$C$	水的比热容, 取 4.187	kJ/(kg·°C)
$C_{air}$	空气的比热容, 取 1.005	kJ/(kg·°C)
$\rho$	水的密度, 取 1000	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{air}$	空气的密度, 取 1.2	kg/m <sup>3</sup>
$\bar{T}$	室内空气平均温度	°C
$T_i$	室内第 $i$ 个测试点的温度	°C
$V_i$	房间 $i$ 的容积	m <sup>3</sup>
$\bar{H}_{abs}$	室内平均绝对湿度	g/kg
$H_{absi}$	室内第 $i$ 个测试点的绝对湿度	g/kg
COFP	风机的性能系数	
PLRF	风机的部分负荷率	
PLRP	水泵的部分负荷率	
$f_0 \sim f_3$	方程中的参数	
$Q_{rc}$	冷机的额定制冷量	kW
$A$	空调区域面积	m <sup>2</sup>
$A_x$	第 $x$ 种形式的空调末端所承担的空调区域面积	m <sup>2</sup>
NF	没有故障	
$T_{est}$	空调系统不开启时室内可以达到的估算温度	°C
$T_0$	室内空气温度上限值, 当 $T_{est} > T_0$ , 空调系统开启	°C
$N_0$	冷机的台数	

$N_1$	冷冻水泵的台数	
$N_2$	冷却水泵的台数	
$N_3$	冷却塔的台数	
$a_0 \sim a_5, b_0 \sim b_5, c_0 \sim c_3, d_0 \sim d_3, e_0 \sim e_2, f_0 \sim f_3$	方程中的系数	
$S$	定压点以外管道部分的比摩阻	$\text{h}^2/\text{m}^5$
$S_{total}$	整个水循环环路的比摩阻	$\text{h}^2/\text{m}^5$

高频符号	含义	单位
$E$	电耗	kWh
$F$	体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
$T$	温度	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T$	温差	$^{\circ}\text{C}$
$Q$	冷负荷	kW
$WTF_{chw}$	冷冻水输送系数	
$EER_t$	空调末端能效比	
$COP$	冷水机组运行效率	
$WTF_{cw}$	冷却水输送系数	
$PLR$	部分负荷率	
$H$	水泵扬程	m
$\eta$	效率	%
$\Delta H$	空调水系统定压差控制的定压压差	Pa 或 m
$P$	压力	Pa
$L$	诊断阈值	

主要下标	含义
$i$	i 时刻
$chw$	冷冻水
$chp$	冷冻水泵
$cw$	冷却水
$cp$	冷却水泵
$c$	冷机
$t$	空调系统末端设备
$fan$	风机
$ct$	冷却塔
$eva$	蒸发器

<i>con</i>	冷凝器
<i>rated</i>	额定工况下的状态或数据
<i>PL</i>	部分负荷工况下的状态或数据
<i>s</i>	模拟条件下的状态或数据
<i>m</i>	实测条件下的状态或数据
Standby	待机状态
<i>ce</i>	冷凝器入口
<i>ee</i>	蒸发器入口
<i>el</i>	蒸发器出口
<i>pipe</i>	管道
<i>LV</i>	限值
<i>motor</i>	电机
<i>VFD</i>	变频器

同济江鹏课题组

## 第1章 绪论

### 1.1 课题研究的背景及意义

本课题来源于上海市科学技术委员会科研计划项目“上海中心城区大型公建节能与能效监控服务平台的创新研究与实践”。

#### 1.1.1 大型公建及空调系统能耗现状

随着经济的发展,人们的生活水平不断提高,对能源的需求也日益增大,80%以上的能源由煤炭、石油和天然气等化石燃料供应,但化石燃料的储量是有限的,全球性能源危机已经来临,节约用能,提高用能效率已经成为世界关注的焦点。建设资源节约型社会是我国的战略决策,节约能源是资源节约型社会的重要组成部分,建筑的运行能耗大约为总商品用能的三分之一,是节能潜力很大的用能领域<sup>[2]</sup>。

2013年中国总建筑面积545亿 $m^2$ ,建筑总商品能耗(不包含北方地区供暖)约占全国能源消费总量的19.5%,其中公共建筑面积99亿 $m^2$ ,占总建筑面积的18.2%(见图1.1(a)),但是公共建筑总能耗却占建筑总能耗的27.9%(见图1.1(b)),可见公共建筑的能耗密度最高<sup>[2]</sup>。公共建筑是指非住宅类民用建筑,包括办公楼、商店、旅馆、文化体育设施、交通枢纽、学校、医院等。2001~2013年间,我国公共建筑面积增加近1倍。2010年美国建筑总能耗在全国总能耗中占比41.3%,仅商业建筑能耗占比就达到了18%,建筑能耗中的36%是消耗在空调系统上的<sup>[3-5]</sup>。2010年欧洲建筑总能耗在全国总能耗中占40%<sup>[6]</sup>。

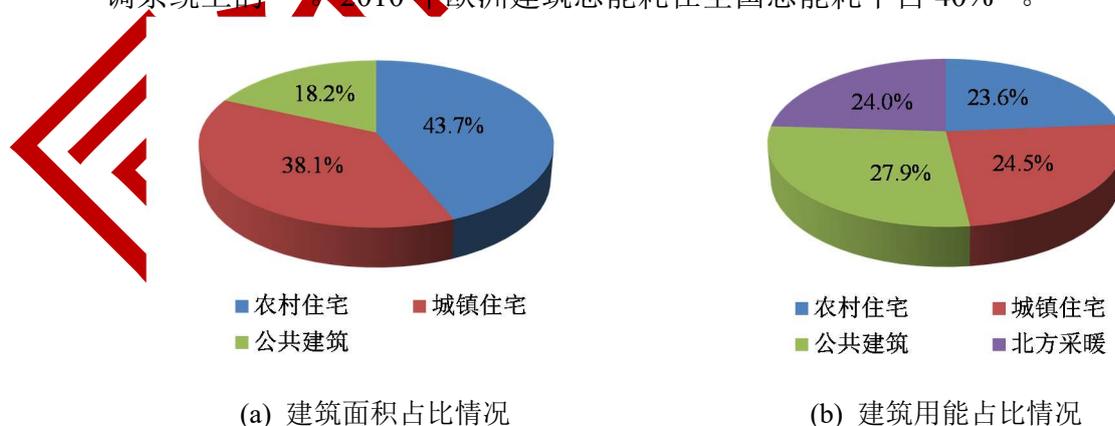


图 1.1 2013 年中国建筑面积占比情况和建筑用能占比情况

2008 年,中国住房和城乡建设部发布 114 号文件《关于印发国家机关办公

建筑和大型公共建筑能耗监测系统建设相关技术导则的通知》<sup>[7]</sup>（下文称导则或建科【2008】114号文），该导则包含五个附件，分别为《分项能耗数据采集技术导则》、《分项能耗数据传输技术导则》、《楼宇分项计量设计安装技术导则》、《数据中心建设与维护技术导则》和《建设、验收与运行管理规范》。《分项能耗数据采集技术导则》中指出根据建筑的使用功能和用能特点，将国家机关办公建筑和大型公共建筑分为8类：1) 办公建筑；2) 商场建筑；3) 宾馆饭店建筑；4) 文化教育建筑；5) 医疗卫生建筑；6) 体育建筑；7) 综合建筑；8) 其它建筑。其它建筑指除上述7种建筑类型外的国家机关办公建筑和大型公共建筑。上海市人民政府于2012年印发了《关于加快推进本市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测系统建设的实施意见》<sup>[8]</sup>（下文称沪府发【2012】49号文），明确指出大型公建指单体建筑面积在1万平方米以上的国家机关办公建筑和2万平方米以上的公共建筑。

随着建筑体量的增大，人们对建筑环境的要求也越来越高。为了提高室内舒适度和空气品质，空气调节系统变得越来越复杂，包含诸多子系统和大量元部件，不仅能耗可观，而且设备故障现象也频频发生。发达国家和地区，建筑采暖、通风及空调系统的能耗在社会一次能源能耗中所占的比例分别为欧洲的30%和美国的14%<sup>[9-11]</sup>。中国的采暖和空调能耗之和几乎超过了建筑总能耗的60%<sup>[12]</sup>。空调能耗高居不下的一个主要原因就是即使空调系统经过精心设计和专业调试，运行一段时间以后其运行状况也会与调试后的状况相差甚远<sup>[13, 14]</sup>。可见保证空调系统的高效运行是建筑节能的关键。

### 1.1.2 分项计量的发展及现状

为了实现大型公建的节能，减少建筑运行阶段能源浪费，首先需要了解建筑的实际运行能耗是多少，能源分别消耗在了哪些用途上，每个用途消耗了多少能源，只有掌握了建筑中的能源流向，才能为建筑节能工作的开展提供参考和指导。然而，大型公建使用功能多样，用能系统繁杂，若按照传统方法只对一栋建筑的总能耗进行计量，无法分清各用能系统的具体能耗情况。所以，只有对各用能系统的能耗分别进行计量，才可以真正了解各用能系统的实际能耗情况，从而根据实际能耗现状采取相应的节能措施。对于数量和种类都如此繁多的用能系统及其子系统，采用人工抄表的计量方式无论从数据采集上还是数据处理上，工作量都非常大，所以需要利用自动计量仪表对建筑各个用能系统能耗进行在线监测、自动计量和实时传输。

要建立这样的分项计量平台，涉及资金支持、制度确立和平台建设等诸多方面，需要逐步实现。随着信息通信技术的发展，数据采集和传输的成本不断降低，

对建筑进行分项计量的可行性越来越高。在分项计量平台中，不但能够查询单栋建筑的各项用能并进行相关分析，还可以对多栋建筑的特定能耗进行对比，了解不同建筑间的用能差异，寻找节能潜力，甚至进行系统或者设备的故障诊断。

1992年，哥伦比亚大学的Hart博士正式提出“电能分项计量”这一概念<sup>[15]</sup>。为了更好的了解建筑中各类型设备电能的使用情况，从而发现能耗浪费节点和实现建筑节能，使得国家政府部门、建筑的持有者和租户对电能的使用情况和建筑的运行情况进行更好地掌控和管理，推行分项计量是十分必要的。2008年，美国加州公共事业委员会（CPUC）通过了对多层商业建筑进行电能分项计量的决议<sup>[16]</sup>；为了推动分项计量发展，2013年美国能源部的建筑技术项目发表声明，声明指出美国能源部的一项重要任务就是实现100美金的主动分项计量<sup>[17]</sup>；2007年，我国财政部印发《国家机关办公建筑和大型公共建筑节能专项资金管理暂行办法》，明确专项资金用于搭建建筑能耗监测平台（主要包括安装分项计量装置、数据联网等）的补助支出<sup>[18]</sup>。

上海市自1995年起对公共建筑能耗开展了大规模地调查，北京、天津、长沙和武汉等城市紧随其后也不断开展公共建筑的能耗调查<sup>[19-21]</sup>。近几年，我国政府大力推行分项计量政策，要求地方大型建筑必须安装分项计量仪表。截至2013年，在先后建设的六批公共建筑能耗监测系统试点省（市）中，已有深圳、天津、北京、重庆、江苏、上海等多个系统通过验收。沪府发【2012】49号文规定，2012年，建成1个建筑能耗监测市级平台、17个建筑能耗监测区级分平台和1个市级机关办公建筑能耗分平台，实现市级平台与分平台数据自动交换；2015年，建成基本覆盖本市国家机关办公建筑和大型公共建筑的能耗监测系统。截止至2014年12月，上海市完成分项计量系统安装的楼宇已经达到1000栋，建筑总面积逾4000万 $m^2$ <sup>[22]</sup>。2015年还在继续增加。已经有大量楼宇的超过一年的分项计量数据，这样的数据为空调系统的故障诊断提供了良好的基础。

### 1.1.3 分项计量数据的分类及采集

建科【2008】114号文<sup>[7]</sup>中明确规定：对国家机关办公建筑和大型公共建筑电能按4大分项进行计量管理，并且每一分项可以选择计量到一级或者二级子项，建筑总能耗分项计量模型如下图1.2所示。

在能耗数据采集频率方面，导则要求分项能耗数据的采集频率为每15分钟1次到每1小时1次之间，数据采集频率可根据具体需要灵活设置。本文所研究的分项计量系统所使用的多功能电表能够以5分钟/次的频率采集电耗数据，并通过数据聚合，获得逐刻、逐时、逐天的电耗量。

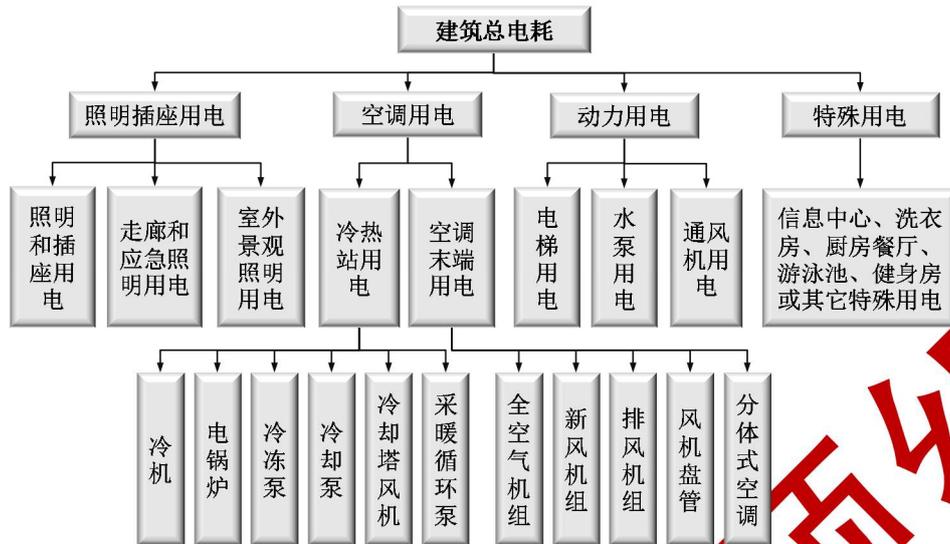


图 1.2 建筑能耗分项计量模型

#### 1.1.4 分项计量数据存在的问题

通过对当前分项计量系统采集到的上海市若干栋大型公建的能耗数据进行分析，发现目前分项计量系统安装质量良莠不齐，不同楼宇之间差异很大，从每栋楼几块电表到几百块电表不等，分项能耗数据质量也存在很多问题。

1) 配电支路计量不完全。许多楼宇存在某些配电支路漏记的问题，例如一些备用配电支路用作日常使用，却没有纳入计量范围。

2) 配电支路计量重复。有些用电设备能耗存在多次重复计量问题。

3) 配电支路用途不清晰。由于配电柜没有标识、标识模糊、连接混乱或者不同分项设备掺混等现象造成某些配电支路计量的用途不清晰，此处最突出的问题就是空调系统末端设备能耗与其他分项能耗掺混。

4) 分项能耗数据断数。由于数据采集或者传输等方面出现问题，造成一些分项在个别时段或者长时段没有数据。

5) 分项能耗数据失真。如电表反转，产生一些负值数据；电表缺项，三相电表只采集了其中两相；电表数据发生阶跃变化，出现较大负值和正值等。

上述问题给本文的研究带来了很大的困难与挑战，要在众多楼宇中根据数据质量慎重选择适当的楼宇作为研究对象。

#### 1.1.5 空调系统故障诊断的意义

随着社会和经济的发展，建筑面积越来越大，建筑功能越来越复杂，对建筑环境的要求也越来越高，空调系统也必然越来越庞大和复杂，下层包含了一定数量的子系统和大量的元部件，不仅能耗非常可观，而且设备故障也是不容忽视的。

空调系统因为设备老化、运行管理不当、维护检修不及时等原因会出现各种故障，最终会导致空调系统能耗浪费、建筑环境舒适性下降和设备使用寿命缩短等不良后果。

根据美国 NIST 的报告，成功的故障检测与诊断可以实现空调系统节能 10~40%<sup>[23]</sup>。美国能源部在研究欧洲能耗水平时发现，欧洲的建筑空调系统也存在同样问题<sup>[24]</sup>。Mills 的研究也表明建筑的空调系统由于其运行状况偏离设计之初的状况而造成的能耗浪费达 16%甚至更多<sup>[25]</sup>。香港机电工程署调查研究显示，在香港的商业建筑中，空调系统能耗所占的比例已经超过 40%，而因为故障造成的能耗损失高达空调系统总能耗的 15%~30%<sup>[26]</sup>。北京市大型公共建筑面积不到建筑总面积的 10%，但其总能耗（城镇采暖除外）已超过建筑总电耗（采暖除外）的 30%<sup>[27]</sup>。自 20 世纪 90 年代起设计建成的大型公建除供暖外的平均电耗水平为 100~300kWh/（m<sup>2</sup>·a），实施节能运行管理并正确开展节能诊断与技术改造可以实现 10~30%的节能潜力<sup>[28]</sup>。所以空调系统的优化管理和高效运行是降低建筑能耗和运行成本的关键。

大多数大型公建都安装了能源管理与控制系统（EMCS），用于建筑设备的监测、控制和提高建筑能源利用效率，为空调系统故障诊断研究提供了信息基础。然而，现有的 EMCS 系统存在以下弊端：1) 国内 EMCS 系统实际使用率较低，有调查显示在我国既有建筑的 EMCS 系统正常投入运营的百分比不到 10%；2) 设备运行参数获取困难，并且市场上因为通讯协议不一致带来的数据获取障碍还没有得到很好的解决；3) 系统监测数据多为温度参数，很少有流量、压力等参数，而且监测数据不保存，即没有历史数据；4) EMCS 系统中没有建筑能耗数据；5) 传感器、执行器和控制器等设备的价格昂贵，导致大量空调系统关键数据未被测量。可见，较差的 EMCS 数据质量在一定程度上妨碍了空调系统故障诊断的发展与应用。换言之，即便有稳健实用的故障诊断方法，倘若没有良好的数据支撑，空调故障诊断技术在现实楼宇中仍然难以实施。

电表较之于其他传感器（温度、压力、流速等）更加稳健，受环境及周围干扰波动小，传感器失效或漂移发生率也更低。所以相对于 EMCS 系统的各参数，分项计量平台采集的电耗数据更加稳定。分项计量平台数据可以解决数据来源问题及空调自控传感器安装成本高的问题。目前对于建筑分项计量系统的研究大多为建筑指标体系研究和间接式拆分算法研究。对于建筑群而言，可以通过横向比较建筑间的能耗指标了解用能状况，促进节能。但对于单栋建筑而言，即使知道该楼宇空调能耗偏高，没有良好的故障诊断方法，还是难以追溯故障源。

在空调系统故障诊断领域，已经有众多学者做出了杰出的贡献。传统上讲，用于空调系统故障诊断的传感器，执行器和控制器等价格比较昂贵，导致故障诊

断的成本较高，投资回收比较低。而本文中所述的故障诊断是一个广义的概念，它不仅包括众所周知的传统意义的故障诊断，如机械故障和元件故障，还包括能效诊断。传统意义的故障诊断研究非常之多，概括来讲就是建立一系列的规则或者模型，通过监测空调系统各个设备或部件的运行参数来判断运行情况，但是因为实际的建筑中往往很难获取这些运行参数，所以大多的诊断算法在实际运行的空调系统下都很难发挥很好的作用。所以本文提出了基于分项计量电耗数据的空调系统故障诊断算法，该方法可以克服实践困难这一障碍，在有分项计量电耗数据的楼宇中都可以使用。依靠纯粹的电耗数据可以得到的故障诊断结果是有限的，对于要求较高的楼宇，本文也给出了较深层次的故障诊断方法，只需要极少的温度和压力参数来辅助诊断。

针对分项计量下的空调故障诊断的研究比较少，并且几个基础问题，如故障能耗特性的表征，规则阈值的确定，通用性规则等都尚未解决。但是传统的基于EMCS自控系统的空调故障诊断方法研究成果可以为本文提供思路 and 方向，本文的研究可以在此基础上进行拓展和创新。分项计量条件下的空调故障诊断算法问题的研究，不仅可以保证空调系统的合理运行，并且可以同时判断故障的能耗浪费水平，有利于我国大型公建的节能事业。

## 1.2 国内外研究现状

如本章 1.1.1 节所述建筑能耗已经占全球总能源消耗的三分之一，而建筑能耗中有三分之一甚至超过一半的能耗是由空调系统造成的<sup>[1-3, 6, 11, 12]</sup>。空调能耗高居不下的一个主要原因就是经过一段时间的使用之后空调系统的实际运行状况与调试之初的状况相距甚远<sup>[29, 30]</sup>。在控制成本和保证建筑室内舒适度的前提下，提高空调系统的整体运行性能是很多学者一直以来研究的重点，如提高传感器的性能，实现设备运行性能的在线监控，实现自动能效诊断和优化上位控制等，广义来讲，上述的一系列研究工作都属于空调系统故障诊断的范畴。

### 1.2.1 诊断领域概念辨析

建筑用能研究中，按照从宏观到微观的过程可以划分为几个常见的研究层次：能效评级、能效诊断和故障诊断。如图 1.3 所示。

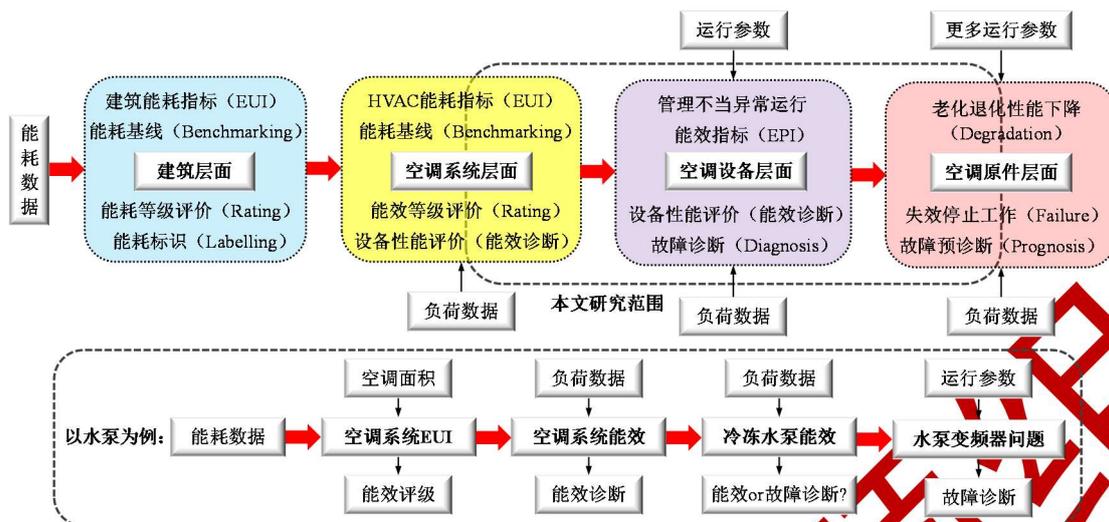


图 1.3 建筑各个层面诊断工作示意图

能效评级较为宏观。能效评级主要侧重于建筑群之间和全楼宇层面的宏观评价，目的在于为业主和公众提供统一的、公认的方法，用以评价建筑的相对用能效率和  $\text{CO}_2$  排放量，从而促进节能改进。其评价方法主要包括颁发能耗证书、提供节能标识 (Labelling)、建立能耗基准 (Benchmarking) 并排名 (Rating) 等。在能效指标的选择上，以单位建筑面积的能耗量 (EUI，又称能耗密度) 使用最为广泛，有时也用  $\text{CO}_2$  排放量代替能耗量并按照建筑面积进行归一化处理，得到反映碳排放的能效指标。在分析方法上，主要以对比实测能耗与基准能耗为主要方法，而基准值的来源包括统计数据 and 模拟计算。

能效诊断相对微观。能效诊断注重于发现具体的能源浪费点，更为细致也需要更多的数据，采取梯级分析法，根据数据的详细程度分析全楼宇层面、系统层面以及设备层面的能效，从而提供具体的节能策略。相对于能效评级而言，其对数据的依赖度较高，数据的种类、质量和数量直接决定了诊断的深度和精度。由于建筑内用能系统多样，用能特点复杂，尤其是大型公建的空调系统，设备种类多、组成形式各异，针对建筑能效诊断的研究也包括多个方面，大致可以分为全楼宇层面的能效诊断和空调系统的能效诊断，前者主要对建筑总能耗和建筑内较大的用能系统能耗进行能效诊断，及时发现用能异常并定位，后者侧重于空调系统及其子系统和设备的能效诊断，会涉及到设备的具体故障。

故障诊断更加微观。故障诊断 (FDD)，是指系统在一定的工作环境下，根据设备运行状态信息查明导致系统某种功能失调的原因或性质，判断劣化状态发生的部位或部件，以及预测状态劣化的发展趋势并确定相应决策等。完整的 FDD 系统一般包括以下 4 个方面的内容：1) 故障检测：根据系统的测量信息判断系统是否发生故障；2) 故障识别或诊断：在故障检测的基础上，指出故障发生的位置，区别出故障原因是执行器、传感器还是其他部件；3) 故障评价：评价系

统失常的程度、对系统的影响程度、系统能否容忍这种失常的存在等；4) 故障决策：根据故障评价的结果，决定是容忍故障的存在还是对故障进行恢复。<sup>[31]</sup>对空调系统而言，由于技术和经济等方面的原因，其 FDD 研究和应用主要是前两个方面的内容，即故障检测和故障诊断。

所谓系统的故障，是指系统的运行处于异常状态，并可导致系统相应的功能失调，即导致系统相应的行为（输出）超过允许范围，使系统的功能低于规定的水平。故障按照其严重程度可以分为硬故障与软故障。硬故障主要是指器件完全失效的故障，如风机不能运转、阀门完全堵塞、传感器没有读数等。这类故障往往是突发性的，故障一般较大，非常容易被检测到。这类故障一旦发生会严重影响系统运行，所以针对此类故障，故障诊断已经不具有很大的价值，而故障预诊断(Prognosis)是非常必要的。软故障是指器件性能下降或部分失效的各种故障，如风机盘管的结垢、阀门的泄漏、传感器漂移等。软故障一般是渐变性的，发展较慢，在初期往往难于被检测到<sup>[32]</sup>。

能效诊断与故障诊断之间并没有严格的界限，只是诊断对象细化程度不同而已，如图 1.3 中虚线框中的例子，空调系统整体运行能效偏低，一般被判定属于能效诊断范畴；水泵变频器变频不当，一般被判定属于故障诊断范畴；而水泵运行效率低可以被判定属于能效诊断范畴，但被判定属于故障诊断范畴也未尝不可。而且在国外，并没有明确使用过“能效诊断”这一概念，能效诊断往往是属于故障诊断这一大的研究领域的。随着数据采集与传输技术的发展以及社会对建筑节能的认识及要求的提高，低效用能现象越来越被重视，本文将其纳入了故障诊断的范畴一并研究，如空调系统的运行启停时间不合理，设备的开启台数不合理，设备的运行状态偏离理想状态等。本文的研究包括空调系统层面的能效诊断、单体设备的能效诊断和有限参数条件下单体设备的故障诊断。本文研究的大致范围如图 1.3 中黑色粗体虚线框所示。

## 1.2.2 空调系统故障诊断方法国内外研究现状

### 1.2.2.1 故障诊断方法的分类

周东华将现有的故障诊断方法分为三大类，即基于数学模型的诊断方法、基于信号处理的诊断方法和基于知识的诊断方法，而且每一大类还包括若干种具体的诊断方法<sup>[31, 33]</sup>，如图 1.4 所示。

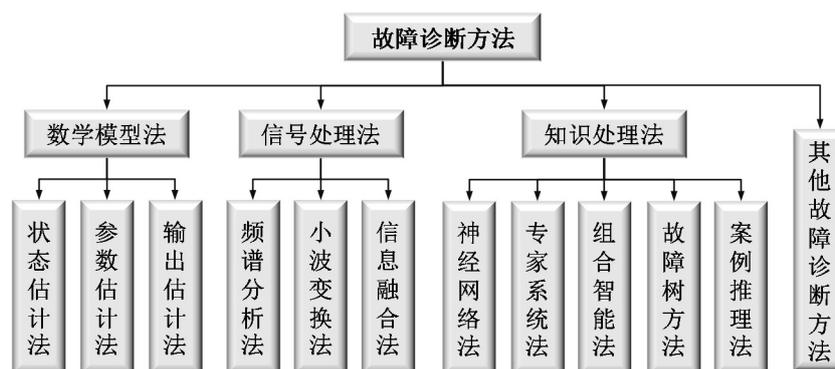


图 1.4 周东华故障诊断方法分类

### 基于数学模型的诊断方法

20 世纪 70 年代初，基于模型的故障诊断方法研究开始于美国。麻省理工学院（MIT）的 Beard 最早提出了用解析冗余代替硬件冗余，通过系统的自组织特性来稳定系统闭环，通过分析观测器的输出来获取系统故障信息<sup>[34]</sup>。基于模型的故障诊断，就是通过比较被诊断对象的可测信息和由模型产生的先验信息进行比较，产生残差，然后对残差进行分析和处理而实现的故障诊断方法<sup>[35]</sup>。

### 基于知识的诊断方法

所谓知识，即专家的操作经验，以专家和操作者的先验知识为核心，通过推理获取故障诊断结构，形成故障征兆模式集合，使之能对某一给定的征兆产生的原因做出解释，并给出因果关系成立程度的数值性关系，构成知识库<sup>[36]</sup>。

### 基于信号处理的诊断方法

基于信号处理的诊断方法通常利用信号模型，如相关函数、频谱、自回归滑动平均模型等，直接分析可测信号，提取诸如方差、幅值、频率等特征值，进而诊断出故障。此类方法通过某种信号处理和特征提取方法来进行故障诊断。这种方法不需要对象的准确模型，因此适应性较强，但数据处理的计算量很大，实时故障诊断有一定的难度。

Katipamula 和 Brambley 也将故障诊断方法分为三大类，但是与周东华的分类不同，即基于定量模型的诊断方法、基于定性模型的诊断方法和基于历史过程的诊断方法，每一大类也包括若干种具体的诊断方法<sup>[37]</sup>，见图 1.5。

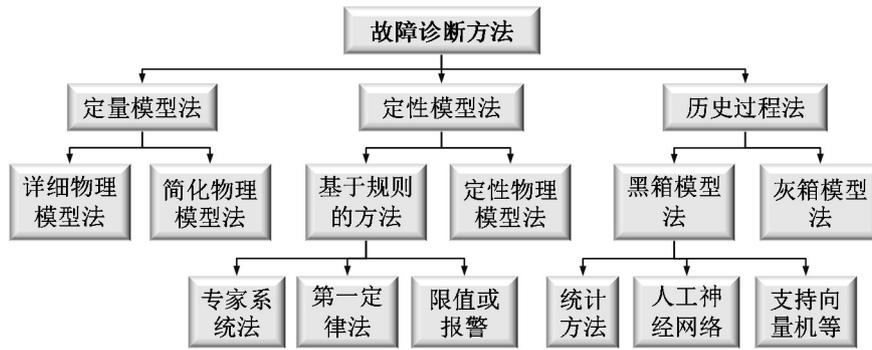


图 1.5 Katipamula 故障诊断方法分类

### 基于定量模型的方法

基于定量模型的算法用到的模型是描述系统物理过程的一系列数学公式。这类方法是以对目标系统的充分理解为前提。然后，用一系列数学方程来表示系统输入和输出之间的关系。所用到的数学方程可以是简单的线性方程，也可以是复杂的微分方程。系统的输入包括可以直接测量的变量（如，温度、流量和压力等）和模型参数（如、换热器换热系数、制冷剂种类等）。系统的输出包括运行情况、能耗和费用等。最后，对给定输入下的模拟结果和实测结果进行比较，可以检测出系统故障。

按照定量模型的复杂程度，这类算法又可以进一步分为详细物理模型法（白箱模型）和简化物理模型法两种。前者是基于系统各组件详细物理关系和特征所构建的模型，这些物理关系包括质量、动量、能量守恒和传热传质规律等。详细物理模型法通过对系统的详细模拟以追求模型的高仿真性。和详细物理模型法相比，简化模型法通常采用集总参数法来简化数学公式，降低计算复杂度。

这类方法有以下优缺点。首先，模型是基于严谨的物理方程的，这就保证了模型的准确性。其次，这类模型可以模拟“正常”运行和“故障”两种工况。因而，系统的故障可以很容易就监测出来。同时，用于控制故障检测诊断的动态模型只能用这种方法建立而成。当然，这类方法有着很明显的不足之处。通常，这类模型需要一定的专业知识。此外，这类模型的建立过程相当耗费时间和精力，而且详细模型所需要的时间精力相比于简单模型要更多。同时，很多模型对计算机计算能力的要求也相当大。由于以上这些特点，这类模型的商业应用在很长一段时间内很难实现。正因为如此，尽管目前有很多空调制冷系统模型被开发出来，但只有很少一部分被应用到故障诊断中去<sup>[38-42]</sup>。

值得强调的是，相比于详细模型法，简化模型法由于所需时间精力和对计算复杂度的要求相对降低，因而，将其广泛应用于故障诊断的可行性也相对高一些。

### 基于定性模型的方法

与基于定量物理模型法不同，基于定性模型的故障诊断方法不需要对系统进行定量的数学描述，而是用定性方式来描述系统输入和输出之间的关系，然后运用这些定性关系来进行系统故障的监测和诊断。这类方法又可以进一步分为基于规则的诊断算法和定性物理模型法。

基于规则的诊断算法用系统的先验知识来推导出一系列形如“如果—就—否则”的规则，然后，在这个得到的规则空间中用一定的搜索机制就可以得出任一运行工况所对应的评估。根据规则的来源，这类方法可以分为专家系统法、定性物理关系法和限值警示法。专家系统法一般是指一个用于故障诊断的电脑程序，其用于诊断的规则是通过经验丰富的工程师进行采访而总结得出的。有些专家系统可能会将某些规则的置信度考虑进来，以体现这些规则存在一定程度的不确定性。专家系统已经被成功的应用在多个领域，最典型的例子就是医学诊断的专家系统。而用于空调系统的专家系统也有了成功应用的案例<sup>[43]</sup>。专家系统容易开放，透明度高，即使在不确定性存在的情况下也能工作，能够对所得结论给出解释。但是，这类算法也有其不足之处。由于一个专家系统通常只对某一个建筑适用，因而其通用性较差。其次，由于这类系统是根据工程师的经验而来的，往往对经验知识有很高的要求，并且要得到一套比较完整的规则有很大的难度。

另一类基于规则的算法是通过物理关系推导得出的，其中最著名的例子就是美国能源部（DOE）开发的用于新风系统和经济器故障诊断的工具<sup>[44]</sup>。这个工具首先对系统正常运作和故障运作工况进行模拟，然后从这个模型中总结出诊断规则。接着，这些规则按照诊断逻辑被排列成一个诊断树。在应用过程中，将一定时间段内收集的数据输入诊断树中，然后从树根到树叶依次进行规则的判断，最终将会到达某一叶子节点，即某一诊断结果。

最后一种基于规则的诊断算法是限值监测和警告法。这类算法通过比较测试结果和预期结果的差值是否超过一定限值来判断系统是否发生故障。这类算法的理念如今在其他各种算法中都有所应用。

和基于规则的诊断算法不同，基于定性物理模型的诊断算法是以系统物理过程的定性描述为基础来进行诊断的算法。这类算法和基于定量模型的算法一样，都是以描述系统的微分方程为起点，但不同的是，由于信息不足，这些方程无法得出定量的解，只能通过不精确的信息得出定性的判断。这类算法的实际应用可以参考<sup>[45]</sup>。

总体来看，基于定性模型的诊断算法有以下一些优缺点：这类算法较容易开发和使用时，即使在信息不足的情况下也能较为精确地诊断出系统故障。这类算法的透明度较高，由于其本身的因果推理关系，对于监测出的故障能够很容易判断造成故障的原因。当然，这类算法也有缺陷之处。每个诊断系统都只适用于特定的系统，其通用性往往较差。要得到一套完整的诊断规则通常比较难，尤其是当系统复杂度较高时。

### 基于历史过程的方法

在一个基于历史过程的算法中，模型的输入和输出都是测量得到或者预先知道的，然后，这类算法利用数据驱动的方法建立起输入和输出之间的关联。和定性物理模型的算法不同，这类算法所得的计算模型往往没有任何物理意义，即黑箱模型法，或者只有部分物理意义，即灰箱模型法。

黑箱模型在建立输入和输出关联时不考虑任何的物理关系，纯粹利用统计学或者模式识别的算法来实施。较常用到的模型包括回归算法（线性回归、多项式回归）、主成分分析法、人工神经网络和支持向量机法等。这方面有比较丰富的研究<sup>[46-51]</sup>。

和黑箱模型不同，灰箱模型会根据一定的物理关系给出输入和输出之间的关系模式，然后利用历史数据来拟合模型参数。如 Gordon 和 Ng 等人根据热力学第一定律开发的冷水机组模型<sup>[52-56]</sup>。灰箱模型法，由于模型方程的形式是根据专业知识给定的，因而，所得到的模型往往具有更高的鲁棒性和准确性，并且对数据的需求较少，模型训练较为容易。

总体上说，基于历史过程的诊断算法对专业知识的要求较低，且当数据充足时能够较为容易的建立模型。同时，尽管不同算法的计算复杂度不尽相同，但通常都是可以接受。但是，由于这类方法都是基于大量的训练数据，因而，对于训练数据以外的运行状况，这类算法的精度将会大打折扣。此外，由于模型训练需要大量的数据，对于一些数据匮乏的系统则不太适用。

根据上文可以看出模型建立的方法可以分为三种：黑箱模型（即数据驱动模型），基于长时间历史数据驱动出来的数学或者统计学模型，对数据的质量、种类、采集频率和数据量要求高，不具有明确的物理意义，很难确定模型中具体变量和参数的意义；灰箱模型，具有一定的物理意义，但有一部分参数是数据驱动出来的；白箱模型即详细的物理模型。

要注意的是，以上分类方法是比较笼统的大分类方法，在实际操作过程中，他们之间存在着许多交叉，没有明显的严格的界限。

### 1.2.2.2 空调系统故障诊断方法国内外研究现状

国外的空调系统故障诊断研究比我国起步早，且注重软件的开发和计算机技术的应用。

上世纪 90 年代初期，国外关于空调系统故障诊断的研究发生革命性进步，国际能源组织（IEA）签署协议，协议形成以建筑节能为主题的多国参与的协作研究项目，其中子课题 25（Annex25），就是空调系统故障检测与诊断，并且进行建筑能源优化仿真。Annex25 完成以后，国际能源组织又成立了 Annex34 协作研究项目。Annex34 是在实际建筑中对 HVAC 进行故障检测和评价，其目的是开发关于 HVAC 系统的故障检测与诊断工具，使其达到商业化应用的水平。Annex34 的成员与超过 50 个的建筑能源管理与控制系统的生产商、建筑开发商以及建筑运维管理者通力协作，最终在 Annex25 的基础上开发了用于实际建筑的故障检测与诊断方法和相关软件。<sup>[3]</sup>除了国际能源组织的研究项目以外，美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE）也积极开展关于 HVAC 系统的故障检测与诊断研究，截止到现在，完成的研究报告主要有 1043RP、1275RP 和 1486RP，

用于冷水机组的故障诊断需求和评价；1312RP，用于空气处理单元 AHU 的故障诊断和评价<sup>[57-60]</sup>等。

上世纪 80 年代国内开始针对空调系统故障诊断进行研究。近年来发展迅速，许多高校和科研机构都开展了故障诊断与预测技术及其相关研究，并取得了许多成果。清华大学的江亿院士等人参与了国际能源组织 Annex25 的研究。湖南大学的陈友明教授以及香港理工大学的 Wang Shengwei 教授和 Wang Jin-Bo 博士等参加国际能源组织的 Annex34 的研究工作。以上学者发表了多篇学术论文和研究报告。

传统的空调系统故障诊断是根据设备的主要运行参数对空调系统主要设备进行故障诊断。尤以冷热源和 AHU（空调处理机组）的故障诊断工作最为突出。

### 冷热源

空调系统故障诊断最早研究的一项内容就是 McKellar 研究的压缩蒸汽冷冻机，结论是如果已知吸入压力（或温度）、排出压力（或温度）和排除吸入压力比，就可以支持研究冷冻机常见故障的诊断系统，包含的常见故障有压缩机阀门泄漏、风机故障、蒸发器结霜、管路堵塞、制冷剂充注过多（过少）<sup>[61]</sup>。在 McKellar 的工作基础上，Stallard 开发了一个自动 FDD 系统冷冻机。基于规则的专家系统用于简单故障检测和诊断。使用了冷凝温度、蒸发温度、冷凝器入口温度、排出吸入压力比作为分类特征<sup>[62]</sup>。

Yoshimura 和 Ito 通过测量压力和温度来检测蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀和制冷剂充注问题。通过比较测量值和预期值之间的差异来检测故障。该研究仅限于实验室阶段，而且没有说明如何选择特征值的阈值<sup>[63]</sup>。

Wagner 和 Shoureshi 提出了两个不同的故障检测方法，并且在实验室环境下对 5 种热泵系统故障进行诊断，比较两个模型的优劣，这 5 种故障分别为冷凝器风机卡死、蒸发器风机卡死、管路堵塞、压缩机泄漏和密封系统泄漏。第一种方法是基于极限和趋势的定性模型法，第二种方法是简化的物理模型法。定性的方法能够检测到四五个故障，简化物理模型法只检测出两个故障。他们还讨论了如何权衡诊断的敏感性与虚假警报。但是他们的试验只能够检测故障，不包括诊断、评估和决策<sup>[38]</sup>。

Rossi 的研究提出了一种基于规则的稳态故障诊断方法对空调设备进行故障诊断，使用的参数为温度参数和湿度参数，该方法可以诊断出冷凝器结垢、蒸发器结垢、管路阻塞、压缩机阀门泄漏和制冷剂泄漏等故障<sup>[47]</sup>。除了此次研究，Rossi 和 Braun 还研究了故障评价，但仅仅研究了实验室的屋顶空调系统<sup>[64, 65]</sup>。Breuker 对 Rossi 研究的故障诊断系统做了更详细的故障评价，通过实验室中对空调系统在不同条件和不同程度下的故障诊断进行了稳态和瞬态的系统测试评

价<sup>[66, 67]</sup>。此后 Breuker 和 Braun 还研究了上述故障对 COP 的影响<sup>[51]</sup>。

Miyasaka 等人开发了一种基于定性的逻辑推理的故障诊断工具，建立了实时故障监测工具，通过使用信号化的诊断图，能够直接从特定的 HVAC 系统中找出故障，这个工具的优点是诊断速度快，缺点是完成的故障诊断是定性的而非定量的，故障误报的可能性较大<sup>[68]</sup>。

Salsbury 介绍了一种 HVAC 系统故障检测控制器，属于仿真模型的范畴，它通过静态仿真模型产生前馈反映，修正了传统的 PID 模型。这种前馈控制减小了系统的非线性误差，能够使用设备的信息作为输入参数来控制模型，所以在 HVAC 系统的运行条件改变时，能提高系统的稳定性<sup>[69]</sup>。

Comstock 等人对冷机的故障进行了研究，他们认为 60% 的故障可以通过热力测量来检测，并且对几种评价冷水机组故障诊断效果的工具和方法进行了总结<sup>[57]</sup>。Comstock 等人又进行了后续研究，利用实验系统模拟了离心制冷机组的正常运行状态和故障运行状态，建立了线性回归模型<sup>[70]</sup>。

Braun 进行了冷水机组故障诊断和优化控制的研究，使用的是二次线性回归方法，冷水机组的输入变量被划分为可控和不可控两大类，对机组的运行进行控制，将机组的运行调节到性能最佳的工况点。该研究的总体思想依旧属于数学模型诊断领域，分析各个参数并且提炼成一个函数，然后使输出变量对输入参数求导，从而进行故障诊断和优化控制<sup>[4]</sup>。

Peitsman 和 Bakker 对变风量空调系统的冷机进行了故障诊断研究，比较了自回归模型和人工神经网络模型。使用两级故障诊断方法，建立了 14 个系统层面模型和 16 个元件层面模型对冷机进行故障诊断和检测。研究结果表明人工神经网络模型比较好。但是论文里只研究了“制冷系统渗入空气”这一故障<sup>[50]</sup>。

Stylianou 发展了一个基于统计学的方法，并结合了模式识别的思想，实现了一个基于统计模式识别的逻辑，对往复式冷水机组的故障进行检测与诊断，并考察了该方法用于机组时的监控和诊断性能<sup>[72]</sup>。

Tsutsui 发展了一个基于拓扑模型的诊断方法，通过一些规则的应用，利用该模型进行冷水机组的运行状况的监控<sup>[73]</sup>。

Visiter 对基于知识的故障诊断方法在冷水机组中的应用进行了研究，通过对一所学校的空调系统构建专家系统模型，利用专家系统的知识对系统的故障进行诊断<sup>[74]</sup>。

Wang 等人开发了离心式制冷机组的在线故障诊断系统<sup>[75]</sup>。该诊断方法属于基于模型的故障诊断方法。

Zhao 等人提出使用支持向量回归 (SVR) 方法获得建筑用能设备的参数指标 (PI) 并且提出了用指数加权移动平均 (EWMA) 控制图法来诊断冷水机组的

故障，并且用 ASHRAE RP-1043 的数据进行了验证<sup>[76]</sup>。

### 空调箱 (AHU)

Howell 提出了一种基于物理模型的检测方法，完成对空调箱的一些常见故障的检测<sup>[77]</sup>。

Lee 提出了基于残差和参数辨识的故障检测方法，对 AHU 的风机故障、水阀失效等 8 种常见硬故障进行检测<sup>[49]</sup>。

Yoshida 提出自回归外部输入模型法 (ARX)，对空调箱进行故障诊断，ARX 法是一种基于黑箱模型的诊断方法。同时他还比较了 ARX 与 Kalman 滤波器两种诊断方法在空调箱中的效果，研究了空调箱的多种类型的故障，包括风阀故障、盘管结垢、管路漏风、风机故障和过滤器堵塞等<sup>[78]</sup>。

Haves 提出了一种基于参数估计的方法对空调箱的状态或故障情况进行监测，用过程系数的变化来表征空调箱的故障。认为空调箱发生故障时，可以直接以温度、流量等参数的变化直观地表现出来，所以实际空调箱模型温度、流量等参数与预测模型的输出值比较，即可检测空调箱的故障。Haves 将他的诊断逻辑用于空调箱冷却盘管故障等<sup>[39]</sup>。

作为对基于模型的诊断方法的继承和发展，Dodier 提出了一种假设检验法，该方法是一种基于统计模型的方法，同时又结合了前人提出的基于空调箱物理参考模型的方法，把两者有机的结合起来去完成变风量空调系统的故障检测<sup>[79]</sup>。

江亿等人利用状态空间法诊断空气处理机组常见故障<sup>[80]</sup>。

Katipamula 采用故障树法，通过利用一些故障规则，对空调箱新风优化控制系统进行了故障诊断研究<sup>[44]</sup>。从空调箱通风的角度开展故障诊断研究工作的还有 Brambley<sup>[81]</sup>。

Dexter 也提出了基于模型的诊断方法，与 Howell 的基于物理模型的诊断方法相比，他提出的是一个基于模糊模型的诊断方法。该方法也是通过比较实际系统的模型和模糊参考模型来完成诊断，能够诊断的故障类型包括空调箱冷却盘管的结垢、水阀的泄漏等<sup>[82]</sup>。

Nofford 和 Shaw 等人利用物理模型预测送风静压和送风温度，通过比较风机的预测能耗和实际能耗来检测变风量系统中空调箱的风机故障<sup>[41, 83]</sup>。

House 对前人的空调箱故障诊断方面的研究工作和成果进行了总结，比较了应用于空调箱的 6 种不同诊断方法的优劣<sup>[84]</sup>。

Li 等人先后发表两篇文章，在 ASHREA 1312RP 的基础上，使用软件 HVACSIM+ 建立了 AHU 的动态模型，比 1312RP 多引入了两个新的元件模型——油阀模型和风机能耗模型，并且详细的介绍了模型的建立和校验过程，以及参数阈值的确定，结论是回风机模型的效果不是很理想，而且研究过渡季节工况模拟

结果有震荡，需要进行深入研究<sup>[85, 86]</sup>。

Kumar 等人提出了基于自回归模型和递推参数估计算法的变风量空调系统空气处理机组故障诊断方法<sup>[87]</sup>。但该研究统计分析的广度较小，研究深度较浅。

Salsbury 和 Diamond 提出了一个简化物理模型法，对空气处理设备进行现场试验结果表明，该方法具有一定的故障检测能力，但也存在模型参数如何选择，传感器信号的可靠性，AHU 正常运行的标准等实际问题<sup>[40]</sup>。

Qin 和 Wang 利用专家规则、性能指标和控制图诊断变风量空调末端装置故障<sup>[88]</sup>。

张鹏进行了 VAV 空调系统的故障诊断工作，但其研究仅限于采用 ARX 模型对 AHU 进行故障诊断<sup>[89]</sup>。

上述这些故障诊断的基础是设备的主要运行参数，如温度、压力和流量等，为了保证故障诊断结果的可靠性，那么必须先要保证数据的准确性，所以也有一部分学者致力于传感器的故障诊断。

### 传感器

陈友明等人介绍了 HVAC 系统自动故障检测与诊断的故障分类、研究现状、基本流程、常用方法及应用情况。用主成分分析法对 BA 系统中传感器的各种故障建立了模型；对空调检测系统中的四类传感器故障进行了检测与诊断；对空调监控系统中的数据恢复与容错控制进行了分析研究<sup>[90, 91]</sup>。

晋欣桥等人根据能量守恒定律，利用能量守恒关系式的残差特征，在冷水机组中选取恰当的控制体，对系统中温度传感器的故障诊断方程组进行了推导和求解，解决了稳态检测和方程组封闭性等问题<sup>[92]</sup>。

Wang 和 Xiao 提出了用主成分分析法检测 AHU 传感器的故障<sup>[93-95]</sup>。

Yang 等人对 AHU 的传感器故障诊断进行了研究，该研究属于基于规则的故障诊断，建立了传感器故障诊断规则集<sup>[96]</sup>。

Du 等人采用人工神经网络和减法聚类相结合的方法，对冷水机组和 AHU 的传感器进行了诊断<sup>[97]</sup>。

此外，还有关于换热器<sup>[98, 99]</sup>，冷却塔<sup>[100]</sup>等的若干研究，此处不再一一赘述。

与上述的单体设备故障诊断不同，还有一部分学者，他们从事空调系统整体能耗的优化控制和主要设备的能效诊断。Lu 等人建立了空调系统主要设备能耗的数学模型，使用遗传算法通过调整参数设定对整个系统的总能耗进行优化<sup>[101, 102]</sup>。Seem 提出了一种智能数据分析法，使用待修正的 z-score 去判断空调系统中的异常用能情况<sup>[103]</sup>。Standard EN 14825 提出了用中间参数 Z 来评价空调系统部分负荷下的能效，Z 等于空调系统设备在部分负荷工况下运行的能耗与在满负荷

工况下运行的能耗的比值<sup>[104]</sup>。Schibuola 等人对 Standard EN 14825 的方法进行了剖析和验证<sup>[105]</sup>。Kusiak 等人通过数据驱动的方法，使用多元感知算法计算空调系统能耗，通过优化控制方法和优化设定点来减小空调系统的整体能耗<sup>[106]</sup>。Zheng 等人建立了一种基于模型的、实时的建筑能耗诊断和性能监测系统，对建筑的用能系统和主要设备进行实时监测和故障诊断。但是该模型需要的参数种类繁多，搭建复杂且不具备通用性，对于每一栋建筑都需要重新构建一个模型<sup>[107]</sup>。

概括讲，一方面，传统意义的故障诊断，不管是单体设备层面的还是系统层面的，依赖的设备运行参数种类较多且数量较大，而用于空调系统故障诊断的传感器、执行器和控制器等价格比较昂贵，导致故障诊断的成本较高，从而造成收益成本比较低。一方面建筑多层面的故障诊断需要非常详细的建筑基本信息和运行参数信息，这些信息往往源自建筑的 BAS 系统，而实际上，BAS 系统的数据往往是不准确的<sup>[95, 108]</sup>。

近些年来有不少学者进行了基于电耗数据的故障诊断，一方面因为电耗数据更加容易获得，且电表的精度高，并且不容易像其他传感器那样产生漂移或者其他偏差；另一方面是因为近年来分项计量的全面快速发展。基于电耗数据的故障诊断深度可能无法媲美传统的故障诊断，但是其操作简单，可应用性强。在这方面的主要研究有：

Wang 等人以回归技术为基础，对 HVAC 系统进行了系统级别的故障诊断，将空调系统分为冷水机组、冷却塔、换热器、供水泵系统和回水泵系统五个子系统，诊断指标为 6 个温度参数和两个流速参数，并且给出了诊断参数阈值的确定方法，但是该研究只能解决系统级别的故障，不能解决元件故障，诊断过程中，能耗数据是一个非常重要的参考指标<sup>[26]</sup>。

Wu 和 Sun 等人研究出了一种自上而下的分层次的时空分隔的系统故障诊断方法，根据建筑、环境和人员等因素对空调空间进行分区，并且对空调系统进行分层次诊断，建立了 HVAC 各元件的能流模型，该论文着重指出能耗数据是实时参数中的最主要特征量，他们还提出在不同的时段使用不同的诊断阈值可以提高诊断精度。该研究只做到了逐天的诊断，没能做到逐时诊断<sup>[109, 110]</sup>。

Magoulès 等人使用递归确定感知（RDP）神经网络法对建筑进行全楼宇层面的能效诊断，包括控空调系统的主要设备冷机、水泵和风机，但是该研究使用的是 EnergyPlus 的模拟数据而非实际楼宇的运行能耗<sup>[111]</sup>。Wang 等人提出不同种类的空调系统设备或部件的错误操作都可以通过数据趋势分析和功能测试进行检测<sup>[112]</sup>。Xiao 等人使用数据挖掘（Data Mining）技术对实际建筑中获得的分项计量能耗数据进行挖掘，检测到了几个故障，如泵流量不足或异常运行等问题<sup>[113]</sup>。Yan 等人提出了用月电费账单对既有建筑进行能效诊断的方法，该方法受到冷负

荷没有计量和电费账单时间跨度的限制，只做到了逐月的比较粗略的诊断<sup>[114, 115]</sup>。

综上所述可以看出，空调系统故障诊断需要两个重要数据基础，即电耗数据和空调负荷，目前的很多研究都受到了这两个条件的限制，限制情况可以总结为以下三个方面：1) 没有实际建筑作为研究对象，只能使用模拟的方法获得数据，从而进行诊断方法的研究，这样获得的诊断方法没有经过实践地评价；2) 可以获得实际建筑的能耗数据，但是电耗数据的频率不高且用途分类不详，往往为大楼的月电费账单，故无法实现空调系统实时的能效诊断；3) 在装有分项计量系统的大楼里，电耗数据可以获得，而空调负荷数据依然缺乏。而本文提出的基于分项计量电耗数据的空调系统夏季运行故障诊断算法则试图解决上述困难。

### 1.2.3 能耗拆分方法国内外研究现状

发达国家对建筑能耗数据的采集和统计较早，如美国能源部（DOE）采用普查方式获取了许多建筑的能耗信息，但是数据更新较慢，只可以用来进行建筑能耗的宏观层面分析。而要量化实时准确的建筑能耗数据，需要电费账单、能源审计报告、分项计量系统、建筑能源管理系统协同工作并结合模拟计算才能得到<sup>[116]</sup>。若要深入分析建筑用能系统的运行状况，只有少量宏观的能耗测量数据是远远不够的，需要详细的高频率的分项能耗数据，而分项计量可以直接提供详细准确的能耗数据。知道详细的分项计量数据有重要的意义：1) 校验建筑能耗模型；2) 挖掘建筑节能潜力，计算和验证节能量，评估建筑节能改造的成果；3) 通过故障诊断的方式，优化能源系统的运行，实现建筑层面、系统层面和设备层面的节能等。

分项能耗数据的获取方式可以分为两大类，第一类：直接计量方法，就是在每个主要用电设备上安装一个电表；第二类间接测量方法，比如目前广泛采用的风机盘管系统，其末端分项计量便无法直接计量，只能通过间接方法。传统的直接分项计量手段一方面成本高，另外一方面在实际建筑中安装困难。所以国内外很多学者致力于能耗拆分方法的研究，根据总表的相位、频率和谐波等特征，使用计算方法通过拆分的方法得到各个支路下属的末端能耗，这是分项计量中最常用的间接计量方法，称为“能耗拆分方法”（也称为“间接计量方法”）<sup>[117]</sup>。一个完整的能耗拆分方法一般包括“估算算法”和“拆分算法”两部分，前者体现了对末端能耗的认识，后者体现了末端能耗与支路能耗之间的关系。

国内分项计量的研究，以清华大学建筑节能中心、天津大学建筑节能中心、同济大学暖通空调研究所、中国建筑科学研究院、上海建筑科学研究院和深圳建筑科学研究院为主。现在除了大力推动商业能耗监测平台之外，这些单位也在分项计量的算法方面做出了大量的工作。清华大学的江亿院士、魏庆芄在分项计量

领域做了很多研究,并且对北京以及全国主要城市的上百栋建筑进行了能耗计量;深圳建科院的李俊和清华大学的王远等人对公共建筑能耗分类的原则和模型进行了研究,形成了李俊分类模型<sup>[118]</sup>,王远分类模型<sup>[119]</sup>等。从二十世纪80年代末90年代初开始,美国麻省理工学院(MIT)、卡内基·梅隆大学和劳伦斯·伯克利实验室,以及英国的剑桥大学等世界尖端学府和科研单位致力于分项计量拆分算法的研究,并且取得了一些技术上的突破和阶段性的成果。下面介绍几个典型的间接式分项计量算法。

1) 最优化能耗拆分算法(不确定度估算法)<sup>[21, 120]</sup>。能耗拆分算法实际上是求解 $Y=X_1+X_2+\dots+X_n$ 的过程,一个方程, $n$ 个未知数,是无法求解出 $X$ 的准确结果的,为此,该方法引入了“不确定度”概念,求解思路如下:1、对支路中各末端集的能耗进行估算;2、依据支路能耗,对总能耗进行拆分,即通过调整各末端集的估算能耗值,使得它们的和等于总能耗;3、对估算结果进行调整,估算较准确的末端调整幅度较小,反之调整幅度较大;4、最后得出带不确定度的拆分结果。改进后的最优化能耗拆分算法,在最优化能耗拆分算法的最后一步将总目标函数的拆分指标、末端类型细分、末端隐形阶段细分三者加权再求和,在限定条件下求最优值。

2) 基于电流互感器的电能分项计量法<sup>[121]</sup>。当任何一个用电设备 $Z$ 在时间 $t_1$ 投入运行时,必然引起线路总电流的增加,根据数据采集板采集的电流变化量可以确定当前投入运行用电设备的性质和类型,然后将投入 $Z$ 以后的线路总电流减去投入 $Z$ 以前的线路总电流,得到流过 $Z$ 的电流。再根据采集的电压,可以计算出用电设备 $Z$ 的功率 $P$ ;当线路总电流在时间 $t_2$ 减小时,假定确认是用电设备 $Z$ 退出运行,即可得到用电设备 $Z$ 运行的时间 $t=t_2-t_1$ ,这样就可以计量出用电设备 $Z$ 在时间 $t$ 内消耗的电能。但是此方法无法判断投入运行或者退出运行的用电设备到底是什么种类的设备。

3) 基于波形因数的用电设备识别法<sup>[121]</sup>。一般来说,公共建筑常用用电设备的稳态电流波形均不相同,电流的波形因数也就不同,因此,可以根据电流的波形因数来识别用电设备。此方法可以与上述方法结合使用,但是局限性依然很大,因为用电设备种类繁多,波形因数数据欠缺。

4) 末端设备能耗拆分算法(End-use Disaggregation Algorithm (EDA))。EDA法是一项基于计算机模拟和统计学分析的混合技术,将建筑的小时能耗拆分为不同末端设备的分项能耗,其流程图如图1.6所示。该方法起初用于单独一栋建筑的电能耗拆分,后来经过改进又可以用于同电网内多栋建筑的电能耗拆分,但是该方法需要大量的统计数据 and 实时模拟计算来修正,局限性较大。Akbari,

Konopacki 和 Heinemeier 等人采用分段线性回归的方法做了很多研究，由于缺乏分项计量实测数据，给当时的研究造成了很大的障碍<sup>[116, 122-126]</sup>。

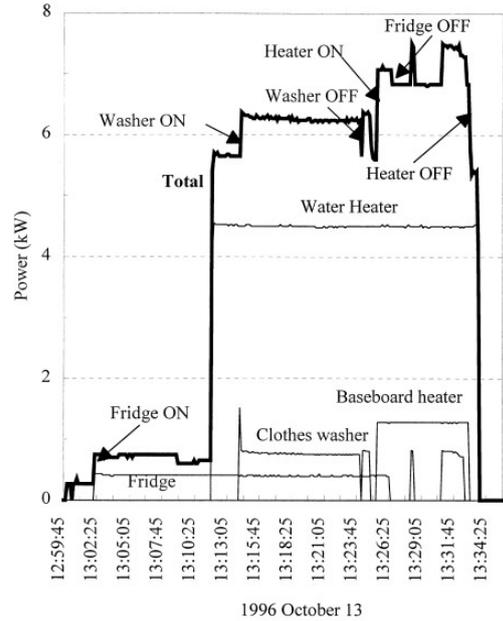
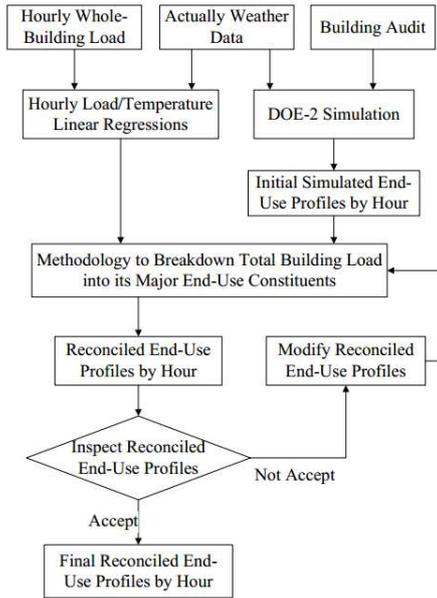


图 1.6 末端设备能耗拆分算法流程图<sup>[116]</sup> 图 1.7 非嵌入式能耗检测法住宅测试图<sup>[127]</sup>

5) 非嵌入式能耗监测法 (Non-intrusive Load Monitoring (NILM))。通过监测建筑的实时电耗曲线，根据用电设备的启动和停止电信号（电流、电压、有功功率、无功功率、功率因数等）来识别设备，判断具体用能设备的启停和实时功率值，进而计算出各类设备的能耗。此方法中又包含若干种拆分算法：1、艾伦方差算法；2、稳态和瞬态负荷探测算法；3、逻辑分析法；4、电流谐波分析法等等。Schweppe 和 Hart, Hart, Marceau 和 Zmeureanu, Pihala, Murata 和 Onoda 等大量学者对 NILM 系统进行了大量研究，研究局限于简单的住宅建筑<sup>[15, 127-130]</sup>。Marceau 等人将该方法应用于一个住宅的测试效果如图 1.7 所示。Norford, Mabey 和 Leeb 等人也做了少量关于商业建筑 HVAC 系统的研究，由于商业建筑用能的复杂性，设备种类繁多复杂、数量极其庞大，仅仅凭借总能耗曲线判断设备启停的难度过高，所以结果并不理想<sup>[131-134]</sup>。

近些年，众多学者做了大量的研究，其中包括传统的简单的回归模型<sup>[29, 30]</sup>，人工神经网络 (ANN) 模型<sup>[135-138]</sup>，建筑模拟方法<sup>[139, 140]</sup>和决策树模型<sup>[141-143]</sup>等，研究覆盖了建筑总能耗预测，空调系统能耗预测和空调末端能耗预测等领域，预测准确度较高，但是缺乏长时间的实测数据验证模型，且对于非专业人士模型的理解困难，尤其是 ANN 这样的黑箱模型，这些方法可复制性差，推广使用困难。

Pandit 和 Wu 研究发现几乎所有的商业建筑的逐时能耗都呈现周期性的特征，他们使用正弦余弦等三角函数的模型对商业建筑能耗进行了模拟，这便是傅里叶能耗模型的雏形<sup>[144]</sup>。随后 Seem 和 Braun 又使用三角函数模型预测商业建筑

以周期的能耗情况，但结果很不理想<sup>[145]</sup>。Claridge 等人也研究发现建筑的照明和设备能耗是随天或者年呈周期性变化，不受室外天气参数的影响<sup>[146]</sup>。Dhar 等人在前人的研究基础上进一步深入的研究发现商业建筑中工作日与非工作日的用能特点有很大的区别，在建立模型时需分开建模，同样的对于不随室外气象参数变化的用能设备和随着气象参数变化的用能设备也要分开考虑<sup>[147-149]</sup>。

尽管很多非线性模型都可以实现高准确度的能耗模拟，然而针对空调系统末端能耗掺混在照明插座分项或者动力分项中需要进行拆分这一问题，傅里叶模型是最适合的，源于傅里叶模型本身所独有的周期性特征，该观点将在后面的研究中用数据说明。该方法的优越性体现在：1) 模型结构简单，易于理解。即使是非专业人士也可以轻松的掌握和使用。2) 算法可复制性强。模型一旦建立，可以简单直接地复制到其他建筑中。

#### 1.2.4 空调系统负荷预测方法国内外研究现状

正如 1.2.2 节所说的想要实现空调系统运行性能的在线监测和诊断，能耗数据和冷量数据是两个重要的数据基础。

近十年来，很多国家和地区都在对大型商业建筑的分项能耗进行高频率的在线监测，称之为“分项计量”，实现了逐时电耗的计量，为空调系统能效的在线诊断提供了宝贵的数据和良好的平台，针对无法直接计量的末端能耗数据也可以采用间接计量方法，上文中也对间接计量方法进行了综述，本小节针对空调系统负荷预测问题进行综述。

冷量计量只能通过间接方式实现，如计量冷冻水的供回水温度和冷冻水的流量从而计算得出冷量，或者计量空调系统末端的送回风温度和送风量从而计算出冷量。前者则是目前广泛采用的冷量计量方式，冷量计量在理论上不存在任何障碍，而在实际建筑中实施则是非常困难的，对于新建建筑，一般在空调系统设置初就将温度传感器和流量传感器内置于冷冻水管路中，数据质量在运行之初较为理想，但由于内置传感器无法校核，长时间使用会发生退化和漂移，数据质量会明显下降；对于既有建筑，需要在管壁上开洞放置传感器，但空调冷冻水系统是承压系统，所以开洞放置传感器这样危险的行为是不被允许的，即使是拨开管道保温层进行外贴式测量也非常困难。

鉴于空调系统冷量数据的重要性和实际计量的困难性，越来越多的学者致力于空调系统负荷（建筑负荷）的预测研究。近些年来，伴随着计算机技术的发展和众多学者的不懈努力，空调系统负荷预测领域取得了许多有意义的研究成果。

ASHRAE 手册（Fundamentals 2001）将模型分为两大类“正演模型（或称前向模型）”和“反演模型（也称后向模型）”<sup>[150]</sup>。一般来讲，正演模型是根据建

筑的基本信息从从底层搭建而成的,基本信息包括建筑的形态、尺寸、地理位置、围护结构材料、照明、设备、人员和空调系统形式等。这一类的模型主要用于建筑设计阶段或者空调系统设计选型阶段。反演模型多属于经验模型,由一个或多个变量和一组经验参数表达。首先假设不同的模型形式,然后通过测量数据用反推的方式获得模型的参数,最终确定最合理最准确的模型形式和参数集。这类模型一般用于改造分析、性能监控和诊断、控制策略开发和在线控制等领域。

正演模型也叫原理驱动模型或者白箱模型,在建筑负荷预测研究领域,最常见的也是最主要的研究方法就是建筑能耗模拟方法。正如上文中所说的该方法适用于建筑和空调系统的设计阶段,对于实际运行的建筑该方法则存在严重的高限性,其需要的输入参数非常多,实际可获得的参数往往不够全面,该方法还需要大量的建模和校验时间,即使操作人员非常专业,建模效率依然不高;并且精度往往无法保障<sup>[140, 151-154]</sup>。反演模型也叫数据驱动模型,总体来讲可以分为黑箱模型和灰箱模型两个大的分类。黑箱模型往往是通过长时间的大量的实际数据训练出来的数学模型或者统计学模型,该类模型对数据的时间跨度和质量要求都非常高,并且要求训练数据尽可能涵盖所有的变化可能性。这类模型往往不具备物理意义,在实践中应用往往由于训练数据匮乏而造成模型的精度低鲁棒性差。灰箱模型介于白箱模型与黑箱模型之间,一般具有一定的物理意义,但依然有部分参数是通过数据驱动的方式获得的。下面对该领域的主要研究进行综述。

**白箱模型。**这类方法是将建筑模型的详细物理信息输入计算工具中,得出空调系统负荷的方法,这类方法也叫做物理方法。从模型复杂程度上看,这类模型又包括修正的温频法和详细建模方法等。

Knebel 提出了修正温频法,这是一个简化的能耗计算方法<sup>[155]</sup>。在这个方法中,室外温度简化为四个典型温度:最大制冷温度,过渡制冷温度,最大供热温度和过渡供热温度。对于每一个温度,都分别计算一个建筑负荷。这个负荷主要包括以下几部分:通过窗户、墙体和屋顶的太阳辐射得热,墙体和屋顶传导得热、窗户传导得热,人员、照明和设备所造成的负荷以及通风负荷。然后,将每个温度下的负荷与该温度小时数的乘积进行加和,就可以得到全年的负荷。

相比于修正温频法,详细的负荷计算方法则需要更多更详细的输入参数,其相应的计算工具也变得更加复杂。这类模型通常会尽可能地接近实际系统,以提高模型的准确性。如今,这类方法已经成功的应用到计算软件中,如 DOE-2、EnergyPlus、TRNSYS、ESP-r 等等<sup>[156-160]</sup>。Crawley 对 21 个这类计算软件的建筑特征进行了比较。他发现尽管很难用单一的指标对各个软件的优劣进行评判,但是,在负荷计算方面,这类软件有以下一些共性:都考虑了对流、传导、长波以

及短波的辐射换热<sup>[161]</sup>。此外,已经有 Hensen 和 Lamberts 编写的教科书对建筑负荷模拟进行了全面系统的介绍<sup>[162]</sup>。

众多学者<sup>[163-166]</sup>致力于白箱模型的研究,是因为这类模型具有较大的实际应用价值:1)可以实现能耗的逐时预测;2)可以对运行管理方案和节能改造方案进行评估;3)可以实现节能量的准确计算和验证;4)可以作为很多相关研究的基础和工具。但是白箱模型在实际应用中遇到了一些障碍。在建筑设计阶段,由于建筑的使用情况尚不确定,很难对建筑进行准确模拟。而在建筑运行阶段,建筑物理模型的建立和校验也是一个非常困难的事情。其主要原因有以下几点:1)多解。由于可用信息的局限性和输入参数的繁杂,一个完整建筑模型的校核往往会得出多个不一致的解<sup>[167]</sup>。2)准确度低。在进行校核时采用的指标多是全年或者逐月的实测数据,大多数模型校核问题都缺少详细的运行参数。并且,目前还没有一个标准的系统的校核方法,使得现有校核研究具有很大的主观性。由于这些原因,所得的校核模型准确性很难令人信服,且即使逐月的预测负荷和实际负荷匹配度较高,但逐时的匹配度依然不高<sup>[151-153]</sup>。3)操作繁琐困难。物理模型的校验,需要大量的时间投入并且需要操作人员具有较高的专业能力<sup>[154]</sup>。

**黑箱模型。**黑箱模型包括传统的回归模型,人工神经网络(ANN)和支持向量机模型(SVM)等。

回归模型尽管不能够非常准确的预测负荷,但能够清晰的给出负荷与各个因素之间的相关性。这方面已经有了大量的研究,涵盖制冷负荷和供热负荷<sup>[168-171]</sup>。Catlina 等人建立了一个用来预测单一住宅逐月供热能耗的回归方程<sup>[29]</sup>。这个回归模型以建筑形状、围护结构、气象条件和室内设定点为输入,来输出供热负荷。之后的案例验证表明,该模型能够较为准确地预测供热负荷。Ansari 等人先是建立了制冷负荷每个部分与室内外温度差的线性方程,包括墙体导热、通风负荷等等,然后将这些负荷求和即可得出总的制冷负荷<sup>[172]</sup>。

与回归模型不同,人工神经网络能够较为准确地拟合负荷与其影响因素之间的结构,因而,具有较高的预测精度。人工神经网络模型是从神经生物学研究中得到启示而提出的一种模型。目前,已经有多种神经网络模型,如前馈神经网络、回归神经网络等。Zhang 等人利用人工神经网络来建立矩形大横截面地源空气换热器的对流换热模型,然后该模型与有限元分析进行结合,计算该换热器的运行情况。实验验证表明该模型有非常好的准确性<sup>[136]</sup>。

支持向量机是另外一种具有较高预测精度的黑箱模型,也有大量的研究<sup>[173, 174]</sup>。Li 等人用支持向量机预测建筑的逐时冷负荷,然后将这个方法应用于广州的一栋办公建筑。结果表明该方法具有较高的预测精度,最后通过与反向神经网络、通用回归神经网络等方法比较,发现该方法的预测精度较高<sup>[175, 176]</sup>。

**灰箱模型。**灰箱模型有决策树模型、傅里叶级数模型和 RC 热网络模型等。

Yu 等人提出用决策树来预测建筑能耗需求指标。然后，他们利用日本的几十栋住宅建筑对该方法进行了验证，表明该方法能够较好地预测出建筑的能耗需求水平，并且能够给出建筑能耗的影响因素<sup>[143]</sup>。利用傅里叶级数来进行负荷预测的研究已经有几十年的历史了。Dhar 等人利用傅里叶级数的方法来预测商用建筑的逐时能耗<sup>[149]</sup>。Braun 和 Chaturvedi 利用传递函数来预测建筑冷热负荷，该传递函数的参数则根据建筑中的能量流动计算得出。然后，利用芝加哥的一栋建筑的实测数据对文中提出的灰箱模型进行验证。从结果可以看出，两周的建筑数据足够训练出较为准确的能耗预测模型<sup>[177]</sup>。

针对建筑空调系统负荷预测问题，由于负荷的组成部分比较明确，相对于前两种灰箱模型，RC 模型具有更加明确的物理意义和更少的参数，该方法可以通过短时间的训练数据获得精度较高、鲁棒性较强的预测模型。早在上个世纪 90 年代，在 Kreider 和 Rabl 编写的教科书“*Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency*”中就有对使用 RC 模型计算通过建筑围护结构形成的建筑负荷的详细方法<sup>[178]</sup>。

Mitchell 指出 3R2C 的节点位置和参数可以通过遗传算法比对理论模型的幅频特性和简化的 3R2C 模型的幅频特征获得<sup>[179, 180]</sup>。Seem 和 Klein 等人通过研究表明 3R2C 模型对于模拟建筑外围护结构是非常适用的<sup>[181]</sup>。Ciampi 等人在研究空调系统的优化运行问题也采用了 RC 模型对空调系统的负荷进行计算<sup>[182]</sup>。Xu 和 Wang 则通过 CFT 模型和 3R2C 的对比再一次验证了 Seem 和 Klein 的观点<sup>[183, 184]</sup>。Braun 等人使用 RC 模型对两栋不同结构办公建筑的冷负荷进行预测并且与 TRNSYS 模型的模拟结果进行对比，但是该模型没有详细说明建筑内部蓄热体的计算方法<sup>[177]</sup>。而 Xu 和 Wang 提出了用 2R2C 串联模型来模拟建筑内部蓄热体对建筑负荷的影响并且使用了遗传算法对模型参数进行优化，但是估算冷负荷与实际冷负荷的相比，误差达到了 22%<sup>[185, 186]</sup>。经过分析，造成误差的两个主要原因是：1) 使用 2R2C 模型描述内部蓄热体的特性不够准确；2) 在 Xu 等人研究中关于建筑内部得热（照明和设备等）的计算，使用的内热源的设计功率和同时使用系数，与建筑的实际运行情况并不相符。

## 1.3 本课题的主要研究工作

### 1.3.1 本课题的主要研究内容

根据对分项计量现状和空调系统故障诊断障碍的分析，本文将针对基于分项

计量的公建空调系统夏季运行故障诊断算法展开研究。研究目标为：建立基于分项计量的空调系统夏季运行故障诊断的算法体系，得到空调系统故障诊断的报警阈值或诊断规则，并给出可以诊断的故障列表。本文以既有建筑的实测数据为基础，通过理论分析、数值模拟和数据挖掘等方法进行研究。本文的主要研究内容如图 1.8 所示，主体研究工作包括三部分：1) 空调系统末端设备逐时能耗拆分算法的建立，2) 空调系统逐时负荷估算算法的建立，3) 空调系统逐时故障诊断算法体系的建立。

### 1) 建立空调系统末端逐时能耗拆分算法

为了响应国家分项计量的号召，或者随着业主自身对建筑能耗关注度的提高，新建建筑可能会考虑将空调系统的冷热源，输配系统和末端的配电线路都进行独立设计；而既有建筑中由于配电环路的设计已经确定，一般来讲，空调系统的冷热源、水泵、冷却塔等是可以直接独立计量的，但是空调系统末端设备能耗往往掺混在照明插座分项或者动力分项之中，这是现有分项计量系统的一大弊端，该部分的工作就是解决该问题，建立模型，通过间接方式获得空调系统末端逐时能耗数据，阐述建立模型需要的前提条件、输入参数、输出参数、训练和验证方法及过程，并且给出模型的适用范围和模型精度。

### 2) 建立空调系统逐时负荷估算算法

第一部分研究工作已经解决了能耗数据问题。在空调系统故障诊断研究领域，另一个非常重要的研究基础就是空调系统的逐时冷负荷。而在实际建筑中计量冷量是非常困难的，对于新建建筑，如果在空调系统设置初将温度传感器和流量传感器内置于冷冻水供回管路之中，数据质量在运行之初较为理想，而内置传感器长时间使用无法校核，数据质量会明显下降；对于既有建筑，由于空调冷冻水系统是承压系统，是不允许开洞放置传感器的，即使是拨开保温层进行外壁贴附式测量也是非常困难的。该部分研究工作则是要解决冷量数据缺乏这个问题。本文给出了两种空调系统逐时负荷计算方法，“模拟法”和“RC 模型法”。

方法一：模拟法计算空调系统逐时负荷。通过建立实际建筑模型获得建筑负荷的工作重点是建筑模型的建立和校核，因为在建筑的实际运行阶段，建筑中各种用电设备的能耗是逐时变化的，与设计参数的出入很大，如果没有逐时的运行数据用于模型校核，是很难获得准确的模型的。现有的很多模型校验方法可以实现总能耗数据的吻合，但是由于输入参数有成百上千，这是一个多解问题，最终依旧无法确定模型是否与实际建筑相符。本阶段的研究是要提出一种基于逐时分项计量电耗数据的模型校验方法，对实际运行的建筑模型进行校验，使用校验好的模型计算空调系统的逐时冷负荷，给出具体的校验过程和模型精度。

方法二：基于分项计量能耗数据和 RC 传热模型的空调系统逐时负荷估算方

法。本阶段的研究是在现有的 RC 建筑负荷估算模型的基础上，进行改进，使得改进后的模型具有更高的估算精度和更好的实践性。

### 3) 建立空调系统逐时故障诊断算法

在上述研究中已经获得了空调系统各个设备的逐时能耗数据和空调系统的逐时负荷。该研究阶段则是构建空调系统的故障诊断算法体系。在现有的空调系统故障诊断基础上，提出适用于基于分项计量能耗数据的逐时空调系统故障诊断算法，并且给出合理的诊断阈值和常见的可以诊断的故障列表。故障诊断算法包括简单的规则诊断和深入的模型诊断，规则诊断方法需要的诊断数据基础为各设备逐时电耗数据和空调系统逐时负荷数据；模型诊断方法需要的数据则是在上述基础上，增加了很少量的温度和压力参数来辅助诊断，尽量避免运用大量的运行参数和较难测量的运行参数（如流量参数）。

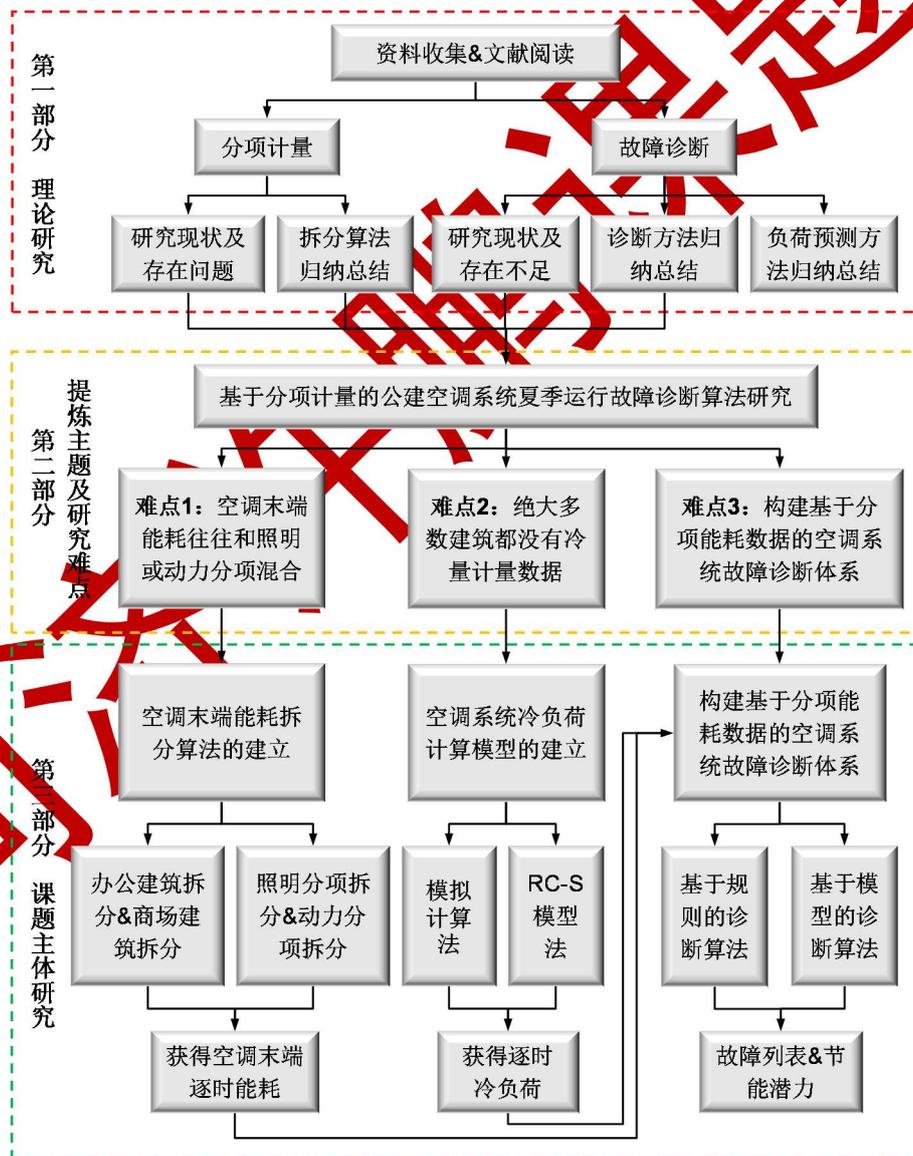


图 1.8 课题研究的主要内容

### 1.3.2 研究内容界定和基本假设

本课题对研究对象做出如下限定：

1) 根据沪府发【2012】49号文，本课题所说的大型公建本意是指单体建筑面积在1万平方米以上的国家机关办公建筑和2万平方米以上的公共建筑。因为满足这样条件的公共建筑是必须安装分项计量系统的，如果建筑面积小于上述规定，但是也安装有分项计量系统的公共建筑也可以纳入本文的研究范围。此处特别指出，由于大型公建种类繁多，而且通过调查发现商场、办公及商场办公综合体等建筑的分项计量效果较好；医院、学校等建筑的分项计量数据整体较差，所以本文重点研究商场建筑和办公建筑。

2) 因为分项计量的对象是电耗数据，所以本课题所说的空调系统，只考虑以电能为能源供应形式的空调系统设备，如冷源为电冷水机组或热泵，热源为电锅炉或热泵，空调末端为风机盘管系统（含新风）或全空气系统。非电耗设备不在本课题的研究范围之内。

3) 由于分项计量数据主要为空调系统主要设备的电耗数据，冷机、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔等都可以直接计量，所以针对这些设备的诊断可以做到比较具体和深入，而空调系统末端设备能耗基本上无法实现直接计量，即使本文采用傅里叶模型可以拆分出空调系统末端设备能耗，该能耗也只是所有末端设备的能耗之和，而非单个末端的能耗，所以本文没有做到对空调系统末端设备的深入诊断，只是做了一些简单的启停和变频控制的诊断。

4) 大部分冬季采暖热源（燃油锅炉、燃气锅炉、溴化锂机组）都不是以电能为直接能源的（空气源热泵等除外），不存在能源消耗的数据记录；热水泵的运行能耗较冷冻水泵而言也较低，且冬季不存在冷却水泵和冷却塔的运行；另外本文的研究对象建筑冬季采暖使用的溴化锂机组。所以本文的故障诊断研究主要针对制冷季节，采暖季节暂无法做研究。

5) 本文中故障诊断是一个广义的概念，不仅包含大家熟知的传统的故障诊断，如水泵烧毁、风机卡死等硬故障和管路结垢、传感器漂移等软故障，还包括设备运行时间不正常、开启台数不合理和运行能效低等经济运行和运行策略问题。

在实施研究工作过程中，本文将采用以下基本假设：

1) 因为电表采集数据精度高，不易发生漂移，本文认为电表采集的数据是真实可靠的，不对其进行修正和不确定度分析。

### 1.3.3 本课题研究的方法和技术路线

本课题主要通过理论分析、数值模拟和数据挖掘相结合的方法展开研究。本

课题在研究过程中所采用的技术路线如图 1.9 所示。与图 1.8 中提到的三个工作难点相对应,本文提出的基于分项计量的大型公建空调系统故障诊断算法是由三个子算法构成的:1) 空调系统末端设备逐时能耗拆分算法,2) 空调系统逐时负荷估算算法,3) 空调系统逐时故障诊断算法。

子算法①: 空调系统末端设备逐时能耗拆分算法。

进行基于分项计量的空调系统故障诊断研究,空调系统各主要设备的能耗数据是必备的研究基础,但是由于现有配电设计因素导致空调系统末端设备能耗往往和照明插座分项或者动力分项能耗混合在一起,无法直接计量,所以要想获得空调系统完整的分项能耗数据,用以支持故障诊断工作,建立空调系统末端设备逐时能耗拆分算法是必要的工作环节。针对该问题,本文提出使用傅里叶模型对照明插座分项和动力分项逐时能耗进行计算,然后使用采集到的混有空调系统末端能耗的照明插座分项和动力分项逐时能耗减去傅里叶模型计算得到的纯照明插座分项和动力分项逐时能耗,最终得到空调系统末端设备逐时能耗。

子算法②: 空调系统逐时负荷估算算法。

进行空调系统故障诊断,逐时负荷是另一个必要的诊断基础。由于既有建筑中几乎都没有冷量数据的采集,所以需要建立空调系统逐时负荷估算模型。本文针对该问题提出了两个空调系统逐时冷负荷计算方法,模拟法和 RC-S 模型估算法。对于模拟法,本文给出了一套根据建筑实际运行参数模型校验的方法。RC-S 模型估算法中,对于外围护结构的传热计算,本文继续采用简化 3R2C 模型,并且采用遗传算法进行参数优化;对于建筑内部得热的计算,本文将分项计量的能耗数据转化为建筑内部逐时负荷;对于建筑内部蓄热体的计算,本文首先假设三种不同的模型形式,使用遗传算法对模型参数进行优化计算,然后使用实测冷量数据和模拟法中校验好的模型模拟得到的冷量数据分别对三种不同形式的内部蓄热体模型进行验证,最终选取精度最好的模型形式。模拟法计算精度高,直观性好,但是费时且通用性较差;RC-S 模型估算法通用性好,但是计算精度相对较低且不够直观。二者各有利弊,使用者可以根据需求选择。而本文在子算法③中选择使用 RC-S 模型估算法计算空调系统逐时负荷。

子算法③: 空调系统逐时故障诊断算法。

在获得空调系统各个设备逐时能耗和系统逐时负荷的基础上,子算法③提出了基于规则的和基于模型的两套空调系统故障诊断算法。基于规则的诊断算法属于简单的限值诊断,包括启停时间的诊断和能效限值的诊断,本文对现有规范中空调系统各设备典型工况下的能效限值进行修正,获得了逐时的能效限值用以对空调系统各设备的运行进行诊断。基于模型的诊断算法中,本文建立了一套理想空调系统模型,然后通过比较分析实际计量得到的能耗数据与理想空调系统模型

模拟得到的能耗数据，对空调系统各设备的运行情况进行诊断。规则诊断方法需要的诊断数据基础为各设备逐时电耗数据和空调系统逐时负荷数据；模型诊断方法需要的数据则是在上述基础上，增加了很少量的温度和压力参数来辅助诊断，尽量避免了运用大量的运行参数和较难测量的运行参数（如流量）。针对上述诊断算法本文给出了诊断流程、诊断规则和可以诊断的故障列表。

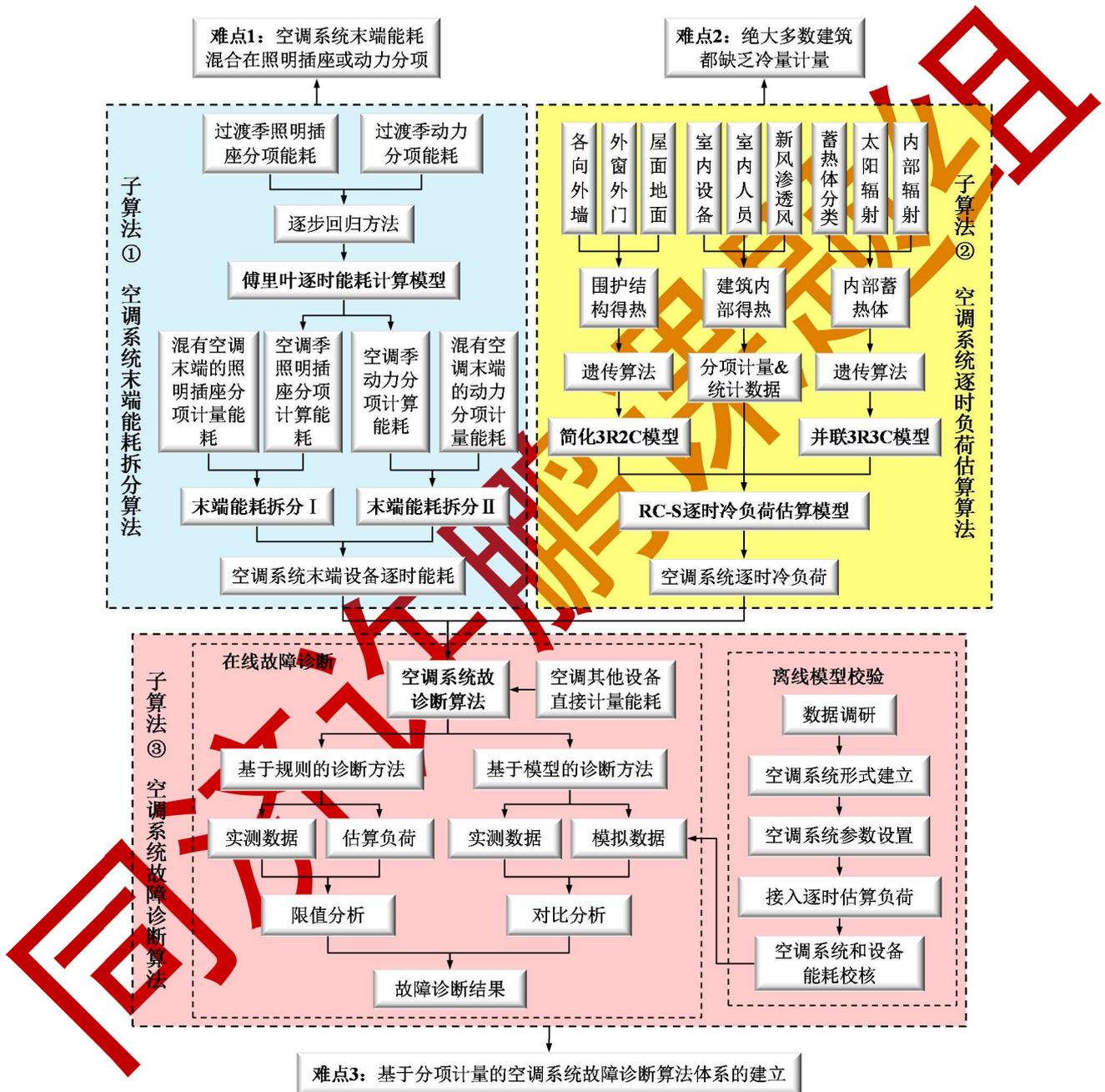


图 1.9 课题研究的技术路线

### 1.3.4 文章结构与章节关系

第一章绪论，主要介绍课题研究的背景、国内外研究现状和课题研究工作。

第二章建立一种空调系统末端逐时能耗拆分模型,并且使用上海市四栋实际楼宇数据对该模型进行了验证。

第三章建立一种基于模拟的空调系统逐时冷负荷计算模型,给出了一套使用实际楼宇逐时运行能耗数据校验模型的方法,并且用一栋实际楼宇演示了该方法。

第四章建立一种 RC-S 空调系统逐时冷负荷估算模型,将分项计量能耗数据与现有的 RC 模型结合,并且对现有的 RC 模型中建筑内部蓄热体部分的计算进行了改进,然后使用实际楼宇的实测数据和第四章中校验好的模型的模拟数据分别对 RC-S 进行了验证。

第五章介绍基于分项计量能耗数据的空调系统故障诊断算法。阐述了基于规则的和基于模型的诊断算法的建立过程,给出了故障诊断的规则和可以诊断的故障列表。并且运用 MATLAB 自主编写了理想空调系统能耗计算模型用于故障诊断。并将空调系统故障诊断算法应用于上海市的一栋实际楼宇,对故障诊断流程进行了演示,对故障诊断结果进行了分析与讨论。

第六章总结了本文的结论、创新点和局限性,并对后续工作进行展望。

#### 1.4 本章小结

本章首先对大型公建和空调系统的能耗现状及节能潜力,分项计量的发展历程、研究现状及存在的问题,空调系统故障诊断的意义三个方面进行了总结。然后对空调系统故障诊断、末端能耗拆分算法和空调系统负荷预测三个领域的研究进行了综述。最后根据国内外关于本课题内容的研究现状和不足,结合现有的数据基础和实际需求,确定了本文的主要研究内容,并给出了具体的研究方法和技术路线。

## 第 2 章 空调系统末端能耗拆分算法

### 2.1 概述

当前商业建筑节能工作遇到的一个障碍是缺乏详细直接的分项能耗数据。传统的直接分项计量手段不仅成本高，而且在实际建筑中安装困难，特别是空调系统的分项计量，因为往往末端能耗和照明动力混在一起。照明插座分项包括照明设备能耗和插座中的一些其他设备能耗，这两部分能耗绝大多数情况下都是混合在一起，不可分开的。动力分项主要指建筑中的一些大型用电设备，如电梯、生活水泵等，空调系统末端设备主要指风机盘管、空气处理机组、新风机组等。本章采用傅里叶模型，对照明插座分项和动力分项能耗进行模拟，从而从混合能耗中拆分得出空调末端能耗数据，并且分析了上海市 4 栋商业建筑（1 栋办公建筑，1 栋办公商场混合建筑，2 栋商场）的全年逐时能耗数据，对空调末端混合在照明插座分项和动力分项的情况分别做了拆分研究。

### 2.2 傅里叶拆分模型的介绍

既有研究<sup>[147-149]</sup>表明商业建筑中的照明和设备能耗往往表现出极强的周期性变化规律，是以年和天为周期的随着时间变化的周期函数，而且除空调系统设备的能耗以外，其它能耗，如照明设备和动力设备等的能耗，的变化规律几乎不受室外温度或者其他气象参数的影响。因为傅里叶级数本身所具有的独特的周期性变化特征，所以在描述这些周期性变化的能耗特征时傅里叶级数模型是一个非常合适的选择。

#### 2.2.1 傅里叶级数介绍

一个周期信号  $f(t)$ ，当其在在一个周期内只有有限个极值点，并且只有有限个第一类间断点（间断点处左、右极限都存在），而其余各处都是连续的，这时可以用一个傅里叶级数来表示该周期信号。

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega_0 t) + b_n \cos(n\omega_0 t)] \quad (2.0)$$

其中  $a_0$  为静态分量，也就是信号一个周期内的平均值； $\omega_0 = 2\pi / T = 2\pi f_0$  为基频角频率； $T$  为信号周期； $f_0 = 1 / T$  为基频； $nf_0$  为第  $n$  次谐波的频率（ $n=1、2、$

3、……)。

任何一个周期函数，只要满足一定条件，都可以分解为基频  $f_0$  的谐波与整数倍于基频  $f_0$  的高次谐波的和，任一阶频率成分的幅值和相位都可以傅里叶级数展开得到。换句话说，多个不同频率的谐波函数相加，只要所有的频率都是最低频率的整数倍，最终合成的函数一定是周期函数。所以傅里叶级数模型是描述周期函数变化特征的佳选。

## 2.2.2 傅里叶拆分模型的建立

为了了解空调系统末端设备配电环路情况及能耗计量现状，本文于 2013 年对上海市 287 栋建筑面积大于等于 20000m<sup>2</sup> 的安装有分项计量系统的大型公建进行了调查，调查结果表明空调系统末端设备有单独能耗计量的大型公建仅有 4 栋，其余大型公建空调系统末端设备能耗计量可以总结为三类情况：1) 空调系统末端设备能耗混合在照明插座分项之中；2) 空调系统末端设备能耗混合在动力分项之中；3) 部分空调系统末端设备能耗混合在照明插座分项，其余则混合在动力分项。正如本文第一章中介绍的直接计量空调系统末端设备的能耗是非常困难的，而间接计量的方法可以解决这一难题。本文中，将空调系统末端设备能耗与照明插座分项掺混的情况叫做“情景 I”，将空调系统末端设备能耗与动力分项掺混的情况叫做“情景 II”，如图 2.1 所示。本章的研究将会围绕 4 栋具有空调末端独立计量的建筑展开，这四栋建筑的详细信息见表 2.1。建筑 A 为纯办公建筑；建筑 B 为综合型建筑，由品牌旗舰店和办公建筑组成，由于品牌旗舰店部分面积现对于办公部分而言，是非常小的，所以该栋建筑的建筑类型暂归于办公建筑类；建筑 C 和 D 为商场建筑。

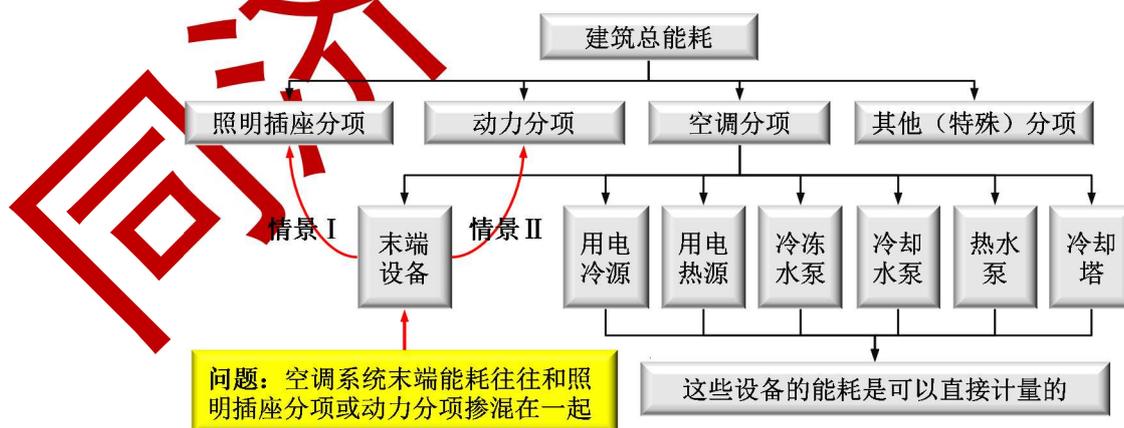


图 2.1 分项计量中存在的键问题

表 2.1 本文研究用到的四栋实际建筑的基本信息汇总表

建筑信息	建筑名称			
	A	B	C	D
地理位置	上海	上海	上海	上海
建筑类型	办公建筑	综合性建筑	商场	商场
建筑层数	30	1~4层: 品牌旗舰店 5~34层: 层办公	7	9
建筑高度(m)	140	150	43	52
建筑面积(m <sup>2</sup> )	70795	68330	60287	40000
使用时间	工作日: 9:00-17:00	工作日: 9:00-17:00	全年: 10:00-22:00	全年: 10:00-22:00
空调冷热源形式	冷水机组+锅炉	冷水机组+锅炉	冷水机组+锅炉	冷水机组+空气源热泵
空调末端形式	AHU+FAU	1~4层: AHU 5~34层: FCU+DOAS	AHU+FAU	AHU
能源形式	电能 锅炉: 燃油/燃气	电能	电能 锅炉: 燃油/燃气	电能

针对上述情况, 本文提出的解决办法是通过拆分的手段, 从各个分项与空调末端混合的总能耗中获得空调系统末端能耗数据。本文给出的空调系统末端能耗拆分算法流程图如图 2.2 所示, 对纯照明插座分项能耗和动力分项能耗进行模拟, 然后用实际测量得到的混合有空调系统末端设备的分项能耗减去模拟得到的纯照明动力分项能耗便可以得到空调系统末端设备的能耗。

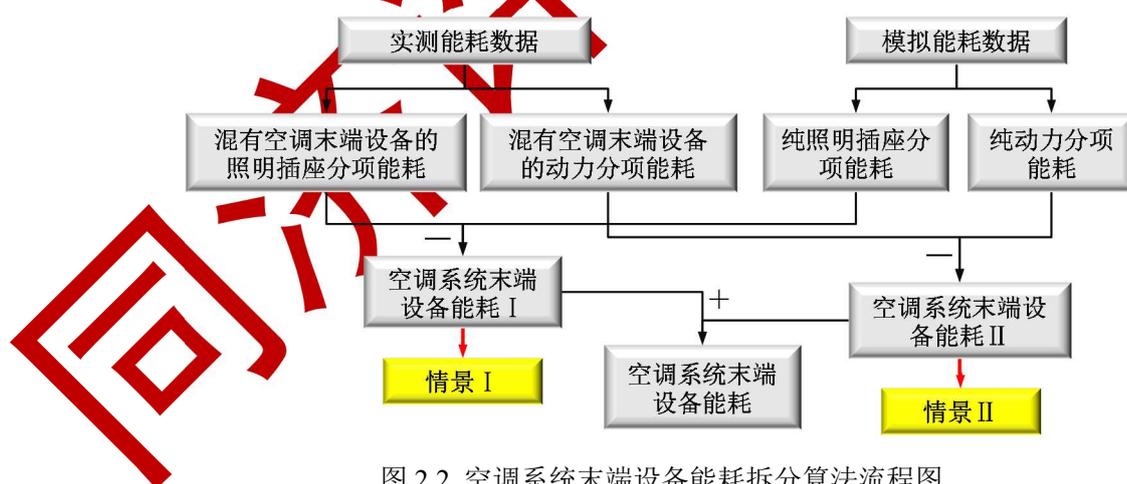


图 2.2 空调系统末端设备能耗拆分算法流程图

首先, 预先确立一系列与建筑外部气象参数无关而只与时间相关的基本傅里叶模型, 用来计算照明插座分项和动力分项的逐时能耗, 如方程 (2.1) 所示; 然后, 通过逐步回归的方式确定最终的形式简单且适用的具体的傅里叶模型形式; 最后根据方程 (2.2) 来计算空调系统末端设备逐时能耗拆分。

$$E_L(\text{or } E_P) = a + f(d) + \varphi(h) + \phi(d, h) + \varepsilon \quad (2.1)$$

$$f(d) = \sum_{m=1}^{m_{\max}} [\alpha_m \sin(2\pi\omega_m)d + \beta_m \cos(2\pi\omega_m)d] \quad (2.1-1)$$

$$\varphi(h) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] \quad (2.1-2)$$

$$\phi(d, h) = \sum_{m=1}^{m_{\max}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} [\gamma_m \sin(2\pi\omega_m)d + \lambda_m \cos(2\pi\omega_m)d] \times [\mu_n \sin(2\pi\omega_n)h + \kappa_n \cos(2\pi\omega_n)h] \quad (2.1-3)$$

$$\omega_m = \frac{m}{365}, m=1\sim 182, \quad \omega_n = \frac{n}{24}, n=1\sim 12 \quad (2.1-4)$$

其中， $a$  表示能耗平均值； $f(d)$  表示能耗随着日或者季节的变化，周期为一年； $\varphi(h)$  表示能耗随着小时的变化，周期为天； $\phi(d, h)$  则表示能耗受日和小时共同影响的情况； $\varepsilon$  表示误差。 $\alpha_m \sim \kappa_n$  为傅里叶模型中的参数， $2\pi\omega_m$  和  $2\pi\omega_n$  分别为年周期和天周期下的谐波频率。

$$E_i = E_{i1} + E_{i2} \quad (2.2)$$

$$E_{i1} = E_{LM} - E_L \quad (2.2-1)$$

$$E_{i2} = E_{PM} - E_P \quad (2.2-2)$$

本文选取几个评价指标，如下面公式 (2.3) ~ (2.5) 所示，对照明动力分项逐时能耗计算结果和空调系统末端设备逐时能耗拆分结果进行评价。

变异系数 CV:

$$CV = \frac{\sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^N (E_{mi} - E_{si})^2}{N} \right)}}{\left( \frac{\sum_{i=1}^N E_{mi}}{N} \right)} \quad (2.3)$$

相对误差 RE:

$$RE = \frac{E_{mi} - E_{si}}{E_{mi}} \quad (2.4)$$

平均相对误差 MRE:

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^N |E_{mi} - E_{si}|}{\sum_{i=1}^N E_{mi}} \quad (2.5)$$

## 2.3 具体傅里叶拆分模型的建立

本章上一节中，已经对傅里叶拆分模型进行了概要地介绍，这一节将针对上文中介绍的四栋实际大型公建建立具体的傅里叶拆分模型，在建立具体模型之前要先阐述两个问题：1) 日类型的确定和 2) 逐步回归方法的介绍。

### 2.3.1 日类型的确定

如前文中 Dhar 的研究中提到的商业建筑的工作日与非工作日用能特征是不一样的，为了提高模型的准确度，在对其进行能耗模拟的时候需要根据日期特性分别建立模型。下面作者以建筑 B 为主要案例对 4 栋商业建筑的用能周期特征和日类型进行分析。图 2.3 展示了建筑 B 在 2013 年 4 月 10 日到 2013 年 7 月 18 日期间 100 天的照明插座分项的逐时电耗计量数据。连续两天能耗较低的，如图中红色圆圈中所示，为周末；连续三天或者三天以上能耗较低，如图中橘色圆圈中所示，为节假日；连续五天能耗较高的为正常的工作日；连续高能耗时间小于五天或者大于五天的现象，如图中黑色圆圈中所示，是由于节假日调休造成的。通过该图大致可以得出以下结论：建筑 B 工作日的能耗水平和特征几乎是一样的，非工作日的能耗水平和特征也基本一致，但是工作日与非工作日之间的能耗水平则相差甚远。

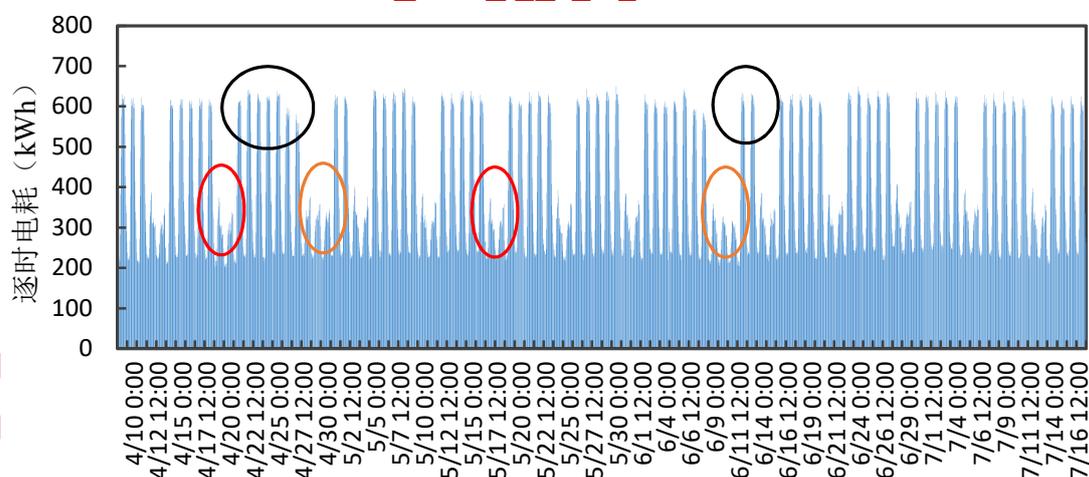


图 2.3 建筑 B 中照明插座分项逐时能耗

根据上述分析，本文选择根据日均能耗值来判别日类型。本文将研究的 4 栋建筑的日均能耗数据列于下表 2.2。根据该表的日均能耗数据，可以将建筑 A 和建筑 B 分为两个日类型：工作日（0）和非工作日（1、2、3）；而建筑 C 和建筑 D 则只有一个日类型：全年日类型（0、1、2、3）。虽然建筑 B 为一栋综合性商业建筑，但是它的商场面积占比很小，它的整体用能特性的日类型划分与办公

建筑几乎一样。所以可以得出以下结论：办公建筑可以分为两个日类型，工作日和非工作日；商场建筑则只有一个日类型，为全年日类型。同一个日类型下的照明插座分项逐时能耗则以日为周期，以小时为变量变化，并且暂时不排除年周期的微弱影响。

表 2.2 照明插座分项日均能耗汇总表

日类型		照明插座分项日均能耗值 (kWh)			
编号	名称	A	B	C	D
0	工作日	11737	10304	22359	14410
1	周末	7537	6927	22602	14652
2	节假日	6853	6719	22031	14714
3	春节	5913	6594	21501	14095

用和上文同样的方法，对动力分项逐时能耗进行周期特征和日类型的分析。此处需要说明，非常的遗憾，由于建筑 A 和建筑 B 两栋办公建筑的动力分项计量不完善，本章只对建筑 C 和建筑 D 两栋商场建筑进行动力分项空调末端拆分的研究。建筑 C 和建筑 D 的动力分项日均能耗汇总于表 2.3。日类型分析结果和照明插座分项的相同，建筑 C 和建筑 D 只有一个日类型：全年日类型，且逐时能耗呈现以日为周期的变化特征。总结为商场建筑的动力分项能耗只有一个日类型：全年日类型。

表 2.3 动力分项日均能耗汇总表

日类型		动力分项日均能耗值 (kWh)	
编号	名称	C	D
0	工作日	2437	3448
1	周末	2457	3578
2	节假日	2495	3703
3	春节	2401	3506

### 2.3.2 情景 I 拆分模型的建立

在上述的傅里叶模型（公式（2.1））基础上使用全年的逐时电耗数据通过逐步回归的方式确定照明插座分项逐时能耗的计算模型。两栋办公建筑工作日和两栋商场全年的照明插座分项逐时能耗逐步回归过程见表 2.4 和表 2.5，表中对  $\text{Partial } R^2$  大于等于 0.001 的变量用红色加粗字体表示，不难看出影响模型结果的主要输入变量是小时变量“h”，日期变量“d”对模型精度的影响非常微小，几乎可以忽略不计。

表 2.4 办公建筑工作日照明插座分项逐时能耗逐步回归结果

编号	变量	建筑 A			建筑 B		
		R <sup>2</sup>	Partial R <sup>2</sup>	CV(%)	R <sup>2</sup>	Partial R <sup>2</sup>	CV(%)
1	a	/	/	/	/	/	/
2	SH1	0.2660	<b>0.2660</b>	32.73	0.3199	<b>0.3199</b>	32.75
3	CH1	0.9135	<b>0.6475</b>	11.24	0.9468	<b>0.6269</b>	9.16
4	SH2	0.9137	0.0002	11.23	0.9469	0.0001	9.15
5	CH2	0.9211	<b>0.0074</b>	10.74	0.9521	<b>0.0052</b>	8.69
6	SH3	0.9557	<b>0.0346</b>	8.04	0.9799	<b>0.0278</b>	5.63
7	CH3	0.9560	0.0003	8.02	0.9803	0.0004	5.58
8	SH4	0.9625	<b>0.0065</b>	7.42	0.9834	<b>0.0051</b>	5.12
9	CH4	0.9627	0.0002	7.39	0.9836	0.0002	5.09
10	SH5	0.9639	<b>0.0012</b>	7.16	0.9851	<b>0.0045</b>	4.84
11	CH5	0.9644	0.0005	7.12	0.9854	0.0003	4.81
12	SH6	0.9651	0.0007	7.02	0.9854	0.0000	4.81
13	CH6	0.9665	<b>0.0014</b>	6.77	0.9859	0.0005	4.71
14	SH12	0.9665	0.0000	6.77	0.9859	0.0000	4.71
15	CH12	0.9670	0.0005	6.77	0.9860	0.0001	4.71
16	SD1	0.9720	<b>0.0050</b>	6.40	0.9860	0.0000	4.70
17	CD1	0.9754	<b>0.0034</b>	6.00	0.9863	0.0003	4.65
18	SD2	0.9777	<b>0.0023</b>	5.71	0.9869	0.0006	4.55
19	CD2	0.9788	<b>0.0011</b>	5.57	0.9869	0.0000	4.55
20	SD3	0.9788	0.0000	5.57	0.9878	0.0009	4.39
21	CD3	0.9789	0.0001	5.95	0.9878	0.0000	4.38
22	SD4	0.9789	0.0000	5.55	0.9878	0.0000	4.39
23	CD4	0.9793	0.0004	5.50	0.9878	0.0000	4.38
24	SD12	0.9795	0.0002	5.48	0.9878	0.0000	4.38
25	CD12	0.9795	0.0000	5.47	0.9879	0.0001	4.38
26	SH1*SD1	0.9796	0.0001	5.47	0.9882	0.0003	4.38
27	SH1*CD1	0.9796	0.0000	5.47	0.9890	0.0008	4.17
28	CH1*SD1	0.9797	0.0001	5.45	0.9890	0.0000	4.17
29	CH1*CD1	0.9797	0.0000	5.45	0.9897	0.0007	4.03

表 2.5 商场建筑全年照明插座分项逐时能耗逐步回归结果

编号	变量	C			D		
		R <sup>2</sup>	Partial R <sup>2</sup>	CV(%)	R <sup>2</sup>	Partial R <sup>2</sup>	CV(%)
1	a	/	/	/	/	/	/
2	SH1	0.6693	<b>0.6693</b>	34.83	0.7337	<b>0.7337</b>	39.65
3	CH1	0.8363	<b>0.1670</b>	24.51	0.8559	<b>0.1222</b>	29.16

4	SH2	0.8364	0.0001	24.50	0.8634	<b>0.0075</b>	28.40
5	CH2	0.8386	<b>0.0022</b>	24.34	0.8643	0.0009	28.31
6	SH3	0.8391	0.0005	24.30	0.8735	<b>0.0092</b>	27.34
7	CH3	0.9485	<b>0.1094</b>	13.75	0.9489	<b>0.0754</b>	17.37
8	SH4	0.9487	0.0002	13.72	0.9493	0.0004	17.31
9	CH4	0.9490	0.0003	13.68	0.9493	0.0000	17.31
10	SH5	0.9660	<b>0.0170</b>	11.17	0.9543	<b>0.0050</b>	16.44
11	CH5	0.9712	<b>0.0052</b>	10.29	0.9708	<b>0.0165</b>	13.13
12	SH6	0.9712	0.0000	10.28	0.9711	0.0003	13.06
13	CH6	0.9724	<b>0.0012</b>	10.06	0.9719	0.0008	12.89
14	SH7	0.9787	<b>0.0063</b>	8.81	0.9808	<b>0.0049</b>	10.65
15	CH7	0.9806	<b>0.0019</b>	8.45	0.9816	0.0008	10.42
16	SH8	0.9809	0.0003	8.39	0.9819	0.0003	10.35
17	CH8	0.9809	0.0000	8.37	0.9821	0.0002	10.28
18	SH9	0.9811	0.0002	8.34	0.9870	<b>0.0049</b>	8.76
19	CH9	0.9829	<b>0.0018</b>	7.92	0.9882	<b>0.0012</b>	8.35
20	SH10	0.9831	0.0002	7.88	0.9884	0.0002	8.27
21	CH10	0.9832	0.0001	7.87	0.9884	0.0000	8.27
22	SH11	0.9832	0.0000	7.87	0.9890	0.0006	8.07
23	CH11	0.9836	0.0004	7.76	0.9931	<b>0.0041</b>	6.38
24	SH12	0.9836	0.0000	7.76	0.9931	0.0000	6.38
25	CH12	0.9837	0.0001	7.74	0.9932	0.0001	6.33
26	SD1	0.9837	0.0000	7.74	0.9939	0.0007	6.02
27	CD1	0.9840	0.0003	7.69	0.9945	0.0006	5.73
28	SD2	0.9840	0.0000	7.69	0.9945	0.0000	5.73
29	CD2	0.9841	0.0001	7.67	0.9945	0.0000	5.71
30	SD3	0.9845	0.0004	7.60	0.9945	0.0000	5.70
31	CD3	0.9845	0.0000	7.59	0.9945	0.0000	5.70
32	SD4	0.9847	0.0002	7.57	0.9945	0.0000	5.70
33	CD4	0.9847	0.0000	7.56	0.9945	0.0000	5.70
34	SH1*SD1	0.9848	0.0001	7.54	0.9946	0.0001	5.68
35	SH1*CD1	0.9861	<b>0.0013</b>	7.30	0.9946	0.0000	5.67
36	CH1*SD1	0.9862	0.0001	7.29	0.9946	0.0000	5.67
37	CH1*CD1	0.9873	<b>0.0011</b>	7.07	0.9946	0.0000	5.67

模型中不同的项对模型精度的影响程度由高到低排列结果见表 2.7。同时对两栋办公建筑影响最大的前 7 项为 CH1、SH1、SH3、CH2、SH4、CH6 和 SH5，而同时对两栋商场建筑影响最大的为 5 项 SH1、CH1、CH3、CH5 和 SH7。且一次频率余弦项对办公建筑的影响最大，而商场建筑的特性则刚好相反，一次频率

正弦项对其影响最大。

为了使空调末端能耗拆分的准确度高,应该尽量提高照明插座分项逐时能耗计算模型的精度,同时为了使模型的结构形式简单,易于推广使用,又应该尽可能的简化模型,这两个方面是相互矛盾的。综合考虑两栋办公建筑的逐步回归结果,尽可能涵盖所有  $\text{Partial } R^2$  大于等于 0.001 的变量,但又为了保持模型结构的简单,有些  $\text{Partial } R^2$  小于 0.001 的变量也没有被剔除,最终确立了适用于办公建筑的模型,如公式 (2.6) 所示。该模型可以保证两栋办公建筑照明插座分项逐时能耗计算模型的  $R^2$  分别大于 0.967 和 0.986, CV 值 (计算方法见公式 (2.3)) 则分别控制在 8% 和 5% 以内。可以看出在公式 (2.6) 中有部分变量对模型精度的影响不大,例如 SH2、CH3 和 CH4,但这些变量并没有剔除掉,主要是为了保持模型表达的简易,当然也一定程度上提高了精度。

$$E_{L\_Office} = a + \sum_{n=1}^6 [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] + \varepsilon \quad (2.6)$$

同样的,综合考虑两栋商场建筑的逐步回归结果,最终确立了适用于商场建筑照明插座分项逐时能耗计算的模型,如公式 (2.7) 所示。该模型可以保证两栋商场建筑照明插座分项能耗模型的  $R^2$  分别大于 0.983 和 0.993, CV 值则分别控制在 8% 和 7% 以内。

$$E_{L\_Shopping} = a + \sum_{n=1}^6 [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] + \varepsilon \quad (2.7)$$

### 2.3.3 情景 1 | 拆分模型的建立

与照明插座分项逐时计算模型的建立相同,本小节使用全年的逐时电耗数据通过逐步回归的方式确定动力分项逐时能耗计算的模型。逐步回归过程见表 2.6,同样的表中对  $\text{Partial } R^2$  大于等于 0.001 的变量用红色加粗字体表示,不难看出影响模型结果的主要输入变量依然是小时变量“h”,日期变量“d”对模型精度的影响非常微小,几乎可以忽略不计。不同项对模型精度的影响程度由高到低排列结果,见表 2.7。同时对两栋商场的动力分项能耗预测影响最大的为 7 项 SH1、CH1、CH3、SH5、CH5、SH2 和 SH7,与影响商场建筑照明插座分项模型的变量几乎一致。

表 2.6 商场建筑全年动力分项逐时能耗逐步回归结果

编号	变量	C			D		
		$R^2$	$\text{Partial } R^2$	CV(%)	$R^2$	$\text{Partial } R^2$	CV(%)
1	a	/	/	/	/	/	/

2	SH1	0.6311	<b>0.6311</b>	46.48	0.6623	<b>0.6623</b>	34.02
3	CH1	0.8723	<b>0.2412</b>	27.35	0.8526	<b>0.1903</b>	22.48
4	SH2	0.8753	<b>0.0030</b>	27.03	0.8582	<b>0.0056</b>	22.04
5	CH2	0.8768	<b>0.0015</b>	26.87	0.8597	<b>0.0015</b>	21.93
6	SH3	0.8789	<b>0.0021</b>	26.64	0.8602	0.0005	21.90
7	CH3	0.9615	<b>0.0826</b>	15.02	0.9347	<b>0.0745</b>	14.96
8	SH4	0.9631	<b>0.0016</b>	14.71	0.9352	0.0005	14.91
9	CH4	0.9639	0.0008	14.55	0.9372	<b>0.0020</b>	14.67
10	SH5	0.9776	<b>0.0137</b>	11.46	0.9473	<b>0.0101</b>	13.44
11	CH5	0.9811	<b>0.0035</b>	10.53	0.9554	<b>0.0081</b>	12.37
12	SH6	0.9811	0.0000	10.53	0.9555	0.0001	12.36
13	CH6	0.9826	<b>0.0015</b>	10.10	0.9582	<b>0.0037</b>	14.97
14	SH7	0.9852	<b>0.0026</b>	9.33	0.9658	<b>0.0076</b>	10.89
15	CH7	0.9873	<b>0.0021</b>	8.62	0.9667	<b>0.0009</b>	10.48
16	SH8	0.9880	0.0007	8.38	0.9689	<b>0.0022</b>	10.37
17	CH8	0.9881	0.0001	8.36	0.9702	<b>0.0013</b>	10.08
18	SH9	0.9883	0.0002	8.30	0.9711	0.0009	9.96
19	CH9	0.9903	<b>0.0026</b>	7.54	0.9744	<b>0.0033</b>	9.38
20	SH10	0.9908	0.0005	7.34	0.9753	0.0009	9.30
21	CH10	0.9912	0.0004	7.19	0.9759	0.0006	9.23
22	SH11	0.9915	0.0003	7.05	0.9759	0.0000	9.23
23	CH11	0.9915	0.0000	7.05	0.9773	<b>0.0014</b>	8.71
24	SH12	0.9915	0.0000	7.05	0.9773	0.0000	8.71
25	CH12	0.9919	0.0004	6.90	0.9782	0.0009	8.45
26	SD1	0.9926	0.0007	6.70	0.9791	0.0009	8.28
27	CD1	0.9928	0.0002	6.50	0.9808	<b>0.0017</b>	8.12
28	SD2	0.9929	0.0001	6.47	0.9812	0.0004	8.10
29	CD2	0.9930	0.0001	6.43	0.9823	<b>0.0011</b>	7.80
30	SD3	0.9930	0.0000	6.42	0.9832	0.0009	7.60
31	CD3	0.9930	0.0000	6.42	0.9837	0.0005	7.49
32	SD4	0.9930	0.0000	6.42	0.9838	0.0001	7.47
33	CD4	0.9930	0.0000	6.41	0.9839	0.0001	7.44
34	SH1*SD1	0.9933	0.0003	6.27	0.9839	0.0000	7.44
35	SH1*CD1	0.9933	0.0000	6.27	0.9847	0.0008	7.26
36	CH1*SD1	0.9934	0.0001	6.23	0.9849	0.0002	7.21
37	CH1*CD1	0.9934	0.0000	6.22	0.9851	0.0002	7.16

表 2.7 回归模型中不同变量对模型精度的影响排序

变量	编号	照明插座分项能耗计算模型				动力分项能耗计算模型	
		A	B	C	D	C	D
H	1	CH1	CH1	SH1	SH1	SH1	SH1
	2	SH1	SH1	CH1	CH1	CH1	CH1
	3	SH3	SH3	CH3	CH3	CH3	CH3
	4	CH2	CH2	SH5	CH5	SH5	SH5
	5	SH4	SH4	SH7	SH3	CH5	CH5
	6	CH6	SH5	CH5	SH7	SH2	SH7
	7	SH5	CH6	CH2	SH2	SH7	SH2
	8	SH6	CH3	CH7	SH5	SH3	CH9
	9	CH5	CH5	CH9	SH9	CH7	CH6
	10	CH12	CH4	CH6	CH11	CH9	SH8
	11	CH3	SH2	SH3	CH9	SH4	CH4
	12	CH4	CH12	CH11	CH2	CH2	CH2
	13	SH2	/	CH4	CH7	CH6	CH11
	14	/	/	SH8	CH6	CH4	CH8
	15	/	/	SH4	SH11	SH8	CH7
	16	/	/	SH9	SH4	SH10	SH10
	17	/	/	SH10	SH8	CH10	CH12
	18	/	/	SH2	SH6	CH8	SH9
	19	/	/	CH10	SH10	SH11	CH10
	20	/	/	CH12	CH8	SH9	SH3
	21	/	/	/	CH12	CH12	SH4
	22	/	/	/	/	/	SH6
D	1	SD1	SD3	SD3	SD1	SD1	CD1
	2	CD1	SD2	CD1	CD1	CD1	CD2
	3	SD2	CD1	SD4	/	SD2	SD1
	4	CD2	CD12	CD2	/	CD2	SD3
	5	CD4	/	/	/	/	CD3
	6	SD12	/	/	/	/	SD2
	7	CD3	/	/	/	/	SD4
	8	/	/	/	/	/	CD4
H,D	1	SH1*SD1	SH1*CD1	SH1*CD1	SH1*SD1	SH1*SD1	SH1*CD1
	2	CH1*SD1	CH1*CD1	CH1*CD1	/	CH1*SD1	CH1*SD1
	3	/	SH1*SD1	SH1*SD1	/	/	CH1*CD1
	4	/	/	CH1*SD1	/	/	SH1*SD1

综合考虑两栋商场建筑的逐步回归结果，最终确立了适用于商场建筑模型，

如公式 (2.8) 所示。该模型可以保证两栋商场建筑动力分项能耗模型的  $R^2$  分别大于 0.992 和 0.977, CV 值则分别控制在 7% 和 9% 以内。

$$E_{P\_Shopping} = a + \sum_{n=1}^{11} [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] + \varepsilon \quad (2.8)$$

### 2.3.4 数据的选取

上述照明插座分项和动力分项逐时能耗的计算模型是使用四栋实际建筑的全年能耗数据通过逐步回归的方式获得的,本章要解决的实际问题就是:绝大部分建筑空调系统末端设备能耗是没有单独计量的,所以是无法获得全年数据来训练模型的。实际操作过程中可以选取过渡季节空调系统未开启时段内的照明插座分项和动力分项能耗作为训练数据,对上述的模型 (2.6) ~ (2.8) 进行训练,获得模型中的参数,然后对空调季节的照明插座分项和动力分项能耗进行计算,从而获采暖季节和空调季节的照明插座分项和动力分项能耗,然后用实际采集到的含有空调系统末端设备能耗的分项数据减去计算得到的分项能耗数据,即可获得空调末端的拆分能耗。此处需要着重说明三个问题:

**关于分项电耗的采集。**分项计量系统中电耗数据的采集原理是使用互感器功率表对建筑的各个分项能耗进行计量,数据的采集周期为  $\tau$ , 即每小时采集  $60/\tau$  次数据,采集数值为瞬时功率值,逐时能耗的计算方式如公式 (2.9) 所示。

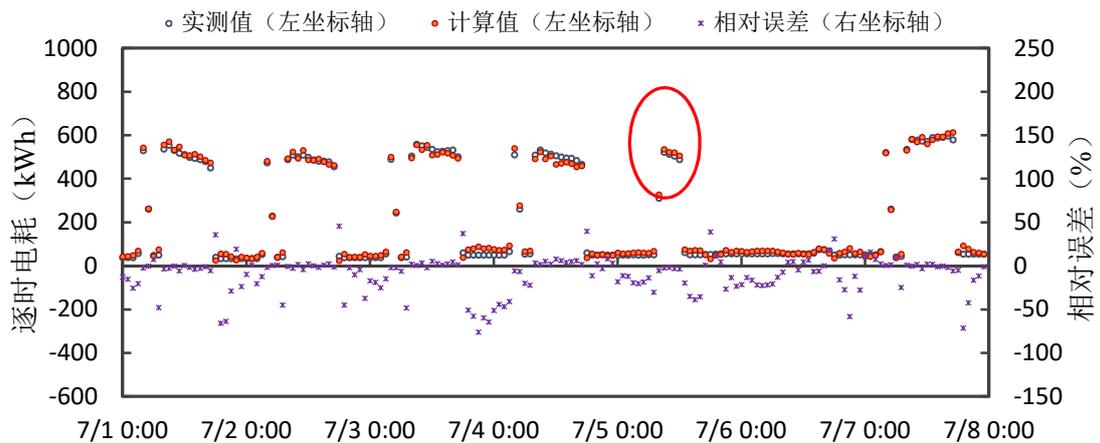
$$E = \sum_{i=1}^{60/\tau} \left( Pow_i \times \frac{60}{t} \right) \quad (2.9)$$

其中,  $Pow_i$  为瞬时功率, W 或 kW;  $t$  为数据采集周期, min。

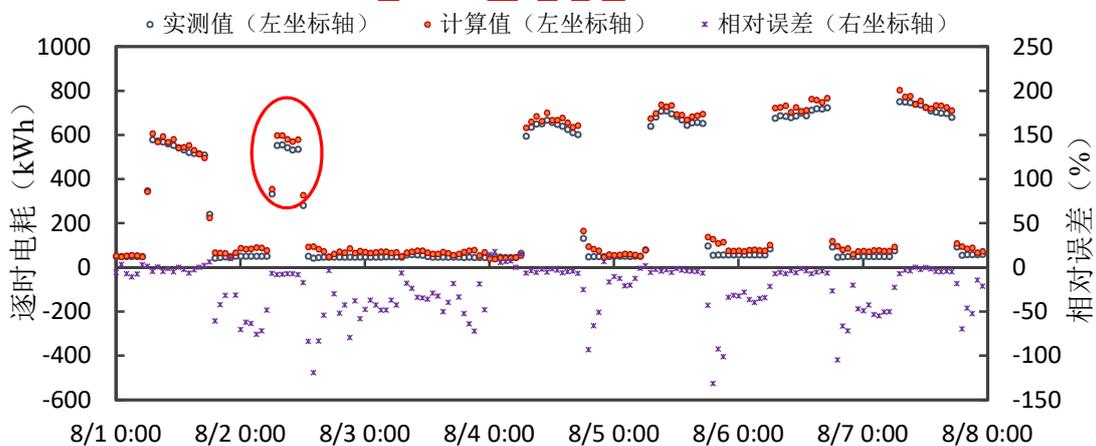
**关于训练数据的选取。**本文采用过渡季节的数据作为训练数据,所谓过渡季节是指空调系统不运行的季节。一般情况下,取每一年的 4、5、10 和 11 四个月作为过渡季节,但这并不意味着这四个月的数据全部可以用于训练模型,因为在过渡季空调系统也有可能开启,本文选择的数据是分项计量数据中空调系统的冷热源、冷冻水泵和热水泵的能耗均为 0 或者均为待机能耗时刻的照明插座分项能耗数据。

**关于验证数据的选取。**在决定如何选择验证数据之前,先看两张图。图 2.4 中的 (a) (b) 两图为建筑 A 在 2014 年 7 月 1 日~7 日, 8 月 1 日~7 日两周时间段内的空调系统末端设备逐时能耗拆分结果,从这两张图上可以看出下面几个现象: 1) 空调系统的运行时间和办公建筑中人员的工作时间呈现一致性; 2) 实测数据与预测数据的分布几乎一致,这说明拆分结果非常好,误差非常小; 3) 相对误差的分布波动很大,对于白天空调末端开启时段而言,相对误差是非常小的,

大约在 5% 范围以内，但是在夜间，空调末端处于待机状态，此时虽然绝对误差很小，但是相对误差很大。实际中应该关心的是空调运行时刻的拆分准确程度，所以对于运行时刻应该着重分析拆分结果的相对误差；对于非空调运行时刻的相对误差则并不关心，因为这不能说明什么问题，反而拆分结果本身或者说绝对误差是值得被关注的，因为这对于空调系统运行的故障诊断具有重要意义。例如图 2.4 中两个红色圆圈位置表明，在周六上午空调系统末端设备有几个小时时间是开启的，如果不是因为加班等原因，则可以判断为末端非正常开启，这是一种运行故障。



(a) 2014.07.01 (周二) ~ 2014.07.07 (周一)



(b) 2014.08.01 (周五) ~ 2014.08.07 (周四)

图 2.4 建筑 B 部分时段内空调系统末端设备能耗拆分结果

综上所述在下文中对空调系统末端设备拆分数据的分析选取的是空调系统的运行时间，对于办公建筑，空调系统运行时间为空调季节的工作日的上班时时间，对于商场建筑则为全年空调季节的营业时间。在本文中，选取每年的 12 月 1 日到次年的 3 月 31 日为采暖季节，每年的 6 月 1 日到 9 月 30 日为制冷季节，统称

为空调季节。

本小节通过逐步回归的方式建立了办公建筑和商场建筑的照明插座分项和动力分项逐时能耗的计算模型，需要说明的是这些模型的逐步回归计算使用的是四栋建筑全年的逐时电耗数据。有了这些模型，则可对照明插座分项和动力分项逐时能耗进行计算，然后根据图 2.2 所示的拆分算法流程和公式 (2.2) 即可进行空调系统末端设备能耗的拆分计算，对拆分结果的评价依然可以使用公式 (2.3) ~ (2.5) 的评价指标。

## 2.4 应用拆分算法的计算过程

上文中介绍了傅里叶拆分模型的原理、形式、评价方法、不同情境下具体拆分模型的建立过程和数据的选取，是对该拆分算法的一个摸索过程，而本小节是对上述拆分模型的归纳总结，详细阐述在实际建筑中应用傅里叶拆分模型进行空调系统末端设备能耗计算的过程，该计算过程分为 5 个主要步骤。

### 步骤 1：确定日类型种类

根据上文的研究，已经确定办公建筑分为“工作日”和“非工作日”两个日类型，而商场建筑只有一个日类型，其他类型的建筑本文研究暂不涉及，针对一栋实际建筑进行空调系统末端设备能耗拆分时，首先确定该建筑的日类型种类。

### 步骤 2：训练数据和验证数据的选取

训练数据和验证数据的选取见本章 2.3.5 节，此处需要说明，在本文的研究中使用过渡季数据作为训练数据，使用空调季数据作为验证数据，是因为本文所选用的四栋建筑为空调系统末端设备能耗数据具有独立计量的建筑，即全年的数据均可获得；而实际应用过程中会选择使用该拆分算法的建筑必然是空调系统末端设备能耗不具备独立计量的建筑，所以依然使用过渡季数据作为训练数据，空调季数据作为验证数据，这显然是行不通的，因为空调季数据是混合能耗数据，是有待拆分的，所以应将过渡季数据一部分用以训练模型，另一部分留作验证模型，验证过的模型才可用来对空调季数据进行拆分。

### 步骤 3：确定情景类型

根据上文的研究，已经将空调系统末端能耗掺混情况分为两个情景，情景 I 是空调系统末端设备能耗与照明插座分项掺混，情景 II 是空调系统末端设备能耗与动力分项掺混，所以在此步骤中，需要确定待拆分的对象属于哪一种情景，然后选取适当的含有空调系统末端能耗的照明插座分项或者动力分项逐时能耗的计算模型（公式 (2.6)、公式 (2.7) 或者公式 (2.8)）。

### 步骤 4：计算纯照明插座分项或者动力分项逐时能耗

步骤 3 中已经根据空调系统末端设备能耗的掺混情景, 确定了应该使用的具体模型, 该模型可以计算出不含有空调系统末端能耗的照明插座分项或者动力分项的逐时能耗。计算过程如下:

- a. 选择数据处理工具, 本文选用的 MATLAB。
- b. 步骤 3 中已经确定了训练数据, 此时使用选择的训练数据对模型进行训练, 此时  $E_L$  (或  $E_p$ ) 和时间变量均为为已知量, 可以计算出模型中的参数  $a$ 、 $\delta_n$  和  $\eta_n$ , 即可获得确定的模型形式。
- c. 步骤 3 中同样确定了验证数据, 此时使用验证数据对上一步获得的模型进行验证, 确保模型准确性。
- d. 使用验证过的模型对空调季的混合能耗中的照明拆做分项或者动力分项的逐时能耗进行计算。

步骤 5: 空调系统末端设备能耗拆分计算

根据减法原则, 使用实际测量得到的混合有空调系统末端设备能耗的照明插座分项或者动力分项的逐时能耗数据减去上述步骤 4 计算得到的纯照明插座分项或者动力分项的逐时能耗便可以得到空调系统末端设备的逐时能耗。

## 2.5 案例分析

本小节对上面介绍的四栋实际建筑和建立的傅里叶拆分模型进行验证, 首先对建筑的基本情况介绍, 然后分别完成空调系统设备能耗与照明插座分项和动力分项掺混的拆分计算和结果验证及分析。

### 2.5.1 建筑描述

如上文所述, 本章节研究选取的位于上海市的四栋建筑都安装有详细的分项计量系统, 计量数据的分类情况如图 2.1 所示, 且空调系统末端设备具有独立的计量。四栋建筑的基本信息见表 2.1, 建筑 A 和建筑 C 的分项计量数据采集起始时间为 2013 年 10 月, 建筑 B 和建筑 D 的分项计量数据采集起始时间为 2012 年 12 月, 所以本文选取建筑 A 和建筑 C 在 2013 年 11 月 1 日到 2014 年 10 月 31 日的一整年的数据作为研究对象, 选取建筑 B 和建筑 D 在 2013 年全年的数据作为研究对象, 四栋建筑的分项计量数据的采集周期均为 5 分钟, 不同分项的逐时电耗数据可以根据公式 (2.9) 进行计算。

对于办公建筑 A 和建筑 B, 空调系统的运行时间等同于内部人员的工作时间, 考虑到不同单位的工作时间存在些许差异, 如有些单位的上班时间为上午 9:00, 而有的单位则为上午 8:30, 有的单位下班时间为下午 17:00, 而有的单位

为下午 17:30；还有部分工作人员会出现提前上班或者加班等现象，所以本文将办公建筑空调系统的运行时间定义为工作日的 8:00~18:00。对于商场而言，一般开始营业的时间都在上午 9:00~10:00 这段时间，关门时间为晚上 21:00~22:00 这段时间，而一般的商场会在晚上 9:00 左右就开始关闭空调，所以本文将商场空调系统的运行时间定义为全年的 9:00~21:00。

## 2.5.2 情景 I 案例分析

### 2.5.2.1 情景 I 计算过程

根据本章 2.4 节内容，情景 I 案例分析的计算过程如下：

步骤 1：确定日类型种类

建筑 A 和 B 为办公建筑，分为“工作日”和“非工作日”两个日类型，建筑 C 和 D 为商场建筑，只有一个日类型。

步骤 2：训练数据和验证数据的选取

本文研究的四栋建筑均为空调系统末端设备能耗数据具有独立计量的建筑，为了方便阐述该拆分模型在空调季节的拆分结果，本文选择使用过渡季数据作为训练数据，空调季数据作为验证数据。

步骤 3：确定情景类型

该小节的案例分析属于情景 I，即空调系统末端设备能耗与照明插座分项掺混，故选取计算模型公式 (2.6) 和公式 (2.7)。

步骤 4：计算纯照明插座分项逐时能耗

a. 选择 MATLAB 作为数据处理工具。

b. 选择 4、5、10 和 11 月过渡季数据作为训练数据，计算出模型中的参数  $a$ 、 $\delta_n$  和  $\eta_n$ ，如表 2.8 所示，所以模型形式已经确定。

表 2.8 情景 I 训练得到的模型参数汇总表

建筑 参数	A		B		C	D
	工作日	非工作日	工作日	非工作日	全年	全年
$a$	500.7	313.7	429.1	285.6	937.5	652.9
$\delta_1$	-140.4	-25.76	-132.4	-51.58	-634.6	-597.6
$\delta_2$	4.815	0.434	-3.012	-20.96	19.93	-59.87
$\delta_3$	50.66	-8.136	39.3	-0.2305	-16.02	-68.32
$\delta_4$	-21.8	-3.648	-13.74	-2.142	-10.5	-13.34
$\delta_5$	-5.083	-0.1771	-9.561	-3.985	106.3	48.95
$\delta_6$	7.533	-1.768	1.265	3.552	-7.771	-13.15
$\delta_7$	/	/	/	/	59.69	64.57

$\delta_8$	/	/	/	/	11	10.96
$\delta_9$	/	/	/	/	7.147	50.65
$\delta_{10}$	/	/	/	/	7.922	10.02
$\delta_{11}$	/	/	/	/	-2.291	15.93
$\eta_1$	-219.5	-33.2	-184.3	-36.39	-314.7	-242.4
$\eta_2$	23.37	-8.842	16.87	12.35	34.78	23.77
$\eta_3$	-3.445	5.236	-3.718	-14.24	-262.6	-190.8
$\eta_4$	-2.579	0.1687	3.085	-1.206	20.27	-2.28
$\eta_5$	4.815	1.741	3.755	-4.555	-53.06	-88.59
$\eta_6$	-8.488	0.509	-5.595	0.004829	-7.771	-19.29
$\eta_7$	/	/	/	/	35.42	21.18
$\eta_8$	/	/	/	/	-6.533	-12.09
$\eta_9$	/	/	/	/	32.23	23.7
$\eta_{10}$	/	/	/	/	4.843	-1.348
$\eta_{11}$	/	/	/	/	15.44	45.3

- c. 因为本文旨在说明建立的拆分算法准确可靠, 所以选择只用空调季数据直接作为模型的验证数据, 所以步骤 c 和 d 合并为一步。使用步骤 b 获得的模型对空调季的混合能耗中的照明拆做分项逐时能耗进行计算。

#### 步骤 5: 空调系统末端设备能耗拆分计算

根据减法原则, 使用实际测量得到的混合有空调系统末端设备能耗的照明插座分项的逐时能耗数据减去上述步骤 4 计算得到的纯照明插座分项的逐时能耗得到空调系统末端设备的逐时能耗。

下面对计算结果进行分析。

### 2.5.2.2 照明插座分项能耗计算模型的训练与验证

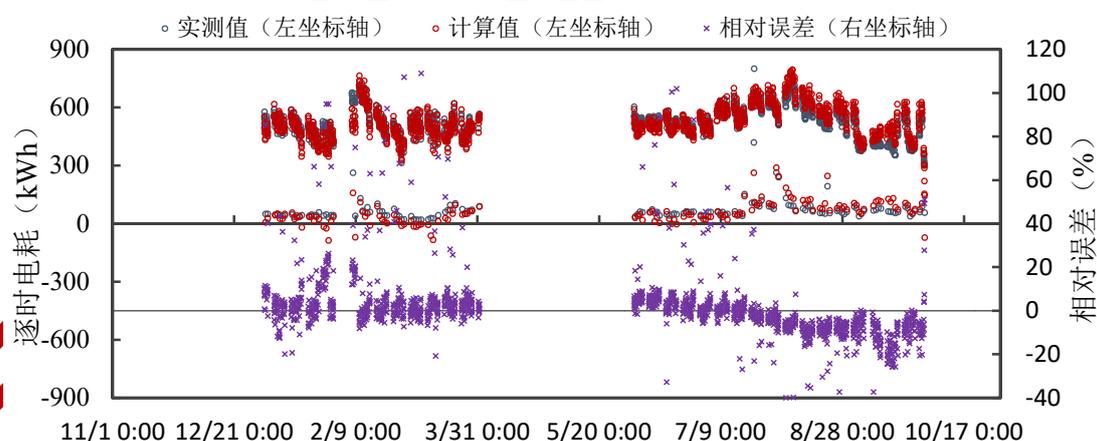
表 2.9 照明插座分项能耗计算模型的训练和验证结果

建筑名称	时间	训练数据	验证数据	日类型	训练模型 R <sup>2</sup>	训练模型 CV(%)	验证模型 CV(%)
A	2013.11.01~2014.10.31			工作日	0.9550	7.48	6.62
				非工作日	0.7453	7.47	9.29
B	2013.01.01~2013.12.31	过渡季 (4、5、10 和 11 月)	空调季 (12.01~次年 03.31) + (06.01~09.30)	工作日	0.9879	4.25	4.84
				非工作日	0.7663	10.52	10.65
C	2013.11.01~2014.10.31(09.19~30 缺数)			全年	0.9847	7.27	8.22
D	2013.01.01~2013.12.31			全年	0.9950	5.38	4.50

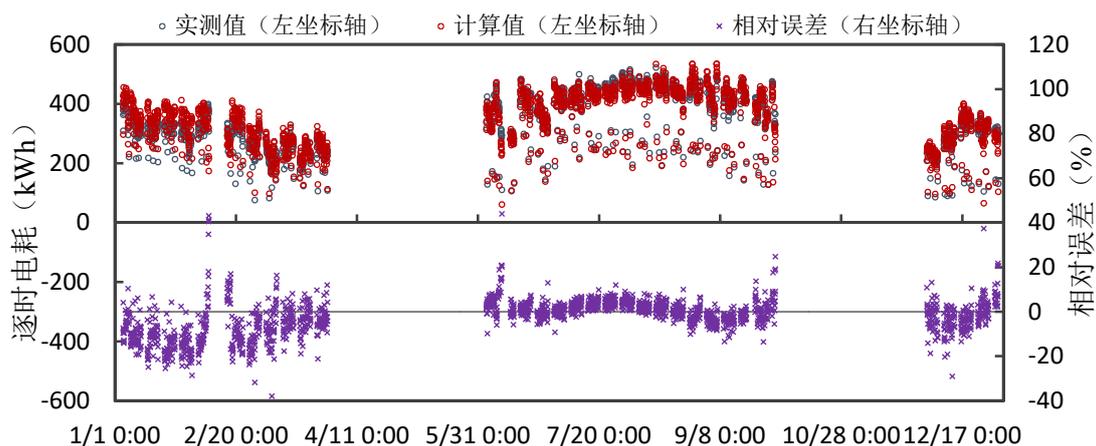
根据章节 2.3 建立的照明插座分项逐时能耗计算模型(公式(2.6)和(2.7)),对本文研究的上海市四栋建筑的照明插座分项能耗计算模型进行训练和验证。选取过渡季节数据作为模型训练数据,空调季节数据为模型验证数据。四栋建筑的照明插座分项能耗计算模型的训练和验证结果见表 2.9,结果显示办公建筑工作日和商场建筑全年的训练模型  $R^2$  都大于 0.95, CV 值都小于 8%,其中建筑 D 的  $R^2$  更高达 0.995, CV 值仅为 5.38%;模型验证的结果也非常不错,四栋建筑验证模型的 CV 值分别为 6.6%、4.8%、8.2%和 4.5%。办公建筑非工作日的验证结果相对差一些, CV 值达到了 10%,考虑到办公建筑的非工作日不是本文研究的重点,该结果也在接受范围之内。

### 2.5.2.3 空调末端能耗拆分结果分析

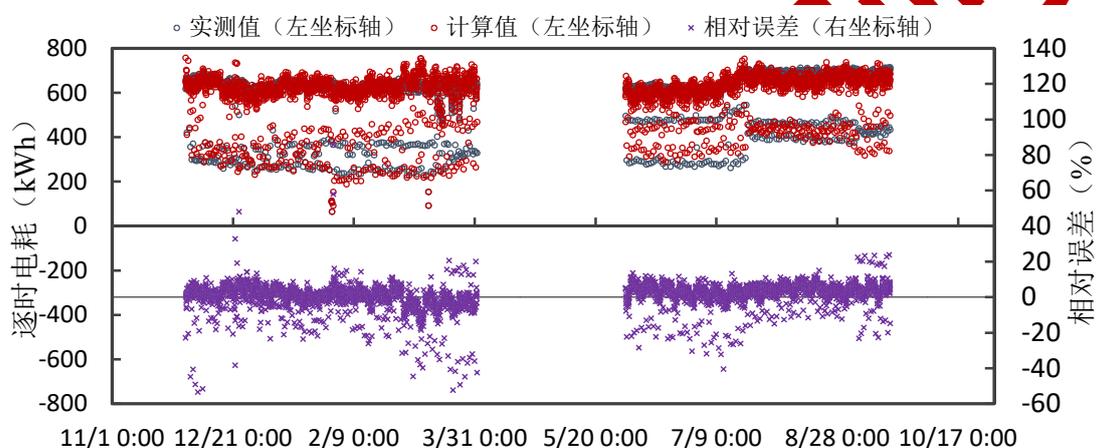
上一小节已经完成了对各个建筑照明插座分项逐时电耗的预测计算,那么根据公式(2.2)则可计算空调系统末端设备的逐时电耗。下面将四栋建筑的空调系统末端设备电耗拆分结果绘制于图 2.5。图 2.5 中四幅图的上部是实际计量的空调系统末端电耗逐时数据和使用拆分算法拆分得到的数据的对比,图 2.5 中四幅图的下部是根据公式(2.4)计算得到的逐时拆分结果的相对误差。根据公式(2.3)和(2.5),通过计算对拆分结果进行评价,计算结果列于表 2.10。同时还对不同误差范围内的数据点数进行了统计,统计结果见表 2.11。



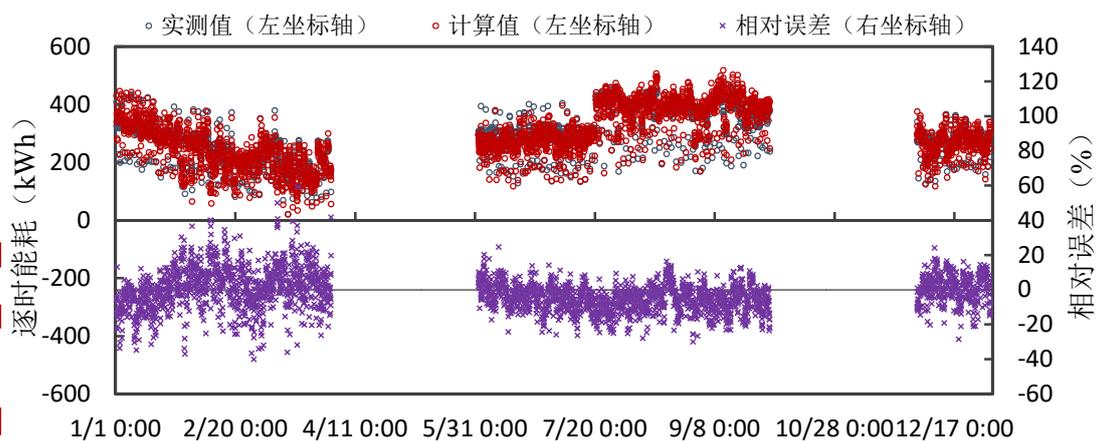
(a) 建筑 A (2013.11.01~2014.10.31)



(b) 建筑 B (2013.01.01~2013.12.31)



(c) 建筑 C (2013.11.01~2014.10.31)



(d) 建筑 D (2013.01.01~2013.12.31)

图 2.5 空调末端能耗与照明插座分项掺混拆分结果

图 2.5 中四幅图的上部实际计量的空调系统末端电耗逐时数据和使用拆分算法拆分得到的数据的对比, 结合表 2.10, 可以看出实测数据与拆分结果整体的吻合度非常的好, 拆分结果最好的是建筑 B, 其 CV 和 MRE 分别为 7.38% 和 5.56%,

尽管建筑 D 是效果最差,但是它的 CV 和 MRE 值也没有超出 10%,分别为 9.81% 和 7.81%, 而且制冷季的拆分效果明显优于采暖季。

图 2.5 中四幅图的下部是四栋建筑空调末端能耗拆分的相对误差分析, 结合表 2.11, 可以看出四栋建筑中, 空调末端设备逐时能耗拆分的相对误差在 10% 以内的数据量分别占总数据量的 80%、81%、90%和 70%; 在 20% 以内的数据量比例则可达到 92%、97%、97%和 95%, 且同样可以看出制冷季的结果比采暖季的结果好。经分析采暖季末端拆分结果相对较差的原因有两个: 1) 采暖季空调末端间歇性运行的情况比空调季明显; 2) 采暖季极端情况下有辅助电加热的现象。

表 2.10 空调末端能耗与照明插座分项掺混拆分结果分析

建筑名称	数据选取时间	空调运行时间	空调末端拆分结果 (%)					
			全年		采暖季		制冷季	
			CV	MRE	CV	MRE	CV	MRE
A	2013.12.01-2014.03.31; 2014.06.01-2014.09.30	Weekday:8:00~ 18:00	7.98	5.95	8.17	5.44	7.81	6.29
B	2013.01.01-2013.03.31; 2013.06.01-2013.09.31; 2013.12.01-2013.12.31	Weekday:8:00~ 18:00	7.38	5.56	11.33	8.89	4.20	3.32
C	2013.12.01-2014.03.31; 2014.06.01-2014.09.18	Full year: 9:00~21:00	8.95	5.20	11.31	5.48	5.86	4.91
D	2013.01.01-2013.03.31; 2013.06.01-2013.09.31; 2013.12.01-2013.12.31	Full year: 9:00~21:00	9.81	7.81	10.9	8.53	8.99	7.29

表 2.11 空调末端能耗拆分相对误差在不同误差范围内的分布情况 (情景 I)

建筑名称	数据量	比例 (%)						
		RE≤5%	RE≤10%	RE≤15%	RE≤20%	RE≤25%	RE≤30%	
A	全年	1606	55.73	80.07	87.8	91.84	94.15	94.89
	制冷季	946	56.77	79.18	88.48	92.39	94.93	95.67
	采暖季	660	54.24	81.36	86.82	91.06	93.03	93.79
B	全年	1837	60.32	81.11	91.51	97.22	99.29	99.46
	制冷季	935	82.78	97.65	99.14	99.57	99.89	99.89
	采暖季	902	37.03	63.97	83.59	94.79	98.67	99.00
C	全年	3003	63.87	89.84	94.71	96.87	98.1	98.57
	制冷季	1430	63.01	91.89	95.94	97.90	99.37	99.79
	采暖季	1573	64.65	87.98	93.58	95.93	96.95	97.46
D	全年	3159	45.43	70.09	87.18	94.65	95.25	99.08
	制冷季	1586	48.36	73.96	90.86	97.23	99.68	100
	采暖季	1573	42.47	66.18	93.58	92.05	90.78	98.16

### 2.5.3 情景 II 案例分析

#### 2.5.3.1 情景 II 计算过程

根据本章 2.4 节内容，情景 II 案例分析的计算过程如下：

步骤 1：确定日类型种类

建筑 A 和 B 数据缺失，此处不做研究，建筑 C 和 D 为商场建筑，只有一个日类型。

步骤 2：训练数据和验证数据的选取

与 2.5.3.1 节相同，为了方便阐述该拆分模型在空调季节的拆分结果，本文选择使用过渡季数据作为训练数据，空调季数据作为验证数据。

步骤 3：确定情景类型

该小节的案例分析属于情景 II，即空调系统末端设备能耗与动力分项掺混，故选取计算模型公式 (2.8)。

步骤 4：计算纯动力分项逐时能耗

a. 选择 MATLAB 作为数据处理工具。

b. 选择 4、5、10 和 11 月过渡季数据作为训练数据，计算出模型中的参数  $a$ 、 $\delta_n$  和  $\eta_n$ ，如表 2.12 所示，所以模型形式已经确定。

表 2.12 情景 II 训练得到的模型参数汇总表

建筑	C	D
参数	全年	全年
$a$	97.48	149.6
$\delta_1$	-84.15	-101.1
$\delta_2$	-5.344	-9.129
$\delta_3$	5.789	-3.359
$\delta_4$	-3.695	-2.728
$\delta_5$	11.85	12.51
$\delta_6$	-0.2851	0.3314
$\delta_7$	4.84	10.33
$\delta_8$	1.785	5.177
$\delta_9$	-1.097	3.923
$\delta_{10}$	1.562	3.91
$\delta_{11}$	-1.63	0.7581
$\eta_1$	-52.98	-53.19
$\eta_2$	4	4.662
$\eta_3$	-30.01	-33.94
$\eta_4$	-2.089	-5.304

$\eta_5$	-5.957	-11.56
$\eta_6$	-3.413	-6.546
$\eta_7$	4.415	1.436
$\eta_8$	-0.3791	-4.404
$\eta_9$	4.423	5.14
$\eta_{10}$	1.546	2.967
$\eta_{11}$	0.7251	4.413

c. 因为本文旨在说明建立的拆分算法准确可靠, 所以选择只用空调季数据直接作为模型的验证数据, 所以步骤 c 和 d 合并为一步。使用步骤 b 获得的模型对空调季的混合能耗中的照明拆做分项逐时能耗进行计算。

#### 步骤 5: 空调系统末端设备能耗拆分计算

根据减法原则, 使用实际测量得到的混合有空调系统末端设备能耗的动力分项的逐时能耗数据减去上述步骤 4 计算得到的纯动力分项的逐时能耗得到空调系统末端设备的逐时能耗。

下面对计算结果进行分析。

### 2.5.3.2 动力分项能耗计算模型的训练与验证

根据章节 2.3 建立的动力分项逐时能耗计算模型 (公式 (2.8)), 对本文研究的上海市两栋商场建筑的动力分项能耗计算模型进行训练和验证。选取过渡季节数据作为模型训练数据, 空调季节数据为模型验证数据。两栋建筑的动力分项能耗计算模型的训练和验证结果见表 2.13, 结果两栋商场建筑全年的训练模型  $R^2$  分别为 0.972 和 0.993, CV 值分别为 9.9% 和 6.5%; 模型验证的结果也非常不错。

表 2.13 动力分项能耗计算模型的训练和验证结果

建筑名称	时间	训练数据	验证数据	日类型	训练模型 $R^2$	训练模型 CV(%)	验证模型 CV(%)
C	2013.11.01~2014.10.31(09.19~30 缺数)	过渡季 (4、5、10 和 11 月)	空调季 (12.01~次年 03.31) + (06.01~09.30)	全年	0.9716	9.94	8.02
D	2013.01.01~2013.12.31			全年	0.9929	6.51	5.57

### 2.5.3.3 空调末端能耗拆分结果分项

上一小节已经完成了对两栋建筑动力分项逐时电耗的预测计算, 那么根据公式 (2.2) 则可计算空调系统末端设备的逐时电耗。下面将两栋商场建筑的空调系统末端设备电耗拆分结果绘制于图 2.6。图 2.6 中两幅图的上部是实际计量的

空调系统末端电耗逐时数据和使用拆分算法拆分得到的数据的对比，图 2.6 中两幅图的下部是根据公式 (2.4) 计算得到的逐时拆分结果的相对误差。根据公式 (2.3) 和 (2.5)，通过计算对拆分结果进行评价，计算结果列于表 2.14。同时还对不同误差范围内的数据点数进行了统计，统计结果见表 2.15。

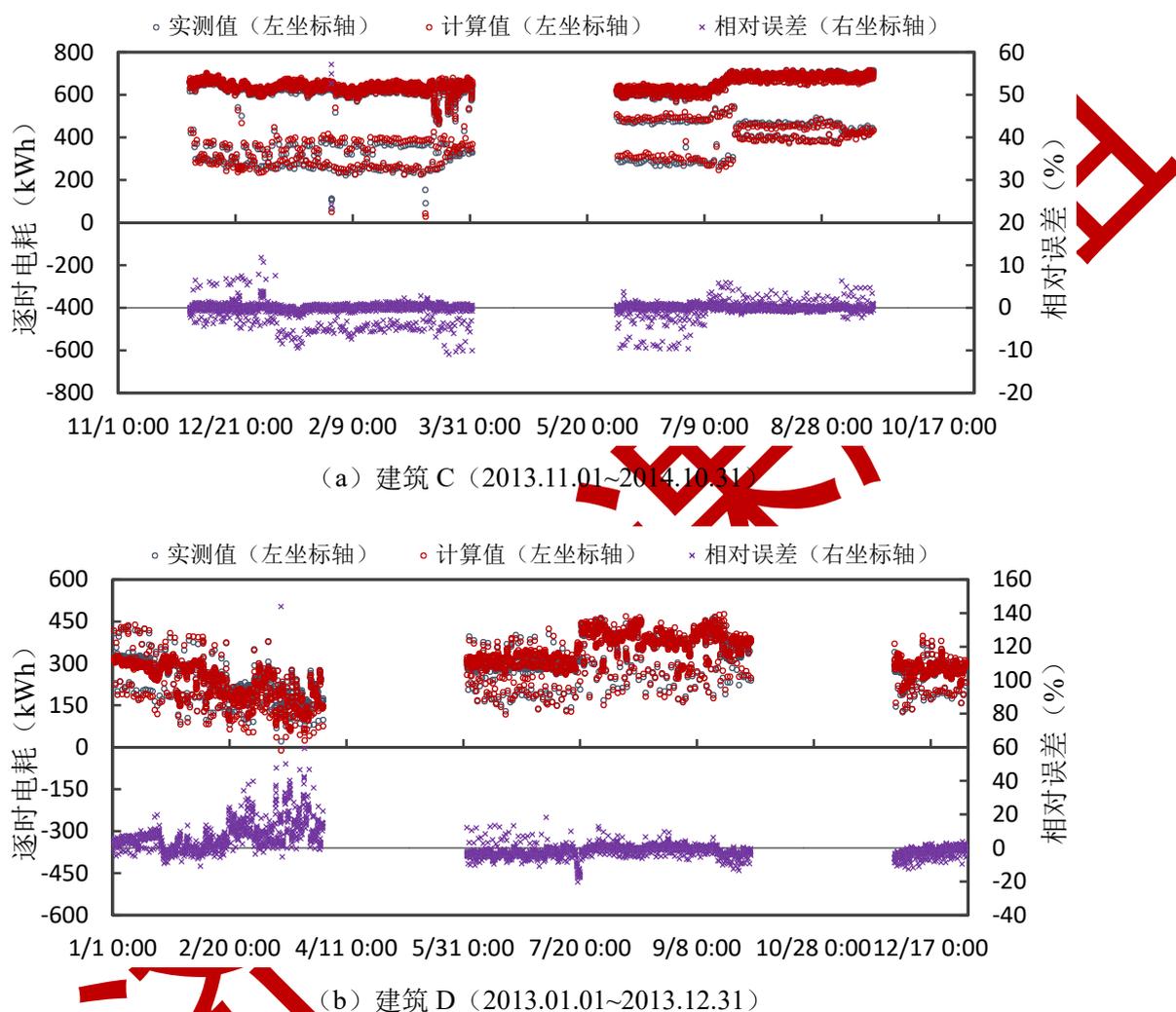


图 2.6 空调末端能耗与动力分项掺混拆分结果

图 2.6 中两幅图的上部实际计量的空调系统末端电耗逐时数据和使用拆分算法拆分得到的数据的对比，结合表 2.14，可以看出实测数据与拆分结果整体的吻合度非常的好，CV 值可以达到 1%，最大的也只有 5%，与照明插座分项拆分情况类似也是制冷季的拆分效果明显优于采暖季。

表 2.14 空调末端能耗与动力分项掺混拆分结果分析

建筑名称	数据选取时间	空调运行时间	空调末端拆分结果 (%)					
			全年		采暖季		制冷季	
			CV	MRE	CV	MRE	CV	MRE
C	2013.12.01-2014.03.31; 2014.06.01-2014.09.18	Full year: 9:00~21:00	1.53	1.09	1.88	1.42	1.09	0.75
D	2013.01.01-2013.03.31; 2013.06.01-2013.09.31; 2013.12.01-2013.12.31	Full year: 9:00~21:00	5.16	3.90	7.22	5.73	3.52	2.60

表 2.15 空调末端能耗拆分相对误差在不同误差范围内的分布情况 (情景 II)

建筑名称	数据量	比例 (%)						
		RE≤5%	RE≤10%	RE≤15%	RE≤20%	RE≤25%	RE≤30%	
C	全年	3003	94.14	99.2	99.8	99.83	99.83	99.83
	制冷季	1430	97.83	99.79	100	100	100	100
	采暖季	1573	90.78	98.66	99.62	99.68	99.68	99.68
D	全年	3159	73.12	89.08	93.83	97.25	98.07	98.96
	制冷季	1586	88.84	97.79	99.31	100	100	100
	采暖季	1573	57.28	80.29	88.30	94.47	96.12	97.90

图 2.6 两幅图的下部是两栋建筑空调末端能耗拆分的相对误差分析, 结合表 2.15, 可以看出建筑 C 和建筑 D 中, 空调末端能耗拆分相对误差在 10% 以内的数据量分别占总数据量的 99% 和 89%, 且同样可以看出制冷季的结果比采暖季的结果好。

而且同样是这两栋商场建筑, 空调系统末端设备能耗与动力分项掺混的拆分结果优于与照明插座分项掺混的拆分结果, 原因是动力分项能耗较照明插座分项能耗低, 基数小, 于是拆分结果相对误差相应的降低了许多。

## 2.6 特殊情况分析

下面对建筑 A 展开进一步分析, 通过上文的描述, 不难发现两个问题: 1) 在进行逐步回归时, SD1、CD1、SD2 和 CD2 四个变量对建筑 A 的影响比较大, 而对其他三栋建筑几乎没有影响; 2) 其他三栋楼的相对误差都是比较对称的分布在 0 刻度线上下, 只有建筑 A 的拆分结果相对误差呈现出由正转负的单调变化趋势。经过仔细分析作者发现建筑 A 的照明插座分项能耗呈现随时间缓慢上升的变化趋势, 如图 2.7 中线 a 所示, 这使得拆分而得的末端能耗由偏小逐渐变化为偏大, 所以相对误差呈现由正逐渐转负的显现。一般正常运行的建筑照明插

座分项能耗是不会有这样的变化的，这个建筑产生这样的变化是因为这是一栋新建建筑，2012 年投入使用，2013 年用户入住率达到了 80%，在 2014 年一年中依然有一些比较分散的小型用户陆续入住，所以造成该结果。

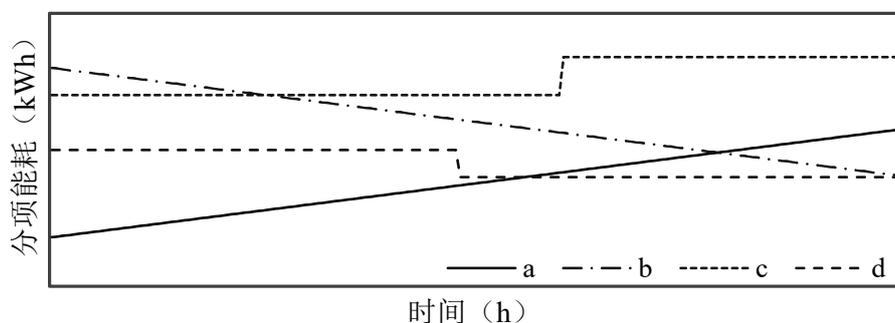


图 2.7 建筑分项能耗变化趋势示意图

注意：1) 图 2.7 仅表示能耗数据变化趋势，不代表具体能耗数值；2) 线“a”表示能耗逐渐上升，此类现象产生的原因例如入户陆续入驻某建筑；3) 线“b”表示能耗逐渐下降，此类现象产生的原因例如入户陆续撤离某建筑；4) 线“c”表示能耗突然间上升，此类现象产生的原因例如建筑中购置了某些大功率设备；5) 线“d”表示能耗突然间下降，此类现象产生的原因例如建筑中移除了某些大功率设备。

将 SD1、CD1、SD2 和 CD2 四项加入公式 (2.7) 中重新进行拆分计算，得到的相对误差如图 2.8 所示，拆分结果明显变好。

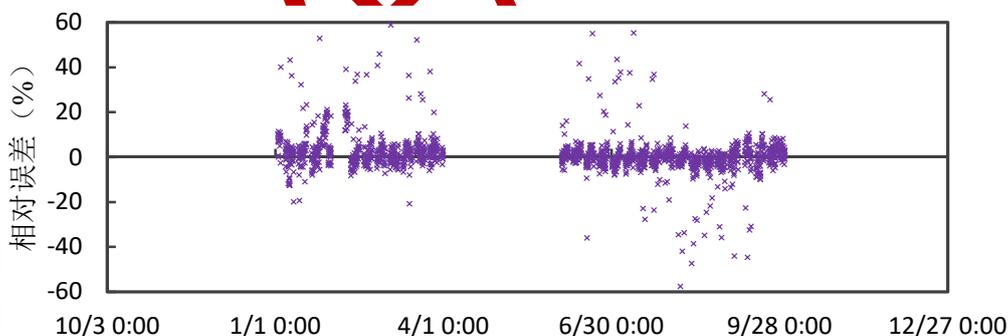


图 2.8 调整后的建筑 A 空调末端能耗拆分相对误差

对于分项能耗数据如图 2.7 中线 a、b 变化的，本文建议在模型 (2.7) 中加入对日期变量的考虑，取 SD1、CD1、SD2 和 CD2 四项即可，如公式 (2.10)。对于图 2.7 中 c、d 的变化情况，一般可以理解为增加了某些用能设备或者进行了节能改造，这两种情况选取的模型不变，但是建议在能耗改变点的前后进行分段拆分处理。

$$E'_{L\_Shopping} = a + \sum_{n=1}^{11} [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] + \sum_{m=1}^2 [\alpha_m \sin(2\pi\omega_m)d + \beta_m \cos(2\pi\omega_m)d] + \varepsilon \quad (2.10)$$

## 2.7 本章小结

本章分别建立了从办公建筑照明插座分项能耗、商场建筑照明插座分项能耗和商场建筑动力分项能耗中拆分出空调系统末端设备能耗的模型，这三个模型分别是以天为周期、以小时为变量的 6 次、11 次和 11 次傅里叶模型。该拆分模型有两个主要的优势：1) 模型结构简单，使用方便；2) 模型外延性强，因为商业建筑的非空调能耗都是具有周期性变化特征的，所以该拆分模型具有很好的外延性，一旦形式确立可以直接用于同类型的其他建筑。

本章研究结果表明，不同类型建筑的日类型可以根据日均分项能耗进行划分。商场建筑中用于计算照明插座分项能耗和动力分项能耗的模型形式相同，且都受 SH1 的影响最大，办公建筑中用于计算照明插座分项能耗的模型受 CH1 的影响最大。所有模型在空调运行时间段内的拆分结果准确度较高，可以确保拆分结果的平均相对误差在 10% 以内，效果最好的达到了 1%。非空调运行时间段内本文更加关注的是绝对误差而非相对误差，主要用于空调系统末端设备是否正常开启和关闭的判断。

本章研究还发现混合在动力分项中的空调末端能耗拆分结果比混合在照明插座分项的拆分结果要好，主要原因是一般的商业建筑动力分项能耗整体水平比照明插座分项低很多，尽管照明插座分项和动力分项的预测模型的 CV 值相仿，但是由于动力分项能耗的基数小，所以混合在动力分项之中的空调系统末端能耗拆分的相对误差也就小了很多。

根据本文的研究，对于分项能耗数据呈现平缓上升或者下降的情况，建议在模型中加入 SD1、CD1、SD2 和 CD2 四项，构建成新的模型；而对于有能耗突然上升或下降的情况，则建议以用能特征变化点为界分段进行拆分计算。

由于建筑中空调系统末端设备在采暖季和制冷季都需要运行，所以本文对空调系统末端能耗在全年工况下都进行了拆分计算，但是第一章中对本文研究对象及其范围的限定中，已经说明由于热源的能源形势和种类的多样性以及热水泵能耗并不高，所以本文的研究工作主要围绕夏季工况展开，冬季工况不纳入研究范围。

本章研究有两个不足之处，一是由于有空调末端独立计量的建筑只有四栋，而且全部位于上海市，所以希望在今后的研究中可以验证上海市和其他地区的更

多的商业楼宇；另一个是根据本章研究可以发现商场建筑的照明插座分项和动力分项能耗拆分模型相同，但是由于缺数造成无法对办公建筑动力分项拆分情况进行分析，所以无法确定办公建筑照明插座分项能耗的预测模型是否也适用于其动力分项。

同济许鹏课题组

---

同济许鹏课题组

## 第3章 空调系统逐时负荷模拟法

### 3.1 概述

空调系统逐时负荷模拟在建筑空调系统的方案设计、运行优化和节能改造等方面都扮演着重要的角色。而运用既有模拟软件对空调系统进行负荷模拟和进行建筑能耗模拟是密不可分的，往往是伴随着建筑能耗模拟而进行的，因为建筑中的所有用能设备都会对空调系统的负荷产生影响，而空调系统负荷又会反过来影响建筑的空调系统能耗，所以在某种程度上讲二者可以被视为同一个问题。无论是模拟空调系统冷热负荷还是建筑能耗，都需要建立一个准确度高的模型，那么一个准确的实践上可操作的模型校验方法是必不可少的。建筑能耗模型的建立和校核在建筑设计阶段的应用是比较成熟而且比较简单的，因为大部分的模型输入参数都是设计参数。而在建筑的实际运行阶段或者节能改造阶段就变得非常复杂，因为建筑中各种用电设备的能耗是逐时变化的，与设计参数的出入很大，需要逐时的运行数据进行模型校核。现有的很多模型校验方法可以实现总能耗数据的吻合，但是由于输入参数成百上千，这是一个多解问题，最终依旧无法确定模型是否与建筑实际情况相符。现如今分项计量领域快速发展，已经有大量的楼宇具备了逐时的运行电耗数据，给实际运行建筑模型的校验提供了良好的基础，那么如何运用这些实测数据进行模型校验则成为了一个亟待解决的问题，本章提出一种基于逐时分项计量电耗数据的模型校验方法，给出了具体的模型校验步骤并且进行了案例分析，通过校验好的建筑模型则可以获得空调系统的逐时负荷。

### 3.2 空调系统负荷的实测方法

由于本课题主要研究空调系统制冷季节的故障诊断问题，所以空调系统负荷预测部分也针对制冷季节展开。

计量原理：测量冷冻水的供回水温度和流量，通过计算间接获得冷量。

计量方式：测量每个冷源的进出口水温和流量，根据公式（3.1）计算得到逐时冷量。

$$\begin{aligned}
 \text{Hourly cooling load} &= \sum_1^n \left( \sum_1^{60/t} \left( C \times \frac{\rho F_{chw-i}}{3600} \times \Delta T_{chw-i} \times \frac{60}{t} \right) \right) \\
 &= \sum_1^n \left( \sum_1^{60/t} \frac{C \rho F_{chw-i} \Delta T_{chw-i}}{60t} \right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

其中， $F_{chw\_i}$ 为*i*时刻冷冻水瞬时流量， $m^3/h$ ， $\Delta T_{chw\_i}$ 为*i*时刻冷冻水进出口瞬时温差， $^{\circ}C$ 。

在实际建筑中计量冷量是非常困难的，对于新建建筑，如果在空调系统设置初就将温度传感器和流量传感器内置于冷冻水管路中，运行之初数据质量还是比较好的，而内置传感器长时间使用无法校核，数据质量会明显下降；对于既有建筑，由于空调冷冻水系统是承压系统，管理人员是不允许开洞放置传感器的，即使是拨开保温层进行外贴式测量几乎也是不被允许的。所以采用间接方式获得空调系统逐时负荷是非常有必要的。

### 3.3 空调系统负荷模拟

本章所提出的基于逐时分项计量电耗数据的空调系统负荷模拟模型校验方法，由七个步骤组成，如图 3.1 中加粗字体所示。此处需要说明本章的内容主要依托于建筑模拟软件 EnergyPlus 进行展开，其他模拟软件的情况与 EnergyPlus 相似。

步骤 1：建筑基本信息校验

步骤 2：建筑外围护结构校验

步骤 3：建筑内部蓄热体校验

步骤 4：非空调设备能耗校验

步骤 5：非用电设备参数校验

步骤 6：空调系统末端能耗校验

步骤 7：空调系统负荷校验

严格来讲，如果建筑基本信息调研准确，上述步骤 1~步骤 3 只需要根据建筑实际信息进行设置，不需要复杂的校验手段。步骤 4~步骤 6 是没有办法根据建筑实际运行数据直接设置，必须经过专业处理将已知的信息转化为 EnergyPlus 软件的输入形式。步骤 7 则是对空调系统负荷模拟模型校验结果的验证。众所周知空调系统负荷的三个最主要组成部分为围护结构得热、建筑内部得热和新风负荷，所以步骤 2、步骤 4 和步骤 5 是本章的研究重点。下面分别对这七个模型校验步骤进行详细说明。

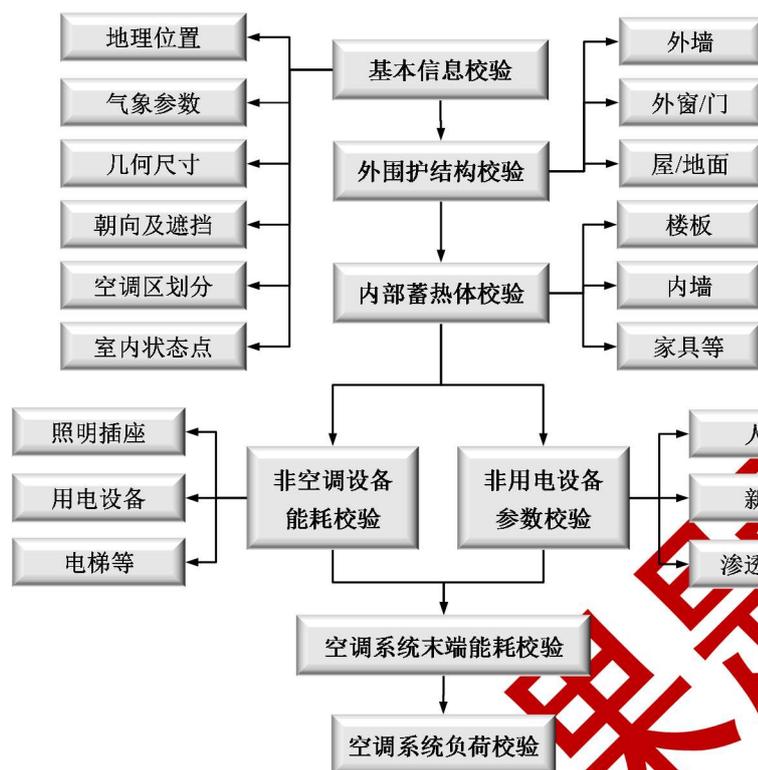


图 3.1 空调系统负荷模拟计算流程图

### 3.3.1 基本建筑信息校验

该步骤与一般的建模方式没有什么区别，包括确定模拟对象建筑所处的地理位置、本地气象参数、建筑朝向、建筑周围的遮挡情况以及空调区室内空气状态设定点等，并且根据模型建立的具体目的，合理简化建筑外形和内部空间。Pedrini 等人的研究表明将建筑模型搭建的非常详尽，使之与实际建筑情况近似，对于提高建筑能耗和空调系统负荷的模拟精度没有太大的帮助，反而会严重地降低模型的运行速度，但是过度简化模型会导致模拟结果产生较大的误差<sup>[157, 187]</sup>。所以可以根据模型建立的目的对模型的几何外形和内部空调分区进行合理简化，简化方法可以参考教材《空气调节》第四章。

该步骤中室内空气状态点设置主要指的是室内温度和相对湿度的设置，室内温度即为多个区域的加权平均温度，如果 BMES 系统中有空调末端设备回风温度的记录，则可以直接计算加权平均温度，计算方法如公式 (3.2) 所示。如果没有记录，进行现场实测也是非常容易操作的。公式 (3.3) 计算而得的是室内空气的绝对湿度，在已知温度的情况下，相对湿度和绝对湿度是可以相互转化的。

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i V_i}{\sum V_i} \quad (3.2)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum H_i V_i}{\sum V_i} \quad (3.3)$$

### 3.3.2 外围护结构校验

通过调研对模拟对象建筑的外围护结构进行准确的设置，因为通过建筑围护结构进入室内的热量是空调系统负荷的主要构成部分。建筑外围护结构的校验主要包括外墙、外窗、外门、屋面和地面五个部分。需要调研的信息为建筑围护结构各层材料的厚度、导热率、密度和比热容四个参数。

### 3.3.3 建筑内部蓄热体校验

如果调研信息详细，对于建筑的主要内部结构，如内墙和楼板，也可以进行比较准确的设置。而对内部家具和装饰，如家具、办公桌椅、地毯、书籍等，只能进行估算设置，这部分的设置不会影响通过围护结构进入到室内的空调系统的总负荷量，但是会对室内负荷波动的幅值和相位产生一定的影响。Antonopoulos 的研究表明外围护结构、主要内部结构和内部家具装饰等的蓄热能力所占的比重分别为 78%，15%和 7%<sup>[188]</sup>，可见内部家具装饰的影响所占比例很小；此外，周军莉的研究表明内部家具装饰的蓄热放热速度比较快，对间歇性运行空调系统而言，内部家具装饰对室内负荷的幅值有一定影响，对相位变化的影响较小；而对连续运行的空调系统，家居装饰的温度基本和室温保持一致，对空调系统负荷的影响几乎可以忽略不计<sup>[189]</sup>。所以可以对建筑内部家具和装饰等进行简化描述。

### 3.3.4 非空调设备能耗校验

第 2 章的研究表明对于运行稳定的公共建筑，其照明插座分项逐时能耗和动力分项逐时能耗都是不受外部气象参数影响的，并且只随时间周期性变化，傅里叶模型可以对其进行很好地描述，并且日期“d”对模型精度的影响非常小，可以忽略不计。第 2 章中建立了从办公建筑照明插座分项能耗、商场建筑照明插座分项能耗和商场建筑动力分项能耗中拆分空调末端能耗的模型，分别是以天为周期，以小时为变量的 6 次、11 次、11 次傅里叶模型（见公式（2.6）~（2.8））。为了方便，本章中将上述三个模型形式统一，并且为了提高模型的精度，本文将统一的模型形式定义为公式（3.4）。同样的，对于不同的日类型要使用下述傅里叶模型分别进行计算，模型训练所需要的数据依然选取自过渡季节。

$$E_L(or E_P) = a + \sum_{n=1}^{12} [\delta_n \sin(2\pi\omega_n)h + \eta_n \cos(2\pi\omega_n)h] + \varepsilon \quad (3.4)$$

通过上式可以获得建筑不同日类型下的逐时分项能耗数据计算模型，然后根据回归模型对不同日类型下的逐时分项能耗数据进行计算，在同一日类型下，选取能耗最大的值作为基准值，其他时刻的能耗值与最大值的比值则为该时刻的同时使用系数，在 EnergyPlus 中设置为照明和设备的 schedule fraction，灯具和设备的对流换热得热和辐射得热比例可以根据样品手册确定，如果没有样品手册作为参考，则可以参考 ASHRAE Handbook<sup>[190]</sup>或者相关研究，如 Braun 的论文中采用照明灯具对流换热比例 20%，辐射比例 80%；设备对流换热比例 80%，辐射比例 20%<sup>[175]</sup>。具体操作参见本章 3.4 小节的案例分析。

### 3.3.5 非用电设备参数校验

建筑中非用电设备参数的设置主要包括三个部分：人员、空调系统新风和建筑渗透风。

现在很多建筑，尤其是办公建筑，都有人员出入统计，因为无论是内部工作人员还是访客都需要持卡进出，该情况下可以选取人员峰值作为基准值，其他时刻的人员数量与基准值的比值作为该时刻的人员同时在室系数，在 EnergyPlus 中同样设置为 schedule fraction。对于没有人员统计的楼宇，可以进行短期的现场调研或者参考相关规范。人员的散热功率选取可以参考相关标准，显热量、潜热量以及对流换热得热和辐射得热比例参考 ASHRAE Handbook<sup>[190]</sup>，取值分别为 40%、20%和 40%。根据 Braun 的研究人员散热的对流换热比例为 70%，辐射比例为 30%<sup>[175]</sup>。

渗透风量的设置是比较麻烦的，因为逐时的渗透风量很难计算准确。但是有学者研究表明，商业建筑的渗透空气量一般都不大于 0.5 次/小时，空调区的渗透风量甚至小到 0.1 次/小时，由于渗透风形成的空调系统冷负荷只占总冷负荷的 4%左右，占比是非常小的<sup>[185, 191, 192]</sup>。所以在进行渗透风设置时可以根据建筑类型和分区在 0.1~0.5 次/小时范围内选取。新风量根据实际空调系统的新风设置情况进行设置即可。

### 3.3.6 空调系统末端能耗校验

既然是空调系统末端设备能耗的校验，首先应该获得空调系统的实际能耗数据。如果空调系统末端设备有单独的分项计量，那么可以直接根据实测数据对空调系统末端能耗进行校核，如果空调系统末端没有单独计量而是混合在照明插座或者动力支路中的，那么可以对其进行拆分，拆分方法已经在第 2 章中进行了详细介绍，本章不再赘述。

空调系统末端设备往往散落在建筑的各个空调区域内，其主要耗电部件是风机，所以风机的耗电量一部分以热量的形式进入空调区，一部分则转变为送风空气的动能，无论哪一种形式，风机的能耗最终都将转化为空调区域的负荷，所以说空调系统末端的能耗是室内负荷的组成部分，只是与室内大量的照明插座能耗相比该部分形成的室内负荷占总负荷的比重很小。

本文给出的空调系统末端设备的校验方式步骤如下：1) 通过直接或者间接的手段获取空调系统末端设备的实际能耗数据；2) 在 EnergyPlus 中先按照 autosize 的方式对空调系统末端设备进行设置；3) 在完成上述本章 3.3.1 的模型校验步骤 1 到 3.3.5 的模型校验步骤 5 后，建筑冷负荷的模拟已经与实际情况相差不远，此时将建筑的逐时冷负荷输出，记为  $Q_s$ ；4) 在上述基础上已经获得了空调系统末端设备的逐时能耗数据和模拟的建筑逐时冷负荷，那么可以使用下述公式 (3.5) ~ (3.7) 对风机的性能曲线进行拟合，然后将拟合得到的公式 (3.6) 的各个参数值设置到 EnergyPlus 中的风机性能曲线处。此处需要说明，如果有实测冷量数据则可以使用实测冷量数据与实测空调系统末端能耗直接拟合风机的性能曲线，此外，由于此处获得的空调末端能耗不是单个末端的能耗数据，所以该曲线也不是单个末端的性能曲线，而是一个等价的总性能曲线。

$$Pow_{t\_fan} = COFP \times Pow_{t\_fan\_rated} \quad (3.5)$$

$$COFP = f_0 + f_1(PLRF) + f_2(PLRF)^2 + f_3(PLRF)^3 \quad (3.6)$$

$$PLRF = \frac{Q_s}{C_{air} P_{air} \Delta T_{t\_fan\_air} F_{t\_air\_rated}} \quad (3.7)$$

其中： $Pow_{t\_fan}$  为空调系统末端设备中风机的逐时功率，W 或 kW， $COFP$  为风机的性能系数，即为部分负荷工况下风机功率与额定功率的比值， $Pow_{t\_fan\_rated}$  为风机的额定功率， $PLRF$  为风机的部分负荷率，即为部分负荷工况下风机的送风量与额定送风量的比值， $\Delta T_{t\_fan\_air}$  为室内状态点温度与空调系统送风温度的差值， $F_{t\_air\_rated}$  为风机的额定风量。

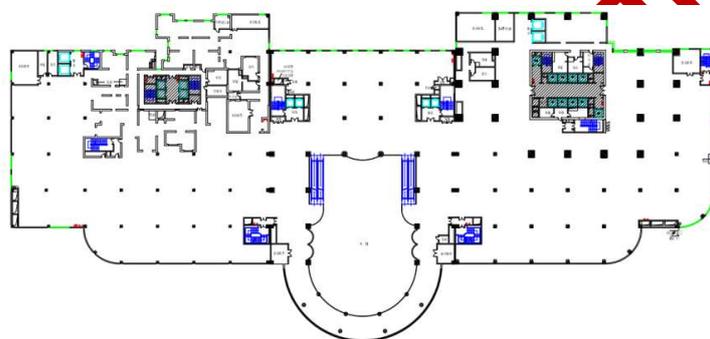
### 3.3.7 空调系统负荷校验

完成上述各步骤后，空调系统负荷模拟模型已经可以进行比较准确的负荷计算了，该步骤是使用模拟的逐时冷负荷数据与实际楼宇采集到的实测冷量数据进行比较分析，对模拟结果进行评价。评价指标可以参考公式 (2.3) ~ (2.5)。

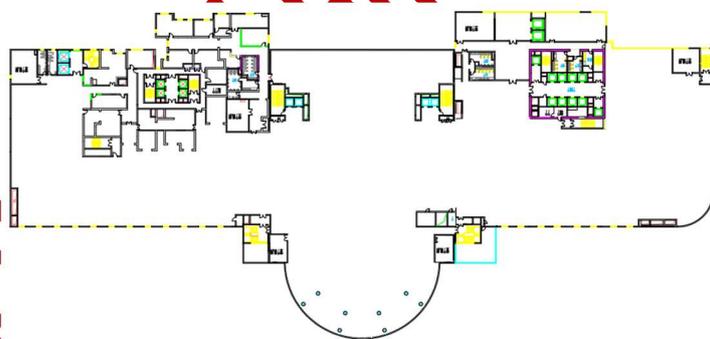
## 3.4 案例分析

### 3.4.1 建筑描述

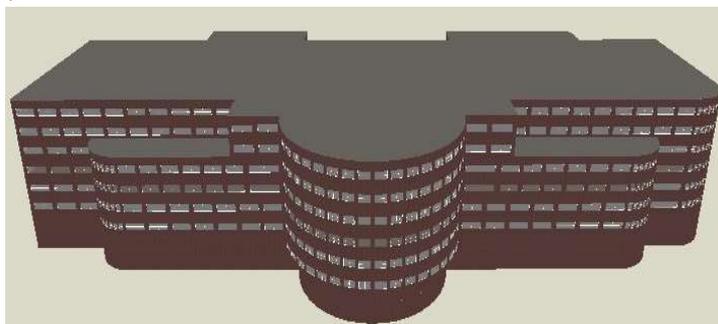
建筑 DMT，位于上海市市区，是一栋混合型建筑，共 8 层，地下两层，地上六层。地下二层约 5000m<sup>2</sup>，为空调机房和设备用房等，属于非空调区域；地下一层到地面四层是商场，五、六层是办公区域，主要为业主和商场各驻户的办公地点。总建筑面积约 68000 m<sup>2</sup>，层高 4.5m，地上高度约 28m，建筑为长 153m，主体部分宽 51m，最宽处 75m，占地面积 9112 m<sup>2</sup> 的不规则形状，四层以下的商场部分和五、六层办公部分的平面图有些许差异。建筑平面图和建筑外形如下图所示 3.2 所示，半圆形弧线一面朝向为北向，为了方便展示，将建筑平面图进行了 180° 旋转。各个朝向的窗墙比见下表 3.1。



(a) 建筑 DMT 的平面图（四层以下商场）



(b) 建筑 DMT 的平面图（五、六层办公）



(c) 建筑 DMT 的外形图

图 3.2 建筑 DMT 的平面和外形图

表 3.1 建筑 DMT 各个朝向的窗墙比

朝向	东	南	西	北
窗墙比	18%	40%	18%	10%

DMT 的空调系统形式如下，冷源是离心式冷水机组，热源是溴化锂直燃机，冷冻水泵为变频泵，冷却水泵为 2013 年以前为定频泵，后来改造为变频泵，热水泵为定频泵，上述设备全部位于地下二层的空调机旁内；冷却塔位于 DMT 楼顶，风机为双速风机；空调系统末端设备为 AHU，风机为变频风机，位于每一层楼的设备用房内。具体的设备型号和参数见下表 3.2，制冷季节为 5 月 1 日~10 月 30，制冷室内设定温度为 26°C；采暖季节为 12 月 1 日~3 月 1 日，采暖室内设定温度为 18°C。商场部分的空调运行时间为 9:00~21:00，办公区域空调系统的运行时间为 8:00~17:00。

表 3.2 建筑 DMT 的 AHU 设备信息汇总表

空调末端机组	台数	风量 m <sup>3</sup> /h	供冷量 (kW)	电机最大功率 (kW)	使用场所	机外全压 (Pa)
-1 层	4×1	26000	215	18.5	商场	200-800
1-4 层 AHU	2×4	32000	257	18.5	商场	200-800
1-4 层 AHU	2×4	36000	283	22	商场	200-800
5-6 层 AHU	2×2	21000	174	15	办公	200-800
5-6 层 AHU	2×2	32000	257	18.5	办公	200-800

通过调研和分项能耗分析，得到该建筑的分项能耗计量情况如表 3.3 所示。

表 3.3 建筑 DMT 分项计量信息统计表

一级子项	有无直接计量	二级子项	有无直接计量	是否形成空调负荷
照明插座分项	有	照明和插座用电	无	是
		室外景观照明用电	有	否
		走廊及公共区照明用电	无	是
动力分项	有	电梯用电	有	否（电机位于屋顶）
		生活水泵用电	无	是
		通、排风机用电	无	是
		末端用电	无	是
空调分项	无	冷源	有	否（位于地下室机房中，属于非空调区）
		冷冻泵	有	
		冷却泵	有	
		冷却塔	有	
		热源	使用燃气	
		热水泵	无	

其他/特殊用电	有	信息中心	有	否（独立空调系统）
		厨房餐厅	使用燃气，不在分项计量范畴	是（厨房区域有独立排风系统）

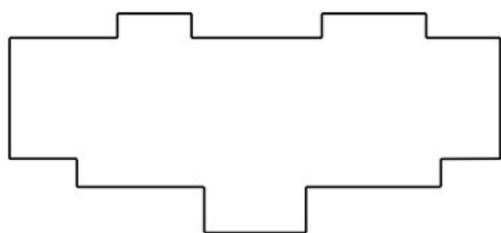
该建筑为混合型建筑，混合型建筑的校验相对于单一功能建筑而言，更加的复杂和困难，本文之所以选择该建筑作为案例分析的对象，有如下两个原因：1）可以同时演示使用傅里叶模型对商场建筑和办公建筑的非空调能耗进行校验。2）该建筑有频率为5min的冷量计量，测量时间为2014年8月15日到9月30日，但是8月29日和30日两天出现了数据缺失。

### 3.4.2 空调系统负荷模拟计算

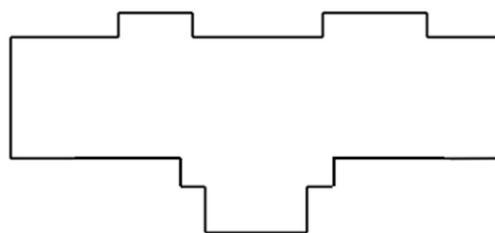
本小节使用3.3节建立的空调系统负荷模型校验方法对DMT建筑进行建模并完成校验过程。

#### 3.4.2.1 建筑基本信息校验

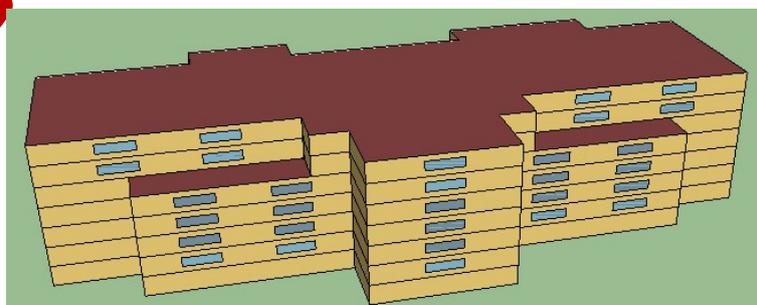
DMT建筑实际为长153m，主体部分宽51m，最宽处75m，占地面积9112m<sup>2</sup>的不规则形状，形状如图3.2所示。因为DMT建筑的外形有很多弧面，在建模过程中，弧线按照多段线进行处理，所以会形成大量的建筑的外立面，这样会大大降低模型的计算速度。所以应该对建筑外形进行简化，保持原建筑的建筑面积不变，将上述建筑外形中的所有弧线都简化为直线，简化后的平面图如图3.3所示。模型层高4.5m。由于每层有4个AHU，所以每层分为4个zone。



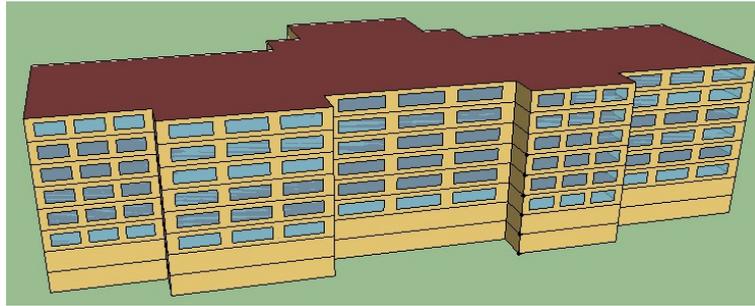
(a) DMT 简化平面图（四层以下商场）



(b) DMT 简化平面图（五、六层办公）



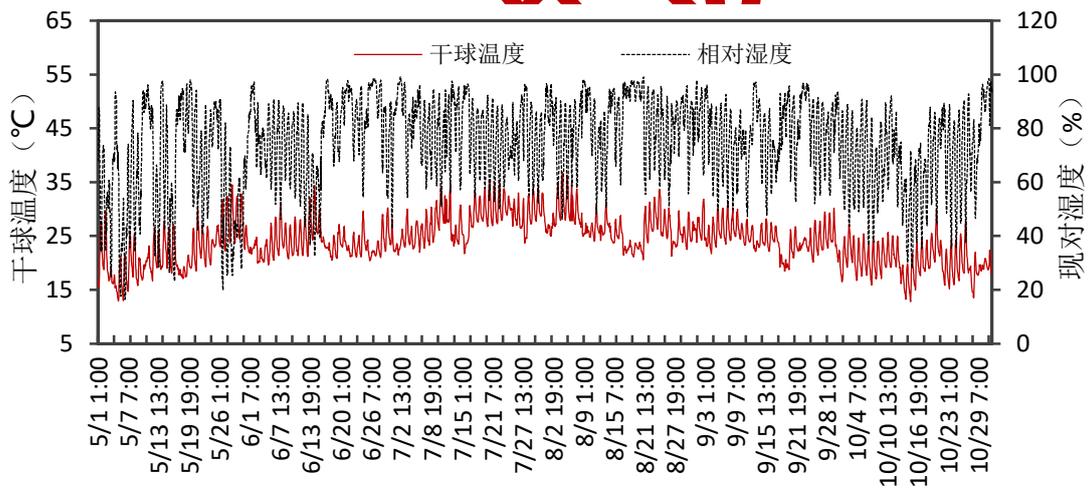
(c) DMT 简化图北侧



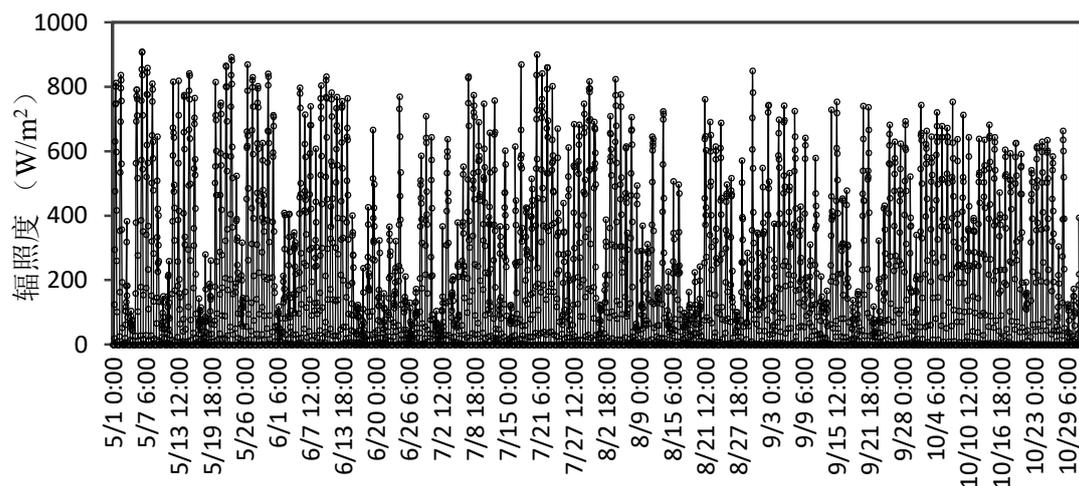
(d) DMT 简化图南侧

图 3.3 DMT 简化平面图

为了获得逐时的气象参数,2014年4月作者所在团队建立一个小型气象站,对室外气象参数进行采集,采集时间开始于2014年5月1日,数据采集周期为10min。采集的主要参数为干球温度、相对湿度、辐照度、风速和风向,可以使用采集到的实际气象参数制作成气象参数文件,用于模拟计算。为了对采集到的气象参数进行展示,现将周期为10min的干球温度、相对湿度和辐照度数据处理为逐时数据并且绘制为图3.4。



(a) 干球温度和相对湿度



(b) 辐照度

图 3.4 实地采集气象参数

### 3.4.2.2 外围护结构和内部蓄热体校验

通过调研得到 DMT 建筑的外围护结构和主要内部结构的材料组成情况，然后通过资料搜集获得各种材料的物性参数并列于下表 3.4。正如 3.3.3 节中所述对于空调系统连续运行的建筑，室内家具装饰等对空调系统负荷的影响是比较小的，所以此处只是简单的对室内家具和装饰进行了一个简单估计。

表 3.4 DMT 外围护结构及主要内部结构的材料组成

外部结构	材料	厚度 (mm)	导热率 (W/m·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)
屋面	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8
	膨胀珍珠岩	50	0.16	400	1170
	钢筋混凝土	200	1.74	2500	920
	水泥砂浆找平层	30	0.93	1800	1050
	石灰砂浆	20	0.81	1600	1050
外墙	花岗岩挂面	20	3.49	2800	920
	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8
	水泥砂浆找平层	30	0.93	1800	1050
	混凝土砌块	200	0.68	1300	537.8
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050
外窗	普通玻璃	3	/	/	/
	空气层	6	/	/	/
	普通玻璃	3	/	/	/
地面	水泥基内保温砂浆	300	0.085	450	1164.8
	钢筋混凝土	500	1.74	2500	920
	水泥砂浆找平层	30	0.93	1800	1050

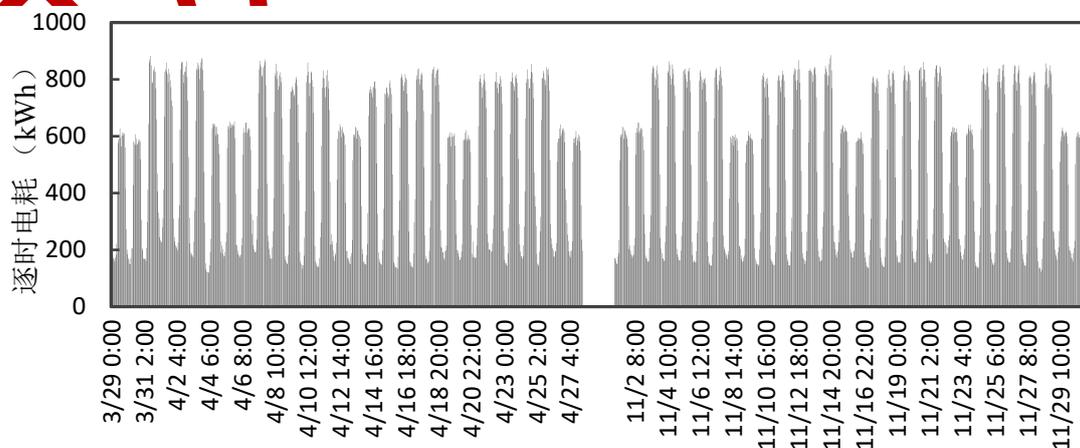
内部结构	材料	厚度 (mm)	导热率 (W/m·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)
楼板	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050
	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8
	钢筋混凝土	120	1.74	2500	920
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050
内墙	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050
	钢筋混凝土	120	1.74	2500	920
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050
家具装饰 1	木材 1	10	0.29	500	2510
家具装饰 2	木材 2	20	0.23	600	1890
家具装饰 3	纤维板	50	0.29	500	2510

### 3.4.2.3 非空调设备能耗校验

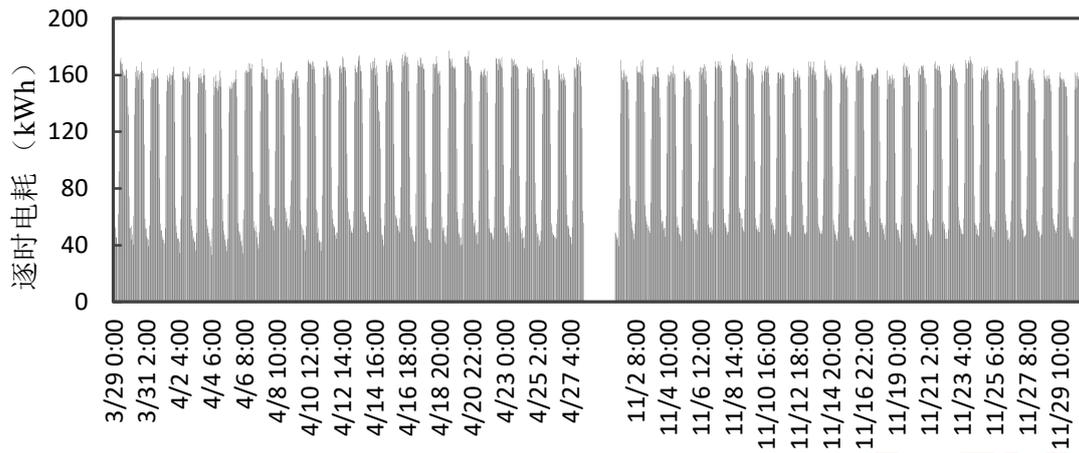
根据表 3.3 可以看出非空调系统设备能耗分为五部分：1) 室外景观照明用电，2) 其他照明插座用电，3) 电梯用电，4) 其他动力用电，5) 信息中心用电。

分项能耗数据显示室外景观照明的开启时间为 18:00~24:00，但是其产生的热量直接散到室外，不会形成空调系统的负荷；因为电梯的电机位于 DMT 建筑的楼顶，所以电梯散热也不在空调系统负荷范围内；信息中心的运行时间是全年全天，并且调查信息显示信息中心有独立的空调系统，所以信息中心产生的热量也不计算在集中式空调系统负荷之内。

通过分项能耗数据分析，照明插座分项和动力分项中都混有空调系统末端能耗，为了避免这一现象的影响，此处选择使用过渡季的数据建立能耗回归模型并且对模型进行验证，最后将验证好的模型用于模拟校验。最终选取 2014 年 3 月 29 日~2014 年 4 月 27 日四周的数据作为模型训练数据，2014 年 11 月 1 日~2014 年 1 月 30 日四周的数据作为模型验证数据，所选择的逐时数据如下图 3.5 所示。



(a) 照明插座分项逐时电耗（不包括室外景观照明）



(b) 动力分项逐时电耗 (不包括电梯)

图 3.5 选取的模型训练数据和验证数据

根据第 2 章的研究和图 3.5, 可以发现, 动力分项用能 (不包括电梯) 可以分为一个日类型, 照明插座分项用能 (不包括室外景观照明) 则分为工作日和非工作日两个日类型。使用 2014 年 3 月 29 日~2014 年 4 月 27 日的数据训练模型 (公式 (3.4)), 得到各个模型的参数如下表 3.5 所示。

表 3.5 训练得到的模型参数汇总表

参数	照明插座分项 (不包括室外景观照明)		动力分项 (不包括电梯)
	工作日	非工作日	全年
$a$	538.9	418.4	115
$\delta_1$	-331.2	-239.2	-62.78
$\delta_2$	-64.58	-25.66	-10.2
$\delta_3$	-5.099	-9.168	0.02581
$\delta_4$	-25.04	-20.51	-9.781
$\delta_5$	9.065	17.1	3.968
$\delta_6$	-9.292	-11.35	-1.793
$\delta_7$	10.88	16.38	0.8318
$\delta_8$	2.618	3.365	0.9028
$\delta_9$	-0.7763	-0.2718	-0.455
$\delta_{10}$	8.833	10.23	1.759
$\delta_{11}$	-2.803	-2.431	-0.5772
$\delta_{12}$	0.008974	0.3846	0.2978
$\eta_1$	-172.7	-109.9	-29.86
$\eta_2$	50.25	32.85	11.6
$\eta_3$	-78.74	-62.53	-14.97
$\eta_4$	-3.568	-5.959	-2.573
$\eta_5$	-12.31	-16.59	-2.195

$\eta_6$	-16.96	-19.04	-4.719
$\eta_7$	4.573	5.321	0.51
$\eta_8$	-12.95	-10.92	-2.206
$\eta_9$	4.223	1.814	0.2883
$\eta_{10}$	-0.3947	1.21	-0.6294
$\eta_{11}$	0.5534	-1.459	-1.161
$\eta_{12}$	1.446	2.761	1.008

经过训练，获得了照明插座分项（不包括室外景观照明）工作日、照明插座分项（不包括室外景观照明）非工作日和动力分项（不包括电梯）全年的计算模型，下面 2014 年 11 月 1 日~2014 年 1 月 30 日的数据作为验证数据，对上述三个模型进行验证，验证结果汇总于表 3.6。三个模型的训练模型  $R^2$  都大于 0.95，CV 值和 MRE 值都不大于 10%，验证模型结果更好，CV 值和 MRE 值都小于 5%。

表 3.6 模型训练和验证结果汇总表

分项	日类型	训练模型 $R^2$	训练模型 CV (%)	训练模型 MRE (%)	验证模型 CV (%)	验证模型 MRE (%)
照明插座分项 (不包括室外 景观照明)	工作日	0.9850	6.529	4.772	4.518	4.255
	非工作日	0.9836	6.357	4.433	3.074	3.825
动力分项(不包 括电梯)	全年	0.9745	7.479	4.685	5.482	4.082

通过上述工作，已经可以获得 DMT 不同日类型下的逐时分项能耗数据，在同一日类型下，选取能耗最大的值作为基准值，其他时刻的能耗值与最大值的比值则为该时刻的同时使用系数，在 EnergyPlus 中设置为照明和设备的 schedule fraction。在计算 schedule fraction 之前需要先说明几个问题。

1) 由于照明能耗和插座能耗是混在一起的，所以对照明和插座不进行分开设置。

2) 由于 DMT 是一栋混合型建筑，所以需要对照明插座能耗进行合理的分配设置，首先取夜间 (23:00~次日 6:00) 时均功率最高值 (此处为 303kW) 作为照明灯具以及插座设备的待机能耗和全天运行的照明灯具及插座设备的能耗之和，将其单独作为一项进行设置，本文中称之为全天用能，白天时间 (7:00~22:00) 全部按照 303kW 计算。

3) 在白天时间内的逐时时均功率中均减去 303kW，将剩余的逐时功率再分配为商场区域和工作区域，分配方式是非工作日的逐时值即为商场部分的照明插座剩余功率，取最大值为峰值，此处为 412kW，其余时刻的时均功率与 412kW 的比值即为同时使用系数；工作日的逐时值减去非工作日的逐时值，差值即为办

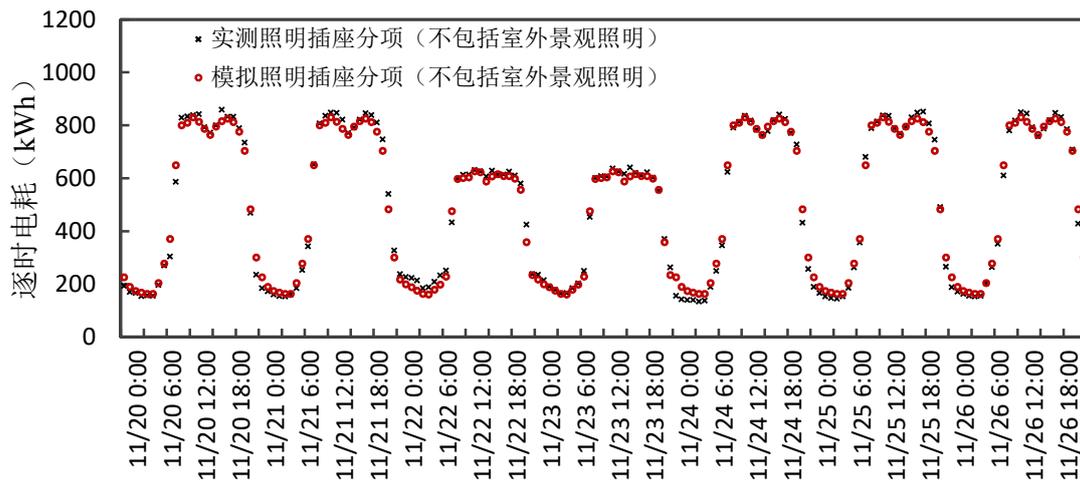
公部分的照明插座剩余功率，同样取最大值为峰值，此处为 140kW，其余时刻的时均功率与 140kW 的比值即为同时使用系数。

4) 动力分项不进行划分，直接根据峰值和其他时刻的值计算同时使用系数即可。

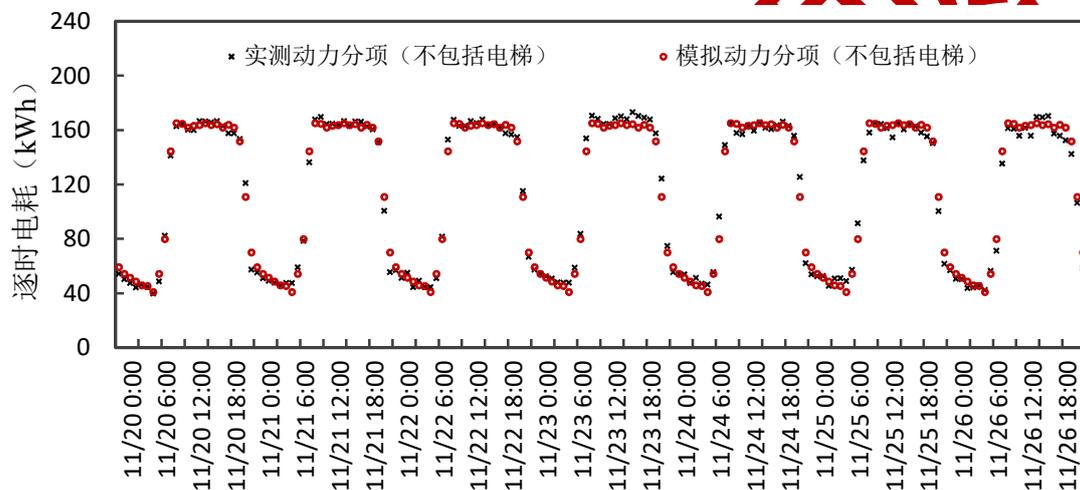
DMT 照明插座和动力分项的同时使用系数计算结果见表 3.7，为了展现模拟结果和实测数据的相关程度，作者在 11 月选取一周的模拟数据绘于图 3.6 说明模拟的准确性。

表 3.7 模型训练和验证结果汇总表

分项	办公区域工作日	商场区域全年	工作日全天用能	非工作日全天用能	动力分项(不包括电梯)
峰值 (kW)	140	412	303	166	
面积 (m <sup>2</sup> )	18000	45000	63000	63000	63000
强度 (W)	7.8	9.1	4.81	4.81	2.63
1:00	0.00	0.00	0.63	0.66	0.33
2:00	0.00	0.00	0.58	0.63	0.31
3:00	0.00	0.00	0.56	0.58	0.29
4:00	0.00	0.00	0.54	0.54	0.28
5:00	0.00	0.00	0.54	0.54	0.27
6:00	0.00	0.00	0.68	0.60	0.25
7:00	0.35	0.32	1.00	1.00	0.33
8:00	0.63	0.37	1.00	1.00	0.48
9:00	0.77	0.76	1.00	1.00	0.87
10:00	0.89	0.95	1.00	1.00	1.00
11:00	0.92	0.96	1.00	1.00	0.99
12:00	1.00	0.96	1.00	1.00	0.98
13:00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.98
14:00	0.72	0.99	1.00	1.00	0.99
15:00	0.78	0.94	1.00	1.00	1.00
16:00	0.83	0.97	1.00	1.00	0.99
17:00	0.88	0.98	1.00	1.00	0.99
18:00	0.96	0.97	1.00	1.00	0.98
19:00	0.90	0.97	1.00	1.00	0.99
20:00	0.78	0.96	1.00	1.00	0.98
21:00	0.65	0.89	1.00	1.00	0.91
22:00	0.54	0.57	1.00	1.00	0.67
23:00	0.00	0.00	1.00	0.78	0.42
0:00	0.00	0.00	0.75	0.72	0.36



(a) 照明插座分项逐时电耗 (不包括室外景观照明)



(b) 动力分项逐时电耗 (不包括电梯)

图 3.6 选取的模型训练数据和验证数据

#### 3.4.2.4 非用电设备参数校验

该建筑不具备人员的进出统计功能,本文进行了现场调研,办公区的人员密度约为 $8\text{m}^2/\text{人}$ ,商场的人员密度约为 $6\text{m}^2/\text{人}$ ,人员逐时在室系数如下图3.7所示。人员的显热量、潜热量以及对流换热得热和辐射得热比例参考 ASHRAE Handbook,分别为40%、20%和40%。

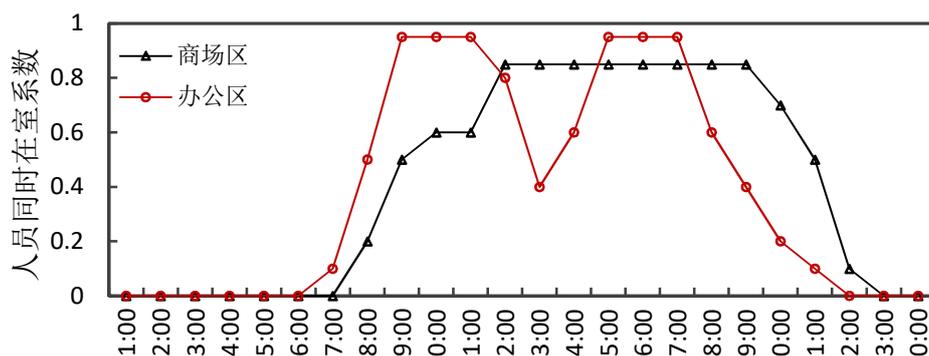


图 3.7 人员同时在室系数

根据 3.3.5 节，在进行渗透风设置时可以根据建筑类型和分区在 0.1~0.5 次/小时范围内选取。该建筑占地面积较大，窗墙比较小，冷风渗透量不大，此处取 0.1 次/小时。室外新风量，该建筑的空调系统为定新风比系统，新风比为 30%。

#### 3.4.2.5 空调系统末端能耗校验

本节为空调系统末端设备风机的校验，根据 3.3.6 节所述，校验方法为使用空调系统末端设备实测逐时电耗数据和实测或者模拟得到的逐时冷负荷拟合出风机的等效性能曲线。

根据章节表 3.3，该建筑有空调末端能耗的单独计量，在章节 3.4.2.3 中照明插座分项能耗和动力分项能耗已经计算出来，并且准确度很高，所以可以根据第 2 章的空调末端能耗拆分算法拆分得到空调系统末端设备能耗。得到空调末端能耗如下图 3.8 所示。

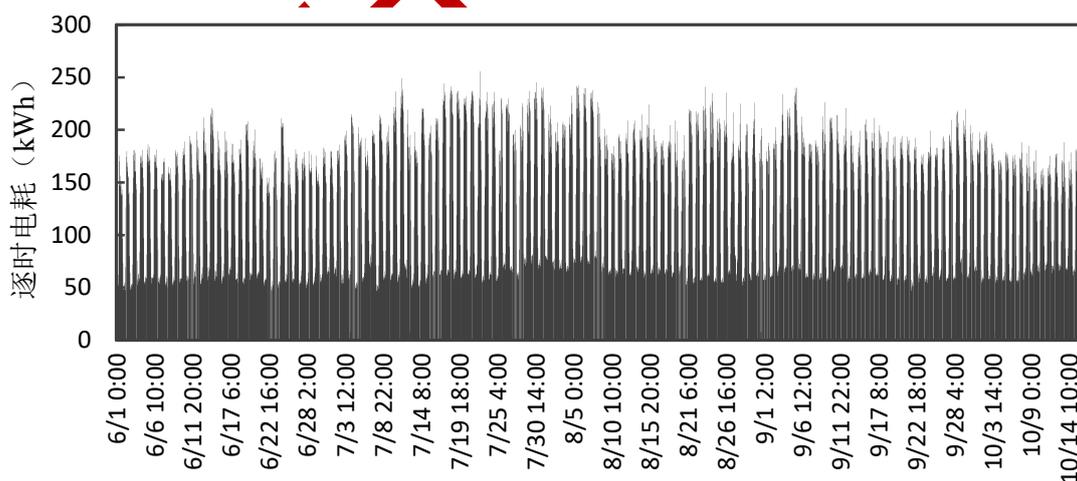


图 3.8 空调系统末端设备拆分结果

BMES 数据中没有空调末端的逐时送风量，但是有送风温度和回风温度的采集，房间的设计送风温差为  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有逐时冷量数据又知道空气的比热  $1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 和空气的密度  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。所以可以间接计算出逐时送风量，根据

公式 (3.5) ~ (3.7) 拟合得到的风机的等效性能曲线如图 3.9 所示。

$$COFP=0.3244+1.324(PLRF)-1.052(PLRF)^2+0.3384(PLRF)^3$$

$$R^2=0.8673, RMSE=0.03965, CV=4.873\%, MRE=3.733\%$$

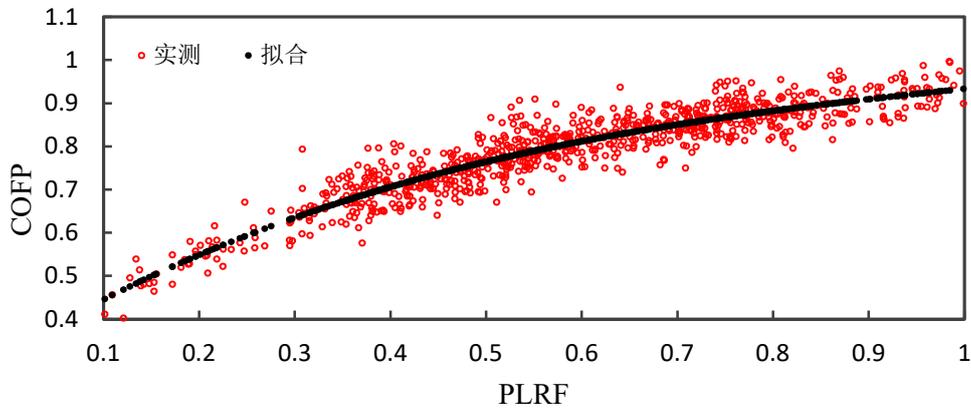


图 3.9 空调系统末端风机等效性能曲线拟合结果

下面在八月份取一周的数据对实测空调末端能耗和模拟空调末端能耗进行对比分析。由图 3.10 可以看出实测值和模拟值的趋势是非常接近的。即使做不到一致，但是这样的结果对于室内冷负荷模拟的影响已经非常小。

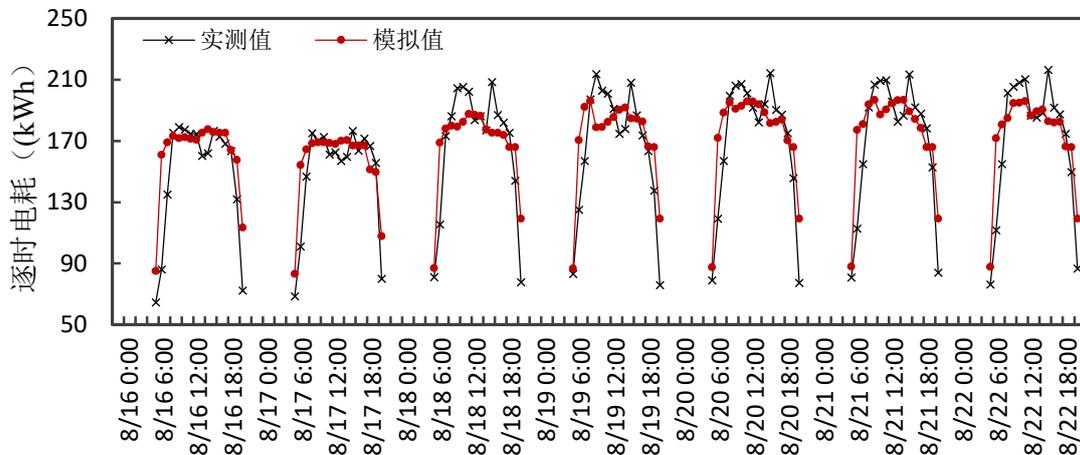


图 3.10 空调系统末端拆分能耗与模拟能耗对比图

#### 3.4.2.6 空调系统负荷校验

空调系统负荷模拟已经完成，本小节是对逐时负荷模拟结果进行验证。下面选取 2014 年 8 月 16 日~22 日一周的逐时冷量进行校验并绘制于图 3.11，经计算其 CV 和 MRE 分别为 13.40%和 8.242%。相比于能耗校验而言逐时冷负荷的校验误差相对较大，超过了 10%，其主要原因有以下几个方面：1) 围护结构的参数与实际数值相比有一定的误差；2) 室内人员的模拟没有做到非常精确；3) 冷

风渗透和新风量的逐时值也无法做到非常精准。

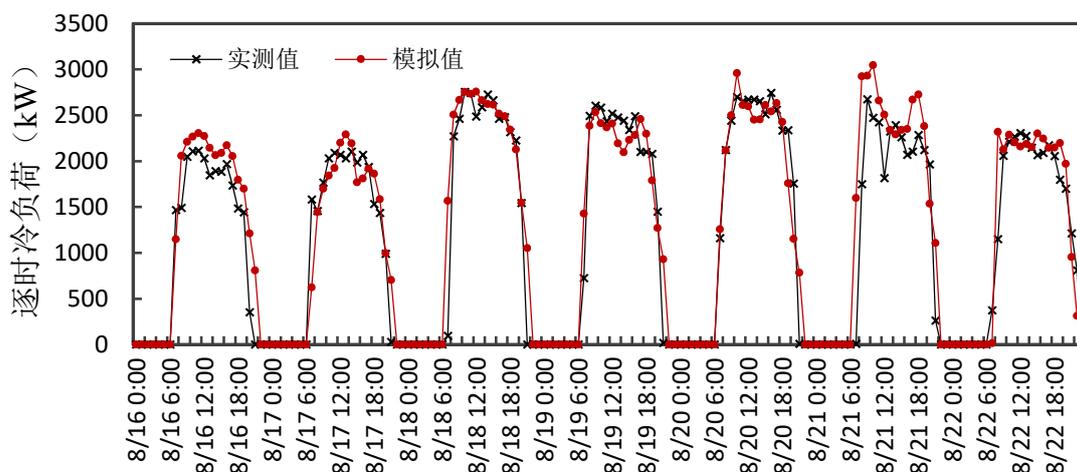


图 3.11 实测冷负荷与模拟冷负荷对比图

### 3.5 本章小结

本章提出一种基于逐时分项计量电耗数据的空调系统负荷计算模型校验方法。该方法主要分为七个步骤，其中第二步到第六步是校验的重点。该方法可以很好的克服模型校验中“多解”、“不准”和“费时”这三个困难。该方法是先校验各个分项的能耗，由底层到顶层，从而获得准确的总能耗，这便克服了“多解”这个困难。针对“不准”问题，由于使用月电费账单等数据进行校验，现有的校验方法很难做到逐时模拟结果的准确性，而本章提出的方法是通过实测的逐时分项能耗数据逐层校核，可以保证逐时模拟的准确性。

对于围护结构的设置，外围护结构和建筑内的楼板和内墙需要进行准确设置，对于空调系统连续运行的建筑，室内家具，办公和装饰等对建筑负荷的影响很小。可以进行估算设置。建筑内非空调系统能耗的校验使用了傅里叶模型，按照不同的能耗分项和日类型分别进行计算，然后将计算后的能耗中最大值作为基准值，其余时刻的能耗值与其比值作为同时使用系数，经过案例分析，该部分的校验精度非常好。对于人员的设置，则需要建筑的出入记录或者到现场进行人员进出调查。室外空气的设置包括渗透风和空调系统的新风，渗透风的设置可以在 0.1~0.5 次/小时的换气次数内选取，且该部分对模型的影响很小。

空调系统逐时冷负荷的校验结果为 CV 值和 MRE 值分别为 13.40% 和 8.242%，并且分析了造成误差的几个主要原因。用模拟法计算空调系统负荷平均相对误差可以保证在 10% 以内，这样的计算准确度是比较好的，但是针对任何一栋建筑都需要建立一个新的建筑模型，模型校验的方法是通用的，而建立的建筑模型是不通用的。

---

本文提出的模型校验方法是一个系统的具有普遍适用性的方法，并且该方法可以实现自动化校验，可以尽最大可能地避免无意义的尝试性校验，从而加快校验速度。有了基本的建筑信息和详细的分项能耗数据，可以将建筑的非空调系统设备能耗和建筑的冷/热负荷计算得比较准确。

同济许鹏课题组

## 第4章 空调系统逐时负荷估算法

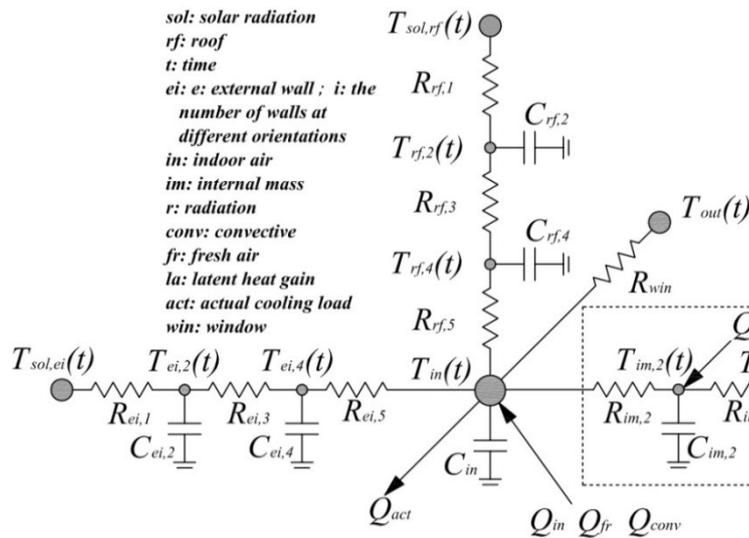
### 4.1 概述

本文在第1章绪论中已经阐述了在空调系统故障诊断领域中空调系统负荷数据的重要性。本文第3章以EnergyPlus为依托建立了一套以分项计量能耗数据为基础的空调系统逐时负荷模拟模型的校验方法,模拟结果逐时平均相对误差为8.242%,准确度较高。但是众所周知使用常用的模拟软件,不只是EnergyPlus,还有eQuest、TRNSYS等,对空调系统负荷进行模拟,都需要搭建一个完整的建筑模型,搭建完整的建筑模型是非常耗时的;而且针对每一栋建筑都要搭建一次新的模型。在对准确性要求没有那么高,但是追求计算效率的情况下,本章建立了一个通用的空调系统负荷估算模型,对于不同类型不同几何尺寸的建筑,不需要重新建立模型,只需要更改模型中的几个参数即可。本章建立的空调系统逐时负荷估算模型是在现有的RC模型(热网络模型)的基础上结合现有的建筑分项计量系统的优势改良而成的,所以本文给该空调系统逐时负荷估算方法命名为“RC-S”模型(S表示分项计量“submeter”)。该模型中建筑的外围护结构依然沿用3R2C模型表示,为了提高模型的精度,对现有的建筑内部蓄热体模型进行了改进;然后通过数据挖掘手段进行优化计算,获取模型中的各参数;建筑的内部照明及设备产生的内热用分项计量逐时数据表示;并且通过与上海市一栋楼宇的实测数据和EnergyPlus模拟数据对估算模型进行了验证。

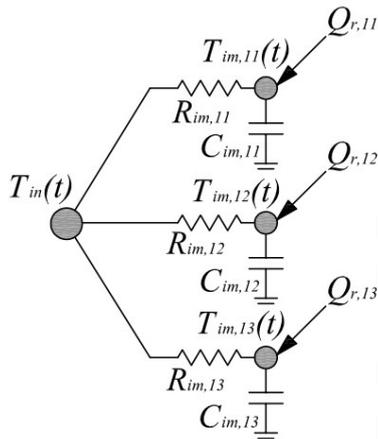
### 4.2 RC模型的介绍

RC热网络模型不是一个新兴模型,它早在上世纪七十年代就已经被写入了教科书<sup>[178]</sup>,较新较全面的研究和应用当属香港理工大学的Xinhua Xu和Shengwei Wang等人<sup>[184-186]</sup>。他们提出的模型如下图4.1(a)所示。本文中称之为“模型0”。

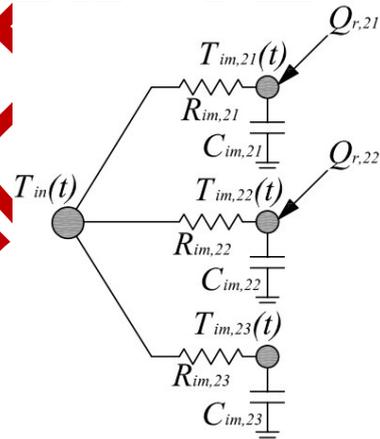
模型0对建筑的外围护结构和内部蓄热分别进行了描述,其中屋面和外墙的传热情况都使用3R2C简化模型进行描述。此处需要说明的是由于各个朝向的外墙接受太阳辐射情况不同,导致不同朝向外墙的外壁面温度不同,所以各个朝向的外墙需要分别计算。对于建筑内部的蓄热体(如楼板、内墙、家具、地毯和各种装饰等)则采用了串联型的2R2C模型来进行描述。



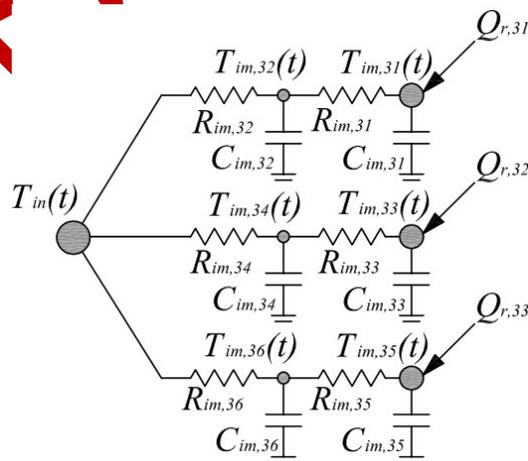
(a) 模型 0



(b) 模型 1



(c) 模型 2



(d) 模型 3

图 4.1 RC 负荷估算模型示意图

注意：图中内部蓄热体节点表示抽象为一个整体的一类蓄热体，非某个具体的壁面。

3R2C 简化模型的参数是通过比较外围护结构的理论模型和 3R2C 简化模型在热传导中的幅频特性获得的。即通过优化计算方法计算得到 3R2C 简化模型的参数,使得简化后的模型的传热特性与实际外围护结构的传热特性尽可能地吻合。此处选用的优化计算方法为遗传算法。建筑内部得热的计算采用的是设计参数与现场调研相结合的方式完成的。同样的,描述建筑内部蓄热体的 2R2C 模型参数也是通过遗传算法优化而得,只是此处的优化目标不再是吻合传热特性,而是使建筑的估算负荷与实测负荷尽可能地吻合。该模型可以由传热方程描述,见公式(4.1)~(4.7)。

$$C_{rf,1} \frac{dT_{rf,2}(t)}{dt} = \frac{T_{sol,rf}(t) - T_{rf,2}(t)}{R_{rf,1}} - \frac{T_{rf,2}(t) - T_{rf,4}(t)}{R_{rf,3}} \quad (4.1)$$

$$C_{rf,4} \frac{dT_{rf,4}(t)}{dt} = \frac{T_{rf,2}(t) - T_{rf,4}(t)}{R_{rf,3}} - \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} \quad (4.2)$$

$$C_{ei,2} \frac{dT_{ei,2}(t)}{dt} = \frac{T_{sol,ei}(t) - T_{ei,2}(t)}{R_{ei,1}} - \frac{T_{ei,2}(t) - T_{ei,4}(t)}{R_{ei,3}} \quad (4.3)$$

$$C_{ei,4} \frac{dT_{ei,4}(t)}{dt} = \frac{T_{ei,2}(t) - T_{ei,4}(t)}{R_{ei,3}} - \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} \quad (4.4)$$

$$C_{im,1} \frac{dT_{im,1}(t)}{dt} = Q_{r,1} - \frac{T_{im,1}(t) - T_{im,2}(t)}{R_{im,1}} \quad (4.5)$$

$$C_{im,2} \frac{dT_{im,2}(t)}{dt} = Q_{r,2} + \frac{T_{im,1}(t) - T_{im,2}(t)}{R_{im,1}} - \frac{T_{im,2}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,2}} \quad (4.6)$$

$$Q_{est} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{ei,i}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,i}} \right) + \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} + \frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{R_{win}} + \left( \frac{T_{im,2}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,2}} \right) - C_{in} \frac{dT_{in}(t)}{dt} + (Q_{conv} + Q_{fr} + Q_{la}) \quad (4.7)$$

其中,  $R$  为热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $C$  为热容,  $J/m^2 \cdot K$ 。  $T$  为温度,  $^{\circ}C$ ; 下标  $rf$ ,  $im$ ,  $ei$ ,  $win$  和  $in$  分别表示屋面、内部蓄热体、外墙、外窗和建筑内部;  $Q_{r,1}$  和  $Q_{r,2}$  分别表示节点  $C_{im,1}$  和  $C_{im,2}$  接受的辐射热量, 包括来自室外的太阳辐射得热和灯具。设备和人员等来自建筑内部的辐射得热,  $Q_{conv}$  表示灯具、设备和人员等建筑内部的对流换热;  $Q_{fr}$  表示由新风或者渗透风产生的空调系统负荷;  $Q_{la}$  表示人员、餐饮等产生的潜热负荷;  $Q_{est}$  表示估算而得的冷负荷。

模型 0 中将内部蓄热体视为串联模型, 分为轻重两种类型, 分别接受太阳辐

射和建筑内部人员、照明和设备等产生的辐射，即  $R_{im,01} \neq R_{im,02}$ ， $C_{im,01} \neq C_{im,02}$ ， $Q_{r,01} \neq Q_{r,02}$ 。

在第 1 章 1.2.4 节文献综述部分已经对 RC 模型的发展和研究现状进行了综述，经过分析，造成误差的两个主要原因：1) 使用 2R2C 模型描述内部蓄热体的特性不够准确；2) 在上述的研究中关于建筑内热源（照明和设备等）的计算，使用的是内热源的设计功率和同时使用系数，而非建筑实际运行中的实测数据。鉴于上述不足，本章将对现有 RC 空调系统负荷估算模型进行改进。

### 4.3 RC-S 空调系统逐时负荷估算算法的建立

鉴于上述问题，在现有的 RC 模型基础上，本文提出了改进的“RC-S 模型”。该模型的建筑外围护结构依然维持使用传统的 3R2C 简化模型；而建筑内部蓄热体模型则由原来的 2R2C 串联模型改进为并联模型，并且本文提出了假设的三种并联模型，具体见本章 4.3.1；建筑内部得热则使用实时的建筑分项计量能耗数据进行计算。下面对改进后的三个模型进行描述，此处需要说明的是 RC-S 模型的外围护结构（外墙、外窗和屋面）计算方法和模型 0 是完全一致的，没有任何变动。RC-S 模型的主要变动体现在两个方面：1) 建筑内部蓄热体模型的改进（即对图 4.1 (a) 中虚线方框中的部分进行改进），改变表现为模型结构的变化，将模型 0 中的串联形式变为并联形式，并且本文中预设了三种不同的改进模型形式，下面会进行详细介绍；2) 建筑内热源计算，即人员、照明和设备等的改进在模型形式上是无法体现的，而是体现在计算数据的选取上，模型 0 建筑内热源计算数据是选取建筑的设计数据或实际建筑内用电设备额定功率的统计数据，而 RC-S 模型使用的是分项计量系统采集到的实时的电耗数据。

#### 4.3.1 模型假设

RC-S 模型对于建筑内部蓄热体的描述提出了三种改进模型，分别称为“模型 1”、“模型 2”和“模型 3”，见图 4.1 (b)、(c) 和 (d)。此处需要说明：实际建筑内部的辐射情况是比较复杂的，如需要计算辐射热量在不同壁面上的分配比例，需要考虑不同壁面之间的相互辐射情况等。但是本文的空调系统负荷计算方法是一个估算方法，没有足够的技术支持如此详细的计算，考虑到建筑内部辐射无论经过怎样的复杂过程，最终都会转化为建筑内部的得热，所以本文略过辐射的复杂动态过程，认为辐射经过复杂过程之后最终都照射到建筑内部蓄热体上，从而提高蓄热体的温度，然后蓄热体与室内空气之间通过对流换热形式进行热量交换。

## 4.3.1.1 模型1

该模型如图4.1(b)所示,可以简单的描述为:对建筑内部蓄热体进行分类,对蓄热体接受的辐射情况不进行分类。

该模型中,根据材料的热惰性将建筑内蓄热体分为轻中重三类,1) 轻型蓄热体,实际建筑中体现为地毯、简易隔墙和轻型家具等;2) 中型蓄热体,实际建筑中体现为厚度较大的家具和较薄的内墙等;3) 重型蓄热体,实际建筑中体现为楼板和厚度较大的承重内墙等。对于建筑内部各个部位接受到的辐射得热情况则不进行分类,即模型中默认透过窗户进入到室内的太阳辐射和室内人员、照明和设备等产生的辐射都是均匀的照射在不同种类的蓄热体上的,即 $R_{im,11} \neq R_{im,12} \neq R_{im,13}$ ,  $C_{im,11} \neq C_{im,12} \neq C_{im,13}$ , 而 $Q_{r,11} = Q_{r,12} = Q_{r,13}$ , 分别等于室内总辐射得热的三分之一。该模型同样可以由传热方程描述,见公式(4.1)~(4.4)和公式(4.8)~(4.11)。

$$C_{im,11} \frac{dT_{im,11}(t)}{dt} = Q_{r,11} - \frac{T_{im,11}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,11}} \quad (4.8)$$

$$C_{im,12} \frac{dT_{im,12}(t)}{dt} = Q_{r,12} - \frac{T_{im,12}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,12}} \quad (4.9)$$

$$C_{im,13} \frac{dT_{im,13}(t)}{dt} = Q_{r,13} - \frac{T_{im,13}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,13}} \quad (4.10)$$

$$Q_{est} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} \right) + \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} + \frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{R_{win}} + \left( \frac{T_{im,11}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,11}} + \frac{T_{im,12}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,12}} + \frac{T_{im,13}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,13}} \right) - C_{in} \frac{dT_{in}(t)}{dt} + (Q_{conv} + Q_{fr} + Q_{la}) \quad (4.11)$$

## 4.3.1.2 模型2

该模型如图4.1(c)所示,可以简单的描述为:对蓄热体接受的辐射情况进行分类,对建筑内部蓄热体不进行分类。

该模型中,根据接受到辐射得热情况的不同,将建筑内部蓄热体分为三部分,1) 接受太阳辐射的蓄热体,实际建筑中体现为靠近建筑外窗的部分楼板,家具和装饰等;2) 接受其他辐射(人员、灯具和设备等产生的辐射),建筑内大部分的楼板、内墙和家具外表面等;3) 不接受辐射的蓄热体,建筑中背光处的楼板,墙壁和家具背光面等。 $Q_{r,21}$ 为透过窗户的太阳辐射, $Q_{r,22}$ 为人员、灯具和设备等

产生的辐射总和。该模型中对建筑内部蓄热体本身不进行分类，所以有  $R_{im,21} = R_{im,22} = R_{im,23}$ ， $C_{im,21} = C_{im,22} = C_{im,23}$ ， $Q_{r,21} \neq Q_{r,22}$ 。描述该模型的传热方程，见公式 (4.1) ~ (4.4) 和公式 (4.12) ~ (4.14)。

$$C_{im,21} \frac{dT_{im,21}(t)}{dt} = Q_{r,21} - \frac{T_{im,21}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,21}} \quad (4.12)$$

$$C_{im,22} \frac{dT_{im,22}(t)}{dt} = Q_{r,22} - \frac{T_{im,22}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,22}} \quad (4.13)$$

$$Q_{est} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} \right) + \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} + \frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{R_{win}} \\ + \left( \frac{T_{im,21}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,21}} + \frac{T_{im,22}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,22}} + \frac{T_{im,23}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,23}} \right) \\ - C_{in} \frac{dT_{in}(t)}{dt} + (Q_{conv} + Q_{fr} + Q_{in}) \quad (4.14)$$

#### 4.3.1.3 模型 3

该模型如图 4.1 (d) 所示，可以简单的描述为：对建筑内部蓄热体和蓄热体接受的辐射情况都进行分类。

为了模型的简化，不同于模型 1 中的三类分法，该模型根据材料的热惰性将建筑内蓄热体分为轻重两类，1) 轻型蓄热体，实际建筑中体现为地毯，简易隔墙，轻型家具等；2) 重型蓄热体，实际建筑中体现为楼板和承重内墙等。考虑到蓄热体可能会出现温度分布不均匀这一现象，如表面不同部位温度不一致，表面温度与内部温度不一致等，该模型选择了串并联混合模型。进而根据接受辐射得热情况的不同，对模型 3 进行进一步的描述，1) 通常透过窗户的太阳辐射作用在靠近窗户的地面上，所以该模型中假设透过窗户进入室内的太阳辐射作用在该小部分面积的重型蓄热体上；2) 其他辐射（人员、灯具和设备的辐射等）则分别作用在剩余的大部分重型蓄热体和轻型蓄热体上。所以有  $R_{im,31} = R_{im,33} \neq R_{im,35}$ ， $R_{im,32} = R_{im,34} \neq R_{im,36}$ ， $C_{im,31} = C_{im,33} \neq C_{im,35}$ ， $C_{im,32} = C_{im,34} \neq C_{im,36}$ ， $Q_{r,31} \neq Q_{r,32} = Q_{r,33}$ 。 $Q_{r,31}$  为透过窗户的太阳辐射， $Q_{r,32}$  和  $Q_{r,33}$  相等，都等于人员、灯具和设备等产生的辐射总和的二分之一。描述该模型的传热方程，见公式 (4.1) ~ (4.4) 和公式 (4.15) ~ (4.21)。

$$C_{im,31} \frac{dT_{im,31}(t)}{dt} = Q_{r,31} - \frac{T_{im,31}(t) - T_{im,32}(t)}{R_{im,31}} \quad (4.15)$$

$$C_{im,33} \frac{dT_{im,33}(t)}{dt} = Q_{r,32} - \frac{T_{im,33}(t) - T_{im,34}(t)}{R_{im,33}} \quad (4.16)$$

$$C_{im,35} \frac{dT_{im,35}(t)}{dt} = Q_{r,33} - \frac{T_{im,35}(t) - T_{im,36}(t)}{R_{im,35}} \quad (4.17)$$

$$C_{im,32} \frac{dT_{im,32}(t)}{dt} = \frac{T_{im,31}(t) - T_{im,32}(t)}{R_{im,31}} - \frac{T_{im,32}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,32}} \quad (4.18)$$

$$C_{im,34} \frac{dT_{im,34}(t)}{dt} = \frac{T_{im,33}(t) - T_{im,34}(t)}{R_{im,33}} - \frac{T_{im,34}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,34}} \quad (4.19)$$

$$C_{im,36} \frac{dT_{im,36}(t)}{dt} = \frac{T_{im,35}(t) - T_{im,36}(t)}{R_{im,35}} - \frac{T_{im,36}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,36}} \quad (4.20)$$

$$Q_{est} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} \right) + \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} + \frac{T_{oa}(t) - T_{in}(t)}{R_{win}} + \left( \frac{T_{im,32}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,32}} + \frac{T_{im,34}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,34}} + \frac{T_{im,36}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,36}} \right) - C_{in} \frac{dT_{in}(t)}{dt} + (Q_{com} + Q_{fl} + Q_{la}) \quad (4.21)$$

为了方便比较，将上述模型 0~模型 4 四个模型的建筑内部蓄热体模型的信息汇总于下表 4.1。

表 4.1 建筑内部蓄热体模型信息汇总表

模型编号	形式	热阻	热容	辐射
模型 0	串联	轻重型两种蓄热体 $R_{im,01} \neq R_{im,02}$	$C_{im,01} \neq C_{im,02}$	$Q_{r,01}$ = 太阳直射辐射 $Q_{r,02}$ = 太阳散射辐射 + 室内辐射
模型 1	并联	轻中重型三种蓄热体 $R_{im,11} \neq R_{im,12} \neq R_{im,13}$	$C_{im,11} \neq C_{im,12} \neq C_{im,13}$	$Q_{r,11} = Q_{r,12} = Q_{r,13} =$ 总辐射/3
模型 2	并联	蓄热体不分类 $R_{im,21} = R_{im,22} = R_{im,23}$	$C_{im,21} = C_{im,22} = C_{im,23}$	$Q_{r,21}$ = 太阳直射辐射 $Q_{r,22}$ = 太阳散射辐射 + 室内辐射
模型 3	串并联混合	轻重型两种蓄热体 $R_{im,31} = R_{im,33} \neq R_{im,35}$ $R_{im,32} = R_{im,34} \neq R_{im,36}$	$C_{im,31} = C_{im,33} \neq C_{im,35}$ $C_{im,32} = C_{im,34} \neq C_{im,36}$	$Q_{r,31}$ = 太阳直射辐射 $Q_{r,32} = Q_{r,33} =$ (太阳散射辐射 + 室内辐射) / 2

### 4.3.2 建筑外围护结构的参数优化

建筑外围护结构 3R2C 模型的优化方式是使得 3R2C 简化模型的幅频特性和相频特性与理论模型的幅频特性与相频特性无限接近,越是接近优化效果则越好。该优化过程可以划分为三个步骤,1) 获得理论模型的幅频特性与相频特性,2) 获得简化的 3R2C 模型的幅频特性与相频特性,3) 通过 GA 算法(遗传算法)优化出参数 3 个 R 和 2 个 C,使得 3R2C 简化模型的幅频特性与相频特性与理论模型尽可能相似。因为建筑幕墙(门窗等)结构的蓄热能力很小,可以按照瞬态传热模型进行计算;建筑的地面保温性能较好,而且土壤层温度比较恒定,其传热可以忽略不计;所以本小节所说的外围护结构主要指建筑的外墙和屋面。

#### 4.3.2.1 外围护结构理论模型特性

关于一维均匀多层平面结构传热矩阵的拉普拉斯变换已经有很多学者做过研究<sup>[182, 186, 193-198]</sup>,本文只做简单介绍。

建筑围护结构的传热属于一维传热过程,其传热模型可以表示为如方程(4.22)所示的关于变量  $s$  的拉普拉斯变化方程。

$$\begin{bmatrix} T_{in}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} = M(s) \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ q_{out}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ q_{out}(s) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

其中  $T$  是温度,  $q$  是热流,  $M(s)$  是整个壁面所有材料层的总系数矩阵,  $A(s) \sim D(s)$  是矩阵中的元素,即传热方程组的系数。如果将所有的壁面材料层包括内外空气层分开表示,则可以表示为下面方程(4.23)的形式。

$$M(s) = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = M_{in}(s)M_n(s)\dots M_1(s)M_{out}(s) \quad (4.23)$$

$$\text{其中: } M_i(s) = \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (4.23-1)$$

当材料的热容很小的时候,式(4.24)即可简化为:

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & -R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } R_i \text{ 为该材料的热阻。}$$

因此建筑与空气的内外表面的换热热阻为  $R_{in}$  和  $R_{out}$ , 所以有:

$$M_{in}(s) = \begin{bmatrix} 1 & -R_{in} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{out}(s) = \begin{bmatrix} 1 & -R_{out} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因为方程(4.22)有唯一解, 所以有  $A(s)D(s) - B(s)C(s) = 0$ , 对方程(4.22)进行变换可以得到方程(4.24)。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_{out}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -A(s)/B(s) & 1/B(s) \\ -1/B(s) & D(s)/B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_{in}(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -G_X(s) & G_Y(s) \\ -G_Y(s) & G_Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_{in}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

其中:  $G_X(s) = A(s)/B(s)$  (4.24-1)

$G_Y(s) = 1/B(s)$  (4.24-2)

$G_Z(s) = D(s)/B(s)$  (4.24-3)

令  $s = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ) 带入方程(4.24-1) ~ (4.24-3), 即可以生成复杂的方程  $G_X(j\omega)$ 、 $G_Y(j\omega)$  和  $G_Z(j\omega)$ , 这三个方程分别是理论传热模型中建筑外围护结构的材料外壁面、材料内部和材料内壁面的频率特性<sup>[19]</sup>。该频率特性可以表示为幅值特性和相位特性。

#### 4.3.2.2 外围护结构简化 3R2C 模型特性

用简化的 3R2C 模型(即三个热阻和两个热容)来表示建筑外墙和屋面的传热特性, 如图 4.2 所示。简化的模型包括外部、中部和内部三个部分, 下面对简化模型进行拉普拉斯变换的计算, 如方程(4.25)所示。

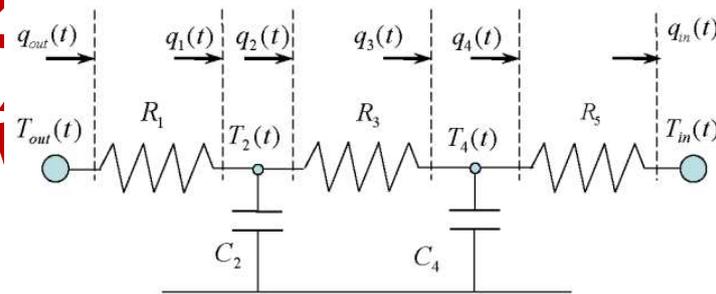


图 4.2 简化 3R2C 模型示意图

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{in}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -R_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -R_3 \\ -C_4s & C_4R_3s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -R_1 \\ -C_2s & C_2R_1s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ q_{out}(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ q_{out}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\text{其中: } A' = 1 + (C_4 R_5 + C_2 R_3 + C_2 R_5) s + C_4 C_2 R_5 R_3 s^2 \quad (4.25-1)$$

$$B' = -(R_5 + R_3 + R_1) - (C_4 R_3 R_1 + C_2 R_3 R_1 + C_2 R_5 R_1 + C_4 R_5 R_3) s - C_4 C_2 R_5 R_3 R_1 s^2 \quad (4.25-2)$$

$$C' = -(C_4 + C_2) s - C_4 C_2 R_3 s^2 \quad (4.25-3)$$

$$D' = 1 + (C_4 R_1 + C_4 R_3 + C_2 R_1) s + C_4 C_2 R_3 R_1 s^2 \quad (4.25-4)$$

与理论模型原理相同, 传热模型结构是一样的, 只是将多 R 多 C 的理论模型简化为只有 3R 和 2C 的简单模型, 所以简化的 3R2C 模型也可以表达为下面的方程 (4.26)。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_{out}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -A'(s)/B'(s) & 1/B'(s) \\ -1/B'(s) & D'(s)/B'(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_m(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -G'_X(s) & G'_Y(s) \\ -G'_Y(s) & G'_Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_m(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\text{其中: } G'_X(s) = A'(s)/B'(s) \quad (4.26-1)$$

$$G'_Y(s) = 1/B'(s) \quad (4.26-2)$$

$$G'_Z(s) = D'(s)/B'(s) \quad (4.26-3)$$

令  $s = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ) 带入方程 (4.26-1)~(4.26-3), 即可生成复杂的方程  $G'_X(j\omega)$ 、 $G'_Y(j\omega)$  和  $G'_Z(j\omega)$ , 这三个方程分别是 3R2C 简化传热模型中建筑外围护结构的外部、中部和内部的频率特性<sup>[199]</sup>。将其与理论模型的  $G_X(j\omega)$ 、 $G_Y(j\omega)$  和  $G_Z(j\omega)$  进行匹配, 则可以得到模型中的参数值。

#### 4.3.2.3 优化目标函数

外围护结构优化的目的是使得简化的 3R2C 模型的传热幅频特性与相频特性与实际结构理论模型的传热幅频特性与相频特性尽量接近, 该部分的目标函数为方程 (4.27)。

$$J_{3R2C}(R_1, R_5, C_4) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=X,Y,Z} (W_m^{AM} \left| |G_m(j\omega_n)| - |G'_m(j\omega_n)| \right| + W_m^{PL} \left| PL(G_m(j\omega_n)) - PL(G'_m(j\omega_n)) \right|) \quad (4.27)$$

其中,  $PL$  表示相位,  $N$  是频域,  $W$  是关于外部、中部和内部材料层传热的幅频特性与相频特性的权重比例, 既有研究表明在此处三个权重值都取值为 1 时优化效果最好。优化目标函数的约束条件如下面方程 (4.28) 所示。其中  $R$  和  $C$  是所有材料层总的热阻和热容。

$$\begin{cases} 0 < R_1 < R \\ 0 < R_5 < R \\ 0 < R_1 + R_5 < R \\ R_3 = R - R_1 - R_5 \\ 0 < C_4 < C \\ C_2 = C - C_4 \end{cases} \quad (4.28)$$

频域  $N$  的取值范围为  $(10^{-n_1}, 10^{-n_2})$ , 根据现有研究  $n_1$ ,  $n_2$  和  $N$  分别取 8、3  $10(n_1 - n_2) + 1$  [200]。

对建筑外围护结构简化模型进行优化计算需要的输入参数包括: 外墙和屋面的各个组成层材料的热阻、比热容、厚度、密度和外部壁面温度以及内部壁面温度。

### 4.3.3 建筑内部得热的计算

建筑的内部得热主要包括以下几个部分: ①照明灯具以及其他设备的散热; ②人员散热; ③新风负荷和④渗透风负荷。关于照明设备以及其他设备的散热, 因为室内的所有设备最终都将电耗转化为内部负荷, 所以可以将逐时分项计量数据作为内部的热量计算, 而其中的对流换热和辐射各占的比例参考本文章节 3.3.4。人员散热、新风负荷和渗透风负荷的计算可参考本文章节 3.3.5。此处不再重复介绍。

### 4.3.4 建筑内部蓄热体的参数优化

建筑内部蓄热体的参数优化比较容易实现, 优化的目的就是使得估算负荷值与实际负荷值之间的均方根误差尽可能小, 所以优化目标函数可以表达为方程 (4.29)。

$$J_{mRnC}(R_{im,1}, \dots, R_{im,m}, C_{im,1}, \dots, C_{im,n}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Q_{act,k} - Q_{est,k})^2}{N-1}} \quad (4.29)$$

其中， $Q_{act}$  是建筑的逐时实际负荷值， $Q_{est}$  是模型估算的建筑逐时负荷值， $R_{im,1} \sim R_{im,m}$  和  $C_{im,1} \sim C_{im,n}$  表示建筑内部蓄热体的热阻和热容， $m$  和  $n$  的具体取值，根据选取的模型而定。

对建筑内部蓄热体简化模型进行优化计算需要的输入参数包括：建筑各个朝向的外墙面积、外窗面积、屋面面积；室外辐照度、干球温度和相对湿度（用于计算室外空气的焓值）；室内干球温度和相对湿度（用于计算室内空气的焓值）、和建筑内部得热。

#### 4.3.5 模型输入参数汇总

章节 4.3.2~4.3.5 完成了建筑外围护结构的传热计算、建筑内部蓄热体的蓄热计算和建筑内部得热的计算，本小节将上述计算中需要用到的模型输入参数进行汇总，汇总结果列于表 4.2。

表 4.2 负荷计算模型输入参数汇总表

类别	输入参数
气象参数	干球温度
	相对湿度
	太阳辐照度
围护结构	各个朝向外墙的面积
	各个朝向外墙外壁面温度
	外墙的材料物性参数
	屋面的面积
	屋面外壁面温度
	屋面的材料物性参数
	各个朝向外窗的面积
	外窗的传热系数
	外窗的综合遮阳系数
	照明
设备	设备功率 设备得热的辐射和对流换热比例
人员	热源散热强度
	人员散热的辐射和对流换热比例

新风	渗透风负荷 空调系统新风负荷
内部蓄热体	楼板和主要内墙的估算面积 楼板和主要内墙的材料物性参数 其他蓄热体的估算面积 其他蓄热体的材料物性参数
室内空气	室内温度 室内相对湿度
其他	一段时间的冷负荷实测数据

#### 4.3.6 遗传算法优化过程

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是计算机科学人工智能领域中用于解决最优化的一种搜索启发式算法, 是进化算法的一种, 由美国的 J.Holland 教授 1975 年首先提出。介绍遗传算法的书籍和文章很多, 此处不展开描述。

遗传算法对于一个求函数最大值的优化问题 (求函数最小值也类同), 一般可以描述为数学规划模型。本文中要解决的正是这一类问题。

##### 4.3.6.1 外围护结构简化模型参数优化过程

根据方程 (4.27) 建筑外墙和屋面的简化模型参数求解过程是一个求解最小值的过程, 所以按照求解最小函数值的参数求解过程来编写遗传算法, 此处定义的适应度函数如方程 (4.30) 所示。

$$f_{3R2C}(R_1, R_5, C_4) = J_{3R2C}(R_1, R_5, C_4) \quad (4.30)$$

使用遗传算法进行优化的基本运算过程如下<sup>[201]</sup>:

- 1) 选取参数随机值: 给参数随机赋值, 并且判断是否在约束条件范围内。
- 2) 初始化: 设置进化代数计数器  $i=0$ , 设置最大进化代数 Max, 随机生成若干个个体作为初始种群。
- 3) 个体评价: 计算初始种群中各个个体的适应度。
- 4) 选择运算: 将选择算子作用于群体。选择的目的是把优化的个体直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。选择操作是建立在群体中个体的适应度评估基础上的。
- 5) 交叉运算: 将交叉算子作用于群体, 交叉算子是遗传算法的核心。
- 6) 变异运算: 将变异算子作用于群体, 即是对群体中的个体的某些基因的基因值作变动。
- 7) 群体经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体。

8) 终止条件判断: 若  $i=\text{Max}$ , 则以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出, 终止计算。

外围护结构简化模型参数优化流程如图 4.3 所示。

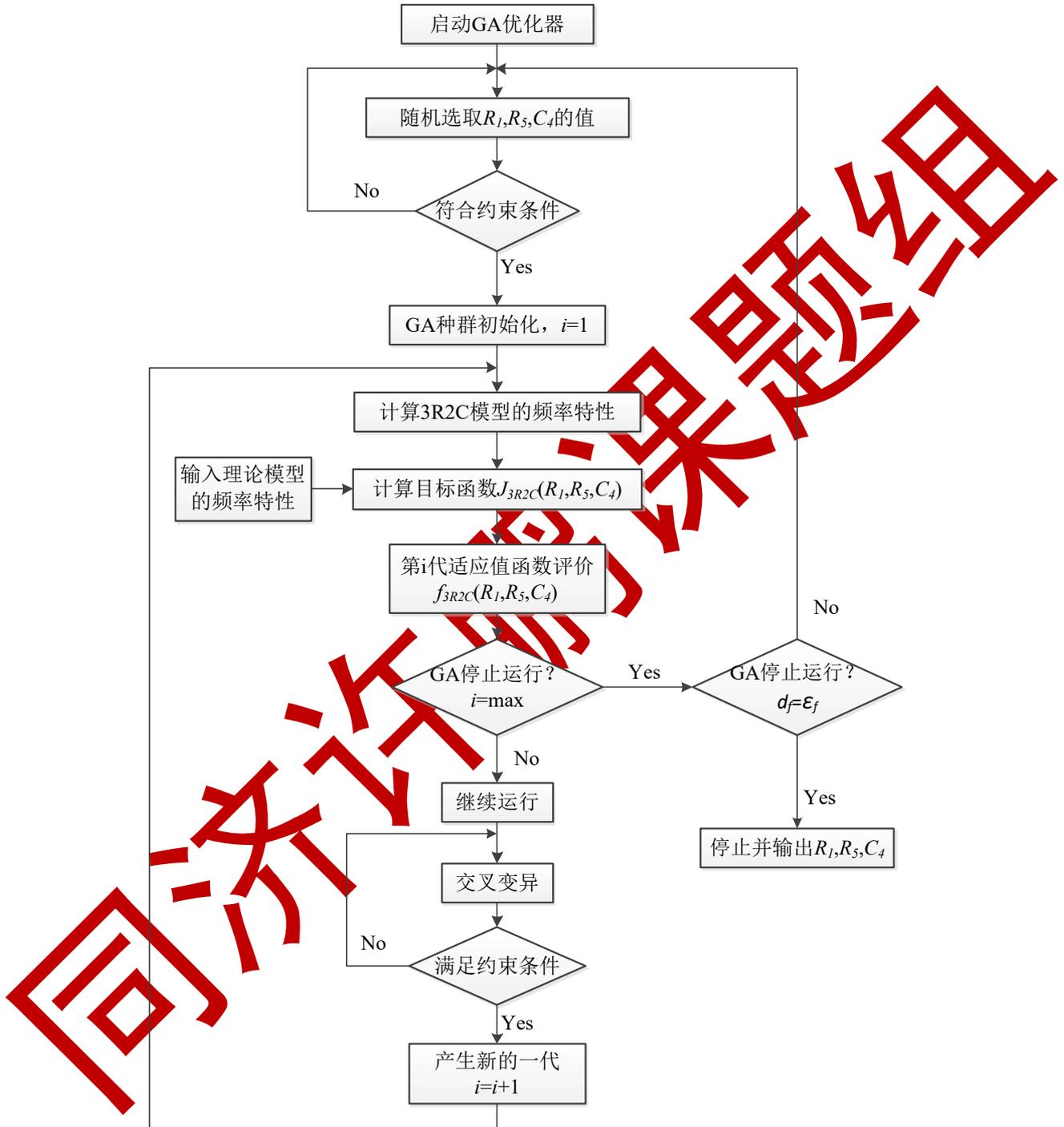


图 4.3 外围护结构简化模型参数优化流程图

#### 4.3.6.2 内部蓄热体简化模型参数优化过程

根据方程 (4.29) 建筑内部蓄热体的简化模型参数求解过程也是一个求解最小值的过程, 所以按照求解最小函数值的参数求解过程来编写遗传算法, 此处定

义的适应度函数如方程(4.31)所示。

$$f_{mRnC}(R_{im,1}, \dots, R_{im,m}, C_{im,1}, \dots, C_{im,n}) = J_{mRnC}(R_{im,1}, \dots, R_{im,m}, C_{im,1}, \dots, C_{im,n}) \quad (4.31)$$

使用遗传算法进行优化的基本运算过程与4.3.4.1相同,此处不做重复介绍。外围护结构简化模型参数优化流程如图4.4所示。

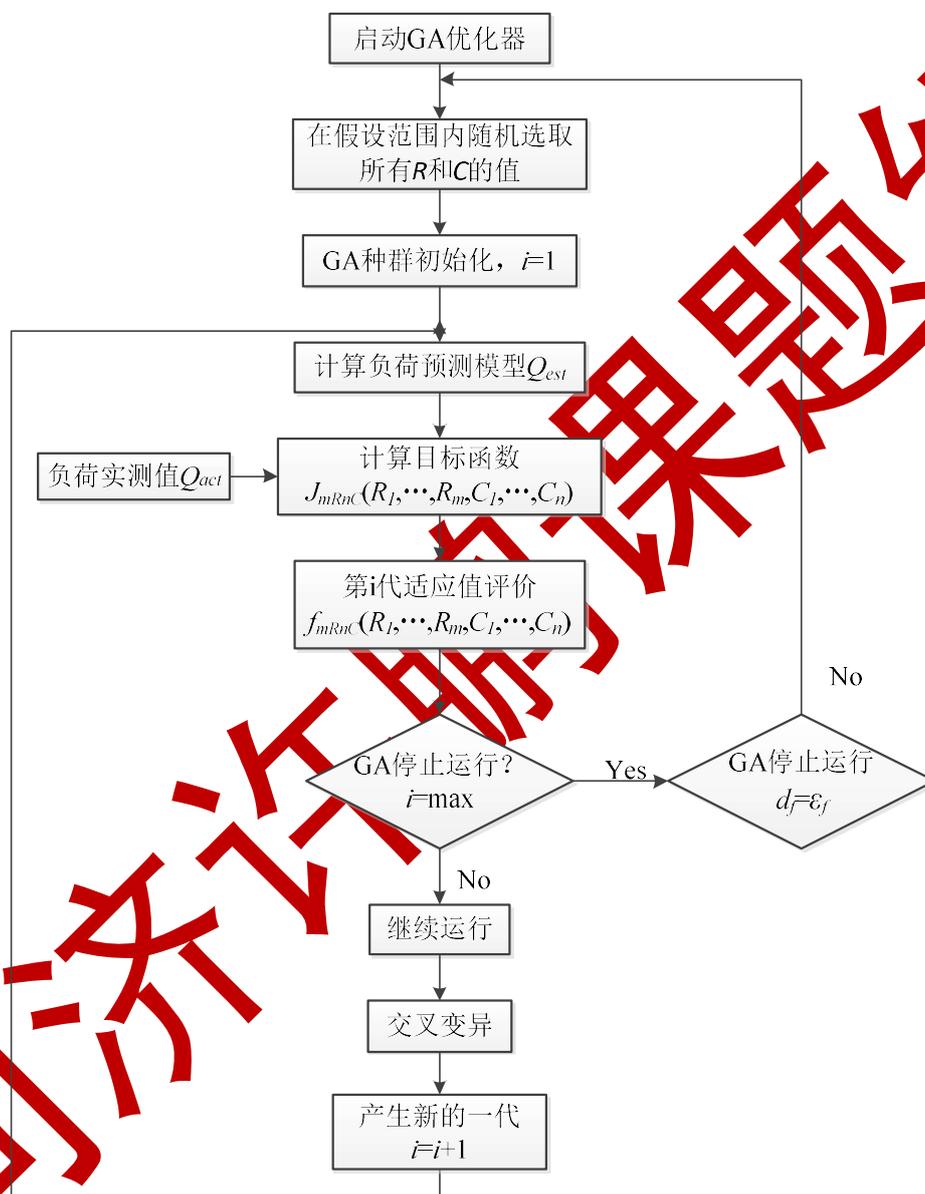


图4.4 内部蓄热体简化模型参数优化流程图

#### 4.4 案例分析

本章节首先描述了研究的建筑对象,然后介绍了对优化计算中需要用到的现场实测数据和调研数据的获取方式,为了使得研究结果更加丰富和可靠,本文第3章已经针对该实际建筑建立了 Energyplus 模型,获得一套完整的模拟数据对模

型进行了进一步验证。本章节分为三个主要部分，第一部分阐述了建筑外围护结构的优化过程，并且对优化结果进行了分析；第二部分是使用该建筑的现场实测数据对上述的四个模型进行了优化和验证；第三部分则使用该实际建筑的 Energyplus 模拟数据对上述的四个模型进行了优化和验证。

#### 4.4.1 建筑描述

本章案例分析的对象建筑和本文第 3 章中的案例建筑为同一栋建筑，所以建筑基本信息描述见本文章节 3.4.1。

#### 4.4.2 数据的获取

**实测数据。**实际气象参数的获取见本文章节 3.4.3.1，各个朝向的外墙和屋面的室外综合温度和室内温度由现场测量获得，各个朝向的外墙温度使用贴壁式温度传感器进行多点测量后取平均值。**模拟数据。**源于第 3 章校验好的 DMT 模型。

#### 4.4.3 建筑外围护结构的参数优化

本小节根据章节 4.3.2 的理论使用遗传算法对建筑围护结构（外墙和屋面）的简化 3R2C 模型中的参数进行优化计算。通过 GA 算法寻找最优化的  $R$  和  $C$  值，使得简化的 3R2C 模型的幅频特性与相频特性与理论模型的尽可能相似。建筑围护结构的简化 3R2C 模型是由上述的建筑实测数据校验而得的。

根据表 3.4 的建筑外围护结构材料情况对 DMT 建筑外墙和屋面的实际热阻的热容进行计算，计算结果列于表 4.3。其中热阻的计算方法是：热阻=厚度(m)/导热率(W/m·K)；热容的计算方法是：热容=比热容(J/kg·K)×密度(kg/m<sup>3</sup>)×厚度(m)。需要指出的是本文的计算过程中空气的热容是忽略不计的。

表 4.3 建筑外墙和屋面的材料层物性参数

外部结构	材料	厚度 (mm)	导热率 (W/m·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)	$R$ (m <sup>2</sup> ·K/W)	$C$ (J/m <sup>2</sup> ·K)
	外部空气层	—	—	—	—	0.0400	—
	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8	0.2500	8366
	膨胀珍珠岩	50	0.16	400	1170	0.3125	23400
	钢筋混凝土	200	1.74	2500	920	0.1149	460000
屋面	水泥砂浆找平层	30	0.93	1800	1050	0.0323	56700
	石灰砂浆	20	0.81	1600	1050	0.0247	33600
	内部空气层	—	—	—	—	0.1150	—
			总和			0.8894	582066

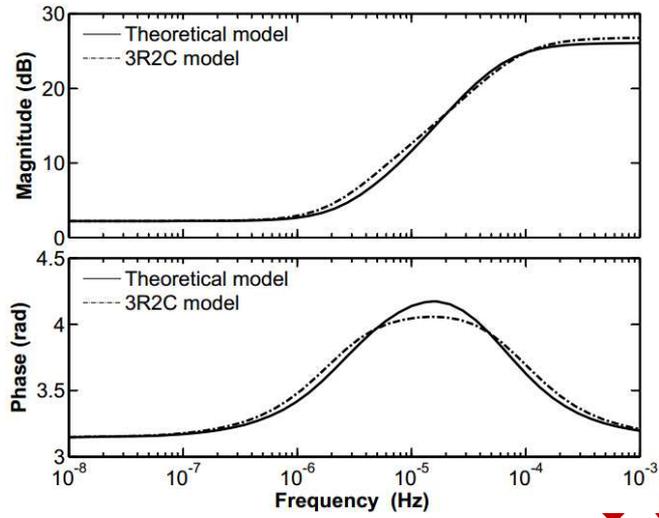
	外部空气层	—	—	—	—	0.0400	—
	花岗岩挂面	20	3.49	2800	920	0.0057	51520
	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8	0.2500	8366
外墙	水泥砂浆找平层	30	0.93	1800	1050	0.0323	56700
	混凝土砌块	200	0.68	1300	537.8	0.2941	139828
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050	0.0370	50400
	内部空气层	—	—	—	—	0.1150	—
	总和					0.7741	306814

上表 4.3 中已经计算出外墙和屋面材料的总的热阻和热容,根据目标函数(方程 (4.27))、约束条件(方程 (4.28))和适应度函数(方程 (4.30)),使用遗传算法对简化 3R2C 模型进行优化,优化得到的简化模型的参数列于下表 4.4。

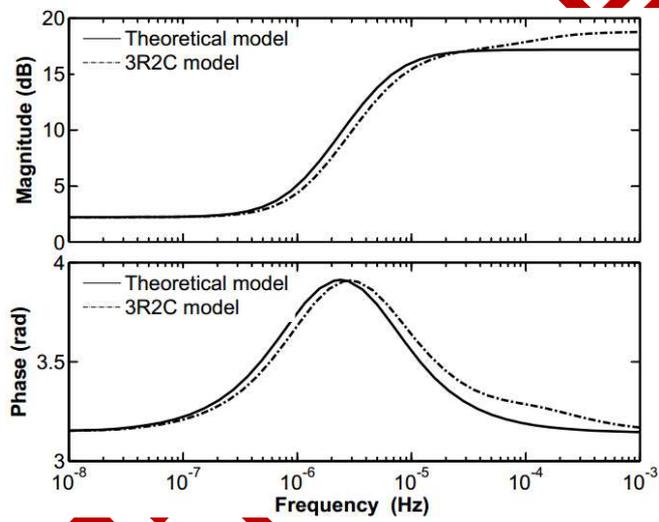
表 4.4 简化 3R2C 模型参数优化结果

外部结构	模型	$R$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ), $C$ ( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )						
		$R_1$	$C_2$	$R_3$	$C_4$	$R_5$	$R_{total}$	$C_{total}$
屋面	理论模型	—	—	—	—	—	0.8894	582066
	优化模型	0.4640	40066	0.2685	542000	0.1569	0.8894	582066
外墙	理论模型	—	—	—	—	—	0.7741	306814
	优化模型	0.0496	59014	0.5862	247800	0.1383	0.7741	306814

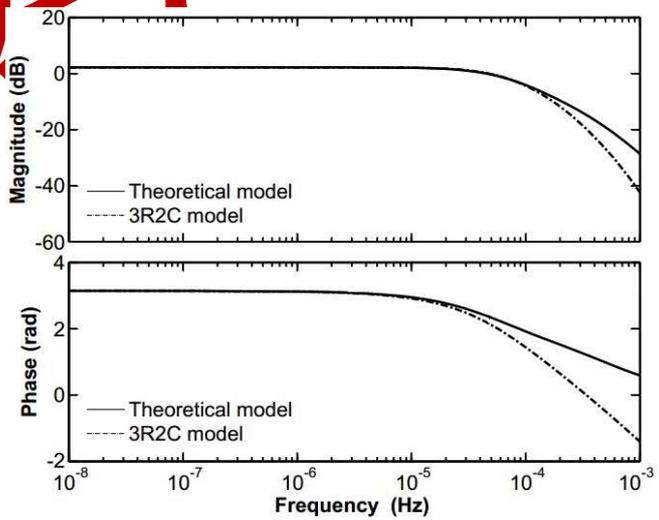
图 4.5 以伯德图的形式展示了建筑外墙的简化 3R2C 模型 (3R2C model) 与理论模型 (Theoretical model) 的外部、中部和内部的传热特性,横坐标为频率,纵坐标分为两个。分别为幅频特性 (Magnitude) 和相频特性 (Phase lag)。与图 4.5 同理,图 4.6 则对比了建筑屋面的简化 3R2C 模型与理论模型传热特性。由图 4.5 (a) 和图 4.6 (a) 不难看出外墙的外部传热特性吻合程度非常好,而屋面简化模型与理论模型的传热特性在低频区吻合的非常好,到高频区则出现了较大的误差,但是根据前人的研究可知对通过建筑外墙和屋面传入室内的热量影响较大是围护结构中部和内部的传热特性,受外部的传热特性影响并不大<sup>[186]</sup>。由图 4.5 (b) 和图 4.6 (b) 可以看出无论是外墙还是屋面,简化模型和理论模型中部区域的幅频特性和相频特性都吻合的非常好。而对于外墙和屋顶,简化模型和理论模型内部的幅频特性和相频特性在低频区和中频区都非常接近,只有在高频区,出现了一些偏差,见图 4.5 (c) 和图 4.6 (c)。但是图中理论模型曲线与简化 3R2C 模型曲线出现差异的高频区的传热量在围护结构整体传热量中所占的比例并不是很大,所以即使高频区存在差异,简化 3R2C 模型对建筑围护结构的传热描述依然是比较好的。该结果可以由图 4.7 说明。



(a) 外部

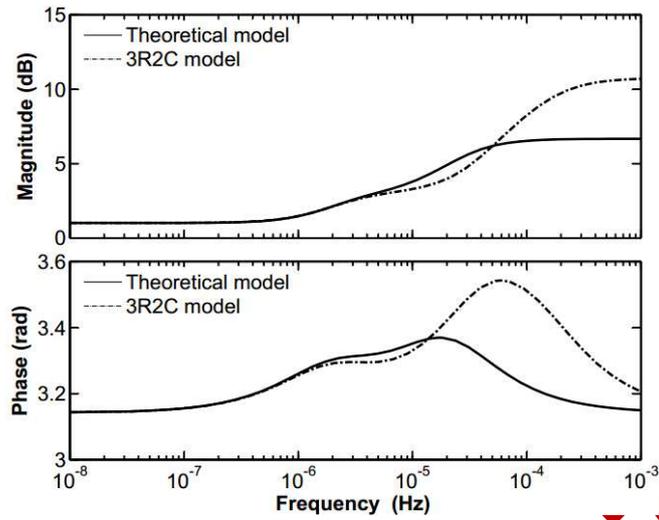


(b) 中部

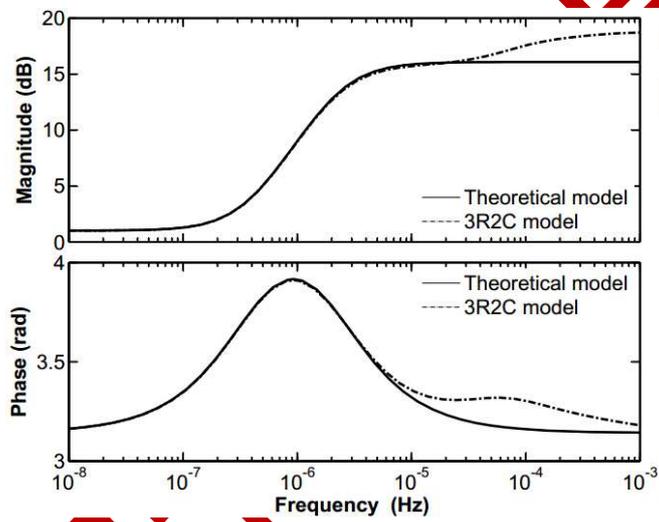


(c) 内部

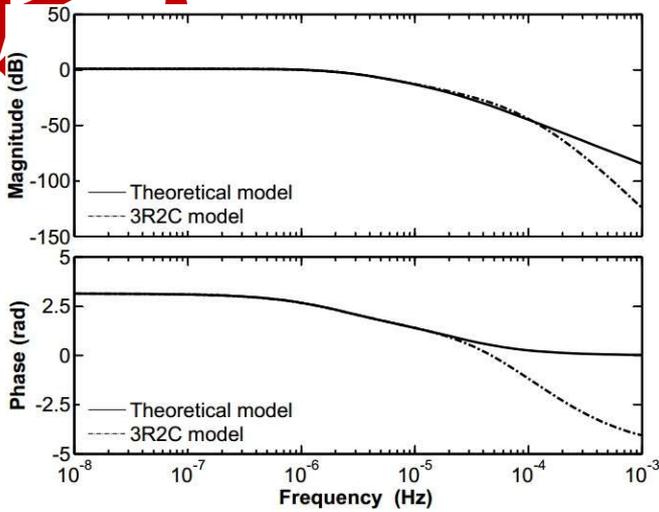
图 4.5 外墙伯德图



(a) 外部



(b) 中部



(c) 内部

图 4.6 屋面伯德图

图 4.7 为 8 月 2 日一天的分别使用理论模型和简化 3R2C 模型计算而得的外墙和屋面的逐时传热量对比图。根据该图可以看出简化模型的准确度较高。外墙得热量的计算,简化模型与理论模型相比平均相对误差为 8.8%,而屋面的为 7.9%。所以说简化的 3R2C 模型估算结果令人满意。

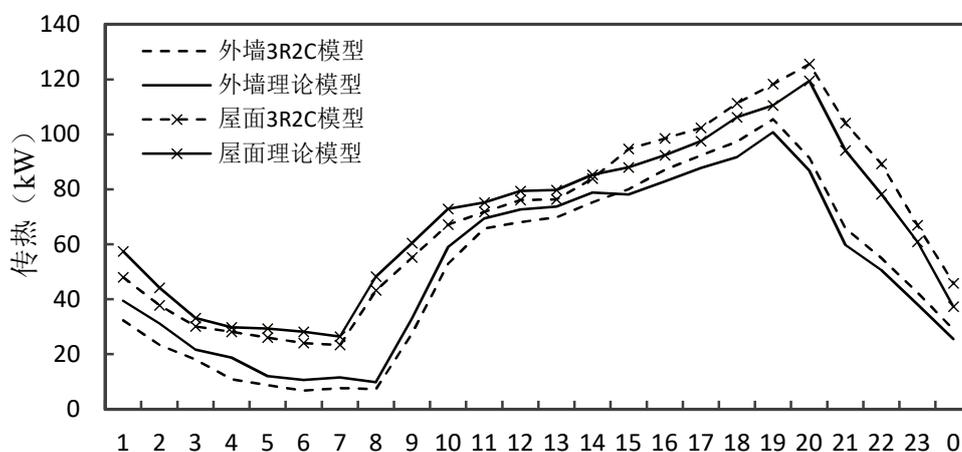


图 4.7 外墙和屋面的理论模型与简化模型逐时传热对比图

#### 4.4.4 建筑内部得热的计算

照明设备以及其他设备的散热,直接取逐时分项计量数据作为内部的热量计算依据,其中的对流换热和辐射所占的比例参考本文章节 3.3.4。人员散热、新风负荷和渗透风负荷的计算参考本文章节 3.3.5。

#### 4.4.5 建筑内部蓄热体的参数优化

根据 DMT 建筑的楼板和承重墙的材料情况和估算的建筑内部蓄热体情况(表 3.4),对内部蓄热体的热阻和热容进行计算,计算结果如下表 4.5 所示。

表 4.5 建筑内部蓄热体物性参数计算

内部结构	材料	厚度 (mm)	导热率 (W/m·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)	R (m <sup>2</sup> ·K/W)	C (J/m <sup>2</sup> ·K)
楼板	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050	0.0370	50400
	保温砂浆	20	0.08	400	1045.8	0.2500	8366
	钢筋混凝土	120	1.74	2500	920	0.0690	276000
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050	0.0370	50400
			总和			0.3930	385166
内墙	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050	0.0370	50400
	钢筋混凝土	120	1.74	2500	920	0.0690	276000
	石灰砂浆	30	0.81	1600	1050	0.0370	50400
			总和			0.1430	376800

家具装饰 1	木材 1	10	0.29	500	2510	0.0345	12550
家具装饰 2	木材 2	20	0.23	600	1890	0.0870	22680
家具装饰 3	纤维板	50	0.29	500	2510	0.1724	62750
总和						0.2939	97980

#### 4.4.5.1 内部蓄热体参数优化——实测

在章节 4.4.2 中，建筑围护结构的简化 3R2C 模型已经优化完成，且优化结果比较令人满意；在章节 4.4.4 中对建筑的内部得热进行了计算。本节将对建筑的内部蓄热体进行优化计算，优化手段依然是遗传算法，优化原理见本章 4.4.4。优化目的就是通过遗传算法寻求最优的  $R$  值和  $C$  值，使得估算建筑冷负荷与实际冷负荷尽可能相近。

建筑内部的蓄热体包括楼板、用于承重的重型内墙、轻型的简易隔墙、家具和各种内部装饰物等。其中楼板、内墙的面积可以比较准确的估算，而其他内部蓄热体的面积估算可能会存在较大的偏差，所以在优化计算过程中对  $R$  值和  $C$  值的取值范围进行适当的放大，本文则选择使用 3 倍的材料热阻值与表面空气热阻的和作为  $R$  值的约束条件上限， $C$  值也选择 3 倍的材料热容值作为约束条件上限，二者的优化范围约束条件下限都是 0。需要指出的是本文的计算过程中空气的热容是忽略不计的。

表 4.6 建筑内部蓄热体模型参数优化结果（实测）

模型编号	$R$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )	$C$ ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )	MRE (%)
模型 0	$R_{im,1}=0.0100$	$C_{im,1}=5.9938$	16.57
	$R_{im,2}=0.0325$	$C_{im,2}=1.9787$	
模型 1	$R_{im,11}=0.9586$	$C_{im,11}=0.0175$	13.04
	$R_{im,12}=0.3794$	$C_{im,12}=0.0276$	
	$R_{im,13}=0.2617$	$C_{im,13}=0.2968$	
模型 2	$R_{im,21}=R_{im,22}=R_{im,23}=0.4217$	$C_{im,21}=C_{im,22}=C_{im,23}=0.1822$	12.15
模型 3	$R_{im,31}=R_{im,33}=0.6560$	$C_{im,31}=C_{im,33}=0.0288$	12.25
	$R_{im,32}=R_{im,34}=0.3431$	$C_{im,32}=C_{im,34}=1.9964$	
	$R_{im,35}=0.1291$	$C_{im,35}=0.1947$	
	$R_{im,36}=0.5290$	$C_{im,36}=0.9592$	

本章节是采用建筑现场实测数据作为优化计算的数据来源，数据的选择和使用已经在本章 4.3 中进行了详细的介绍。气象参数的选择则是使用自己搭建的小型气象站采集到的实时数据，数据见第 3 章图 3.4。该建筑的实测冷量数据为 2014 年 8 月 15 日~2014 年 9 月 30 日，其中 8 月 19 日~8 月 31 日三天出现数据缺失。

所以本文选取 8 月 16 日~8 月 28 日两周的数据作为模型训练数据，分别对四个建筑内部蓄热体简化模型进行优化计算，获得各个模型的参数值；然后选用 9 月份的建筑实测冷负荷对各个模型进行验证，并且将估算逐时冷负荷与实际计量的逐时冷负荷（计算方法见公式（3.1））进行对比分析，得到四个模型的平均相对误差。四个模型参数优化结果和平均相对误差列于表 4.6。

通过表 4.6 可以看出，模型 0 的估算准确度是最低的，而本文提出的三种改进模型估算精度都高于模型 0，其中效果最好的是模型 2。下面将模型 2 对 9 月份逐时冷负荷的估算结果和实际计量数据的对比展示在图 4.8 中。

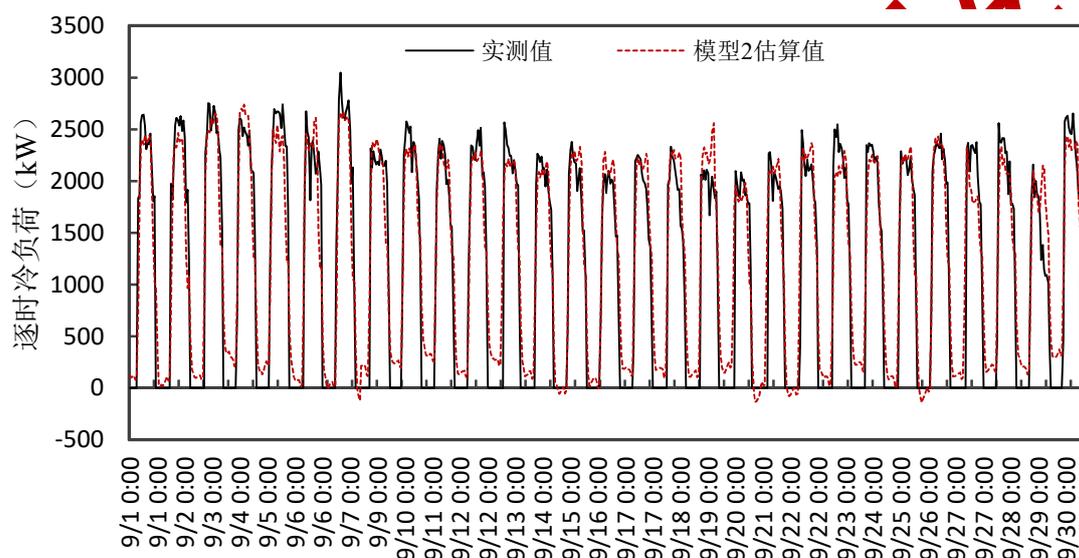


图 4.8 冷负荷的估算结果和实际数据的对比

#### 4.4.5.2 内部蓄热体参数优化——模拟

本章节的计算原理和计算过程都与章节 4.4.5.1 相同，不同的是章节 4.4.5.1 使用的是现场实测数据，而该章节则使用的是 EnergyPlus 模拟数据，模型的建立和校验过程已经在章节 4.4.2 中进行了详细的介绍。本章节  $R$  和  $C$  的优化约束条件选取方式和使用的气象参数都与章节 4.4.5.1 相同。

选取 6 月份的 DMT 建筑的模拟数据分别对四个建筑内部蓄热体简化模型进行优化计算，获得各个模型中的参数值，然后使用得到的四个模型分别对 7、8、9 月三个月份的建筑冷负荷进行估算，并且将估算冷负荷与模拟冷负荷进行对比分析，得到四个模型的平均相对误差。四个模型参数优化结果和平均相对误差列于表 4.7。

通过表 4.7 可以看出，模型 0 的估算准确度依然是最低的，而本文提出的三种改进模型估算精度都高于模型 0，其中效果最好的是模型 1，这一点与实测数据的优化结果不同。下面选取模型 1 对 7 月份建筑逐时冷负荷的估算结果和 EnergyPlus 的模拟结果进行对比，展示在图 4.9 中。

表 4.7 建筑内部蓄热体模型参数优化结果（模拟）

模型编号	$R$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )	$C$ ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )	MRE (%)
模型 0	$R_{im,1}=0.1576$	$C_{im,1}=1.7491$	16.83
	$R_{im,2}=0.0289$	$C_{im,2}=0.3883$	
模型 1	$R_{im,11}=0.2751$	$C_{im,11}=0.0387$	9.50
	$R_{im,12}=0.1620$	$C_{im,12}=0.0265$	
	$R_{im,13}=0.9562$	$C_{im,13}=0.2444$	
模型 2	$R_{im,21}=R_{im,22}=R_{im,23}=0.6251$	$C_{im,21}=C_{im,22}=C_{im,23}=0.0148$	11.35
	$R_{im,31}=R_{im,33}=1.9613$	$C_{im,31}=C_{im,33}=0.6717$	
模型 3	$R_{im,32}=R_{im,34}=1.0950$	$C_{im,32}=C_{im,34}=0.3791$	11.60
	$R_{im,35}=1.8844$	$C_{im,35}=0.6686$	
	$R_{im,36}=0.4764$	$C_{im,36}=0.1944$	

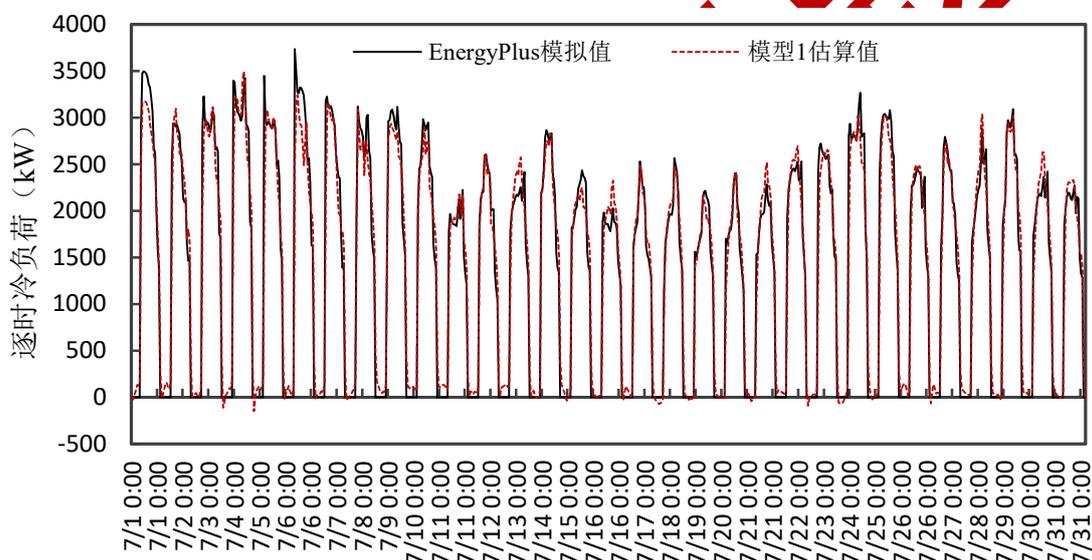


图 4.9 冷负荷的估算结果和模拟数据的对比

#### 4.4.6 结果分析与讨论

本章完成了建筑外墙和屋面的 3R2C 简化模型的优化计算，使用实测数据的建筑内部蓄热体的优化计算和使用模拟数据的建筑内部蓄热体的优化计算，并且对简化模型的负荷估算数据和实测数据以及简化模型的负荷估算数据和模拟数据进行了对比。现在对四个模型的优化结果进行分析。

无论是使用实测数据的优化结果还是使用模拟数据的优化结果都表明模型 0 对建筑冷负荷的估算准确度是最低的。

使用实测数据作为模型训练数据和验证数据的优化结果中模型 2（对建筑内部蓄热体不进行分类，只对接受的辐射得热进行分类的模型）的负荷估算效果是最好的，与之不同的是，在使用纯模拟数据作为模型训练数据和验证数据的优化

结果中，则是模型 1（对建筑内部蓄热体进行分类，对接受的辐射得热不进行分类的模型）的表现最为突出。出现该现象的原因主要是：1）Energyplus 软件计算负荷的原理认为辐射得热是均匀的照射在所有壁面上的，而且每个壁面的表面温度和内部温度分布都是均匀一致的，而实际建筑中则不是这样，例如实际建筑中阳光透过窗户照射在地面上，被阳光照射的部分地面温度会升高，而没有阳光照射的地面则不会出现温度升高的现象。这就解释了为什么实测数据的优化结果对辐射得热的分布敏感，而模拟数据的优化结果则对其不敏感；2）Energyplus 中建筑内部蓄热体的温度是均匀的，即蓄热体表面的温度与蓄热体内部的温度是一致的，所以在模拟计算建筑负荷时整个蓄热体都是有效的，而实际建筑中的蓄热体并不一定得到了充分的利用，例如像楼板这样的重型蓄热体，可能只有表层部分对建筑负荷有影响。所以实测数据的优化结果对建筑内部蓄热体的轻重分类不敏感，而模拟数据的优化结果则对其非常敏感。

这也解释了为什么同时对蓄热体和辐射得热都分类的模型 3 在两组优化结果中表现都一般。模型 3 考虑了建筑内部蓄热体表层与内部温度分布的不一致，所以选择了先串联再并联的形式，显然对于模拟数据测试组，由于蓄热体本身的温度分布是均匀的，所以模型 3 的效果没有比模型 1 更好，而在实测数据测试组中模型 3 依然没有效果很好，所以本文认为简单的 3R3C 并联模型可以对建筑内部蓄热体进行很好的描述，不需要建立更加复杂的模型。

综上所述可以得出结论实测数据的优化结果对辐射得热的分布敏感，对蓄热体的轻重分类不敏感，而模拟数据的优化结果则对辐射得热的分布不敏感，对蓄热体的轻重分类非常敏感。在实际应用中本文推荐使用模型 2。

此处需要说明，RC-S 模型不仅可以估算空调系统逐时冷负荷，还可以计算相同的室外气象参数和室内得热水平条件下，如果空调系统不开启，空调区域内可以达到的温度，这一观点不难理解，现有的传热方程中室内温度为已知输入量，冷负荷为需要计算的输出量，反之令负荷为 0，即可计算传热方程中的室内温度。这一观点在 Wang 和 Braun 等人的研究中得到了充分的证明<sup>[177, 186]</sup>。本文的研究，由于无法关闭实际建筑中的空调系统进行测量，所以对此不作实测数据的成果展示。

## 4.5 本章小结

经过第一章 1.2.4 小节的分析，可知造成现有 RC 负荷估算模型误差较大的两个主要原因：1）使用 2R2C 模型描述内部蓄热体的特性不够准确；2）在上述的研究中关于建筑内热源（照明和设备等）的计算，使用的是内热源的设计功率

和同时使用系数，而非建筑实际运行中的实测数据。所以本章在既有 RC 模型研究的基础上，对建筑内部蓄热体的简化模型进行了三种不同方式的改进，并且使用实时的分项计量数据对建筑内部照明和设备等的内部得热进行描述。

本章完成了建筑围护结构的简化模型参数优化，实测数据组的建筑内部蓄热体模型的参数优化和模拟数据组的建筑内部蓄热体模型的参数优化。

本文再一次验证了 3R2C 简化模型可以很好的描述外墙和屋面的传热特性。建筑内部蓄热体的优化结果也比较理想，在实测数据组中效果最好的是模型 2，其估算结果的平均相对误差为 12.15%；而在模拟数据组中效果最好的则是模型 1，其估算结果的平均相对误差为 9.50%。

通过本文的研究还可以得到以下结论：无论是对于实测数据还是模拟数据，改进模型的负荷计算准确度都明显高于基准模型（模型 0）。实测数据的优化结果对辐射得热的分布敏感，对蓄热体的分类不敏感，而模拟数据的优化结果则对辐射得热的分布不敏感，对蓄热体的分类非常敏感（见 4.4.6 的结果分析与讨论）。简单的 3R3C 并联模型可以对建筑内部蓄热体进行很好的描述，更加复杂的模型并没有表现出更好的估算效果。在实际应用中推荐使用模型 2。

RC-S 模型不仅可以估算空调系统逐时冷负荷，还可以计算相同的室外气象参数和室内得热水平条件下，如果空调系统不开启，空调区域内可以达到的温度，现有的传热方程中室内温度为已知输入量，冷负荷为需要计算的输出量，反之冷负荷为 0，即可计算传热方程中的室内温度。这一结论在空调系统故障诊断章节中还会用到。

本章内容与第 3 章内容都是关于空调系统负荷计算的研究，第 3 章介绍的模拟法优点是计算精度高，模型直观，可视化好；缺点是建模费时，且通用性差。本章介绍的 RC-S 模型法则是计算精度相对模拟法低，但是计算效率高，模型具有通用性。两者各有利弊，可以视情况选择。本文接下来的研究旨在阐述如何使用电耗数据和空调负荷数据进行空调系统夏季运行故障诊断，数据的使用是目的，负荷数据的获取手段是途径，可以是模拟法也可以是 RC-S 估算法，本文选择了使用 RC-S 估算法来完成对下面诊断工作的阐述。

---

同济许鹏课题组

## 第5章 空调系统故障诊断算法

### 5.1 概述

空调系统能耗在建筑总能耗中所占的比重非常大，大量研究表明空调系统由于故障或者管理不当造成的能耗浪费现象是非常严重的。传统的故障诊断研究非常多，概括来讲就是建立一系列的规则或者模型，通过监测空调系统各个设备或部件的运行参数来判断运行情况，但是因为实际的建筑中往往很难获取大量的运行参数，所以大多的诊断算法在实际运行的空调系统下都很难发挥良好的作用。既有的空调系统故障诊断需要的传感器、执行器和控制器等价格比较昂贵，导致故障诊断的成本较高，收益成本比较低，所以被接受程度低。随着分项计量的推广，越来越多的大型公建具备了大量的历史电耗数据，本文旨在尽可能少的安装传感器而是充分利用现有的分项计量电耗数据对空调系统进行故障诊断。本文中所说的故障诊断是一个广义的概念，它不仅含众所周知的传统意义的故障诊断，如水泵烧毁、风机卡死、管路结垢等，还包括低能效运行和运行管理不当等，本文统称为故障诊断。本文上述研究中已经解决了空调系统末端设备能耗无法直接计量和建筑冷量数据缺乏两个关键性问题，本章主要阐述空调系统故障诊断算法的建立，并将该算法应用于上海市一栋实际大型公建的空调系统，通过该案例分析对上述建立的故障诊断算法进行演示。

### 5.2 故障诊断算法框架

第1章绪论已经总结出，空调系统的故障诊断需要两个关键条件，即电耗数据和冷量数据，目前的很多研究都受到了这两个条件的限制，限制情况可以总结为以下三种情况：1) 没有实际建筑作为研究对象，只能使用模拟的方法获得数据，从而进行诊断方法的研究，这样获得诊断方法没有经过实践的评价；2) 可以获得实际建筑的能耗数据，但是电耗数据的频率不高且用途分类不详，往往为大楼的月电费账单，故无法实现空调系统实时的能效诊断；3) 在装有分项计量系统的大楼里，电耗数据可以获得，而冷量数据依然缺乏。在本文的第2章~第4章已经解决了电耗数据和冷量数据的获取问题。本小节主要介绍研究空调系统故障诊断算法的框架。

本文所提出的空调系统故障诊断算由三部分构成，见图5.1（详图见第一章

绪论图 1.9)。子算法①：空调系统末端设备逐时能耗拆分算法；子算法②：空调系统逐时负荷估算算法；子算法③：空调系统逐时故障诊断算法。

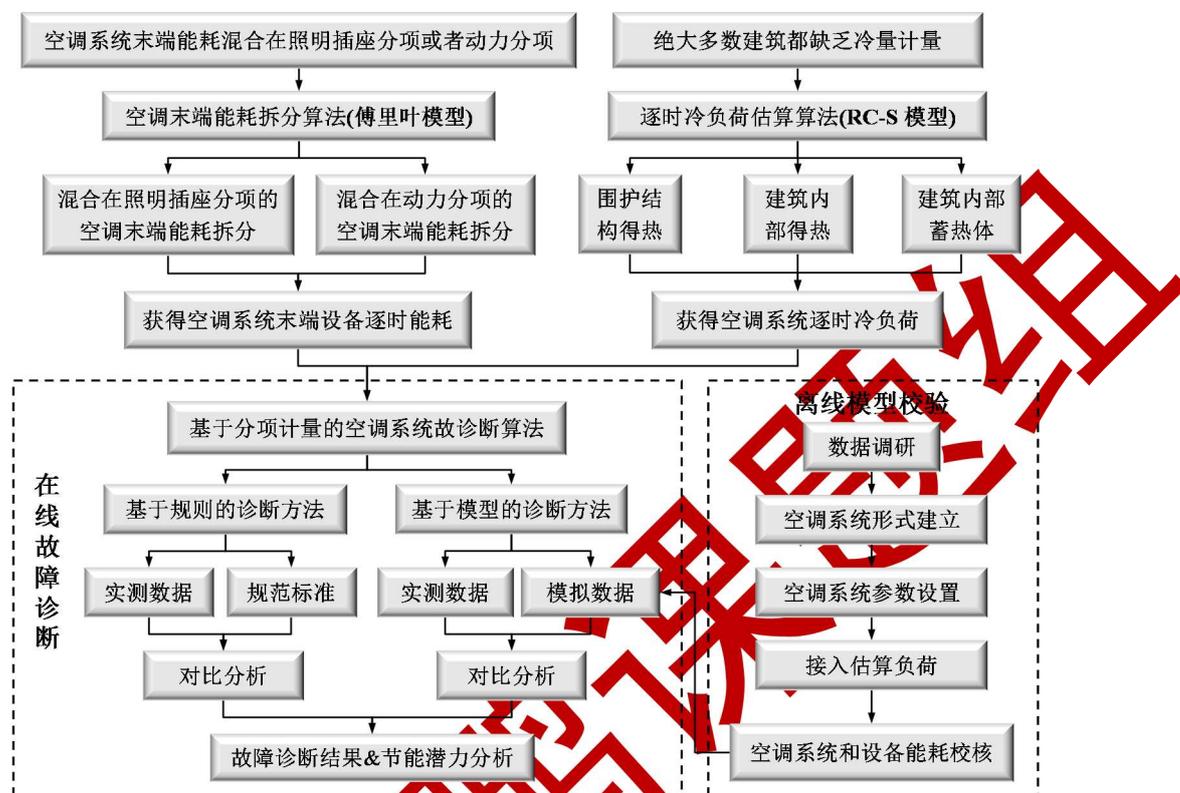


图 5.1 基于分项计量的空调系统故障诊断算法框架

### 子算法①：空调系统末端设备逐时能耗拆分算法

自从 1992 年 Hart 首次提出电能分项计量这个概念以来，世界各地都在进行分项计量的建设。中国各大城市也在积极的推进分项计量，截止到 2015 年仅仅上海市就已经有超过一千栋的大型公共建筑安装了分项计量系统。一般来讲，建筑总能耗被划分为四大分项和若干子项（见图 1.2）。对于空调系统而言，冷机、水泵及冷却塔等设备能耗都可以进行独立计量，而空调系统末端设备的计量则是一个难题，因为由于配电设计因素，空调系统末端设备能耗往往和照明插座分项或者动力分项掺混在一起，无法剥离。本文第 2 章的研究发现使用傅里叶模型可以很好地将空调末端能耗从与照明插座分项或者动力分项的混合能耗中拆分出来，且拆分结果准确度很高，所以本章研究中采用该方法获得空调系统末端的逐时电耗数据。

### 子算法②：空调系统逐时负荷估算算法

在实际建筑中计量冷量是非常困难的，对于新建建筑，如果在空调系统设置初就将温度传感器和流量传感器内置于冷冻水管路中，运行之初数据质量还是比较好的，而内置传感器长时间使用无法校核，数据质量会明显下降；对于既有建筑，由于空调冷冻水系统是承压系统，管理人员是不允许开洞放置传感器的，即

使是拨开保温层进行外贴式测量几乎也是不被允许的。所以采用间接方式获得空调系统逐时负荷是非常有必要的。

本文第 4 章提出的 RC-S 模型，属于灰箱模型，它既不像白箱模型那样需要详尽的建筑本身及内部设备的参数，也不像黑箱模型那样需要长时间的数据训练。RC-S 模型可以使用短时间的种类不多的测量数据，通过遗传算法对建筑的外围护结构和内部蓄热体的热阻和热容进行优化计算，获得热阻和热容的参数后，只要有室外气象参数和室内的温湿度就可以计算全年的通过建筑围护结构形成的空调系统冷负荷；建筑的内部得热则通过人员统计和分项计量的电耗数据转化而得；最终获得空调系统的负荷。该模型具有普适性，而且较前人的 RC 模型更加准确。这个模型是在分项计量数据基础上提出的，在基于分项计量的空调系统故障诊断中，可以更好的发挥作用。

而且当令负荷数据为零的时候，该方法还可以逆向计算室内温度，即在同样的室外气象参数和室内条件下，不开启空调系统情况下室内会达到的温度。本文第 4 章假设了三种不同形式的建筑内部蓄热体模型，通过模拟数据和实测数据的双重验证最终推荐“模型 2”，所以最终的 RC-S 模型的示意图如图 5.2 所示。

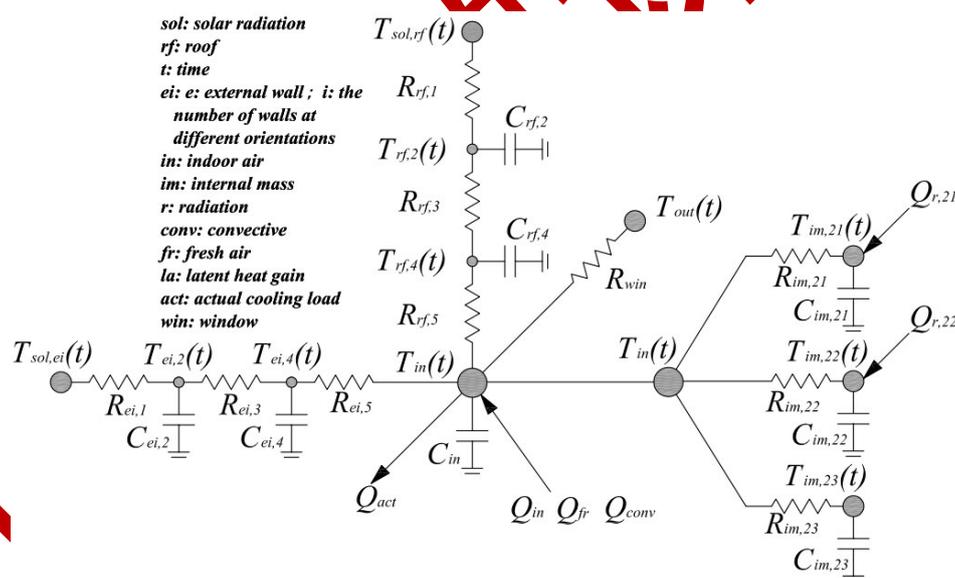


图 5.2 RC-S 空调系统逐时负荷估算模型

本文提出的基于分项计量的空调系统故障诊断算法的子算法①和子算法②已经在之前章节的研究工作中完成，本章主要阐述子算法③空调系统逐时故障诊断算法。5.3 节主要进行基于规则的空调系统故障诊断算法的研究，5.4 节则进行基于模型的空调系统故障诊断算法的研究。

### 5.3 基于规则的故障诊断算法

基于简单规则的空调系统故障诊断流程如图 5.3 所示。在已知空调系统各设备逐时能耗和空调系统的逐时冷负荷的基础上，通过一些规则对空调系统的运行状态进行诊断，并对诊断结果进行分析。

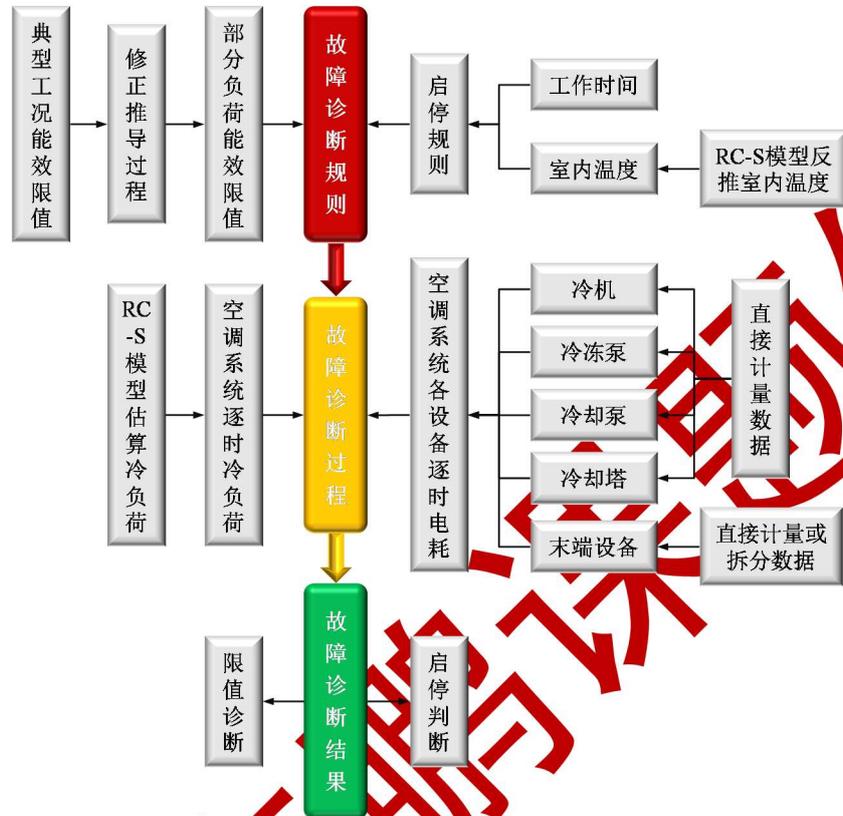


图 5.3 基于简单规则的空调系统故障诊断流程

### 5.3.1 部分负荷能效限值的修正

本节主要介绍基于规则的空调系统故障诊断规则的建立过程，该方法属于简单的限值诊断算法，就是采用各个国家或者地区的标准作为诊断的限值来判断空调系统主要设备的运行情况，所以也可以称为“限值诊断”。本文所采用的是中国国家推荐标准 GBT 17981-2007<sup>[202]</sup>。该标准对空调系统不同设备在全年累计工况和典型工况下的能效限值做出了规定，现将这两种工况下的能效限值汇总于表 5.1。此处需要说明两个问题：1) 混合末端形式的限值根据相应工况的不同形式末端的限值计算而得；2) 由于分项计量系统只有电耗数据，所以此处所说的冷机指的是电制冷机组，不包括其他能耗形式或者混合能耗形式的冷源。3) 因为本文的主要研究内容是空调系统的故障诊断，由于定频泵和定频风机的能耗随负荷的变化不会产生大的变化，所以本文研究的风机和水泵指变频风机和变频水泵。

表 5.1 空调系统不同设备能效限值

名称	计算公式	能效限值			
		全年累计工况	典型工况		
$WTF_{chw}$	$WTF_{chw} = \frac{Q}{E_{chp}}$	30	35		
$EER_t$	$EER_t = \frac{Q}{\sum E_i}$	全空气系统	6	全空气系统	8
		风机盘管+新风系统	9	风机盘管+新风系统	12
		风机盘管系统	24	风机盘管系统	32
		混合末端形式 $EER_t = \sum A_x \cdot EER_x$			
$COP$	$COP = \frac{Q}{E_c}$	$Q_{rc} \leq 200$	2.8	$Q_{rc} \leq 200$	3.0
		$200 < Q_{rc} \leq 528$	4.2	$200 < Q_{rc} \leq 528$	4.4
		$528 < Q_{rc} \leq 1163$	4.5	$528 < Q_{rc} \leq 1163$	4.7
		$Q_{rc} > 1163$	4.8	$Q_{rc} > 1163$	5.0
$WTF_{cw}$	$WTF_{cw} = \frac{Q_{cw}}{E_{cp}}$	25	30		

由于该标准只给出了全年累计工况和典型工况两种情况下的能效限制，并不适用于空调系统的逐时诊断，所以本文对该标准进行一些修正，使其适用于空调系统逐时故障诊断。下面介绍空调系统主要设备在部分负荷运行时能效限值修正系数的推导过程。

**冷冻水泵。**根据表 5.1 冷冻水泵能效限值的定义公式，进行推导，推导过程如下：

$$\begin{aligned}
 WTF_{chw_{pl}} &= \frac{Q_{PL}}{E_{chp_{PL}}} = \frac{Q_{rc} \cdot \frac{C\rho F_{chw_{PL}}\Delta T_{chw_{PL}}}{Q_{rc}}}{E_{chp_{rated}} \cdot \frac{\rho g F_{chw_{PL}} H_{chp_{PL}}}{E_{chp_{rated}} \cdot \eta_{chp_{PL}}} \quad (5.1) \\
 &= \frac{Q_{rc} \cdot \frac{C\rho F_{chw_{PL}}\Delta T_{chw_{PL}}}{C'\rho' F_{chw_{rated}}\Delta T_{chw_{rated}}}}{E_{chp_{rated}} \cdot \frac{\rho g F_{chw_{PL}} H_{chp_{PL}}}{\rho' g F_{chw_{rated}} H_{chp_{rated}} \cdot \eta_{chp_{PL}}}}
 \end{aligned}$$

假设：1) 额定负荷下和部分负荷下冷冻水的供回水温差保持不变，只是流量改变；2) 在温度变化不大的情况下，冷冻水的热容和密度为定值。那么公式 (5.1) 可以整理为下面的公式 (5.2)。

$$WTF_{chw_{PL}} = \frac{\eta_{chp\_PL} H_{chp\_rated}}{\eta_{chp\_rated} H_{chp\_PL}} \times \frac{Q_{rc}}{E_{chp\_rated}} \quad (5.2)$$

其中  $\frac{Q_{rc}}{E_{chp\_rated}}$  为冷冻水泵额定工况下的能效限值，在规范 GBT 17981-2007 中取值为 35。所以可以得到部分负荷时冷冻水泵的能效限值修正系数如公式 (5.3) 所示。

$$k_{WTF_{chw}} = \frac{\eta_{chp\_PL} H_{chp\_rated}}{\eta_{chp\_rated} H_{chp\_PL}} \quad (5.3)$$

现有的空调系统压力控制方法分为定压差控制和变压差控制，根据作者所在团队的调研数据显示大部分楼宇的空调系统都为定压差控制，少部分楼宇采用的变压差控制，但是由于管理人员的管理水平不高，变压差控制系统的实际运行往往也是定压差的。对于定压差控制系统，分、集水器之间的压差为一定值，用  $\Delta H$  表示，因为  $H = sF^2$ ，其中  $F$  表示流量， $m^3/h$ ，所以分集水器定压点以外的冷冻水环路部分的压降是与流量的平方成正比的，所以上述公式 (5.3) 可以变形为公式 (5.4)，而对于变压差控制系统，则上述公式 (5.3) 可以变形为公式 (5.5)。

$$k_{WTF_{chw}} = \frac{\eta_{chp\_PL} H_{chp\_rated}}{\eta_{chp\_rated} (\Delta H + (H_{chp\_rated} - \Delta H) \cdot PLR^2)} \quad (5.4)$$

$$k_{WTF_{chw}} = \frac{\eta_{chp\_PL}}{\eta_{chp\_rated} PLR^2} \quad (5.5)$$

冷却水泵。根据表 5.1 冷却水泵能效限值的定义公式，进行推导，推导过程如下：

$$\begin{aligned} WTF_{cw_{PL}} &= \frac{Q_{cw\_PL}}{E_{cp\_PL}} = \frac{Q_{cw\_rated} \cdot \frac{C \rho F_{cw\_PL} \Delta T_{cw\_PL}}{Q_{cw\_rated}}}{E_{cp\_rated} \cdot \frac{\rho g F_{cw\_PL} H_{cp\_PL}}{E_{cp\_rated} \cdot \eta_{cp\_PL}}} \\ &= \frac{Q_{cw\_rated} \cdot \frac{C \rho F_{cw\_PL} \Delta T_{cw\_PL}}{C' \rho' F_{cw\_rated} \Delta T_{cw\_rated}}}{E_{cp\_rated} \cdot \frac{\rho g F_{cw\_PL} H_{cp\_PL}}{\rho' g F_{cw\_rated} H_{cp\_rated}} \cdot \eta_{cp\_PL}} \end{aligned} \quad (5.6)$$

如果同样假设：1) 额定负荷下和部分负荷下冷却水的供回水温差保持不变，只是流量改变；2) 在温度变化不大的情况下，冷却水的热容和密度为定值。那

么和冷冻水泵情况相同上公式（5.6）可以整理为下面的公式（5.7）。

$$WTF_{cw_{PL}} = \frac{\eta_{cp\_PL} H_{cp\_rated}}{\eta_{cp\_rated} H_{cp\_PL}} \cdot \frac{Q_{cw\_rated}}{E_{cp\_rated}} \quad (5.7)$$

其中  $\frac{Q_{cw\_rated}}{E_{cp\_rated}}$  为冷却水泵额定工况下的能效限值，在规范 GBT 17981-2007 中取值为 30。所以可以得到部分负荷时冷却水泵的能效限值修正系数如公式（5.8）所示。

$$k_{WTF_{cw}} = \frac{\eta_{cp\_PL} H_{cp\_rated}}{\eta_{cp\_rated} H_{cp\_PL}} \quad (5.8)$$

有些情况下为了使冷水机组冷凝器散热效果更好，冷却水泵往往会保持比较大的流量，在这种情况下，公式（5.7）则整理为公式（5.9）的形式。

$$WTF_{cw_{PL}} = \frac{\eta_{cp\_PL} \Delta T_{cw\_PL} H_{cp\_rated}}{\eta_{cp\_rated} \Delta T_{cw\_rated} H_{cp\_PL}} \times \frac{Q_{cw\_rated}}{E_{cp\_rated}} \quad (5.9)$$

对于开式冷却塔，则上述公式（5.8）可以变形为公式（5.10），用  $\Delta H$  表示冷却塔布水器到集水盘的距离，额定冷却水流量下的剩余冷却水环路部分压降即为冷却水泵的额定压头  $H_{cp\_rated}$  与  $\Delta H$  之差，部分负荷下剩余冷却水环路部分的压降是与流量的平方成正比的，即与部分负荷率的平方成正比；对于闭式冷却塔，则上述公式（5.8）可以变形为公式（5.11）。此处需要说明，与冷冻水泵不同，冷却水的部分负荷率计算方式为： $PLR_{cw} = (\text{部分负荷下冷机制冷量} + \text{部分负荷下冷机的功率}) / (\text{冷机额定制冷量} + \text{冷机额定功率})$ 。

$$k_{WTF_{cw}} = \frac{\eta_{cp\_PL} H_{cp\_rated}}{\eta_{cp\_rated} (\Delta H + (H_{cp\_rated} - \Delta H) \cdot PLR_{cw}^2)} \quad (5.10)$$

$$k_{WTF_{cw}} = \frac{\eta_{cp\_PL}}{\eta_{cp\_rated} PLR_{cw}^2} \quad (5.11)$$

冷机。冷机的逐时工况下的能效限值即为部分负荷下的性能系数（ $COP_{PL}$ ），末端风机。末端风机在部分负荷工况下运行时，能效限值修正系数的推导过程和水泵一样，此处不再演算，最终得到其修正系数如公式（5.12）所示。但是需要指出，由于空调系统有最小新风量的限值，所以风机的出风量有下限值，不可以无限降低。

$$k_{EER_t} = \frac{\eta_{t\_PL} P_{t\_rated}}{\eta_{t\_rated} P_{t\_PL}} = \frac{\eta_{t\_PL}}{\eta_{t\_rated} PLR^2} \quad (5.12)$$

上文已经完成了空调系统各设备逐时工况下的能效限值的修正，修正系数汇

总于表 5.2。由于冷却塔没有能效限值可以参考，所以本文没有对其进行修正。

表 5.2 空调系统不同设备逐时工况能效限值修正系数

名称	修正系数	能效限值	
$WTFchw_{PL}$	$k_{WTFchw} = \frac{\eta_{chp\_PL} H_{chp\_rated}}{\eta_{chp\_rated} H_{chp\_PL}}$	$35 k_{WTFchw}$	
$EERt_{PL}$	$k_{EERt} = \frac{\eta_{t\_PL} P_{t\_rated}}{\eta_{t\_rated} P_{t\_PL}}$	全空气系统	$8 k_{EERt}$
		风机盘管+新风系统	$12 k_{EERt}$
		风机盘管系统	$32 k_{EERt}$
		混合末端形式	$EERt = \frac{\sum A_x \cdot EERt_x}{A}$
$COP_{PL}$	$k_{COP} = \frac{COP_{PL}}{COP_{rated}}$	$Q_{rc} \leq 200$	$3.0 k_{COP}$
		$200 < Q_{rc} \leq 528$	$4.4 k_{COP}$
		$528 < Q_{rc} \leq 1163$	$4.7 k_{COP}$
		$Q_{rc} > 1163$	$5.0 k_{COP}$
$WTFcw_{PL}$	$k_{WTFcw} = \frac{\eta_{cp\_PL} H_{cp\_rated}}{\eta_{cp\_rated} H_{cp\_PL}}$	$30 k_{WTFcw}$	

此处需要说明，空调系统实际运行情况下，末端风机和水泵等设备的部分负荷率与系统冷负荷的部分负荷率并非时刻相等，但却存在着近似关系，所以在基于规则的诊断中，取各个设备的部分负荷率等于系统逐时冷负荷的部分负荷率。由于冷却塔没有能效限值可以参考，所以此处不对冷却塔进行诊断。

### 5.3.2 诊断规则的建立

基于规则的空调系统故障诊断是用分项计量所得的空调系统各设备逐时电耗数据，如果空调系统末端没有单独的计量，则可以根据本文第 2 章的研究通过拆分算法获得，与 RC-S 模型估算所得的空调系统逐时冷负荷计算而得的设备逐时运行能效与给定的能效限值进行比较，从而对设备的运行情况进行诊断。本文总结了 14 种可以用限值诊断的故障，并且给出了相应的诊断规则。这 14 种故障主要分为两大类，故障 F1~F10 是启停故障，判断方法有两种：

方法一：空调系统负荷和工作时间双重判断。工作时间判断非常简单，即根据室内是否有人工作或者有物品需要保温来判断空调系统是否应该运行。对于办公建筑，工作时间开始，非工作时间关闭；对于商场建筑，营业时间开始，非营业时间关闭。空调系统负荷判断的含义为在空调系统负荷低于某一水平时则选择关闭空调系统，牺牲部分舒适度，这一负荷水平限值则根据建筑的持有者或者使用者对室内舒适度和空调系统能效的要求而定。

方法二：室内温度和工作时间双重判断。工作时间判断和方法一相同。室内

温度判断的含义如下，如第 4 章 4.4.6 节提及到的 RC-S 模型可以逆向计算空调系统不开启的情况下，室内应该达到的理论温度  $T_{est}$ ，此处则根据该室内理论温度判断是否需要运行空调系统。

故障 F11~F14 则是根据表 5.2 进行的主要设备的能效限值诊断。

空调系统主要设备的故障及根据方法而得到的诊断规则见表 5.3。

表 5.3 常见故障及限制诊断规则

设备名称	故障表现	故障编号	诊断方法
末端	该关闭时开启	F1	非工作时间或 $T_{est} \leq T_0, E_t > E_{t\_standby}$
	该开启时关闭	F2	工作时间并且 $T_{est} > T_0, E_t \leq E_{t\_standby}$
冷机	该关闭时开启	F3	非工作时间或 $T_{est} \leq T_0, E_c > E_{c\_standby}$
	该开启时关闭	F4	工作时间并且 $T_{est} > T_0, E_c \leq E_{c\_standby}$
冷冻水泵	该关闭时开启	F5	非工作时间或 $T_{est} \leq T_0, E_{chp} > E_{chp\_standby}$
	该开启时关闭	F6	工作时间并且 $T_{est} > T_0, E_{chp} \leq E_{chp\_standby}$
冷却水泵	该关闭时开启	F7	非工作时间或 $T_{est} \leq T_0, E_{cp} > E_{cp\_standby}$
	该开启时关闭	F8	工作时间并且 $T_{est} > T_0, E_{cp} \leq E_{cp\_standby}$
冷却塔	该关闭时开启	F9	非工作时间或 $T_{est} \leq T_0, E_{ct} > E_{ct\_standby}$
	该开启时关闭	F10	工作时间并且 $T_{est} > T_0, E_{ct} \leq E_{ct\_standby}$
末端	能效低	F11	$EERt_m < EERt_{PL}$
冷机	能效低	F12	$COP_m < COP_{PL}$
冷冻水泵	能效低	F13	$WTFchw_m < WTFchw_{PL}$
冷却水泵	能效低	F14	$WTFcw_m < WTFcw_{PL}$

### 5.3.3 诊断流程的建立

上文中完成了空调系统各个主要设备逐时能效限值修正系数的推导过程，并且给出了 14 种常见故障的诊断规则，本小节主要阐述基于规则的空调系统故障诊断的诊断流程，首先是根据工作时间和室内计算温度进行的双重判断，判断空调系统的启停是否正常，然后是对各个主要设备的能效进行诊断。诊断流程如图 5.4 所示。

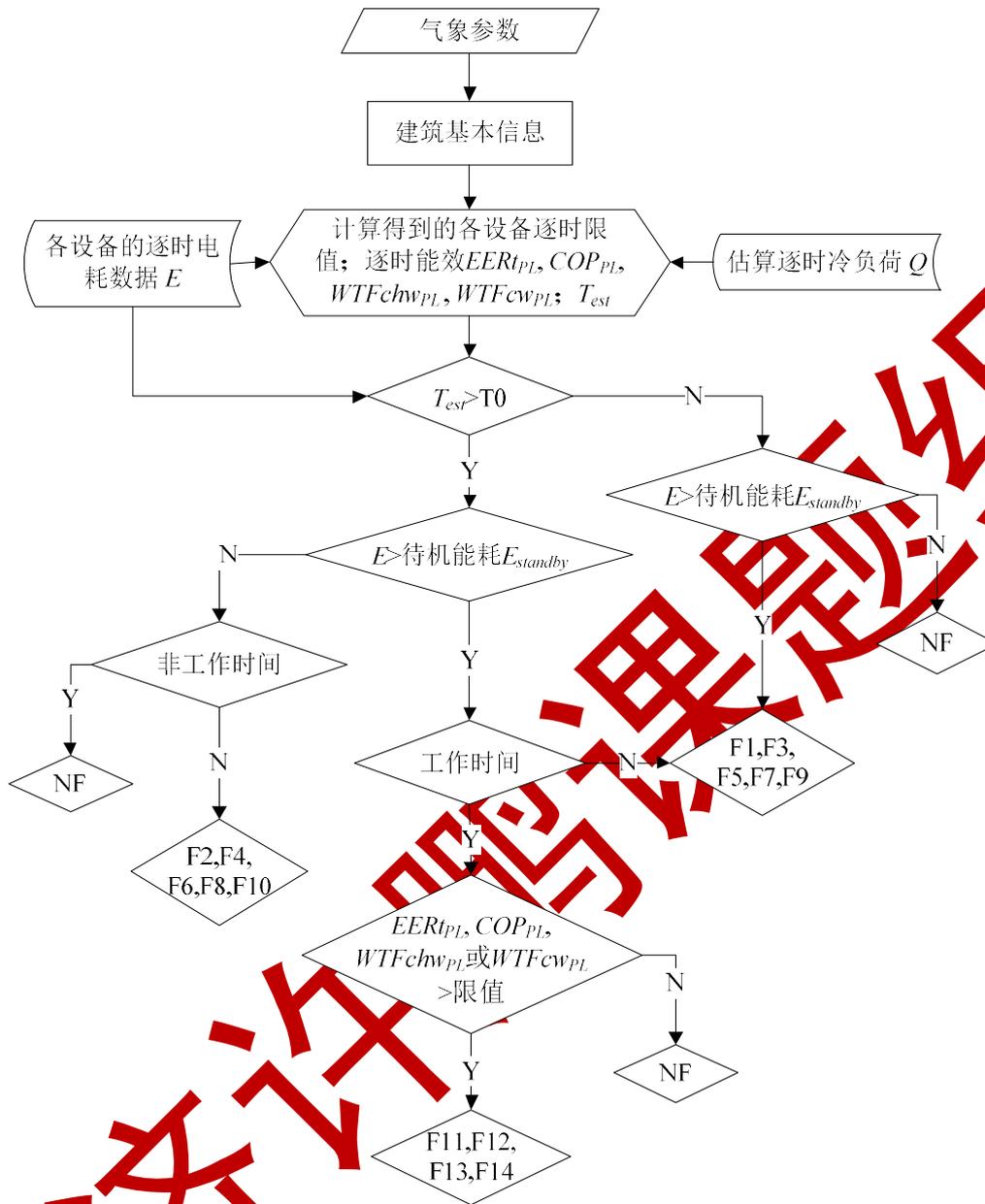


图 5.4 基于规则的故障诊断流程图

### 5.3.4 输入/输出参数汇总

本小节主要介绍基于规则的空调系统故障诊断算法中需要的输入/输出参数。输入参数主要包括空调系统各主要设备的实际计量逐时电耗、空调系统的逐时冷负荷、设备的一些铭牌参数以及各设备关于部分负荷率的性能曲线。主要输入参数和输出参数汇总于表 5.4。输入参数与输出参数的中间计算过程则参考本章 5.3.1 节部分负荷率下能效限值的修正系数推导过程。

表 5.4 基于规则的空调系统故障诊断算法输入输出参数

	输入参数	输出参数
空调系统	工作时间表 实测或估算而得的逐时冷量 (kW)	系统启停判断
末端风机	计量或拆分而得的逐时电耗 (kWh) 效率曲线 最小新风量 (或最小风阀开度)	逐时能效 $EERt_m$ 逐时能效限值 $EERt_{PL}$
冷机	计量逐时电耗 (kWh) 性能曲线	逐时能效 $COP_m$ 逐时能效限值 $COP_{PL}$
冷冻水泵	计量或拆分而得的逐时电耗 (kWh) 额定扬程 (m) 额定流量 (m <sup>3</sup> /h) 效率曲线 定压控制压差 (m) (变压差控制不需要)	逐时能效 $WTFchw_m$ 逐时能效限值 $WTFchw_{PL}$
冷却水泵	计量逐时电耗 (kWh) 额定扬程 (m) 额定流量 (m <sup>3</sup> /h) 效率曲线 冷却塔布水器到集水盘的距离 (m) (闭式冷却塔不需要)	逐时能效 $WTFcw_m$ 逐时能效限值 $WTFcw_{PL}$

本小节建立了基于规则的空调系统故障诊断算法, 故障 F1~F10 属于简单的与非判断, 诊断过程简单, 不需要做深层次的诊断。而对故障 F11~F14 的诊断, 若诊断结果为能效偏低, 则可进入深层次的诊断, 从而判断造成低效运行的原因, 深入诊断的诊断方法在下面 5.4 节中介绍。

#### 5.4 基于模型的故障诊断算法

上一节介绍了基于简单规则和分项能耗数据的空调系统主要设备的诊断方法, 方法简单但是不够深入, 可以诊断的故障种类有限而且比较粗略, 适用于对空调系统运行能效要求不高的建筑。若要对空调系统的故障进行深入的诊断, 上述诊断方法则略显不足, 本节则进行深层次诊断的研究。在空调系统故障诊断领域, 大多数的诊断方式都需要对空调系统的某个设备或者整个系统建立模型, 然后通过模拟值与实测值的比较分析来判断空调系统的运行状态和故障情况。建模方法有很多, 根据第 1 章文献综述部分可以大致分为三类模型, 黑箱模型、灰箱模型和白箱模型; 建模工具也有很多, 可以选择使用既有的模拟软件, 也可以根

据实际需求和诊断目的自主编写软件。根据本文研究的特点，最终选择自主编写空调系统模型。

本节基于模型的空调系统故障诊断方法是用空调系统各个设备的实测能耗数据（来源于分项计量系统）与本文自主编写的理想空调系统模型的模拟数据进行对比分析，从而对各个设备的运行情况及其故障进行诊断。

基于模型的空调系统故障诊断流程如图 5.5 所示。在已知空调系统各设备逐时能耗和理想空调系统模拟逐时能耗的基础上，通过一些规则对空调系统的运行状态进行诊断，并对诊断结果进行分析。

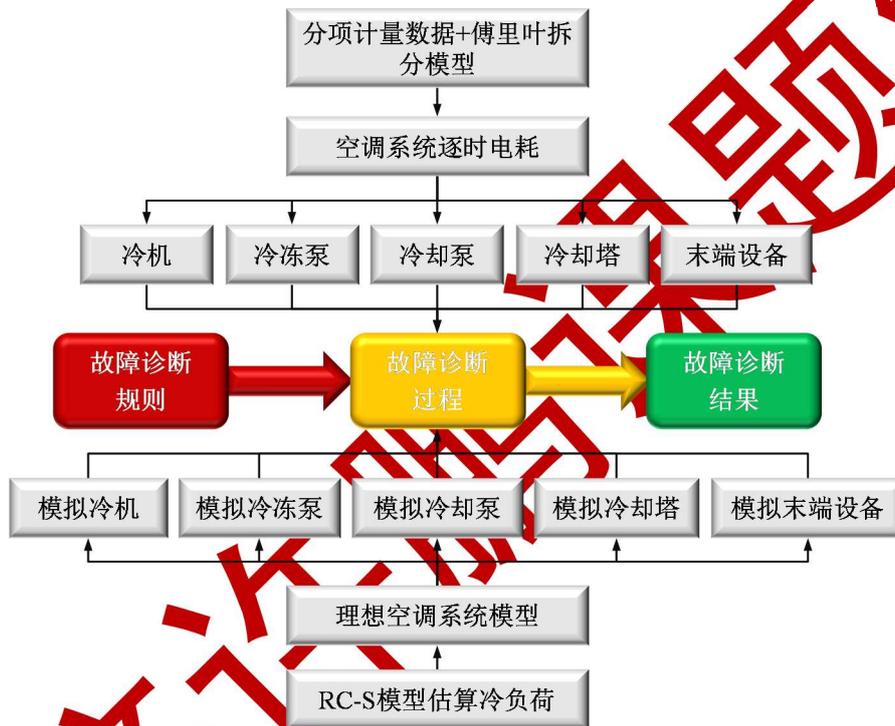


图 5.5 基于模型的空调系统故障诊断流程

#### 5.4.1 理想空调系统模型建立

本文通过对现有的模拟软件进行总结，发现现有的模拟软件都存在一些不足。如 EnergyPlus、eQuest 等软件，如果想要对空调系统进行模拟，首先需要建立一个详细的建筑模型来模拟系统冷负荷，所以针对不同的建筑都需要建立新的模型，通用性不强；而且 EnergyPlus 模拟空调系统能耗还有一个明显的不足，就是水系统为无压系统，所以对水泵能耗的模拟不够准确；此外，建立 EnergyPlus 模型对操作人员的专业技能要求较高，实践应用有困难。TRNSYS 是可以忽略建筑本身情况仅仅针对空调系统独立建模的，对于空调系统的逐时冷负荷，TRNSYS 可以通过读取外部文件的形式进行读取，但是搭建 TRNSYS 依然比较复杂，需要专

业的技术人员进行操作；并且 TRNSYS 在水系统压力平衡计算问题上略显不足，无法通过迭代计算自动匹配管路特性与水泵特性，对于变频水泵这样特性曲线复杂的模块，其计算过于简化。为了更好的描述空调系统逐时运行的理想情况，本文选择使用 MATLAB 自主编写理想空调系统能耗模型。系统原理图如图 5.6 所示。

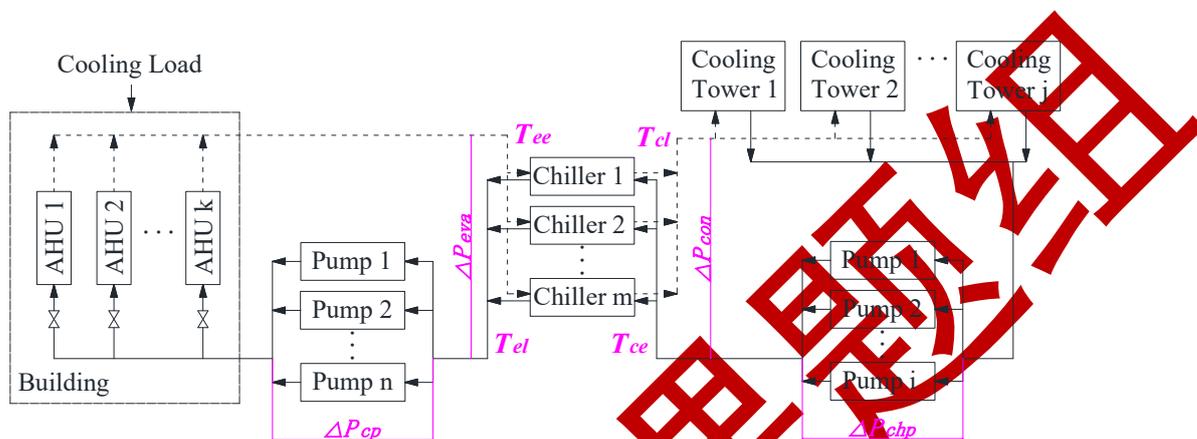


图 5.6 空调系统主要设备及连接原理示意图

空调系统的主要设备包括冷机、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔、末端和输配管路六个部分，其中冷却塔模型主要包括风机模型和换热模型；末端模型主要包括风机模型和盘管模型；输配管路模型主要包括局部阻力模型和沿程阻力模型。下面逐一介绍这些模型。

#### 5.4.1.1 冷机模型

本文中冷水机组模型采用 DOE-2 模型，该模型因为在 DOE-2 模拟软件中应用而得名，是目前工程中最常用的用于分析机组典型变工况特性的经验模型，EnergyPlus 和 TRNSYS 等软件都采用的该模型。DOE-2 模型使用三条性能曲线表征机组性能。其中 ChillerCapTemp 和 ChillerEIRFTemp 曲线表征的机组设计工况下的特性，曲线 ChillerEIRFPLR 则将机组特性外推到制冷机非设计条件、部分负荷时的变工况性能。作为一种通用的、典型的模型，DOE-2 的有效性已经过验证，并且 DOE-2 模型对吸收式制冷机、螺杆式制冷机、离心式制冷机均运用广泛，且准确性较高。

1) ChillerCapTemp（冷水机组制冷量关于温度的曲线）（公式（5.13））。制冷量关于温度的函数是一个有两个单独变量的双二次曲线，这两个变量是：冷冻水离开冷机的温度和冷却水进入冷机的温度。这个函数的输出值乘上名义制冷量就可以得出在一定温度情况下冷机所能提供的总的制冷量。

2) ChillerEIRFTemp（冷水机组能效关于温度的曲线）（公式（5.14））。这个

函数也是一个有两个单独变量的双二次曲线。实际上，EIR 是 COP 的倒数。这个函数的输出值乘以冷机在标准工况下的 EIR 就可以得到在特定温度工况下冷机的 EIR 值。

3)ChillerEIRFPLR(冷水机组能效关于部分负荷率 PLR 的曲线)(公式(5.15))。这个曲线是 PLR 的二次函数。部分负荷率 (PLR) 是实际制冷量与当前温度状态下最大制冷量的比值。这个函数的输出结果乘上参考 EIR 就是冷水机组实际运行时的 EIR。EIR 为 COP 的倒数。

$$\begin{aligned} ChillerCapFTemp = & a_0 + a_1(T_{el}) + a_2(T_{el})^2 + a_3(T_{ce}) \\ & + a_4(T_{ce})^2 + a_5(T_{el})(T_{ce}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} ChillerEIRFTemp = & b_0 + b_1(T_{el}) + b_2(T_{el})^2 + b_3(T_{ce}) \\ & + b_4(T_{ce})^2 + b_5(T_{el})(T_{ce}) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\frac{1}{COP} = c_0 + c_1(PLR) + c_2(PLR)^2 + c_3(PLR)^3 \quad (5.15)$$

#### 5.4.1.2 盘管模型

**冷盘管模型。**一般来说，冷盘管模型需要计算全干盘管、全湿盘管以及半干半湿盘管三种工况。考虑到半干半湿工况需要迭代计算且计算结果与全湿工况结果相差在 5% 以内<sup>[203]</sup>，所以本文只模拟全干和全湿工况。冷盘管模型是由三个模块组成的：设计 UA 值计算模块、运行 UA 值计算模块和冷盘管性能计算模块。

**热盘管模型。**本文中采用  $\epsilon$ -NTU 模型来计算热盘管。根据进口条件、流量和 UA 值，可计算出热盘管的传热效率  $\epsilon$ 。与冷盘管类似，热盘管的计算也由三部分组成：设计 UA 值计算模块、实际 UA 值计算模块和热盘管性能计算模块。其中设计 UA 值计算和实际 UA 值计算模块和冷盘管部分相同。

#### 5.4.1.3 冷却塔模型

冷却塔模型也采用逆流换热器的  $\epsilon$ -NTU 方法来计算。对于单速机械驱动的冷却塔，风机开启和关闭的情况都采用如下方法计算：当冷却塔的风机关闭时，水泵依然保持运行，这时冷却塔的运行状态称作“自然对流”；对于部分负荷的工况，这个模型通过在风机开启和关闭的两个状态间进行线性插值来进行计算。对于双速风机，当负荷降低到某一水平时冷却塔风机则会从高速运行转变为低速运行，如果负荷继续降低，则风机的运行状态与上述单速风机相同。

#### 5.4.1.4 变频风机模型

变频风机效率受几个部分共同影响：风扇、转轴、皮带、电机和变频器。因此，变频风机模型主要由风扇模型、风机转轴模型、皮带模型、电机模型及变频器模型组成。同下述变频水泵的模型相同。

同冷机模型相同，理想空调系统模型中的盘管模型，风机模型和冷却塔模型均选用 Energyplus 的模型，鉴于文章篇幅有限，具体公式参见 Energyplus 的 EngineeringReference<sup>[203]</sup>，本文不再赘述。下面对变频水泵模型和管路模型进行说明。

#### 5.4.1.5 管网模型

该理想空调系统的管路表达形式为比摩阻的形式，不对管路的长度进行计算，而是将连接两个主要设备之间的管路的总比摩阻直接输入模型之中。对于多个末端、多台水泵、多个冷机并联的情况，同样将单个设备所在的管路两个端点之间的总比摩阻直接输入模型之中，模型会根据管网串并联计算公式(5.16)和(5.17)进行自动计算。不同管段的比摩阻  $S$  可以通过到现场进行测量一次性获得，且比摩阻  $S$  为管网的固有参数，在不调整阀门的情况下  $S$  的取值不会发生变化。本文编写的理想空调系统模型是冷量控制下的理想情况下的空调系统运行状态，其实质就是根据冷量的变化调整冷冻水泵和冷却水泵的变频特性，在部分负荷工作下通过水泵变频来改变水流量，而不是通过调节阀增加管网阻力来改变流量。

$$S_{\#} = S_1 + S_2 + \dots + S_x \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{S_{\#}} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_x} \quad (5.17)$$

#### 5.4.1.6 变频水泵模型

一个典型的变速水泵的效率由三个子效率组成，包括：水泵效率、电机效率和变频效率。如图 5.7 所示。

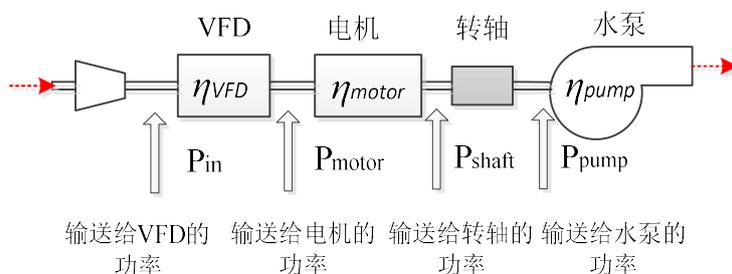


图 5.7 典型变频水泵示意图

水泵的总能耗由下式(5.18)计算：

$$Pow_{pump} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{pump} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{VFD}} \quad (5.18)$$

其中：

$$PLRP = \frac{F}{F_{rated}} \quad (5.18-1)$$

$$\eta_{pump} = d_0 + d_1(PLRP) + d_2(PLRP)^2 + d_3(PLRP)^3 \quad (5.18-2)$$

$$\eta_{motor} = e_1(1 - e^{e_2 PLRP}) \quad (5.18-3)$$

$$\eta_{VFD} = f_0 + f_1(PLRP) + f_2(PLRP)^2 + f_3(PLRP)^3 \quad (5.18-4)$$

$$\eta_{total} = \eta_{pump} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{VFD} \quad (5.18-5)$$

$Pow$  表示水泵的功率， $F$  是水泵的流量， $d$ 、 $e$ 、 $f$  都是方程的系数，可通过相应产品参数拟合得到。下标  $pump$ 、 $motor$ 、 $VFD$  和  $rated$  分别表示水泵、电机、变速和设计工况，下标  $total$  表示总和。

本文中水泵模型与上述模型有所不同，本文的水泵模型为有压模型，考虑了管网特性，引入了比摩阻  $S$ 。下面以冷冻水泵为例进行说明。

根据公式（5.18）可知冷冻水泵的功率计算应该如公式（5.19）所示。

$$Pow_{chp} = \frac{\rho g F_{chw} H_{chp}}{\eta_{chp} \eta_{chp\_motor} \eta_{chp\_VFD}} \quad (5.19)$$

其中：

$$PLR_{chw} = \frac{F_{chw}}{F_{chw\_rated}} \quad (5.19-1)$$

$$\eta_{chp} = d_0 + d_1(PLR_{chw}) + d_2(PLR_{chw})^2 + d_3(PLR_{chw})^3 \quad (5.19-2)$$

$$\eta_{chp\_motor} = e_1(1 - e^{e_2 PLR_{chw}}) \quad (5.19-3)$$

$$\eta_{chp\_VFD} = f_0 + f_1(PLR_{chw}) + f_2(PLR_{chw})^2 + f_3(PLR_{chw})^3 \quad (5.19-4)$$

三个效率曲线可以通过样本数据拟合而得， $F_{chw}$  为冷冻水泵逐时水流量， $F_{chw\_rated}$  为冷冻水泵额定工况下的水流量，可以通过测量或者根据间接计算获得。此处需要重点说明的是  $H_{chp}$  的计算，现有的模型中因为没有计算管网的阻力，所以水泵扬程的计算只是与流量的简单的二次方关系，而实际情况下并非如此。

如第 5.3.1 节所说对于定压差控制的空调系统而言，冷冻水泵的扬程计算公

式为式 (5.20),  $\Delta H$  为设定的压差, 对于确定的空调系统其为一定值。同样的对于一确定的空调系统, 理想的负荷调节形式应该为通过水泵变频来调节冷冻水的流量, 而非通过调节管路中的阀门增加管网阻力的形式来实现水力平衡。所以理想状态下定压差控制空调系统中冷冻水环路定压点外侧 (以定压点为分界, 末端侧为定压点内侧, 冷机侧为定压点外侧) 的管路特性应该是保持不变的, 即定压点外侧的比摩阻  $S$  保持不变, 所以公式 (5.20) 可以变形为公式 (5.21), 实际情况下,  $S$  可以通过测量一次性获得。

$$H_{chp} = \Delta H + (H_{chp\_rated} - \Delta H) \cdot PLR_{chw}^2 \quad (5.20)$$

$$H_{chp} = \Delta H + (H_{chp\_rated} - \Delta H) \cdot PLR_{chw}^2 = \Delta H + SF_{chw}^2 \quad (5.21)$$

同样的, 理想状态下变压差控制空调系统中冷冻水环路总的管路特性应该是保持不变的, 即总比摩阻  $S$  保持不变, 所以公式 (5.20) 可以变形为公式 (5.22), 实际情况下,  $S$  可以通过测量一次性获得。

$$H_{chp} = H_{chp\_rated} \cdot PLR_{chw}^2 = S_{total} F_{chw}^2 \quad (5.22)$$

上文已经将自主编写的理想空调系统模型主要部件的模型介绍完毕, 下面对于该理想空调系统还要做几点说明。

1) 本文的理想空调系统模型选用的控制方式是冷量控制, 为了达到较高的能效, 该模型控制冷冻水的出水温度为  $7^{\circ}\text{C}$ , 供回水温差为  $5^{\circ}\text{C}$ , 上下波动范围不超过  $1^{\circ}\text{C}$ , 即冷冻水的供水温度范围为  $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ , 供回水温差范围为  $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。

2) 在该理想空调系统模型中, 空调系统的逐时冷负荷为输入量, 而如上文所述该模型已经控制了冷冻水的供回水温度, 在室内温度设定点 (回风温度) 一定的情况下, 根据冷冻水供回水温度、冷冻水流量和回风温度以及新风量, 可以计算出确切送风温度, 但是该送风温度不一定合理, 为了保证末端有合理的出风量, 这里需要对末端的送风温度进行优化计算, 控制送风温度在  $12\sim 18^{\circ}\text{C}$  范围内。初始计算冷冻水供水温度  $7^{\circ}\text{C}$ , 供回水温差  $5^{\circ}\text{C}$ , 如果送风温度在  $12\sim 18^{\circ}\text{C}$  范围内, 则计算结束, 如果超出范围, 则在冷冻水的供水温度范围  $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ , 供回水温差范围为  $4\sim 6^{\circ}\text{C}$  的前提下调整水温, 对送风温度和送风量进行迭代计算。

该理想空调系统模型具有很好的精度, 不仅操作简单, 而且具有适用性和通用性。1) 操作简单。该模型为编译好的模块化模型, 不受系统形式和设备个数的限制, 可以根据具体空调系统的情况, 在模型界面中选择设备的形式和设备的个数, 操作非常简单。2) 通用性强。该模型不像 Energyplus 等模拟软件那样针对每一栋建筑都需要建立一个新的模型, 该模型完全不受建筑种类和形式的影响。3) 适用范围广。安装有分项计量系统的建筑都可以使用该模型。

实际应用过程中，冷机、冷冻水泵和冷却水泵需要用到的性能曲线，可以通过设备样本曲线取数据点拟合的方式获得；冷却塔和末端盘管为逆流换热模型，是现有模拟软件中的通用模型，主要出口参数已知的情况下，只需要计算额定工况下的 UA 值和自由对流换热的 UA 值；风机模型也选用的 Energyplus 的模型，使用的归一化的性能曲线，只需要输入风机的额定参数即可。

#### 5.4.2 诊断方法的建立

该诊断方法分为两个层次，第一个层次即能效诊断，本文中气象参数和分项电耗数据为已知量，在此基础上通过第 2 章的空调系统末端能耗拆分算法和第 4 章的空调系统逐时负荷估算算法两个步骤的处理，可以获得空调系统各个设备的逐时能耗和空调系统的逐时冷负荷。获得的空调系统各个设备的电耗数据即为空调系统实际运行的能耗数据，获得的空调系统冷负荷则作为理想空调系统模型的输入量，计算在比较理想的情况下空调系统各个设备应该具有的能耗水平。然后通过对比各个设备的实测电耗数据和使用理想空调系统模拟得到的电耗数据，判断各个设备的能效，其中  $L_i$ 、 $L_c$ 、 $L_{cp}$ 、 $L_{cp}$  和  $L_c$  等阈值的大小根据空调系统的实际情况和对能效要求的高低来决定，也可以根据能耗偏差的大小划分为多个故障等级。

第二层次即为运行故障的诊断，在第一个层次诊断结束后，被判断为能效异常的设备，则会进入第二个层次的诊断，该层次的诊断则需要更多的诊断参数，在第一层次的数据基础上，还需要冷冻水供回水温度、冷却水供回水温度、水泵（冷冻泵、冷却泵）前后压差和冷机前后压差（蒸发侧、冷凝侧）8 个参数来辅助完成第二个层次的诊断。表 5.5 的第五列中用到的所有诊断数据都可以通过冷负荷和这 8 个参数计算而得。表 5.5 为空调系统各个设备的主要故障及其诊断方法。本章节给出了 20 种故障的诊断方法，由于本章 5.3 节已经完成了对 14 种常见简单故障的诊断，故障编号为 F1~F14，所以本节中对故障的编号从 F15 开始，为 F15~F34。

一级诊断非常容易理解，就是对实测能耗值偏离理想能耗值的程度进行判断，从而得到分析结果，此处不详细说明，下面对不同设备的二级故障诊断方法逐一进行说明。

##### 1) 末端

因为空调系统的末端设备没有独立的计量，即使通过拆分算法获得末端的逐时能耗数据，也只是所有末端的混合能耗数据而非单个末端的能耗数据，所以此处将空调系统的所有末端视为一个整体。当空调系统负荷变化范围超过 20% 时，如果末端总能耗没有表现出明显变化，那么可以诊断为变频风机没有正常的发挥

变频功能。由于末端数量较多,关于末端设备的已知参数数量和种类都非常有限,所以此处只做这一种故障的诊断,

## 2) 冷机

可以诊断出的冷机故障有六种, F16~F21。F16 为开启台数异常, 诊断方法为估算空调系统负荷除以冷机的额定制冷量, 除得的结果向上取整即为应该开启的冷机的台数, 如果实际开始台数大于该数量, 则诊断为冷机台数开启异常; F17~F19 为冷冻水和冷却水水温的异常, 判断方式比较简单, 直接进行温度的比较即可; F19~F20 为蒸发器或冷凝器结垢问题, 判断方法为阻力判断, 通过压差和流量来判断蒸发器或冷凝器的比摩阻是否大于原始比摩阻, 原始比摩阻可以通过设备样本计算而得。

## 3) 冷冻水泵

可以诊断的冷冻水泵的故障有五种, F22~F26。F22 为开启台数异常, 判断方法为实际需要的冷冻水量除以水泵的额定流量, 除得的结果向上取整即为应该开启的冷冻水泵的台数, 其中实际需要的冷冻水流量通过估算而得的冷负荷和给定的冷冻水供回水理想温差计算而得; F23 冷冻水环路管路阻塞的判断方式与蒸发器结构的判断方式相同; F24 水泵选型异常的判断方式为比较水泵的额定流量或扬程与模拟计算得到的峰值冷冻水流量或扬程进行比较, 如果水泵的额定流量或扬程明显偏大, 则判断为选型过大, 此处取 1.2 倍的系数作为诊断的安全系数; F25 大流量小温差的判断方式为, 实际温差小于设定温差超过 2°C 则判断为故障, 即设定温差为 5°C, 而实际温差小于 3°C; F26 变频器故障的诊断方式与末端风机相同。

## 4) 冷却水泵

可以诊断的冷冻水泵的故障有五种, F27~F31。判断方法与冷冻水泵完全相同, 但是此处需要说明的一点是冷却侧的冷量应该为空调系统冷负荷与冷机功率之和。

## 5) 冷却塔

可以诊断的冷却塔故障有三种, F32~F34。开启台数问题和变频器问题的判断方式与上文相同; F34 冷却塔散热效果差的判断方式为实际冷却水流量与模拟冷却水流量相近, 但是实际冷却塔冷却得到的冷却水温差却高于理想温差。此处实际冷却水流量是通过估算冷负荷、实测冷机功率和实测冷却水的供回水温度计算而得的。

表 5.5 常见故障及基于模型的诊断方法

设备	一级诊断	故障	故障编号	二级诊断
----	------	----	------	------

末端	$\frac{ E_{t\_m} - E_{t\_s} }{E_{t\_s}} > L_t$	末端风机变频器故障	F15	$\frac{\Delta Q_i}{Q_i} > 20\% \cap \Delta E_{t\_m} \rightarrow 0$
		开启台数异常	F16	$N_0 > \lceil Q/Q_{rc} \rceil$
		冷却水进水温度过高	F17	$T_{ce} > T_{ce\_LV}$
		冷冻水回水温度过高	F18	$T_{ee} > T_{ee\_LV}$
冷机	$\frac{ E_{c\_m} - E_{c\_s} }{E_{c\_s}} > L_c$	冷冻水出水温度过低	F19	$T_{el} < T_{el\_LV}$
		蒸发器结垢	F20	$\frac{\Delta P_{eva}}{F_{chw\_s}^2} > 1.2 \frac{\Delta P_{eva\_rated}}{F_{chw\_rated}^2}$
		冷凝器结垢	F21	$\frac{\Delta P_{con}}{F_{chw\_s}^2} > 1.2 \frac{\Delta P_{con\_rated}}{F_{chw\_rated}^2}$
		开启台数异常	F22	$N_1 > \lceil F_{chw\_s}/F_{chw\_rated} \rceil$
		冷冻环路结堵塞	F23	$\frac{\Delta P_{chwpipe}}{F_{chw\_s}^2} > 1.2 \frac{\Delta P_{chwpipe\_rated}}{F_{chw\_rated}^2}$
冷冻水泵	$\frac{ E_{chp\_m} - E_{chp\_s} }{E_{chp\_s}} > L_{chp}$	水泵选型过大	F24	$F_{chp\_rated} > 1.2 \max(F_{chw\_s})$ 或 $H_{chp\_rated} > 1.2 \max(H_{chw\_s})$
		大流量小温差	F25	$\Delta T_{chw\_m} < \Delta T_{chw\_rated} - 2$
		变频器故障	F26	$\frac{\Delta Q_i}{Q_i} > 20\% \cap \Delta E_{chp\_m} \rightarrow 0$
		开启台数异常	F27	$N_2 > \lceil F_{cw\_s}/F_{cw\_rated} \rceil$
		冷却环路结堵塞	F28	$\frac{\Delta P_{cwpipe}}{F_{cw\_s}^2} > 1.2 \frac{\Delta P_{cwpipe\_rated}}{F_{cw\_rated}^2}$
冷却水泵	$\frac{ E_{cp\_m} - E_{cp\_s} }{E_{cp\_s}} > L_{cp}$	水泵选型过大	F29	$F_{cp\_rated} > 1.2 \max(F_{cw\_s})$ 或 $H_{cp\_rated} > 1.2 \max(H_{cw\_s})$
		大流量小温差	F30	$\Delta T_{cw\_m} < \Delta T_{cw\_rated} - 2$
		变频器故障	F31	$\frac{\Delta Q_{cwi}}{Q_{cwi}} > 20\% \cap \Delta E_{cp\_m} \rightarrow 0$
		开启台数异常	F32	$N_3 > \lceil Q_{ct}/Q_{ct\_rated} \rceil$
冷却塔	$\frac{ E_{ct\_m} - E_{ct\_s} }{E_{ct\_s}} > L_{ct}$	变频风机不变频或者双速风机不调速	F33	$\frac{\Delta Q_{cwi}}{Q_{cwi}} > 20\% \cap \Delta E_{ct\_m} \rightarrow 0$
		散热差	F34	$F_{cw} \approx F_{cw\_s} \cap \Delta T_{cw} > \Delta T_{cws} + 1$

### 5.4.3 诊断流程的建立

上一节中给出了 20 种空调系统故障的诊断方式，下面以冷机为例绘制的诊断流程，如图 5.8 所示。

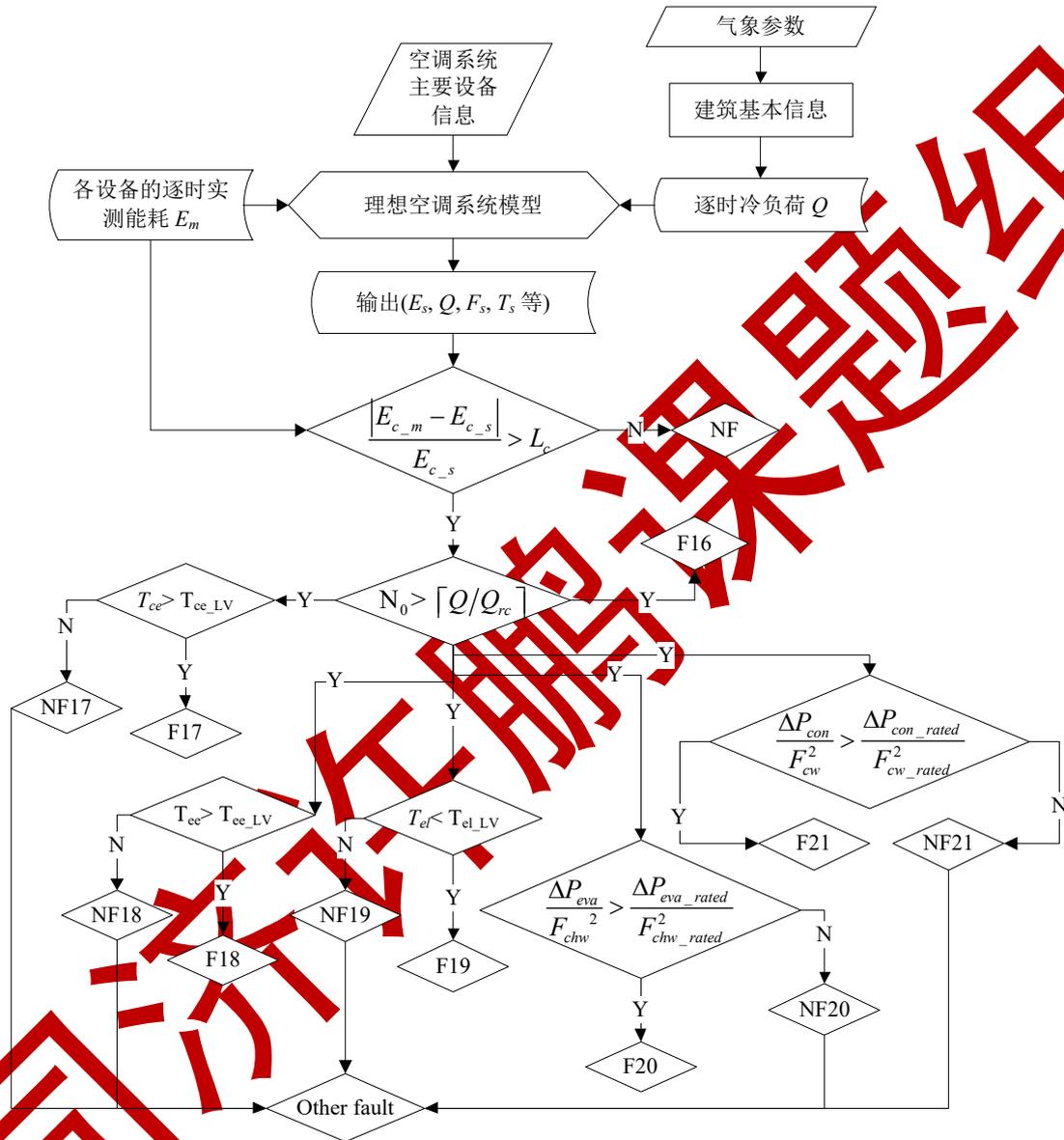


图 5.8 基于模型的冷机故障诊断流程图

### 5.4.4 输入/输出参数汇总

本小节主要介绍基于模型的空调系统故障诊断算法中需要的输入/输出参数。输入参数主要包括理想空调系统模型校验参数、各主要设备的实际计量逐时电耗、空调系统的逐时冷负荷和冷冻水供回水温度、冷却水供回水温度、水泵（冷冻泵、冷却泵）前后压差以及冷机前后压差（蒸发侧、冷凝侧）8 个参数。理想空调系

统模型校验需要用到的参数汇总于表 5.6。基于模型的空调系统故障诊断算法的主要输入参数和输出参数汇总于表 5.7。

表 5.6 理想空调系统模型校验用到的参数

模型校验输入参数	
整体系统	工作时间表
	实测或估算而得的逐时冷量 (kW)
冷机	额定制冷量 (W)
	额定 COP
	冷冻水侧阻力系数 ( $m/(L/s)^2$ )
	冷却水侧阻力系数 ( $m/(L/s)^2$ )
	CapFTemp 曲线系数
	EIRFTemp 曲线系数
	EIRFPLR 曲线系数
	冷机数量 (台)
	额定流量 (L/min)
	额定压头 (m)
冷冻水泵	额定功率 (kW)
	额定转速 (r/min)
	水泵效率曲线系数
	电机效率曲线系数
	VFD 效率曲线系数
	最大转速比
	最小转速比
	冷冻水泵数量 (台)
	是否变频 (是: 1; 否: 0)
	冷冻水侧管路阻力系数 ( $m/(L/s)^2$ )
冷却水泵	额定流量 (L/min)
	额定压头 (m)
	额定功率 (kW)
	额定转速 (r/min)
	水泵效率曲线系数
	电机效率曲线系数
	VFD 效率曲线系数
	最大转速比
	最小转速比
	冷却水泵数量 (台)
是否变频 (是: 1; 否: 0)	
冷却水侧管路阻力系数 ( $m/(L/s)^2$ )	

冷却塔	风机开启时的空气流量 (m <sup>3</sup> /s)
	名义冷却水流量 (m <sup>3</sup> /h)
	名义风机能耗 (W)
	压降 (m)
	最大台数 (台)
	风机开启时的 UA (J/°C)
	自由对流时空气侧流量比
末端(末端风机按照型号相同处理)	AHU 个数 (个)
	风机盘管个数 (个)
	设计空气流量 (m <sup>3</sup> /s)
	设计水流量 (m <sup>3</sup> /s)
	冷冻水压降 (m)
	风机直径 (m)
	电机额定功耗 (W)
	最大空气质量流量 (kg/s)
	名义效率
	名义扬程 (Pa)
	名义空气流量 (m <sup>3</sup> /s)

表 5.7 基于模型的空调系统故障诊断算法输入输出参数

输入参数	输出参数
整体系统	系统启停判断 F1~F10; 运行能效判断 F11~F14; 故障诊断 F15~F34
工作时间表	
实测或估算而得的逐时冷量 (kW)	
实测冷冻水供水温度 (°C)	
实测冷冻水回水温度 (°C)	
实测冷冻水泵前后压差 (m)	
实测蒸发器前后压差 (m)	
实测冷却水供水温度 (°C)	
实测冷却水回水温度 (°C)	
实测冷却水泵前后压差 (m)	
实测冷凝器前后压差 (m)	
冷机实测逐时能耗 (kWh)	
冷冻水泵实测逐时能耗 (kWh)	
冷却水泵实测逐时能耗 (kWh)	
末端风机实测逐时能耗 (kWh)	
冷却塔实测逐时能耗 (kWh)	

理想  
空调  
系统  
模拟  
数据

模拟冷冻水供水温度 (°C)  
模拟冷冻水回水温度 (°C)  
模拟冷冻水泵前后压差 (m)  
模拟蒸发器前后压差 (m)  
模拟冷却水供水温度 (°C)  
模拟冷却水回水温度 (°C)  
模拟冷却水泵前后压差 (m)  
模拟冷凝器前后压差 (m)  
冷机模拟逐时能耗 (kWh)  
冷冻水泵模拟逐时能耗 (kWh)  
冷却水泵模拟逐时能耗 (kWh)  
末端风机模拟逐时能耗 (kWh)  
冷却塔模拟逐时能耗 (kWh)

本节首先详细介绍了理想空调系统模型的建立过程和原理；然后，阐述了基于模型的空调系统故障诊断算法的建立过程和诊断流程，给出了 20 种常见故障及其诊断方法；最后，汇总了理想空调系统模型校验需要用到的输入参数，和基于模型的空调系统故障诊断算法需要用到的主要输入参数。

## 5.5 案例分析

### 5.5.1 建筑描述

本章以上海市一栋实际商业建筑为例，对上一章介绍的故障诊断算法进行演示，本章包括三个部分，第一部分是对该案例建筑的描述，第二部分是基于规则的故障诊断过程和诊断结果分析，第三部分是是基于模型的故障诊断过程和结果分析。

本章案例分析的对象建筑和本文第 3 章中的案例建筑为同一栋建筑，即 DMT 建筑，所以建筑基本信息描述见本文章节 3.4.1。该建筑的冷量测量时间为 2014 年 8 月 15 日到 9 月 30 日，8 月 29 日和 30 日两天出现了数据缺失。此处主要对该建筑的空调系统主要设备进行介绍。

DMT 的空调系统形式如下，冷源是离心式冷水机组，热源是溴化锂直燃机（能源形式为燃气，不在诊断范围），冷冻水泵为变频泵，冷却水泵在 2013 年以前为定频泵，后来改造为变频泵，热水泵为定频泵，上述设备全部位于地下二层的空调机房内；冷却塔位于 DMT 楼顶，风机为双速风机；空调系统末端设备为

AHU, 风机为变频风机, 位于每一层楼的设备用房内。具体的设备型号和参数见下表 5.8, 制冷季节为 5 月 1 日~10 月 30, 制冷室内设定温度为 26°C; 采暖季节为 12 月 1 日~3 月 1 日, 采暖室内设定温度为 18°C。商场部分的空调运行时间为 9:00~21:00, 办公区域空调系统的运行时间为 8:00~17:00。所以空调系统最终的运行时间为工作日 8:00~21:00, 非工作日 9:00~21:00。

表 5.8 DMT 建筑空调系统主要设备参数汇总表

冷源	数量	额定制冷量 (kW)	额定功率 (kW)	冷冻水额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	冷却水额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	
离心式水冷机组	2	3516	591	605	706	
水泵	数量	额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	额定扬程 (m)	额定功率 (kW)	类型	
冷冻泵	3(两用一备)	600	35	75	变频	
冷却泵	3(两用一备)	720	32	90	变频	
冷却装置	数量	额定功率 (kW)	额定水量 (m <sup>3</sup> /h)	额定风量 (m <sup>3</sup> /h)	类型	
开式冷却塔	4	15	400	300000	双速风机	
末端	数量	额定风量 (m <sup>3</sup> /h)	额定冷量 (kW)	最大功率 (kW)	位置	压头 (Pa)
AHU	4×1	26000	215	18.5	B1	200-800
AHU	2×4	32000	257	18.5	F1-F4	200-800
AHU	2×4	36000	283	22	F1-F4	200-800
AHU	2×2	21000	174	15	F5-F6	200-800
AHU	2×2	32000	257	18.5	F5-F6	200-800

## 5.5.2 基于规则的故障诊断

### 5.5.2.1 故障诊断计算过程

本小节根据本章 5.3 节建立的故障诊断算法对这栋实际商业建筑的空调系统进行诊断。故障 F1~F10 属于简单的与非判断, 诊断过程简单, 不需要计算过程。此类故障会在下一小节中展示。

下面对故障 F11~F14 进行详细地计算, 用于诊断的数据为 2014 年的 8 月 19~25 日一周的数据。

**冷冻水泵:** 根据实际冷冻水泵的型号, 查询设备手册, 拟合得到其效率曲线如方程 (5.23)。

$$\frac{\eta_{chp\_PL}}{\eta_{chp\_rated}} = 0.0102 + 1.5378(PLR_{chw}) + 0.0388(PLR_{chw})^2 - 0.6061(PLR_{chw})^3 \quad (5.23)$$

该建筑的空调系统冷冻水侧采用的定压差控制，所以选择使用公式（5.4）。其中冷冻水分集水器之间的设定压差为定值，压头 20m。根据表 5.8 可知冷冻水泵的额定扬程为 35m，并且根据章节 5.3 可知，在基于简单规则的故障诊断方法中，可以用冷负荷的部分负荷率来代替冷冻水流量的部分负荷率，在选取的时间段内该空调系统只开启了一台冷机和一台冷冻泵，冷机的额定冷量已知为 3516kW，空调系统的逐时冷负荷已在第 4 章中计算而得，所以公式（5.4）整理后变为下式(5.24)。根据规范得到的  $WTF_{chw}$  的限值为 35，可以计算出逐时  $k_{WTF_{chw}}$ 。

$$k_{WTF_{chw}} = (0.0102 + 1.5378(PLR) + 0.0388(PLR)^2 - 0.6061(PLR)^3) \cdot \frac{35}{20 + 15 \cdot PLR^2} \quad (5.24)$$

**冷却水泵：**冷却水泵的部分负荷效率曲线如方程（5.25）。冷却环路为变频控制，根据表 5.8 可知冷却水泵的额定扬程为 32m，值得注意的是该开式冷却塔喷淋管到集水盘水面的高差为 5m，在选取的时间段内该空调系统只开启了一台冷却泵，所以根据式（5.10），可以整理得到  $k_{WTF_{cw}}$  的计算公式（5.26）。根据规范得到的  $WTF_{cw}$  的限值为 30，所以可以计算出逐时  $k_{WTF_{cw}}$ 。

$$\frac{\eta_{cp\_PL}}{\eta_{cp\_rated}} = 0.0102 + 1.5378(PLR_{cw}) + 0.0388(PLR_{cw})^2 - 0.6061(PLR_{cw})^3 \quad (5.25)$$

$$k_{WTF_{cw}} = (0.0102 + 1.5378(PLR) + 0.0388(PLR)^2 - 0.6061(PLR)^3) \cdot \frac{32}{5 + 27.5 \cdot PLR^2} \quad (5.26)$$

**冷机：**冷机的诊断非常简单，可以根据所用冷机的部分负荷性能曲线直接诊断。该空调系统所用的冷机，其部分性能曲线如方程（5.27）。

$$\frac{COP_{PL}}{COP_{rated}} = 0.5264 + 1.4520(PLR) - 0.9399(PLR)^2 \quad (5.27)$$

**末端：**末端数量较多，性能曲线有所差异，本文根据所选择品牌的末端，选取了一条标准化的部分负荷效率曲线如方程（5.28）。末端为变风量控制，为了保证最小新风量，风阀的开度不小于 30%，即  $PLR_t \geq 0.3$ ，所以根据公式（5.12），可以整理得到  $k_{EER_t}$  的计算公式（5.29）。根据规范得到的  $EER_t$  的限值为 8，所以

可以计算出逐时  $k_{ERRt}$ 。对于空调末端同样可以用冷负荷的部分负荷率来代替冷冻水流量的部分负荷率。

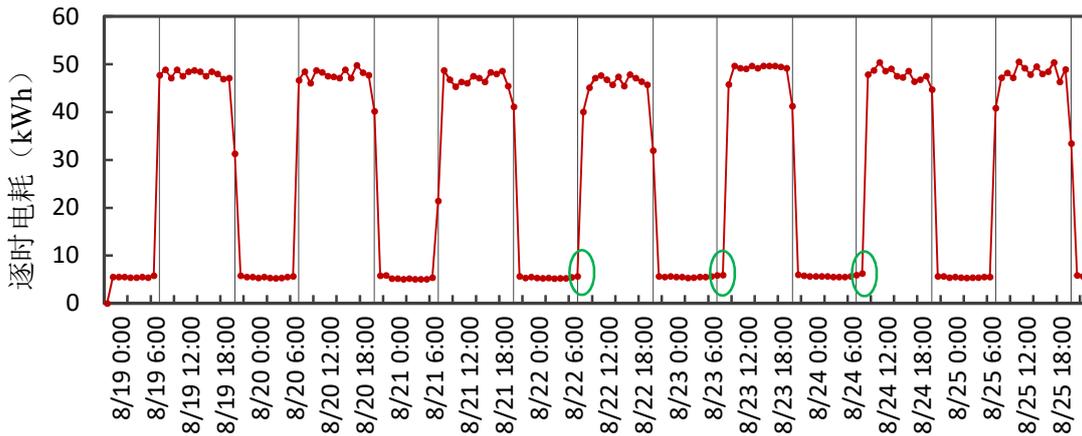
$$\frac{\eta_t}{\eta_{t\_rated}} = 0.4731 + 1.2433(PLR_t) - 1.0390(PLR_t)^2 + 0.3234(PLR_t)^3 \quad (5.28)$$

$$k_{ERRt} = \frac{0.4731 + 1.2433(PLR_t) - 1.0390(PLR_t)^2 + 0.3234(PLR_t)^3}{PLR^2} \quad (5.29)$$

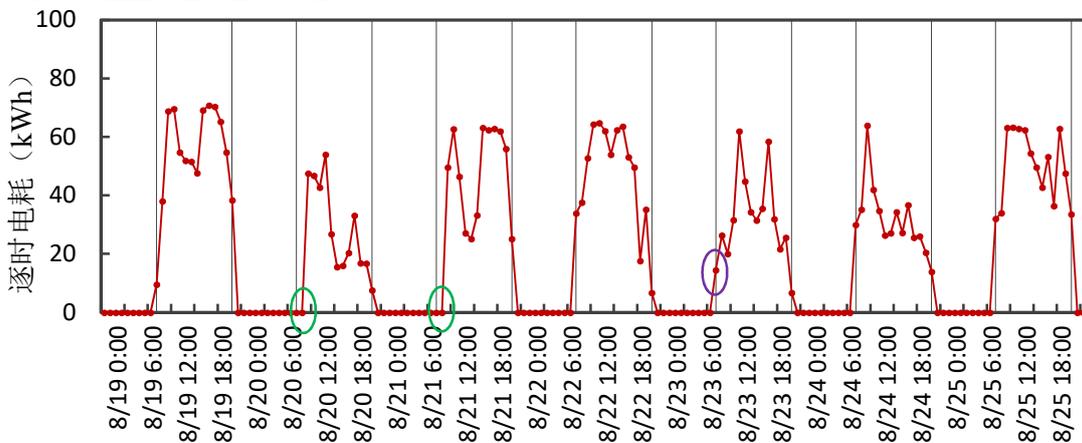
### 5.5.2.2 故障诊断结果分析

本文选取 2014 年的 8 月 19（周二）~8 月 25 日（周一）一周的数据用于诊断，本章 5.5.1 节对于 DMT 建筑的描述中已经指出该建筑空调系统的运行时间为工作日 8:00~21:00，非工作日 9:00~21:00。

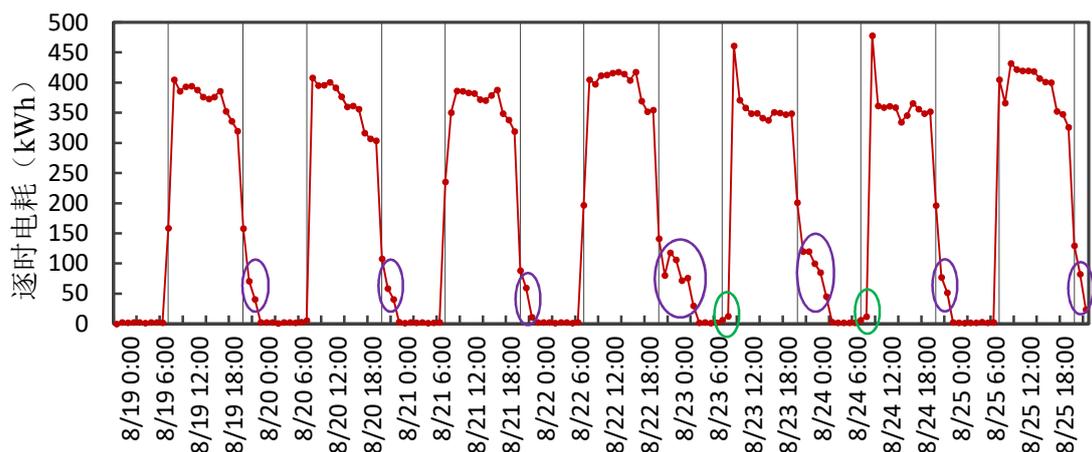
本小节首先对空调系统的主要设备启停时间进行诊断，诊断结果如图 5.9 所示。图中黑色竖线为每天的 8:00~21:00，表示工作日的空调系统正常运行时间。



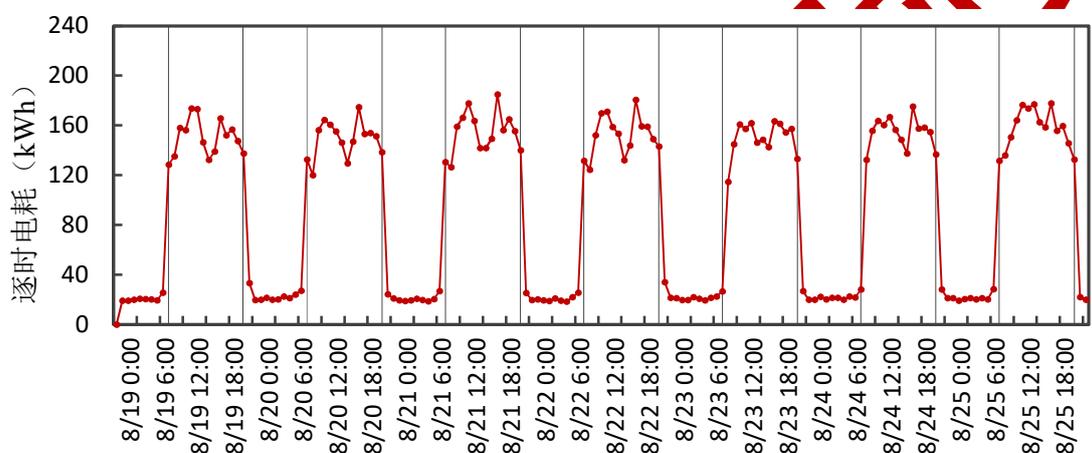
(a) 冷冻泵



(b) 冷却泵



(c) 冷机



(d) 末端风机

图 5.9 空调系统主要设备运行时间诊断结果

图 5.9 (a) 为冷冻水泵的一周运行逐时电耗曲线，根据绿色圆圈部分可以看出 8 月 22 日为周五，启动时间应该为 8:00，但是实际启动时间为 9:00，即晚启动 1 个小时，同样的 8 月 23 日和 24 日，为周末，正常启动时间应为 9:00，实际启动时间为 10:00，也是晚启动了 1 个小时，根据表 5.3 可知该故障现象属于 F6。

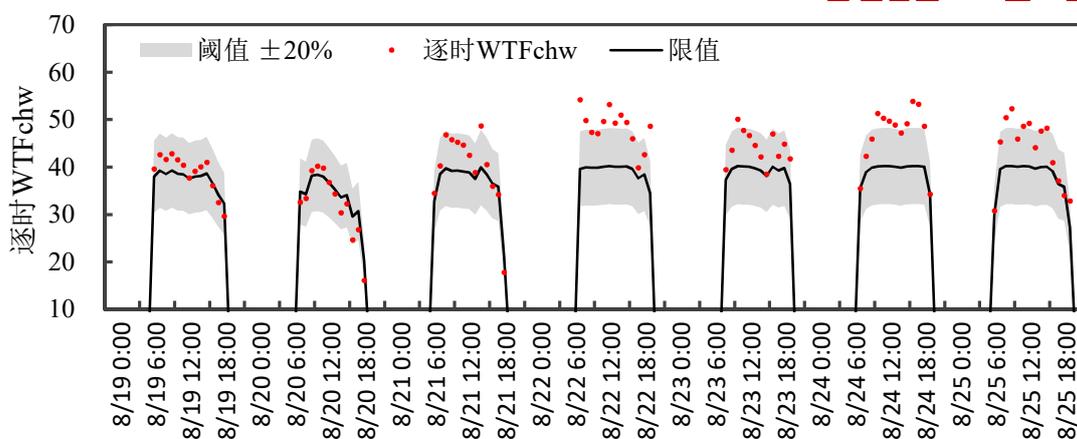
图 5.9 (b) 为冷却水泵的一周运行逐时电耗曲线，根据绿色圆圈部分可以看出 8 月 20 日和 21 日为周三和周四，启动时间应该为 8:00，但是实际启动时间为 10:00，即晚启动 2 个小时，根据表 5.3 可知该故障现象属于 F8。根据紫色圆圈部分可以看出 8 月 23 为周六，正常启动时间应为 9:00，实际启动时间为 8:00，即早启动了 1 个小时，根据表 5.3 可知该故障现象属于 F7。

图 5.9 (c) 为冷机的一周运行逐时电耗曲线，根据绿色圆圈部分可以看出 8 月 23 日和 24 日为周末，启动时间应该为 9:00，但是实际启动时间为 10:00，即晚启动 1 个小时，根据表 5.3 可知该故障现象属于 F4。根据紫色圆圈部分可以看出冷机整周运行存在一个明显问题，即正常关闭时间应为 21:00，实际关闭时间

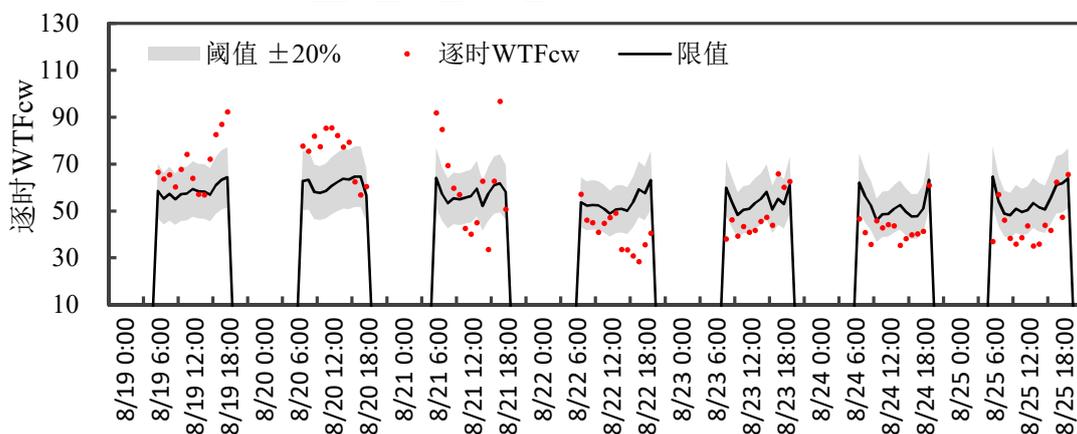
都晚于 22:00,即每天都晚关闭超过 1 小时,根据表 5.3 可知该故障现象属于 F3。

图 5.9 (d) 为空调末端设备的一周运行逐时电耗曲线,电耗数据通过拆分获得,具体拆分算法见本文第 2 章,拆分结果见本文章节 3.2.4.5。根据曲线可以看出空调系统末端设备的启停时刻是没有问题的。

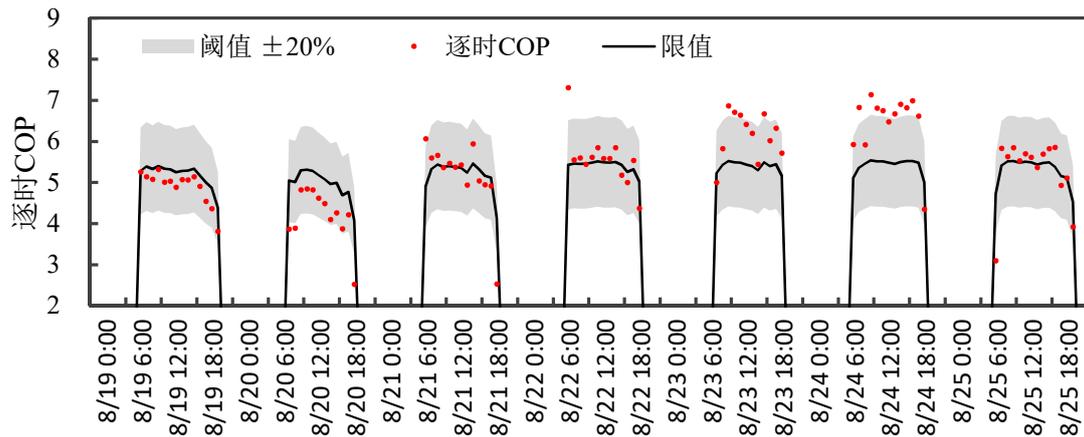
5.5.2.1 节已经计算得到了空调系统主要设备的逐时能效限值,本节选取 2014 年的 8 月 19~8 月 25 日一周的数据作为诊断数据,对空调系统的主要设备进行逐时性能诊断。诊断结果如图 5.10 所示。需要说明,在上述的空调系统启停诊断中已经对空调系统各设备的启停故障进行了判断,此处为了方便作图,图 5.10 中已经将非空调系统运行时刻的数据点去掉。



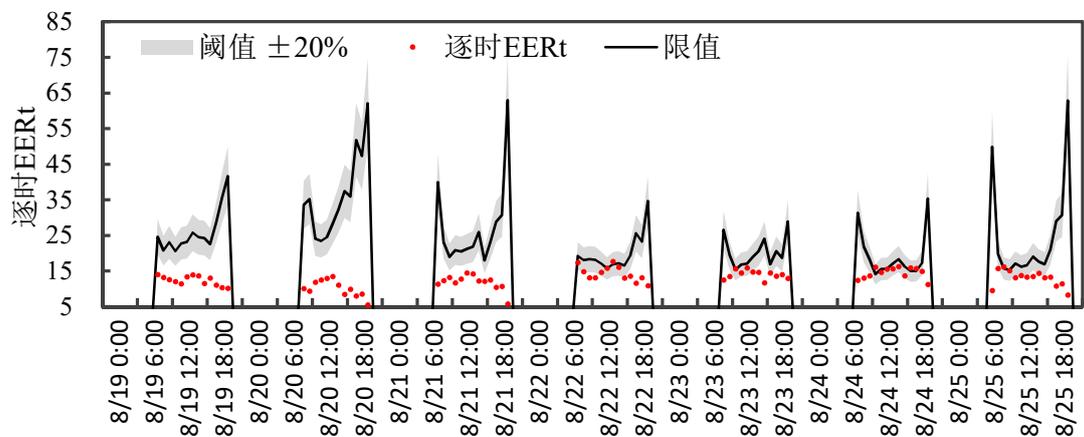
(a) 冷冻泵



(b) 冷却泵



(c) 冷机



(d) 末端风机

图 5.10 空调系统主要设备逐时能效诊断结果

图 5.10 中，黑色实线表示逐时能效限值，灰色区域为诊断阈值，取值范围为能效限值的 $\pm 20\%$ 。阈值的范围可以根据诊断需求进行确定，阈值范围越小则诊断精度越高，但是误报率也会随之增高；反之阈值范围越大，诊断精度越低，但是误报率也会降低，由于本文第 4 章空调系统逐时冷负荷的估算结果误差为 12%，所以此处诊断阈值的选择不应小于 12%，故选取 20%。高于阈值上限的点被标记为正常运行，阈值范围内的点此处也被接受为正常运行，低于阈值下限的点则被判断为低效运行，造成低效运行的原因需要进一步诊断，进一步诊断内容见本章 5.5.3 节。

图 5.10 (a) 和 5.10 (c)，个别日期中冷冻水泵和冷机的开启和关闭时刻诊断结果数据点低于诊断阈值的下限，这表示该时刻设备运行能效较低，其余时刻的诊断数据点都高于阈值上限或者落入阈值范围之内，诊断结果表明冷冻水泵和冷机的运行状况良好，不存在低效运行问题。

图 5.10 (b) 的诊断结果表明，8 月 19 日和 20 日冷却水泵的运行状况较好。

21 日~25 日则出现低效运行问题。

图 5.10 (d) 为空调系统末端设备的运行诊断结果，可以看出末端设备的运行能效非常低，几乎全部低于诊断阈值的下线。造成低效运行的具体原因需要在本章 5.5.3 中进行进一步诊断。

### 5.5.3 基于模型的故障诊断

#### 5.5.3.1 理想空调系统模型校验

根据表 5.8 可知 DMT 建筑的空调系统有两台离心冷机，但是由于 2014 年的夏季比往年凉爽，所以冷量测量时间段内只同时运行一台冷机、一台冷冻水泵和一台冷却水泵，但是冷却塔的开启台数是不定的。通过现场空调系统形式调研、主要设备铭牌信息整理、设备样本数据拟合和部分数据现场实测等手段，获得了校验理想空调系统模型所需要的所有参数并汇总于表 5.9。

表 5.9 空调系统主要参数汇总表

表 5.9-1 冷机

额定制冷量 (W)	3516000					
额定 COP	5.95					
冷冻水侧阻力系数 ( $\text{m}/(\text{L}/\text{s})^2$ )	0.000225					
冷却水侧阻力系数 ( $\text{m}/(\text{L}/\text{s})^2$ )	0.000242086					
CapFTemp	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0.257896	0.0389016	-0.00022	0.046868	-0.00094	-0.00034
EIRFTemp	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	0.933884	-0.058212	0.0045	0.00243	0.000486	-0.00122
EIRFPIR	$c_0$	$c_1$	$c_2$			
	0.222903	0.313387	0.46371			
冷机数量 (台)	1					

表 5.9-2 冷冻水泵

额定流量 (L/min)	10800			
额定压头 (m)	35			
额定功率 (kW)	75			
额定转速 (r/min)	980			
水泵效率曲线系数	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
	0.2371	1.013	-0.0667	-0.425
电机效率曲线系数	$e_0$	$e_1$		
	0.9695	-9.4625		

VFD 效率曲线系数	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
	0.5087	1.2830	-1.4200	0.5834
最大转速比	1.2			
最小转速比	0.3			
冷冻水泵数量 (台)	1			
是否变频 (是: 1; 否: 0)	1			
冷冻水侧管路阻力系数 ( $m/(L/s)^2$ )	0.00060917			

表 5.9-3 冷却水泵

额定流量 (L/min)	12000			
额定压头 (m)	32			
额定功率 (kW)	90			
额定转速 (r/min)	980			
水泵效率曲线系数	$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
	0.2371	1.013	-0.0667	-0.425
电机效率曲线系数	$e_0$	$e_1$		
	0.9695	-9.4625		
VFD 效率曲线系数	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
	0.5087	1.2830	-1.4200	0.5834
最大转速比	1.2			
最小转速比	0.3			
冷却水泵数量 (台)	1			
是否变频 (是: 1; 否: 0)	1			
冷却水侧管路阻力系数( $m/(L/s)^2$ )	0.000200437			

表 5.9-4 冷却塔

风机开启时的空气流量 ( $m^3/s$ )	83.8
名义冷却水流量 ( $m^3/h$ )	400
名义风机能耗 (W)	15000
压降 (m)	4.5
最大台数 (台)	4
风机开启时的 UA ( $J/^\circ C$ )	107520
自由对流时空气侧流量比	0.1

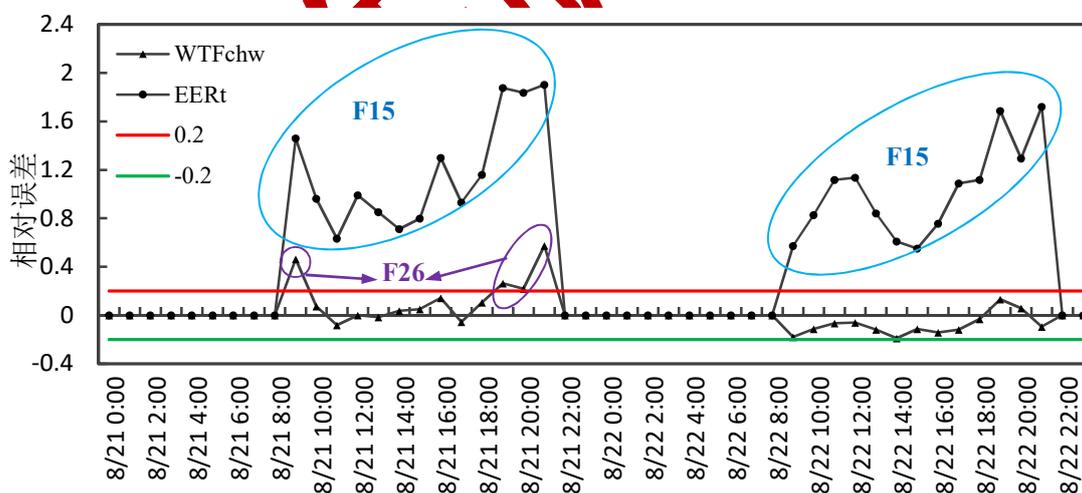
表 5.9-5 末端

AHU 个数 (个)	14
风机盘管个数 (个)	0
设计空气流量 ( $m^3/s$ )	8.3

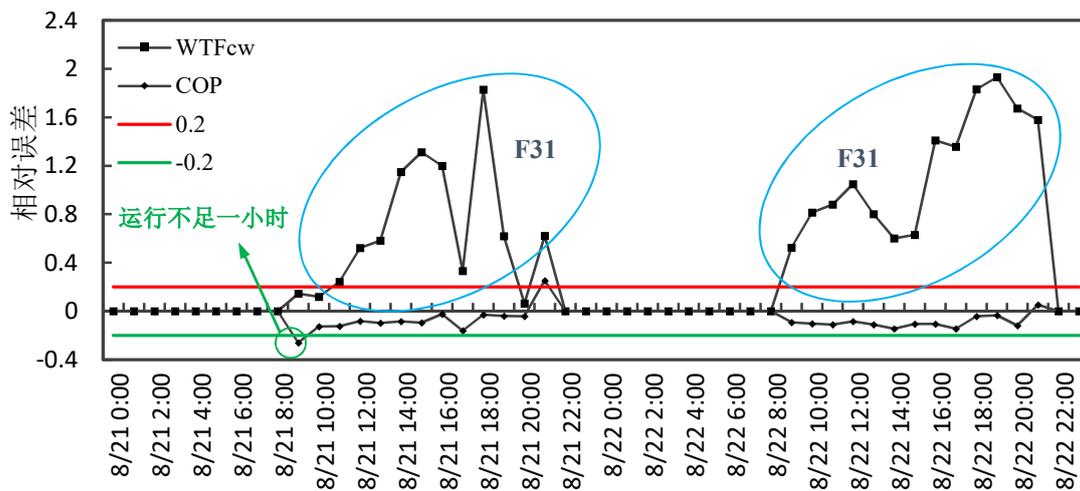
设计水流量 (m <sup>3</sup> /s)	0.0012
冷冻水压降 (m)	20
末端风机按照型号相同处理	
风机直径 (m)	0.63
电机额定功耗 (W)	22000
最大空气质量流量 (kg/s)	18
名义效率	0.919
名义扬程 (Pa)	1000
名义空气流量 (m <sup>3</sup> /s)	8.3

### 5.5.3.2 故障诊断结果分析

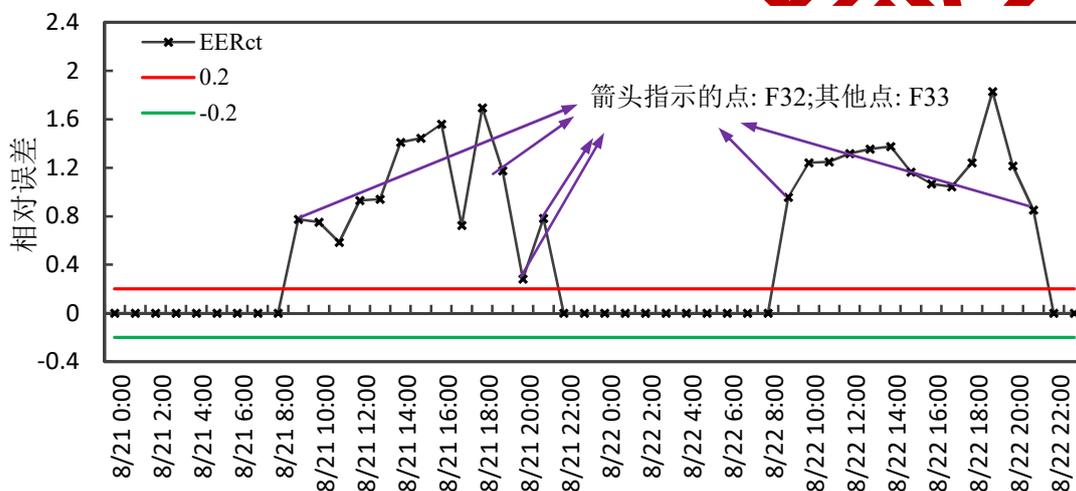
上一节已经建立了 DMT 建筑的理想空调系统模型，现在导入实际的气象参数，并且接入空调系统负荷估算结果，即可以进行各设备理想能耗的计算。通过比较模拟结果与实测能耗数据进行故障诊断。如 5.5.2.2 节中所述，阈值的范围根据诊断需求进行确定，阈值范围越小则诊断精度越高，但是误报率也会随之增高；反之阈值范围越大，诊断精度越低，但是误报率也会降低，由于本文第 4 章空调系统逐时冷负荷的估算结果误差为 12%，所以此处诊断阈值的选择不应小于 12%。在该案例中，本文选取诊断的阈值为 20%，即实测能耗偏离模拟能耗的偏差达到 20%，则进入深层次诊断。选取 8 月 21 和 22 两天的数据进行诊断，故障诊断结果展示在图 5.11 中。具体数据见表 5.10。



(a) 冷冻水泵和末端



(b) 冷机和冷却水泵



(c) 冷却塔

图 5.11 基于模型的空调系统主要设备故障诊断结果

图 5.11 (a) 显示, 绝大部分时间冷冻水泵运行状况良好, 但是 8 月 21 日的 9:00、19:00、20:00 和 21:00 冷冻水泵的能耗高于模拟的预期值, 这四个时刻的运行状况被诊断为 F26 (表 5.5), 8 月 21 日的这四个时刻空调系统冷负荷相对较低, 系统处于部分负荷运行工况, 此时监测到冷冻水的供回水温差在  $1.5\sim 3.0^{\circ}\text{C}$  范围之内, 远小于系统的设定温差  $5^{\circ}\text{C}$ , 造成大流量小温差, 导致这一现象产生的原因是冷冻水泵的变频器没有进行合理的流量调节。现场验证, 确定该诊断结果与调研结果相符。

图 5.11 (a) 还展示了末端设备运行的诊断结果, 显示空调系统末端设备逐时能耗的测量值显著高于模拟值, 诊断结果为 F15 (表 5.5)。该空调系统设定的送风温度是固定的, 当负荷发生变化时, 则通过调节送风量来实现负荷调节, 现场调研结果表明该变风量空调系统的大部分末端设备并没有进行合理的变风量

调节,在部分负荷工况下,依然按照满负荷风量进行送风,确实为故障 F15。

图 5.11 (b) 展示了冷机的诊断结果,除了 8 月 21 日 9:00 以外,其余时刻的运行状况都在诊断阈值的范围之内。该时刻冷机的实际测量能耗低于模拟值,该状况不在故障 F16~F21 之中,现场调研得知,这一日冷机的启动时间较晚,所以运行时间不足一小时,故能耗明显低于模拟值。

图 5.11 (b) 还展示了冷却水泵的诊断结果,可以看出这两天冷却水泵的运行情况都不在 20% 的偏差范围内,诊断结果为 F31(表 5.5),例如 8 月 21 日 17:00 和 18:00 的冷负荷分别为 2257kWh 和 1961kWh,负荷降低且降低比例不到 20%,而冷却水泵在这两个小时的能耗分别为 36kWh 和 58kWh,即负荷降低而冷却水泵的能耗却上升。现场验证结果表明确实是冷却水泵的变频器失灵,与本文 F31 的诊断结果相符。

图 5.11 (c) 为冷却塔的诊断结果,显示冷却塔的实际能耗明显高于模拟的预期能耗,诊断结果为冷却塔的运行策略存在问题,即同时开启的台数不合理(F32),且风机变频控制存在问题。

表 5.10 基于模型的空调系统主要设备故障诊断结果

时间	冷冻水泵		冷却水泵		冷机		末端		冷却塔	
	$L_{chp}$	Fault	$L_{cp}$	Fault	$L_c$	Fault	$L_t$	Fault	$L_{ct}$	Fault
8/21 9:00	<b>0.46</b>	F25	0.15	—	<b>-0.26</b>	运行不足一小时	<b>1.46</b>	F15	<b>0.78</b>	F32
8/21 10:00	0.07	—	0.12	—	-0.13	—	<b>0.96</b>	F15	<b>0.75</b>	F33
8/21 11:00	-0.08	—	<b>0.24</b>	F30	-0.12	—	<b>0.63</b>	F15	<b>0.58</b>	F33
8/21 12:00	0.00	—	<b>0.52</b>	F30	-0.08	—	<b>0.99</b>	F15	<b>0.93</b>	F33
8/21 13:00	-0.01	—	<b>0.53</b>	F30	-0.10	—	<b>0.85</b>	F15	<b>0.94</b>	F33
8/21 14:00	0.04	—	<b>1.15</b>	F30	-0.08	—	<b>0.71</b>	F15	<b>1.41</b>	F33
8/21 15:00	0.05	—	<b>1.31</b>	F30	-0.10	—	<b>0.80</b>	F15	<b>1.44</b>	F33
8/21 16:00	-0.14	—	<b>1.20</b>	F30	-0.02	—	<b>1.30</b>	F15	<b>1.56</b>	F33
8/21 17:00	-0.05	—	<b>0.33</b>	F30	-0.16	—	<b>0.93</b>	F15	<b>0.73</b>	F33
8/21 18:00	0.11	—	<b>1.83</b>	F30	-0.03	—	<b>1.16</b>	F15	<b>1.69</b>	F33
8/21 19:00	<b>0.26</b>	F25	<b>0.62</b>	F30	-0.04	—	<b>1.88</b>	F15	<b>1.18</b>	F32
8/21 20:00	<b>0.22</b>	F25	0.06	—	-0.04	—	<b>1.84</b>	F15	<b>0.28</b>	F32
8/21 21:00	<b>0.57</b>	F25	<b>0.62</b>	F30	<b>0.25</b>	F18	<b>1.90</b>	F15	<b>0.78</b>	F32
8/22 9:00	-0.18	—	<b>0.52</b>	F30	-0.09	—	<b>0.57</b>	F15	<b>0.96</b>	F33
8/22 10:00	-0.11	—	<b>0.81</b>	F30	-0.10	—	<b>0.83</b>	F15	<b>1.24</b>	F33
8/22 11:00	-0.07	—	<b>0.88</b>	F30	-0.11	—	<b>1.12</b>	F15	<b>1.25</b>	F33
8/22 12:00	-0.06	—	<b>1.05</b>	F30	-0.08	—	<b>1.13</b>	F15	<b>1.32</b>	F33
8/22 13:00	-0.12	—	<b>0.80</b>	F30	-0.11	—	<b>0.84</b>	F15	<b>1.35</b>	F33
8/22 14:00	-0.19	—	<b>0.60</b>	F30	-0.14	—	<b>0.61</b>	F15	<b>1.38</b>	F33

8/22 15:00	-0.11	—	<b>0.63</b>	F30	-0.11	—	<b>0.55</b>	F15	<b>1.16</b>	F33
8/22 16:00	-0.14	—	<b>1.41</b>	F30	-0.11	—	<b>0.76</b>	F15	<b>1.07</b>	F33
8/22 17:00	-0.12	—	<b>1.36</b>	F30	-0.15	—	<b>1.09</b>	F15	<b>1.04</b>	F33
8/22 18:00	-0.03	—	<b>1.83</b>	F30	-0.04	—	<b>1.12</b>	F15	<b>1.24</b>	F33
8/22 19:00	0.13	—	<b>1.93</b>	F30	-0.03	—	<b>1.69</b>	F15	<b>1.83</b>	F33
8/22 20:00	0.06	—	<b>1.67</b>	F30	-0.12	—	<b>1.29</b>	F15	<b>1.22</b>	F33
8/22 21:00	-0.09	—	<b>1.58</b>	F30	0.05	—	<b>1.72</b>	F15	<b>0.85</b>	F32

## 5.6 本章小结

本章首先建立了空调系统故障诊断算法框架，明确指出该算法由三个子算法组成。子算法①：空调系统末端设备逐时能耗拆分算法；子算法②：空调系统逐时负荷估算算法；子算法③：空调系统逐时故障诊断算法。

然后，建立了基于简单规则（也可以称为“限值诊断”）的空调系统故障诊断方法，给出了各个设备诊断限值的计算原理和计算方法以及故障诊断的流程，并且列出了可以诊断的 14 种常见故障，基于规则的诊断比较粗略，适用于数据种类较少或者对空调系统运行节能要求不高的楼宇。

对于数据基础较好、节能要求较高的建筑，本文建立了基于模型的空调系统主要设备故障诊断方法，和一套理想空调系统模型，通过模拟能耗与实测能耗的比较来完成诊断。该理想空调系统模型具有很好的精度，不仅操作简单，而且具有适用性和通用性：1) 操作简单。该模型为编译好的模块化模型，不受系统形式和设备个数的限制，可以根据具体空调系统的情况，在模型界面中选择设备的形式和设备的个数，操作非常简单；2) 通用性强。该模型不像 Energyplus 等模拟软件那样针对每一栋建筑都需要建立一个新的模型，该模型完全不受建筑种类和形式的影响；3) 适用范围广。安装有分项计量系统的建筑都可以使用该模型。基于模型的故障诊断精度较高，通用性强，本文给出了 20 种常见故障的诊断方法和诊断流程。

最后，为基于分项计量的大型公建空调系统故障诊断算法案例分析，案例研究的对象建筑继续沿用本文第 3 章和第 4 章的研究中使用的 DMT 建筑。本章对 DMT 建筑空调系统的设备启停时间问题、空调系统主要设备部分负荷运行能效问题和造成各个设备运行能效低的因素进行了由浅入深地依次诊断。其中空调系统末端设备能耗拆分使用到了本文第 2 章介绍的傅里叶拆分算法，空调系统负荷获取运用了本文第 4 章介绍的 RC-S 估算模型，故障诊断的过程和结果分析是在本章上述小节的基础上完成的。再一次说明了在实际建筑中应用基于分项计量的大型公建空调系统故障诊断算法时，三个子算法（子算法①：

空调系统末端设备逐时能耗拆分算法；子算法②：空调系统逐时负荷估算算法和子算法③：空调系统逐时故障诊断算法）是一个有机的整体，缺一不可。

同济许鹏课题组

---

同济许鹏课题组

## 第6章 结论与展望

### 6.1 主要结论

本文以既有建筑的实测数据为基础,通过理论分析、数值模拟和数据挖掘等方法,进行了基于分项计量的公建空调系统夏季运行故障诊断算法的研究。本文提出的空调系统故障诊断算法相比于现有的空调系统故障诊断算法而言,有两个明显的优势:1)电耗的计量精度比温度、流量、压力等运行参数的计量精度高,且不容易发生漂移,数据质量稳定;2)我国的主要城市已经有大量的公共建筑安装了分项计量系统,该空调系统故障诊断算法可以直接在这些建筑中应用。本文建立的空调系统故障诊断算法由三个子算法组成:1)空调系统末端设备逐时能耗拆分算法,2)空调系统逐时负荷估算算法和3)空调系统逐时故障诊断算法。通过本文的研究可以得到以下结论:

1)使用以天为周期,以小时为变量的6次、11次和11次傅里叶模型,分别可以从办公建筑照明插座分项能耗、商场建筑照明插座分项能耗和商场建筑动力分项能耗中拆分出空调末端能耗。商业建筑受SH1的影响最大,办公建筑受CH1的影响最大,商业建筑照明插座分项和动力分项的能耗预测模型形式相同。所有模型在空调运行时间段内的拆分结果准确度较高,可以确保拆分结果的平均相对误差在10%以内,效果最好的达到了1%。对于分项能耗数据呈现平缓上升或者下降的情况,建议在模型中加入SD1、CD1、SD2、CD2四项,构成新的模型;而对于有能耗突然上升或下降的情况,则建议以用能特征变化点为界分段进行拆分。

2)使用逐时分项计量电耗数据通过傅里叶模型可以很好的完成实际建筑的建模和校验。按照不同的能耗分项和日类型分别进行计算,然后将计算后的能耗最大值作为基准值,其余时刻的能耗值与其比值作为同时使用系数,对模型进行设置。经过案例分析,该部分的校验精度非常好。对于人员的设置,则需要建筑的出入记录或者到现场进行人员进出调查。室外空气的设置包括渗透风和空调系统的新风,渗透风的设置可以在0.1~0.5次/小时的换气次数内选取,且该部分对模型的影响很小。并且校验好的模型可以用于计算空调系统逐时冷负荷。空调系统逐时冷负荷的校验结果为CV值和MRE值分别为13.40%和8.242%。

3)本文再一次验证了3R2C简化模型可以很好的描述外墙和屋面的传热特性。对建筑内部蓄热体的简化模型进行了三种方式的改进,并且使用实时的分项

计量数据对建筑内部照明和设备等的内部得热进行描述。优化结果比较理想，在实测数据组中效果最好的是模型 2，其估算结果的平均相对误差为 12.15%；而在模拟数据组中效果最好的则是模型 1，其估算结果的平均相对误差为 9.50%。无论是对于实测数据还是模拟数据，改进模型的负荷计算准确度都明显高于基准模型（模型 0）。实测数据的优化结果对辐射得热的分布敏感，对蓄热体的分类不敏感，而模拟数据的优化结果则对辐射得热的分布不敏感，对蓄热体的分类非常敏感。简单的 3R3C 并联模型可以对建筑内部蓄热体进行很好的描述，更加复杂的模型并没有表现出更好的估算效果。在实际应用中本文推荐使用模型 2。

4) 本文建立的基于规则的空调系统故障诊断方法，可以诊断出常见空调系统故障 14 种，通过案例分析，证明该方法简单有效，诊断结果理想。

5) 本文建立的基于模型的空调系统故障诊断方法，在基于规则的故障诊断基础上进行深入诊断，可以诊断出常见空调系统故障 20 种，通过案例分析，证明该方法在实际楼宇中具有很强的可操作性，诊断结果理想，具有较好的应用前景。

## 6.2 主要创新点

1) 本文首次将傅里叶模型应用于空调系统末端设备逐时能耗拆分领域，解决了从办公建筑照明插座分项能耗中拆分出空调系统末端设备能耗、从商场建筑照明插座分项能耗中拆分出空调系统末端设备能耗和从商场建筑动力分项能耗中拆分出空调系统末端设备能耗三个问题。通过上海市四栋实际建筑的验证，逐时平均相对误差都可以控制在 10% 以内，拆分效果最好的一栋建筑逐时平均相对误差只有 1%。

2) 本文构建的基于分项计量的空调系统故障诊断算法体系，包括基于规则和基于模型两个大的诊断分支，可以诊断空调系统常见故障 30 余种，并且根据现有大型公建的实际状况和分项计量的数据质量，明确了该故障诊断算法由三个子算法构成：1) 空调系统末端设备逐时能耗拆分算法，2) 空调系统逐时负荷估算算法和 3) 空调系统逐时故障诊断算法。

## 6.3 工作局限性

本文的研究虽然获得了一些积极的结论，但是依然存在一些不足：

1) 由于有空调末端独立计量的建筑只有四栋，而且全部位于上海市，所以对空调系统末端能耗拆分算法没有更多的验证。且本文经过研究发现商业建筑照

明插座分项和动力分项能耗拆分模型相同,但是由于办公建筑动力分项数据缺失,无法确定办公建筑照明插座分项能耗的预测模型是否也适用于动力分项。

2) 由于冷量计安装具有很大的客观障碍,作者所在科研团队经过多方面努力也只在一栋实际楼宇中安装了冷量计,所以本文的空调系统逐时负荷估算模型和故障诊断研究都是围绕这一栋楼宇开展的,没有更多的楼宇加以验证。

3) 由于空调系统末端设备能耗基本上无法实现直接计量,即使本文采用傅里叶模型可以拆分出空调系统末端设备能耗,该能耗也只是所有末端设备的能耗之和,而非单个末端的能耗,所以本文没有做到对空调系统末端设备的深入诊断,只是做了一些简单的启停和变频控制的诊断。

4) 因为装有冷量计量的建筑只有一栋,且该建筑冬季采暖热源为溴化锂机组,燃气数据无法获取,所以本文只对夏季运行的故障诊断进行了研究。

#### 6.4 工作展望

1) 希望在今后会有更多的楼宇和更多的实测数据,可以完成上述由于客观原因造成的工作不足。

2) 尝试更多研究方法,如使用小波变化法进行空调系统末端能耗拆分工作,比较其拆分结果与现有拆分结果。

3) 通过逆向思维的方式,从故障诊断的角度出发去指导分项计量电表和常用传感器的安装。

4) 将本文的研究进一步细化,开发成为具有实际应用价值的成品软件,为建筑节能事业贡献一份力量。

---

同济许鹏课题组

## 致谢

同济许鹏课题组

## 参考文献

- [1] IEA, Key World Energy Statistics 2012. 2012.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心, 中国建筑节能年度发展研究报告 2015. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 2010 Buildings Energy Data Book. US Department of Energy, 2010.
- [4] CBECS, Commercial Buildings Energy Consumption Survey. 2003.
- [5] EUROSTAT, Energy – yearly statistics 2008. 2010.
- [6] Council, EPA. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May, 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, 2010:13-15.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 关于印发国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测系统建设相关技术导则的通知. 建科[2008]114号, 2008.06.24.
- [8] 上海市人民政府, 市政府印发关于加快推进本市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测系统建设实施意见的通知 沪府发[2012]49号 2012.05.11.
- [9] Laustsen, Jens, Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. International Energy Agency (IEA), 2008.
- [10] United States Energy Information Administration, Annual Energy Review 2011. Washington, DC, USA, DOE/EIA – 0384 (2011) EIA, 2012.
- [11] 2011 Buildings energy data book. US Energy Efficiency and Renewable Energy Department Department of Energy, March 2012.
- [12] 王庆一, 中国建筑能耗统计和计算研究. 节能与环保, 2007,(8):9-10.
- [13] House JM, Kelly GE, An overview of building diagnostic. <http://poetlbl.gov/diag-workshop/proceedings>, 1999.
- [14] Liu M, Song L, Claridge D, al. e, Development of whole building fault detection methods. <http://buildings.lbl.gov/hpcbs/pubs/E5P23T1cpdf>, 2002.
- [15] Hart GW, Nonintrusive appliance load monitoring. Proceedings of the IEEE, 1992, Vol. 80(12):1870-1891.
- [16] California T.B.O.A.M.A.O, Guide to the implementation of tenant submetering and billing for commercial buildings in Northern California. 2008.
- [17] ENERGY.GOV, Federal and Industry Partners Issue Challenge to Manufacturers. <http://energy.gov/articles/federal-and-industry-partners-issue-challenge-manufacturers>, 2013.
- [18] 中华人民共和国财政部, 财政部关于印发《国家机关办公建筑和大型公共建筑节能专项资金管理暂行办法》的通知. 财教[2007]558号, 2007.10.24.
- [19] 王君若, 分项计量系统对上海地区大型公共建筑能耗案例分析. 新型建筑材料, 2010, Vol. 37(11):48-50.
- [20] 张辉, 魏庆芑, 李一力, 王鑫, 大型公共建筑用电分项计量系统研究与进展(1):系统构架. 暖通空调, 2010, Vol. 40(8):10-13.
- [21] 王鑫, 魏庆芑, 沈启, 张辉, 大型公共建筑用电分项计量系统研究与进展(2):统一的能

- 耗分类模型与方法. 暖通空调, 2010, Vol. 40(8):14-17.
- [22] 上海市城乡建设和管理委员会, 上海市发展和改革委员会, 2014 年度国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测平台能耗监测情况报告. 2015.04.
- [23] Schein J, Bushby ST, Castro NS, House JM, A rule-based fault detection method for air handling units. *Energy and Buildings*, 2006, Vol. 38(12):1485-1492.
- [24] US Department of Energy, Energy information Administration. *Monthly Energy Review*. DOE/EIA 0035(99/05), Washington, DC, May. 1999.
- [25] Mills E, Building commissioning: a golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions in the United States. *Energy Efficiency*, 2011, Vol. 4(4):145-173.
- [26] Wang S, A system-level fault detection and diagnosis strategy for HVAC systems involving sensor faults. *Energy and Buildings*. 2010, Vol. 42(4):477-490.
- [27] 清华大学建筑节能研究中心, 大型公建节能"新政"(之八)大型公建用电分项计量与实时分析系统. *建设科技*, 2007,(18):24-27.
- [28] 陈海波, 王凡, 基于能耗分项计量数据的大型公建节能诊断及典型案例. *建筑科学*, 2011, Vol. 27(4).
- [29] Catalina T, Virgone J, Blanco E, Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings*, 2008, Vol. 40(10):1825-1832.
- [30] Ghiaus C, Experimental estimation of building energy performance by robust regression. *Energy and Buildings*, 2006, Vol. 38(6):582-587.
- [31] 黄永红. 基于递阶结构的变风量空调系统故障检测与诊断研究[博士学位论文]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007.
- [32] Xie G, Xue D, Xi S, TREE-EXPERT: a tree-based expert system for fault tree construction. *Reliability Engineering and System Safety*, 1993, Vol. 40(3):295-309.
- [33] 周东华, 现代故障诊断与容错控制[图书]. 京: 清华大学出版社, 2000.
- [34] Beard RV. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. Report MVT-71-1, Man Vehicle Lab, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- [35] Patton RJ, Chen J, Review of Parity Space Approaches to Fault Diagnosis for Aerospace System. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1994, Vol. 17(2):278-85.
- [36] Maurer DE. Man machine interface for a failure diagnosis expert system. *Technical Papers of IEA Annex 25*, 1996.
- [37] Katipamula S, Brambley MR, Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I. *HVAC & R Research*, 2005, Vol. 11(1):3-25.
- [38] Wagner J, Shoureshi R, Failure Detection Diagnostics for Thermofluid Systems. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1992, Vol. 114(4):699-706.
- [39] Haves P, Salsbury TI, Wright JA, Condition monitoring in HVAC subsystems using first principles models. *ASHRAE Transactions*, 1996, Vol. 102(1).
- [40] Salsbury TI, Diamond RC, Fault detection in HVAC systems using model-based feedforward control. *Energy and Buildings*, 2001, Vol. 33(4):403-415.

- 
- [41] Norford LK, Wright JA, Buswell RA, Luo D, Suby CJK, A., Demonstration of fault detection and diagnosis methods for air-handling units (ASHRAE 1020-RP). HVAC & R Research, 2002, Vol. 8(1):41-71.
- [42] Castro NS, Remington G, Performance evaluation of a reciprocating chiller using experimental data and model predictions for fault detection and diagnosis. ASHRAE Transactions, 2002, Vol. 108:889-903.
- [43] Kaldorf S, Gruber P, Practical experiences from developing and implementing an expert system diagnostic tool. 2002, Vol. 108(1):826-840.
- [44] Katipamula S, Pratt RG, Chassin DP, Taylor TZ, Gowri K, Brambley MR, Automated fault detection and diagnostics for outdoor-air ventilation systems and economizers: Methodology and results from field testing. ASHRAE Transactions Symposium, 1999, Vol. 295-296(1):555-567.
- [45] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri SN, A review of process fault detection and diagnosis : Part II: Qualitative models and search strategies. Computers and Chemical Engineering, 2003, Vol. 27(3):313-326.
- [46] Norford LK, Little RD, Fault Detection and Load Monitoring in Ventilation Systems. ASHRAE Transactions, 1993, Vol. 99.
- [47] Rossi TM, Detection, diagnosis, and evaluation of faults in vapor compression cycle equipment [Ph.D thesis]. School of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, Indiana, 1995.
- [48] Rossi TM, Braun JE, A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. International Journal of Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigerating Research, 1997, Vol. 3(1):19-37.
- [49] Lee WY, Park G, Kelly GE, Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods. ASHRAE Transactions, 1996, Vol. 102(2):528-539.
- [50] Peitsman HC, Bakker VE, Application of BlackBox Models to HVAC Systems for Fault Detection. ASHRAE Transactions, 1996, Vol. 102(1):628-640.
- [51] Breuker MS, Braun JE, Evaluating the performance of a fault detection and diagnostic system for vapor compression equipment. HVAC & R Research, 1999, Vol. 4(4):401-425.
- [52] Gordon JM, Ng KC, A general thermodynamic model for absorption chillers: Theory and experiment. Geological Society of America Bulletin, 1969, Vol. 80(1):73-83.
- [53] Gordon JM, Kim CN, Hui TC, Centrifugal chillers: Thermodynamic modelling and a diagnostic case study. International Journal of Refrigeration, 1995, Vol. 18(95):253-257.
- [54] Gordon JM, Ng KC, Predictive and diagnostic aspects of a universal thermodynamic model for chillers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, Vol. 38(5):807-818.
- [55] Gordon JM, Ng KC, Chua HT, Optimizing chiller operation based on finite-time thermodynamics: universal modeling and experimental confirmation. International Journal of Refrigeration, 1997, Vol. 20(96):191-200.
- [56] Gordon JM, Ng KC, Chua HT, Lim CK, How varying condenser coolant flow rate affects

- chiller performance: thermodynamic modeling and experimental confirmation. *Applied Thermal Engineering*, 2000, Vol. 20(13):1149-1159.
- [57] Braun JE, Comstock MC, Development of Analysis Tools for the Evaluation of Fault Detection and Diagnostics for Chillers. ASHRAE Research Project Report 1043-RP, 1999.
- [58] Braun JE, Singhal A, Seem JE, Evaluation and Assessment of Fault Detection And Diagnostic Methods for Centrifugal Chillers- Phase II. ASHRAE Research Project Report, 1275- RP, 2006.
- [59] Li H, Zhao X, Fault Detection and Diagnostics for Centrifugal Chillers-Phase III: Online Implementation. ASHRAE Research Project Report 1486- RP, 2011.
- [60] Wen J, Li S, Tools for Evaluating Fault Detection and Diagnostic Methods for Air-Handling Units. ASHRAE Research Project Report 1312- RP, 2011.
- [61] McKellar MG, Failure diagnosis for a household refrigerator [Master's thesis]. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1987.
- [62] Stallard LA, Model based expert system for failure detection and identification of household refrigerators [Master's thesis]. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1989.
- [63] Yoshimura M, Ito N, editors. Effective diagnosis methods for air-conditioning equipment in telecommunications buildings. *Telecommunications Energy Conference*, 1989 INTELEC '89 Conference Proceedings, Eleventh International; 1989.
- [64] Rossi TM, Braun JE, Minimizing Operating Costs of Vapor Compression Equipment with Optimal Service Scheduling. *HVAC & R Research*, 1996, Vol. 2(1):3-25.
- [65] Braun JE, A Statistical, Rule-Based Fault Detection and Diagnostic Method for Vapor Compression Air Conditioners. *HVAC & R Research*, 1997, Vol. 3(3):19-37.
- [66] Breuker MS, Evaluation of statistical, rule-based fault detection and diagnostic's method for vapor compression air conditioners [Master's thesis]. Master's thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, Indiana, 1997.
- [67] 李志生, 张国强, 刘建龙. 暖通空调系统故障检测与诊断研究进展. *暖通空调*. 2005, 35(12): 31-38.
- [68] Miyasaka T, Yamasaki T, Yumoto M, Ohkawa T, Komoda N, editors. Real-time simulation for fault detection and diagnosis using stochastic qualitative reasoning. *Emerging Technologies and Factory Automation*, 2001 Proceedings 2001 8th IEEE International Conference on; 1999.
- [69] Salsbury TI, A Temperature Controller for VAV Air-Handling Units Based on Simplified Physical Models. *HVAC & R Research*, 1998, Vol. 4(3):265-279.
- [70] Comstock MC, Braun JE, Groll EA, The Sensitivity of Chiller Performance to Common Faults. *HVAC & R Research*, 2001, Vol. 7(3):263-279.
- [71] Braun JE, Methodologies for the Design and Control of Central Cooling Plants [Dissertation]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1988,:45-46.
- [72] Stylianou M, Nikanpour D, Performance Monitoring, Fault Detection, and Diagnosis of Reciprocating Chillers. *ASHRAE Transactions*, 1996, Vol. 73(13):615-627.

- 
- [73] Tantsui H, Ksmimm K, Chiller Condition monitoring Using Topological Case-based Modeling. ASHRAE Tram, 1996, Vol. 102(1):641-650.
- [74] Visier JC, Vaezi-Nejad H, A fault detection tool for school buildings. ASHRAE Tram, 1999, Vol. 105(1):543-554.
- [75] Wang S, Wang J, Burnett J, Mechanistic model of centrifugal chillers for HVAC system dynamics simulation. Building Service Engineering, 2000, Vol. 21(2):73-83.
- [76] Zhao Y, Wang S, Xiao F, A statistical fault detection and diagnosis method for centrifugal chillers based on exponentially-weighted moving average control charts and support vector regression. Applied Thermal Engineering, 2013, Vol. 51(s 1–2):560-572.
- [77] Howell J, Maddison EJ, Fault detection in HVAC plants based on constraint suspension. Zeitschrift Für Die Gesamte Hygiene Und Ihre Grenzgebiete, 1989, Vol. 35(5):264-266.
- [78] Yoshida H, Iwami T, Yuzawa H, Susuki M, Typical Faults of Air Conditioning Systems and Fault Detection by ARX Model and Extended Kalman Filt. ASHRAE Transactions, 1996, Vol. 102(1).
- [79] Dodier RH, Curtiss PS, Kreider JF, Small-scale on-line diagnosis for an HVAC system. 1998, Vol. 104(1A):530-539.
- [80] Jiang Y, Zhu W, Fault direction space method for fault detection and diagnosis in HVAC systems. Journal of Tsinghua University, 1999.
- [81] Brambley MR, Pratt RG, Chassin DR, Kapuramula S, Hatley DD, Diagnostics for Outdoor Air Ventilation and Economizers. ASHRAE Journal, 1998, Vol. 40(10).
- [82] Dexter AL, Pakanen J, Agency IE, Demonstrating automated fault detection and diagnosis methods in real buldings: Technical Research Centre of Finland; 2001.
- [83] Shaw SR, Norford LK, Luo DD, Leeb SB, Detection and Diagnosis of HVAC Faults via Electrical Load Monitoring. HVAC & R Research, 2002, Vol. 8(1):13-40.
- [84] House JM, Vaezi-Nejad H, Whitcomb JM, An Expert Rule Set for Fault Detection in Air-Handling Units. ASHRAE Transactions, 2001, Vol. 107(1):858-871.
- [85] Li S, Wen J, Zhou X, Klaassen CJ, Development and Validation of a Dynamic Air Handling Unit Model, Part I. ASHRAE Transactions, 2010, Vol. 116:57-73.
- [86] Li S, Wen J, Zhou X, Klaassen CJ, Development and Validation of a Dynamic Air Handling Unit Model, Part II. ASHRAE Transactions, 2010, Vol. 116:74-90.
- [87] Kumara S, Sinhaa S, Kojima T, Yoshidab H, Development of parameter based fault detection and diagnosis technique for energy efficient building management system. Energy Conversion and Management, 2001, Vol. 42(7):833-854.
- [88] Qin J, Wang S, A fault detection and diagnosis strategy of VAV air-conditioning systems for improved energy and control performances. Energy and Buildings, 2005, Vol. 37(10):1035-48.
- [89] 张鹏, 石来德, 基于 ARX 模型的变风量空调系统故障诊断. 同济大学学报:自然科学版, 2000, Vol. 28(6):679-683.
- [90] 陈友明, 郝小礼, 建筑能源管理与控制系统中传感器故障及其检测与诊断. 暖通空调, 2004, Vol. 34(2):83-88.

- [91] 陈友明, 自动故障检测与诊断在暖通空调中的研究与应用. 暖通空调, 2004, Vol. 34(3):29-33.
- [92] 晋欣桥, 杜志敏, 肖晓坤, 惠广海, 李晓锋, 冷水机组系统的温度传感器故障诊断. 上海交通大学学报, 2004, Vol. 38(6):976-981.
- [93] Wang S, Xiao F, Detection and diagnosis of AHU sensor faults using principal component analysis method. *Energy Conversion and Management*, 2004, Vol. 45(17):2667-2686.
- [94] Wang S, Xiao F, AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method. *Energy and Buildings*, 2004, Vol. 36(2):147-160.
- [95] Wang S, Cui J, Sensor-fault detection, diagnosis and estimation for centrifugal chiller systems using principal-component analysis method. *Applied Energy*, 2005, Vol. 82(3):197-213.
- [96] Yang H, Cho S, Tae CS, Zaheeruddin M, Sequential rule based algorithms for temperature sensor fault detection in air handling units. *Energy Conversion and Management*, 2008, Vol. 49(8):2291-2306.
- [97] Du Z, Fan B, Jin X, Chi J, Fault detection and diagnosis for buildings and HVAC systems using combined neural networks and subtractive clustering analysis. *Building and Environment*, 2014, Vol. 73(3):1-11.
- [98] Isermann IHCR. *Fault detection of heat exchangers*: Springer Berlin Heidelberg; 2011. 259-281.
- [99] Upadhyayaa BR, Eryurekb E. *Degradation Monitoring of Industrial Heat Exchangers*: Springer London; 2006. 504-512.
- [100] Khan JUR, Zubair SM, A study of fouling and its effects on the performance of counter flow wet cooling towers. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering 1989-1996*, 2004, Vol. 218(218):43-51.
- [101] Lu L, Cai W, Chai YS, Xie L, Global optimization for overall HVAC systems—Part I problem formulation and analysis. *Energy Conversion and Management*, 2005, Vol. 46(7-8):999-1014.
- [102] Lu L, Cai W, Chai YS, Xie L, Global optimization for overall HVAC systems—Part II problem solution and simulations. *Energy Conversion and Management*, 2005, Vol. 46(7-8):1015-1028.
- [103] Seem JE, Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings. *Energy and Buildings*, 2007, Vol. 39(1):52-58.
- [104] European Standard EN 14825, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling—testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. 2012.
- [105] Schibuola L, Scarpa M, On-field validation of a seasonal performance calculation method for chillers in buildings. *Energy Conversion and Management*, 2014, Vol. 85(9):62-69.
- [106] Kusiak A, Zhang Z, Xu G, Minimization of energy consumption in HVAC systems with data-driven models and an interior-point method. *Energy Conversion and Management*, 2014, Vol. 85(9):146-153.

- 
- [107] Zheng ON, Pang X, Shashanka M, Haves P, Bailey T, Model-based real-time whole building energy performance monitoring and diagnostics. *Journal of Building Performance Simulation*, 2013, Vol. 7(2):83-99.
- [108] Du Z, Jin X, Yang Y, Fault diagnosis for temperature, flow rate and pressure sensors in VAV systems using wavelet neural network. *Applied Energy*, 2009, Vol. 86(9):1624-1631.
- [109] Wu S, Sun JQ, A top-down strategy with temporal and spatial partition for fault detection and diagnosis of building HVAC systems. *Energy and Buildings*, 2011, Vol. 43(9):2134-2139.
- [110] Wu S, Sun JQ, Cross-level fault detection and diagnosis of building HVAC systems. *Building and Environment*, 2011, Vol. 46(8):1558-1566.
- [111] Magoulès F, Zhao HX, Elizondo D, Development of an RDP neural network for building energy consumption fault detection and diagnosis. *Energy and Buildings*, 2013, Vol. 62(8):133-138.
- [112] Wang L, Greenberg S, Fiegel J, Rubalcava A, Earni S, Pang X, et al., Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency. *Applied Energy*, 2013, Vol. 102(2):1382-1390.
- [113] Fu X, Cheng F, Data mining in building automation system for improving building operational performance. *Energy and Buildings*, 2014, Vol. 75(11):109-18.
- [114] Yan C, Wang S, Xiao F, A simplified energy performance assessment method for existing buildings based on energy bill disaggregation. *Energy and Buildings*, 2012, Vol. 55(10):563-574.
- [115] Yan C, Wang S, Xiao F, Gao DC, A multi-level energy performance diagnosis method for energy information poor buildings. *Energy*, 2015, Vol. 83:189-203.
- [116] Akbari H, Validation of an algorithm to disaggregate whole-building hourly electrical load into end uses. *Energy*, 1995, Vol. 20(12):1291-1301.
- [117] 王鑫, 公共建筑用能分项计量 综合关键技术研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2010.
- [118] 李俊, 基于分项计量系统的建筑能耗拆分与节能潜力分析研究[硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学城市环境与工程学院, 2008.
- [119] 王远, 大型公共建筑用电分项计量方法研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2008.
- [120] 熊玮玮, 席自强, 王莎, 黄文聪, 校园某实验楼电能分项计量系统研究. *湖北工业大学学报*, 2011, Vol. 26(1):97-100.
- [121] 李宝树, 葛玉敏, 刘川川, 新型电能分项计量系统. *电测与仪表*, 2011, Vol. 48(4):63-65.
- [122] Akbari H, Heinemeier K, Le CP, Flora D, An Algorithm to Disaggregate Commercial Whole-Building Electric Hourly Load into End Uses. *Proc of ACEEE 1988 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 1988, Vol. 10:13-26.
- [123] Akbari H, Eto J, Konopacki S, Afzal A, Rainer L, Heinemeier K, Integrated Estimation of Commercial Sector End-Use Load Shapes and Energy Use Intensities in the PG&E Service Area. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-34263, Berkeley, CA, 1993a.

- [124] Akbari H, Rainer L, Heinemeier K, Huang J, Franconi E, Measured Commercial Load Shapes and Energy-use Intensities and Validation of the LBL End-use Disaggregation Algorithm. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-32193, Berkeley, CA, 1993b.
- [125] Akbari H, Konopacki S, End-use Energy Characterization and Conservation Potentials at DoD Facilities: An Analysis of Electricity Use at Fort Hood, Texas. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-36974, Berkeley, CA, 1995b.
- [126] Akbari H, Konopacki SJ, Application of an End-Use Disaggregation Algorithm for Obtaining Building Energy-Use Data. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 1998, Vol. 120(3):205-210.
- [127] Marceau ML, Zmeureanu R, Nonintrusive load disaggregation computer program to estimate the energy consumption of major end uses in residential buildings. *Energy Conversion and Management*, 2000, Vol. 41(13):1389-1403.
- [128] Laughman C, Lee K, Cox R, Shaw S, Leeb S, Norford L, et al., Power signature analysis. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2003, Vol. 1(2):56-63.
- [129] Pihala H, Non-intrusive Appliance Load Monitoring System Based on a Modern kWh-Meter. Espoo: VTT Publications 356, 1998.
- [130] Murata H, Onoda T, editors. Estimation of power consumption for household electric appliances. *Neural Information Processing, 2002 ICONIP '02 Proceedings of the 9th International Conference on*; 2002.
- [131] Norford LK, Leeb SB, Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms. *Energy and Buildings*, 1996, Vol. 24(1):51-64.
- [132] Norford LK, Mabey N, Non-Intrusive Electric Load Monitoring in Commercial Buildings. *Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, 1992.
- [133] Steven BL, A conjoint pattern recognition approach to nonintrusive load monitoring. Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [134] Baranski M, Voss J, editors. Genetic algorithm for pattern detection in NIALM systems. *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*; 2004.
- [135] Magnier L, Haghghat F, Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 2010, Vol. 45(3):739-746.
- [136] Zhang J, Haghghat F, Development of Artificial Neural Network based heat convection algorithm for thermal simulation of large rectangular cross-sectional area Earth-to-Air Heat Exchangers. *Energy and Buildings*, 2010, Vol. 42(4):435-440.
- [137] Ekici BB, Aksoy UT, Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software*, 2009, Vol. 40(5):356-362.
- [138] Ben-Nakhi AE, Mahmoud MA, Cooling load prediction for buildings using general regression neural networks. *Energy Conversion and Management*, 2004, Vol. 45(13):2127-2141.

- 
- [139] Zhou YP, Wu JY, Wang RZ, Shiochi S, Li YM, Simulation and experimental validation of the variable-refrigerant-volume (VRV) air-conditioning system in EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 1997, Vol. 30(3):117-128.
- [140] Al-Ajmi FF, Hanby VI, Simulation of energy consumption for Kuwaiti domestic buildings. *Energy and Buildings*, 2008, Vol. 40(6):1101-1109.
- [141] Wehenkel L, Pavella M, Decision tree approach to power systems security assessment. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1993, Vol. 15(1):13-36.
- [142] Tung KY, Huang IC, Chen SL, Shih CT, Mining the Generation Xers' job attitudes by artificial neural network and decision tree—empirical evidence in Taiwan. *Expert Systems with Applications An International Journal*, 2005, Vol. 29(4):783-794.
- [143] Yu Z, Haghghat F, Fung BCM, Yoshino H, A decision tree method for building energy demand modeling. *Energy and Buildings*, 2010, Vol. 42(10):1637-46.
- [144] Pandit SM, Wu SM, *Time Series and System Analysis with Applications*. John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [145] Seem JE, Braun JE, Adaptive methods for real-time forecasting of building electrical demand. *ASHRAE Transactions*, 1991, Vol. 97.
- [146] Claridge DE, Haberl JS, Turner D, O'Neal DL, Heffington WM, Tombari C, et al., Improving energy conservation retrofits with measured savings. *ASHRAE Journal (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)*; (United States), 1991, Vol. 33:10(10):14.
- [147] Dhar A, Reddy TA, Claridge DE, Modeling Hourly Energy Use in Commercial Buildings With Fourier Series Functional Forms. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1998, Vol. 120(3):217-223.
- [148] Dhar A, Reddy TA, Claridge DE, A Fourier series model to predict hourly heating and cooling energy use in commercial buildings with outdoor temperature as the only weather variable. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1999, Vol. 121(1):47-53.
- [149] Dhar A, Reddy TA, Claridge DE, Generalization of the Fourier series approach to model hourly energy use in commercial buildings. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1999, Vol. 121(1):54-62.
- [150] *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA. 2001.
- [151] Karlsson F, Rohdin P, Persson ML, Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using building energy simulation. *Building Service Engineering Research and Technology*, 2007, Vol. 228(3):223-35.
- [152] Turner C, *Energy Performance of LEED for New Construction Buildings*. New Buildings Institute Green Buildings Council, 2008, Vol.
- [153] Scofield JH, Do LEED-certified buildings save energy? Not really.... *Energy and Buildings*, 2009, Vol. 41(12):1386-1390.
- [154] Coakley D, Raftery P, Keane M, A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol.

- 37(3):123-141.
- [155] Knebel DE, Simplified Energy Analysis Using the Modified Bin Method. BOOK by ASHRAE, Atlanta, GA, 1983.
- [156] Winkelmann F, Birdsall B, Buhl W, DOE-2 supplement: version 2.1 e. LBL-34947. Berkeley: Calif Lawrence Berkeley Lab, 1993.
- [157] USDE, EnergyPlus testing and validation, Department Energy, USA, [accessed 06.12.09]. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>, 2009a.
- [158] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Pedersen CO, editors. EnergyPlus: New Capabilities in a Whole-Building Energy Simulation Program. Building Simulation; 2001.
- [159] Solar Energy Laboratory, TRNSYS version 17.02 user manual and documentation, solar energy laboratory, mechanical engineering department, Madison, WI: University of Wisconsin, May 2014.
- [160] ESRU, ESP-r. [accessed 05.12.09.]. <http://www.esrustrath.ac.uk/>
- [161] Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, 2008, Vol. 43(4):661-673.
- [162] Hensen JLM, Lamberts R, Building Performance Simulation for Design and Operation [M]. Published by Spon Press, 2011.
- [163] Federspiel C, Zhang Q, Arens E, Model-based benchmarking with application to laboratory buildings. Energy and Buildings, 2002, Vol. 34(3):203-214.
- [164] Park CS, Quantification methods of technical building performance. Building Research and Information, 2005, Vol. volume 33(2):159-172.
- [165] Mui KW, Wong LT, Law LY, An energy benchmarking model for ventilation systems of air-conditioned offices in subtropical climates. Applied Energy, 2007, Vol. 84(1):89-98.
- [166] Heo Y, Choudhary R, Augenbroe GA, Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. Energy and Buildings, 2012, Vol. 47(4):550-560.
- [167] Raftery P, Keane M, O'Donnell J, Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. Energy and Buildings, 2011, Vol. 43(9):2356-2364.
- [168] Papalexopoulos AD, Hesterberg TC, A regression-based approach to short-term system load forecasting. Power Systems IEEE Transactions on, 1990, Vol. 5(4):414 - 423.
- [169] Yiu CM, Wang S, Multiple ARMAX modeling scheme for forecasting air conditioning system performance. Energy Conversion and Management, 2007, Vol. 48(8):2276-2285.
- [170] Jacob D, Dietz S, Komhard S, Neumann C, Herkel S, Black-box models for fault detection and performance monitoring of buildings. Journal of Building Performance Simulation, 2010, Vol. 3(3):53-62.
- [171] Li Z, Huang G, Re-evaluation of building cooling load prediction models for use in humid subtropical area. Energy & Buildings, 2013, Vol. 62(3):442-449.
- [172] nsari FA, Mokhtar AS, Abbas KA, Adam NM, A simple approach for building cooling load estimation. American Journal of Environmental Sciences, 2005, Vol. 1(3):209-212.
- [173] Dong B, Cao C, Lee SE, Applying support vector machines to predict building energy

- 
- consumption in tropical region. *Energy and Buildings*, 2005, Vol. 37(5):545-553.
- [174] Xuemei L, Jin-Hu L, Lixing D, Gang X, Jibin L, editors. *Building Cooling Load Forecasting Model Based on LS-SVM*. Information Processing, 2009 APCIP 2009 Asia-Pacific Conference on information processing, Shenzhen, China; 2009.
- [175] Li Q, Meng Q, Cai J, Yoshino H, Mochida A, Applying support vector machine to predict hourly cooling load in the building. *Applied Energy*, 2009, Vol. 86(10):2249-2256.
- [176] Li Q, Meng Q, Cai J, Yoshino H, Mochida A, Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and different artificial neural networks. *Energy Conversion and Management*, 2009, Vol. 50(1):90-96.
- [177] Braun JE, Chaturvedi N, An Inverse Gray-Box Model for Transient Building Load Prediction. *HVAC & R Research*, 2002, Vol. 8(1):73-99.
- [178] Kreider JF, Rabl A, Curtiss P, *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency, Taha, Hamdy Operation Research*, 1994.
- [179] Mitchell M, *An Introduction to Genetic Algorithm*. MIT Press, Cambridge, MA, 1997.
- [180] Thede SM, An introduction to genetic algorithms. *Cambridge*, 2004, Vol. 20(1):325-36.
- [181] Seem JE, Beckman WA, Klein SA, Mitchell JW, Transfer functions for efficient calculation of multidimensional transient heat transfer. *Journal of Heat Transfer*, 1989, Vol. 111(1):5-12.
- [182] Ciampi M, Leccese F, Tuoni G, Multi-layered walls design to optimize building-plant interaction. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, Vol. 43(4):417-429.
- [183] Xu X, Wang S, A simplified dynamic model for existing buildings using CTF and thermal network models. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, Vol. 47(9):1249-1262.
- [184] Xu X, Wang S, Optimal simplified thermal models of building envelope based on frequency domain regression using genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 2007, Vol. 39(5):525-536.
- [185] Wang S, Xu X, Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 2006, Vol. 47(13-14):1927-1941.
- [186] Wang S, Xu X, Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. *International Journal of Thermal Sciences*, 2006, Vol. 45(4):419-432.
- [187] Pedrini A, Westphal FS, Lamberts R, A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. *Building and Environment*, 2002, Vol. 37(8-9):903-912.
- [188] Antonopoulos KA, Koronaki E, Envelope and indoor thermal capacitance of buildings. *Applied Thermal Engineering*, 1999, Vol. 19(7):743-756.
- [189] 周军莉. 建筑蓄热与自然通风耦合作用下室内温度计算及影响因素分析[博士学位论文]: 长沙: 湖南大学; 2009.
- [190] *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA. 2005.
- [191] Emmerich SJ, A.K. P, Energy impacts of infiltration and ventilation in US office buildings using multizone airflow simulation. *Proceedings of IAQ and Energy*, 1998, Vol. 98: 191-206.
- [192] Ng LC, Persily AK, Emmerich SJ, Improving infiltration modeling in commercial building

- energy models. *Energy and Buildings*, 2015, Vol. 88:316-323.
- [193] Kusuda T, Thermal response factors for multilayer structures of various heat conduction systems. *ASHRAE Transaction*, 1969, Vol. 75:246-271.
- [194] Ouyang K, State Space Method — A New Method for Calculating Thermal Response Factors of Multilayer Walls. *Building Science*, 1989.
- [195] Ouyang K, Haghghat F, A procedure for calculating thermal response factors of multi-layer walls—State space method. *Building and Environment*, 1991, Vol. 26(2):173-177.
- [196] Chen Y, Wang S, Zuo Z, A procedure for calculating transient thermal load through multilayer cylindrical structures. *Applied Thermal Engineering*, 2003, Vol. 23(23):2133-2145.
- [197] Chen Y, Wang S, A new procedure for calculating periodic response factors based on frequency domain regression method. *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, Vol. 44(4):382-392.
- [198] Li XQ, Chen Y, Spitler JD, Fisher D, Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, Vol. 48(7):1441-1451.
- [199] Chen Y, Chen Z, A neural-network-based experimental technique for determining z-transfer function coefficients of a building envelope. *Building and Environment*, 2000, Vol. 35(3):181-189.
- [200] Wang S, Chen Y, A novel and simple building load calculation model for building and system dynamic simulation. *Applied Thermal Engineering*, 2001, Vol. 21(6):683-702.
- [201] 遗传算法. 百度百科. <http://baike.baidu.com/item/遗传算法/838140>.
- [202] 空气调节系统经济运行. GBT 17981-2007. 2007.
- [203] U.S. Department of Energy. EnergyPlus Engineering Reference-The Reference to EnergyPlus Calculations. October 1, 2013.

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

2012年3月-2017年3月	供热、供燃气、通风及空调工程专业	攻读博士学位
2016年9月-2017年2月	香港城市大学	助理研究员
2013年9月-2014年4月	美国德雷克赛尔大学	访问学者
2012年3月申请提前攻博	供热、供燃气、通风及空调工程专业	攻读博士学位
2010年9月保送入同济大学	供热、供燃气、通风及空调工程专业	攻读硕士学位
2010年6月毕业于湖南大学	建筑环境与设备工程专业	获学士学位

### 已发表论文:

#### SCI 论文:

- [1] **Ying Ji**, Peng Xu, Pengfei Duan, Xing Lu. Estimating hourly cooling load in commercial buildings using a thermal network model and electricity submetering data. *Applied Energy*. 2016, Vol.169 (5): 309–323. (SCI: 000374196200026)
- [2] **Ying Ji**, Peng Xu, Yunyang Ye, Xing Lu, Jiachen Mao. Energy Load Superposition and Spatial Optimization in Urban Design: a Case Study. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016, Vol.57 (5): 26–35. (SSCI: 000374360600003)
- [3] **Ying Ji**, Peng Xu. A bottom-up and procedural calibration method for building energy simulation models based on hourly electricity submetering data. *Energy*. 2015, Vol.93(12): 2337–2350. (SCI:000367409500101)
- [4] **Ying Ji**, Peng Xu, Yunyang Ye. HVAC terminal hourly end-use disaggregation in commercial buildings with Fourier series model. *Energy and Buildings*. 2015, Vol.97(6): 33–46. (SCI:000357222500005)
- [5] Yunyang Ye, Peng Xu, Jiachen Mao, **Ying Ji**. Experimental Study on the Effectiveness of Internal Shading Devices. *Energy and Buildings*. 2016, Vol.111(1): 154–163. (SCI:000369191100014)
- [6] Peng Xu, Yang Shen, Lu Chen, Jiachen Mao, Eric Chang, **Ying Ji**. Assessment of energy-saving technologies retrofitted to existing public buildings in China. *Energy Efficiency*, 2016, Vol. 9(1): 67–94. (SCI:000368993200004)

#### EI 论文:

- [7] **Ying Ji**, Peng Xu. Model Based Indirect Submetering method of HVAC End-use in Existing Office Building. *Procedia Engineering*. 121(2015)1705-1712. The 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE). Tianjin. 2015.07.

(EI:20150700519818)

- [8] Peng Xu, **Ying Ji**. Load Superposition and Shifting Method with Simulation tools for Energy Planning and the Case Analysis. Energy Procedia. 61(2014)730–734. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014. Taipei.2014.05. (EI:20160701939796)

#### 其他论文:

- [9] 许鹏, **姬颖**. 风道气密性国内外标准综述及对比分析. 建筑节能. 2014(8): 82–85.
- [10] **姬颖**, 许鹏. 公共建筑间接能耗分项计量方法综述. 建筑节能. 2013(10): 54–57.
- [11] **姬颖**, 许鹏. 典型建筑在不同外遮阳形式下的节能率分析. 建筑节能. 2013(9): 26–29.
- [12] Bin Chen, **Ying Ji**, Peng Xu. Impact of Window Shading Devices on Energy Performance of Prototypical Buildings. ASim2012, the 1st IBPSA Asia Conference. Shanghai. 2012, 11.
- [13] Xin Xu, Dengkuo Yuan, Huajing Sha, **Ying Ji**, Peng Xu. Energy consumption simulation of the prototypical building for optimizing the orientation of building model in the simulated environment. ASim2012, the 1st IBPSA Asia Conference. Shanghai. 2012, 11.
- [14] Xiaofen Xu, Liang Zhang, Huajing Sha, **Ying Ji**, Peng Xu. Establishment of Typical Building Models in Each Climate Regions in China and Research of Adaptability of Energy Saving. ASim2012, the 1st IBPSA Asia Conference. Shanghai, 2012, 11.

#### 待发表论文:

##### SCI 论文:

- [1] **Ying Ji**, Fan Feng, Peng Xu. Diagnosing HVAC system performance in commercial buildings through electricity submeters: A Quantitative Framework. Applied Energy. (Under review)
- [2] **Ying Ji**, Peng Xu. Review of electricity submetering system in China: current status, applications and future developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (Preparing)

##### EI 论文:

- [3] **Ying Ji**, Peng Xu. A performance assessment method for main HVAC equipment with electricity submetering data. The 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC). Jinan. 2017.10.

#### 专利:

- [1] 许鹏, **姬颖**, 侯瑾, 鲁星, 王慧龙. 一种公共建筑空调系统末端设备电耗间接计量系统. 发明专利. 2015.07.01. (公布号: CN 10479431 A)
- [2] 许鹏, 陈永保, 吴云涛, 李为林, 褚祎祎, 王慧龙, **姬颖**, 侯瑾, 秦琪伟. 一种组合式相

---

变蓄冷装置及采用该蓄冷装置的空调系统. 发明专利. 2016.12.07. (公布号: CN 10697115 A)

**参加主要学术会议:**

- [1] 2016年8月: Sino - EU Engineering Education Platform High Level Summer School. 皇家理工学院. 斯德哥尔摩. 瑞典. 埃因霍温理工学院. 埃因霍温. 荷兰.
- [2] 2015年7月: The 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE). 天津大学. 天津, 中国.
- [3] 2014年5月: The 6th International Conference on Applied Energy – IC AE2014. 台湾科技大学. 台北, 中国.
- [4] 2013年11月: GreenBuild Conference. 费城, 美国.
- [5] 2012年11月: The 1st IBPSA Asia Conference. 同济大学. 上海, 中国.
- [6] 2012年7月: 第七届全国人工环境学科博士生论坛. 天津大学. 天津, 中国.
- [7] 2012年5月: 建筑节能与建筑能源管理系统创新高峰论坛. 深圳建科院. 深圳, 中国.

**完成或参与项目:**

- [1] 2015年1月-2017年12月: [City University of Hong Kong] Developing Effective Eco-feedback Platform to Benchmark Building Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission and Promote Energy Saving Behavior and Awareness in Hong Kong. 深圳市科委, 参与者.
- [2] 2015年1月-2017年12月: 国家“十二五”科技支撑项目“东部发达地区单户农居生产生活循环技术系统构建与示范”子课题 2“研发太阳能, 地热能 and 沼气池供暖的集成技术和设备, 提高生态农居的可再生能源利用率”, 科技部, 参与者.
- [3] 2014年2月-2014年4月: Understanding problems in design, construction and operation of Megatal Buildings, UTrC, 主要参与者.
- [4] 2013年9月-2014年2月: [Drexel University] Research in building energy system modeling and fault detection and diagnostics. 美国能源部项目. 主要参与者.
- [5] 2013年9月-2014年12月: 可再生能源与能效合作项目提高中国的设施农业的能源效率. 欧盟 REEEP 组织, 参与者.
- [6] 2013年6月-2013年9月: 曲阜尼山圣境区域能源规划, Atkins 咨询顾问有限公司曲被动节能方案负责人.
- [7] 2013年1月-2014年12月: 上海中心城区大型公建节能与能效监控公共服务平台的创新研究与实践, 上海市科委&上海新长宁低碳投资管理有限公司, 主要参与者.
- [8] 2012年1月-2013年9月: 建筑全能效测试平台建设项目, 中央部委, 参与者.
- [9] 2012年12月-2013年2月: 无锡耿湾区域能源规划, Atkins 咨询顾问有限公司, 需求侧规划负责人.
- [10] 2012年2月-2012年8月: 上海市长宁区建筑节能改造管理机制之社区项目节能效果

评估办法, 上海市长宁区低碳办, 主要参与人。

#### 研究报告:

- [1] 许鹏, 姬颖, 李为林. 上海市长宁区社区项目节能效果评估办法——上海市长宁区建筑节能改造管理机制. 2012.
- [2] 许鹏, 姬颖. 耿湾区域能源规划报告. 2013
- [3] 许鹏, 姬颖. 昆山圣境能源需求侧规划报告. 2013.
- [4] Hamilton, M., Hendricken, L., Ji, Y., Gurian, P., & Wen, J.. Drexel University Year 3 Annual Report: EEB Policy, Markets, and Behavior Research. 2014.
- [5] Peng Xu, Ying Ji, Zhangwei Li. Understanding problems in design, construction and operation of Megatall Buildings. 2014

#### 学生工作经历:

- [1] 2010年9月-2011年10月: 同济大学机械与能源工程学院研究生会 副主席。

#### 在校期间获奖经历:

- [1] 2016年03月 上海市市级优秀毕业生
- [2] 2016年01月 同济大学优秀学生
- [3] 2015年10月 同济大学优秀博士生奖学金
- [4] 2015年03月 同济大学机械与能源工程学院优秀学生
- [5] 2014年10月 同济大学潍柴奖励金
- [6] 2013年10月 同济大学优秀研究生奖学金
- [7] 2012年03月 同济大学机械与能源工程学院优秀学生