



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

超高层建筑空调水系统配置设计优化

姓名：扶洋洋

学号：1333018

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

二〇一六年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Philosophy

Optimum Design of HVAC Water System Configurations in High-rise Buildings

Candidate: Yangyang Fu

Student Number: 1333018

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Heating, Gas Supply, Ventilation and Air-conditioning
Engineering

Supervisor: Prof. Peng Xu

March, 2016

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

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，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

摘要

传统的超高层建筑空调系统设计过程中,选择空调系统结构是一个基于设计师个人经验与知识系统的过程,设定组件变量及控制变量是一个次优化的过程。这样的系统设计方法带来了诸多问题如:次优的系统配置、不合理的设备选型等。为解决传统设计方法的弊端,本文提出在概念设计阶段将建筑性能模拟与设计优化耦合在一起,通过系统层次的优化满足最优设计。

首先,建筑性能模拟是通过对空调系统配置建模实现的。空调系统配置主要由三部分组成:设备组件、拓扑结构及运行控制策略。另外,系统模型还需要一定的求解策略才可以完成动态模拟过程。

其次,设计优化问题的建立涉及三个主要方面:优化变量、目标函数以及限制条件。通过合理的简化,选择出能够反映组件选型、系统形式及控制策略的优化变量,在合理选型、满足舒适度及安全运行的约束下,最优化空调系统目标(能耗、初投资等)。

系统配置设计优化是一个多层次(上层拓扑结构变量、下层组件及控制变量)、非线性约束、混合整数规划的问题,因此,本文对遗传算法进行一定的修改使之满足混合整数的需求。同时,因为建筑性能模拟的耗时性,本文提出基于支持向量回归(SVR)的适应度近似方法,用来近似建筑性能,加速传统遗传算法。

本文通过对上海金茂大厦进行案例分析,提出适用于该建筑的空调水系统配置。根据优化结果,可发现,只考虑能耗目标时,优化出的系统配置可节能约30%左右,当考虑多目标(能耗及初投资)时,可从优化出的非支配边界上根据需求选择合适的系统配置设计方案。在案例3中,可以得到关于超高层建筑空调系统配置的一般性结论。

最后,作为一种概念设计方法,本文有着诸多局限性。一方面,本文在考虑空调系统配置时做了诸多简化,包括设计变量的选择及拓扑结构形式等。现实中,可考虑的变量会更多,优化问题的解空间也就更为复杂;另一方面,本文给出的进化算法虽然在一定程度上可以满足最优设计的需要,但是并不能保证每次运行结果都会稳定的收敛到全局最优解,因此,设计出能快速收敛到全局最优解的优化算法显得很有必要。

关键词: 空调水系统配置 设计优化 遗传算法 适应度近似

ABSTRACT

In knowledge-based HVAC design, HVAC designers usually choose a system simply based on their knowledge and experience, and also set the component variables and control variables suboptimally. Such knowledge-based approach has many limitations: suboptimal system configuration, unreasonable sizing components etc. To fix those limitations, this research has successfully coupled building simulation with design optimization, to solve this system-level optimization problem in conceptual phase.

First, building simulation is based on system configuration models. System configuration model includes component models, topology and control strategy. Also, this research has developed system solver for dynamic simulation.

Then, to establish the optimization problem for HVAC system configurations involves three aspects: selection of design variables, computation of objectives and identification of constraints. By simplifying, this research has chosen some optimization variables which can represent component sizing process, system topology and control strategy. Under the constraints of reasonable sizing, satisfying indoor comfort and safe operation, objectives such as energy consumption and capital cost are then optimized.

Optimization of system configuration design is a multiple-leveled (where the upper level is a topology optimization problem and the lower level is a component sizing and control setting problem), nonlinearly constrained and mixed integer programming (MIP) problem. Genetic Algorithm (GA) especially NSGA-II has been modified to solve this MIP problem. What's more, because building simulation is very time consuming, this research Support-Vector-Regression-based (SVR-based) fitness approximation to approximate true fitness and then to speed up GA.

In the case study on the Jinmao Tower in Shanghai, the proposed method has optimized some new system configurations. In minimization of energy consumption, the optimized system configuration can help save around 30% energy. In the multi-objective optimization problem, one can choose the reasonable design points from the Pareto front optimized by the modified NSGA-II. And in Case 3, we have some general conclusions for HVAC system design in super high-rise building.

Finally, as a design approach used in conceptual design phase, this research has

several limitations. On one hand, this research has simplified HVAC system configurations, including selection of optimization variables and topology etc.. In a real design, there are more variables required to be considered, and thus the solution space for the optimization problem is more complex. On the other hand, the proposed GA can satisfy to some extent the design optimization, but it is hard for this GA to converge to the global optimality every time. So it is very necessary to design a capable GA.

Key Words: HVAC Water System Configuration, Design Optimization, Genetic Algorithm, Fitness Approximation

目录

第 1 章 背景介绍	1
1.1 高层建筑的发展和空调技术应用.....	1
1.2 基于经验的空调系统设计方法.....	2
1.3 基于经验的空调系统设计带来的问题.....	3
1.4 最优设计.....	5
1.5 研究目的与主要研究内容.....	6
1.5.1 研究目的.....	6
1.5.2 主要研究内容.....	7
第 2 章 文献综述	9
2.1 国外研究现状.....	9
2.1.1 局部配置设计优化.....	9
2.1.2 全局配置设计优化.....	10
2.2 国内研究现状.....	12
第 3 章 超高层建筑空调系统配置分析	15
3.1 空调水系统配置.....	15
3.2 空调水系统配置分析.....	17
3.2.1 水系统静压.....	17
3.2.2 冷热源选择.....	18
3.2.3 拓扑结构.....	18
3.2.4 冷热源设备的安装位置.....	20
3.2.5 断压板式换热器.....	21
3.2.6 其他影响因素.....	22
3.3 本章小结.....	22
第 4 章 超高层建筑空调水系统配置设计优化	23
4.1 空调水系统配置建模.....	23
4.1.1 组件模型.....	23
4.1.2 拓扑结构形式.....	41
4.1.3 运行控制策略.....	47
4.1.4 系统求解.....	49
4.2 空调水系统配置设计优化.....	52
4.2.1 优化变量.....	53
4.2.2 目标函数.....	55
4.2.3 限制条件.....	55
4.3 本章小结.....	56

第 5 章 优化算法-进化算法	59
5.1 进化算法简介	59
5.2 MI-LXPM GA	59
5.2.1 编码方式	60
5.2.2 适应度函数	61
5.2.3 选择算子	61
5.2.4 交叉算子	62
5.2.5 变异算子	62
5.2.6 整数限制	63
5.2.7 MI-LXPM GA 计算流程	63
5.2.8 遗传算法参数设计	64
5.3 NSGA-II	64
5.3.1 快速非支配排序法	65
5.3.2 拥挤度比较算子	66
5.3.3 交叉算子	68
5.3.4 变异算子	68
5.3.5 整数算子	69
5.3.6 NSGA-II 算法流程	69
5.4 适应度近似	71
5.4.1 ϵ -SVR	71
5.4.2 基于适应度近似的 NSGA-II	74
5.5 本章小结	76
第 6 章 编程及软件开发	77
6.1 软件开发	77
6.1.1 编程语言	77
6.1.2 软件开发目的	78
6.2 能耗模拟软件	80
6.3 设计优化软件	81
第 7 章 优化案例：金茂大厦	85
7.1 建筑描述	85
7.2 能耗模型基准	85
7.3 设计优化	87
7.4 结果分析	87
7.4.1 Case 1	87
7.4.2 Case 2	89
7.4.3 Case 3	92
第 8 章 结论	96
8.1 研究成果	96

8.2 局限性与工作展望.....	98
致谢	100
参考文献	101
个人简历、在读期间发表的学术论文及研究成果	105

第 1 章 背景介绍

1.1 高层建筑的发展和空调技术应用

早在 1972 年，由联合国教科文组织所属的世界高层建筑委员会召开的国际高层建筑会议上，将 9 层和 9 层以上的建筑定义为高层建筑，40 层以上（高度在 100m 以上）的建筑称为超高层建筑^[1]。

随着工业的迅速发展和经济繁荣，城市人口激增，用地紧张，城市地价不断升高，人类才有了建造高层建筑的需求。同时由于科学技术的发展，作为构筑物用的钢铁、水泥、玻璃等建材的问世，电以及电梯的发明，解决了垂直交通运输、防火、防雷等问题。此外，作为环境控制技术-空调、采暖、通风、卫生设备和电讯等系统的出现提供了高层建筑发展的可能性。美国是近代高层建筑的发源地。最早的高层建筑出现在芝加哥和纽约，其中 20 世纪初中期建成的著名的帝国大厦（102 层）执摩天大楼之牛耳达 40 年之久。第二次世界大战之后，高层建筑在欧洲、日本、加拿大等地也得到了迅速的发展。我国上海、天津、广州、武汉等大城市，是中国高层建筑的发源地，尤以上海为最。特别是在改革开放后，城市对现代办公空间的大量需求促使高层建筑在中国大地上如雨后春笋般建立。根据美国高层建筑与城市人居环境理事会（CTBUH）的统计，截止到 2014 年，世界上已经建成的最高的 100 幢建筑中，有 33 幢在中国；世界上正在建设中的最高的 100 幢建筑中，有 62 幢也在中国。这些项目中，有相当一部分由境内外联合设计，中方担任设计顾问和施工图设计。在设计中，全面吸收学习、吸收我国香港地区和美国、日本等的设计经验。

在第二次世界大战以前，美国的商业办公楼几乎没有可见的空气调节设计。在那之后空调设计才在高层建筑中得到普及。据统计，美国 1936 年和 1956 年高级办公楼空调普及率分别为：1% 以下及 27%。我国的高层建筑空调技术在不断的发展中，主要呈现为以下两个方面：

空调方式方面：旅馆建筑因建筑形式与功能的固定性，对空调要求与各国一致，即大多采用风机盘管加新风系统；办公建筑标准层空调方式多样化选择，其中风机盘管加新风系统为主要方式，由于后来发现 FCU 方式有水患问题，且室内污染物稀释能力较差，故逐渐注意到全空气方式、特别是变风量（VAV）空调系统的应用；单元式空调以其灵活性和较小的输送能耗也逐渐引起设计人员的注意。

冷热源方式方面：经实践证明，在夏热冬冷地区（如上海），夏季采用离心

式冷水机组、冬季采用燃油（气）锅炉为经济上最认可的选择，但对环境未必是最好的方式；在电制冷与热（燃气）制冷的市场竞争中，20 世纪 90 年代后期业主与设计人员达成了共识，即在大型高层建筑中能源多元化（复合能源）利用是一种合理思路，即可平衡城市的能源供应，又可以让用户有经济方面的选择。此外还提供一定的灵活性和供能的可靠性；蓄冷技术应用逐步推广以达到用电的“移峰填谷”目的，国家可以减少电力投资，用户可以减少用能支出（实行峰谷电价差别）；另外，作为局部空调方式系统化应用的变制冷剂流量（VRV）系统于 1980 年代中期由日本引入，该系统方式与建筑设计的协调相对简单，安装与调节方便。

在多年的实践与探索中，暖通设计人员逐渐形成了一套空调系统设计方法。可参见图 1 部分。

1.2 基于经验的空调系统设计方法

现行的高层建筑暖通空调系统设计方法如图 1.1 所示，该方法也被称为基于经验的设计方法。关于该图的一些说明如下：

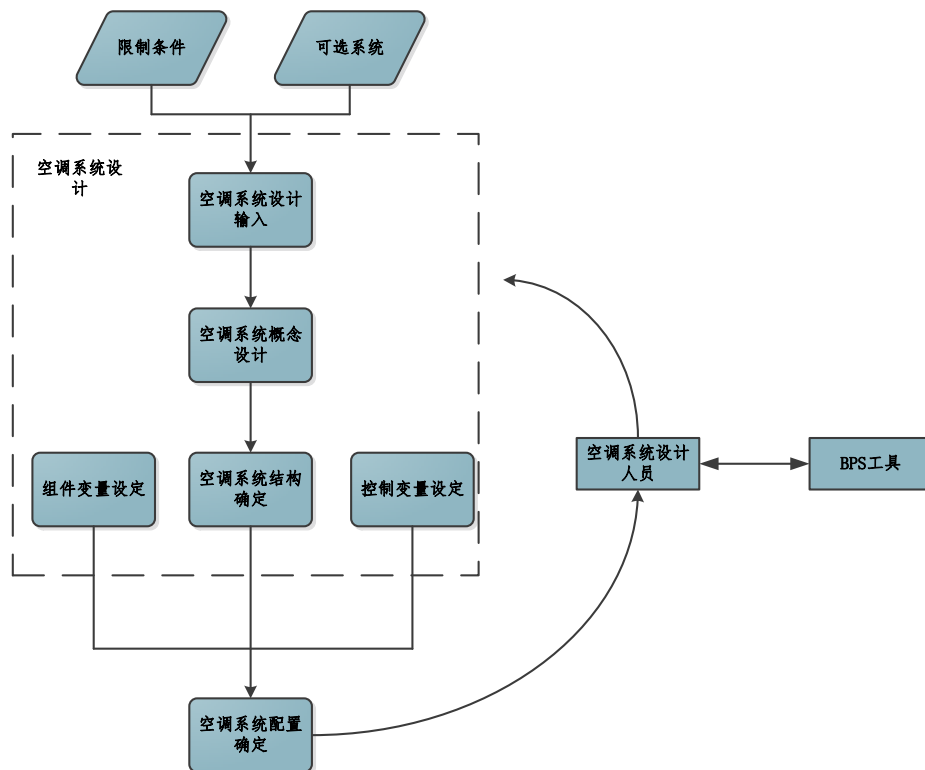


图 1.1 基于经验的空调系统设计流程

限制条件：指的是空调系统设计要考虑的因素，主要包括业主方面因素（初

投资、建筑功能用途、运行维修费用等)、建筑师方面因素(空间布局限制、建筑物形状限制等)以及其他方面限制(结构要求、抗震要求等)。

可选系统:指的是空调系统设计工程师在概念设计初期为目标建筑选择的空调系统形式,可见这个过程是依赖于设计师经验的。

空调系统设计输入:指的是在空调系统概念设计初期已知的设计条件,主要为限制条件和可选系统;

空调系统概念设计:指的是空调系统设计的初期阶段。在此阶段,设计决策是由设计人员通过自身知识系统及经验来支撑完成的,是一个具有创造性和主观性的过程。通常这些决策包括一个或者多个可能的空调系统结构。

空调系统结构:反应的是空调系统的组件或者设备之间的连接方式,如单风道/双风道系统、一级/二级泵系统等。

组件变量:指的是空调系统组件的选型变量、位置变量。

控制变量:指的是空调系统组件在运行阶段被控制策略控制的变量。

空调系统配置:包括三部分:空调系统结构(也称作拓扑结构)、组件变量以及控制变量。

BPS 工具:指的是建筑性能模拟(Building Performance Simulation)工具。

图 1.1 展示了传统空调系统配置设计中设计人员、BPS 工具以及空调系统配置之间的关系。空调系统配置的确是在可选系统的范围内完成的,然后在这个选定的系统中进行组件变量的设定,最后进行控制变量的设定。这些变量的设定过程可被看作是一个简单的“优化”过程,因为设计人员通过“猜测”变量参数的不同值,输入到 BPS 工具,进行多次模拟仿真,得到预先设定范围内的最优值。整个过程中,设计人员必须根据需要完成的设计任务,调用 BPS 工具箱,最后将工具输出结果“翻译”给空调系统作为系统调整的依据。BPS 工具与设计过程分离,数据模型之间需要设计人员的第三方“翻译”过程也是导致空调系统设计优化困难的一个原因。另外,假如变量个数超过两个或者三个,模拟工作将变得繁琐。

1.3 基于经验的空调系统设计带来的问题

从上分析可知,传统的空调系统设计过程可分为三步:选择空调系统结构—设定组件变量值—设定控制变量值。其中,选择空调系统结构是一个基于设计师个人经验与知识系统的过程,设定组件变量及控制变量是一个次优化的过程。这样的系统设计方法带来了以下问题:

- (1) 次优化的空调系统配置

传统空调系统设计方法带来的第一个问题就是设计出的空调系统配置是次优的。表现在以下两个方面：

*单一的优化目标：*空调系统配置优化的目标有多种：系统电耗、系统一次能源消耗、系统资金成本、系统对环境的影响、系统带来的舒适度、系统年运行费用、系统的现值以及系统的投资回收期等。传统设计往往只考虑系统的资金成本或者投资回收期，在能耗条件满足的情况下，选取合适的系统配置。因此传统空调系统设计是一个单目标优化的设计过程。该设计将导致空调系统配置在选定目标函数下达到最优，但是在其他目标下可能表现很差。

*次优的系统结构：*如上所述，空调系统配置由系统结构、组件变量及控制变量组成。传统的空调系统配置设计是在给定范围内选取的“最优”系统结构，然后对组件变量及控制变量进行设定。上述中，系统结构的给定范围依赖于设计人员多年的设计经验，这就可能造成最终的系统配置只是在次优的系统结构的基础上对组件变量及控制变量进行优化的结果。

(2) 不合理的设计选型

空调系统设计是为了满足最不利条件下的设计负荷，组件的选型也是为了满足设计负荷的需要。不合理的设计选型主要来源于以下方面：

*负荷计算不合理：*负荷是组件选型的基本依据，负荷计算不合理将导致选型结果不可靠。不合理的负荷计算主要表现在：(1) 设计人员与业主沟通不善造成的建筑内热负荷计算不合理；(2) 部分设计人员在负荷计算过程中采用经验数值（例如，对于一般办公室来说，指标为 28-32.5 m²/冷吨）。

*选型计算不合理：*设计人员会根据个人经验，在选型计算时乘以一定的安全系数，如果安全系数过大，则会导致选型过大。

(3) 待验证的冷热源系统结构

冷热源系统结构包括冷热源类型、数量以及放置的位置。对冷热源结构的合理配置需要结合系统的设计负荷以及部分负荷特性来完成。传统的冷热源结构设计主要是由设计人员的经验主导完成的，例如，在多年的设计实践中，在夏热冬冷地区（如上海），夏季采用离心式冷水机组、冬季采用燃油（气）锅炉为经济上最认可的选择。复合能源的利用被普遍认为在高层建筑空调系统设计中是一种合理的思路，冷热源类型需要工程师根据经验结合现场条件来确定，不同类型能源形式的比例是一个需要多目标优化选择的结果。

(4) 过大的集中系统能耗

早期国内外的超高层建筑大多采用集中空调系统，这种“约定俗成”的空调系统配置在运行阶段显露出一序列问题，例如，运行能耗过高。据统计，2003年上海金茂大厦的办公区域能耗为 193kW.h/m²，酒店区域能耗为 402kW.h/m²，在

经过节能改造之后,能耗水平才符合我国大型公共建筑单位面积电耗的平均水平(办公区域 67~167 kW.h/m², 酒店区域 63~203 kW.h/m²)。

传统空调系统配置设计方法带来的问题展现出“经验”在系统设计中的不足。如果能改善设计过程对设计人员的严重依赖,充分利用建筑信息,实现设计过程、设计人员以及 BPS 工具三者有机结合,建立新型的基于数据驱动的空调系统配置设计方法,我们才有机会克服传统方法的不足。

1.4 最优设计

优化过程有三个主要部分:确认解集空间、解空间中个体解的评估方法以及指引搜索方向的数学算法。优化算法如果被正确的应用,就能够找到最优或者近优解。因此,如果空调系统配置设计能够表达成一个待求解的优化问题,而且选取或者设计了合适的搜索方法,那么就有可能找出最优的系统配置。

优化方法已经广泛应用于绝热层设计、管道和水力系统设计、组件设计、最优控制以及组件选型。一般来说,对于一特定系统,使用优化方法可以帮助建立最优的参数值。以一个控制优化问题为例,该优化问题的目的是找到最优参数和控制器设定值或者控制策略。该例子中,解空间其实是控制参数和设定点的可能值组成的集合。再以空调系统选型为例,Wright 将风机盘管的尺寸和机械结构、控制设定点(如水流量、风机转速等)作为优化变量^[2]。这个问题比控制优化问题更为复杂,因为同时考虑了结构尺寸参数和控制参数。这两种类型的变量值是相互影响的,例如与较小尺寸的风机盘管相比较,为了实现最优化运行,较大尺寸的风机盘管可能需要完全不同的控制参数设定值。但是,选型优化问题的解空间仍然是由参数取值空间(结构尺寸参数和控制设定点)决定的。一旦空调系统的配置能够确定,优化问题的解空间在优化过程中就保持不变。

空调系统配置优化区别于选型优化的地方在于空调系统的配置并不是预先定义的,而是需要搜索求解的优化变量。只有系统配置确定,系统选型问题才可以接着进行计算求解。因此,系统配置优化是一个多层的优化问题:下层“子”问题的解空间受到上层“子”问题的影响。具体的说,空调系统配置设计包含了组件选择以及组件连接方式。组件连接方式一般包含组件间的连接、组件与外部元素的连接以及假想的控制策略。系统中的每一个组件都有相应的尺寸参数和控制变量,而且不同的系统配置可能包含不同的参数和变量。因此,每一个系统配置都会有一个独特的参数解空间。同时,系统配置设计的质量是通过其性能评估的,这意味着必须要求解选型问题。系统配置优化问题和选型问题可通过图 1.2 表示。

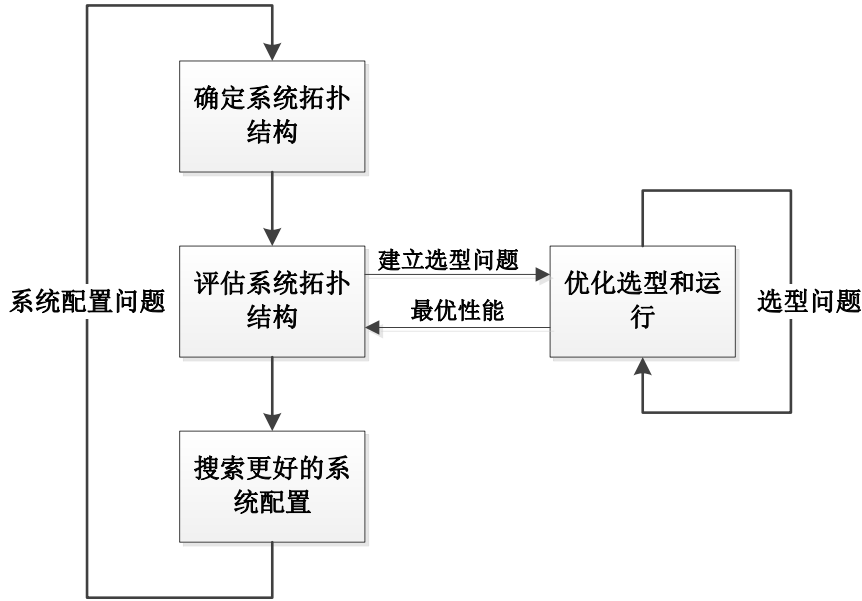


图 1.2 系统配置设计问题与选型问题的关系

系统层次（system-level）设计优化问题的一个常见特征就是具有多层次的形式。空调水系统配置设计优化问题同时包含了拓扑结构变量（分区数等）和动态运行变量（控制设定值参数等）。在拓扑结构层面，优化问题变成组件连接方式的优化问题；在运行变量层次，优化变量的个数非常庞大（如不同组件的控制设定点）。因此为了求解系统配置问题，需要一个能够同时求解组合式多层次问题和大量优化变量问题的优化算法。

1.5 研究目的与主要研究内容

1.5.1 研究目的

因为系统配置设计是一个多层次的优化问题，本研究的主要目标是开发一种能够同时优化系统结构和组件参数的方法，并以超高层建筑空调系统配置设计为背景，综合考虑超高层建筑复杂空调系统的配置设计优化问题，提出基于数据的空调系统设计方法，为超高层建筑最优空调系统配置设计提供新的思路，为以后的相关研究提供参考借鉴。

1.5.2 主要研究内容

本文包括以下主要内容：

第二章：整理、分析空调系统优化设计和优化运行的实际应用，调查系统层面优化的方法，并确定合适的优化算法；

第三章：定义空调系统配置的概念，分析空调系统配置对建筑性能的影响。

第四章：建立空调系统配置的优化问题，包括建立配置模型、确认优化参数、定义优化目标及限制条件以及讨论该优化问题的特点。

第五章：修正基因遗传算法(GA)，并将 GA 作为系统配置问题的优化方法。

第六章：介绍系统设计优化问题的编程实现--HVACOpt 软件。通过建筑性能模拟和设计优化相耦合，该软件能够实现多层次的系统配置设计优化问题的求解。

第七章：用实际案例来验证空调系统配置设计优化方法。实例中包含着单目标优化、多目标优化的结果及优化结果的一般性结论。

第八章：总结研究成果，得出结论，并为以后研究提供方向。

第 2 章 文献综述

根据空调系统配置的组成部分,可将国内外的相关研究分为两大部分。第一部分是局部配置设计优化。局部配置优化指的是研究人员只对空调系统配置的局部部分如组件选型或者控制系统设计进行优化。这类优化可使得空调系统配置在某个局部部分表现最优,但是空调系统配置在整体层面上不一定是最优。第二部分是系统配置设计优化。这部分优化是系统层面的优化,考虑了系统结构、组件变量及控制变量的同时优化。

2.1 国外研究现状

2.1.1 局部配置设计优化

Y. Asiedu 等人采用遗传算法在最小生命周期成本的目标下,对空调系统的风管选型进行设计优化^[3]。在对案例的分析中,作者指出,通过利用 SGA (Segregated Genetic Algorithm),优化出的管网系统比其他简单设计的管网系统总造价要低 2%-5%,而且该算法也能实现管路系统的压力平衡。因此作者认为,遗传算法不仅可以用来解决管路输配的优化设计问题,而且还可以解决在空调系统配置设计中遇到的其他离散、非线性的优化问题。

Jonathan A. Wright 等人在对单区域全新风空调系统的设计优化中,指出系统设计过程是一个在资本支出、运营成本及舒适度之间不断权衡的一个过程,该过程可以使用多标准决策 (MCDM) 方法来解决^[4]。MCDM 方法在案例中能够很快的在日能源消耗成本和区域不舒适度之间找到平衡点。

Weimin Wang 等人认为在绿色建筑设计中应该考虑对环境的影响,要找到能够同时满足不同目标(如经济性和环保性)的设计方案比较困难^[5]。作者根据此问题建立了绿色建筑设计的多目标优化模型。变量包括在概念设计阶段需要决策(如窗墙比等)的和对能耗有重大影响(如窗户朝向等)的因素。优化方法选择的是多目标遗传算法。虽然本文只考虑了建筑围护结构的优化,但是此方法可以扩展到整个机械系统和被动太阳能设计优化中。

Lu Lu 和 Wenjian Cai 等人依据前人的研究成果,整理出空调系统各设备模型的简化数学能耗模型^[6],利用遗传算法建立并求解了空调系统全局最优化的问题^[6-9]。模拟结果显示,和传统方法相比,优化控制方式可以使系统能耗显著降低。

K.F. Fong 等人针对空调系统运行阶段的弊端,提出用模拟-优化技术来对系

统进行仿真,然后决定运行变量的值^[10]。鉴于空调系统的复杂性,作者提出使用鲁棒遗传算法进行数值求解。通过使用 Lu Lu 等人的模型与数据^[6-9],对空调一次系统侧,包括冷却水循环和冷冻水循环,进行优化控制,得出鲁棒遗传算法比一般遗传算法计算效率和计算结果更好。该作者的其他论文^[11-13]也提出了对空调系统的优化实现,但都是对既有系统控制策略的改进,并未涉及到系统层次的设计优化。

Berhane H. Gebreslassie 等人通过多目标优化求解的方法优化出一种新的吸收制冷系统^[14]。该系统同时满足年均总成本和对环境影响最低的目标要求。文中指出如果决策者愿意牺牲一点经济性,该系统可以显著降低对环境的影响。

Mohamed Hamdy 和 Ala Hasan 等人为解决空调系统设计优化中长时间的模拟优化过程,提出了两种组合式的优化方法,分别是 PR_GA 和 GA_RF^[15]。案例分析结果显示,两种方法都能够解决多目标优化问题,而且花费的时间及或者得效果都要比 MATLAB 2008a 中的默认遗传算法表现好。作者认为,PR_GA 可以降低优化过程的计算时间,GA_RF 可以获得更高质量的结果。两种方法也可以组合到一起,形成新的 PR_GA_RF 方法,此方法能继承两者的优点。

建筑设计优化涉及到多个目标,一般是一个非常耗时耗力的过程。Laurent Magnier 等人首先用基于模拟分析得到的人工神经网络表征建筑行为,然后把神经网络和多目标遗传算法结合起来进行优化计算^[16]。在对某住宅建筑进行热舒适和能耗优化后,可以得到一些潜在的建筑设计方案,为设计人员提供了很好的参考。

Andrew Kusiak 和 Guanglin Xu 使用动态神经网络方法对空调的二次系统的进行优化^[17]。优化目标是系统能耗最小而且能够将室内温度维持在可接受的范围。作者利用多目标粒子群优化算法求解该优化模型。通过在实际空调系统中应用此优化控制方法,得到与传统控制策略相比,可实现节能量 30%。

Janghoo Seo 等人利用多岛遗传算法优化住宅建筑空调系统设计^[18]。作者首先使用 TRNSYS 模拟了建筑的冷热需求量,然后通过设置组件种类、数量及容量,利用多岛遗传算法,使得能耗系统最小。

2.1.2 全局配置设计优化

Jonathan Wright 在 1986 年的博士论文中首次提出空调系统配置设计优化的完整思路^[19,20]。通过对组件及系统进行优化问题建模,使用直接搜索的方法进行求解。在对空调二次系统进行设计优化后,作者认为模式搜索的方法可用但是并不有效,因为空调系统配置优化是一个既有离散变量又有连续变量、优化目标和限制条件高度非线性的问题,所得的解倾向依赖于一个或者多个限制条件。所以

未来的设计优化工作需要优化算法上有所突破。

P.P. Angelov 和 Y. Zhang 等人通过进化算法实现了空调二次系统的自动设计优化^[21]。作者将空调系统配置设计的整个过程,包括初期对人力干涉的大量需求,看成是一个约束满足的问题。将组件的选型变量和系统结构特性用不同的变量类型表示(实数和整数等),这样设计过程就可以通过最优化模型来表示。为了验证优化模型的有效性,作者对位于美国俄克拉何马州的一个小型办公建筑进行空调二次系统的最优化设计。结果显示,三个典型日内,作者提出的系统比传统的最优系统能够节省能耗 800 千瓦时(9%)。

Jonathan Wright 和 Yi Zhang 于 2005 年在文[22]中指出,空调系统拓扑结构设计是一个高度受限且多模态的优化问题。他们之前用多染色体进化算法优化出的系统与某些选定的用作对比的常规系统相比是节能的,但是与其他大部分常规系统相比则是不节能的^[21]。原因是多染色体进化算法只在单个拓扑结构内进行搜索。在此文中,作者引入了一种新型进化算法运算符用来抑制算法可能出现的在单个拓扑结构内进行搜索的现象。经验证,新方法使找到可行性解的概率从 28% 提高到 66%,而且该解比现行的最优系统节省 15% 的能耗。

Jonathan Wright 和 Yi Zhang 在 ASHARE 研究项目 RP-1049 中指出,空调系统配置设计优化可以看成是由三个子优化问题组成:组件变量的设定、组件之间拓扑连接设计和系统的运行策略。通过设定遗传算法的数据结构和搜索运算符,可解决空调系统配置的优化问题。实验结果显示,如果把组件变量给定为搜索的边界条件,那么该算法就会有 81% 的可能性找到最优系统配置^[23]。在对二次系统优化设计的实验结果中显示,需要多次运行该算法才能找到最优系统配置设计方案,经统计,要得到一个比现行系统能耗低的设计方案需要额外运行该算法约 8 次。优化过程中没有任何先验设计经验,只是依靠系统的容量及可行性来判断设计方案的合理性。虽然现行的空调系统配置方案是人类在经过一个多世纪慢慢发展起来的,但是仅仅通过文中提出的优化设计方法就可以达到相同的或者更好的效果^[24]。

Magdalena Stanescu 等人利用某大学建筑区域的日负荷曲线提出一种空调系统设计的优化方法。描述系统实际负荷和可能最大负荷关系的全局负荷率(Global Load Ratio)被用作优化目标函数。优化结果显示,具有 63 个热力区域的建筑,可采用 6 种不同的空调二次系统,而且优化后的系统比对照系统节能 18.8%^[25]。Magdalena Stanescu 等人随后又将 CR_CONS 优化方法应用在空调一次系统设计中,根据同一建筑中不同热力区域负荷特性得到不同的二次系统形式。优化出的设计方案可实现节能 25% 左右^[26,27]。三篇文章都没有考虑系统的资本投入问题,根据优化结果显示,新系统的经济性受到质疑。

Michael Wetter 致力于研究建筑设计优化与模拟。其主导开发的 GenOpt 优化软件可与成熟商业建筑性能模拟软件如 EnergyPlus, Trnsys 等连接, 通过模拟与优化相结合的方式, 进行设计优化^[28]。同时, Michael Wetter 及其合作者也对设计优化的耗时性做了诸多研究, 如使用 GPS 算法在迭代早期以低精确度近似求解模拟系统, 在中后期再以高精度模型求解。该方法经证实, 与 Hooke-Jeeves 搜索算法相比, 可节省大量计算时间^[29]。

2.2 国内研究现状

国内在空调系统优化设计方面只停留在局部系统的优化上。

1998 年至今, S.W. Wang 等人对空调水系统建立了模型, 并将不同的智能优化控制策略应用于水系统中, 使得空调系统更加节能; 其研究成果应用在香港环球经融中心上, 预计可节约大量能耗^[30-32]。他们也建立了变风量系统模型, 对空调房间热舒适性, 室内空气品质和总能耗, 做了多目标优化分析, 得出不同的新风策略将造成能耗有显著的差别; 提出风系统整体优化管理, 能降低可观的能耗^[33-35]。

W. Huang 等人利用 HVACSIM+ 并结合遗传算法, 对空调系统控制的稳定性, 精确性进行了模拟研究。得出遗传算法在解决空调系统类似的复杂优化问题比其他算法更为健全、高效^[36]。

陈丹丹利用 TRNSYS 为模拟平台, 对空调水系统进行仿真, 并提出集中空调水系统层次的在线可预测性的优化控制策略^[37]。以水系统能耗为目标函数, 对冷冻水供水温度和二次水泵压差进行同时优化控制, 可以保证系统控制特性稳定的前提下能够节约 4.57~10.59% 整个水系统的能耗。

上海交通大学 Ye Yao 等人, 利用分解协调法对空调系统全方面进行了优化, 得出在利用全局优化的控制策略下, 能够比传统的控制方式降低更多能耗^[38]。

上海交通大学晋新桥等人, 对智能建筑变风量空调系统的送风温度进行优化控制, 得出可以节能 4.9~17.3%^[39]。

南京航空航天大学的孙雪德, 结合遗传算法对变水温和变流量的空调系统进行优化, 结果显示可节约能耗大约 5.5~9.2%^[40]。

台北科技大学张永宗等人, 利用拉格朗日、遗传算法、模拟退火等优化方法控制大型冷水机组的负载分配运行方案^[41-44]。得出对于大型空调系统的制冷机, 根据各制冷机的 COP 性能曲线, 利用优化方法来确定最经济的制冷机负载分配方案以及启停秩序, 能节约 1~8.59% 的能耗。

综合国内外对空调系统配置设计优化的研究现状,国内外的大部分研究都是对局部系统配置进行设计优化,优化层面包括一次空调系统的选型及控制优化、二次系统的选型及控制优化,并未涉及到空调系统结构的优化,也即系统层面的优化。少数学者如 Jonathan Wright 和 Magdalena Stanescu 等人,虽然提出了系统层面的配置设计优化,但是他们的研究成果仅限于二次空调系统,且为了简化模型,只考虑了几个热力区域。国内对系统层面的配置设计优化研究目前为零。

同时可以看到,空调系统设计优化是一个复杂的问题。它涉及到建筑性能模拟及优化,而这两个过程都是非常耗时的。因此,减少工程设计所用的优化时间成本显得非常有研究必要。

第3章 超高层建筑空调系统配置分析

空调系统配置指的是空调系统的方案设计，包括组件的选择、气流的组织、水力系统以及控制策略等。通常，大型的空调系统是由许多子系统和组件组成的，而且空调系统的设计也受到一系列因素的制约，如初投资、能耗水平、室内空气质量和热舒适等。考虑到超高层建筑空调系统配置优化的复杂性，本研究的工作范围仅限于（1）超高层建筑空调水系统配置，和（2）系统配置设计的能耗和初投资评估。

空调水系统配置¹包括冷热源、水泵、换热器、空气处理机组等组件以及组件间的连接方式等。本章主要讨论空调水系统配置的组成以及水系统优化的可能性。通常，空调水系统配置可表现为在一定控制策略下，由水流网路连接（拓扑结构）的一序列热质传递过程（组件）的结合。因此，组件、拓扑结构以及运行控制策略是空调系统配置设计的三个基本元素。随后本章会讨论影响空调系统配置设计的主要因素，为配置设计优化提供理论基础。

3.1 空调水系统配置

本文中仅限于讨论空调水系统的配置设计。图 3.1 中描述了基本的一级、二级泵系统。冷水机组提供的低温冷水通过二次泵输送给负荷侧，经过与室内空气换热后，温度升高并通过一次泵返回冷水机组；冷水机组则通过冷却水系统将所得热量从冷却塔排出。通常情况下，一级泵定流量运行，水泵扬程克服系统冷、热源产出环路的阻力；二级泵变流量运行，水泵扬程应该克服用户侧空调末端环路的阻力。旁通管 AB 的设定有两个作用：一是平衡水流量，当冷源环路循环水量大于用户循环水量时，旁通管内的水就从供水总管流向回水总管，反之亦然；二是将冷源环路与用户环路水力隔断，两环路的泵的运行调节互不影响。

图 3.1 中的一次、二次泵水系统包括 3 台冷水机组、3 台一次泵、3 台冷却塔和 2 个垂直分区，每个垂直分区配备相应的二次泵组，分区与分区间通过板式换热器连接。图中并未展示一些其他常见的配件，如阀门、传感器、控制器、过滤器分集水器等。不同的空调系统配置有着不同的组件，每一个组件都起着独特的作用。由于众多组件的存在，空调系统配置的优化设计是非常困难的。因此，本文进行了适当的假设与简化。

根据功能区别，可将空调系统组件分为 4 组。第一组是传热设备，包括冷水

¹ 如无特殊说明，本文以后所提到“空调水系统”均指的是“超高层建筑空调水系统”。

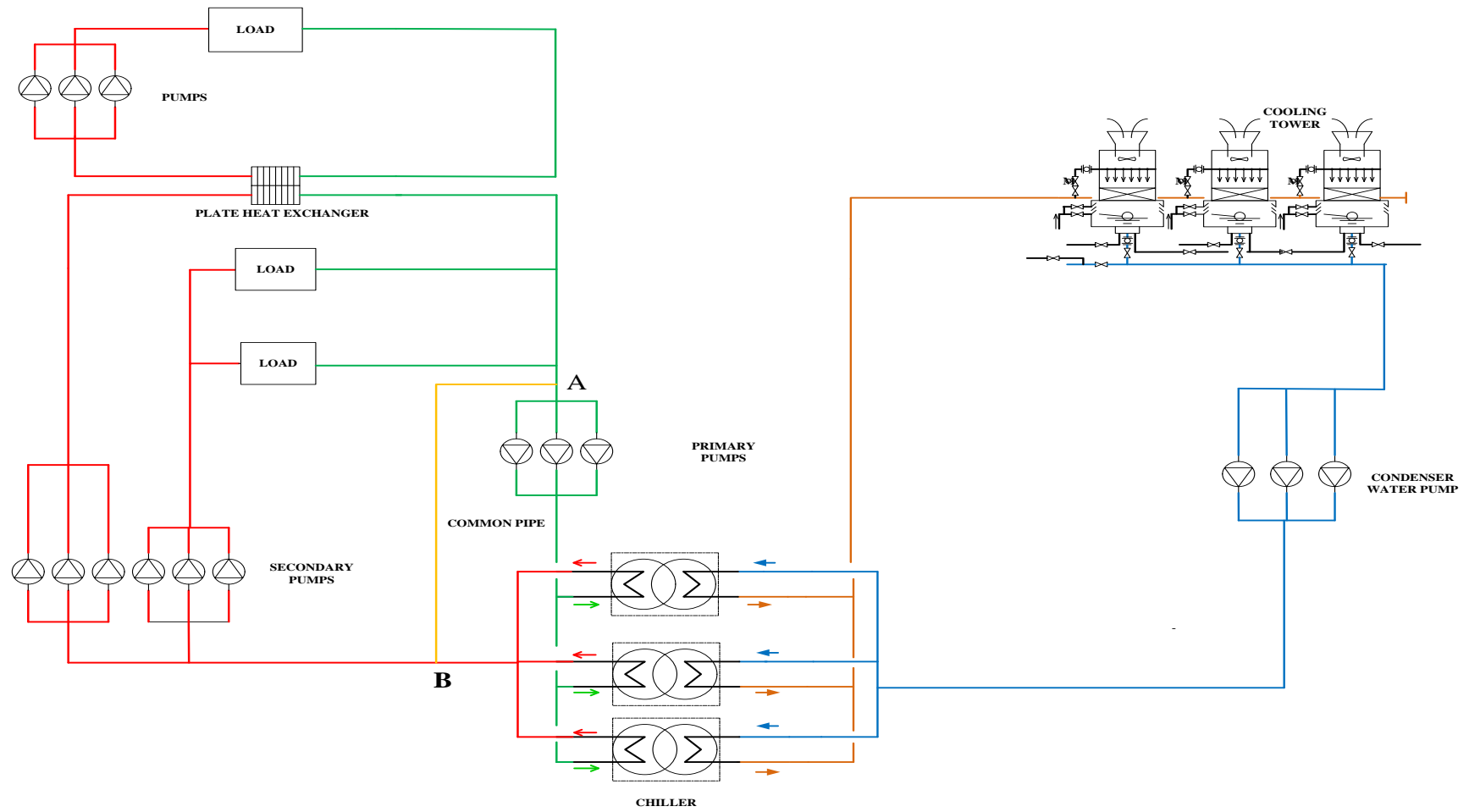


图 3.1 一级、二级泵水系统简图

机组、换热器、冷却塔、空气处理机组。这类设备通过温差驱动满足系统换热的需求。第二组是输配设备，包括水泵、风机、管道、阀门、分集水器等。第三组是与系统运行相关的控制设备，如传感器、控制器、执行器等。第四组是其他设备，这组设备有着其他各种各样的作用，如消音器等。本文并未考虑第四组设备，因为其对空调系统性能（能耗等）影响不大。对于空调系统来说，前三组组件的连接方式决定了系统的配置。因此，空调水系统配置主要包含以下三个方面：

- 组件：传热组件主要处理介质间的传热过程，输配组件主要处理介质水的输配。组件的详细模型将在 4.1.1 中讨论。
- 水系统拓扑结构：水泵、管道、阀门等输配设备组成了水力循环管网。循环管网决定了传热组件间的连接方式以及水的分配与流动。在此，本文将水力循环管网抽象成拓扑结构。具体详见 4.1.2。
- 运行策略：传感器、控制器以及执行器的连接决定了系统的运行方式，也即运行策略。典型的空调水系统控制策略有一次泵定流量、二次泵变流量策略、一次泵变流量策略、监督最优控制（Supervisory Optimal Control）等。在性能模拟中，并不需要控制组件（传感器、执行器等）的具体计算模型也可以进行不同控制策略的优劣势比较。也就是说，可以通过控制器设定点的改变来代表系统的运行策略，大大简化系统配置设计问题。具体详见 4.1.3。

3.2 空调水系统配置分析

超高层建筑空调水系统的能耗取决于系统的结构与控制策略。本节主要讨论超高层建筑空调水系统配置最优化设计的影响因素。

3.2.1 水系统静压

超高层建筑空调水系统的设计不同于低层建筑空调系统设计的一个最大地方在于水系统静压。水系统静压是由建筑高度产生的，不仅影响管路、阀门等设备，还影响其他安装在系统内的设备，如冷冻水系统中的冷水机组、冷水盘管、换热器等。在高层建筑中，建筑越高，空调水系统的承压越大，组成水系统的冷、热源设备、空调设备和其他设备的承压要求也越高。表 3.1 列出了空调系统各个组件的承压分类。工程应用的空调水系统必须使组成系统的各组件在其安全范围内工作。

水系统工作静压不仅影响到设备的正常运行，还影响到设备的初投资。一般来说，设备的承压能力越大，设备的初投资也越大。具体设备初投资与承压能力

的关系详见 4.1.1 章节。

表 3.1 空调系统组件承压能力分类

组件	工作压力 (MPa)
冷水机组	1.0, 1.7(1.6), 2.0, 2.5
锅炉	0.7, 1.0, 1.25, 1.6
水泵	1.0, 1.6, 2.5
换热器	1.0, 1.6, 2.5
管道	1.0, 1.6, 2.5
阀门	1.0, 1.6, 2.5
AHU	1.0, 1.6, 2.0
风机盘管	1.0, 1.6

3.2.2 冷热源选择

可应用于建筑的冷热源形式众多，不同的冷热源性能不同。对于超高层建筑来说，合适的冷热源组合能够使空调冷热水系统变得更加有效率。

在选取冷热源时，主要考虑三个因素：冷热源形式、设计台数以及部分负荷性能。

首先，合适的冷热源形式可以充分利用超高层建筑及其周围的设施。一般来说，当有余热可利用时，可将余热应用于建筑物供热与空调热源；当有水资源可利用时，可采用水（地）源热泵的供冷供热技术。因此，具体冷热源形式的选择需结合不同建筑的综合信息来确定。

其次，在确定冷热源形式后，要进行选型计算。不同形式的冷热源数量与设计容量需满足建筑设计负荷的要求。

最后，冷热源的部分负荷率特性也影响到其在运行过程中的效率。如果选型时不考虑设备部分负荷特性，那么在低负荷情况下，系统将不能高效的运行，会造成能源的浪费。

3.2.3 拓扑结构

水系统拓扑结构反映了水系统的结构形式，不同的拓扑结构意味着不同的空调水系统。在设计初期，当确定了水系统形式后，系统运行就局限在该特定的结构内。因此，不论采用何种优化控制策略，其节能的潜力是有限的。

空调水系统拓扑结构的决定性变量有以下三个：

(1) 垂直分区个数

超高层建筑空调水系统设计时, 必须将系统进行分区, 使水系统的静压力及系统的工作压力小于各组件的承压能力。中国的设计人员一般将空调水系统分成两个或者三个分区, 每个分区的工作压力控制在 2.5MPa 以内, 风机盘管的工作压力控制在 1.6MPa 以内; 而日本的设计人员将水力垂直分区较多, 每分区最大工作压力一般小于 1.0MPa 。

一旦确定了垂直分区的个数, 空调水系统拓扑结构的一般形式就被确定了下来。

(2) 水泵设置方式

水泵的设置方式影响空调水系统的拓扑结构。例如常见的一级泵系统和多级泵系统。

一级泵系统中只采用一套循环水泵, 水泵扬程能够克服整个水系统的循环阻力。图 3.2 左图展示了一级泵系统中水流方式。这种系统通常适用于小规模的建筑或者功能较单一、使用时间较一致的超高层建筑。

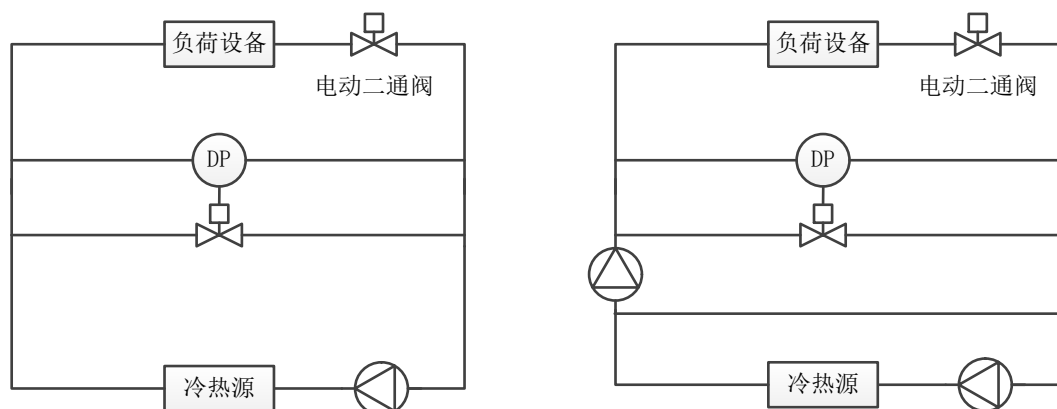


图 3.2 一级泵与多级泵系统示意图

多级泵系统将冷热源侧与负荷侧分成两个或者多个环路, 各个环路设置独立的循环水泵。图 3.2 右图展示了典型的一级二级泵系统。这种系统通常适用于规模较大、功能复杂、使用时间不一致的超高层建筑中。

(3) 管道布置方式

管道布置方式分为同程系统和异程系统。同程系统中供水与回水流经环路管道长度相等, 一般适用于对压差平衡要求较高的系统, 在高层建筑中由于空间受限, 使用较少。异程系统设计简单、管道空间要求小, 在高层建筑中使用较多。

同时, 管道布置方式也会考虑用户末端接管, 如二管制、四管制等。

3.2.4 冷热源设备的安装位置

冷热源设备的位置会对自己及其他组件的设计工作压力产生影响，进而影响了水系统的初投资。尽管从理论上说，冷热源可以安装在地下室，可以安装在顶层，也可以安装在任意一层，但是不同的位置对冷热源有着不同的影响。

以某栋高为 270m 的高层建筑为例，如图 3.3 所示，冷水机组有三种不同的安装位置：地下室、中间层、顶层。系统中还包括空气处理机组（AHU）、换热器等热处理组件。顶层的开式膨胀水箱处于系统的最高点。

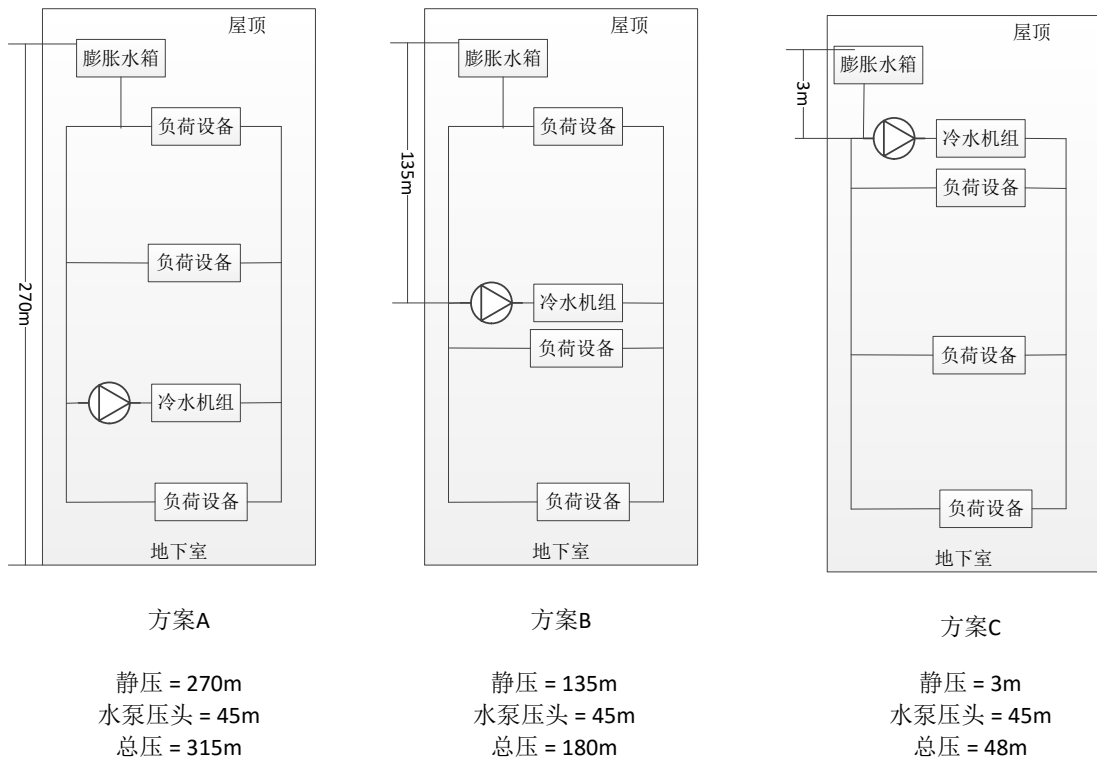


图 3.3 安装位置对冷热源设备承压能力的影响示意图

系统中，组件的工作压力为由高差引起的静压与由水泵产生的动压之和。在方案 A 中，冷水机组承受的压力为 315m（水静压为 270m，水泵的压头为 45m），方案 B 和 C 中冷水机组承压分别为 180m 和 48m。冷水机组的标准工作压力为 1.0MPa（约 100m），当承压超过 100m 时，设备厂家需要增加额外抗压设计来保证设备的运行安全。

本文将冷热源的位置定义为两个设计变量：能源站的位置及能源站的个数。能源站个数在工程上可以看做是冷热源站房的个数，在本文中，指的是独立冷水系统的个数。其中，每个能源站都有自己的冷热源组合方式。如图 3.3 所示，方案 A、B、C 都只有一个能源站，但是位置却各不相同。

3.2.5 断压板式换热器

水系统组件如冷水机组、管道、阀门等的初投资随着系统设计工作压力的增大而增大。尽管通过调整冷水机组的位置到一定高度，可以减少冷水机组的承压，但是却不能改变系统其他组件如管道、阀门、空气处理机组等所要承受最大压力值。通过使用板式换热器，将整个水系统分割成独立的压力分区，则可以减少所有组件所需要承受的最大压力值。

还以上述高为 270m 的高层建筑为例，如图 3.4 所示，当其水系统被分为三个垂直分区，冷水机组位于地下室时，每一个垂直分区仅需要承受值为建筑高度三分之一(90m)的水力静压。每个区的最大压头为 100m，约等于设计压力 1.0MPa。

但是，由于增加了额外的两个垂直分区，导致冷冻水供水温度的提升，最终将导致上层分区水流量的增加。因此，尽管板式换热器能够起到降低工作压力的作用，但是也降低了冷冻水的品质。

冷却水侧虽然也可以用换热器进行断压，但是现实中很少使用，一是因为冷却水侧的阀门及其他管道配件太少，不足以补偿增加一台换热器及二次侧水泵的费用，二是因为也会增加冷却水温度，导致冷水机组运行费用增加。

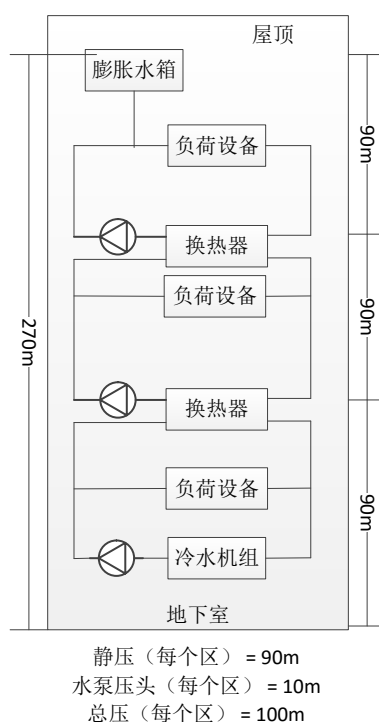


图 3.4 板式换热器断压对系统工作压力的影响示意图

3.2.6 其他影响因素

除了上述影响因素外，还有其他的一些因素能够影响空调系统配置的设计，如控制器设定温度点、系统温差等。

控制器温度设定点，如冷冻水供水温度、冷却水供水温度等，对组件的高效运行起着重要的调节作用。从冷水机组的角度，蒸发温度越高，冷凝温度越低，冷水机组的 COP 会越大，运行更节能，但是过高的蒸发温度会影响风侧性能，过低的冷凝温度也会增加冷却塔的能耗。

冷冻水和冷却水系统的温差对管道及管道配件的选型有着重大影响。温差越大，所需流量就越小，管道及相应配件的选型也越小。

3.3 本章小结

本章主要定义了空调水系统配置的含义，并在水系统配置的定义基础上对超高层建筑空调系统设计的影响因素进行分析。

3.1 小节中，主要将水系统配置抽象成三大组成部分。一是组件，包括传热组件（冷水机组等）及输配组件（水泵等）；二是拓扑结构，主要由输配组件根据流体流动方向组成的水利循环管网；三是运行策略，描述了系统的运行方式。

3.2 小节中，主要讨论了影响超高层建筑空调系统配置设计的因素，如水系统设计压力、冷热源选型及位置、水系统拓扑结构、断压板式换热器的运用以及其他影响因素。

通过上述分析，为下一章空调系统配置设计优化问题的建立，如优化变量的选择及简化，提供理论支持，

第4章 超高层建筑空调水系统配置设计优化

第3章中讨论了超高层建筑空调系统配置最优化设计的影响因素。在进行空调系统配置设计时，设计人员需要合理的权衡不同影响因素。这个过程其实就是优化设计的过程。因此，可以将系统配置设计看成是一个优化问题，优化目标是找到能够使建筑性能最优的空调系统配置。

本章主要讨论如何建立空调系统配置设计的最优化问题。

4.1 空调水系统配置建模

空调系统配置的性能模型是配置设计评估与优化的基础。配置模型的主要目的是验证运行数据和评估建筑性能或优化目标。由第3章可知，配置模型是由组件模型、拓扑结构以及运行控制策略组成。系统配置的拓扑结构是通过连接不同组件、形成水流管网实现的。本节将详细讨论系统配置模型、组件模型、拓扑结构、控制策略以及系统的求解算法。

4.1.1 组件模型

表4.1列出了用于本研究的所有组件及模型，具体计算方法参考下文：

表4.1 本文考虑的空调系统组件

类型	组件	组件 ID	具体信息
传热组件	冷水机组	1	电动离心式冷水机组
	板式换热器	5	逆流、顺流、混流板式换热器
	空气处理机组	4	冷盘管、热盘管、风机
	冷却塔	6	单速风机、双速风机冷却塔
	冷盘管	2	多工况冷盘管
	热盘管	3	---
输配组件	水泵	7	定频、变频水泵
	风机	8	定频、变频风机
	混合器	9	集水器、混合箱、三通阀
	分离器	10	分水器、三通阀
湿空气特性	湿空气特性计算	-	

(1) 冷水机组

冷水机组模型采用 DOE-2 模型，该模型因为在 DOE-2 模拟软件中使用而得名。DOE-2 模型使用三条性能曲线表征机组性能。三条曲线分别为 ChillerCapTemp（冷水机组制冷量关于温度的曲线），ChillerEIRFTemp（*EIR* 关于温度的曲线）和 ChillerEIRFPLR（*EIR* 关于部分负荷率 *PLR* 的曲线），如下所示：

- 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。

$$\begin{aligned} CapFTemp = a_0 + a_1 T_{chw,leave} + a_2 T_{chw,leave}^2 + a_3 T_{chw,enter} + \\ a_4 T_{chw,enter}^2 + a_5 T_{chw,leave} T_{chw,enter} \end{aligned} \quad (4.1)$$

- *EIR* 关于温度的函数。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上在标准工况下的 *EIR* 就可以得到在特定温度工况下的 *EIR* 值。

$$\begin{aligned} EIRFTemp = b_0 + b_1 T_{chw,leave} + b_2 T_{chw,leave}^2 + b_3 T_{chw,enter} + \\ b_4 T_{chw,enter}^2 + b_5 T_{chw,leave} T_{chw,enter} \end{aligned} \quad (4.2)$$

- *EIR* 关于部分负荷率 *PLR* 的曲线。这个曲线是 *PLR* 的二次函数。部负荷率（*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*。

$$EIRFPLR = c_0 + c_1 PLR + c_2 PLR^2 \quad (4.3)$$

在实际中，部分负荷率 *PLR* 的取值是受一定限制的，如下式：

$$PLR = \max(0, \min(\frac{Q_{evaporator}}{Cap_{available}}, PLR_{max})) \quad (4.4)$$

式中， $Q_{evaporator}$ 为蒸发器的传热量， $Q_{evaporator} / Cap_{available}$ 即为实际 *PLR*，当实际的 *PLR* 大于 *PLR* 的上限值时，将超出冷水机组的制冷能力。而当 *PLR* 小于时部分负荷率的下限值 PLR_{min} ，冷水机组将通过间歇运行来满足要求，这时冷机

在最低负荷率下运行，其间歇运行率如下：

$$Ratio_{cycling} = \min\left(\frac{PLR}{PLR_{min}}, 1\right) \quad (4.5)$$

基于上述公式，冷机在部分负荷情况下的运行能耗有下式计算：

$$Power = \frac{Cap_{available} \cdot EIRFTemp \cdot EIRFPLR \cdot Ratio_{cycling}}{COP_{nominal}} \quad (4.6)$$

(2) 冷盘管

一般来说，冷盘管模型需要计算盘管全干、盘管全湿以及盘管半干半湿三种工况。本文中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不在 5% 以内[45]，决定只模拟全干和全湿工况。冷盘管模型包含三个模块：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。

1) 设计 UA 值计算模块

冷盘管的设计 UA 值 UA_0 是通过设计条件下的进出口参数计算得到。已知盘管的设计参数，通过调用冷盘管性能计算模块，迭代计算求 UA_0 。冷盘管性能计算模块可参考下文。

2) 运行 UA 值计算模块

动态模拟中，冷盘管的流量随时间不断变化，因为盘管的 UA 值是空气侧和水侧流量的函数，所以运行 UA 值也在不断的变化。因此在每一个计算步长内，都需要调整运行 UA 值。具体方法如下。

用户需先定义对流传热比率 r 的值， r 的定义式如下：

$$r = \frac{\eta_f UA_{air}}{UA_{water}} \quad (4.7)$$

式中， η_f 指的是翅片效率。

因此，可通过下式计算出水侧和风侧在额定状态下的 UA 值：

$$UA_{water,0} = UA_0 \cdot \frac{r+1}{r} \quad (4.8)$$

$$\eta_f \cdot UA_{air,0} = r \cdot UA_{water,0} \quad (4.9)$$

运行 UA 值是两侧流量和进口温度的函数，具体计算方式如下：

$$x_{air} = 1 + 4.769 \cdot 10^{-3} (T_{air,in} - T_{air,in,0}) \quad (4.10)$$

$$\eta_f UA_{air} = x_{air} \left(\frac{m_{air}}{m_{air,0}} \right)^{0.8} (\eta_f \cdot UA_{air,0}) \quad (4.11)$$

$$x_{water} = 1 + \frac{0.014}{1+0.014T_{water,in,0}} (T_{water,in} - T_{water,in,0}) \quad (4.12)$$

$$UA_{water} = x_{water} \left(\frac{m_{water}}{m_{water,0}} \right)^{0.85} UA_{water,0} \quad (4.13)$$

$$UA = \left(\frac{1}{UA_{water}} + \frac{1}{\eta_f UA_{air}} \right)^{-1} \quad (4.14)$$

式中，下表 0 表示额定工况。

3) 冷盘管性能计算模型

冷盘管性能计算模型将计算冷盘管全干工况和全湿工况。首先根据冷盘管的进口条件判断冷盘管处于何种工况，其具体判断规则为：如果空气进口露点温度小于水侧进口温度，则为全干盘管；否则为全湿盘管。

全干逆流盘管的传热效率计算过程如下：

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1-Z))}{1 - Z \cdot \exp(-NTU(1-Z))} \quad (4.15)$$

$$T_{air,out} = T_{air,in} - \varepsilon \frac{C_{min}(T_{air,in} - T_{water,in})}{C_{air}} \quad (4.16)$$

$$T_{water,out} = T_{water,in} - \varepsilon \frac{C_{min}(T_{air,in} - T_{water,in})}{C_{water}} \quad (4.17)$$

式中，

$$C_{air} = Cp_{air} \cdot m_{air} \quad (4.18)$$

$$C_{water} = Cp_{water} \cdot m_{water} \quad (4.19)$$

$$C_{min} = \min(C_{air}, C_{water}) \quad (4.20)$$

$$C_{max} = \max(C_{air}, C_{water}) \quad (4.21)$$

$$Z = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (4.22)$$

$$NTU = UA / C_{min} \quad (4.23)$$

干盘管进出口空气绝对湿度不变，因此，

$$W_{air,out} = W_{air,in} \quad (4.24)$$

湿盘管中，需要处理潜热负荷。因此，模型中定义了新的概念：基于焓值的盘管 UA 值 $UA_{Enthalpy}$ ，整个过程计算如下：

$$h_{air,in,dew} = f(T_{air,in,dew}) \quad (4.25)$$

$$h_{water,sat} = f(T_{water,in}) \quad (4.26)$$

$$Cp_{sat} = \frac{h_{air,in,dew} - h_{water,in,sat}}{T_{air,in,dew} - T_{water,in}} \quad (4.27)$$

$$UA_{Enthalpy} = \left(\frac{Cp_{sat}}{UA_{water}} + \frac{Cp_{air}}{\eta_f UA_{air}} \right)^{-1} \quad (4.28)$$

计算出 $UA_{Enthalpy}$ 之后，将之代入式(4.23)中，可算出湿盘管相对应的 NTU 值，然后求解湿盘管空气出口焓值 $h_{air,out}$ 。已知空气出口焓值后，可根据下列式子计算空气出口温度及湿度等状态：

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{UA_{air}}{C_{air}}\right) \quad (4.29)$$

$$h_{air,condensation} = h_{air,in} - \frac{(h_{air,in} - h_{air,out})}{\eta} \quad (4.30)$$

$$T_{air,condensation} = f(h_{air,condensation}) \quad (4.31)$$

$$T_{air,out} = T_{air,in} - \eta(T_{air,in} - T_{air,condensation}) \quad (4.32)$$

$$w_{air,out} = f(h_{air,out}, T_{air,out}) \quad (4.33)$$

上述各式中，下标 sat ， dew 和 $condensation$ 分别表示饱和湿空气状态，露点状态和冷凝状态。

(3) 热盘管

本文中采用 ε -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 ε 。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 值计算模块可参考冷盘管部分。热盘管性能计算模块如下。

热盘管传热效率为：

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{e^{-Z \cdot NTU^{0.78}} - 1}{Z \cdot NTU^{-0.22}}\right) \quad (4.34)$$

式中， Z 及 NTU 可参考式 (4.22) 和 (4.23)。

计算完传热效率，可通过下式计算热盘管出口条件：

$$T_{air,out} = T_{air,in} + \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{water,in} - T_{air,in}) / C_{air} \quad (4.35)$$

$$T_{water,out} = T_{water,in} - C_{air} \cdot (T_{air,out} - T_{air,in}) / C_{water} \quad (4.36)$$

(4) 换热器

本文采用典型的 ε - NTU 模型来计算换热器的效率及出口条件。

由于实际的换热系数和两侧的流量有很强的关系，因此，换热系数需要进行修正：

$$UA = UA_0 \cdot \left(\frac{m_{cold}}{m_{cold,0}}\right)^a \cdot \left(\frac{m_{hot}}{m_{hot,0}}\right)^b \quad (4.37)$$

然后，对于不同换热器形式（如，逆流、顺流等）其相应的计算公式也不尽相同。本课题中只用到了逆流换热器，其计算方式如下：

$$C_{cold} = m_{cold} \cdot Cp_{cold} \quad (4.38)$$

$$C_{hot} = m_{hot} \cdot Cp_{hot} \quad (4.39)$$

$$C_{max} = \max(C_{cold}, C_{hot}) \quad (4.40)$$

$$C_{min} = \min(C_{cold}, C_{hot}) \quad (4.41)$$

$$Z = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (4.42)$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (4.43)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU \cdot (1 - Z)]}{1 - Z \cdot \exp[-NTU \cdot (1 - Z)]} \quad (4.44)$$

接着，总的换热量和出口状态：

$$Q = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \quad (4.45)$$

$$T_{hot,out} = T_{hot,in} - \frac{Q}{C_{hot}} \quad (4.46)$$

$$T_{cold,out} = T_{cold,in} + \frac{Q}{C_{cold}} \quad (4.47)$$

式中， C_{cold} 和 C_{hot} 分别是冷水和热水的比热容量， a 和 b 为经验公式所得的指数，下标 out 和 in 代表了出口和进口。

在这个模型中，需要给定三个参数： UA_0 、 a 和 b 。 UA_0 可以根据设计工况下的换热性能数据计算求得。

(5) 冷却塔

冷却塔模型采用逆流换热器的 ε - 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，这是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形插值来进行计算。

稳态情况下，空气和水的全热换热量可以由下式进行计算：

$$dQ_{total} = \frac{U \cdot dA}{Cp_{air}} (h_{sat} - h_{air}) \quad (4.48)$$

式中：

h_{sat} ：在湿表面温度情况下，饱和空气的焓值，J/kg

h_{air} ：在自然对流情况下，空气的焓值，J/kg

Cp_{air} ：湿空气的比热容，J/kg $^{\circ}C$

U ：冷却塔的传热系数，W/m 2 $^{\circ}C$

A ：换热面积，m 2

在这个模型中，假定湿空气的焓值是湿球温度的单值函数，并且湿空气被看做理想气体，其平均比热有下式计算得到：

$$\bar{C}p_e = \frac{\Delta h}{\Delta T_{wb}} = \frac{h_{air,in} - h_{air,out}}{T_{wb,in} - T_{wb,out}} \quad (4.49)$$

式中,

Δh : 空气进入冷却塔和离开冷却塔的焓值之差, J/kg

ΔT_{wb} : 空气进入冷却塔和离开冷却塔的湿球温度之差, °C

由于液体侧的传热系数远远大于气体侧的传热系数, 因此湿表面的温度被认为等于水温。基于这个假设, 全热换热量变为:

$$dQ_{total} = U_e \cdot dA \cdot (T_{water} - T_{wb}) \quad (4.50)$$

$$U_e = \frac{U \cdot \bar{C}p_e}{Cp_{air}} \quad (4.51)$$

式中,

T_{wb} = 空气湿球温度, °C

T_w = 水温, °C

由空气侧和水侧的能量平衡可得下面公式:

$$dQ_{total} = m_{water} \cdot Cp_{water} \cdot dT_{water} \quad (4.52)$$

$$dQ_{total} = m_{air} \cdot \bar{C}p_e \cdot dT_{wb} \quad (4.53)$$

式中,

m_{water} : 水的质量流量, kg/s

m_{air} : 空气的质量流量, kg/s

假定水的比热容量(mc_p)小于空气的, 类比简单换热器的效率定义公式, 冷却塔的换热效率可以定义为:

$$\varepsilon = \frac{T_{water,in} - T_{water,out}}{T_{water,in} - T_{wb,in}} \quad (4.54)$$

式中

ε : 换热效率

$T_{water,in}$: 进水温度, °C

$T_{water,out}$: 出水温度, °C

$T_{wb,in}$: 空气入口处的湿球温度, °C

综合上述公式, 并在换热面积上积分, 可以得到冷却塔的效率计算公式:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left\{-NTU \cdot \left[1 - \left(\frac{C_{water}}{C_{air}}\right)\right]\right\}}{1 - \left(\frac{C_{water}}{C_{air}}\right) \exp\left\{-NTU \cdot \left[1 - \left(\frac{C_{water}}{C_{air}}\right)\right]\right\}} \quad (4.55)$$

式中,

$$\begin{aligned} C_{water} &= m_{water} \cdot C_{p_{water}} \\ C_{air} &= m_{air} \cdot \bar{C}_{p_e} \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$NTU = \frac{UA_e}{C_{water}} \quad (4.57)$$

公式 4.55 和间接接触的逆流换热器的效率计算公式 4.44 一致, 因而, 在静态情况下, 冷却塔可以用一个等价的逆流换热器进行模拟, 如图 4.1 所示。



图 4.1 冷却塔简化图

模型中第一个流体是水, 第二个流体是一个当量流体, 其进入换热器的温度是 $T_{wb, in}$, 比热是 C_{p_e} 。这个换热器只需要一个参数—它的换热系数和面积乘积: UA_e 。实际的换热系数和面积的乘积 UA 与 UA_e 有下述关系:

$$UA = UA_e \cdot \frac{C_{p_{air}}}{\bar{C}_{p_e}} \quad (4.58)$$

模型中认为 UA 仅仅是空气质量流量的函数, 只能通过实验测试或工厂所提供的数据来进行估计。

冷却塔模型的目的是计算冷却水出水状态和风机能耗。因为在实际计算中, 只有进水状态和空气进口状态是已知的, 因而, 需要用上述提到的公式进行迭代计算来确定流体出口状态—空气侧出口的湿球温度。然后, 水侧出口的湿球温度用能量守恒公式来进行计算, 详细计算如下:

第一步, 用周围空气湿球温度来计算空气进入冷却塔时的焓值。由于需要进行迭代求解, 空气侧出口焓值的初始值需要给定, 由空气进口焓值和出口焓值(式

4.49) 可以算出空气的平均比热 \bar{C}_{p_e} :

然后, 由用户输入的换热系数和面积乘积 UA , 有效换热系数和面积乘积可以用式 4.59 计算得:

$$UA_e = \frac{UA \cdot \bar{C}_{p_e}}{C_{p_{air}}} \quad (4.59)$$

最后, 当 \bar{C}_{p_e} 和 UA_e 算出来之后, 通过式 4.56 和 4.57 就可以计算出换热效率:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left\{-NTU \cdot \left[1 - \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]\right\}}{1 - \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \cdot \exp\left\{-NTU \cdot \left[1 - \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]\right\}} \quad (4.60)$$

总的换热量由式 4.61 可得:

$$Q_{total} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{water,in} - T_{wb,in}) \quad (4.61)$$

空气出口处的湿球温度为:

$$T_{wb,out} = T_{wb,in} + \frac{Q_{total}}{C_{air}} \quad (4.62)$$

上述整个过程不断迭代, 直至收敛。

最终, 计算水侧出口温度:

$$T_{water,out} = T_{water,in} + \frac{Q_{total}}{C_{water}} \quad (4.63)$$

为了让冷却水出水温度正好为用户设定点, 本模型首先计算“自然对流”情况下的出水温度。如果所得结果小于设定的出水温度, 则风机不需要开启, 反之, 开启风机。然后, 计算风机开启时的冷却水出水温度。比较所得结果和用户设定的出水温度点, 如果小于设定点, 则需要冷却塔间歇运行来满足要求。冷却塔的

开启率用下式 4.64 计算：

$$\theta = \frac{T_{set} - T_{water,out,off}}{T_{water,out,on} - T_{water,out,off}} \quad (4.64)$$

式中，

T_{set} : 出水温度， $^{\circ}\text{C}$

$T_{water,out,off}$: 风机关闭时的出水温度， $^{\circ}\text{C}$

$T_{water,out,on}$: 风机开启时的出水温度， $^{\circ}\text{C}$

最后，给风机的额定功率乘上计算所得的开启率 ω ，可以得到风机的平均能耗：

$$P_{fan} = \theta \cdot P_{fan,on} \quad (4.65)$$

式中，

P_{fan} : 某一时间步长的风机能耗，W；

$P_{fan,on}$: 在名义工况下的风机能耗，W。

(6) 水泵

如图 4.2 所示，一个典型的变速水泵有三个子效率组成，包括：水泵效率 (η_{pump})、电机效率 (η_{motor}) 和变频效率 (η_{VFD})。

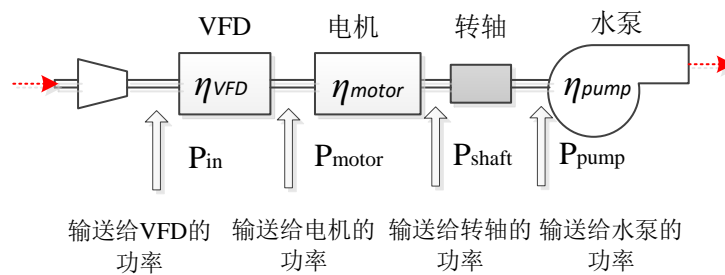


图 4.2 典型变频水泵的构造

对于一个变频水泵来讲，设计转速是指在水泵经常在这个转速下运行。水泵压头、效率和流量都是指设计转速下的，可以有下式分别计算：

$$H_{design} = \sum a_i \cdot Q_0^i (i=0, \dots, n) \quad (4.66)$$

$$\eta_0 = \sum b_j \cdot Q_0^j (j=0, \dots, n) \quad (4.67)$$

当水泵运行状况不是设计转速时，实际压头以及流量可以由相似律进行计算：

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0} \right) \quad (4.68)$$

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (4.69)$$

相似地，水泵的效率也根据转速发生改变，由下式计算：

$$\eta_{pump} = \eta_0 \left[\sum c_k \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^k \right] \quad (4.70)$$

水泵的总能耗有下式计算：

$$P_{pump} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{pump} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{VFD}} \quad (4.71)$$

式中，

$$\eta_{motor} = d_1 \left(1 - e^{-d_2 \frac{N}{N_0}} \right), \quad (4.72)$$

$$\eta_{VFD} = \sum e_m \left(\frac{N}{N_0} \right)^m (m=0, \dots, n) \quad (4.73)$$

H 是水泵压头， N 是水泵转速， a, b, c, d 和 e 都是系数，可通过相应产品参数拟合得到。下标 $pump, motor, VFD$ 和 0 分别代表着水泵、电机、变速和设计工况。

(7) 变频风机

变频风机与变频水泵类似，其效率也是由几个部分组成：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。

1) 风扇效率与轴功模型

采用欧拉数来简化风机静压效率的变化：

$$Eu = \frac{\Delta p_{fan} \cdot D_{fan}^4}{\rho \cdot Q_{fan}^2} \quad (4.74)$$

式中, Δp_{fan} 是风机静压(Pa), D_{fan} 是风机叶轮外径(m), ρ 是在风机进口处的空气密度(kg/m^3), Q_{fan} 是在标准工况下的空气流量(m^3/s)。Eu名义上是压力和惯性力的比值。

文献[45]显示不同尺寸风机的标准化静压效率(静压效率/最大静压效率)和标准欧拉数(Eu/Eu_{max} , Eu_{max} 是最大静压效率时的欧拉数)的对数之间的曲线是类似的。该曲线可用一个连续性方程来表示:

$$\frac{\eta_{fan}(x_{fan})}{\eta_{fan,max}} = \frac{e^{(-0.5Z_1^2)} \left[1 + \frac{Z_2}{|Z_2|} \cdot erf \left(\frac{|Z_2|}{\sqrt{2}} \right) \right]}{e^{(-0.5Z_3^2)} \left[1 + \frac{Z_3}{|Z_3|} \cdot erf \left(\frac{|Z_3|}{\sqrt{2}} \right) \right]} \quad (4.74)$$

式中,

$$x_{fan} = \log_{10} \left(\frac{Eu}{Eu_{max}} \right) \quad (4.75)$$

$$Z_1 = \frac{x_{fan} - a_{fan}}{b_{fan}} \quad (4.76)$$

$$Z_2 = \frac{e^{c_{fan} \cdot x_{fan}} d_{fan} x_{fan} - a_{fan}}{b_{fan}} \quad (4.77)$$

$$Z_3 = \frac{-a_{fan}}{b_{fan}} \quad (4.78)$$

对于概念设计,通常只需要粗糙的估计即可,采用一个只需要知道最大效率和最大工况下的欧拉数就可以计算风机效率和风机能耗的通用公式。这个通用公式的系数如下:

$$a_{fan} = -2.732094, b_{fan} = 2.273014, c_{fan} = 0.196344, d_{fan} = 5.267518$$

为了确定在某一特定时间步长内的风机效率和轴功,首先需要计算风机的压头(ΔP_{fan})。然后,计算欧拉数,将其标准化之后对其取对数。相应的标准化的风

机效率可以用下式计算得出：

$$\eta_{fan}(x_{fan}) = \eta_{fan,max} \left[\frac{\eta_{fan}(x_{fan})}{\eta_{fan,max}} \right] \quad (4.79)$$

风机轴功输入：

$$P_{fan} = \frac{\Delta P_{fan} \cdot Q_{fan}}{\eta_{fan}(x_{fan})} \quad (4.80)$$

2) 风机转轴模型

对于转动的物体，功耗是转矩(τ)和转速(ω)的乘积。Stein 和 Hydeman 的变频模型将变频(VFD)效率和变频输出能耗用线性函数联系起来[46]。数据显示VFD效率是电机转速的函数($\omega_{motor}/\omega_{motor,max}$)。Stein 和 Hydeman 的线性函数假设电机转速和转矩有固定的关系，即部分转矩(τ/τ_{max})和其电机转速的平方有关系。

对于风机，无量纲流量定义为：

$$\varphi = \frac{V_{fan}}{\omega_{fan} \cdot D_{fan}^3} \quad (4.81)$$

式中， ω_{fan} 是风机转速(rad/s)。这些参数可以利用工厂提供的性能数据来进行计算。无量纲流量(流量除以最大流量($\varphi(x_{spd})/\varphi_{max}$))和标准化欧拉数的对数(x_{fan})有如下关系：

$$\frac{\varphi(x_{fan})}{\varphi_{max}} = a_{spd} + \frac{b_{spd}}{1 + e^{\left[\frac{c_{spd} - x_{spd}}{d_{spd}} \right] \cdot e_{spd}}} \quad (4.82)$$

式中， a_{spd} , b_{spd} , c_{spd} , d_{spd} 和 e_{spd} 都是风机的参数。

对于任意的运行工况，我们可以根据流量(V_{fan})和压降(Δp_{fan})计算出欧拉数 Eu ，然后确定相应的标准化之后的无量纲流量($\varphi(x_{spd})/\varphi_{max}$)，最后根据式(4.82)和已知的最大流量 φ_{max} 确定风机的实际流量。

$$\varphi(x_{fan}) = \varphi_{\max} \left[\frac{\varphi(x_{fan})}{\varphi_{\max}} \right] \quad (4.83)$$

实际流量确定之后，风机的转速计算如下：

$$\omega_{fan} = \frac{V_{fan}}{\varphi(x_{fan}) \cdot D_{fan}^3} \quad (4.84)$$

接着，皮带传送给风扇转轴的转矩可通过下式计算：

$$\tau_{fan} = \frac{H_{fan}}{\omega_{fan}} \quad (4.85)$$

转矩相对全负荷的比率（一般称作“皮带负荷”），可以用上式计算所得的转矩除以皮带转矩的最大容量得到 $(\tau_{fan}/\tau_{belt,max})$ 。

忽略皮带滑动，电机的转速就可以用风机的转速和电机/风扇的皮带轮直径比率计算得到，如式(4.86)所示：

$$\omega_{motor} = \frac{\omega_{fan}}{\left(\frac{D_{pulley,motor}}{D_{pulley,fan}} \right)} \quad (4.86)$$

3) 皮带效率和功率输入模型

为了计算皮带的最大效率 $\eta_{belt,max}$ ，我们首先需要用最大风机轴功 $(P_{fan,max})$ 来计算皮带做功的自然对数：

$$x_{belt,max} = \ln(P_{fan,max}) \quad (4.87)$$

然后，根据皮带的参数计算皮带的最大效率 $\eta_{belt,max}$

$$\eta_{belt,max,\ln} = c_1 + c_2 x_{belt,max} + c_3 x_{belt,max}^2 + c_4 x_{belt,max}^3 + c_5 x_{belt,max}^4 \quad (4.88)$$

转换成指数形式即为：

$$\eta_{belt,max} = e^{\eta_{belt,max,\ln}} \quad (4.89)$$

用标准化的部分负荷皮带效率模型来修正最大效率。为了确定在部分负荷下皮带标准化之后的效率，用风机部分转矩($x_{belt} = \tau_{belt}/\tau_{belt,max}$; $\tau_{belt}=\tau_{fan}$)代替皮带部分负荷，然后利用相应皮带类型的效率参数来计算。

根据 x_{belt} 的大小，可分成三个区域。区域 1, 2, 3 各自的计算公式如下：

区域 1($0 \leq x_{belt} < x_{belt,tran}$) 和区域 3($x_{belt} > 1$)

$$\frac{\eta_{belt}(x_{belt})}{\eta_{belt,max}} = \frac{a_{belt} \cdot x_{belt}}{b_{belt} + x_{belt}} + c_{belt} \cdot x_{belt}$$

区域 2 ($x_{belt,trans} \leq x_{belt} \leq 1$)

$$\frac{\eta_{belt}(x_{belt})}{\eta_{belt,max}} = a_{belt} + b_{belt} e^{c_{belt} \cdot x_{belt}}$$

式中

$$x_{belt} = \frac{\tau_{belt}}{\tau_{belt,max}}$$

例如，某 V 型皮带的拟合参数如下表所示：

表 4.2. 某 V 型皮带效率模型拟合参数

皮带类型	$x_{belt,trans}$	区域	a_{belt}	b_{belt}	c_{belt}
V-Belt	0.167	1	0.920797	0.026269	0.151594
		2	1.011965	-0.33904	-3.43626
		3	1.037778	0.010307	-0.02682

因此，皮带效率为：

$$\eta_{belt}(x_{belt}) = \eta_{belt,max} \left[\frac{\eta_{belt}(x_{belt})}{\eta_{belt,max}} \right] \quad (4.90)$$

皮带电功输入为:

$$P_{belt} = \frac{P_{fan}}{\eta_{belt}(x_{belt})} \quad (4.91)$$

4) 电机效率和电功输入模型

计算电机的最大效率 $\eta_{motor,max}$, 首先需要用最大皮带输入功($P_{belt,max}$)来计算皮带做功的自然对数:

$$x_{motor,max} = \ln(P_{belt,max}) \quad (4.92)$$

然后, 用根据电机的拟合公式系数来计算 $\eta_{motor,max}$

$$\eta_{motor,max} = \frac{a_{motor,max} \cdot x_{motor,max}}{b_{motor,max} + x_{motor,max}} + c_{motor,max} \quad (4.93)$$

式中的拟合参数可参考文献[45]。

用标准化的部分负荷下的电机效率模型来修正电机的最大效率。为了确定在部分符合下电机的标准化效率($\eta_{motor}(x_{motor})/\eta_{motor,max}$), 用皮带功的分数($x_{motor} = P_{belt} / P_{belt,max}$)作为电机输出功。然后利用下式以及相应的拟合参数来计算。

$$\frac{\eta_{motor}(x_{motor})}{\eta_{motor,max}} = \frac{a_{motor} \cdot x_{motor}}{b_{motor} + x_{motor}} + c_{motor} \cdot x_{motor} \quad (4.94)$$

因此, 可计算出电机效率为:

$$\eta_{motor}(x_{motor}) = \eta_{motor,max} \left[\frac{\eta_{motor}(x_{motor})}{\eta_{motor,max}} \right] \quad (4.95)$$

电机输入功

$$P_{motor} = \frac{P_{belt}}{\eta_{motor}(x_{motor})} \quad (4.96)$$

5) 风机的变频效率和输入功模型

对于变频风机, 能够找到的资料比较有限。DOE[45]建议使用类似于电机效

率模型的方法来计算变频器效率,即使用部分电机输入功($x_{VFD} = P_{motor}/P_{motor,max}$),或者电机的部分转速($x_{VFD} = \omega_{motor} / \omega_{motor,max}$)来计算,如下式。

$$\eta_{VFD} = \frac{a_{VFD} \cdot x_{VFD}}{b_{VFD} + x_{VFD}} + c_{VFD} \cdot x_{VFD} \quad (4.97)$$

因此变频输入功:

$$P_{VFD} = \frac{P_{motor}}{\eta_{VFD}} \quad (4.98)$$

综上,变频风机的总效率计算公式为:

$$\eta_{total} = \eta_{fan} \cdot \eta_{belt} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{VFD} \quad (4.99)$$

(8) 湿空气特性计算

湿空气的特性主要通过湿空气特性及气体状态方程进行计算。本文编写了如表 4.3 所示的计算模型。

表 4.3 湿空气及水特性计算模型

序号	名称	描述
1	PsychCpAirFuTdbW	已知干球温度和湿度,计算湿空气比热值
2	PsychCpWater	已知水温,计算水的比热值
3	PsychHFuTdbRH	已知干球温度和相对湿度,计算湿空气焓值
4	PsychHFuTdbW	已知干球温度和湿度,计算湿空气焓值
5	PsychRHFuTdbTwb	已知干球温度和湿球温度,计算相对湿度
6	PsychRHFuTdbW	已知干球温度和湿度,计算相对湿度
7	PsychTdbFuHRH	已知焓值和相对湿度,计算干球温度
8	PsychTdbFuHW	已知焓值和湿度,计算干球温度
9	PsychTdpFuTdbRH	已知干球温度和相对湿度,计算露点温度
10	PsychTdpFuWP	已知湿度和气体压力,计算露点温度
11	PsychTwbFuTdbW	已知干球温度和湿度,计算湿球温度
12	PsychWFuTdbH	已知干球温度和焓湿,计算湿度
13	PsychWFuTdbRH	已知干球温度和相对湿度,计算湿度
14	RhoAirFuTdbWP	已知干球温度、湿度和气体压力,计算空气密度
15	RhoWater	已知水温,计算水密度

(9) 压力模型

这个系统中的压力模型都采用下述格式:

$$\Delta p = S \cdot m^2 \quad (4.100)$$

式中, S 是系数, m 表示了流体的质量流量(kg/s), Δp 是组件的压力损失(Pa)。

(10) 初投资模型

本文中的组件初投资数据均来自 *RSMeans Mechanical Cost Data book*^[47]。根据数据本文建立了组件初投资 (\$) 与相应自变量的多次曲线关系, 模型如下:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (4.101)$$

式中, y 表示初投资 (\$), x 是各组件中与初投资相关的变量, 系数向量 \vec{a} 为初投资方程拟合系数。其中, 部分组件的 \vec{a} 与 x 的取值如表 4.4 所示。

表 4.4 各组件初投资模型详细参数

组件	\vec{a}	R ²	x	x 范围
冷机	[-13585,453.64,0]	0.9922	设计容量, ton	[400,2500]
水泵	3700*[1.0582,10.759,-14.888]	0.9564	设计流量, m ³ /s	[0.002,0.1]
板换	34800*[0.0622,37.664,-66.756]	0.9962	设计流量, m ³ /s	[0.02,0.2]
冷却塔	[4127.4,122.7,0]	0.9923	设计容量, ton	[50,1000]
AHU	4150*[0.7569,0.7154,0]	0.9978	设计风量, m ³ /s	[0.75,36]
VFD	[1783.5,177.33,-0.2995]	0.9856	设计功率, hp	[3,200]

4.1.2 拓扑结构形式

作者在 1.4 章节中指出, 系统配置设计是一个多层次的优化问题, 而且必须在“上层”拓扑结构确定之后, 才能对“下层”组件进行选型及参数设定。影响拓扑结构形式的因素有很多, 可详见 3.2.3。为了简化研究目标, 作者只采用异程式、二管制的管道布置方式。

在确定水系统的拓扑结构时, 还做了以下简化:

- (1) 因为二级板换的性价比低, 在超高层建筑中很少使用, 因此本文只考虑二级或更低板换设置, 即只考虑最多连续两次的换热器热品质交换;
- (2) 理论上水系统垂直分区分区的越多, 对各分区设备的承压能力的要求就

越低。因此，当设计压力一定时，垂直分区个数存在一个最小值，能够保证各分区正好满足设计压力需求，此时，如果继续增加垂直分区个数，分区的压力将减小，小于设计压力值；垂直分区个数增加的上限是高层的层数，此时，对设备的承压能力要求最低，但是由于各设备的标准承压能力为 1.0MPa（表 3.1），意味着可承受 100m 左右的压力，因此垂直分区个数并没有必要取到上限值。综上分析，知垂直分区个数选取的原则是在保证满足设计压力等级的情况下，使尽可能多的分区在较低等级的压力下工作。本文只考虑最小垂直分区个数，即分区压力正好处于设计压力等级的情况。最小垂直分区个数的计算方式如下：

$$\frac{\sum_i^n H_{floor}}{N} + H_{head} \leq H_{design} \quad (4.102)$$

$$N_{minimum} = \frac{\sum_i^n H_{floor}}{H_{design} - H_{head}}$$

式中，

N : 垂直分区个数；

H_{head} : 水泵扬程，m；

H_{floor} : 建筑层高，m；

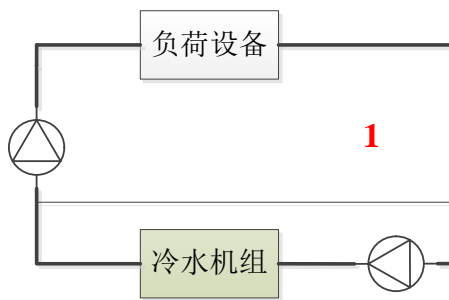
H_{design} : 设计压力，m；

考率到超高层建筑总高在 600m 左右，且设备标准承压在 1.0MPa(100m)，本文对最小垂直分区个数的最大值限定为 6。

- (3) 冷热源的安装位置对冷水机组的承压能力要求有着很大影响。冷热源的位置涉及两个设计变量：能源站的位置及能源站的个数。本文规定能源站处于分区底层，能源站的个数不多于 2 个。
- (4) 每个分区都安装了一个高于系统最高点的虚拟膨胀水箱，用于水泵进口定压及储存膨胀水，但是膨胀水箱并未在系统中进行模拟计算。

在合理的简化之后，水系统拓扑结构形式就变得非常有限。例如，常见的一级二级泵水系统的拓扑结构有 12 种形式，如下图所示：

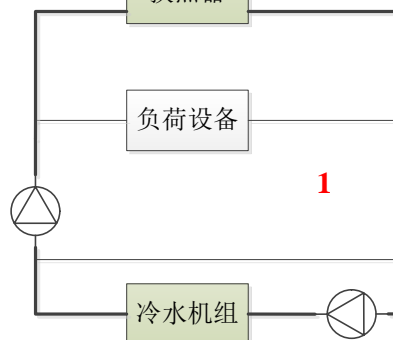
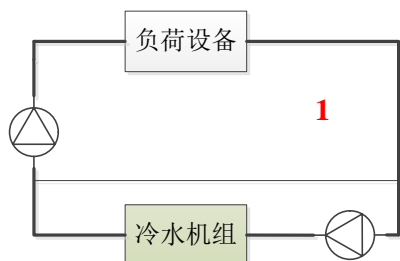
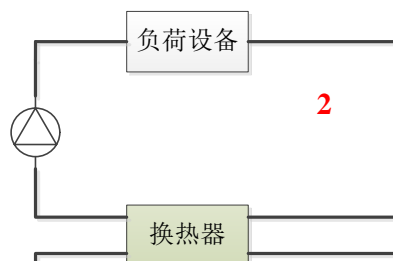
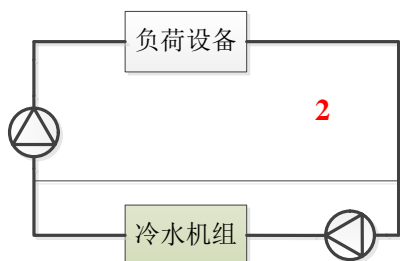
- (1) 1 个最小垂直分区，1 个能源站



拓扑结构变量值: [1 1 1]

图 4.3 1 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

(2) 2 个最小垂直分区



拓扑结构变量值: [2 2 1]

拓扑结构变量值: [2 1 1]

图 4.4 2 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

(3) 3 个最小垂直分区

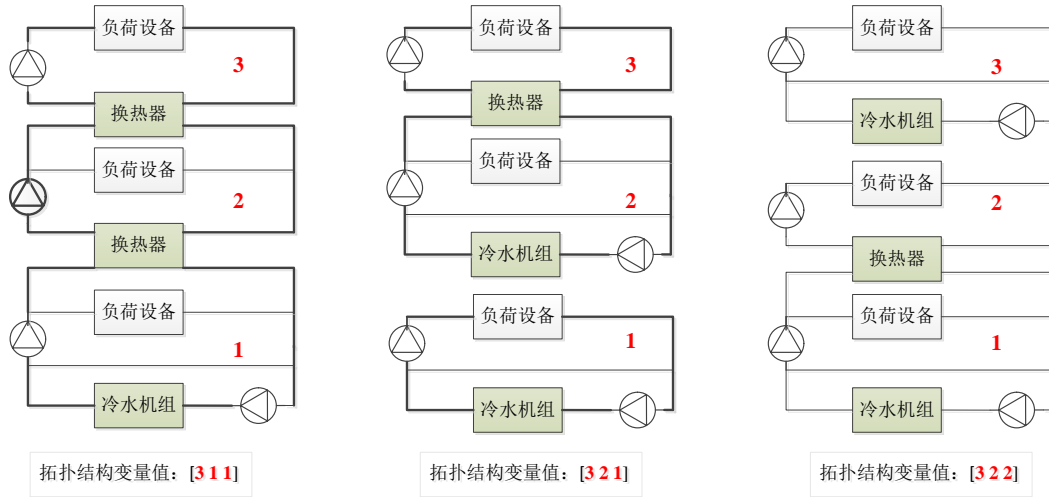


图 4.5 3 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

(4) 4 个最小垂直分区

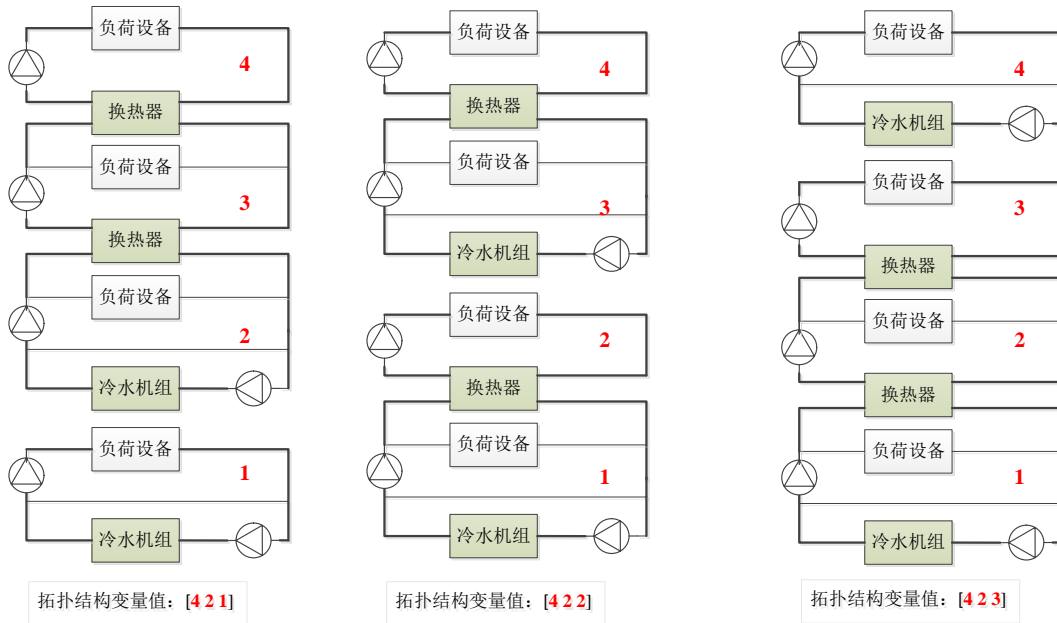


图 4.6 4 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

(5) 5 个最小垂直分区

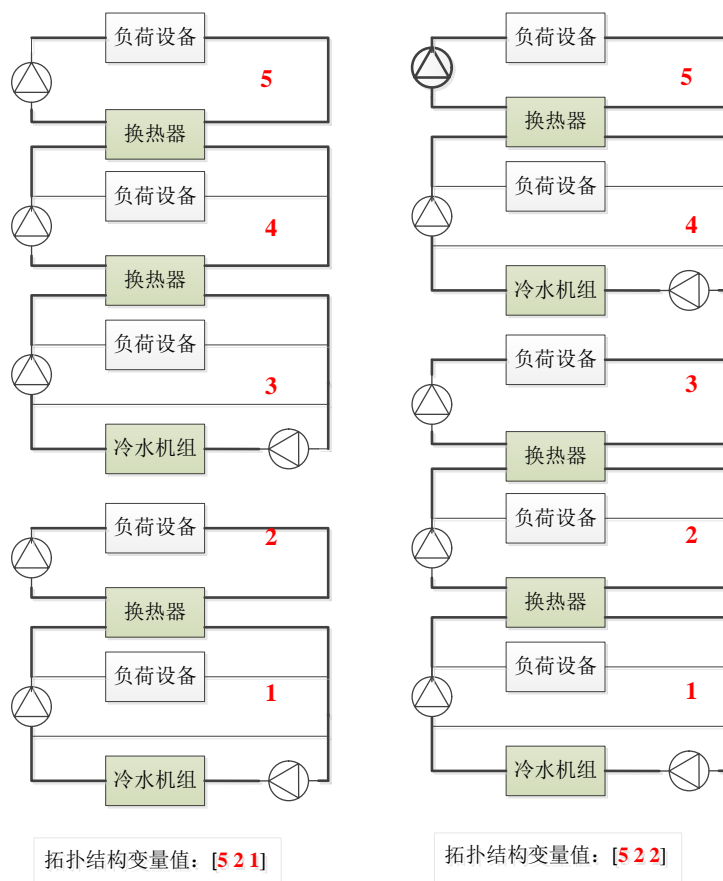


图 4.7 5 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

(6) 6 个最小垂直分区

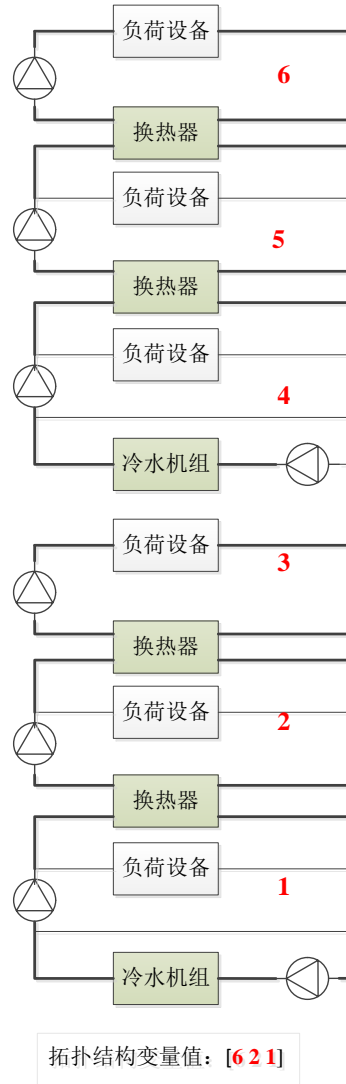


图 4.8 6 个最小垂直分区的可能拓扑结构形式

由上述各图可以发现，除了冷水机组所在分区，每个垂直分区的连接方式几乎相同。为了模拟需要，本文将相似分区处理成分区组件，方便在优化过程中根据分区个数调用计算。分区组件的示意图如 4.9 所示，由负荷设备、水泵、管道及换热器热侧连接而成，在进行模拟计算时，做了如下假设：

- 负荷设备如 AHU，通过调节二次水流量达到送风温度设定值；
- 在进行分区组件计算时，认为换热器热侧出水温度能达到温度设定值；
- 最不利环路的压差设定值在模拟过程中固定不变。

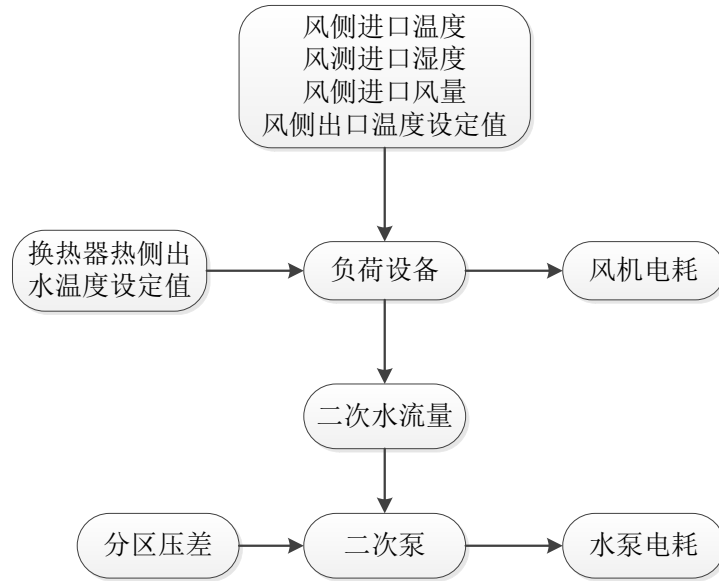


图 4.9 垂直分区组件的计算流程

4.1.3 运行控制策略

空调系统配置的运行控制策略指的是系统随外界环境变化而控制目标值不变或者在一定范围内波动的方法。空调系统运行控制对系统的性能有着重大影响。通常，对于复杂的空调系统，监督优化控制策略可以保证系统高效的运行。根据系统模型和干扰变量，监督优化控制策略可以全局动态地调节控制点的设定值，使得系统一直处于高效率的状态。本文采用监督优化控制器设定值来描述系统的运行。这种虚拟的“监督优化控制器”使得控制过程变得理想化，而这一点在设计过程中是可以接受的。

本文在使用“监督优化控制器”时做了以下假设：

- 空调系统配置的运行策略是基于监督优化控制的；
- “监督优化控制器”可以获取系统中所有的参数及变量；
- 系统中的所有的热质交换过程，以及水流量都是可以控制的；
- 优化过程中，“监督优化控制器”通过收集负荷及环境参数，决定可控组件的最优设定点；

通过这种方法，空调系统配置中的控制系统就可以简化为对运行工况可控组件的设定值进行优化计算。

除了可控组件设定点的控制，本文还对冷水机组、水泵、换热器及冷却塔等

组件进行启停序列控制。

(1) 冷水机组序列控制

超高层建筑空调系统会安装多组冷水机组以满足不同负荷率时的开启需求。冷水机组序列控制指的是当负荷变化时控制哪台机组开启或者停止的策略。

以一级、二级泵系统为例，本文根据空调系统设计的需要，为尽可能减少旁通管逆流现象，采用基于旁通管流量的控制方法。正常运行情况下，大部分冷冻水都会流向二次水环路，小部分冷冻水则通过旁通管顺流回冷水机组。当负荷增加时，二次水环路的流量增大，当二次水流量超过一次水流量时，二次水回水就会从旁通管逆流回供水端。因此，旁通管逆流意味着正在运行的冷机不足以提供现在的冷负荷所需要的冷量，需要增开机组；当负荷降低时，二次水环路的流量减少，旁通管顺流水量将增大，当顺流流量太大时，冷机提供的冷量远大于建筑需求，这时，需要关闭一台机组。机组启停的原则如下：

- 开机原则：如果逆流持续时间大于预先设定临界值，那么开启一台冷水机组；
- 关机原则：如果顺流流量大于冷水机组额定流量的 1.1~1.2 倍，且持续时间大于预先设定临界值，那么关闭一台冷水机组。

(2) 二次泵序列控制

二次泵序列控制包含两个部分：转速控制和启停控制。

转速控制是通过分区最不利环路的压差来控制二次泵的转速。由于并未模拟控制器等相关组件，可通过迭代计算求出二次泵转速，此过程可以看做是理想压差控制。

启停控制主要通过二次水流量进行控制。假设二次水泵组共有 n 台水泵，其计算原理如下所示：

STEP 1: 收集二次水流量信号，本文指的是，输入二次水流量值；

STEP 2: 如果二次水流量大于 $n-1$ 台水泵的设计流量的和，那么所有二次泵都开启运行，进入 **STEP 5**；否则进入 **STEP 3**；

STEP 3: 计算二次泵的所有开启组合，使用给定压差值、流量值和水泵模型预测不同组合的水泵总能耗值；

STEP 4: 根据预测出的能耗值选择二次泵最优的开启序列。如果开启组合中能耗最小的两种组合相差在 5% 以内，则选择开启台数较少的组合，否则，选择能耗值最小的开启组合；

STEP 5: “监督优化控制器”将开启序列信号输入给泵组。

(3) 板式换热器序列控制

板式换热器启停序列主要影响到水环路的压降,本文采用了一种简单的控制策略来控制板换的启停:

开机原则:当流量大于设计流量时,增开一台板式换热器;

关机原则:当剩余板换可以处理系统流量时,关闭一台板式换热器。

(4) 一次泵、冷却泵与冷却塔的序列控制

由于一次泵、冷却泵与冷却塔通常与冷水机组联动控制,因此本文中
将冷水机组的控制信号直接输入给一次泵、冷却泵和冷却塔。

4.1.4 系统求解

以一级、二级泵水系统为例,本文将空调系统配置分成三大环路,按照一定的求解顺序进行求解计算。

求解系统时,做了以下假设:

- 混合点、分流点处没有压力损失;
- 不考虑管道及泵的温升;
- 不考虑系统加湿功能;
- 每个时间步长内当做稳态处理;
- 监督优化控制是理想化控制,不计算控制响应时间;

(1) 空气环路

STEP 1: 存储系统设计已知变量:显热 $Q_{sensible}$, 潜热 Q_{latent} , 房间设计温度 T_{re} , 送风温度 T_{supply} , 室外新风温湿度 T_{OA}, W_{OA} ; 并假设冷冻水供水温度等于设定值 $T_{chw,leave}$ 。

STEP 2: 计算组件 Zone, 根据负荷及相关温度, 求解需求送风量 \dot{m}_{air} ;

STEP 3: 计算组件 AHU, 根据送风量新风比、相关温湿度等进口参数, 计算 AHU 耗能及出口条件;

(2) 冷冻水环路

STEP 1: 调用分区组件 (VZone), 根据冷冻水进水温度 $T_{cw,enter}$, AHU 水侧流量 $\dot{m}_{w,AHU}$, AHU 出口水温 $T_{w,out,AHU}$ 以及冷水机组序列控制策略, 计算二次水流量 $\dot{m}_{secondary}$ 和一次水流量 $\dot{m}_{primary}$ 。

STEP 2: 计算旁通管的流量及方向;

STEP 3: 重新计算 AHU 进水温度 $T_{w,in,AHU}$;

IF $\dot{m}_{primary} > \dot{m}_{secondary}$

THEN $T_{w,in,AHU} = T_{chw,leave}$

ELSE

$$\dot{m}_{primary} + \dot{m}_{bypass} = \dot{m}_{secondary};$$

$$T_{w,in,AHU} = \frac{\dot{m}_{primary} T_{chw,leave} + \dot{m}_{bypass} T_{w,out,AHU}}{\dot{m}_{secondary}};$$

DO 返回空气环路的 **STEP 1**;
重新计算 AHU 出口温度 $T_{w,in,AHU}$

UNTIL $T_{w,in,AHU}$ 达到收敛

END

STEP 4: 算一次水回水温度;

IF $\dot{m}_{primary} < \dot{m}_{secondary}$

THEN $T_{primary,return} = T_{w,out,AHU}$

ELSE

THEN

$$\dot{m}_{bypass} = \dot{m}_{primary} - \dot{m}_{secondary};$$

$$T_{primary,return} = \frac{\dot{m}_{bypass} T_{chw,leave} + \dot{m}_{secondary} T_{w,out,AHU}}{\dot{m}_{primary}};$$

END

STEP 5: 计算组件压降及系统压降

IF $\dot{m}_{primary} > \dot{m}_{secondary}$

$$\Delta P_{primary,pump,rise} - \Delta P_{component,loss} - \Delta P_{bypass,loss} = 0;$$

$$\Delta P_{secondary,pump,rise} - \Delta P_{component,loss} + \Delta P_{bypass,loss} = 0;$$

ELSE

$$\Delta P_{secondary,pump,rise} - \Delta P_{component,loss} - \Delta P_{bypass,loss} = 0;$$

$$\Delta P_{primary,pump,rise} - \Delta P_{component,loss} + \Delta P_{bypass,loss} = 0;$$

END

STEP 6: 根据压头和流量计算一次泵和二次泵的能耗;

STEP 7: 计算冷水机组功耗、AHU 出风温度不满足设定值小时数、冷冻水组件工作压力不满足小时数;

(3) 冷却水环路

STEP 1: 根据室外湿球温度 $T_{wb,OA}$, 冷却水回水 $T_{cw,enter}$, 冷却水供水温度设定值 $T_{cw,leave}$, 冷却水流量 \dot{m}_{cw} 计算冷却塔风机能耗;

STEP 2: 根据流量及管网阻力, 计算冷却水环路各组件压降 $\Delta P_{cw,pump,rise}$;

STEP 3: 根据压降、流量值和序列控制策略计算冷却水泵功耗

4.2 空调水系统配置设计优化

一个优化问题就是在很多定性或者定量的限制条件下，寻找使得目标函数最大(最小)的解。因而，空调系统的配置设计优化问题可以表达为:满足一定限制条件的最小化问题，其目标函数和限制条件如式(4.103~4.106)。

目标函数:

$$J_1 = f_1(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{sett}) = \sum_i^n \sum_{comps} P_{comp,i} \quad (4.103)$$

$$J_2 = f_2(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{sett}) = \sum_{comps} C_{comp} \quad (4.104)$$

限制条件:

$$h_j(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{sett}) = 0 \quad (4.105)$$

$$g_i(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{sett}) < \varepsilon_j \quad (4.106)$$

式中:

$X_{comp} = (x_1, \dots, x_n) \in Z^n$	代表空调系统中不同组件选择的整数变量
$Y_{topo} = (y_1, \dots, y_m) \in Z^m$	代表空调系统拓扑结构的整数变量
$Z_{sett} = (z_1, \dots, z_l) \in Z^l$	代表空调系统运行设定参数的实数变量
$P_{comp,i}$	在某一个时间段内某个组件的能耗(kW)，耗能组件主要包括：冷水机组、水泵、冷却塔、空气处理机组等
C_{comp}	某一组件的初投资(\$)，主要包括冷水机组、水泵、冷却塔、空气处理机组和板式换热器等
g_j	设计要求的限制，例如，室内空气温度、湿度等
ε_j	空调设计要求的允许误差

本文的优化问题涉及到两个优化目标：空调系统的年运行能耗(kWh)和其初投资(\$)。可以只优化其中一个目标函数，也可以进行同时优化。空调系统的年运行能耗是在一个典型年内，某一选定的空调系统设计方案的总能耗。

系统设计优化问题主要受设计要求的限制，限制条件可以分为两类。第一类是严格限制条件，为了保证设计及运行的可行性，这类条件必须严格满足，例如，空调系统拓扑结构的整数变量，上层必须是可行的拓扑结构，才可以进入

下层组件的优化计算。第二类是不严格限制条件，这类限制条件允许存在一定的波动空间，主要包括房间设计温湿度值、送风温度控制点波动范围等。在实际工程中，设计人员也允许第二类限制条件存在合理的波动。

4.2.1 优化变量

空调系统配置设计问题的优化变量包括三部分：组件变量 X_{comp} 、拓扑结构变量 Y_{topo} 以及运行控制变量 Z_{sett} 。

- 组件选择变量

在本课题中，组件选择的变量是各个组件的选型变量，包括冷水机组的冷水机组的容量及台数、各种泵（一次泵、二次泵和冷却泵）的设计流量、扬程及台数，换热器的 UA 和台数，冷却塔的容量和台数等。本文中主要考虑冷热源的容量及台数。为简化计算，将冷水机组按照容量分为大、中、小三类机组，每类机组有特有的性能曲线。

- 拓扑结构变量

根据 3.2 节及 4.1 节的分析简化，本文取 4 个变量值来代表系统的拓扑结构：最小垂直分区数、能源站个数、系统形式和设计压力，其中前三个变量一起能够描述一个具体的拓扑结构形式。系统形式的取值范围取决于垂直分区数和能源站个数，详细请见 4.1.2 章节。设计压力影响到垂直分区个数的划分，间接的影响了拓扑结构，因此本文将之归纳到拓扑结构变量范围，并做离散变量处理。

- 运行控制变量

本文中，系统运行参数包括：冷冻水供水温度、冷却水供水温度以及末端出风温度。在单个系统中，运行控制变量的值保持不变，也即，本文并未考虑控制变量在不同运行工况下的取值。

结合 4.1 章节中的简化分析，本文中涉及的优化变量如表 4.5 所示：

表 4.5 优化变量及其属性

变量类型	序号	优化变量	取值范围&步长	变量属性
组件选型 变量	x_1	能源站 1 小机组容量	[100,500]，步长 100	整数
	x_2	能源站 1 中机组容量	[600,1000]，步长 100	整数
	x_3	能源站 1 大机组容量	[1100,2000]，步长 100	整数
	x_4	能源站 1 小机组容量	[0,6]	整数
	x_5	能源站 1 中机组容量	[0,6]	整数

	x_6	能源站 1 大机组容量	[0,6]	整数
	x_7	能源站 2 小机组容量	[100,500], 步长 100	整数
	x_8	能源站 2 中机组容量	[600,1000], 步长 100	整数
	x_8	能源站 2 大机组容量	[1100,2000], 步长 100	整数
	x_{10}	能源站 2 小机组容量	[0,6]	整数
	x_{11}	能源站 2 中机组容量	[0,6]	整数
	x_{12}	能源站 2 大机组容量	[0,6]	整数
运行控制 变量	x_{13}	冷冻水出水温度设定值	[5,9], 步长 0.1	离散值
	x_{14}	冷却塔出水温度设定值	[28, 35], 步长 0.1	离散值
	x_{15}	AHU 送风温度设定值	[13, 16], 步长 0.1	离散值
拓扑结构 变量	x_{16}	最小垂直分区个数	[1,6]	整数
	x_{17}	能源站个数	[1,2]	整数
	x_{18}	系统形式	[1,3]	整数
	x_{19}	设计压力	[1,5]	整数

在考虑冷热源选型时,本文按照容量将冷热源分为三大类:小、中和大机组。各类机组容量范围见表 4.5 所示,其中单位为冷吨,并具备独有的性能曲线。由 4.1.2 章节可知,空调系统配置的拓扑结构形式可表达为三个变量:最小垂直分区个数、能源站个数和系统形式,其中系统形式为本文作者赋予不同形式的编号值,取值范围为 1~3。通过这三个变量组成的向量,可以迅速判断其代表的拓扑结构形式。例如向量[4 2 1]代表图 4.6 中左边的结构。同样,作者通过编号处理,将离散型设计压力值转换为整数值。设计压力整数值与离散值对应关系如表 4.6 所示。

表 4.6 设计压力整数型与离散型对应关系

设计压力 (整数值)	设计压力 (离散值) (MPa)
1	1.0
2	1.6
3	2.0
4	2.5
5	2.8

4.2.2 目标函数

在本课题中，空调系统配置设计优化的目标有两个：减小运行能耗和系统初投资。空调系统的运行能耗是将典型年内每个小时内所有空调组件的运行能耗加起来所得。其计算如式（4.107）

$$P_{annual} = \sum_i^n \sum_{comp} P_{comp,i} \quad (4.107)$$

式中， $P_{comp,i}$ 是任一组件在某一小时内的运行能耗， i 为时间步长，取值为 $\{1, 2, \dots, n\}$ ， n 为总时间段数，例如，对于年运行能耗， n 取值为8760。

空调系统的初投资是将系统所有组件的初投资加起来所得，包括：冷却塔、冷水机组和空气处理机组（AHU）以及水泵等。

$$C_{system} = \sum_{comp} C_{comp} \quad (4.108)$$

式中， C_{comp} 是任一组件的初投资。

4.2.3 限制条件

空调系统配置设计优化的限制条件如下

C1：设计压力不满足小时数 $H_{unmet,i}$ 需小于设定值，本文取为 150 小时。

设计压力不满足小时数是指一年中，系统实际运行中的压力情况超出设计压力值的总小时数，比如，设计压力为 2.5MPa，而系统压力最高点超过 2.5MPa，则这个小时的设计压力不满足，将全年的不满足小时数加起来则可以得出设计压力不满足小时数。其计算公式如下：

$$H_{unmet,i} = \sum_{i=1}^{8760} I(P_i > P_0) \quad (4.109)$$

式中， P_0 为系统设计压力（MPa）， P_i 为在第 i 小时的系统运行压力，当 $P_i > P_0$ 时， $I(P_i > P_0) = 1$ ，反之， $I(P_i > P_0) = 0$ 。

C2: 供冷量不满足小时数 $H_{unmet,2}$ 需小于设定值, 本文取为 150 小时。

同样的, 供冷量不满足小时数是指一年中, 系统所能提供的冷量不能满足符合要求, 这个根据 AHU 送风温度来判定, 即实际送风温度大于送风温度设定点, 比如, 设定温度为 13°C , 而实际送风温度最低只能达到 14°C , 则这个小时的冷量不满足符合要求。其计算公式如下:

$$H_{unmet,2} = \sum_{i=1}^{8760} I(T_{air,sup,i} > T_{air,sup,sp}) \quad (4.110)$$

函数 I 的定义如式 (4.109) 所示。

C3: 系统拓扑结构必须是可行性结构

空调系统配置的拓扑结构形式可表达为三个变量: 最小垂直分区个数、能源站个数和系统形式。优化过程中, 以上三个变量代表的拓扑结构形式, 必须是物理及工程上可行的结构。本文中, 为简化拓扑结构可行性的判断标准, 只认为 4.1.2 节中的拓扑结构是可行的, 即, 只有结构 [1 1 1]、[2 1 1]、[2 2 1]、[3 1 1]、[3 2 1]、[3 2 2]、[4 2 1]、[4 2 2]、[4 2 3]、[5 2 1]、[5 2 2]、[6 2 1] 符合限制条件。其中, [1 1 1] 中的三个值依次代表最小垂直分区个数、能源站个数、作者定义的系统形式。

C4: 冷水机组选型需满足设计负荷需求

冷热源的选型需满足设计负荷的需求。考虑到设计负荷的统计学意义, 本文在冷热源选型时, 将对设计负荷乘以一定的安全系数 α , 因此, 此限制条件可表示如下:

$$L_{design} \leq C_{real} \leq \alpha \cdot L_{design} \quad (4.111)$$

式中, L_{design} 表示设计负荷, C_{real} 表示实际选型容量, α 为选型安全系数。

4.3 本章小结

本章的主要内容为对空调系统配置建模及建立空调系统配置设计的优化问题。

4.1 小节中, 作者通过对空调系统配置三大组成部分的合理简化, 建立了空调系统配置模型。通过给定的系统求解器, 可计算出当前配置的性能。

4.2 小节中, 作者在系统配置模型建立的基础上, 建立了系统配置设计的优

化问题：确定了合理的优化变量、目标函数及相应的限制条件。可以看出。空调系统配置设计优化是一个非线性约束、混合整数规划的问题。求解这类问题需要特殊的优化算法，该算法将在下一章进行详细说明。

第 5 章 优化算法-进化算法

5.1 进化算法简介

进化算法，也被成为是演化算法（evolutionary algorithms，简称 EAs），它不是一个具体的算法，而是一个“算法簇”。进化算法的产生的灵感借鉴了大自然中生物的进化操作，它一般包括基因编码，种群初始化，交叉变异算子，精英保留机制等基本操作。与传统的基于微积分的方法和穷举方法等优化算法中的其他数学优化方法相比，进化计算是一种成熟的具有高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法，具有自组织、自适应、自学习的特性，能够不受问题性质的限制，有效地处理传统优化算法难以解决的复杂问题（比如 NP 难优化问题）。

5.2 MI-LXPM GA

J.Holland 受生物进化论的启发而提出遗传算法^[48]。遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)是一种基于自然选择原理和自然遗传机制的搜索(寻优)算法，它是模拟自然界中的生命进化机制,在人工系统中实现特定目标的优化。遗传算法的实质是通过群体搜索技术，根据适者生存的原则逐代进化，最终得到最优解或准最优解。GA 的提出在一定程度上解决了传统的基于符号处理机制的人工智能方法知识表示、信息处理和解决组合爆炸等方面所遇到的困难,其自适应、自组织、自学习和群体进化能力使其适宜于大规模复杂优化问题。GA 是一种通用的优化算法，其编码技术和遗传操作比较简单，优化不受限制性条件的约束，而其最大的显著特点则是隐含并行性和全局解空间搜索。目前，随着计算机技术的日益发展，越来越得到人们的广泛重视，并在图像处理、机器学习、神经网络、模式识别、优化控制、组合优化、设计、遗传学等领域得到了成功运用。基因遗传算法日益为学者所看好，不仅抗小量干扰信号能力强、而且能够较快获得稳定可靠准优化解，相比之下优势明显取得了令人满意的效果。

由第四章的分析可知，空调系统配置设计优化问题是一个离散、不连续的混合整数规划问题，最小化问题具有以下基本形式：

$$\begin{aligned} &\text{minimize:} && f(x, y) \\ &\text{subject to:} && \\ &&& g_j(x, y) \leq 0, j = 1, \dots, r_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_j(x, y) &= 0, j = r_1 + 1, \dots, r_1 + r_2 \\
 x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U, i = 1, \dots, n_1 \\
 y_i^L &\leq y_i \leq y_i^U : integer, i = 1, \dots, n_2 \\
 x &= [x_1, x_2, \dots, x_{n_1}]^T, i = 1, \dots, n_1 \\
 y &= [y_1, y_2, \dots, y_{n_2}]^T, i = 1, \dots, n_2
 \end{aligned}$$

本小节主要介绍由 Deep 和 Thakur 一起提出用于求解整数或者混合整数规划的 MI-LXPM GA 算法^[49]。该算法相比于标准 GA 有着诸多优势：实数编码、整数或者混合整数规划、引入无参数惩罚函数处理约束条件等。

5.2.1 编码方式

(1) 染色体和基因

在遗传算法里，优化问题的解通常被称为个体，它表示为一个变量序列，叫做染色体或者基因串。染色体一般被表达为简单的字符串或数字串，不过也有其他的依赖于特殊问题的表示方法适用，这一过程称为编码。将 GA 应用于具体优化问题，首先要对优化问题的解空间确定一种编码方式。编码方式主要包括实数编码、二进制编码、混合编码等。最简单的编码方式是实数编码。例如，假设有 6 个离散的整数设计变量，取值范围为[1 5]，4 个连续的实数设计变量，取值范围为[3.000 9.000]，一种可能的染色体实数编码形式如下图 5.1 所示：

1	3	2	4	2	4.531	5.422	8.143	8.903	6.548	3.887
---	---	---	---	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------

图 5.1 染色体实数编码形式

图 5.1 所示的染色体中包含了 10 个基因，每一个基因对应一个优化变量，每一个基因值代表着优化变量的取值。本文中的 GA 均采用实数编码方式。

(2) 种群个数和进化代数

运用 GA 算法时，需先设定种群个数，即种群中染色体的个数 P。在第一代时，GA 随机产生初始种群，即产生 P 个染色体；随后，GA 从第一代种群中产生第二代种群，第二代种群中产生第三代种群，以此类推，直到达到设计者自定义的进化代数上限值 N。

5.2.2 适应度函数

对每一个由染色体表示的解应有一个度量好坏的依据，它用一函数表示，叫做适应度函数，适应度函数应为非负函数。评估某一染色体的适应度，必须先计算该染色体所代表解的目标函数值 f 及优化问题的约束条件 $g_j \leq 0, h_j = 0$ 。Deb^[50]提出了式 (5.1) 所示的适应度函数，其中， i 表示第 i 个染色体。

$$fitness(X_i) = \begin{cases} f(X_i) \\ f_{worst} + \sum_j^m |\phi_j(X_i)| \end{cases} \quad (5.1)$$

式中， f_{worst} 是目前种群中最差的可行解。因此，不可行解得适应度值不仅取决于对约束条件的破坏程度，还取决于当前的解集种群。但是，可行解的适应度值是固定的，且等于其目标函数值。 $\phi_j(X_i)$ 指的是不等式限制条件的值（等式限制条件可通过增加合适的误差转化为不等式限制条件）。如果某一代的种群中没有可行解，那么 f_{worst} 可设置为 0。这种适应度函数能够保证某一代种群中的可行解总是优于不可行解。

5.2.3 选择算子

GA 通过选择算子从当前进化代数种群中选择合适的个体放入交配池中。交配池中的个体则通过交叉、变异算子产生下一代个体。GA 的选择算子能够保证种群中较好的个体遗传到下一代。

MI-LXPM GA 算法中的选择算子为联赛选择算法（tournament selection）。联赛选择算法的基本思想如下：从当前种群中随机选择 k （联赛规模）个个体，选中较好的个体放入交配池中，再从另外 k 个个体中选择较好的个体放入交配池，直到交配池放满为止。理论上，当前种群中的每个个体都会参与规模为 k 的联赛选择。种群中的最优个体会在所有的 k 联赛中获胜，因此最优个体的基因将会遗传到下一代。同理，种群中的最差个体会在所有联赛中落败，将失去进入交配池的机会，因此最终被淘汰出局。

个体间通过竞争进入交配池。其中，竞争规则如下所示：

- (1) 可行解胜出不可行解；
- (2) 两个可行解中，目标函数值更佳者（例如，最小化问题中，具有较小目标值者）胜出；
- (3) 两个不可行解中，对约束条件破坏程度小者胜出。

5.2.4 交叉算子

进入交配池的个体通过交叉算子产生新的个体并进入下一代。MI-LXPM GA 采用拉普拉斯交叉算子。拉普拉斯交叉算子中，父代染色体 $x^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$ 和 $x^2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$ ，产生子代 $y^1 = (y_1^1, y_2^1, \dots, y_n^1)$ 和 $y^2 = (y_1^2, y_2^2, \dots, y_n^2)$ 的原理如下：

首先，在 $[0,1]$ 之间均匀产生 n 个随机数 u_i, r_i ，其中， $1 \leq i \leq n$ ， n 为基因的个数；

然后，产生随机数 β_i ，满足下式所示的拉普拉斯分布；

$$\beta_i = \begin{cases} a - b \cdot \log(u_i), & u_i < \frac{1}{2} \\ a + b \cdot \log(u_i), & u_i \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5.2)$$

式中， a 是位置参数， $b > 0$ 是缩放参数。如果优化变量是整数，那么 $b = b_{int}$ ，否则 $b = b_{real}$ 。对于整数和实数变量来说，缩放参数 b 通常取不同的值。缩放参数 b 的值越小，子代离父代就越近，同理，缩放参数 b 的值越大，子代离父代就越远。

最后，在计算完 β_i 之后，子代染色体可通过下式获得；

$$y_i^1 = x_i^1 + \beta_i |x_i^1 - x_i^2| \quad (5.3)$$

$$y_i^2 = x_i^2 + \beta_i |x_i^1 - x_i^2| \quad (5.4)$$

5.2.5 变异算子

变异算子的基本内容是对群体中的个体串的某些基因座上的基因值作变动。交叉之后子代经历的变异,实际上是子代基因按小概率扰动产生的变化。基本变异操作如下所示。



图 5.2 二进制编码基本变异操作

MI-LXPM GA 采用幂指数变异算子。该算子基于幂指数分布，其分布函数为：

$$f(s_1) = ps_1^{p-1}, 0 \leq s_1 \leq 1 \quad (5.5)$$

密度函数为

$$F(s_1) = s_1^p, 0 \leq s_1 \leq 1 \quad (5.6)$$

两式中, p 是幂指数分布的指数。

幂指数变异算子可通过以下方式在父代染色体 x 附近产生子代染色体: 首先, 在 $[0, 1]$ 范围内, 产生随机数 s_1, r ; 然后产生随机数 $s = s_1^p$; 最后, 可通过随机数 r, s 产生变异的子代染色体 y , 其原理如下:

$$y = \begin{cases} x - s(x - x^l), & t < r \\ x + s(x^u - x), & t \geq r \end{cases} \quad (5.7)$$

式中, $t = \frac{x - x^l}{x^u - x}$, x^l 和 x^u 分别表示优化变量的取值下限值和上限值。

5.2.6 整数限制

在整数混合规划问题中, 部分或者全部变量需要满足整数值的设定。为了保证满足整数的要求, 在交叉和变异算子作用之后, 可使用以下截断流程, 也即, $\forall i \in I$, x_i 通过以下规则截断为整数 \tilde{x}_i :

- 如果 x_i 是整数, 那么 $\tilde{x}_i = x_i$; 否则,
- \tilde{x}_i 将分别有 0.5 的概率等于 $[x_i]$ 或者 $[x_i] + 1$; ($[x_i]$ 为 x_i 的整数部分)

5.2.7 MI-LXPM GA 计算流程

MI-LXPM GA 的主要计算步骤如下:

- (1) 随机产生初始种群, 种群中的个体需满足变量的属性要求, 并评价各个体的适应度值;
- (2) 判断算法收敛准则是否满足。若满足则输出搜索结果; 否则执行下一步骤。
- (3) 根据适应度值大小以联赛选择算法执行复制操作从种群中选取两个较优个体;
- (4) 通过拉普拉斯交叉算子 (交叉概率 P_c) 和幂指数变异算子 (变异概率 P_m), 在交配池中产生新的个体及种群;
- (5) 对整数优化变量使用整数限制, 并计算新种群的适应度值;

(6) 返回步骤 2, 进入下一代的计算。

5.2.8 遗传算法参数设计

(1) 种群大小

群体大小表示群体中所含个体的数量。当取值较大时, 会导致遗传算法的运行效率降低; 当取值较小时, 虽然可提高遗传算法的运行速度, 但会降低群体的多样性, 有可能导致遗传算法的早熟现象。本研究的种群大小取值范围是 100~200。

(2) 交叉算子

交叉概率用于控制交叉运算的频度。较大的交叉概率可增强遗传算法开辟新搜索区域的性能, 但是会破坏群体中优良模式的个体; 若交叉概率取值较小, 交叉产生新个体的速度较慢, 会使得搜索停滞不前。本文的交叉概率取值为 0.8。

拉普拉斯交叉算子的参数值分别为: $a = 0$, $b_{real} = 0.15$, $b_{int} = 0.35$ 。

(3) 变异算子

变异概率会直接影响到算法收敛性与最终解的性能。若变异概率值较大, 可使得算法能够不断地搜索新的解空间, 从而增加模式的多样性, 但是较大的变异概率会削弱算法的收敛能力; 若取值较小, 则变异操作产生的新个体的能力和抑制早熟现象的能力就会降低。本文中变异概率的取值是 0.005。

幂指数变异算子的参数值分别为: $p_{real} = 10$, $p_{int} = 4$ 。

(4) 算法的终止条件

给定一个最大的遗传进化代数 and 停滞代数, 当达到此值时, 就停止运行, 并将当前群体中的最佳个体作为所求问题的最优解输出。本文的取值为 200~300。

5.3 NSGA-II

多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problem, MOP), 本质在于多个目标间的关系可能是相互竞争或相互冲突的, 其中某个目标的改善可能导致其它目标的恶化, 所以 MOP 的解通常是一组折衷解, 即所谓的 Pareto 非劣解集。传统的多目标优化方法通常将多个目标转化为一个目标, 由于转化时的权值系数往往由研究者决定, 这无形中增加了解决问题的主观性。而近几十年发展起来的遗传算法, 不对优化问题的性质作深入的数学分析, 只依预先设定的目标寻找全局最优点, 能够对多个目标同时优化, 寻找到 Pareto 非劣解集。

在多目标遗传算法中的非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm- II, NSGA- II) 是综合性能较好的遗传算法。本章将简述 NSGA- II 的概念, 原理, 并对其进行修正以保证适合空调系统配置设计优化问题。

非支配排序遗传算法 II 是在非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA) 的基础上改进而来的。是将父代和子代混合后进行非支配排序,并在同级序中采用拥挤度和拥挤算子为标准选出胜出个体,继而保留精英解,并不断交叉、变异、选择直至收敛的一种遗传算法。

NSGA 虽然得到了广泛的应用,但在应用的过程中它有一些无法克服的缺陷,具体表现在以下三个方面: 1) 计算复杂度高,为 $O(mN^3)$, 这里 m 表示目标函数的个数, N 表示种群的大小,可以看出种群较大时计算相当耗时; 2) 没有精英策略。精英策略通过对种群中所有个体分层存放,使得最佳个体不会丢失,从而提高种群水平,加速 GA 性能; 3) 需要人为指定共享半径,这个参数受主观影响较大,因此对优化结果的影响较为重要。

为了克服 NSGA 的缺陷,2002 年 Deb^[51] 提出了 NSGA 的改进算法 NSGA-II, NSGA-II 针对 NSGA 的缺陷做出了以下改进: 1) 利用快速非支配排序法来降低算法的复杂度,由原来的 $O(mN^3)$ 降到 $O(mN^2)$; 2) 提出拥挤度和拥挤度比较算子来代替需要指定共享半径的适应度共享策略,并在快速排序后的同级比较中作为胜出的标准,使准 Pareto 域中的个体扩展到整个 Pareto 域,保持了种群的多样性; 3) 引入精英策略。精英策略是将父代种群与其产生的子代种群结合,共同竞争产生下一代种群,这样有利于父代中的优良个体进入下一代。具体流程如图 5.6 所示。

5.3.1 快速非支配排序法

为了更好的阐述快速非支配排序法,首先介绍一种能够将种群分成不同非支配层的慢速排序方法。

在慢速非支配排序法中,为了确定规模为 N 的种群的第一级非支配边界,种群中的每一个个体需要与其他所有个体进行比较,并确认是否被支配。对于每一个个体而言,这个过程计算复杂度为 $O(mN)$,当所有个体都考虑在内时,该过程的计算复杂度为 $O(mN^2)$ 。通过本次比较可以找到所有处于第一级非支配边界的个体。在寻找第二级非支配边界上的个体时,除了第一级非支配边界的个体,种群中的其余个体重复上述比较过程。最差的情况下,例如,当 $O(N)$ 个个体都属于第二级或者更高级非支配边界时,寻找第二级非支配边界的计算复杂度也为 $O(mN^2)$ 。同理,对于第三级或者更高级非支配边界来说也一样。因此,最差的情况是,对于规模为 N 的种群来说,存在 N 级非支配边界,且每个边界上只有一个个体。这种情况下,需要 $O(mN^3)$ 次比较计算。

接下来,介绍一种快速的非支配排序法,该方法只需要 $O(mN^2)$ 次比较计算。

首先,对于种群中的每一个个体,计算两个变量: 1) 被支配数 n_p , 支配个

体 p 的总个体数；2) 被个体 p 支配的所有个体组成的集合 S_p 。该过程只需要 $O(mN^2)$ 次比较计算。

对于第一级非支配边界上的点来说，它们的被支配数 n_p 为 0。对于 $n_p = 0$ 的个体 p ，将其对应的支配集 S_p 中的每一个个体 q 的被支配数 n_p 减去 1。之后，如果某个成员 q 的被支配数变为 0，将 q 放进一个单独的集合 Q 中。这些个体属于第二级非支配边界。然后，对于 Q 中的所有个体进行上述过程，可确定出第三级非支配边界。重复该过程直到所有边界都被确定。

对于第二级或者更高级的个体 p 来说，被支配数 n_p 最多为 $N - 1$ 。因此，在其被支配数变为 0 前，最多进行 $N-1$ 次计算。被支配数变为 0 后， p 将被分配到某级非支配界面，并将不再参与后续计算。因为最多有 $N - 1$ 个这样的个体，所以总的计算复杂度为 $O(N^2)$ 。整个过程的计算复杂度则为 $O(mN^2)$ 。

5.3.2 拥挤度比较算子

NSGA 中采用共享函数法，通过设定合理的参数，来保证 Pareto 边界点的多样性。共享函数法有以下缺陷：1) 共享函数的性能受人为设定的参数值的影响；2) 因为种群中每一个个体都需要与其他个体进行比较，所以共享函数法的计算复杂度为 $O(N^2)$ 。

NSGA-II 中，用拥挤度比较的办法弥补了共享函数法的上述缺陷。拥挤度比较的方法不需要用户自己定义任何参数，且需要更小的计算量。

(1) 密度估计

为了估计种群中某个个体周围其他个体的分布密度，需要计算该个体两边点的在目标函数坐标轴的平均距离。将该点两侧最近的边界点作为顶点，连接成长方形，变量 $i_{distance}$ （也称作拥挤度）用来估计该长方形的周长。图 5.3 中，第 i 个个体在边界上的拥挤度为图中长方形的平均边长。

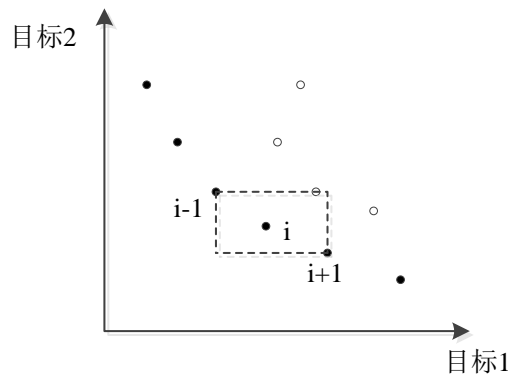


图 5.3 拥挤度计算（实心点处于同一级非支配边界上）

拥挤度计算需要根据每个目标函数值对个体进行排序。然后，对每一个目标函数来说，令处于边界的点（最小和最大目标函数值的点）的拥挤度为无穷大。其他中间点的拥挤度为该点两侧点的归一化拥挤度值。总的拥挤度值为每一个目标函数对应的拥挤度之和。在计算拥挤度之前，每一个目标函数值都需要归一化处理。非支配集 J 中个体拥挤度的计算流程图 5.4 所示：

拥挤度计算 (J)

$l = J $	J中个体个数
$J[i]_{distance} = 0$	初始化拥挤度
对于每一个目标函数 m	
$J = \text{sort}(J, m)$	根据每一个目标函数值排序
$J[1]_{distance} = J[l]_{distance} = \infty$	边界点拥挤度无穷大
$i = 2: l - 1$	计算除边界点之外的点
$J[i]_{distance} = J[i]_{distance} + \left(\frac{(J[i + 1].m - J[i - 1].m)}{(f_m^{max} - f_m^{min})} \right)$	

图 5.4 个体拥挤度的计算流程

流程中， $J[i].m$ 表示非支配集 J 中第 i 个个体的第 m 个目标函数值， f_m^{min} 和 f_m^{max} 表示第 m 个目标函数值的最小值和最大值。

当种群中所有个体的拥挤度都计算完毕后，可对任意两个个体进行比较。某个个体的拥挤度值较小，说明该个体被其他周围的个体所拥挤。拥挤度比较的算法将在下面说明。

(2) 拥挤度比较算子

拥挤度比较算子 ($<_n$) 控制着该算法的选择流程，保证 Pareto 边界上各点处于均匀分布状态。假设种群中每个个体 i 都有两个属性：

- 1) 非支配等级 (i_{rank})
- 2) 拥挤度 ($i_{distance}$)

对于任意两个个体 i 和 j ， i 优于 j 的表示方法及比较规则如下：

$$i <_n j \quad (\text{如果 } (i_{rank} < j_{rank}) \text{ 或者 } (i_{rank} = j_{rank} \text{ 且 } i_{distance} > j_{distance}))$$

也即，两个不同非支配等级的个体中，较低（较好）非支配等级的个体优于较高非支配等级个体；否则，如果两者非支配等级相同，则拥挤度较大的个体优于拥挤度较小的个体。

5.3.3 交叉算子

NSGA-II 中采用的是 SBX (Simulated Binary Crossover) 算子。SBX 算子模拟了二进制串编码的单点交叉操作。父代染色体 $x^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$ 和 $x^2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$ 产生子代 $y^1 = (y_1^1, y_2^1, \dots, y_n^1)$ 和 $y^2 = (y_1^2, y_2^2, \dots, y_n^2)$ 的原理如下:

$$y_i^1 = 0.5[(1 - \beta_k)x_i^1 + (1 + \beta_k)x_i^2] \quad (5.8)$$

$$y_i^2 = 0.5[(1 + \beta_k)x_i^1 + (1 - \beta_k)x_i^2] \quad (5.9)$$

式中, β_k (≥ 0) 是一个随机数, 其分布密度如下:

$$p(\beta) = \begin{cases} 0.5 \cdot (\eta_c + 1)\beta^{\eta_c}, & 0 \leq \beta \leq 1 \\ 0.5 \cdot (\eta_c + 1)\beta^{1/(\beta^{\eta_c+2})}, & \text{else} \end{cases} \quad (5.10)$$

分布指数 η_c 是任意非负实数。 η_c 的值越大, 就越可能产生离父代染色体较近的子代染色体, 同理, η_c 的值越小, 产生的子代染色体离父代染色体就越远。 β 的值可通过均匀分布在 [0,1] 范围内的随机数 u 以以下方式获得:

$$\beta(u) = \begin{cases} (2u)^{1/(\eta_c+1)}, & 0 \leq u \leq 0.5 \\ [2(1-u)]^{-1/(\eta_c+1)}, & \text{else} \end{cases} \quad (5.11)$$

5.3.4 变异算子

标准 NSGA-II 采用多项式变异算子 (Polynomial Mutation Operator) 来执行染色体变异操作。该算子基于以下多项式概率分布:

$$P(\delta) = 0.5(\eta_m + 1)(1 - |\delta|)^{\eta_m} \quad (5.12)$$

通过下式先算出 δ :

$$\bar{\delta}_i = \begin{cases} (2\alpha_i)^{1/(\eta_m+1)} - 1, & 0 \leq \alpha_i \leq 0.5 \\ 1 - [2(1 - \alpha_i)]^{1/(\eta_m+1)}, & \text{else} \end{cases} \quad (5.13)$$

式中, α_i 是在[0,1]之间的随机数。变异后的个体通过下式给出:

$$x'_i = x_i + (u_i - l_i)\delta_i \quad (5.14)$$

其中, l_i 和 u_i 分别为 x_i 的下限值和上限值。

5.3.5 整数算子

由于空调系统配置设计优化是一个混合规划问题, 标准的 NSGA-II 算法并不能处理整数变量, 因此需要增加处理整数变量的能力。本文提出整数算子的概念, 以保证 NSGA-II 对整数变量的处理能力。为了保证满足整数的要求, 在交叉和变异算子作用之后, 可使用以下截断流程, 也即, $\forall i \in I$, x_i 通过以下规则截断为整数 \tilde{x}_i :

- 如果 x_i 是整数, 那么 $\tilde{x}_i = x_i$; 否则,
- \tilde{x}_i 将分别有 0.5 的概率等于 $[x_i]$ 或者 $[x_i] + 1$; ($[x_i]$ 为 x_i 的整数部分)

5.3.6 NSGA-II 算法流程

算法开始时, 先产生一随机父代种群 P_0 。然后, 将该种群进行快速非支配排序, 每个个体将分配一个适应度值, 该适应度值等于该个体在种群中的非支配等级 (1 是最好等级, 2 是其次好的等级, 以此类推)。因此, 该算法假设最小化适应度值。接着, 规模为 2 的联赛选择算子、交叉算子和变异算子一起作用产生下一代规模为 N 的种群 Q_0 。精英保留策略为通过拥挤度比较算子比较当前种群和当前找到的最好非支配解。下述流程 (图 5.5 及图 5.6) 描述了 NSGA-II 第 t 代的计算过程。

首先, 将第 t 代产生的新种群 Q_t 与父代 P_t 合并组成 R_t , 种群大小为 $2N$ 。其次对 R_t 进行快速非支配排序, 产生一系列非支配集 F_i 并计算拥挤度。由于子代和父代个体都包含在 R_t 中, 精英保留策略能够得到保证。经过非支配排序以后的非支配集 F_1 中包含的个体是 R_t 中最好的, 所以先将 F_1 放入新的父代种群 P_{t+1} 中。如果 F_1 中的个体个数小于 N , 则继续向 P_{t+1} 中填充下一级非支配集 F_2 , 直到添加 F_i 时, 种群的大小超出 N , 对 F_i 中的个体进行拥挤度排序, 取前 $|N-P_{t+1}|$ 个个体, 使 P_{t+1} 个体数到达 N 。然后通过选择、交叉、变异算子在种群 P_{t+1} 中产生新的规模为 N 的子代种群 Q_{t+1} 。值得注意的是, 虽然选择算子使用的是规模为 2 的联赛选择算子, 但是比较规则采用的是拥挤度比较算子 \prec_n 。

1. $R_t = P_t \cup Q_t$	合并父代及子代种群
2. $\mathcal{F} =$ 快速非支配排序 (R_t)	$\mathcal{F} = (\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots)$, R_t 的所有非支配边界
3. $P_{t+1} = \emptyset, i = 1$	
4. 直到 $ P_{t+1} + \mathcal{F}_i \leq N$	直到父代种群规模已满
5. 拥挤度计算 (\mathcal{F}_i)	计算 \mathcal{F}_i 中个体拥挤度
6. $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i$	将第 i 个非支配边界放入父代种群
7. $i = i + 1$	检查下一个非支配边界
8. $\text{sort}(\mathcal{F}_i, <_n)$	拥挤度比较并排序
9. $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i[1:(N - P_{t+1})]$	选择 \mathcal{F}_i 中的前 $(N - P_{t+1})$ 个个体
10. $Q_{t+1} =$ 新种群(P_{t+1})	使用选择、交叉、变异、整数算子产生下一代
11. $t = t + 1$	增加进化代数

图 5.5 NSGA-II 第 t 代计算流程

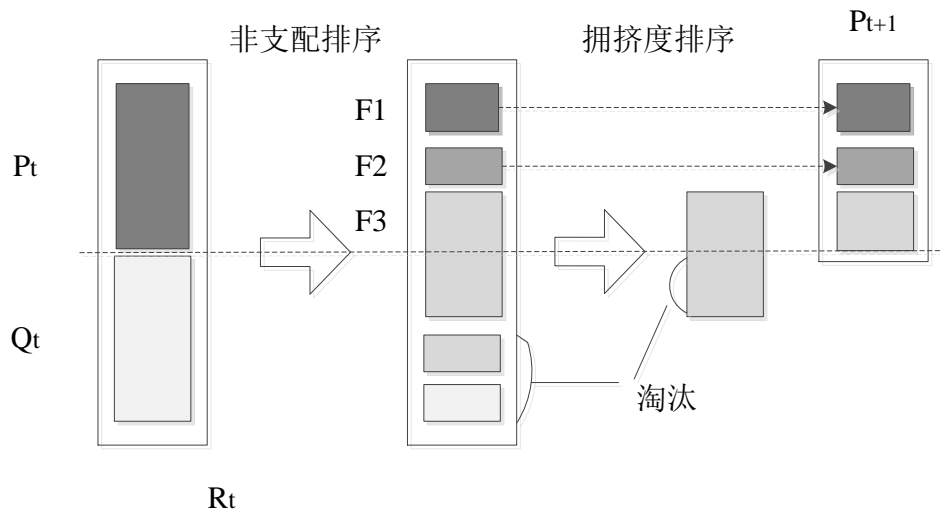


图 5.6 NSGA-II 流程概图

5.4 适应度近似

近年来,进化算法(EA)在实际工程中有着大量的应用,尤其是在工程设计领域。工程设计问题中,适应度函数有着非连续、不可微分、多局部最优值的特征。在求解此类问题时,许多文献显示,EA的性能比传统的优化算法如序列二次规划(SQP)以及模拟退火(SA)都要好^[52-54]。

然而,EA在实际工程问题的应用仍然面临着诸多问题。例如,对工程设计问题来说,需要对目标函数进行大量计算才有可能得到问题的近优解。再者,搜索空间受到很多限制条件的约束,形状复杂,只有很小的可行域。另外,对每一个可能解的适应度评估可能会涉及到模拟器的计算(如,空调系统的能耗值计算),需要非常长的计算时间。因此,为解决上述问题,研究者们提出了适应度近似的方法,用来替代真正的适应度,并与EA相结合,节省很多计算时间。

适应度近似的方法有很多:基于实例学习方法、机器学习方法和统计学习方法是其中最为常用的三种方法。基于实例学习和机器学习方法包括径向基函数模型(RBF)、k最近邻算法、聚类以及神经网络模型等。统计学习方法主要包括多项式模型、Kriging模型和支持向量机模型(SVM)等。本文主要使用 ε 不敏感损失支持向量回归机模型(ε -SVR)。

5.4.1 ε -SVR

SV算法是由Vapnik于1974年提出的一套基于统计学的学习算法^[55]。因为对核函数的使用,训练SVM模型就等同于求解一个凸优化问题,不存在局部最小值,因此可求得全局最优解。本文中主要考虑 ε -SVR算法。假设训练集为 $\{(x_1, y_1) \dots (x_l, y_l)\} \subset X \times \mathbb{R}$,其中, X 表示输入空间, l 是训练数据的个数。SVR的目标是找到一个函数 $f(x)$,该函数距离所有训练数据的目标值 y_i 最远为 ε ,且应该尽可能的平坦。也就是说,不能接受误差大于 ε 的点。 ε -SVR根据训练数据的特性,可找到这样的函数 f ,该函数具有以下形式:

$$f(x) = \langle w, \phi(x) \rangle + b \quad (5.15)$$

式(5.15)中, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 代表输入空间 X 内的点积, $\phi(x)$ 表示从输入空间 x 映射的高维空间。上式中的“平坦”意味着求解出尽可能小的 w ,可以通过最小化 w 的欧几里得范数来实现。因此, w 和 b 可以通过最小化正规式风险函数值来计算,如下所示:

$$\frac{1}{2} \|w^2\| + C \sum_{i=1}^l \zeta_{\varepsilon}(y_i, f(x_i)) \quad (5.16)$$

式(5.16)中，第一项 $\frac{1}{2} \|w^2\|$ 称作正规项，第二项 $\sum_{i=1}^l \zeta_{\varepsilon}(y_i, f(x_i))$ 指的是经验风险项。 ε -SVR 中，使用的是 ε 不敏感损失函数，具体形式如下：

$$\zeta_{\varepsilon}(y_i, f(x_i)) = \begin{cases} |y_i - f(x_i)| - \varepsilon, & |y_i - f(x_i)| \geq \varepsilon \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.17)$$

因此，结合上两式可知，当预测目标的误差值在 ε 以内时，损失函数值为 0，否则，通过惩罚参数 C 来惩罚正规项。结合上两式可知，最小化问题可以转化为：

$$\begin{aligned} & \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w^2\| \\ \text{s. t. } & \begin{cases} y_i - \langle w, \phi(x_i) \rangle - b \leq \varepsilon \\ \langle w, \phi(x_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (5.18)$$

式 (5.18) 中的隐藏假设是方程 f 是存在的，且能够以 ε 精度逼近所有训练数据。也即是，上述凸优化问题是有解的。然而，事实上可能并不是如假设这般，又或者我们允许一些误差存在。因此，可以通过引进松弛变量 ξ_i, ξ_i^* 来处理可能出现的不可行解：

$$\begin{aligned} & \min_{w,b,\xi_i,\xi_i^*} \frac{1}{2} \|w^2\| + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} y_i - \langle w, \phi(x_i) \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \langle w, \phi(x_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.19)$$

优化问题 (5.19) 通常可通过其对偶形式求解：

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^l (\eta_i \xi_i + \eta_i^* \xi_i^*) \\
& - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\varepsilon + \xi_i - y_i + \langle w, \phi(x_i) \rangle + b) \\
& - \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + y_i - \langle w, \phi(x_i) \rangle - b)
\end{aligned} \tag{5.20}$$

式(5.20)中, L 是拉格朗日函数, $\eta_i, \eta_i^*, \alpha_i, \alpha_i^*$ 是拉格朗日乘子向量。因此式(5.20)中的对偶变量需满足非负数的约束条件:

$$\eta_i, \eta_i^*, \alpha_i, \alpha_i^* \geq 0 \tag{5.21}$$

通过对函数 L 求解原始变量(w, b, ξ_i, ξ_i^*)的偏导数, 可得最优解:

$$\begin{cases} \partial_b L = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\ \partial_w L = w - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(x_i) = 0 \\ \partial_{\xi_i} L = C - \alpha_i - \eta_i = 0 \\ \partial_{\xi_i^*} L = C - \alpha_i^* - \eta_i^* = 0 \end{cases} \tag{5.22}$$

将式(15)带入(13), 消去 η_i, η_i^* 可得对偶优化问题:

$$\begin{aligned}
& \max_{\alpha_i, \alpha_i^*} \begin{cases} -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) (\phi(x_i), \phi(x_j)) \\ -\varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \end{cases} \\
& \text{s. t. } \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \quad \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C]
\end{aligned} \tag{5.23}$$

将式(15)中求解出的 w 带入回归方程(8), 可得,

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(x_i) \cdot \phi(x) + b \tag{5.24}$$

引入核函数 $K(x_i, x)$, 方程(17)可以写做,

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (5.25)$$

如果核函数 $K(x_i, x)$ 满足 Mercer 条件, 该核函数也称作 SV 核[56]。典型核函数包括线性函数, 多项式函数以及高斯函数。这些函数中, 高斯函数很适合表示输入与输出之间的复杂的非线性关系。而且, 使用高斯核函数, 可以使计算直接在输入空间进行, 而不是在特征空间, 这样, 可以节省大量计算量。高斯核函数如下所示:

$$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \|x_i - x_j\|^2} \quad (5.26)$$

式中, γ 是核函数参数。

5.4.2 基于适应度近似的 NSGA-II

空调系统设计优化问题中, 适应度近似的目的是用目标函数值的黑箱模型在一定程度上代替物理白箱或者灰箱模型, 进而减少目标函数值估计所用的时间, 达到加速作用, 因此, 通常也称作代理模型。本小节主要使用 SVR 作为代理模型, 进行目标函数值的预测及评估, 然后根据新旧种群规模的差异, 过滤出表现较好的新个体, 该过程可用图 5.7 表示。通过将 SVR 代理模型与 NSGA-II 算法相结合, 提高了寻找优秀个体的能力, 因此大大提高了传统 NSGA-II 的计算效率。本文中 will 用 SVR 代理模型的 NSGA-II 称为 NSGA-II-S, 方便下文与传统 NSGA-II 进行性能比较。

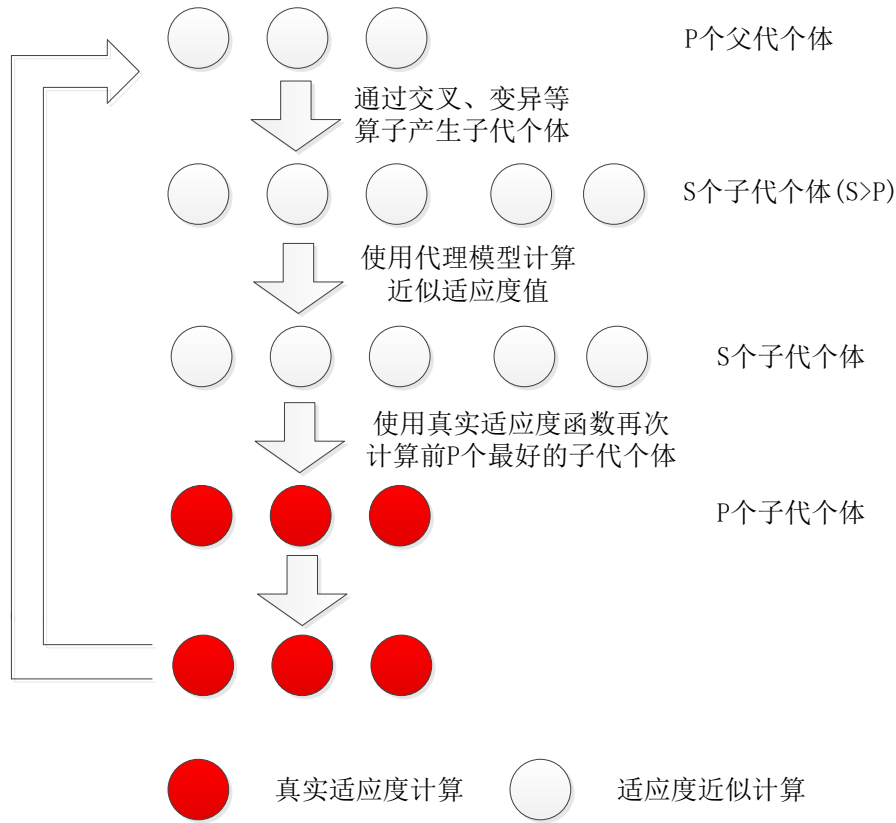


图 5.7 代理模型的作用过程

NSGA-II-S 对 NSGA-II 的主要更改在图 5.5 中的第 10 步：产生规模大于父代种群规模的新的子代，然后使用代理模型过滤出较好的子代个体进入新种群，如图 5.8 所示。

首先，SVR 代理模型通过初始种群 P_0 （规模为 P ）训练得到。然后，与传统生成子代的步骤相比，先生成代理种群 S ，其规模为 $|S|$ ($|S| > |P|$)。代理模型在种群 S 中预测目标函数值及约束条件值，使用 NSGA-II 的快速非支配排序，将 S 中较优排名的个体过滤出，并放入子代种群 Q 中。再通过真实适应度函数计算（建筑性能模拟）并评估 Q 中的个体，并检查代理模型的准确性，根据模型准确性决定是否重新训练代理模型。最后 NSGA-II-S 如传统算法般进入下一代并循环。

1	$S = \text{新种群}(P_{t+1})$	交叉、变异等方式产生代理种群 S , $ S > P $
2	$Obj = FA_{SVR}(S)$	S 中个体使用 SVR 模型进行适应度近似计算
3	$\mathcal{F}_S = \text{快速非支配排序}(S)$	$\mathcal{F}_S = (\mathcal{F}_{S1}, \mathcal{F}_{S2}, \dots)$, R_t 的所有非支配边界
4	$i = 1$	
5	直到 $ Q_{t+1} + \mathcal{F}_{Si} \leq N$	直到子代 Q_{t+1} 个体已满

6	拥挤度计算 (\mathcal{F}_{Si})	计算边界 \mathcal{F}_{Si} 中个体拥挤度
7	$Q_{t+1} = Q_{t+1} \cup \mathcal{F}_{Si}$	将第 i 个非支配边界放入子代种群
8	$i = i + 1$	检查下一个非支配边界
9	sort($\mathcal{F}_{Si} \prec_n$)	拥挤度比较并排序
10	$Q_{t+1} = Q_{t+1} \cup \mathcal{F}_{Si}[1:(N - Q_{t+1})]$	选择 \mathcal{F}_i 中的前 $(N - Q_{t+1})$ 个个体
11	Obj = TrueFitness(Q_{t+1})	Q_{t+1} 中个体进行真实适应度值计算
12	对于每一个目标及限制条件	
13	计算 Q_{t+1} 内个体目标值及限制条件值的 FPC	计算代理模型准确性参数 FPC
14	IF FPC < 0.7	
15	更新代理模型($P_{t+1} \cup Q_{t+1}$)	使用 $P_{t+1} \cup Q_{t+1}$ 内个体更新代理模型
16	END	

图 5.8 NSGA-II-S 对 NSGA-II 的更改步骤

本文中，对于每一个目标函数及复杂约束条件都有对应的 SVR 代理模型，这样的一个是好处是，可以按照需要重新训练任意一个模型。模型准确性参数 (FPC) 通过 spearman 等级相关系数来决定。本文中的相关系数阈值取为 0.7，代表了预测值与真实值之间有着很强的统计相关性。

5.5 本章小结

本章的主要内容是介绍并根据需求改进遗传算法，使之能够解决空调系统配置设计优化问题。

第 5.2 小节介绍了适用于单目标优化的 MI-LXPM GA。该算法经过合理的交叉算子、变异算子设计及处理整数限制，能够求解诸如空调系统配置设计优化之类的多层次、非线性约束及混合整数规划的优化问题。

第 5.3 小节中介绍了适用于多目标优化的 NSGA-II。传统的 NSGA-II 并不能求解整数规划问题，本文借鉴了 MI-LXPM GA 中的整数处理方法，使之能够解决混合整数多目标优化问题。

第 5.4 小节中提出使用基于 SVR 的 NSGA-II-S 算法替代传统的 NSGA-II，可使得优化过程大大节省时间。

第 6 章 编程及软件开发

6.1 软件开发

本研究开发了一款基于组件的建筑性能模拟（Building Performance Simulation）工具-HVACOpt，旨在用于超高层建筑空调系统概念设计阶段。通过对不同概念的数值模拟，得到相应的目标值，进而帮助设计人员更好的对不同的方案进行决策。

本软件主要由两部分功能组成：超高层建筑空调系统能耗模拟和超高层建筑空调系统设计优化。

- 超高层建筑空调系统能耗模拟

超高层建筑空调系统能耗模拟是建立在已知该建筑所有空调系统设备选型的基础上进行的。通过加载外部逐时负荷文件和输入设备选型参数信息，可得到该建筑用于空调系统的逐时能耗。

- 超高层建筑空调系统设计优化

空调系统设计优化是本软件的主要功能。在空调系统设计初期，通过对影响建筑能耗及经济性的变量进行优化，进而得到最优或者近优的空调系统配置设计方案。

就设计优化功能而言，HVACOpt 有着很大的灵活性。一是使用者可以很方便的考察 HVAC 系统设计优化中不同变量对结果的影响，进而确定优化问题中的主要影响因素；二是作为开源软件，使用者可以按需要修正或者添加既有组件模型；三是通过修改内置的基因遗传优化算法(GA)参数，用户可以灵活的控制优化过程。

6.1.1 编程语言

HVAC 系统配置优化设计问题本身是一个规模大的问题，需要大量的计算，而这个问题也限制了性能模拟和设计优化软件在个人电脑上的使用。HVACOpt 通过适当的简化组件模型，如 AHU 模型，以及对 GA 的改进，可以很方便快捷的在个人电脑上使用。目前，现版本的软件是在 DELL VOSTRO (Intel(R) Core(TM) i5-4460 CPU 3.20GHz)上完成调试运行的。

HVACOpt 使用了 MATLAB 环境进行编程与编译。Matlab 是一个高级的矩

阵/阵列语言，它包含控制语句、函数、数据结构、输入输出和面向对象编程特点。Matlab 以矩阵为基础，不需要预先定义变量和矩阵(包括数组)的维数，可以方便地进行矩阵的算术运算、关系运算和逻辑运算等。而且 Matlab 有特殊矩阵专门的库函数，可以高效地求解数值问题。

除了上述原因，之所以选择 Matlab 作为编程语言还因为：

- (1) Matlab 允许模块化的程序结构设计。基于组件的 BPS 工具其主要优势是在模拟中不断调用事先编好的组件进行计算，而这种功能的实现需要编程语言具有模块化程序设计的功能。在空调系统模拟中，就表现为将空调系统能耗模拟这一大任务分成若干个子任务(冷水机组能耗、水泵能耗等)，用一个一个的模块化程序(例如，Matlab 中的函数)完成这些子任务，通过模块化程序间的调用完成复杂的性能模拟。
- (2) Matlab 的扩展性强。作为设计优化软件，首先需要有强大的优化算法支持。Matlab 优化工具箱能够提供大量可靠的优化算法，而且大多是开源程序，可以按照需求进行更改。这种扩展性为 HVACOpt 的优化算法改进提供了可能。
- (3) Matlab 是一种解释性语言，并不需要专门的编译器。在命令行输入语句之后，系统会立即进行处理，完成编译、链接和运行的全过程，压缩了一切不必要的编程工作。
- (4) 由于市场流行性能模拟软件 TRNSYS、EnergyPlus 等，并不计算组件压降，在求解水系统压力时存在困难。虽然通过编程可以实现 TRNSYS 对水系统压力的求解，但是容易造成不收敛的问题。Ma Zhenjun 在其博士论文中，将空调系统性能模拟和系统压力模拟分开，避免了该问题^[57]。因此，有必要开发能够计算水系统压力的系统模型。

6.1.2 软件开发目的

目前，虽然许多 BPS 工具(EnergyPlus, Trnsys 等)可应用于超高层空调系统设计，但是当应用于优化过程时，需要不断的手动调整系统模型的输入参数，尤其是当涉及到系统拓扑结构的优化时，需要不断的重新建模，过程十分繁琐。为了克服基于知识的传统空调系统设计方法带来的弊端以及现有软件复杂的优化过程，HVACOpt 将能耗模拟与优化设计耦合在一起，用户可通过输入建筑信息等基本参数即可实现优化设计，过程相对简单。建议应用于建筑空调系统概念设计初期，为设计人员尽早的对相应的方案做出评估。

HVACOpt 是通过以下几个部分来达到空调系统优化设计的目的的：

- 模块化。模块化的程序结构设计使得软件中的程序代码更加面向对象，

这样的—个好处是研究人员能够同时开发不同的模块，而不会受其他未完成模块的影响，也不会受限于对整个程序结构的理解程度。这一点对于软件的推广及程序模型进一步的开发起着重要的作用。

- 可链接。模块化使得其他开发者能够很方便的修改已有组件模型或者增加新模型。这意味着可以很方便的与其他编程元素建立链接。HVACOpt 的源代码包含了许多组件模型，而且这些模型都有预留接口，方便与其他程序或者软件（例如 Excel）相连接。图 6.1 描述了该软件的基本架构以及与其他软件的链接。

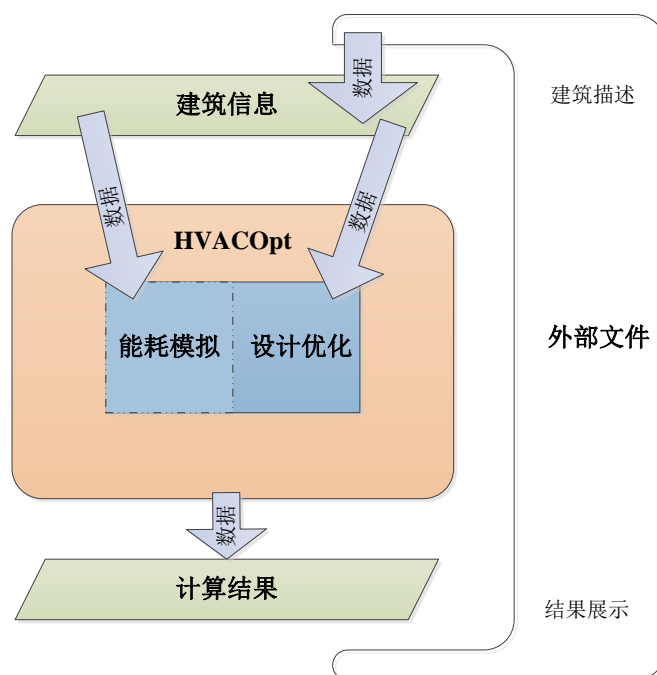


图 6.1 HVACOpt 的基本信息流

- 开源代码。本软件不是一个黑箱模型，不会增加使用者的理解难度。通过开放源代码，使用者可以方便的阅读与修改。

总之，对于使用者和开发者来说，HVACOpt 是一个使用相对简单的软件。开发者使源代码和优化算法尽可能的模块化，并最小化使用者对编程知识的需要；同时，通过与其他软件的链接，不同程序间的数据传递变得 更加有效率。

接下来的介绍并不是为 HVACOpt 软件提供用户指南或者完整的描述，而是用来解释开发软件的一般方法和该软件的主要功能。

6.2 能耗模拟软件

超高层建筑空调系统能耗模拟（HVACOpt Simulation）是建立在已知该建筑所有空调系统设备选型的基础上进行的。通过加载外部逐时负荷文件和输入设备选型参数信息，可得到该建筑用于空调系统的逐时能耗。

如图 6.2 所示，HVACOpt 能耗模拟板块主要由四大部分组成：GUI，输入文件管理器，系统求解器和结果输出。

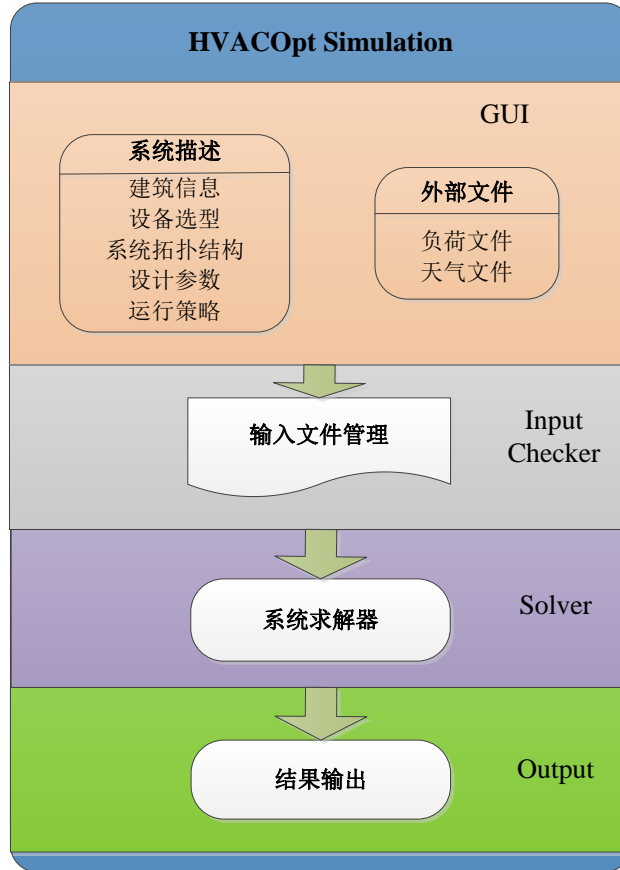


图 6.2 HVACOpt 能耗模拟板块主要组成部分

- 图形用户界面（GUI）

GUI 是软件的图形界面，是用户与软件交互信息的主要途径。HVACOpt Simulation 的 GUI 包含两部分输入文件：系统描述文件和外部文件。系统描述文件包括建筑的基本信息（如层高，层数，设备层位置等）、设备选型、系统拓扑结构（分区数、能源站个数等）、设计参数（水系统设计温度、设计温差等）和运行策略（运行时间等）。系统描述是在 GUI 中相应的位置由用户填写输入完成的。

外部文件包括建筑的负荷文件（例如，逐时负荷等）和天气文件（例如，逐时温度等），这部分信息是由用户提供的 Excel 文件读取得到，且这两种 Excel 外部文件需满足一定的格式，方可成功的进行数据交互。

- 输入文件管理器（Input Checker）

输入文件管理器是为了方便的管理用户输入信息而设定的模块。其主要功能是对用户输入信息进行校核及保存管理。输入信息校核是一项必不可少的工作，因为用户输入的信息可能存在各种各样的问题，通过校核，可以提醒用户输入正确的信息。在校核完毕后，合理的信息会被保存名为 input.xls 的输入文件，方便用户随时检查输入信息。

- 系统求解器

系统求解器是 HVACOpt Simulation 软件的计算核心。通过求解系统方程，输出系统能耗或者经济值。

- 结果输出（Output）

软件计算结果会输出到相应的外部 excel 文件，同时考虑可视化的效果，在 GUI 中增加了空调系统各部分能耗及经济值的展示模块。

由此可见，HVACOpt Simualtion 软件的数据流动过程简单，大大的简化了空调系统模拟过程。用户只需要在 GUI 中给定模拟所需要的系统描述文件和外部文件，通过输入文件管理器的审核，即可进行系统求解并输出计算结果。

6.3 设计优化软件

超高层建筑空调系统设计优化软件（HVACOpt Optimization）旨在空调系统设计初期，通过对影响建筑能耗及经济性的变量进行优化，得到最优或者近优的空调系统配置设计方案。

本软件通过将设计优化过程与能耗模拟过程耦合，简化设计优化实现流程，改善了用户手动优化的繁琐过程。优化软件主要由以下三部分组成。

- 图形用户界面（GUI）

HVACOpt Optimization 的 GUI 包含三大部分：系统描述文件、外部文件和优化问题文件。

不同于能耗模拟软件，系统描述文件只包含优化对象的基本信息，如层高、层数等。拓扑结构等系统信息是要优化的变量，因此并没有在系统描述文件中给出。

外部文件，同能耗模拟软件一样，包括建筑的负荷文件（例如，逐时负

荷等)和天气文件(例如,逐时温度等),这部分信息是由用户提供的 Excel 文件读取得到,且这两种 Excel 外部文件需满足一定的格式,方可成功的进行数据交互。

优化问题文件,涉及到空调系统设计优化问题的建立,主要包括优化目标,优化变量以及优化算法的参数设置。这部分信息是由用户在 GUI 界面中直接输入确定的。

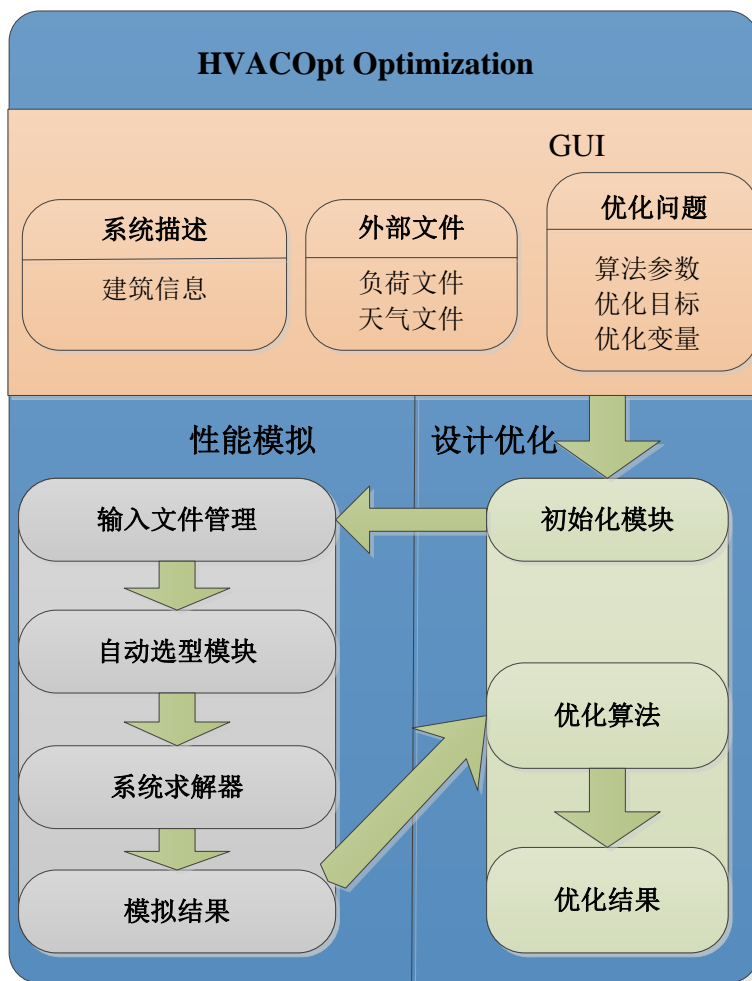


图 6.3 HVACOpt 优化板块主要组成部分

- **性能模拟系统**
性能模拟系统,类似于能耗模拟系统的结构,主要目的是评估目标函数,为设计优化系统返回目标函数值。与能耗模拟软件不同的地方是,性能模拟系统并不需要用户输入设备信息。部分设备信息(如冷热源选型)是通过优化计算得到的,另外一些设备(如水泵,换热器,冷却塔等)是在选择冷热源后由自动选型模块自动选型设定的。
- **设计优化系统**

设计优化系统主要由三部分组成：初始化模块，优化算法和优化结果。初始化模块只在优化计算开始时调用一次，目的是为优化计算提供初始值；优化算法是设计优化系统的核心，通过处理模拟结果值，不断地搜索、更新优化变量值，直到算法收敛，此时可认为得到了优化问题的最优或者近优解；优化结果模块可为用户提供可视化的优化过程，方便用户对优化算法进行监视和及时调整。

第7章 优化案例：金茂大厦

本章将以上海金茂大厦作为优化设计案例，使用改进的进化算法，求解及分析空调系统配置的最优设计方案。

7.1 建筑描述

金茂大厦 (Jin Mao Tower)，竣工于 1999 年，位于上海浦东新区黄浦江畔的陆家嘴金融贸易区，楼高 420.5m，地下 3 层，地上 88 层，88 层以上的四层阁楼用以放置机器设备，总建筑面积为 29.2 万多平方米。大厦的主要功能包括两部分：办公和宾馆，其中，3~50 层为办公室，58~85 层为宾馆客房。

金茂大厦的水系统分为四个垂直分区：办公低区（21 层以下）、办公高区（21-51 层）、宾馆办公区（52-57 层）、宾馆客房区（58-86 层）。其中，宾馆办公区与宾馆客房区的冷水通过 51 层的板式换热器与办公高区的一次冷水热交换获得。虽然有四个垂直分区，但是由于四个分区只通过板换进行了一次连续热品质降低，且只有一个独立冷水系统（能源站），按照 4.1.2 的简化原则，可认为金茂大厦的水系统拓扑结构如图 4.4 右图所示，即拓扑结构值为[2 1 1 5]。其中换热器位于 51 层，起着断压换热作用。冷热源及冷却塔的选型如表 7.1 所示。

表 7.1 金茂大厦的冷机和冷却塔参数

设备类型	额定制冷量 (kW)	电机功率 (kW)	台数
制冷机组	4200	852	6
	1406	306	2
冷却塔	3511.6	44.7	12

7.2 能耗模型基准

本节主要通过金茂大厦的分项计量数据及选型数据来校核能耗模拟模型，然后作为基准模型用于优化设计验证。

在概念设计阶段，水力管网的阻力系数是未知的，且管网阻力系数对系统压头及水泵选型起着决定性作用。因此，在进行设计优化验证时，需要对管网阻力系数进行合理的赋值。本文中，通过使用金茂大厦 2014 年 07 月到 2014 年 10 月

的运行能耗数据，对管网阻力系数进行调整，并建立基准系统能耗模型，最终管网阻力系数表 7.2 所示。

表 7.2 金茂大厦模拟计算中部分组件的阻力系数

组件	$S(\text{Pa}\cdot\text{s}^2/\text{kg}^2)$	压降 @ $m=1.0\text{kg/s}$	描述
管道	2	2	管道、阀门及配件
冷水机组蒸发器	2.317	2.317	冷水机组蒸发侧及阀门
冷水机组冷凝器	1.455	1.455	冷水机组冷凝器及阀门
换热器	4.21	4.21	换热器冷热侧及阀门
AHU 水侧	3.28	3.28	AHU 水侧及阀门
冷却塔	5.00	5.00	冷却塔水侧及阀门

由 7.1 章节已知，基准模型的设计变量为 $x = [4\ 6\ 12\ 2\ 0\ 6\ 1\ 6\ 11\ 0\ 0\ 0\ 5.5\ 32\ 16\ 2\ 1\ 1\ 5]$ 。其中， x 中对应的各个元素详见表 4.4。系统初投资约为 $7.27\text{E}+06$ 美元，7 月份到 10 月份能耗值约为 $7.55\text{E}+06\text{kWh}$ 。

能耗基准模型与金茂大厦实际能耗对比如图 7.1 所示：

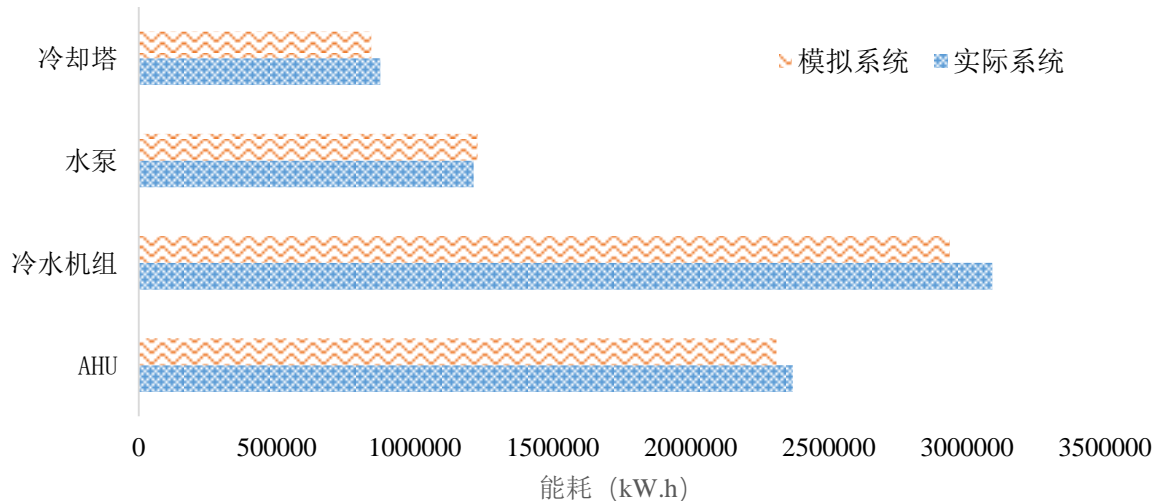


图 7.1 金茂大厦能耗基准模型与实际值对比图

可知冷却塔、水泵、冷水机组以及 AHU 的实际值与模拟值的相对误差分别为 3.68%、-1.2%、4.9%、2.4%。考虑到 5% 的工程误差是可接受的，在此认为基准模型可以代替实际模型，方便在后续优化工作中进行对比。

7.3 设计优化

本文以金茂大厦信息为原型，进行了三组优化实验，分别取名为 Case 1, Case 2 和 Case 3。

Case 1 中，对位于上海的金茂大厦进行以能耗为目标的优化计算，得出以能耗为单目标函数时，适用于金茂大厦的较好的设计方案。

Case 2 中，对位于上海的金茂大厦进行多目标优化计算，找到满足多目标设计时的 Pareto 非劣解集，为决策者提供可依赖的决策数据。

Case 3 中，对超高层建筑空调系统设计优化问题进行参数分析，找出建筑功能、建筑位置及建筑高度对空调系统配置的影响关系。

值得注意的是，初投资目标中，因为数据的缺失，并未计算管道（水管、风管等）的投资。

7.4 结果分析

7.4.1 Case 1

本文单目标主要考虑建筑在给定时间内的能耗目标。通过搜索设计变量空间，找到能耗最小值。

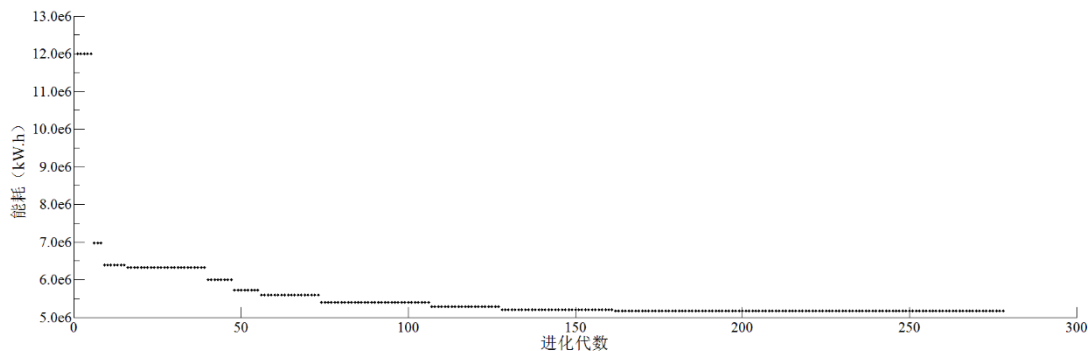


图 7.2 金茂大厦能耗目标优化—GA 性能

从图中可以看出，单目标优化时，GA 在 160 代左右就趋于收敛，展示了 MI-LXPM GA 快速找到最优解的能力：约 54000（300 代×180 个体）次计算，即找到最优解 $x = [1\ 6\ 15\ 1\ 5\ 0\ 1\ 6\ 20\ 6\ 2\ 1\ 8.3\ 32.3\ 13.0\ 2\ 2\ 1\ 3]$ ，此时能耗值约为 $5.20 \times 10^6 \text{kWh}$ ，与基准模型能耗相比节约能耗约 30.9%。

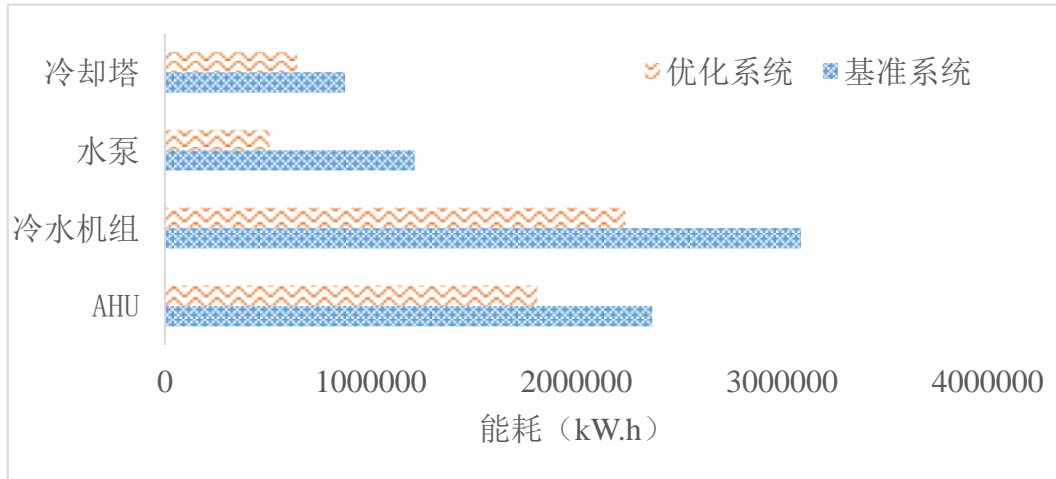


图 7.3 能耗目标 GA 优化结果：最优系统与基准系统的能耗对比

表 7.4 能耗目标 GA 优化结果：最优系统与基准系统的初投资对比

初投资 (\$)	冷水机组	冷却塔	AHU	一次泵	二次泵	冷却泵	换热器
最优模型	3154244	779263	2403388	49100	37061	56246	0
基准模型	3473597	804734	2621878	41911	41583	43691	74308

最优模型与基准模型相比，区别在于拓扑结构形式及设计压力。基准模型中，只有一个能源站，同时处理办公楼与酒店的负荷，其中，冷水机组直接提供冷水给办公楼区域，通过板换间接提供冷水给酒店区域，酒店使用的冷水品质出现下降。而最优模型中，上下两个垂直分区分别有独立的冷冻水系统；这种结构形式充分的考虑了分区不同的使用时间，有效的避免了集中冷冻水系统在不同功能分区的使用；由于使用独立的冷水系统进行断压分区，最优系统中并没有板式换热器，但是却多了一组一次泵。另外，基准模型的设计压力为 2.8MPa，而最优模型中设计压力仅为 2.0MPa。

如表 7.4 所示，在选型方面，最优模型中，冷水机组的初投资较低，其影响因素为：（1）由于最优模型中有两个冷源站分别供给两个垂直分区冷量，所以能源站选型是分别以两个功能分区的负荷为基准，这充分考虑了不同功能区域的不同负荷率；而基准模型中，能源站选型是以两个分区的负荷之和为基准，未充分考虑不同功能分区不同负荷特性。在能源站选型上表现为，最优系统中，总的选型容量（6900 冷吨）小于设计容量（8000 冷吨），而且选择了更多的小容量机组来满足酒店的负荷，减小了机组投资；（2）而且，由于最优模型的设计压力值较小，设备用于承压能力的初投资减小。

最优模型中，定频水泵总的初投资比基准模型要大。主要原因是拓扑结构的变化引起的。最优模型中，有两套独立的冷冻水系统，而基准模型只有一套。再

者，定频泵是与冷水机组配套选型的，意味着，最优系统中，需要额外设置一套一次泵，且总个数与冷水机组的选型一致，这就导致定频泵的初投资增大。但是，二次泵的投资却小于基准模型。原因有三点：（1）与基准模型相比，最优系统少配置一套换热器侧二次泵；（2）基准模型中，换热器降低冷冻水品质，致使上区二次水流量增大，同样会导致基准模型上区二次泵选型较大；（3）最优系统中设计压力更低，设备承压要求更低，用于承压的初投资就更低。

同样，最优模型中，冷却塔的选型与冷水机组的选型配套，总容量随冷水机组容量的减小而减小，而且由于设计压力的减小，承压要求降低，最终初投资减小。

AHU 的投资降低，主要由两部分组成：（1）因为 AHU 送风温度的降低，导致送风温差增大，送风量减少，能耗降低；（2）设计压力降低会降低用于 AHU 承压能力的初投资。

最优模型与基准模型的各项能耗比较如图 7.3 所示。最优系统中各组件能耗均低于基准系统。如前分析所知，冷水机组选型趋于小机组，在部分符合运行时，只需要开启小机组组合，从而达到节能效果。与机组联动选型及控制的组件如定频泵、冷却塔等都因此而能耗降低。之所以水泵能耗降低幅度大于冷水机组，还因为最优系统比基准系统少配置一套二次泵。

7.4.2 Case 2

多目标优化主要考虑选定时间内的能耗目标和初投资。如前面分析所知，设计压力较大时，可能只需要设计一个垂直分区，用于板换和配套的二次泵的初投资减少，同时输送给建筑上层空间的冷冻水品质不会下降，意味着运行阶段的能量浪费会减少；但是设计压力较大时，需增大初投资以提高设备的承压能力。二者的权衡关系，是本次优化的最终结果。

（1）解空间

图 7.4 描述了多目标优化时的解集空间。解空间是由 5 次优化过程中产生的所有的点组成的，一共有 15000 个点（ $5 \times 50 \times 60$ ）。从图中可知，空调系统设计多目标优化问题是一个高度受限的凸优化问题，而且解空间和 Pareto 边界因为离散拓扑结构变量的原因变得不连续。从图 7.4 中的第 III 象限可以看出，空调系统多目标最优设计方案分布在离散的不同解集里，这些不同解集，由图 7.6 可知，是由拓扑结构形式和设计压力的选择共同造成的。

第 III 象限中，靠近最优解的区域被多条斜率趋于 0 的直线(例如 L1, L2,

L3 等)的点分割(图 7.4)。这些直线点其实是不同拓扑形式和设计压力组合下的解空间。以 L1, L2 和 L3 为例,三者结构形式均为[2 2 1],不同之处在于设计压力分别为 5 级(2.8MPa),4 级(2.5MPa)和 3 级(2.0MPa)。结构形式相同时,设计压力只影响到设备承压能力的初投资,而对能耗不存在影响。从数据上表现为,能耗相同的设计中,L3 的点初投资要优于 L2 的点,L2 的点初投资优于 L1 的点。因此,多目标优化时,根据支配解的定义,L3 代表的解支配了 L2 和 L1 的点,意味着 L3 上的点是 Pareto 边界的一部分,而 L2 和 L1 并不是。

图 7.4 中,还可以看出,趋于最优化部分的解空间是由类似直线的点组成的。这些直线受到所有设计变量的影响,但是也存在一定的规律。以 L3 为例,在 L3 上的点,有着一些共同特征:结构形式一致([2 2 1 3]),冷冻水温度相近($13 \pm 0.1^\circ\text{C}$)。可见,AHU 出风温度是影响超高层建筑空调系统初投资的另一个重要因素。AHU 出风温度影响送风量,进而影响 AHU 选型,因为 AHU 的初投资占比高(36%左右),出风温度的对系统总初投资的影响将变得明显。L3 上初投资几乎不变,而能耗变化大,主要与冷冻水温度和冷却水温度有关。冷冻水温度增大,不影响一次水及冷却水环路的选型。虽然因为二次水温差的减小,将增大二次泵的选型,用于二次泵的初投资将增大,但是由于二次泵的初投资占总投资的比例小(约为 0.5%),因冷冻水温度造成的投资增大可忽略不计;同理,因为热处理设备的选型随着建筑设计负荷的变化而变化,冷却塔的选型只受冷水机组选型的影响,所以,冷却水温度变化时,建筑设计负荷并未发生变化,冷水机组的选型也未发生变化,最终,冷却塔的选型未发生明显变化。但是,系统能耗却与冷冻水温度、冷却水温度密切相关。因此,L3 上的点能耗变化范围是与冷冻水温度和冷却水温度的取值范围一致的,而不同直线的初投资范围是与结构形式、设计压力及 AHU 出风温度设定点的取值范围保持一致的。

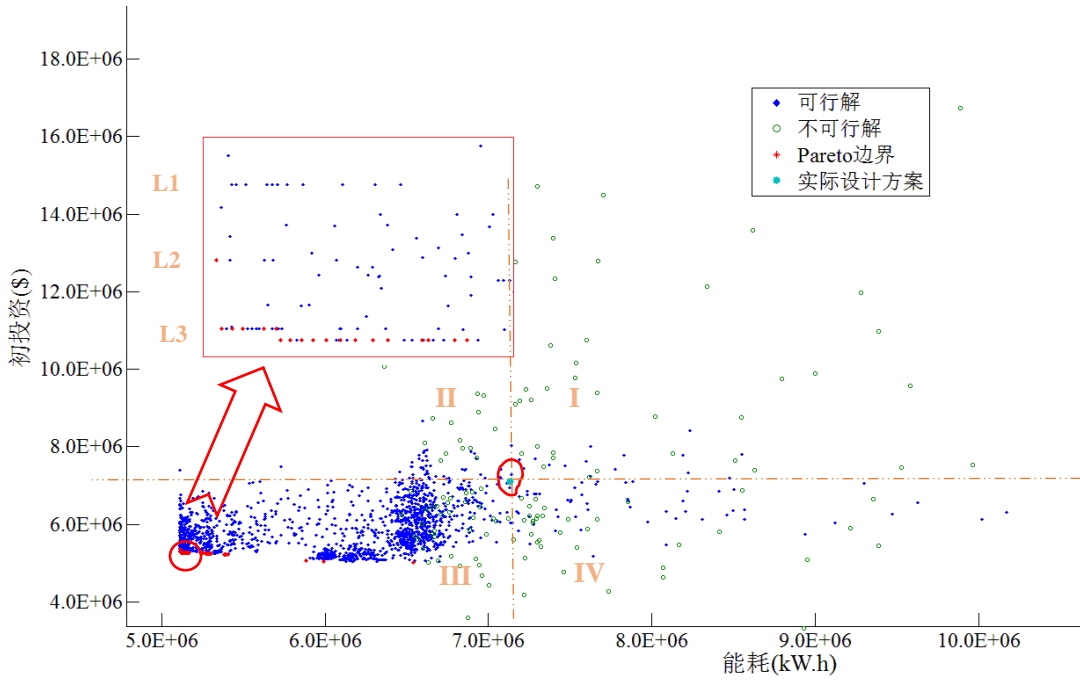


图 7.4 空调系统配置设计多目标优化的解空间

(2) Pareto 边界

优化算法搜索出的 Pareto 边界如图 7.5 所示，优化边界上中主要有三种拓扑结构[2 2 1]、[3 2 2]和[3 2 1]。第一种结构设计压力为 3 级 (2.0MPa)；第二种和第三种结构设计压力为 2 级 (1.6MPa)。与实际设计拓扑机构[2 1 1]设计压力 5 级(2.8MPa)相比，在图 7.4 中虚线组成的象限III中的设计方案都会好于原设计，意味着能耗与初投资均小于实际设计方案。

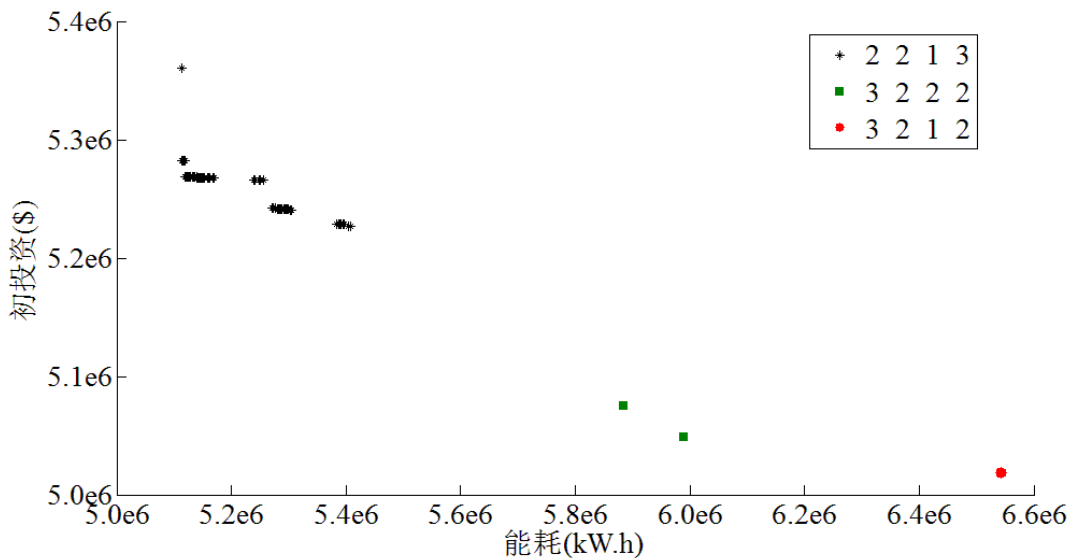


图 7.5 空调系统配置设计多目标优化 Pareto 边界

值得注意的是，由图 7.2 和 7.5 可知，单目标优化时 GA 搜索到的最低能耗

为 $5.2E+06\text{kWh}$ 左右，多目标优化时最优结构的能耗可达到 $5.2E+06\text{kWh}$ ，这意味着单目标优化时，GA 陷入了局部最小值，只搜索到问题的近优解。

(3) 结论分析

对多目标优化结果的分析，可以总结出以下几点：

- 空调系统配置的运行能耗及初投资均受到拓扑结构及运行控制变量的制约。特定形式的拓扑结构和 AHU 出风温度可将解空间划分成不同的区域，因此在实际应用中，只有先确定了合理的拓扑结构，才能实现大幅度的减少建筑能耗和空调水系统的初投资；
- 水系统能耗取值范围与拓扑结构形式有关：在同样的设计变量取值范围里，水系统能耗值的最小值由拓扑结构形式决定。最优结构[3 2 1]中，如图 4.4 所示，分区 2 和分区 3 之间通过板换断压，造成分区 3 的冷冻水品质下降（冷冻水温度上升），最终导致这种拓扑结构中，能耗最低的系统配置比[2 2 1 3]中最优配置还要高。
- 考虑到搜索出的 Pareto 边界点中，不同结构的最优能耗值相差较大(32%左右)，最优初投资值相差 10%左右，因此，建议实际高楼设计中，应充分权衡初投资和能耗的关系。
- 优化结果中搜索出的 Pareto 边界虽然是局部边界点，但是却非常接近于全局边界。想要得到全局 Pareto 边界，唯一的办法是使用穷举搜索，但是对用工程问题来说，穷举搜索方法太过耗时耗力。改进后的 NSGA-II-S 对全局 Pareto 边界的逼近能力是可以接受的。

7.4.3 Case 3

本案例中，主要考虑超高层建筑所处地理位置以及功能对优化结果的影响，并得出适用于超高层建筑空调水系统配置设计的一般性结论。案例中主要考虑了建筑功能、建筑位置、建筑高度等变量的影响。各变量的取值如表 7.5 所示。

表 7.5 建筑功能变量的取值

变量名称	变量取值
建筑功能	办公/酒店(O/H)、办公(O)、酒店(H)
建筑位置	上海(SH)、广州(GZ)、新加坡(SIN)
建筑高度	300m、400m、600m

本文在设计优化实验时，采用了控制变量的方法，即改变某一变量取值的同时，保证其他变量的取值不变，优化目标为最小化初投资与十年的电费账单之和。因此，可得到三组实验结果，分别探讨了不同变量对优化结果的影响，详见表 7.6—表 7.8 所示。

(1) 建筑功能对系统结构的影响

为了解建筑功能对水系统拓扑结构的影响，本实验控制建筑功能变量的值，并比较最后的优化结果，各组的其他建筑信息及参数都一样，主要有：建筑高度 400m，地理位置为上海等。

从表 7.6 可以看出，建筑功能改变时，会导致空调系统使用时间的改变，进而影响系统分区的设定。建筑功能对水系统分区的影响表现为：建筑功能较为单一时，可使用一个能源站的形式，如办公及酒店水系统形式为[2 1 1 3]（图 4.6 右），功能混合建筑适合使用多能源站的形式，如办公与酒店混合建筑适合形式为[2 2 1 3]的结构(图 4.6 左)。主要原因是当功能较为单一时，各设备的使用时间较为统一，而混合功能建筑因为功能的区别，设备使用时间按照各自需求而不同。因此，可以看出，在实际设计中，能源站的个数选择应该按照建筑功能的分区而选择，方可达到节能节钱的目的。垂直分区的个数则需要结合设计压力的选择和楼层高度综合考虑。

表 7.6 建筑功能对最优系统拓扑结构的影响

建筑功能	拓扑结构	备注
O/H	[2 2 1 3]	2 个最小垂直分区，2 个能源站，拓扑形式为 1，设计压力 2.0MPa
O	[2 1 1 3]	2 个最小垂直分区，1 个能源站，拓扑形式为 1，设计压力为 2.0MPa
H	[2 1 1 3]	2 个最小垂直分区，1 个能源站，拓扑形式为 1，设计压力为 2.0MPa

(2) 建筑位置对系统结构的影响

本组优化实验，主要改变建筑位置值，另外两个变量建筑高度和建筑功能分别取为 400m 和办公型建筑。建筑位置的取值为上海、广州和新加坡，其中，上海市属于夏热冬冷地区，广州市属于夏热冬暖地区，新加坡属于热带气候。图 7.6 中，可以看出三个不同城市中同一建筑的冷负荷曲线有着很大差距（新加坡、广州的日平均逐时负荷比上海日平均逐时负荷分别大 15.1%和 17.7%）。

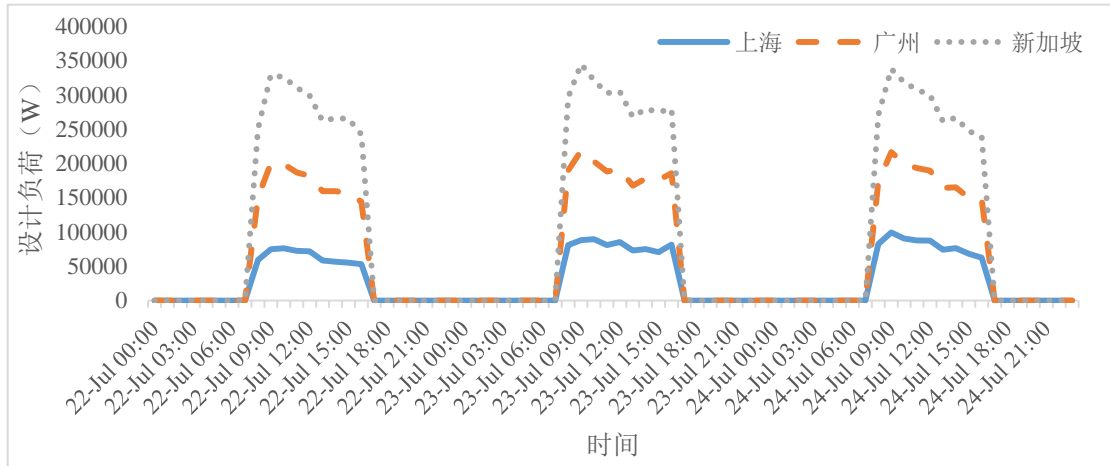


图 7.6 不同城市的负荷曲线

表 7.7 中列出了不同位置下该 400m 超高层办公建筑空调水系统的最优配置。不同城市最优系统的区别在于冷水机组选型容量及类型：上海市的建筑负荷最小，冷水机组选型容量也最小，其配置为 3 台 100 冷吨、2 台 600 冷吨及 5 台 1100 冷吨；广州市的冷水机组选型配置则为 4 台 100 冷吨、2 台 600 冷吨和 5 台 1100 冷吨；新加坡的对应配置为 4 台 100 冷吨、1 台 600 冷吨及 6 台 1100 冷吨。单纯地理位置造成的负荷变化对最优系统拓扑结构没有影响，三个城市中，400m 的超高层建筑最优拓扑结构形式均为[2 1 1 3](2 个最小垂直分区、1 个冷源站、拓扑形式为 1，见图 4.4 右，设计压力为 3 级 (2.0MPa))。

表 7.7 建筑地理位置对最优系统选型及拓扑结构的影响

城市	功能	高度	冷机选型											拓扑结构				
			x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x16	x17	x18	x19
SH	O	400	1	6	11	3	2	5	3	6	9	0	0	0	2	1	1	3
GZ	O	400	1	6	11	4	2	5	3	6	16	0	0	0	2	1	1	3
SIN	O	400	1	6	11	4	1	6	3	9	11	0	0	0	2	1	1	3

可以看出，虽然建筑所处地理位置及负荷曲线不同，会导致冷水机组选型不同，但是对水系统拓扑结构却没有影响。三个城市中，同一拓扑结构[2 1 1 3]的形式都可使得建筑初投资及十年电费账单之和最小。

(3) 建筑高度对系统结构的影响

本组优化试验中，只改变建筑高度的值。建筑功能和建筑位置分别取为办公型建筑和上海市，建筑高度分别为 300m、400m 和 600m。不同高度下的同一建

筑最优空调系统形式如表 7.8 所示。

表 7.8 建筑高度对最优系统选型及拓扑结构的影响

城市	功能	高度	冷机选型											拓扑结构				
			x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x16	x17	x18	x19
SH	O	300	2	6	11	1	1	4	4	10	11	0	0	0	2	1	1	2
SH	O	400	1	6	11	4	2	5	3	6	16	0	0	0	2	1	1	3
SH	O	600	1	10	18	6	4	3	2	6	13	0	0	0	2	1	1	5

表 7.8 中可以看出,位于上海的办公建筑,其最优拓扑结构形式与高度无关,都为[2 1 1] (2 个最小垂直分区、1 个能源站、拓扑形式为 1, 见图 4.4 右) 的形式。不同之处在于高度越高,每个分区的设计压力就越大,当高度由 300m 增加到 600m 时,最优系统中对应的设计压力等级由 2 级(1.6MPa)增加到 5 级(2.8MPa)。与此同时,由于建筑负荷的增大,冷水机组的选型总容量及类型也会发生变化:300m 时,能源站的冷源配置为 1 台 200 冷吨、1 台 600 冷吨及 4 台 1100 冷吨的冷水机组;400m 时,冷水机组选型则为 4 台 100 冷吨、2 台 600 冷吨及 5 台 1100 冷吨;600m 时,冷水机组选型增大为 6 台 100 冷吨、4 台 1000 冷吨和 3 台 1800 冷吨。

因此,建筑高度对系统结构的影响表现为:一是建筑高度的增加,导致建筑负荷的增加,最终影响了冷水机组的选型;二是为了满足建筑高度的增加,水系统可以分为更多垂直分区或者提高现有分区的设备承压能力,而对于功能单一的建筑来说,更多的垂直分区则意味着更多的断压板换的存在,进而导致冷水品质的更大损失,造成运行能耗增加,为避免这种情况,最优系统中,选择了提高每个分区的设备承压能力来保证初投资与十年电费账单之和最小。

第 8 章 结论

超高层建筑空调系统配置设计主要目的是在概念设计阶段,对空调系统进行拓扑结构形式选择、组件选择及选型以及运行控制设定点的设定。优化设计则是使用优化算法搜索出最优系统配置设计方案。为了完成上述目标,需要解决以下几个问题。

第一,必须先建立空调系统配置设计的优化问题。本文的工作是在空调水系统配置设计的范围内进行的。水系统配置主要由组件、水系统拓扑结构及运行策略三大部分组成。为了评估空调水系统能耗及初投资,本文建立了静态的系统配置模型。根据系统配置组成成分及系统能耗目标及投资目标影响因素,选择了合适的设计变量,在满足设计限制条件的情况下,同时建立了单目标优化问题 and 多目标优化问题。

第二,本文的空调系统配置设计问题是复杂的多层次、混合整数、非线性的凸优化问题。一般来说,多层次的特征表现为组件的选择及运行控制变量的设定依赖于上层拓扑结构的选择,意味着,只有在拓扑结构进行优化完毕后,才能对下层控制变量的设定进行优化。本文提出一种同时优化的方法,避免了多层次问题优化分层的现象。其次,本文在对拓扑结构形式进行简化时,采用了 4 维整数向量来代替拓扑结构形式;因此,为满足整数变量的要求,在进化算法中,建立了特殊的整数运算符以适应整数变量的限制要求。最后,为解决文献综述中提到的优化耗时性的问题,本文将基于 SVR 的适应度近似方法与进化算法相结合,在一定程度上可使优化过程提速。

本章将对研究成果及局限性进行说明,并对未来的研究及应用方向提出一些建议。

8.1 研究成果

传统超高层建筑空调系统配置的设计多是基于工程设计人员的经验而完成的,由于优化与模拟软件的分离,设计过程的优化则是通过 2~3 个简单的方案对比来实现的。这种“手动”优化的过程为空调系统配置设计方案的实际运行带来了诸多问题。本文则可以通过以下成果改善空调水系统配置设计的过程:

(1) 超高层水空调系统配置分析与建模。影响空调水系统配置的主要因素有水系统静压、冷热源选择及位置、拓扑结构、断压板式换热器的选择及安装位置、运行控制变量设定点等。通过合理的简化,将上述影响因素归纳整理为三大

类: 组件选型、拓扑结构及运行控制变量。由于要考虑系统设计的能耗及初投资, 本文通过 4 维变量来表示不同的拓扑结构, 涵盖了水系统静压、冷热源位置、断压板式换热器及拓扑结构形式等因素; 因为最优监督控制策略一般比局部控制策略的性能更好, 本文采用监督控制策略来控制系统运行, 但是, 通过简化, 设计中只需要确定控制变量设定值即可。

(2) 本文研究主要内容是将超高层建筑空调水系统配置设计问题当成一个优化问题处理, 通过应用优化算法, 搜索出该问题的最优解。这部分内容主要解决了以下几个问题:

- 建立了各组件能耗、初投资及压降的数学模型; 组件模型、拓扑结构和控制策略组成了系统配置模型 (如一级二级泵水系统等); 最后, 建立了系统方程求解器用于能耗及初投资计算;
- 建立了空调水系统配置设计优化问题, 包括确定优化变量、目标函数方程及限制条件等;
- 增加整数算子, 使得传统 NSGA-II 算法适应于混合整数规划的多目标优化问题求解;
- 增加基于 SVR 的适应度近似方法, 并与 NSGA-II 结合, 加速优化搜索过程;

(3) 模拟与优化软件 HVACOpt 的开发。本文选用 MATLAB 环境进行软件的开发与应用。通过适当简化组件模型、方程求解过程以及使用适应度近似的进化算法, HVACOpt 可以将能耗模拟时间大大缩短; 而工程优化时间则由现行优化方案 (TRNSYS+MATLAB 或者 EnergyPlus+MATLAB) 的长达十几天缩短至 24 小时左右。

(4) 结果验证

本文将上海市金茂大厦的实际空调水系统配置设计方案 (基准系统) 与优化产生的最优系统进行对比。对比结果发现, 单目标 (能耗目标) 优化中, [2 2 1 3] 的拓扑结构形式比实际设计方案能耗值减少约 30%, 且初投资也更低; 多目标优化中, [2 2 1 3]、[3 2 1 2]和[3 2 2 2]的拓扑结构形式也能产生比实际设计更优 (能耗更低、初投资更少) 的方案。可见, 空调系统配置设计可以通过本文提出的方法进行优化。但是, 单目标优化中, GA 算法只搜索到近优解, 这也是后续研究要改善的地方之一。

同时, 空调水系统配置设计与建筑功能、建筑位置及建筑高度密切相关。综合考虑系统初投资和十年电费支出, 当建筑功能单一时, 只需要一套冷冻水系统, 至于混合功能建筑, 多组独立的冷冻水系统能更好的满足设计目标; 位于不同气候区的高层建筑, 冷热源选型配置会发生变化, 但是最优系统拓扑结构不会发生

变化；建筑高度的增加会因为负荷的增加而改变冷热源的选型，为满足建筑高度的要求，最优水系统拓扑结构虽然不会增加垂直分区的个数，但是会提高各个分区的设计压力值。

8.2 局限性与工作展望

本文建立并求解了空调水系统配置概念设计的优化问题。然而，作为一种概念设计方法，本文做了诸多简化。首先，实际建筑中的空调水系统拓扑结构形式比 4.1.2 章节中假设的拓扑结构形式更为复杂。实际超高层建筑空调水系统中，水系统分区还可以在本文提出的“最小垂直分区”里再细分，这样就可以保证最小垂直分区的最下层部分设备在最低设计压力下运行。例如，假设某最小分区设计压力为 3 级，可以在该最小分区内增加两套板换使得部分设备分别运行在 1 级设计压力或 2 级设计压力下。其次，为了减少设计变量，保证优化过程的快速收敛，本文忽略了部分影响设计的因素，如冷水机组在分区中的位置（本文只考虑了冷水机组位于分区最下层的情况）。再者，本文的优化过程是在给定的 12 种拓扑结构形式下进行的，其结果的应用受到拓扑结构的限制。最后，现实的空调系统还与使用者等因素动态相关。未来的研究可在以下两个方向进行：完整的系统模型建立和用于复杂工程系统设计的更强大的优化算法开发。

（1）完整的空调系统模型

超高层建筑空调系统配置设计问题是一个复杂难解的多层次、混合整数规划、非线性的优化问题。本文在建立系统模型时做了诸多简化与抽象。

- 只考虑了部分组件类型。其他类型的组件如螺杆式机组、热泵、吸收式机组、辐射板等未予考虑。这种简化导致，关于最优配置设计的结论只在现有组件模型的范围内适用。
- 未考虑管道、风道的造价。在初投资目标优化过程中，并未考虑管道和风道的造价。这种简化会低估或者高估某些变量对能耗及初投资的影响，如 AHU 出风温度设定值。当 AHU 出风温度增大时，设计风量也会随着增大，风道选型应该增大，同时，AHU 水侧出水温度也上升，同样负荷情况下，意味着二次水流量减小，可以适当减小相应管道的选型。但是，本文并未考虑二者的权衡关系。因此，优化出的设计值，可能并不是实际情况的最优值。
- 空调水系统配置变量的简化。由 3.2 和 4.1 小节，可知在水系统配置建模的过程中，本文忽略了诸多影响因素，如水泵布置方式、管道布置方

式等；其次，在对空调系统拓扑结构形式的描述中，以最小垂直分区个数代替垂直分区个数来对水系统进行垂直方向划分，这种划分使得拓扑结构形式变得有限，简化了计算，但是却忽略了其他可能情况。

(2) 全局优化方法

本文给出的进化算法虽然在一定程度上可以满足最优设计的需要，但是并不能保证每次运行结果都会稳定的收敛到全局最优解。

- 由第7章可知，GA容易陷入局部最优解，使得求解结果为近优解，而非全局最优解。由于GA中采用了随机计算，所以，一个好的办法是使用同一组GA参数进行多组优化求解，然后取多组最优解的平均值。该方法虽然可以在一定程度上克服消除近优解的影响，但是却大量增加优化过程所需计算时间。
- 当设计变量增多时，例如，考虑增加系统配置变量，GA耗时将明显增长，当变量增加为20~30个时，优化时间将增加至3~4天。因此，未来的研究中，可考虑对GA优化过程的提速。

致谢

回想起三年前拿到同济大学研究生录取通知书时心中对于未来毕业时的憧憬,此刻真可谓感慨颇多。我一直致力于寻找更广阔的天空,从军校到同济大学,对我来说是一种前进,从同济到美国也是这样的前进。在入同济前,这种前进的冲动一直激励着我。现在回首看来,多亏这样的冲动一直陪伴着我。

因为许鹏教授的指导与照顾,我在前进的路上才能更加自信。学术上,感谢许老师为我提供的能够磨练自己、充实自己的机会,也感谢他在学术生活上的独具一格的指导意见。学术之余,许老师也经常和我们讨论一些有趣的想法,通过头脑风暴的形式,鼓励我们进行创造性思维,许老师儒雅而不失风趣的性格保证了课题组融洽的氛围。他的人生哲理-期望理论,让我更加坚定自己对理想的信念。

感谢李铮伟老师将我代入研究生学术生活的大门。犹记得李老师手把手教我编写程序的日子,这些直接切身的知识解授为我硕士论文的顺利完成打下了坚实的基础。如果没有李老师,我也许会花更长的时间在学术生活的门口徘徊。谈及梦想,也感谢李老师能够耐心聆听并给予的无私的帮助。

感谢中国 UTRC 的丁金磊博士所领导的团队。每两周一次的会议是本研究能够按时完成的关键因素,丁博士及其团队为研究提出了很多关键性的意见,正是因为这些意见使得本论文在理论及逻辑上经得起推敲。

感谢香港城市大学的黄公胜教授。在黄老师课题组交流的三个月,让我对“为人师表”一词有个更深刻的认识与理解。黄老师多学科的研究经验为本文的优化部分提供了新思路,由于时间关系,这部分研究并未深入下去,实为遗憾。生活上,也感谢黄老师对我生活的照顾,对我留学申请上的大力支持。

感谢许门大家庭的所有成员。正是因为大家努力营造的正直、活跃的学术氛围,才使得我能够全神贯注的投入到论文研究中,也正是因为大家的团结、互助与友爱,才使得我在同济的三年时光过得轻松自在。特别感谢硕士侯瑾、冯帆以及陈永保博士对本论文的帮助。

感谢我的女朋友马静宇同学。正因为她的陪伴,才让枯燥变得有趣,让浮躁变得沉稳。也感谢她对于我人生目标的无私支持与奉献,正是因为她的谅解,我才能在人生的路上走的从容。

感谢我的父母、我的叔伯以及我的兄弟姐妹。正是因为他们无私的奉献与支持,我才能在追求自己价值与理想的道路上越走越远。不怕慢,只怕站。我会继续努力,直达彼岸。

最后,我想感谢一下我自己。感谢自己的独立与自尊,让我有能力有动力走到梦想的今天;感谢自己的不随波逐流,让我坚持为梦想奋斗;也感谢自己的内敛,让我认识到其实我可以做的更好。

2016年3月

参考文献

- [1]. 范存养, 杨国荣, 叶大法, 高层建筑空调设计及工程实录. 2014.
- [2]. Wright, J. and R. Farmani. *The simultaneous optimization of building fabric construction, HVAC system size, and the plant control strategy*. in *Proceedings of the 7th IBPSA Conference: Building Simulation, Rio de Janeiro, Brazil*. 2001.
- [3]. Asiedu, Y., R.W. Besant, and P. Gu, *HVAC duct system design using genetic algorithms*. HVAC&R Research, 2000. **6**(2): p. 149-173.
- [4]. Wright, J.A., H.A. Loosemore, and R. Farmani, *Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm*. Energy and Buildings, 2002. **34**(9): p. 959-972.
- [5]. Wang, W., R. Zmeureanu, and H. Rivard, *Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization*. Building and Environment, 2005. **40**(11): p. 1512-1525.
- [6]. Lu, L., et al., *Global optimization for overall HVAC systems—Part I problem formulation and analysis*. Energy Conversion and Management, 2005. **46**(7-8): p. 999-1014.
- [7]. Lu, L., et al., *HVAC system optimization—condenser water loop*. Energy Conversion and Management, 2004. **45**(4): p. 613-630.
- [8]. Lu, L., et al., *Global optimization for overall HVAC systems—Part II problem solution and simulations*. Energy Conversion and Management, 2005. **46**(7-8): p. 1015-1028.
- [9]. Lu, L., et al., *HVAC system optimization—in-building section*. Energy and Buildings, 2005. **37**(1): p. 11-22.
- [10]. Fong, K.F., V.I. Hanby, and T.T. Chow, *System optimization for HVAC energy management using the robust evolutionary algorithm*. Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(11-12): p. 2327-2334.
- [11]. Fong, K.F., V.I. Hanby, and T.T. Chow, *HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming*. Energy and Buildings, 2006. **38**(3): p. 220-231.
- [12]. Fong, K.F., T.T. Chow, and V.I. Hanby, *Development of Optimal Design of Solar Water Heating System by Using Evolutionary Algorithm*. Journal of Solar Energy Engineering, 2007. **129**(4): p. 499.
- [13]. Fong, K.F., C.K. Lee, and T.T. Chow, *Investigation on variable flow control in existing water-cooled chiller plant of high-rise commercial building in subtropical climate*. HVAC&R Research, 2014. **20**(1): p. 51-60.
- [14]. Gebreslassie, B.H., et al., *Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment*. Applied Energy, 2009. **86**(9): p. 1712-1722.
- [15]. Hamdy, M., A. Hasan, and K. Siren. *Combination of optimisation algorithms for a multi-objective building design problem*. in *IBPSA: 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow-UK*. 2009.
- [16]. Magnier, L. and F. Haghghat, *Multiobjective optimization of building design using*

- TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network*. Building and Environment, 2010. **45**(3): p. 739-746.
- [17]. Kusiak, A. and G. Xu, *Modeling and optimization of HVAC systems using a dynamic neural network*. Energy, 2012. **42**(1): p. 241-250.
- [18]. Seo, J., et al., *Optimization of the HVAC system design to minimize primary energy demand*. Energy and Buildings, 2014. **76**(0): p. 102-108.
- [19]. Wright, J.A., *The formulation, characteristics and solution of HVAC system optimized design problems*. 1987.
- [20]. Wright, J.A., *The optimised design of HVAC systems*. 1986, © JA Wright.
- [21]. Angelov, P., et al., *Automatic design synthesis and optimization of component-based systems by evolutionary algorithms*. Genetic and Evolutionary Computation - Gecco 2003, Pt Ii, Proceedings, 2003. **2724**: p. 1938-1950.
- [22]. Wright, J. and Y. Zhang. *An ageing operator and its use in the highly constrained topological optimization of HVAC system design*. in *Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation*. 2005. ACM.
- [23]. Wright, J., et al., *Evolutionary synthesis of HVAC system configurations: algorithm development (RP-1049)*. HVAC&R Research, 2008. **14**(1): p. 33-55.
- [24]. Wright, J. and Y. Zhang, *Evolutionary synthesis of HVAC system configurations: experimental results*. HVAC&R Research, 2008. **14**(1): p. 57-72.
- [25]. STANESCU, M., S. KAJL, and L. LAMARCHE, *Optimization of HVAC system design for a university archetype building*. Air & Heat Water & Energy, 2011: p. 229-234.
- [26]. Stanescu, M., S. Kajl, and L. Lamarche. *Evolutionary algorithm with three different permutation options used for preliminary HVAC system design*. in *Proceedings of the building simulation and optimization conference*. 2012.
- [27]. Stanescu, M., S. Kajl, and L. Lamarche, *Simplified optimization method for preliminary design of HVAC system and real building application*. HVAC&R Research, 2013. **19**(3): p. 213-229.
- [28]. Wetter, M., *Design Optimization with GenOpt*. 2000.
- [29]. Wetter, M. and E. Polak, *Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations*. Energy and Buildings, 2005. **37**(6): p. 603-612.
- [30]. Wang, S., *Dynamic simulation of a building central chilling system and evaluation of EMCS on-line control strategies*. Building and Environment, 1998. **33**(1): p. 1-20.
- [31]. Wang, S. and J. Burnett, *Online adaptive control for optimizing variable-speed pumps of indirect water-cooled chilling systems*. Applied Thermal Engineering, 2001. **21**(11): p. 1083-1103.
- [32]. Huang, G., et al., *A data fusion scheme for building automation systems of building central chilling plants*. Automation in Construction, 2009. **18**(3): p. 302-309.
- [33]. Wang, S., *Dynamic simulation of building VAV air-conditioning system and evaluation of EMCS on-line control strategies*. Building and Environment, 1999. **34**(6): p. 681-705.
- [34]. Wang, S. and X. Jin, *Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm*. Building and Environment, 2000. **35**(6): p. 471-487.
- [35]. Xu, X., et al., *A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV*

- air-conditioning systems*. Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(1): p. 91-104.
- [36]. Huang, W. and H. Lam, *Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems*. Energy and Buildings, 1997. **26**(3): p. 277-282.
- [37]. 陈丹丹, 集中空调变水量水系统实时优化控制策略研究 [D]. 2007, 上海交通大学.
- [38]. Yao, Y. and J. Chen, *Global optimization of a central air-conditioning system using decomposition-coordination method*. Energy and Buildings, 2010. **42**(5): p. 570-583.
- [39]. 晋欣桥, 王盛卫, 多区域变风量空调系统送风温度的优化节能控制. 上海交通大学学报, 2000. **34**(4): p. 507-512.
- [40]. 孙学德, 建筑环境设备能耗优化. 2009, 南京航空航天大学.
- [41]. Chang, Y.-C., *A novel energy conservation method—optimal chiller loading*. Electric Power Systems Research, 2004. **69**(2): p. 221-226.
- [42]. Chang, Y.-C., *Optimal chiller loading by evolution strategy for saving energy*. Energy and buildings, 2007. **39**(4): p. 437-444.
- [43]. Chang, Y.-C. and W.-H. Chen, *Optimal chilled water temperature calculation of multiple chiller systems using Hopfield neural network for saving energy*. Energy, 2009. **34**(4): p. 448-456.
- [44]. Chang, Y.-C., F.-A. Lin, and C.H. Lin, *Optimal chiller sequencing by branch and bound method for saving energy*. Energy conversion and management, 2005. **46**(13): p. 2158-2172.
- [45]. DOE, U., *Energyplus engineering reference*. The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010.
- [46]. Stein, J. and M.M. Hydeman, *Development and Testing of the Characteristic Curve Fan Model*. ASHRAE transactions, 2004. **110**(1).
- [47]. Department, R.E., *RSMMeans Mechanical Cost Data*. 2008.
- [48]. Holland, J., *Genetic algorithms*. 1992.
- [49]. Deep, K., et al., *A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems*. Applied Mathematics and Computation, 2009. **212**(2): p. 505-518.
- [50]. Deb, K., *An efficient constraint handling method for genetic algorithms*. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2000. **186**(2): p. 311-338.
- [51]. Deb, K., et al., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002. **6**(2): p. 182-197.
- [52]. Ong, Y.S., et al., *Surrogate-assisted evolutionary optimization frameworks for high-fidelity engineering design problems*, in *Knowledge Incorporation in Evolutionary Computation*. 2005, Springer. p. 307-331.
- [53]. Rasheed, K.M., *GADO: A genetic algorithm for continuous design optimization*. 1998, Rutgers, The State University of New Jersey.
- [54]. Schwefel, H.-P.P., *Evolution and optimum seeking: the sixth generation*. 1993: John Wiley & Sons, Inc.
- [55]. Vapnik, V.N. and A.J. Chervonenkis, *Theory of pattern recognition*. 1974.
- [56]. Campbell, W.M., D.E. Sturim, and D.A. Reynolds, *Support vector machines using GMM supervectors for speaker verification*. Signal Processing Letters, IEEE, 2006. **13**(5): p. 308-311.
- [57]. Ma, Z., *Online supervisory and optimal control of complex building central chilling*

systems. 2008, The Hong Kong Polytechnic University.

个人简历、在读期间发表的学术论文及研究成果

个人简历

扶洋洋，男，1989年10月生。

2012年7月毕业于中国人民解放军理工大学 给排水与采暖通风工程专业 获学士学位。

2013年9月入同济大学读硕士研究生。

已发表论文

[1]. Fu Y, Li Z, Zhang H, et al. Using Support Vector Machine to Predict Next Day Electricity Load of Public Buildings with Sub-metering Devices[J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 1016-1022.

[2]. 扶洋洋, 李铮伟, 许鹏, 张皓. 分项计量平台数据质量故障诊断与修复[J]. 建筑节能. 2015(10)

待发表论文

[1]. Yangyang Fu, Zhengwei Li, Peng Xu, Fan Feng. Data-quality Detection and Recovery for Building Energy Management and Control Systems (EMCSs): Case Study on Submetering. HVAC&R (Accepted).

研究报告

[1]. 扶洋洋, 李铮伟, 许鹏. 分项计量平台数据质量故障诊断与修复. 2015

[2]. Yangyang Fu, Peng Xu. Problems and Solutions for HVAC System Design in High-rise Buildings. 2014

[3]. 扶洋洋, 许鹏. 超高层建筑空调水系统配置设计优化. 2015