



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

建筑需求响应中电力需求弹性
的量化及评价方法研究

姓名：陈永保

学号：1510302

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

二〇二〇年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

**Study on Electricity Flexibility and Flexibility
Evaluation of Demand Response Buildings**

Candidate: Yongbao Chen

Student Number: 1510302

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Engineering

Major: HVAC & Gas Engineering

Supervisor: Prof. Xu Peng

March, 2020

建筑需求响应中电力需求弹性的量化及评价方法研究

陈永保

同济大学

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；学校有权保留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

为达到电网的供需平衡，目前传统的方法主要是从供给侧（发电侧）入手，包括建立相当规模的调峰类电厂、储能电站等。在用电高峰时段启用调峰类设备，在用电低谷时关闭，而在一些极端的情况下则通过拉闸限电、有序用电等方式进行管控。通常，此类设备由于投资较大，全年运行小时数不足，效率及经济性非常低，且难以保证用户侧的生产、生活的稳定性，因此，需寻找新的解决方案。电力需求响应（Demand Response, DR）则是从需求侧（用户侧）入手，利用需求侧的弹性用电资源实现电网的削峰填谷，从而缓解电力供需矛盾，提高电网整体的运行效率的同时能够缓解大规模可再生能源发展的并网诉求，从而实现供给侧与需求侧的交互式管理与控制。

需求侧的电力需求弹性资源作为电力需求响应的基础，只有具备电力弹性能力的建筑才能够参与需求响应项目。对于建筑需求响应的顺利开展，建筑电力需求弹性的量化至关重要，仅当明确建筑的电力需求弹性能力及特征时，建筑能源管理者才能更好地对不同的弹性特性实现优化管理与控制，从而实现需求响应效益的最大化。建筑电力需求弹性是指在确保室内人员处于用能舒适范围之内的前提下，建筑电力负荷增加或者减少的一种能力，是一种可交易的电力需求响应资源。建筑的电力需求弹性主要来自两个方面，一方面来自建筑热环境类弹性控制，也是本课题分析的重点部分，主要以办公建筑为研究对象，以空调系统热弹性的控制为核心，继而实现从热弹性到电力弹性的传递过程；另一方面来自非热环境控制，弹性的量化相对较简单些，包括直接用电设备及储能系统等的用电需求弹性控制。

在建筑复杂的用电环境中，各种建筑用能因素对建筑电力需求弹性都有影响，这些因素包括建筑物理结构、建筑能源系统特征、蓄能设备以及热舒适需求的差异，且各因素之间形成交叉影响。随着目前电网交互式建筑（Grid-interactive building）的发展，建筑侧的需求弹性资源的研究有了更实际的需求。目前，建筑电力需求弹性的量化方法缺失，没有系统的量化方法，在各种热环境控制范围下，建筑电力需求弹性的传递过程也没有一个准确的数学描述。仅有一些初期研究通过实验或实际项目的运行数据分析，给出建筑需求弹性结果，这些方法并不适用于绝大多数常规建筑和设计阶段的建筑，并且对每个建筑进行实测也不切合实际，特别在城市尺度上。如果能通过建筑的基本热物性参数及系统参数，建立需求弹性的理论量化模型，就能实现建筑电力需求弹性的全面量化，这里的对象不仅包

括已有建筑也包括设计中的建筑。为此，本课题从建筑热环境弹性和建筑电力需求弹性的耦合关系出发，通过研究弹性的传递叠加机理来建立建筑各子系统需求弹性量化模型，并构建全建筑电力需求弹性的理论量化模型。

本课题的研究对象为办公建筑和居住建筑，但建立的量化方法框架同样适用于其它类型建筑。建筑电力需求弹性量化过程均为单栋建筑，有区别于建筑群以及片区。建筑弹性量化源包括建筑内部蓄热体、空调系统、储能系统、各类家用电器及人行为等方面，研究主要内容包括以下几个方面：首先，建立建筑子系统及全建筑电力需求弹性理论量化模型；其次，对各弹性量化模型的实验及模拟验证分析；之后，研究典型建筑电力需求弹性的特性，优化需求响应控制方法；最后，建立了建筑电力弹性的评价方法，可作为未来电网交互式建筑性能的评价手段。

1) 本研究建立了热环境及非热环境相关的各类子系统电力弹性量化模型。在非热环境类电力弹性资源分析中，对于家用电器设备，本文提出“时间窗口”及“工作窗口”的概念。在热环境类电力弹性资源分析中，提出了从热弹性到电力弹性的转化公式，在计算各类建筑内热负荷形成空调冷负荷时考虑相应的冷负荷系数。对于内部不规则蓄热体家具难于计算的问题，本文应用了“等效面积法”，从而能够对建筑内部蓄热体进行准确的量化。最后给出了两种常见建筑系统类型的全建筑电力弹性量化过程，通过各子弹性模型的聚合，建立了全建筑的弹性量化方法。

2) 本研究设置了四类建筑蓄热体情景模式以及三种房间温度重设方案进行实验分析，得到了相应实验条件下内部蓄热体、空调系统及热储能系统的电力需求弹性曲线，并对实验结果与理论量化结果进行对比分析，验证了理论量化模型的准确性，并提出了在初始阶段对热释放率进行修正的相关方法。此外，通过在 Dymola 平台上，利用 Modelica 建模语言建立建筑系统模型来对弹性理论量化模型及建筑电力弹性进行验证分析。

3) 在建筑不同弹性源准确量化的基础上，结合目前建筑需求响应的控制技术，以“负荷削减最大化”、“经济效益最大化”、“负荷平稳削减和恢复”三种优化为目标，研究不同目标下需求响应优化控制方法。并以一个居住建筑和一个办公建筑为实际案例，分析不同目标下负荷削减和收益情况，从而给出不同控制目标下需求响应的推荐控制策略。

4) 从弹性大小、持续时间、使用效率等评价角度，提出了五种不同的评价指标，并运用这些指标对我国目前现有建筑电力弹性的基本现状进行了分析。通过建立基准建筑弹性模型，提出了一种弹性评分方法，方法中把建筑弹性分为不同星级。利用所提出的弹性评分方法，对未来随着可再生能源的发展，建筑应具

备的电力需求弹性能力以及现有建筑需要进行怎样的弹性改善等问题进行了分析。

本课题最终建立了系统的建筑电力弹性量化模型方法,在建筑电力弹性量化计算方法上取得了创新性研究成果,可为建筑需求响应、智能电网和电网交互式建筑的应用推广提供理论基础和技术支撑。

关键词: 电力需求弹性, 建筑热惰性, 空调系统弹性, 需求响应策略, 需求弹性评价方法

ABSTRACT

In order to achieve the balance of supply and demand of the power grid, the traditional methods mainly start from the supply side (power grid side), including the establishment of a peak-regulating power plant and energy storage power station. The peak-adjusting plant is enabled during the peak load, and the corresponding equipment capacity is turned off during valley load period. In some extreme situations, the power is limited by the means of black-out and orderly power. Generally, due to the large investment and lower operational hours, the peak-regulating plant has very lower energy efficiency and economical profits. It is difficult to ensure the stability of energy supply for the user. Demand Response (DR) aims of the demand side (Users side), and uses the electricity flexibility resources on the demand side to reduce peak load and balance the grid. DR improves the overall operating efficiency of the power grid and allows the large-scale renewable energy integrated into the grid.

Demand-side electricity flexibility resources are the basis for DR, and only buildings with electricity flexibility can involve in demand response. Thus, the quantification of building electricity demand flexibility is very important for DR. Building stakeholders can achieve better management and control when they know the building's flexibility ability. Building electricity flexibility refers to the ability to increase or decrease building's power load while meeting the occupants' comfort and needs, and it is an important tradable resource. The electricity flexibility of buildings mainly comes from two aspects. On the one hand, it comes from the comfort range of building thermal environment, mainly based on the thermal control of air conditioning system; on the other hand, it comes from non-thermal environment control including direct power control equipment and energy storage systems, etc.

The electricity usage is complex in buildings so that various factors have an impact on the building's electricity flexibility. These factors include the physical structure of the building, the characteristics of the building energy system, the energy storage system, and the differences in people's comfort requirements. With the development of the Grid-interactive building, the research on the flexibility resources of the building side has more practical needs. Currently, the quantitative method of building electricity demand flexibility is lack, and there is no general quantitative method. Under different

thermal environments control, there is no accurate mathematical description of the transmission process of building electricity demand flexibility. Only some pilot studies provide flexibility results of building through experiment test or real project data analysis. These methods are not applicable to most conventional buildings and design phase buildings. It is not practical to measure each building, especially on city scale. If we can establish a theoretical quantification model of demand flexibility by using the basic thermophysical and system parameters, a general quantification model can be built, and this can apply to not only existing buildings but also design phase buildings. This dissertation starts from the coupling relationship between the flexibility of building thermal environment and the flexibility of building electricity demand. By studying the flexibility transfer mechanism, the flexibility quantification models of the building of each subsystem are established, and the theoretical quantification model of the flexibility demand of a whole building is formulated.

The subject of this dissertation is on office buildings and residential buildings, but this methodology is equally applicable to other types of buildings. The quantification objects of building include the internal thermal mass, HVAC system, energy storage, household electrical equipment and occupant behaviors. The main contents of the research include the following aspects: Firstly, establish the theoretical quantification models for building subsystem and the whole building; secondly, the experimental and simulation verification analysis of each quantification models; then, optimize the DR control strategies by utilizing the flexibility characteristics; finally, the building flexibility evaluation method is established, which can be used as the method to evaluate the flexibility performance of a grid-interactive building in the future. The detailed contents of each part list bellow.

1) This study established the theoretical quantification models of electricity flexibility of different subsystems related to thermal environment and non-thermal environment. For the household electrical equipment, the concept of "time window" and "work window" are proposed in this dissertation. In the analysis of thermal environment flexibility resources, the conversion formula from thermo-elasticity to electricity flexibility is proposed. When calculating the cooling load of conditioning cooling, the corresponding cooling load factor is considered. For the irregular internal thermal mass, this paper applies the "equivalent area method" to accurately quantify. Finally, the whole building's flexibility quantification process of two typical buildings were given.

2) In this study, four types of building thermal mass scenarios and three room temperature reset schemes were set up for experimental analysis, and the electricity flexibility curves of internal thermal mass, HVAC and thermal energy storage were obtained under the corresponding experimental conditions. The experimental results are compared to verify the accuracy of the theoretical quantification model, and the method of correcting the heat release rate in the initial phase is proposed. In addition, the quantification theoretical model and building electricity flexibility are verified and analyzed by establishing a building system based on the Modelica modeling language on Dymola platform.

3) Based on the accurate quantification of different flexibility sources of buildings, combined with the current control technologies of building demand response, three optimization objectives of “maximizing load reduction”, “maximizing economic benefits” and “stable load reduction and recovery” are studied. With the real case of a residential buildings and an office building, this dissertation analyzes the peak load reduction and profits under different scenarios, and then gives the recommended control strategies for demand response under different scenarios.

4) From the perspectives of flexibility capacity, duration, and efficiency, five different evaluation indicators are proposed, and these indicators are used to analyze the current status of existing building’s electricity flexibility in China. By establishing a benchmark building flexibility model, a scoring method is proposed, which includes different ratings. Using the proposed flexibility evaluation method, the requirement of building’s flexibility and the improvement of existing building needs will be analyzed.

This dissertation establishes a systematic model to quantify the electricity flexibility, which is to achieve innovative research study in the electricity flexibility quantification field, and provide theoretical and technical support for the building demand response, the development of smart grid and grid-interactive building.

Key Words: electricity flexibility; building thermal inertia; air conditioning system flexibility; demand response strategies; demand flexibility evaluation

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	V
目录.....	IX
表格索引.....	XIII
图片索引.....	XV
符号注释表.....	XIX
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 可再生能源发展及电网用电平衡现状.....	1
1.1.2 需求响应.....	2
1.1.3 建筑能效评价的不足.....	6
1.2 国内外研究现状.....	6
1.3 本课题的主要研究内容及意义.....	9
1.3.1 课题的研究对象和概念说明.....	9
1.3.2 课题的主要工作.....	11
1.3.3 本课题的研究意义.....	14
1.3.4 课题的技术路线和文章架构.....	15
1.4 本章小结.....	16
第 2 章 建筑电力需求弹性量化模型建立.....	17
2.1 概述.....	17
2.2 建筑电力需求弹性定义及分类.....	18
2.2.1 电力需求弹性定义.....	18
2.2.2 电力需求弹性来源与分类.....	19
2.3 建筑热弹性与电力弹性关系描述.....	21
2.4 建筑非热环境类需求弹性量化模型的建立.....	23
2.4.1 家用电设备.....	23
2.4.2 分布式能源系统.....	25
2.5 建筑热环境类电力需求弹性量化模型的建立.....	26
2.5.1 建筑内部蓄热体.....	27

2.5.2	家用电设备散热.....	28
2.5.3	热储能设备.....	30
2.5.4	空调系统.....	31
2.5.5	人行为.....	32
2.6	全建筑弹性量化模型.....	34
2.6.1	常规建筑电力弹性.....	34
2.6.2	常规建筑+储能系统电力弹性.....	35
2.7	本章小结.....	36
第 3 章	办公建筑电力需求弹性实验验证.....	39
3.1	概述.....	39
3.2	办公建筑弹性验证实验台搭建.....	40
3.2.1	建筑全能效测试平台介绍.....	40
3.2.2	实验方案设计.....	41
3.2.3	数据采集系统.....	44
3.3	实验结果分析.....	48
3.3.1	内部蓄热体结果分析.....	48
3.3.2	空调系统及含储能水箱结果分析.....	55
3.3.3	人行为结果分析.....	59
3.4	本章小节.....	61
第 4 章	基于 Modelica 建模语言的办公建筑电力需求弹性模拟研究.....	63
4.1	概述.....	63
4.2	Modelica 建模语言简介.....	63
4.3	Modelica 建筑模拟系统搭建.....	64
4.3.1	主要模型介绍.....	64
4.3.2	Modelica 办公建筑模型实例.....	67
4.4	全建筑弹性模拟结果分析.....	73
4.4.1	蓄热体.....	73
4.4.2	用电设备.....	75
4.4.3	HVAC 系统.....	75
4.4.4	人行为.....	77
4.4.5	结果分析与讨论.....	78
4.5	本章小节.....	82
第 5 章	典型建筑电力需求弹性特性及其需求响应策略研究.....	83
5.1	概述.....	83

5.2 弹性负荷种类.....	84
5.2.1 可间断型弹性负荷.....	84
5.2.2 可转移型弹性负荷.....	84
5.2.3 可调节型弹性负荷.....	85
5.3 建筑需求响应控制技术介绍.....	85
5.3.1 调节综合温度(Global Temperature Adjustment, GTA).....	85
5.3.2 建筑预冷(Pre-cooling).....	86
5.3.3 调节新风风量 (Fresh Air Flow Adjustment).....	87
5.3.4 系统平稳恢复策略.....	87
5.3.5 其它.....	88
5.4 不同建筑案例需求响应控制策略.....	88
5.4.1 需求响应优化目标.....	88
5.4.2 建筑需求响应优化控制案例.....	91
5.5 不同控制目标下需求响应控制方法推荐.....	100
5.6 本章小结.....	100
第 6 章 建筑电力需求弹性评价方法研究.....	103
6.1 概述.....	103
6.2 建筑电力需求弹性评价指标.....	104
6.2.1 弹性量 ($F_{capacity}$).....	104
6.2.2 弹性占比 (F_{α}).....	104
6.2.3 弹性使用效率 (F_{eff}).....	104
6.2.4 效益因子 (F_{cost}).....	105
6.2.5 弹性爬坡速率 (F_{ramp}).....	105
6.3 典型办公建筑案例弹性评价指标分析.....	106
6.3.1 典型小型办公建筑.....	106
6.3.2 典型大中型办公建筑-无热储能系统.....	107
6.3.3 典型大中型办公建筑-有热储能系统.....	110
6.3.4 建筑弹性指标范围研究.....	111
6.4 建筑电力弹性评分方法.....	113
6.4.1 基准建筑弹性模型.....	114
6.4.2 弹性改善率 κ	114
6.4.3 建筑弹性评分表.....	114
6.5 建筑弹性与可再生能源利用.....	116
6.6 本章小结.....	119

第 7 章	结论与展望.....	121
7.1	主要结论.....	121
7.2	主要创新点.....	122
7.3	研究的局限性与展望.....	123
7.3.1	局限性.....	123
7.3.2	展望.....	123
	致谢.....	125
	参考文献.....	127
附录 A	建筑电力需求弹性各弹性源量化模型汇总表.....	133
附录 B	建筑 Modelica 模型代码节选.....	134
附录 C	蓄热体 Modelica 传热模型源代码.....	137
	个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	141

表格索引

表 1.1 电力需求弹性文献中量化方法汇总.....	7
表 3.1 测试房间的几何参数和物性参数[24].....	40
表 3.2 建筑不同蓄热体情景设置.....	42
表 3.3 热电偶标定拟合公式.....	47
表 3.4 实验中各测点布置信息.....	47
表 4.1 办公区域围护结构及内部蓄热体参数信息.....	68
表 4.2 办公建筑房间人员逐时在室率.....	69
表 4.3 Modelica 建筑模型中主要组件参数信息	70
表 4.4 弹性组合模式.....	78
表 4.5 各弹性源随时间的弹性总用电占比.....	81
表 5.1 其它需求响应控制策略.....	88
表 5.2 居住建筑案例各弹性设备类型信息参数.....	92
表 5.3 办公建筑案例各弹性设备类型信息参数.....	96
表 5.4 不同需求响应控制情景下收益情况.....	99
表 5.5 不同优化目标下需求响应控制方法推荐.....	100
表 6.1 各弹性源爬坡速率.....	106
表 6.2 典型小型办公建筑的各项弹性指标.....	107
表 6.3 建筑围护结构及内部蓄热体参数详细信息.....	107
表 6.4 弹性计算所需的参数信息.....	107
表 6.5 典型办公建筑弹性指标.....	108
表 6.6 典型中型办公建筑弹性指标.....	110
表 6.7 不同项目阶段成本需求.....	112
表 6.8 建筑案例成本及收益曲线参数值.....	113
表 6.9 建筑弹性基准模型各项目主要要求.....	114
表 6.10 层数分析法评价标度和含义[110].....	115
表 6.11 基于 Santly 1-9 标度法的成对比较矩阵（不含储能系统）	115

表 6.12 基于 Santly 1-9 标度法的成对比较矩阵（含储能系统）	115
表 6.13 弹性改善率与得分、弹性评级.....	116
表 6.14 不同风能+太阳能发电比下电网净负荷变化率[44].....	119

图片索引

图 1.1 上海 2015 全年用电负荷分布曲线.....	1
图 1.2 建筑需求响应负荷削减示意图.....	2
图 1.3 2014 年上海用电高峰负荷频率图.....	4
图 1.4 蓄热体“有效面积法”方法框架.....	12
图 1.5 用于模型验证房间示意图.....	13
图 1.6 课题技术路线图.....	16
图 2.1 建筑电力需求弹性定义示意图.....	18
图 2.2 建筑电力弹性特征属性示意图.....	19
图 2.3 建筑电力需求弹性源分类.....	20
图 2.4 建筑电力需求弹性量化架构.....	21
图 2.5 建筑室内空气的动态热平衡示意图.....	22
图 2.6 设备时间窗口及工作时间示意图.....	24
图 2.7 不同设备平均时间窗口时长.....	24
图 2.8 HVAC 系统弹性源的构成示意图.....	32
图 2.9 建筑用电设备弹性量化时间关系示意图.....	34
图 2.10 常规建筑系统电力弹性量化流程.....	35
图 3.1 弹性实验验证路线图.....	39
图 3.2 建筑全能效建筑测试平台平面图示意图.....	41
图 3.3 外遮阳壳打开后效果图.....	41
图 3.4 情景 4 房间布置-模拟高利用率办公室.....	43
图 3.5 情景 1-模拟空房间.....	43
图 3.6 热电偶温度采集过程图.....	45
图 3.7 温度及流量实时采集软件.....	45
图 3.8 空调负荷计量-冷量计.....	46
图 3.9 温度计标定实验（标定点包括 10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、 40℃）.....	46
图 3.10 各温度测点布置.....	48
图 3.11 不同情景下房间温度从 24℃ 设置为 26℃ 时东西两室空调冷量变化曲 线.....	50

图 3.12 房间温度从 24℃ 设置为 26℃ 时温度变化曲线.....	51
图 3.13 蓄热体内部温度分布.....	52
图 3.14 不同蓄热体类型冷量释放率.....	53
图 3.15 实验测试及理论计算蓄热体电力弹性量对比图.....	54
图 3.16 实验测试及理论计算电力弹性量对比图（修正后）.....	55
图 3.17 东西两室空调系统冷量及温度变化曲线（东室室温从 24℃ 重设为 26℃，西室保持 24℃ 室温设置不变）.....	56
图 3.18 实验测试及理论计算空调系统电力弹性量对比图-东室情景 4.....	56
图 3.19 水箱供冷时房间温度变化曲线.....	57
图 3.20 水箱供冷时两房间冷量变化曲线.....	58
图 3.21 2℃ 预冷下各温度变化曲线.....	59
图 3.22 2℃ 预冷下东西两室空调冷量变化曲线.....	59
图 3.23 房间温度从 26℃ 设置为 28℃ 时东西两室空调冷量及室内温度曲线	60
图 3.24 蓄热体随房间温度设置变化曲线.....	60
图 4.1 Dymola 中 MixedAir 模型组件连接图.....	65
图 4.2 Dymola 中 Carnot_TEva 模型组件连接图.....	66
图 4.3 Dymola 中水箱模型组件连接图.....	67
图 4.4 独立办公区域平面图.....	68
图 4.5 典型夏季日气象参数（7 月 21 日）.....	69
图 4.6 办公建筑 Modelica 模型系统布局图.....	71
图 4.7 Modelica 模型及实测下室温曲线.....	72
图 4.8 弹性计算式和 Modelica 模型模拟算法下 HVAC 系统的电力弹性曲 线.....	73
图 4.9 各蓄热体冷量释放率.....	74
图 4.10 不同蓄热体类型电力弹性曲线.....	74
图 4.11 不同蓄热体类型的弹性贡献占比.....	75
图 4.12 HVAC 系统中不同弹性源的曲线.....	76
图 4.13 HVAC 不同弹性源的弹性贡献占比.....	76
图 4.14 储能水箱的弹性能力曲线（水箱容积为 1.24 m ³ ）.....	77
图 4.15 建筑人行为弹性曲线(27℃ 的情形-允许室温设置从 26℃ 提高至 27℃, 28℃ 的情形-允许室温设置从 26℃ 提高至 28℃).....	78
图 4.16 建筑各弹性源百分比.....	79

图 4.17 不同弹性弹性组合电力弹性量.....	79
图 4.18 无储能水箱下不同弹性弹性组合弹性占比.....	80
图 4.19 有储能不同弹性弹性组合弹性占比.....	81
图 5.1 不同电力弹性负荷特征示意图.....	84
图 5.2 不同综合温度调节方式下房间温度变化曲线.....	86
图 5.3 普通夜间设置, 轻度、中度及额外预冷策略.....	87
图 5.4 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况.....	93
图 5.5 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况.....	93
图 5.6 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况-响应阶段全由水箱供热	94
图 5.7 经济效益最大化下建筑负荷曲线.....	95
图 5.8 办公建筑需求响应负荷削减曲线.....	96
图 5.9 办公建筑需求响应负荷削减曲线.....	97
图 5.10 办公建筑需求响应负荷削减曲线.....	98
图 5.11 办公建筑需求响应负荷平稳削减曲线.....	99
图 6.1 建筑电力需求弹性评价路线.....	103
图 6.2 不同蓄热体类型弹性使用效率随时间变化关系.....	108
图 6.3 蓄热体体量与弹性量的关系曲线图.....	109
图 6.4 温度控制范围与弹性量的关系曲线图.....	110
图 6.5 建筑弹性占比的经济性示意图.....	111
图 6.6 建筑案例成本及收益曲线.....	113
图 6.7 弹性改善率与难易程度关系.....	116
图 6.8 风电+太阳能发电比例与建筑弹性改善的关系曲线	117
图 6.9 可再生能源发电比例与建筑弹性改善的关系.....	119

符号注释表

基本符号:

符号	含义	单位
A	换热面积	m^2
AC	空调	-
AL	可调节型负荷	-
COP	空调系统能效	-
c_p	比热容	$kJ/(kg \cdot K)$
C_{LQ}	冷负荷系数	-
DR	需求响应	-
E_{cap}	电池的额定容量	Wh
F	电力需求弹性	W
h	对流传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
$HVAC$	空调系统	--
IL	可间断型负荷	-
k_0	设备功率降低比率	-
L	蓄热体当量尺寸	m
MAE	平均绝对误差	-
m	重量	kg
\dot{m}	质量流量	kg/s
P	设备功率	W
Q	热量	kJ
SL	可转移型负荷	
SOC	电池初始荷电状态	-
T	温度	$^{\circ}C$
t	时间/温度	$s/^{\circ}C$
t_{window}	时间窗口	min 或者 h
t_{work}	工作时间	min 或者 h
$t_{earliest}$	设备在时间窗口内最早完成任务时段	min 或者 h
t_{latest}	设备在时间窗口内最晚完成任务时段	min 或者 h
t_d	电力弹性量化时段	min 或者 h

T_{range}	房间舒适温度调整幅度，通常为 2-4℃	℃
ΔT_{extra}	用户可接受的温度调整最大区间	℃
U	综合传热系数	W/℃
V	体积	m ³
X	设备工作状态	-
准则数:		
Bi	毕渥准则数	无量纲
Fo	傅里叶准则数	
希腊字符:		
α	风能和太阳能在电网中的发电比例	-
β	太阳能在太阳能和风能中的占比	-
γ	建筑弹性改善率	-
λ	蓄热体导热系数	W/(m·K)
ρ	密度	kg/m ³
μ_1	超越方程 $\tan \mu_1 = Bi/\mu_n, n = 1, 2, \dots$ 的特征值	-
ξ_i	蓄热体 <i>i</i> 的热释放率	-
η	设备效率	-
τ	时间	s
δ	厚度	m
$\zeta(\theta)$	电能费率	元/kWh
$\psi(\theta)$	DR 补贴标准	元/kWh
上标和下标:		
a	房间空气	
apH	指代设备散热	
ave	平均值	
$base$	基准情形	
ba	储能电池	
beh	人行为情形	

<i>cap</i>	容量
<i>carnot</i>	卡诺循环
<i>ceiling</i>	天花板
<i>chiller</i>	冷机
<i>con</i>	冷凝过程
<i>eff</i>	弹性使用效率
<i>el</i>	电力
<i>env</i>	建筑围护结构
<i>eva</i>	蒸发过程
<i>floor</i>	地板
<i>fur</i>	家具
<i>inf</i>	空气渗透
<i>ini</i>	初始阶段
<i>l</i>	照明
<i>mass</i>	蓄热体
<i>max</i>	求最大值
<i>min</i>	求最小值
<i>nor</i>	额定工况
<i>par</i>	内墙
<i>PL</i>	部分负荷情形下
<i>pv</i>	太阳能
<i>ramp</i>	弹性爬坡速率
<i>tank</i>	储能水箱
<i>wind</i>	风能

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 可再生能源发展及电网用电平衡现状

近些年，我国城市建筑的电网供给和需求存在严重的不平衡问题，特别是当受建筑空调季节性负荷的影响时。一方面夏季及冬季电力负荷短缺，而另外一方面全年仍然存在着发电设备过剩、运行小时数不足等问题。以加州为例，夏季高峰用电中 50%左右为空调用电，直接形成季节性高峰负荷。电网出现高峰负荷加大、峰谷差加剧以及间歇性可再生能源接入比例增加等特征，导致电网供需平衡问题突出、安全可靠运行受到严重威胁[1]。以上海为例，如图 1.1 所示，2015 年上海夏季用电峰值为 2700 MW 左右，而每年负荷为峰值负荷 90% 的高峰负荷持续时间不超过 100 小时，95% 以上的不超 50 小时[2]。而为了用电安全，需要建立足够的装机容量来满足这些高峰负荷。到 2017-2018 年，上海夏季峰值负荷增加到了 3100 MW 左右，尖峰负荷问题更加凸显，电网供需平衡问题亟待解决。

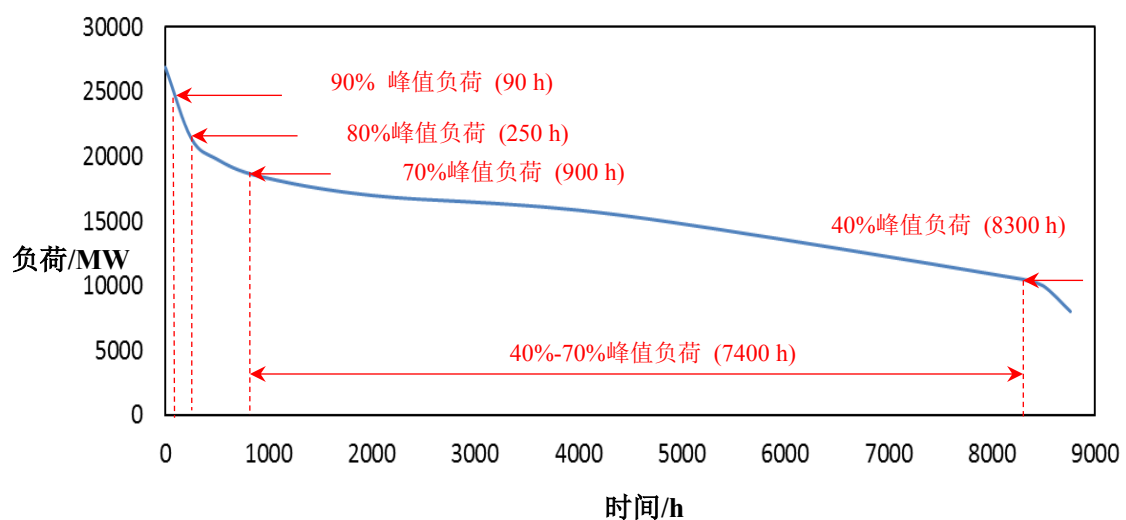


图 1.1 上海 2015 全年用电负荷分布曲线

此外，随着分布式能源和可再生能源在电网中的占比不断提高。2015 年，我国可再生能源，主要为水力发电，累计并网总容量达到 500 GW，占全部电网发电容量的 33.3%，总发电量为 13.93×10^5 GW·h，占电网发电量的 24.8%；至 2017 年底，我国可再生能源累计并网总容量达到 650 GW，其中风电约为 1.64 GW，太阳能发电约为 1.3 GW，可再生能源发电容量占全部电网发电容量的 36.6%，

总发电量占电网发电容量的 26.5% [3]。间歇性能源例如风电和太阳能的并网，使我国电力系统面临更加严重的供需平衡的挑战。如果电网不能进行有效调节，将导致严重的弃光、弃风现象。例如，在电网用电低谷（一般为夜间）时，电网用户端负荷需求较低，若此时风力发电大增，而煤电受到最小发电量的限制，无法为风电腾出并网空间，从而导致弃风现象的发生。特别是在供暖季，一些热电联产项目按照“以热定电”的规则来发电，更加削弱了可再生能源接入电网的能力[4]。为了能够充分利用这些可再生能源，需求侧的需求弹性将至关重要。电力系统供应和需求需要保持时间上的平衡，电力需求弹性能够平衡电力过剩和短缺的问题。

1.1.2 需求响应

电是一种很难大规模存储的能源形式，当一个城市电网的电力供应和需求存在较大的差距的时候，常有两种应对方式。一种办法是通过相对简单的直接拉闸限电，此种方式会严重影响生产生活及用户舒适性。另一种方式是通过挖掘电力需求侧的弹性用电资源，通过各种电力平衡调控手段，实现峰值用电的削减或转移到用电低谷，从而维持电力的供需平衡，称为电力需求响应，简称需求响应（Demand Response, DR）。下图为一建筑示例需求响应高峰负荷削减示意图。

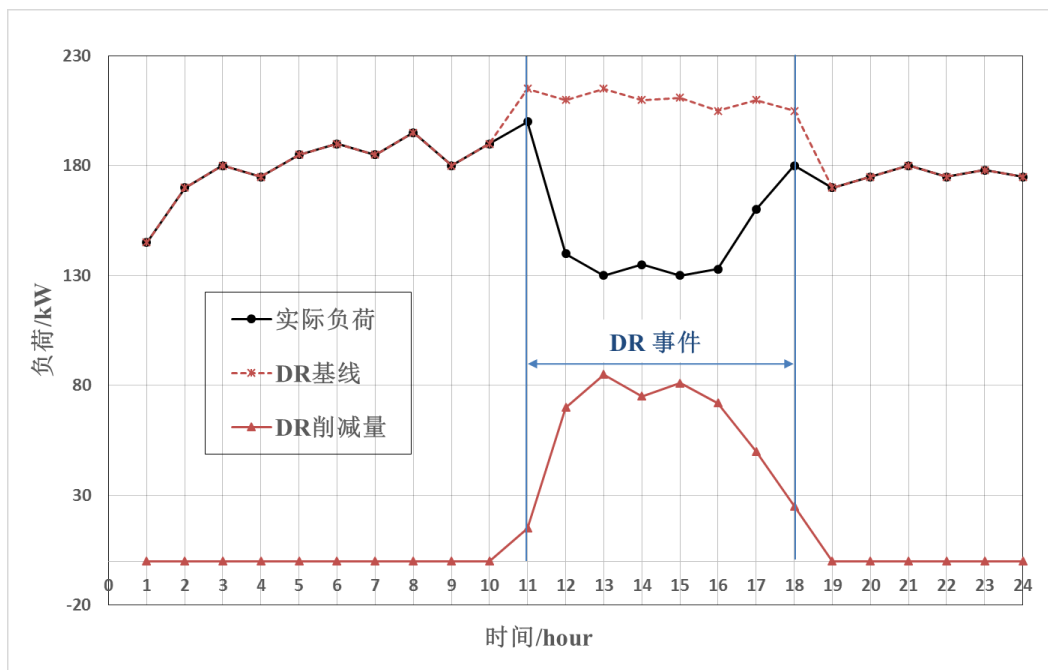


图 1.2 建筑需求响应负荷削减示意图

建筑是现代城市用电大户，智能电网中的交互式建筑（Grid-interactive building）近些年被提出，用来解决电力供需平衡的问题[2, 5]。为了缓解电网中

需求侧及供给侧日渐不平衡的问题，建筑需求响应得到了快速发展。需要指出的是，需求响应不仅指的是在电网用电高峰减少用电负荷，也可以是在用电低谷时增加用电负荷的一种用能响应。目前，国内需求响应尚属探索阶段，试点建设在北京、佛山、苏州、上海等几个城市展开，试点阶段主要是针对高峰用电负荷的需求响应项目，措施主要为在用电高峰来临时手动关闭部分用电设备来达到削峰之目的，还远未达到自动需求响应的效果[6, 7]。

然而，在美国及一些需求响应发展较早国家，已经实现自动需求响应商业化运营[8]，例如美国加州大约 70.5% 的建筑已经加入需求响应控制成为电网交互式建筑[9]。这是一类具有电力需求弹性且能够与电网交互运作，从而有效平衡电网电力供需平衡的建筑。它的实现依赖于两个重要的因素：一是建筑通讯技术的发展，另一个则是建筑本身具备一定的电力需求弹性能力。

对于需求响应，美国能源部（U.S. Department of Energy, DOE）给出了这样的定义[10]：需求响应是指当电力市场价格升高或供应电力变化时，电力用户接收到供电方发出的诱导性减少负荷的直接补偿通知或者电力价格上升信号后，改变其固有的习惯用电模式，达到减少或者转移某时段的用电负荷而响应电力供应，从而保障电网稳定，并抑制电价上升的短期行为。对于用户侧而言，需求响应可以采用很多手段来完成，例如工厂通过调整生产计划，建筑可以通过控制用电设备来实现峰时用电负荷的削减或是减少在电力价格偏高时段用电。即使在美国，需求响应的发展也不是一帆风顺的，需求响应是在 Federal Energy Regulatory Commission（FERC）的推动下 2006 年开始在美国实施，并出台了 Order 745 号法令。因为这个法案的出台，需求响应用了短短几年的时间就迅速普及开来。然而，2012 年，Electric Power Supply Association（EPSA）就起诉 FERC，声称 Order 745 违法，需求响应不应该进入电力市场进行竞争。这起官司一路打到美国最高法院。直到 2016 年美国最高法院判决支持 Order 745 法案生效才让需求响应的推动者长长地松了一口气。这场官司的胜利表面上是法理的角逐，实际上还是技术进步和市场的发展需求最终赢得了最高法院的支持。

需求响应通过削减或转移用户侧的高峰负荷缓解了用电高峰时段电力供需不平衡的问题。对于供应侧而言，需求响应可以减缓新增调峰电厂的建设，进一步提高既有设备的利用小时数，提高总体效率的同时减少运维成本；同时，使得原本用于新建电厂、电网的土地资源得以保留。对于需求侧的用户而言，可以通过参与需求响应获得对应补贴和减少电费成本。

建筑需求响应无论是在美国还是在欧洲等需求响应起步较早的国家和地区，对于电网发展进程都起到了关键作用。通过这些地区成熟的需求响应项目，避免了夏季超高峰负荷和超高电价的出现。在中国的一些一线城市，如北京和上海，

由于夏季高温导致的空调系统用电的增长也是用电峰值突出的主要因素。研究表明,对于很多城市,夏季建筑的空调系统电耗占整个城市电耗的 30%~50%之多,有些经济发达的城市这个数值甚至超过了 50%[11]。

对于商业及办公类建筑而言,空调系统是一个重要的需求响应资源。这是因为空调系统在商业建筑用电负荷中的占比很大,而且由于建筑和系统热惰性的作用,空调系统卸载并不会立刻影响到室内人员,且热环境往往具备一定的弹性空间。对于商业建筑而言,空调系统的需求响应控制策略应在满足需求响应事件的电力负荷削减目标的同时,尽量减少对建筑内人员和建筑功能的负面影响。因此,空调系统的需求响应可以定义为:利用建筑物本身及内部蓄热体的热惰性和空调系统的动态性质,减少或转移空调系统的峰值用电,从而实现建筑需求响应目标的行为。目前,无论是在美国、欧洲还是在中国,常见的是通过负荷集成商形成一个大用户参与需求响应项目,即建筑群的需求响应。对于建筑群而言,分项计量平台的管理者通常在需求响应中可以担当负荷集成商的角色,他们进一步在分项计量平台的基础上,开发需求响应产品,调度各建筑实现总体的削减目标。

在我国,受空调负荷的影响,办公建筑的夏季用电高峰常出现在 2:00 PM-4:00 PM 之间,也是我国夏季需求响应常触发的时间段[12]。图 1.3 为上海地区 2014 年负荷大于峰值负荷 85%及 90%的频率图,从图中可知一天中用电高峰负荷发生在下午四点左右频率最高。

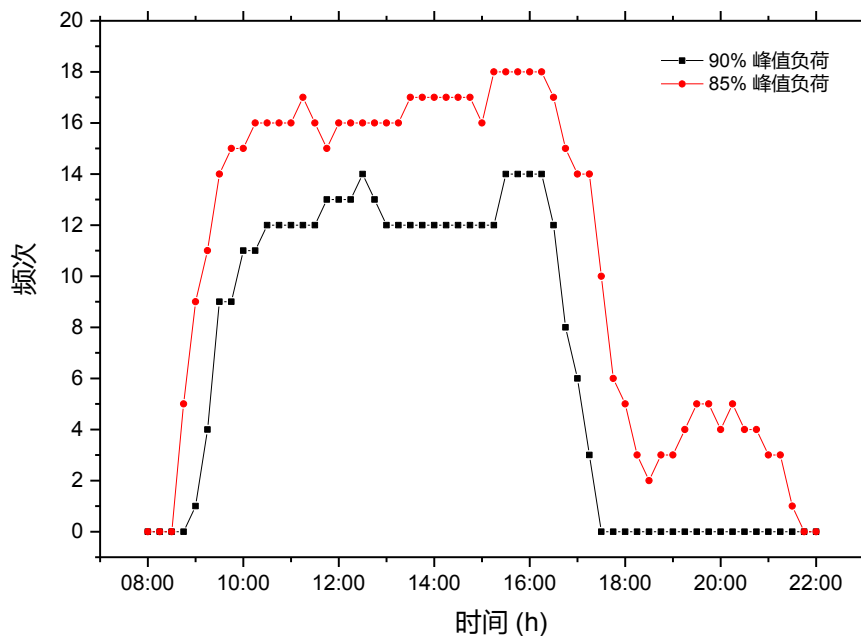


图 1.3 2014 年上海用电高峰负荷频率图

对于居住建筑,据数据统计,2012年英国家庭用电设备用能占建筑总用能的23%左右,其它国家也有相近的统计结果[13]。相比商业办公建筑,居住建筑用电高峰常出现在6:00 PM-9:00 PM之间,此时段也恰好为太阳能供应结束的时段,在供给减少同时需求增加的情况下,容易出现电力系统的用电短缺,从而在该时段触发需求响应。随着太阳能利用比例的不断提高,这种用电冲突将越来越尖锐。家庭用电设备由于其负荷易于转移的特征,作为一种重要的需求响应资源,近些年得到快速的发展。例如,来自苏州地区的居住建筑需求响应的一个示范项目,该项目总计200用户参与,并取得了良好的需求响应效果[14]。通过家庭能源管理系统(Home Energy Management System, HEMS)的管理与控制,能够实现快速的居住建筑需求响应[15]。

在需求响应项目中,负荷需求弹性的准确量化与评估能够为需求响应项目提供指导性的依据,一个建筑的需求弹性高,意味着该建筑能够实现较高的需求响应量。近些年来,无论是建筑需求响应的标准制定还是控制技术方面,国内外都得到了较快的发展[6]。建筑能源需求响应标准的制定旨在对建筑实现需求响应提出更高的要求,在一些需求响应发展较早的国家最新的建筑规范里也对建筑需求响应能力提出了明确要求[5]。例如,美国加州非居民建筑的建筑标准(Title 24, 2019 Nonresidential Compliance Manual)对非居住建筑在HVAC系统、照明系统以及其它用电系统提出了实现需求响应所需达到的基准配置要求[16],包括快速的温度设定等实时响应,我国目前暂时没有相关标准要求。对于建筑能源需求响应技术方面,目前主要包括空调系统、照明系统等。尤其是建筑热环境控制中的空调系统,包括调节综合温度[17, 18]、调节风量[19]、利用被动蓄热[20, 21]以及建筑预热(冷)等[22, 23]。

建筑热环境控制是目前实现建筑需求响应最为常用,且最为有效的方法之一,在居住者热舒适范围内对空调系统进行控制能够有效实现建筑需求响应。通过建筑楼宇能耗模型的建立及实际楼宇的验证,李为林对建筑热环境控制策略及需求响应效果做了大量研究,得出了建筑和空调系统的耦合热惯性模型及其对需求响应的效用[24, 25],并实现需求响应效果的快速计算[26],以及针对建筑群的最优需求响应控制策略[27]。类似基于建筑环境热控制的需求响应研究有很多,但相关研究均对建筑本身热惯性及用能弹性特性没有有效衡量依据,仅从实验或建立完整建筑模型的情况下才能对电力需求弹性进行量化,虽然能够实现一定程度地优化控制,却难以推广到其它建筑。

可再生能源的快速发展以及建筑空调的普及逐渐恶化了电网供需平衡关系,从而促使各国家决心发展电力需求响应来应对电网平衡问题。需求响应的本质是

对建筑用能进行合理地配置,实现这一配置的基础是建筑本身具有需求弹性及对需求弹性的定量把握。

1.1.3 建筑能效评价的不足

针对建筑节能的设计与评价目前国内主要有《公共建筑节能设计标准 GB 50189-2015》以及《绿色建筑评价标准 GB/T 50378-2014》等,建筑能效的评价已经相当成熟。然而,对于传统的建筑节能领域,建筑的节能是没有时间概念作为坐标的,即节约一度电无论是在早上还是在晚上都是一样的。然而,如果从整体社会利益角度看待节能,你就会发现,同样生产一度电的成本,发生在电网尖峰短缺时刻和电网富裕时刻是不一样的。为了满足尖峰时刻的电力供给,需要建设调峰类电厂,该类型电厂全年运行小时数较低,导致成本高且效率低。而通过有电力需求弹性的建筑,通过实施需求响应控制,可作为“虚拟电厂”,能够起到调峰电厂相同的效果。因此,建筑用能评价不仅应该从总的节能角度上,而且需要从时间轴以及对整体社会效益层面考虑。然而,对于从时间维度上的能源效率以及建筑具有的电力需求弹性的评价是缺失的。建筑电力需求弹性是一个随着时代发展产生的新研究领域,通过文献的综述,目前国内外鲜有对于该方面的评价及标准制定。

1.2 国内外研究现状

对于建筑能源需求弹性的研究,目前文献主要集中在对不同单一系统进行的需求弹性量化,很少有针对全建筑需求弹性量化的研究。在能源系统中,延迟弹性(Delayed Flexibility)及强制弹性(Forced Flexibility)为两种常见的弹性表达 [28, 29]。延迟弹性指能源系统延迟或转移用能需求,即可转移型弹性负荷;强制弹性指能源系统能够强制开启或断开,即可间断型弹性负荷。以下列举了建筑不同能源系统建筑能源需求弹性量化的国内外研究现状,目前以国外研究为主,不仅包括实际能源系统,还包含人行为弹性等方面。

在空调系统能源弹性方面,Nuytten Thomas 等人[30]提出一种计算热电联产并结合储能系统中需求弹性的模型,该模型中针对以上所述两种弹性形式进行了模型量化。Fabiano Pallonetto 等人[31]将需求弹性来源分为两类,一类来源于可再生能源,一类来源于储能系统 TES,并对该类能源弹性进行了量化。但在一些学者看来,把可再生能源作为一种弹性资源是存在争议的[32]。另外,Sebastian Stinner 等人[33]对热储能系统的建筑弹性进行量化,研究中量化了三类需求弹性:即时弹性、电力弹性和能耗弹性。通过 Modelica 软件搭建建筑模型,实例计算

不同建筑系统的需求弹性，最后，提出一种单体建筑需求弹性聚合方法，并实现了建筑群和社区需求弹性的量化方法。表 1.1 总结了相关文献中的电力需求弹性的量化方法和模型。各模型方法能够实现各指定系统的有效弹性量化，但各弹性源之间的弹性传递及耦合关系未知，难于推广到全建筑层面上。

表 1.1 电力需求弹性文献中量化方法汇总

文献	系统类型	量化模型	所需主要参数
[34]	可再生能源系统	$F_{\text{wholesystem}} = \sum_{i \in A} \left[\frac{P_{\max}(i)}{\sum_{i \in A} P_{\max}(i)} \times \frac{\frac{1}{2}[P_{\max}(i) - P_{\min}(i)] + \frac{1}{2}[Ramp(i) \cdot \Delta t]}{P_{\max}(i)} \right]$ $\forall i \in A$	最大/小发电率，功率增加/减小速率
[31]	太阳能及热储能系统	$F(t)_{\text{shifted}} = PV(t + dt) + \int_t^{t+1} \frac{C_{pw} \times M \times (T_{ik}(t) - T_{\min})}{3.6 \times 10^6 \times COP_{hp}} dt$ $F(t)_{\text{forced}} = \int_t^{t+1} \frac{C_{pw} \times M \times (T_{\max} - T_{ik}(t))}{3.6 \times 10^6 \times COP_{hp}} dt$	太阳能发电功率，储能系统容量
[29, 33]	热泵及储能系统	$F(t)_{\text{shifted}} = \pi_{\text{ref}}(\xi) - \pi_{\min}(\xi) \quad \xi t \leq \xi \leq t + \tau_{\text{shifted}}(t)$ $F(t)_{\text{forced}} = \pi_{\max}(\xi) - \pi_{\text{ref}}(\xi) \quad \xi t \leq \xi \leq t + \tau_{\text{forced}}(t)$	系统所需最大/小功率
[20]	建筑围护结构	$F_{\text{shifting}} = \frac{\int_0^{\infty} \Delta q_{\text{heating}}(q_{\text{heating}} < 0) dt}{\int_0^{\infty} \Delta q_{\text{heating}}(q_{\text{heating}} > 0) dt}$	吸热/释放热量
[35]	家庭用电设备	$F_{\text{TCLs}} = \frac{T_{\max} - T_a}{T_{\max} - (T_s - \text{tolerance})}$ $F_{\text{non-TCLs}} = \frac{t_L - (t + \Delta t_{\text{duration}})}{t_L - t}$ $F_{\text{battery-based}} = \frac{(t_{\text{use}} - t) - (t_f - t)}{t_{\text{use}} - t}$	用电设备温度设置，充电时长
[36]	基于价格能源系统	$F(t) = \begin{cases} c_2 \cdot s_i(a, t) & r(t) < c_1 \\ \frac{c_2}{c_1 - 1} \cdot (r(t) - 1) \cdot s_i(a, t) & c_1 \leq r(t) < 1 \\ \frac{c_4}{c_3 - 1} \cdot (r(t) - 1) \cdot s_i(a, t) & 1 \leq r(t) < c_3 \\ c_4 \cdot s_i(a, t) & r(t) > c_3 \end{cases}$	能源价格，人为对价格的敏感度

在家居用电设备方面，R. Dhulst 等人[37]对居住建筑用能设备需求弹性进行了量化，主要包括湿处理电器（洗衣机、干燥器、洗碗机），家用热水储水箱以及充电汽车，通过在比利时的 LINEAR 试点项目的数据，分析各用电设备的弹性

潜力。随着电动汽车的发展，其作为一种能够进行有计划地充放电的储能系统，能够提供需求弹性资源[37]。通过充放电的管理，在 PJM 的试点项目中，一辆电动汽车每月约能得到 100 美元的回报 [39]。虽然这类研究能够在试点项目的基础上得到较为准确的电力需求弹性量/能力，但这些结果很难有效地推广到不同建筑、不同地区和不同发展水平的国家，且该文献研究没有详细给出不同家用电设备需求响应的能力。

在由于建筑中人的行为所引起的建筑电力需求弹性方面，目前的研究主要集中在人行为对能源价格因素的响应。能源价格是影响居民行为和能源需求的一种最为直接的方式，根据所在气候区域和建筑类型的不同，居住者对能源价格的响应有显著差异 [40, 41]。因此，充分利用人的行为能够有效地改善能源弹性，并针对居住者对热舒适性范围的不同，建筑电力需求弹性潜力得到了有效的改善 [42]，但其引起的电力需求弹性的量很难量化。

在建筑电力需求弹性的评价方面，现今的研究还比较少，没有形成针对不同建筑类型及功能的电力需求弹性评价体系。对于能源弹性的评价普遍涵盖了三个维度，即容量(size)、时间(time)及费用(cost) [43, 44]。Sunliang Cao 等人[45]在建筑系统中引入了能源匹配指数(Energy Matching Indices)，对可再生能源在系统中的占比进行了量化，一种为可再生能源在总能源中的比例(On-site Energy Fraction, 即 size), 另一种为可再生能源自身利用率(On-site Energy matching, 即 size&time), 通过这两个指数对系统弹性进行评价。Juan Ma[34]在其博士论文中针对应用风能的大型能源系统定义了一种标准化的弹性指数 NFI(normalised Flexibility Index), 并对 IEEE RTS 26 个设备系统进行相关弹性指数测试, 系统的 NFI 均值为 0.5352, 各分设备的 NFI 值从 0.2100-0.8000 之间。需求弹性评价体系是在能够准确量化需求弹性的基础上建立的, 也是未来需求响应发展及电网交互式建筑性能评价不可或缺的一部分。

总结国内外研究现状，以往的相关研究主要存在以下局限：

- (1) 主要集中在对不同单一系统进行的需求弹性量化，很少有针对全建筑需求弹性量化的研究，同时也缺乏不同弹性源的聚合方法的研究工作。
- (2) 对于不同来源的建筑电力需求弹性(人的热舒适范围所引起的需求弹性、建筑围护结构的热惰性所引起的需求弹性、空调风水系统的延迟特性所引起的需求弹性等)，没有相关的弹性传递和叠加机理的研究，更无相应的计算方法。
- (3) 以往研究集中在热环境对电力弹性影响上。但电力弹性和热环境弹性的双向耦合关系尚不清楚。当建筑电力需求弹性作为约束条件的情况下，

建筑热环境的弹性、相应的建筑物理特征和机电系统需要如何适应尚无研究和计算方法。

- (4) 以往的研究中通常给出建筑总的负荷削减潜力及建筑总负荷弹性量，例如通常只给出建筑空调系统的总弹性，而无法定量分析弹性量的具体来源，无法分析不同弹性源所能提供的弹性情况。究其原因主要是没有合适的量化模型对不同弹性源进行计算，仅能通过实际的建筑运行数据和完整的建筑建模进行计算得出。
- (5) 对于建筑能源弹性的评价，目前的研究较少，仅集中在可再生能源的弹性评价指标方面，尚缺乏针对建筑整体弹性的评价方法。

1.3 本课题的主要研究内容及意义

1.3.1 课题的研究对象和概念说明

1.3.1.1 研究对象

本课题的研究对象为办公建筑和居住建筑。以办公建筑为研究对象是因为办公建筑是目前我国需求响应项目的主要参与者，例如，在上海需求响应项目签约用户中，办公建筑约占 70% [24]；本课题同时选取居住建筑为另一研究对象，是基于居住建筑在中国体量大且其电力需求弹性潜能大等特点。尽管目前我国在居住建筑需求响应上处于探索研究阶段，但在一些需求响应较为发达的国家，研究表明，居住建筑也能够提供巨大的需求响应资源[37]。对我国居住建筑的需求弹性进行研究，能够促进我国居住建筑需求响应的发展。

针对不同电力需求弹性源，本课题具体包括建筑常规暖通系统、储能系统、家用电器、建筑蓄热结构本身及人行为引起的弹性。本课题从建筑各弹性源的需求弹性特性入手，研究各弹性源的电力弹性特征及聚合、叠加方法，并建立全建筑电力需求弹性量化体系，从而使建筑管理者能够结合建筑用能特征，指导建筑需求响应控制策略的制定。

本课题建筑电力需求弹性量化的研究背景为空调供冷季节，这样做的原因有两个：一是目前国内大多数需求响应示范项目发生在夏季，有实际的建筑楼宇数据支撑；二是电网高峰负荷通常发生在炎热的夏季，本课题的研究更具实用参考价值。但本课题提出的量化方法对于供热季节同样适用。

1.3.1.2 重要概念及说明

1) 需求响应 (Demand Response, DR)

本课题中建筑需求响应指的是当电力市场价格升高或供应电力变化时,电力用户接收到供电方发出的诱导性减少负荷的直接补偿通知或者电力价格上升信号后,改变其固有的习惯用电模式,达到减少或者转移某时段的用电负荷而响应电力供应,从而保障电网稳定,并抑制电价上升的短期行为。发生需求响应的时段常为炎热的夏季及寒冷的冬季。对于用户侧而言,需求响应可以采用很多手段来完成,建筑可以通过启停用电设备和降低负荷加载率来实现峰时用电负荷的削减以减少在电力价格偏高时段用电行为;或者通过调整设备用能时间表来转移高峰负荷至非高峰时段。在本文中需求响应所指的对象均为建筑,故建筑需求响应在文中也简称为需求响应,缩写为 DR。

2) 能源需求弹性及电力需求弹性

建筑能源需求弹性是指在保证室内人员处于舒适范围的前提下,建筑用能负荷增加或者减少的一种能力。对于电网来说,电网关心的是建筑电力需求弹性的潜能,其与建筑用能系统的能效有关。本文中,能源需求弹性泛指与能源相关的需求弹性,包括冷、热及其它形式的能源,而电力需求弹性指的是与电网用电负荷相关的用电弹性。例如,对于建筑而言,其能源需求弹性来源于建筑热环境的控制及热储能系统的传递及转化,包括建筑围护结构的热惯性、热储能系统的储能及暖通空调系统的热环境弹性控制,这一部分为与热相关的需求弹性,在考虑用能设备用能效率的情况下(例如 COP),可换算为电力需求弹性。对于一些直接用电设备(例如照明、插座等),其用能需求弹性直接体现在用电负荷上,本文中描述为电力需求弹性。而对于电网及需求响应方面,本文将与热相关的需求弹性换算成电力需求弹性,对全建筑电力需求弹性进行量化分析。在本文中,缩写的“需求弹性”及“弹性”均指代的为电力需求弹性。

3) 建筑人行为

本文所指的建筑人行为考虑了两个方面的,一方面是居住者对建筑热环境的容忍度。对于不同的建筑类型及不同建筑居住者,其对于热环境(包括温度,湿度及新风量等)的要求各有差异,特别是当热环境受到价格等因素的影响时,居住者对热环境的接受阈值存在差异。这里所指的常规温度舒适范围为 24-26℃,而考虑人行为下最高不能超过 28℃。另一方面,居住者对各用电设备的时间安排各有差异。通常家用电器包括洗衣机、洗碗机等,为不连续工作设备,且工作的时间比较灵活,即有较长的时间窗口,其工作时长通常小于时间窗口,这为用电设备的用能转移提供了可能,从而提供了电力弹性潜能。

4) 时间窗口及工作窗口

本文中时间窗口指的是用电设备可开始工作时间为起点到截止工作为时间终点之间的时长，即设备被允许或期望工作的时间段。工作窗口指的是用电设备从实际开始工作到结束工作的时段。通常，时间窗口时长大于工作窗口时长，因此设备可以在时间窗口中任意移动，从而实现用电负荷的转移，带来用电弹性潜力。

1.3.2 课题的主要工作

本课题采用理论研究、实验验证和计算机模拟研究相结合的方法。首先，通过理论研究，建立不同建筑弹性源及系统电力需求弹性的理论量化模型；然后，通过实验验证相关子模型的准确性；此后，根据从热弹性到电力弹性的传递及叠加机理，得到全建筑电力弹性计算方法；对于一些因实验平台限制无条件进行实验验证的理论量化模型，本课题通过在 Dymola 平台搭建 Modelica 模型进行模拟分析。最终得到适用于建筑电力需求弹性的通用计算理论数学表达。除此之外，在建筑需求弹性模型确立后，根据不同建筑系统的需求弹性特征，优化建筑需求响应控制策略，实现需求弹性的合理利用以及基于基准弹性建筑的弹性评价方法。主要的研究工作包括以下四点：

1) 与建筑热环境控制弹性相关的建筑电力需求弹性源解析

首先，对建筑需求弹性源进行归类划分，主要划分为建筑蓄热体、暖通空调系统（含热储能系统）、其它用电设备及人行为四个部分。建筑电力弹性一类与热环境控制有关，包括建筑蓄热体、暖通空调及热环境控制的人行为，电力弹性存在传递及转换过程，其弹性模型建立是难点；另一类则属于直接弹性类，如用电设备的强制开启或者关闭，该模型的建立与设备的时间表相关。然后，针对不同弹性源的特征建立各弹性源的子量化模型，并分析不同建筑源中对弹性量影响的主要因素。例如对于蓄热体，蓄热体的体量、蓄热体与空气接触的表面积、蓄热体的热物性参数等；对于暖通空调系统，建筑的保温性、新风要求、综合能效等；对于其它用能设备，其工作的时间窗口及其弹性的时间窗口等；对于人行为，用户对舒适度的接受范围等。最后，通过合理的弹性源聚合方法，使最终模型能够准确描述建筑在周期性外扰和不同用能行为作用下的电力需求弹性能力，从而构建通用建筑电力需求弹性模型。弹性模型中的主要影响因子的获取是本环节重点，例如，图 1.4 为拟采用的一种建筑蓄热体有效面积法模型建模思路，用于更准确的得到不规则蓄热体的一个重要参数-有效面积，从而能够更准确计算蓄热体的热平衡，使建立的蓄热体弹性模型更加准确。

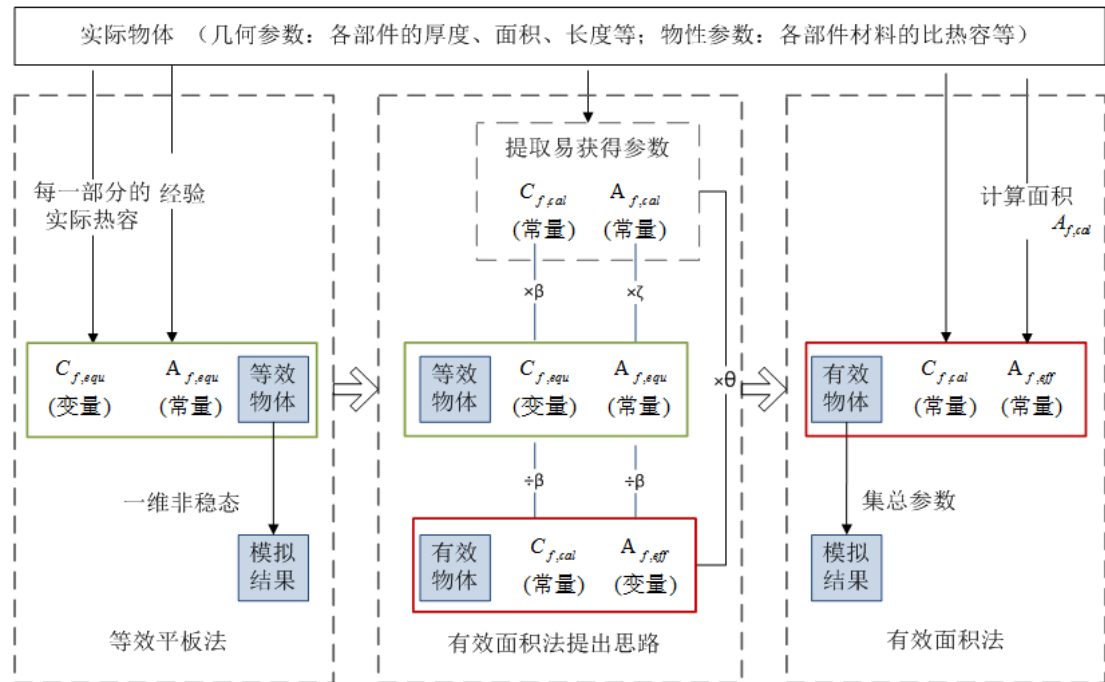


图 1.4 蓄热体“有效面积法”方法框架

2) 建筑电力需求弹性源各子模型实验及模拟验证

一方面，利用本课题组的建筑全能效实验平台，对所建立的电力弹性子模型进行验证。建筑全能效实验平台有两个可用于测试的房间（见图 1.5），可设置不同的建筑蓄热体场景应用于蓄热体子模型验证，具体包括改变测试房间内办公家具和文件体量等，从而能够代表不同入住率及不同类型的建筑。暖通空调系统的模型验证通过实验平台的冷水机组进行验证，当室内房间温度调整或者供水温度进行重设时，可通过冷冻水管道上的冷/热量计对空调用能负荷变化进行测定，同时在测试房间安装多个温度测试点对房间温度及内部蓄热体温度进行测定。人行为子模型可通过对房间调节综合温度进行验证，温度的重设区间及步长可根据不同用户热适应性及要求进行设定，验证过程可结合蓄热体和空调系统实验过程进行验证。

模拟验证部分利用 Modelica 建模语言，在 Dymola 建模平台上搭建建筑系统，通过实际建筑实例对 Modelica 模型进行校验，使其能够反映真实的建筑热力动态过程。利用校验好的 Modelica 建筑模型进行模拟，从而对电力需求理论模型进行进一步验证。

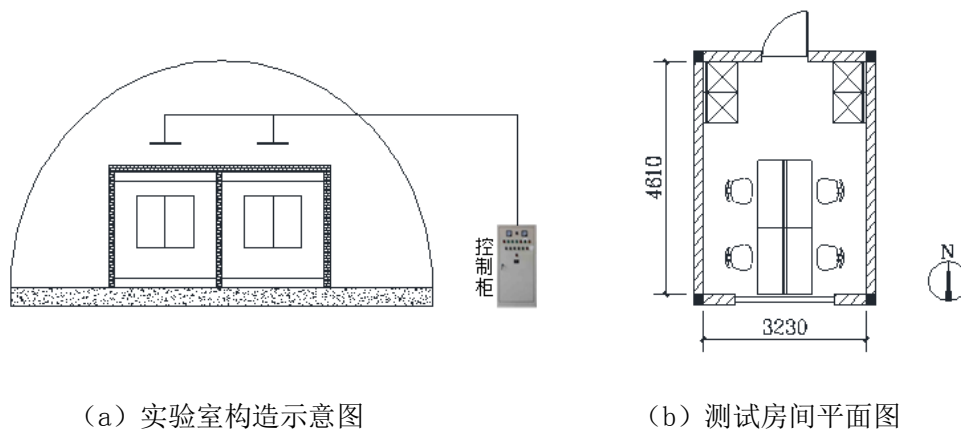


图 1.5 用于模型验证房间示意图

3) 各子能源需求弹性聚合与传递机理研究

以往计算电力需求响应的效果需要复杂而准确的整体建筑模拟计算或者从实际需求响应项目运行数据分析得出。而且即使得出了总电力需求响应变化的结果，也并不知道弹性传递的物理过程，不知道各个子弹性源的实际贡献，各弹性源实际贡献就像是一个黑箱，不得而知。

此外，建筑电力需求弹性和热环境弹性的传递影响关系需要从多方面进行考虑，并针对不同的建筑类型、不同的建筑系统形式给出合理的计算方法。描述电力弹性的特征包括：建筑总电力弹性量、电力弹性量比例、电力弹性利用率以及电力弹性收益。建筑总电力弹性量体现了建筑需求弹性的规模，其与建筑的体量及建筑能源系统规模相关。一般来说，体量大的建筑具有绝对量更大的需求弹性量。电力弹性量比例则表达了弹性量与建筑用电的比例关系，该比例大的建筑具备更好的用电灵活性。弹性量和弹性比例大并不代表建筑能够有效利用弹性资源进行电网供需交互，故各个子弹性源的电力弹性利用率同时也会被提出，该指标与建筑实际应用的需求弹性量相关。

对于电网互动型建筑，上述电力弹性指标往往是固定的，此时需要找出一套有效的方法计算出如何改进热环境的弹性来满足上述特征。例如，当人员行为约束条件较为窄小的时候（如五星级酒店），建筑就需要补充一定的蓄热和蓄冷设备作为弹性来源的补充。又比如，当建筑空调形式为分系统的时候，机电能源热惯性较小，需要牺牲一定的人员舒适度弹性作为补充。所以只有明确弹性叠加和传递物理过程才可能实现双向计算。一方面需要能够计算出子弹性的总体叠加效果。另外一方面需要计算出当热舒适环境范围和建筑物理特征为固定约束时，建筑机电系统需要满足什么样的弹性和蓄能需求。

针对上述问题,在已知建筑用能弹性特性的基础上,研究不同来源的建筑电力需求弹性的叠加和传递机理。并对不同电力弹性源进行有效聚合,得到建筑整体电力弹性聚合解析计算方法。此后进一步完善对建筑热环境弹性和建筑电力需求弹性的传递关系机理研究。对各子弹性在建筑的传递过程做出物理描述,给出双向解析计算方法。

4) 建筑电力需求弹性实际案例分析

上述理论计算方法完成后,本研究将运用其对实际建筑案例进行电力弹性计算分析。找出建筑不同负荷的用电特征,结合常见的需求响应控制技术,实现建筑需求响应的最优化控制。根据不同需求响应优化控制目标,为实际项目推荐最佳的需求响应控制策略。

5) 电力需求弹性评价方法

通过提出合理的电力需求弹性指标,所提出的指标能够反映建筑弹性总量、弹性持续时间以及弹性的成本等要素。除此之外,建立一套类似于建筑能效评价方法体系,对建筑的电力需求弹性进行评价。并结合风能及太阳能未来发展趋势,对未来建筑提出相应的电力需求弹性要求,以期对未来建筑提出相应的弹性建设要求。

1.3.3 本课题的研究意义

本课题通过研究建筑电力的需求弹性特性,主要意义在于为建立相应的电力弹性量化体系和优化建筑需求响应控制方法打下重要的理论基础。因为,建立一套系统的建筑电力需求弹性的量化方法,对研究不同类型的建筑及能源系统的特有控制策略以及对促进下一代电网交互式建筑的发展及评价具有重要的意义。例如,在已知建筑的弹性特性的基础上,可预知建筑缓解电网平衡的潜力,进而可优化需求响应控制策略,在不影响或最小化影响用户用能舒适性的前提下,得到不同建筑类型的最优用电控制策略。对确保电网用电安全、提高电网用电效率,杜绝弃风弃电现象,从而提高可再生能源利用效率及整体社会效益。

随着建筑技术的发展,建筑不单只是在节能、舒适方面得到提升,建筑与电网的交互式能力成为了下一代建筑发展更高的诉求。理清建筑电力需求弹性的传递和叠加机理,可推动建筑电力需求弹性评价体系的建立,从而促进现代化建筑整体性能的评估。对于推动我国需求响应项目发展以及电网交互式建筑建设来说,建立一套系统的、准确的建筑电力需求弹性的量化及评价方法至关重要。而这些评价方法又依赖于底层的最基本的科学问题的解决,即本课题提出的建筑电力需求弹性的量化研究。

因此,为了有效推进电网交互式建筑的发展,亟待厘清建筑热环境控制弹性和建筑电力需求弹性的双向耦合机理,建立全建筑电力需求弹性的量化计算方法。本项目的研究将为我国建筑需求响应的推进和电网供需平衡问题的解决提供理论依据和技术支撑。

1.3.4 课题的技术路线和文章架构

本文共分为七章:

第1章主要介绍了建筑电力需求弹性的概念和研究意义,对目前国内外建筑电力弹性的相关研究进行了分析总结,通过文献的阅读分析了目前本领域存在的问题及不足,这些不足成为了本课题需要解决的重点研究工作,最后简要介绍了本文的研究意义及研究技术路线。

第2章对建筑电力需求弹性源进行分类,建立了建筑不同弹性源的电力需求弹性子模型,包括蓄热体、空调系统、用电设备及人行为的弹性量子模型。并把弹性源的研究分为两大类,一类为与建筑热环境相关的弹性量化,另一类为非热环境相关的弹性量化。最后提出了全建筑电力需求弹性源计算方法,并用案例进行说明。

第3章搭建验证实验平台,验证了建筑各弹性源子弹性模型及全建筑弹性模型的准确性。并对理论模型提供了一些相应的修正方法。

第4章通过在Dymola软件平台上搭建建筑Modelica模型,通过模拟对建筑电力弹性进行分析,并对一办公建筑案例的模拟结果进行展示分析。

第5章分析建筑中的用电弹性特征,把建筑用电设备分为了可间断型弹性负荷、可转移型弹性负荷和可调节型弹性负荷三类。针对这些特征提出了楼宇基于不同电力弹性特征下需求响应的优化控制方法,并通过一个居住建筑和一个办公建筑实例进行说明。

第6章针对不同的建筑能源系统及建筑类型,从建筑总电力弹性量、电力弹性量比例、电力弹性利用率以及电力弹性收益四个方面进行评价。并以基准弹性建筑为基础,提出了一种电力需求弹性评分方法。利用所提出的弹性评分方法,对未来随着可再生能源的发展,建筑应具备的电力需求弹性能力以及现有建筑需要怎样的弹性改良进行分析。

第7章总结了本研究的全部工作成果、创新点以及本文的局限性,并对后续工作进行了相关展望。

本研究的技术路线见图1.6,首先,通过基础的研究,提取建筑电力需求弹性的影响因素,通过理论分析,构建建筑不同弹性源的电力需求弹性子量化模型及全建筑量化模型。然后,通过实验及模拟的方法验证所建立的理论量化模型的

准确性。最后，在建筑电力弹性准确量化的成果基础上，对建筑电力弹性资源进行实际应用研究。

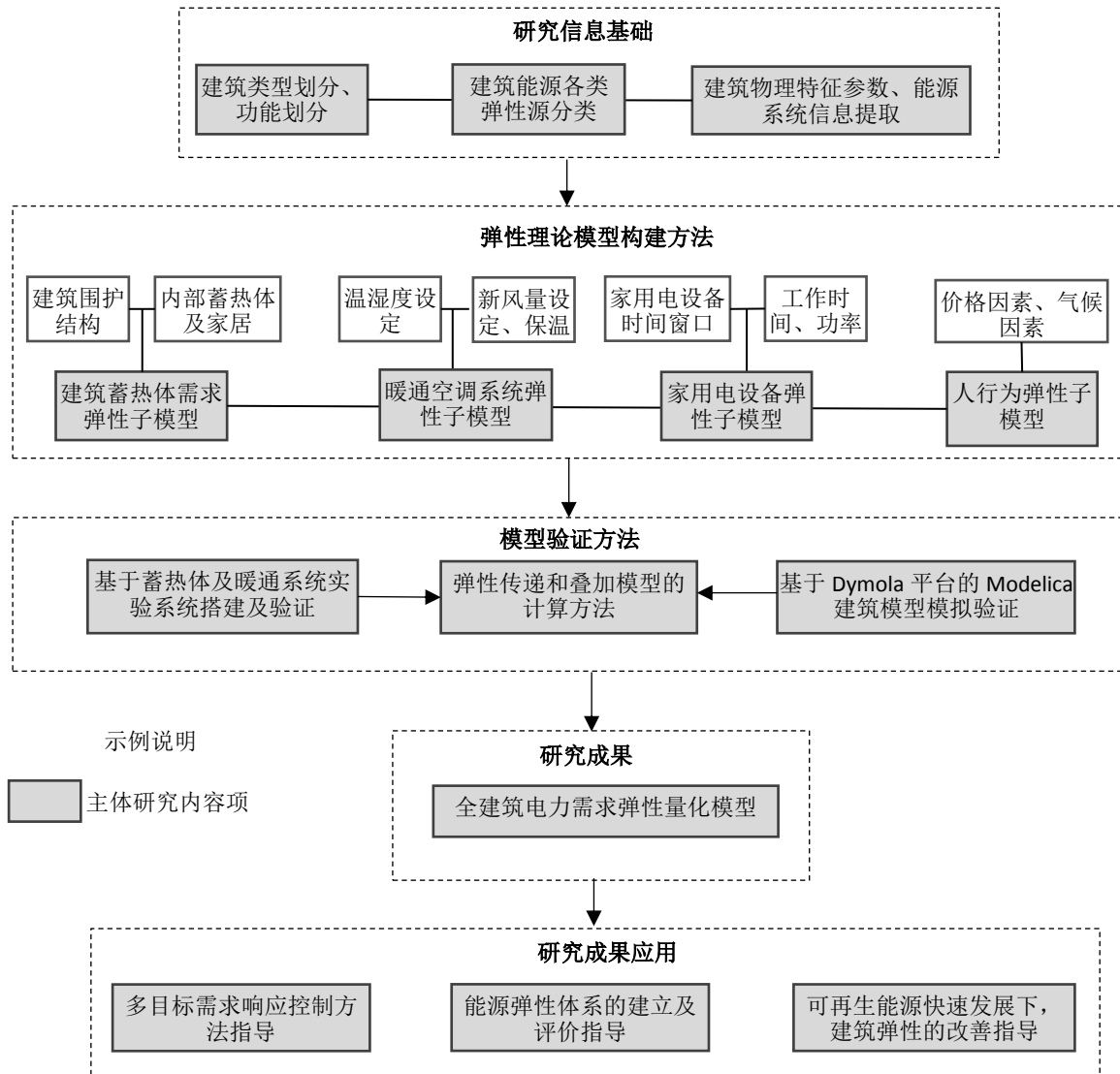


图 1.6 课题技术路线图

1.4 本章小结

本章对本课题的研究背景和意义进行了介绍，指出了建筑电力需求弹性对如今电网安全运行的重要性。回顾了目前国内外电力需求弹性的相关研究，指出了目前该领域存在的几个主要问题，在此基础上提炼出了本课题的主要研究内容和实现技术路线。

第2章 建筑电力需求弹性量化模型建立

2.1 概述

电力需求弹性被认为是一种极具前景的电力需求响应资源，是一切需求响应及能源管理调度的基础，其为需求响应的实现提供了可能。建筑电力需求弹性资源在欧美发达国家已经可以公开出售，通过集成商竞价竞标[46]。虽然大家明确知道建筑电力需求弹性相当一部分来自建筑热环境控制的弹性，无论是来自舒适空调的设定温度的弹性范围，还是来自建筑的热惯性。然而，现今建筑电力需求弹性研究非常有限，建筑热环境控制的弹性及其系统的能源弹性特性关系未知，除非用极其详细和已校准的建筑模型进行模拟计算，对于一个给定建筑，很难估算出弹性能力的大小。无论对于新建建筑还是既有建筑，仅凭设计图纸都难以估算出一栋楼宇的电力需求弹性量。

另一方面，建筑电力需求弹性受多因素影响，包括建筑围护结构、内部蓄热体、内部人员活动、设备运行计划安排等，错综复杂的关系使得建筑需求弹性的量化变得更加复杂。根据对国内外文献的研究，目前尚无系统的建筑电力需求弹性的量化方法。从建筑室内人员的热舒适范围，到建筑围护结构热惯性，到机电系统的终端能耗，建筑电力需求弹性呈现层层传递和叠加的态势。这些叠加和传递的机理和数学描述尚不清晰。此外，以往的研究往往只关心热环境控制对建筑能耗的影响。对于电网交互式建筑，当电网对建筑电力需求弹性提出约束性控制的时候，热环境控制如何适应尚不明确。在建筑电力需求弹性特性未知的情况下，无法准确地制定与之相对应的需求响应控制策略。这些成为阻碍需求响应发展和电网交互式建筑建设的阻力。

综合考虑建筑围护结构、人行为、价格因素、储能系统及机电设备对建筑电力需求弹性的影响，理清影响建筑需求弹性的物理过程。针对不同的电力弹性源，提取关键因素，构建建筑蓄热体、暖通空调系统、用电设备以及人行为等的电力弹性物理过程描述和相互影响关系，从而建立一套建筑电力需求弹性理论计算模型方法是本章的主要内容。不管是新建建筑还是已有建筑，此计算模型不需建筑的运维历史数据，仅需一些易于获取的建筑设计参数即可计算出建筑的电力需求弹性能力。

2.2 建筑电力需求弹性定义及分类

2.2.1 电力需求弹性定义

根据前人的研究，电力需求弹性定义中包括用能负荷延迟弹性（Delayed Flexibility）、负荷转移弹性（Shifted Flexibility）、强制负荷增加弹性（Forced Flexibility）、弹性响应时长（Response Time）及负荷变化（Loads Change）等关键词[17, 30, 33]，国内也称之为电力需求柔性及柔性负荷[47, 48]。顾名思义，本文中描述的弹性为建筑所用电的潜在负荷区间，如图 2.1 所示，弹性区间描述为建筑潜在的最大与最小用电负荷曲线之间。最大及最小负荷曲线均为建筑在满足用户用能要求和舒适允许范围情况下的用电曲线。最大负荷曲线为建筑能够增加的最大用电负荷需求，比如在夜间用电低谷情形下增加用电负荷的能力；同理，最小负荷曲线为建筑的最小负荷需求。

因此，建筑中的用电需求同时存在增加用电负荷和减少用电负荷的能力，为了更好地定量分析建筑需求弹性量，正负弹性潜力通常分开计算[29]，根据该文献研究，本文中把增加用电负荷的能力定义为正弹性，如图 2.1 黄色区域，而把减少用电负荷的能力定义为负弹性，图中浅绿色区域。实际上，负荷转移及延迟时为负弹性，增加负荷时为正弹性。我国用电时段通常可分为峰、平及谷段。在谷段时，电网希望用户多用电，建筑需要有正弹性能力；在峰段时，希望用户减少负荷需求，建筑需要有负弹性能力，从而建筑需求弹性能力有利于平衡电网供需，降低电网高峰用电的风险。在时间尺度上，弹性将受到之前弹性利用情况的影响。

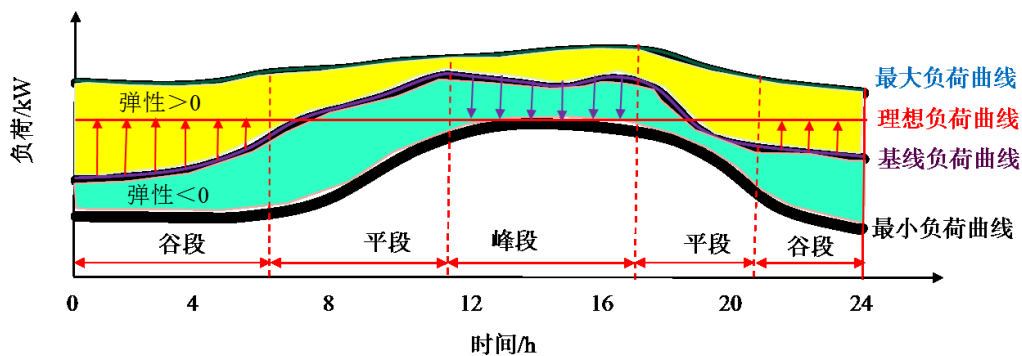


图 2.1 建筑电力需求弹性定义示意图

对于建筑来说，电力需求弹性能力可理解为建筑本身在某个特定时刻开始，在给定的时间段内对用电负荷的持续调整能力。Cherrelle 等人提出了电力弹性资源的四个特征属性[49]，具体包括弹性方向（Direction）、弹性力（Capacity）、弹性起始时间（Starting Time）及弹性持续时长（Duration），如图 2.2 所示。弹性的

方向属性描述了系统是增加还是减少建筑用能，多数弹性源具有双向性，包括储能设备、空调系统和大多数负荷可转移的用电设备，在供需平衡调节中，可根据电网信号增加或者减少建筑电负荷需求。弹性力旨在描述系统提供弹性负荷的大小，但弹性力大的建筑不一定代表弹性总量贡献大，同时需要考虑时间维度，弹性总量是弹性力和弹性需求时间的乘积。除此之外，弹性的起始时间非常重要，此时间的确定需要结合实际电网的供需要求，例如电网用电高峰及低谷出现的时间，从而在不同用电时段充分利用不同的建筑弹性资源。

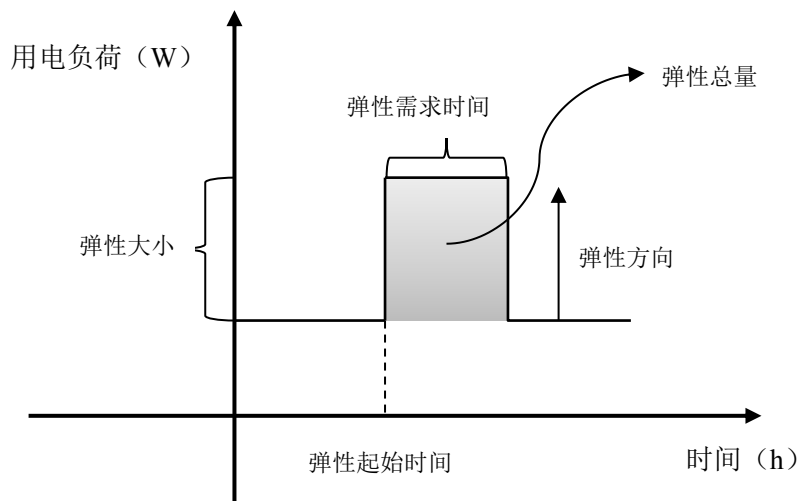


图 2.2 建筑电力弹性特征属性示意图

2.2.2 电力需求弹性来源与分类

图 2.3 为建筑电力需求弹性源的各来源示意图。建筑本身由于围护结构、室内家具物品等存在一定的蓄热能力，当周围环境发生变化时，蓄热体起到一定的温度缓冲作用，通常把这种特性称之为建筑热惰性[50, 51]，具有一定的热弹性。室内的人员对室内热环境具有一定的适应范围。例如，我国夏季一般办公建筑的舒适温度推荐值为 26-28℃，高级办公室为 24-27℃，冬季则分别为 18-20℃及 20-22℃[52]，空调系统因具备一定的舒适温度控制范围以及其本身存在一些蓄热介质（例如冷冻水）也具备相应的蓄热能力。其次，在有经济激励的情形下，用户往往可以超出一般舒适温度设定的阈值范围，所以人行为存在一定的需求弹性。建筑的一些用能设备的工作时间可调整进而形成负荷的转移，也可为建筑提供相应的电力需求弹性。此外，建筑里的蓄能设备（蓄能水箱、电池等）在充放能的控制过程提升了整体建筑的电力需求弹性。此外，照明用能也可作为一种弹性资源。当自然光亮度超过一定值时，例如 500 lux，照明灯应该关闭，通常可以通过和建筑能源管理系统的结合，照明的控制策略可参见文献[53]。同时，可以通过

对手机、笔记本及电池的充电对插座负荷进行管理。家庭能源管理系统(HEMS)联合智能家用设备管理技术已经得到了较好的发展。HEMS被认为是一种改善能源效率以及提高能源弹性的有效方法[54]。在未来,HEMS整合其它的智能设备将是提高需求弹性以及优化需求响应策略的发展方向。

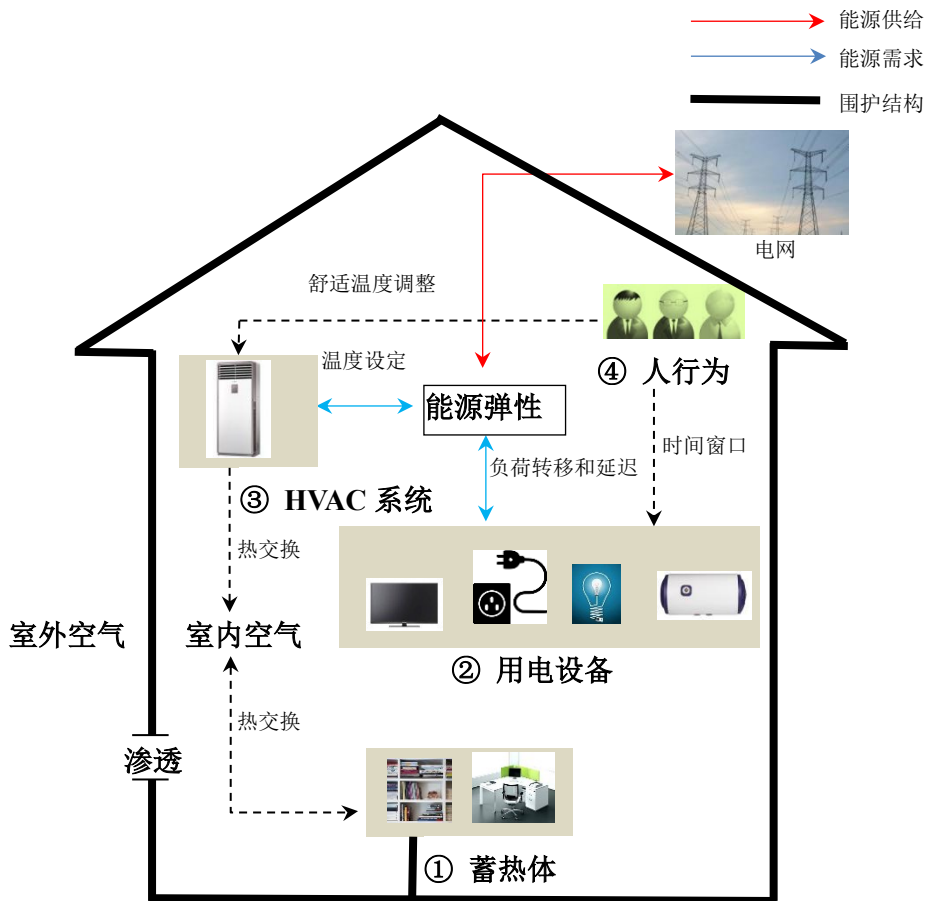


图 2.3 建筑电力需求弹性源分类

电力需求弹性主要来源于两大类,一类为与热环境相关的用电设备,例如空调系统,其电力弹性是由热弹性所引起的,从热弹性转移到电力弹性还具有一定的延迟等特性,且和空调系统的性能相关;另一类为非热环境相关的弹性设备,

包括照明设备、电池储能系统及混杂的插座用电等，其特点是能够直接计算电力弹性，同时需考虑设备散热对热环境类弹性的影响。它们的分类方法参见图 2.4。

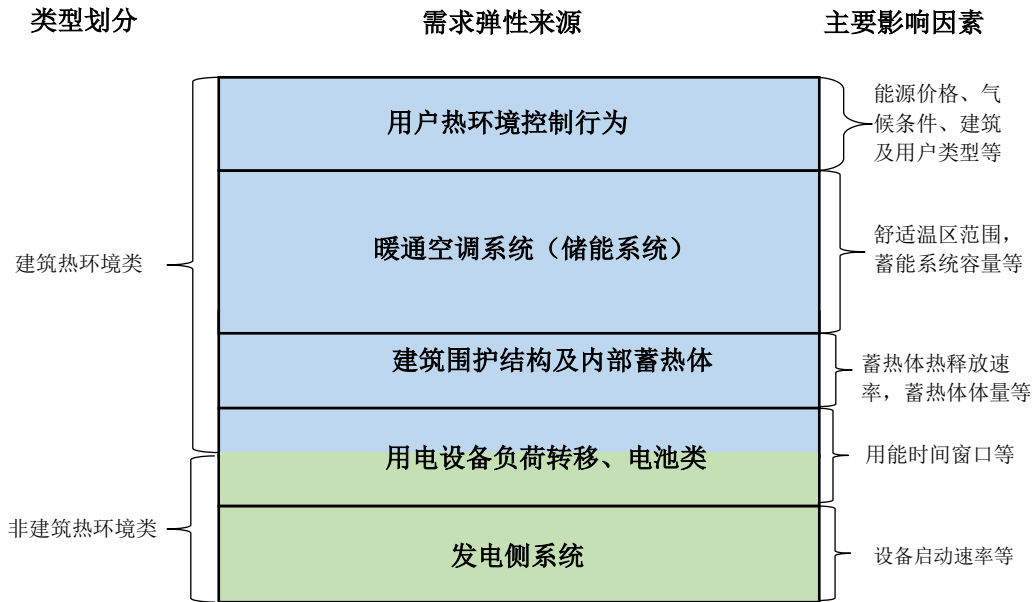


图 2.4 建筑电力需求弹性量化架构

2.3 建筑热弹性与电力弹性关系描述

与建筑热环境相关的需求弹性主要体现在从建筑供冷、供热惯性到电力弹性的传递与转化过程。在制冷工况下，当房间温度从舒适温区的下限提高到上限时，房间的冷负荷需求将降低，最终形成空调系统用电负荷降低，谓之为空调系统的电力弹性。图 2.5 为室内空气动态热平衡的示意图，房间冷负荷降低来自几个方面。随着房间设置温度的升高，一是处理房间新风负荷降低；二是经过外窗和外墙传热量的减少；三是建筑内部蓄热体的冷量释放；最后是房间空气本身的热惰性。所有冷负荷的减少量将通过空调系统用电负荷变化构成用电需求弹性。此类弹性是先计算总冷量的弹性量后，再结合空调系统的性能指标计算电力需求弹性。

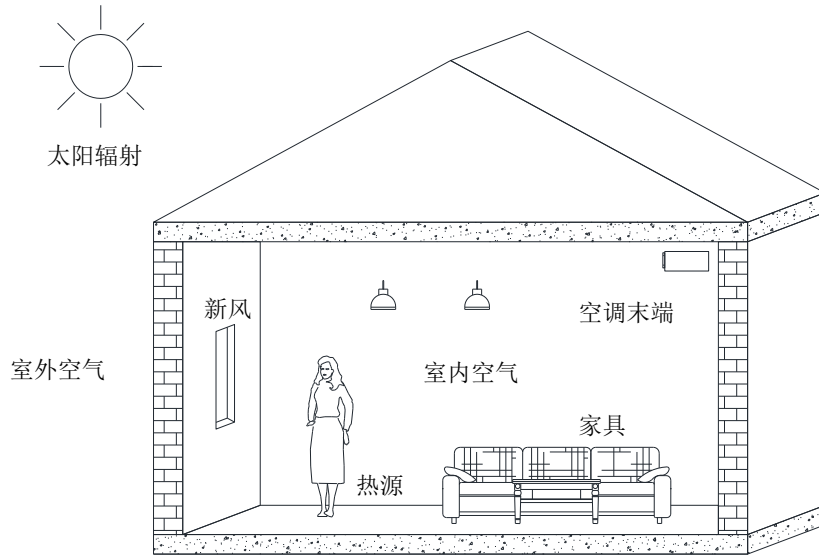


图 2.5 建筑室内空气的动态热平衡示意图

建筑热传递过程的准确描述是准确量化电力需求弹性量的基础，如图 2.5 所示，以下详细介绍建筑热平衡过程。当室内温度设定变化时，室内空气的热平衡影响因素包括：室外天气参数、空气渗透、内热源（包括人员、设备等）、内部蓄热体和空调末端。其中太阳辐射透过玻璃窗进入室内的得热分为两部分，即透过玻璃窗直接进入室内的太阳辐射热和玻璃窗吸收太阳辐射后再通过导热对流传入室内的热量。对于墙体的辐射热则是先通过导热传递给围护结构的内表面，内表面通过与室内空气的对流换热传递给室内空气。在不考虑气体辐射得热情形下，直接进入室内的太阳辐射热作用于室内各表面，使各表面升温后再与室内空气进行对流换热。空气渗透为室外热空气进入室内产生直接得热。室内热源则通过对流及辐射两种方式进行散热，对流散热量直接形成瞬时得热，而辐射散热部分将会形成滞后得热，计算时应采用相应的得热系数。来自空调系统的冷源则是用来平衡上述得热，维持室内舒适的温湿度要求。

因此，室内空气热平衡受到室内物体表面与室内空气的对流换热量、内热源中以对流形式传递热量部分、空调末端供冷量以及空气渗透得热的影响。室内空气传热动态平衡方程如下式。

$$\rho_{in} V_{in} c_{in} \frac{\partial T_{in}(t)}{\partial t} = \sum_{env} Q_{env}(t) + \sum_{fur} Q_{fur}(t) + \sum_{par} Q_{par}(t) + \sum_{floor} Q_{floor}(t) + \sum_{ceiling} Q_{ceiling}(t) + \sum Q_{in,conv}(t) + \sum Q_{inf}(t) + \sum Q_{AC}(t) \quad (2-1)$$

式中： ρ_{in} ——空气密度， kg/m^3 ；

V_{in} ——房间体积， m^3 ；

c_{in} ——空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$;

T_{in} ——房间温度, C ;

$Q_{env}, Q_{fur}, Q_{par}, Q_{floor}, Q_{ceiling}$ ——分别为外围护结构、家具、内围护结构、地板及天花板与室内空气的传热量, W ;

$Q_{in,conv}$ ——内热源与对流方式传给室内空气的热量, W ;

Q_{inf} ——空气通过渗透带来的热量, W ;

Q_{AC} ——空调系统的供冷量, W ;

式(2-1)的意义是:某时刻室内空气热量的变化 $\rho_{in}V_{in}c_{in}\frac{\partial T_{in}(t)}{\partial t}$ 为该时刻所有建筑外围护结构内表面与室内空气间的换热量 $Q_{env}(t)$,所有内围护结构表面与室内空气的换热量 $Q_{par}(t)$,所有室内陈设物表面与室内空气的换热量 $Q_{fur}(t)$,所有地面铺设物表面与室内空气的换热量 $Q_{floor}(t)$,天花板与空气的散热量 $Q_{ceiling}(t)$,室内热源散热量 $Q_{in,conv}(t)$,空调末端向室内的供冷量 $Q_{AC}(t)$,以及渗透风带来的热量 $Q_{inf}(t)$ 的总和。

空调系统热弹性是当采用需求响应控制策略与否的情形下,空调系统冷量的差值,在得出热弹性后除以空调系统的COP得到电力需求弹性量。当需求响应策略实施后与热相关的空调电力弹性的计算可参见2.5小节。

2.4 建筑非热环境类需求弹性量化模型的建立

非热环境类需求弹性部分不参与从热弹性到电弹性的转化及传递过程,其直接提供用电负荷的削减能力。在电力需求侧,非热环境类弹性源主要来自居住类建筑,如家庭用电设备中的洗衣机、洗碗机等负荷的转移及调节。此节仅计算直接电力负荷的弹性部分,而负荷的转移及削减导致的内热变化引起的电力需求弹性将在2.5小节中进行分析。

2.4.1 家用电设备

家用电设备中弹性来源主要为负荷可转移及功率可调节两种。其中设备功率可调节的设备可通过功率调节提供弹性,例如照明亮度的调节;负荷转移设备则可工作于一个时间窗口,在时间窗口中的任意时段内完成工作任务,时间窗口及所需工作时间的关系参见图2.6所示。负荷可转移设备能够对负荷进行转移而不需要额外的投资,且对建筑本身运行没有太大影响[55],主要包括洗碗机、洗衣

机及烘干机等[37]。一般来说，像厨房设备及家庭娱乐设备不具备能源的弹性[56]。用电功率可调节的设备主要包括照明、冰箱等。

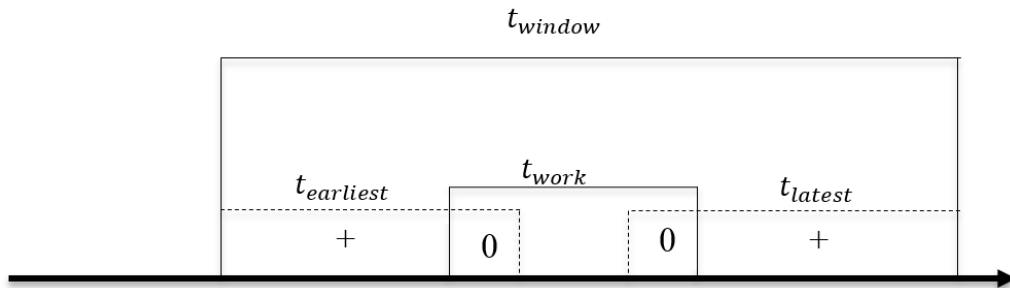


图 2.6 设备时间窗口及工作时间示意图

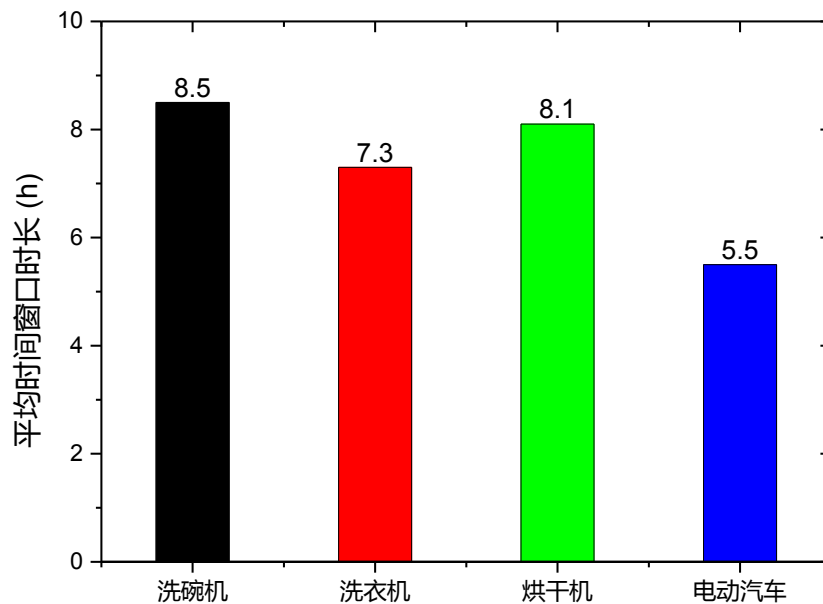


图 2.7 不同设备平均时间窗口时长

时间窗口可定义为设备可开始工作时间与截止工作的时间跨度，而工作时长为设备完成工作任务所需要的时间，且时间窗口大于或等于工作时长。用电设备可以在时间窗口内任意时间段内工作，通常此类用电设备一旦开启，设备需完成任务而不能或不希望中途暂停或关闭。图 2.7 列出了不同家用电器的平均时间窗口，从图中可以看到用电设备的时间窗口均大于 5 小时，而洗碗机的平均时间窗口最长，达到 8.5 小时[37]。在有相应经济激励措施和考虑人行为情形下的时间窗口可更长。因为时间窗口的存在，设备能够方便地转移高峰负荷到非高峰阶段。根据比利时的一示范项目统计，对于洗衣机、洗碗机及烘干机三种家用电器，

一户家庭平均最大负荷可增加量为 430W，平均最小负荷可减小量为 65W[37]。结合时间窗口的定义，家用电器的电力弹性有下式 2-2 定义。

$$F_{ap}(t) = \begin{cases} -\sum_{i=1}^n k_0 \cdot P_i(t) & \text{功率可调节型设备} \\ -\sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot X_i(t) & \text{功率可转移型设备} \end{cases} \quad (2-2)$$

$$X_i(t) = \begin{cases} 0 & t \in (t_{work} \cap t_{earliest}) + (t_{work} \cap t_{latest}) \\ 1 & t \in t_{window} - t_{work} \\ -1 & t \in t_{work} - (t_{earliest} \cup t_{latest}) \end{cases} \quad (2-3)$$

式中： k_0 ——设备功率降低比率，对于功率不可调节设备 $k_0 = 0$ ；

P ——设备的负荷，W；

X ——设备工作状态，对于需全天连续工作的设备 $X = 0$ ；

t_{work} ——设备的工作时长，h；

t_{window} ——时间窗口，h；

$t_{earliest}$ ——设备在时间窗口内能够最早完成任务时段，h；

t_{latest} ——设备在时间窗口内最晚完成任务时段，h。

2.4.2 分布式能源系统

为解决供需平衡问题，分布式能源系统得到了快速的发展，当分布式能源系统能够与电网形成良好的协同运作时，能够为电网提供弹性服务[57]。分布式能源系统主要包括储能系统（例如目前发展较快的可充放电的电动汽车项目）、冷热电联产系统（CCHP）及可再生能源发电系统等。

对于冷热电三联供系统，CCHP 实现了能源的梯级利用，具有更高的能源利用效率[58, 59]。“以热定电”和“以电定热”为 CCHP 系统两种基本运行模式，“以热定电”能够最大程度地利用机组余热，因此实现系统的高效能源利用，但该模式下系统将产生冗余的电能，在我国上网政策不明确的情形下，势必造成电能的浪费。为此我国目前多数 CCHP 系统主要按“以电定热”运行，而通过储能水箱等存储多余的热能[60]。在我国的发展背景下，对于安装了 CCHP 系统的建筑来说，其实质是对电网电力的依赖降低，若 CCHP 系统与电网不形成双向交互控制，且为“以热定电”的模式运行，对于电网来说，无弹性可言，故本课题对此不做详细讨论。

对于可再生能源系统，大部分可再生能源系统受环境影响较大，具有不稳定且难于准确预测等特征，其能否提供电力弹性有待商榷。对于一些实例，在用

能高峰时期,屋顶太阳能的接入减少了建筑对电网的依赖,能够起到削峰的作用,增加了负弹性潜力,但若有多余的可再生能源需要反向接入到公共电网,可能引起电网盈余及供需的不稳定,则该部分可再生能源不能作为弹性资源来衡量。严格来说,类似于建筑中分布式太阳能等可再生间歇式能源的利用所提供的电力弹性存在一定的争议,甚至有可能降低建筑的弹性量[32],故本文中不做详细的讨论,本文仅对电池储能系统做相关分析。实际上,太阳能结合储能等措施,能够为建筑提供更多的能源弹性的可能性,为电网交互式建筑未来发展的方向[61]。

对于各类储能电池模块及近些年快速发展的电动汽车是建筑理想的电力弹性源[62]。基于电网运行供需平衡的需求,储能电池在电网中快速的调频调峰响应优势是当今研究的热点[63, 64]。家用储能电池系统通过充放电过程的合理控制实现建筑的优化用电,从而为建筑提供弹性资源,其弹性量化公式如下:

$$F_{ba}(t) = X(t)(SOC_{ini} - SOC_t)E_{cap}/\Delta t \quad t \in t_d \quad (2-4)$$

$$X(t) = \begin{cases} -1 & t \in t_{charging} \\ 1 & t \in t_{discharging} \end{cases} \quad (2-5)$$

式中: X ——储能电池工作状态,对于不工作的电池 $X = 0$;

SOC_{ini} ——初始荷电状态,为电池所含电量占总可用容量的百分比, %;

SOC_{t_d} ——时间段 t_d 后电池的荷电状态, %;

E_{cap} ——电池的额定容量, Wh, 其它参数同上;

近些年,电动汽车发展迅速,充电汽车与电网联合(V2G)技术在近些年成为了一种电网调度新趋势[65]。对于电动汽车,其充电通常发生在夜间,从而实现了正的电力弹性,如果可以在高峰负荷进行放电行为,则可提供负的电力弹性。PJM 基于动态价格对 V2G 进行了相关市场研究,通过对电动汽车充放电行为的管理,研究发现每月每辆电动汽车能够得到大约\$100 的回报[39]。

2.5 建筑热环境类电力需求弹性量化模型的建立

除了直接提供电力负荷弹性的弹性源外,还有一些用能弹性与热环境相关,其量化过程为从热弹性转化到电力弹性,其机理可见 2.3 小节。以下详细介绍包括建筑蓄热体的热惰性、用电设备散热、空调系统及热储能系统电力弹性的量化方法。

在对热环境相关的电力弹性量化理论计算模型建立时做了如下假设:

- 1) 在房间调节综合温度前, 假设内墙和内部家具等内部蓄热体温度与室内温度相等;
- 2) 忽略外墙的蓄热性能, 仅考虑外墙传热量变化对空调负荷的影响;
- 3) 房间常规舒适温度调节范围为 2°C , 即从 24°C 重设为 26°C , 考虑人行为情形下房间温度最高不超过 28°C 。

2.5.1 建筑内部蓄热体

建筑内部蓄热体主要包括建筑维护结构及家居设备/设施等, 由于这些蓄热体具有一定的“热惰性”, 能够为建筑提供一定量的冷、热负荷弹性。该部分弹性量主要由蓄热体体量及其热力性质有关, 包括热容、导热系数, 还与建筑的保温以及密闭性有关[20]。

计算蓄热体电力需求弹性的方法可参见本人前期做过的相关研究[12, 66]。该问题的关键是将家具等蓄热体近似为一维平板的非稳态导热问题(即蓄热体温度仅沿厚度方向变化)。设蓄热体厚度为 2δ , 初始温度为 t_0 , 房间空气温度为 t_{∞} , 该过程的导热微分方程及定解条件如下式(2-6)~(2-9)。

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} (0 < x < \delta, \tau > 0) \quad (2-6)$$

$$t(x, 0) = t_0 (0 \leq x \leq \delta) \quad (2-7)$$

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2-8)$$

$$h[t(\delta, \tau) - t_{\infty}] = \lambda \left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta} \quad (2-9)$$

从初始时刻到蓄热体与周围空气处于热平衡这一过程所传递的热量由下式计算。

$$Q_0 = \rho c V (t_0 - t_{\infty}) \quad (2-10)$$

这是非稳态导热过程能够传递的最大热量值, 根据导热微分方程组(2-6)~(2-9)采用分离变量法可求得导热过程的分析解, 可得初始时刻到某一时刻 τ 这一阶段传递热量 Q 与 Q_0 的比值 ξ 见下式。

$$Q/Q_0 = 1 - \frac{\sin \mu_1}{\mu_1} \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 Fo) \quad (2-11)$$

式中: μ_1 ——是超越方程 $\tan \mu_1 = Bi/\mu_n, n = 1, 2, \dots$ 的特征值;

Fo ——傅里叶数。

传递热量的比值计算式 2-11, 并采用近似拟合公式 2-14 计算该比值, 即蓄热体的热释放率。根据以上分析, 蓄热体电力需求弹性 F_{mass} 计算公式可表述为式 2-12。

$$F_{mass}(t) = \sum_{i=1}^n \xi_i C_i T_{range} / (t \cdot COP_{AC}) \quad (2-12)$$

$$C_i = c_i \rho_i A_i d_i \quad (2-13)$$

$$\xi_i = 1 - \left[a_1 + b_1 (1 - e^{-c_1 B_i}) \right] \cdot \left(\frac{a_2 + c_2 B_i}{1 + b_2 B_i} \right) \cdot \exp[-F_o \cdot (a_3 + \frac{b_3}{B_i})^{-1}] \quad (2-14)$$

式中： C_i ——蓄热体总热容，是蓄热体的比热 c ，密度 ρ ，表面积 A 和当量直径 d 的乘积，由于家具往往为不规则的形状，其表面积的计算可参见公式 2-15； $kJ/^\circ C$ ；

T_{range} ——房间舒适温度调整幅度，通常为 $2-4^\circ C$ ，但在有建筑预冷的情形下，该值可更大，但需权衡用户的热舒适波动范围， $^\circ C$ ；

ξ_i ——为蓄热体的热释放率，主要受 B_i 和 F_o 的影响，式中系数 a ， b ， c 的选择可参见文献[67]；

COP_{AC} ——空调系统的 COP；

对于家具等形状不规则的内部蓄热体，其表面积的计算公式如式 2-15：

$$A_{fur} = \frac{m_{fur}}{\rho_{fur} \cdot L_{fur}} \quad (2-15)$$

式中： ρ_{fur} ——家具的密度， kg/m^3 ；

m_{fur} ——家具总重量， kg ；

L_{fur} ——家具的当量尺寸，为主要家具厚度的一半， m 。

建筑蓄热体作为冷、热量缓冲介质，能够为建筑提供可观的负荷弹性。在空调负荷控制方面，建筑蓄热体能够提供短时间空调负荷的大幅削减[68]。因此，增加蓄热体的蓄能潜力能够带来更大的弹性潜力，例如在墙体中使用相变材料增加蓄热体总热容[54]。此外，浅色的建筑材料有利于太阳辐射的反射，从而减少房间的冷负荷需求[69, 70]。在不影响舒适度的情况下，结合建筑蓄热体的热惰性，建筑能够提供短期的空调负荷减小的可能，从而提供了相应的负荷弹性。

2.5.2 家用电设备散热

用电设备带来的弹性有两部分，一部分为直接对用电负荷的削减，此部分在 0 小节中已进行了分析；另一部分弹性来源于当用电设备负荷发生转移，或者调节设备用电功率时，由于显热传热形成的冷负荷也随之变化，从而形成额外的需求弹性量。设备由于散热减少而贡献的弹性量 F_{apH} 可由下式计算。

$$F_{apH}(t) = \Delta P_{s,t}(t) \cdot C_{LQ} / COP_{AC} \quad (2-16)$$

$$\Delta P_{s,t}(t) = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{s,i} \quad (2-17)$$

式中： $\Delta P_{s,t}$ ——用电设备实际总散热功率变化量，由照明、电动、电热及电子设备组成，各类用电设备散热变化量 ΔQ 计算方法如下， W ；

C_{LQ} ——用电设备显热散热冷负荷系数，例如，可以通过照明亮度的调整降低高峰用电负荷，照明产生的冷负荷分为对流和辐射两种方式，对流换热直接导致冷负荷的形成，而辐射部分则会形成一定的滞后，从而需要考虑相应的冷负荷系数，照明系统散热的冷负荷系数可参考文献[71]中的附录 2-22，其它设备见附录 (2-20)~(2-23)，其它符号意义同上。

2.5.2.1 照明设备

当在用电高峰降低照明亮度时，其散热量也随之减少。根据照明灯具的不同类型，照明形成的散热量减小量分别为：

$$\text{白炽灯} \quad \Delta Q_{s,1} = k_0 P_l \quad (2-18)$$

$$\text{荧光灯} \quad \Delta Q_{s,1} = k_0 n_1 n_2 P_l \quad (2-19)$$

式中： k_0 ——灯具照明亮度降低比率；通过相关文献报道[53]，在需求响应高峰阶段照明可降低负荷比率达到 0.8，全天的平均为 0.2，本文在需求响应阶段计算电力弹性量时取 0.4。

P_l ——灯具功率，W；

n_1 ——镇流器消耗功率系数，当镇流器安装于空调区内时，取

$$n_1 = 1.2, \text{ 安装于空调区外时, 取 } n_1 = 1.0;$$

n_2 ——灯罩隔热系数，当灯罩有穿孔，可利用自然通风散热时，取

$$n_2 = 0.5 \sim 0.6, \text{ 当灯罩无穿孔时, 取 } n_2 = 0.6 \sim 0.8.$$

2.5.2.2 电动设备

在用电高峰关闭电动设备或降低转速时，其散热量减小。当电动设备及其电动机均在室内时，设备散热减小量为：

$$\Delta Q_{s,2} = k_0 P_e n_1 n_2 / \eta \quad (2-20)$$

当设备在室内，而电动机在室外时，设备显热散热减小量为：

$$\Delta Q_{s,2} = k_0 P_e n_1 n_2 \quad (2-21)$$

当设备在室外，而电动机在室内时，设备显热散热减小量为：

$$\Delta Q_{s,2} = k_0 P_e n_1 n_2 (1 - \eta) / \eta \quad (2-22)$$

式中： k_0 ——电动设备负荷降低比率，定义为电动设备降低转速时负荷减小量与常规负荷之比，当设备完全关闭时 $k_0 = 1.0$ ，当设备不能做任何调整时 $k_0 = 0$ ；

P_l ——电动设备安装功率，W；

n_1 ——利用系数，为电动机最大实耗功率与安装功率之比，通常取 0.7~0.9；

n_2 ——电动机负荷系数，定义为电动机时平均实耗功率与设计的最大实耗功率之比，对于不同类型电动设备通常可取 0.15~0.50；

η ——电动机效率，通常从产品说明书查得，一种 Y 系列电动机效率可取为 80%左右。

2.5.2.3 电热设备

对于无保温措施的电热设备，可按下式计算。

$$\Delta Q_{s,3} = k_0 P_e n_1 n_2 n_3 \quad (2-23)$$

式中： n_3 ——考虑排风带走的热量系数，一般取 0.5，其它符号意义同上。

2.5.2.4 电子设备

对于计算机及一般仪表等电子设备，计算公式同 2-22，其中系数 n_2 的值可根据实际情况而定，对于计算机可取 1.0，对于其它一般设备仪表取 0.5~0.9。

2.5.3 热储能设备

热储能设备通常包括蓄能水箱及含相变储能设备，其能够为建筑带来巨大的弹性潜力，但同时也需要额外的设备投资支出。目前国内普遍执行峰谷差电价的定价模式，在用电高峰时，蓄能水箱释放能量，减少空调用电负荷，提高建筑负弹性量；在用电低谷时，进行充能，增加用电负荷，提高建筑正弹性量。热储能设备能够提供的弹性潜能由储能设备建设规模决定，同时考虑建设的经济性。热储能系统工作时存在两种运行模式：一种为空调系统冷机关闭，冷负荷全部由蓄能系统提供来维持舒适温度；另一种为储能系统提供部分冷负荷，余下的由冷机供给，减少冷机的用电负荷。以储能水箱为例，电力弹性量化按下式计算。

冷机关闭，冷负荷全由蓄能系统供给时：

$$F_{tank}(t) = P_{chiller}(t) \quad (2-24)$$

冷机不关闭，冷负荷由冷机和蓄能系统共同提供时：

$$F_{tank}(t) = c_w \dot{q} (T_{tank,in} - T_{tank,out}) / (\Delta t \cdot COP_{AC}) \quad (2-25)$$

式中： c_w ——水的比热， $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

\dot{q} ——蓄能系统的质量流量， kg/s ；

$T_{tank,in}$ ——蓄能水箱回水水温， $^\circ C$ ；

$T_{tank,out}$ ——蓄能水箱出水水温， $^{\circ}\text{C}$ ，其它符号意义同上。

2.5.4 空调系统

空调系统实现电力弹性的策略主要包括调节综合温度 (Global Temperature Adjustment, GTA)、预制冷/制热(Pre-cooling/Pre-heating)及新风量控制(Fresh Air Flow Adjustment)。在用户舒适或自愿接受的热环境范围(Comfort Band)内，通过调整温度、新风等参数为建筑提供可观的电力需求弹性量。空调系统能够成为建筑理想的弹性源主要因其具备以下三点特性[17, 72]: 1) 不管是在夏季用能高峰还是冬季，HVAC 均占据了大部分建筑的用电负荷; 2) 室内舒适性要求有一定区间范围，加上建筑内部蓄热体的热惰性，在不影响热舒适的前提下，HVAC 系统可实现短时关闭或降低冷负荷供应; 3) HVAC 系统能够方便地接入到能源管理系统，容易实现弹性供需平衡管理。

调节综合温度[18, 53]和预制冷/制热[73, 74]作为常见的 HVAC 系统的被动式需求响应策略被广泛研究。对于调节综合温度来说，在制冷季节当重设温度高于预设温度或者制热季节重设温度低于预设温度时，HVAC 负荷能够相应地减少，反之亦然。通过实验测试的方法，一建筑案例在制冷工况下，重设温度高于预设 2°C 时，HVAC 峰值负荷能够降低 25%[19]。预制冷/制热指的是在用电高峰来临前或者需求响应实施前，对空调区进行预冷却/升温。例如，在制冷工况下，需求响应实施前使房间温度降低到预设之下，但仍为用户能够接受的温度，在需求响应开始时，由于内部蓄热体储存了额外冷量，HVAC 系统短时关闭或者降低制冷输出能够在需求响应期间提供更多的负荷削减量。前人的研究发现，对于重型围护结构建筑，从 5:00 AM 开始预冷，发生在 14:00-17:00 的需求响应能够减少 80%左右的空调负荷，且没有引起用户的舒适性抱怨[75]。

空调系统的电力需求弹性主要由建筑本身与热湿环境相关的弹性引起。空调系统的弹性来源主要由建筑热湿舒适性本身存在一定的区间范围，例如在夏季，当房间温度从舒适温度的下限值（例如 24°C ）设置为上限值（ 26°C ）时，空调系统所需用电负荷将减小。通过调节综合温度，从而形成一定的电力需求弹性区间。为了计算 HVAC 系统的负荷弹性，图 2.8 对 HVAC 系统的弹性构成进行了划分，虽然建筑蓄热体和设备热环境相关的弹性可以像上文中所描述进行独立量化，但其实质是通过空调系统进行电力弹性量的传递。此外，HVAC 系统弹性计算量还包括来自外墙/窗传热减少量、新风处理负荷降低量以及室内空气热惰性本身构成的弹性量，HVAC 系统的综合电力需求弹性的计算见 2-26，当同时考虑用电设备内热减少时的弹性量化可用式 2-27 进行计算。

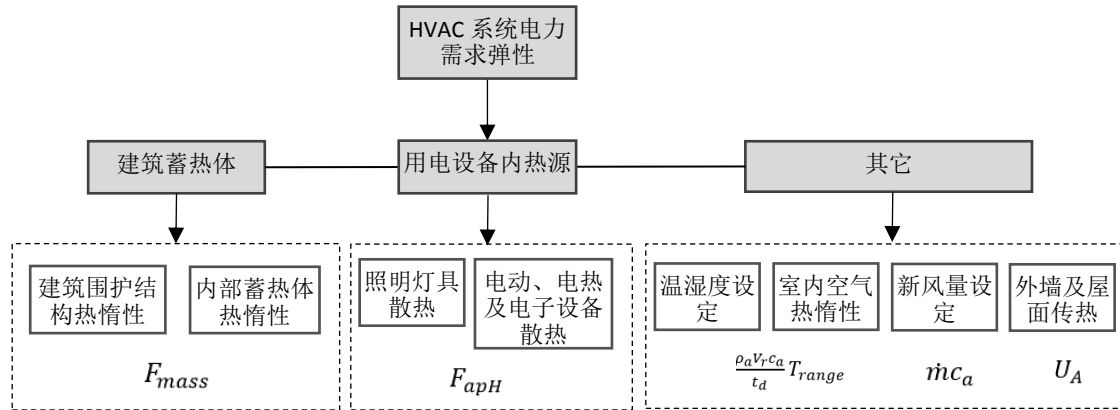


图 2.8 HVAC 系统弹性源的构成示意图

$$F_{HVAC}(t) = F_{mass}(t) + \left[\frac{\rho_a V_r c_a}{t_d} T_{range} + (U_A + \dot{m} c_a) T_{ave} \right] / (\Delta t \cdot COP_{AC}) \quad (2-26)$$

$$F_{HVAC}(t) = F_{HVAC}(t) + F_{apH}(t) \quad (2-27)$$

式中： ρ_a ——空气的密度， kg/m^3 ；

c_a ——空气的比热， $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

V_r ——空调区空气体积， m^3 ；

U_A ——外围护结构从室外空气到室内空气平均传热系数， $W/^\circ C$ ；

\dot{m} ——新风质量流量， kg/s ；

T_{range} ——房间舒适温度调整幅度， $^\circ C$ ；

T_{ave} ——温度调整前后房间温度平均温差， $^\circ C$ ；

F_{mass} ——建筑蓄热体电力弹性， W ；

F_{apH} ——用电设备散热产生的电力弹性， W ， 其它符号意义同上；

在不需要增加额外投资的情况下，HVAC 系统通过温度及风量的调整为建筑提供了弹性潜力，其弹性通常持续时间较短，且需要权衡负荷削减带来的利益及是否会带来牺牲热舒适性的风险。当 HVAC 系统结合储能系统，例如储能水箱时，其能够提供更长的弹性时长及更大的弹性潜力，是未来电网交互式建筑发展的方向。

2.5.5 人行为

建筑用能受两个主要因素的影响：气象环境和末端用户的用能行为[76]。人行为在暖通空调系统、用电设备等方面的建筑用能中扮演着非常重要的角色。可接受的室内热湿环境的不同可能会带来能源系统的电力弹性和节能效应。因此，在需求响应项目中考虑末端用户的行为是非常重要的。用户不同的舒适要求会显

著地影响电力的需求弹性,但这需要用户有自主意愿去接受温度及舒适等级的改变。通常来说,动态电价是一种很容易影响人行为和能量需求的方式。例如,在峰值负荷时,电价最高;在低谷负荷时,通常发生在午夜,电价最低。一种改进的日分时电价(D-TOU)是非常有益的,一周中的D-TOU可以分为四种类型:开始工作日(周一),常规工作日(周二到周五),可能工作日(周六)和周末(周日)[77]。用户会改变他们的用能行为以响应电价信号,尤其是居民用户[78-80]。除了提高电力弹性外,在考虑电价和人行为的能源管理系统中,通过控制家用电器,单个家庭能够实现高达30%费用节省[81]。

不同个体的行为具有不同的能源或成本节约潜力。将用户的行为类型分为节俭型、正常型和浪费型三种,以描述用户的用能意识;通常来说,虽然节俭型和正常型行为的用户实现绝对的节能量较少,但节能的百分比可高于浪费型用户[82]。通过控制用户的用能行为,不仅可以实现能源和成本的节约,还能同时实现能源的需求灵活性。在比利时,通过改变用户在周末夜间使用家用电器的用能行为可以增加总计2GW的用电负荷,这2GW的增加可以持续30分钟。并且在周末的晚上十点可以降低300MW的用电负荷,这300MW的降低可以持续15分钟以上[37]。此外,用户的行为会受到气候区和建筑类型的影响。在不同的气候带和建筑类型下,用户对电价信号的响应有显著的差别[40,41]。对于不同建筑类型来说,高能耗的家庭对电价信号响应最大,低能耗的家庭和公寓对电价信号的响应相对来说少一些。同样的,需求响应效果在独栋家庭住宅的效果要远远好于出租房或合租公寓[40]。对于不同气候区类型来说,气候炎热地区需求响应的绝对值最大,气候温和地区的响应的相对值是最大的[83]。考虑人行为对温度舒适性的弹性量化模型可参见式2-28。

$$F_{beh} = \Delta T_{extra} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\xi_i C_i}{t_a} + \frac{\rho_a V_r c_a}{t_a} + U_A + \dot{m} c_a \right) / (\Delta t \cdot COP_{AC}) \quad (2-28)$$

式中: ΔT_{extra} ——用户可接受的温度调整最大区间,例如建筑的舒适性温区为24-26°C,若用户愿意设置温区温度为27°C时,则 $\Delta T_{extra} = 1^\circ\text{C}$ 。其它符号意义同上。

在能够得到建筑历史用电负荷的情形下,另一种从建筑负荷基线角度进行人行为弹性量化的模型可按下式计算。

$$F_{beh} = P_{real}(t) - P_{base}(t) \quad (2-29)$$

式中: $P_{real}(t)$ ——当用户的用能习惯被外在激励因素改变时的实际用电负荷量;
 $P_{base}(t)$ ——建筑用电负荷基线,即建筑在常规情况下用电负荷,可根据历史数据进行预测得到,一种基于支持向量机(SVR)在需求响应短时负荷预测中的方法可参见文献[84];

用户的行为取决于许多的外部因素，比如能源价格、气候、日期类型和建筑类型等。并且，用户的行为也因不同年龄、性别和收入而存在个体差异。对于不同的建筑用户可接受的温度调整难以准确获取，因此，人行为弹性贡献是非常难以准确量化的。人行为是未来建筑电力弹性改善和评价的一个挑战。但随着大数据技术和智能设备在建筑用能系统中的应用[85, 86]，将来，人行为对电力需求弹性的贡献可以被详细地、精确地量化表达。

2.6 全建筑弹性量化模型

上两节中针对建筑各单一弹性源进行了独立的建模量化，然而，实际建筑中存在各弹性源之间的弹性传递及耦合关系，不同的建筑及系统类型其电力弹性如何计算存在差异，下文中列举了几种常见建筑类型其总电力弹性的量化方法。本文中对用电高峰时段内负荷削减的负弹性量的计算进行举例说明，可推广于用电低谷建筑负荷增加的正弹性量的计算，仅在弹性符号方向上需要进行区分。

2.6.1 常规建筑电力弹性

常规建筑的弹性来源主要包括建筑蓄热体、空调系统、用电设备及人行为四个方面。负荷可转移的用电设备时间窗口、工作时间及弹性需求时段的关系如下图所示。弹性需求时段 t_d 即需求响应时段，一般为电网用电的高峰时段，也可以为低谷时段。考虑到建筑用电设备负荷转移时，由于负荷转移受到设备工作时间及时间窗口的限制，在弹性需求时间 t_d 内的建筑总的电力弹性计算方法见图 2.10。

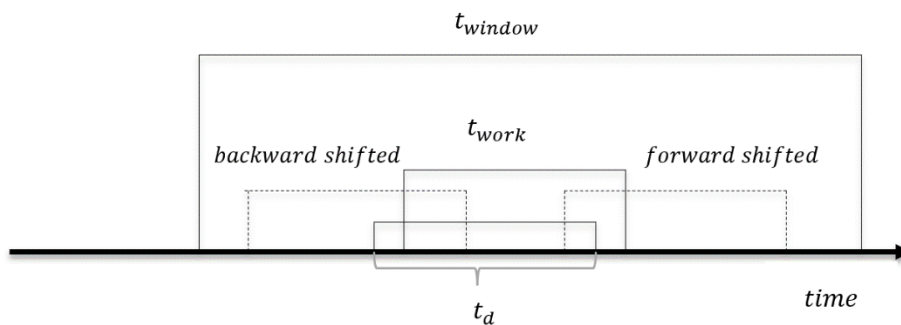
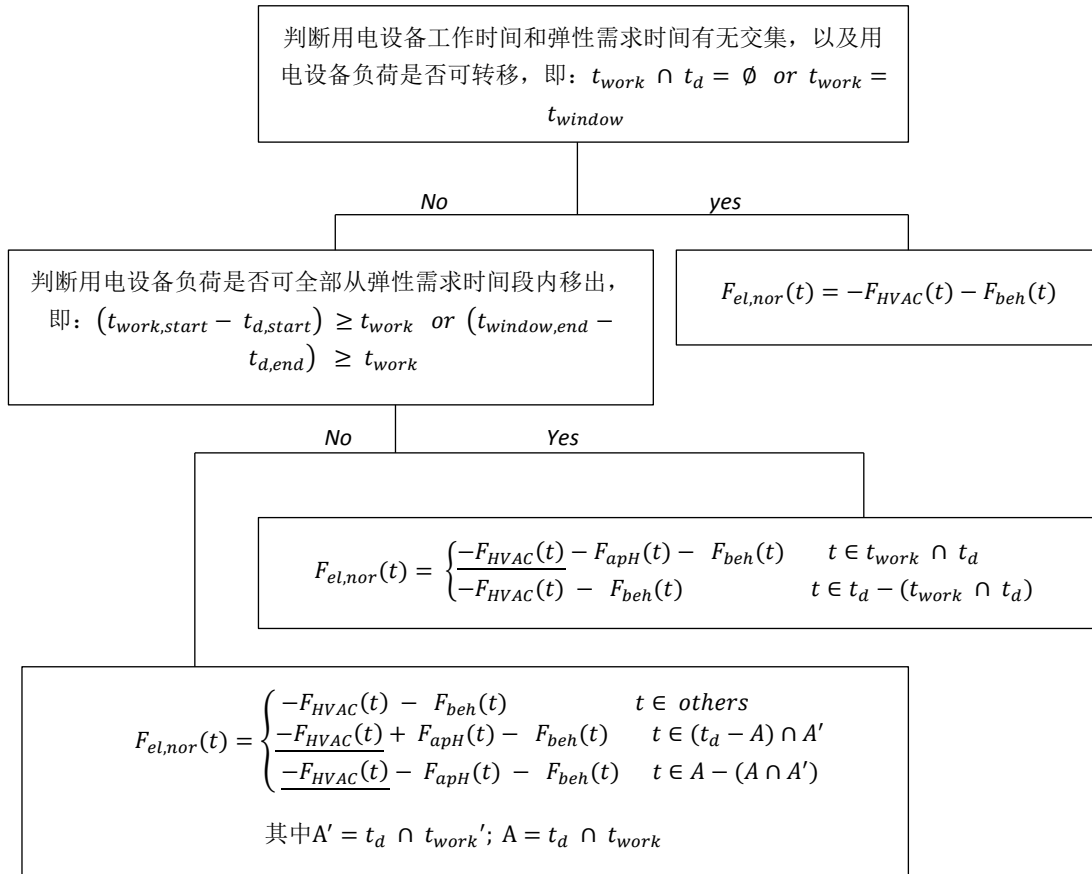


图 2.9 建筑用电设备弹性量化时间关系示意图



备注说明: 上式中 t_{start} 为各时间段的开始时间点, t_{end} 为截止时间点。 $-F_{HVAC}(t)$ 为考虑了用电设备负荷转移带来的设备散热弹性量, 参见式 2-27。

图 2.10 常规建筑系统电力弹性量化流程

在常规建筑系统中, 用电设备弹性的量化较为复杂, 在时间窗口内, 用电设备工作时间可以任意移动。对于提高建筑弹性量来说, 需要尽最大可能提升建筑弹性, 所以用电负荷最大限度地从弹性需求时间段内移出是主要目标。在计算建筑弹性时, 当用电设备工作时间不在弹性需求时间段内, 或者设备工作时间等于时间窗口时, 用电设备不具备电力弹性, 此时弹性量来源于空调系统及人行为。

2.6.2 常规建筑+储能系统电力弹性

在建筑中加入了储能系统能够极大地提升建筑需求弹性, 储能系统可以是水箱形式的热储能系统, 也可以是以电能储存的储能电池模块, 或者两者都有。通常热储能水箱与建筑供冷热系统相连, 其能够提供的弹性上限值为供冷热系统的用电负荷, 而电池模块直接提供电能, 其弹性的上限值可为整个建筑的常规用电负荷。以下为常规建筑在不同储能系统情形下的弹性量化方法。

对于热储能水箱，弹性计算方法如下。

$$F_{el}(t) = \begin{cases} F_{el,nor}(t) - F_{tank}(t) & \text{others} \\ -P_{chiller} & \text{when } F_{el,nor}(t) - F_{tank}(t) \geq P_{chiller} \end{cases} \quad (2-30)$$

对于电池类储能系统，弹性计算方法如下。

$$F_{el}(t) = \begin{cases} F_{el,nor}(t) - F_{ba}(t) & \text{others} \\ -P_{el,building} & \text{when } F_{el,nor}(t) - F_{ba}(t) \geq P_{el,building} \end{cases} \quad (2-31)$$

对于同时具有热储能水箱和电池储能的系统，弹性计算方法如下。

$$F_{el}(t) = \begin{cases} F_{el,nor}(t) - F_{ba}(t) - F_{tank}(t) & \text{others} \\ -P_{el,building} & \text{when } F_{el,nor}(t) - F_{ba}(t) - F_{tank}(t) \geq P_{el,building} \end{cases} \quad (2-32)$$

为了更好地实现弹性源的充分利用，弹性源的利用具有优先使用级别。一种推荐的弹性利用方式为，先利用建筑空调系统本身的弹性源，若不能达到弹性要求时，再判断是否有用电设备负荷转移，再通过储能系统的充能与释能调节，达到弹性源的合理利用。在一些环境要求较高的场所，例如高级酒店，会所等，其弹性利用顺序可能存在差异。

2.7 本章小结

本章首先对建筑电力弹性源进行了分类，把建筑弹性源分成了热环境相关及无关的两大类，然后对各类型弹性源进行分别建模量化。与热无关的电力弹性来源包括家用电设备及分布式能源系统，与热相关的弹性量包括建筑内部蓄热体、用电设备散热、热储能设备、人行为以及空调系统。与热环境相关的弹性源通过空调系统的热弹性间接形成电力需求弹性，而与热无关的弹性源在直接计入电力弹性的同时，还考虑了该类设备散热量变化形成的弹性量。

在非热环境类电力弹性资源分析中，对于家用电设备电力弹性的量化，本文提出“时间窗口”及“工作窗口”的概念。对于一些非全天候工作的用电设备，负荷可以在时间窗口范围内进行合理配置，从而实现电力弹性。并在本文中给出一些常见用电设备的时间窗口的时长供参考。对于分布式能源系统，本文分析了分布式储能电池站电力弹性量化方法，而对分布式可再生能源及 CCHP 系统指出了其不具备电力弹性的理由。

在热环境类电力弹性资源分析中，提出了从热弹性的到电力弹性的转化公式，在计算各类热负荷形成空调冷负荷时考虑相应的冷负荷系数。对于内部蓄热体-不规则家具难于计算的问题，本文应用了“等效面积法”，从而能够准确地对建筑内部蓄热体进行量化。

本章通过不同弹性源的量化，解决了以往空调系统弹性来源不明的难题。以往的研究仅给出在需求响应中空调系统中总的负荷削减，并不能定量地分析空调负荷削减的具体来源及比重。因此限制了用户对建筑电力弹性的优化管理以及改进。本章通过对各类弹性源进行详细的量化建模，实现了各弹性源的弹性量化，从而能够清楚各弹性源对于建筑热环境类电力弹性的贡献。在电网对建筑电力弹性不同的需求情境下，给出更加合理的弹性使用优先顺序，从而能够指导建筑需求响应在不牺牲建筑舒适度或最小牺牲风险的情况下，顺利完成需求响应。

最后，本章还给出了两种常见建筑系统类型的全建筑电力弹性量化的过程，通过各子弹性模型的有效聚合，建立了全建筑的弹性量化公式。本章所建立的弹性量化模型将在下一章进行实验验证。

第3章 办公建筑电力需求弹性实验验证

3.1 概述

上一章中通过对建筑各弹性源进行特性分类，建立了建筑的电力需求弹性子模型。本章将通过实验对办公建筑的弹性量化模型进行校验。实验验证主要包括以下三个部分：1) 办公建筑内部蓄热体弹性模型的验证；2) 空调系统（含储能水箱）弹性模型的验证分析；3) 不同人行为情景下，人行为模型的校验。

本文第二章建立了建筑弹性的理论计算模型，模型解决了以往需要通过建筑历史运维数据或详细建筑物理模型才能计算建筑弹性能力的问题，而提出的弹性模型在建筑的设计阶段或了解基本建筑信息情况下就可计算出建筑的弹性量。本章将对建筑热环境类电力需求弹性模型进行实验验证，热环境类弹性主要为与空调系统相关的弹性源，详见 2.5 节。在本课题组“建筑全能效测试平台”的基础上，可搭建满足本课题理论模型的验证平台。

本章实验验证路线如下：

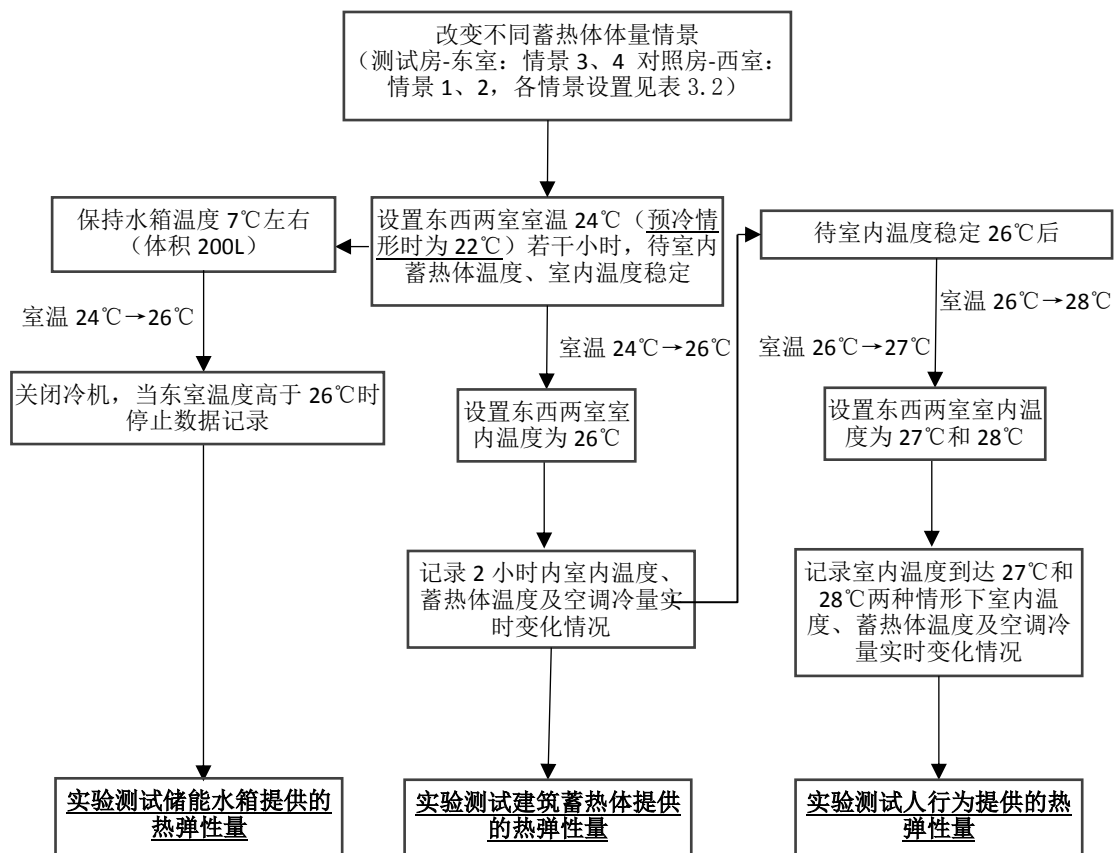


图 3.1 弹性实验验证路线图

3.2 办公建筑弹性验证实验台搭建

3.2.1 建筑全能效测试平台介绍

实验台的搭建是基于所在课题组的“建筑全能效测试平台”，实验测试平台由完全相同的东、西两个房间和一个可控的环境舱组成，各房间面积均为 16m^2 ，南向窗墙比为 0.48。该测试平台可人工制造不同的建筑外界环境，同时也包括遮阳的控制，实验平台平面图见图 3.2 及外观见图 3.3。两个实验房间围护结构的材料也一致，几何参数和物性参数可见表 3.1。为了实现建筑室外环境和室内环境控制的分离，整个测试平台安装了两套独立的空调系统，分别用于控制房间及环境舱的温度。

表 3.1 测试房间的几何参数和物性参数[24]

部件	类型	几何参数		物性参数			
		面积 m^2	厚度 m	材料	密度 kg/m^3	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	比热 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
东墙	外围护结构	14.94	0.17	彩钢板+ 防火岩棉	150	0.045	1.22
西墙	内围护结构	14.94	0.17	彩钢板+ 防火岩棉	150	0.045	1.22
南墙	外围护结构	7.07	0.17	彩钢板+ 防火岩棉	150	0.045	1.22
北墙	外围护结构	8.58	0.17	彩钢板+ 防火岩棉	150	0.045	1.22
南窗	外窗	3.40	-	双层白玻	2500	0.043	0.84
北门	外门	1.89	-	双层白玻	2500	0.043	0.92
天花板	吊顶	14.89	-	石膏板	1050	0.33	2.01
地面	架空地板	14.89	0.04	硅酸板	7850	58.2	0.48
家具	室内陈设物	-	0.02~ 0.03	胶合板/ 纸张	600	0.17	2.51

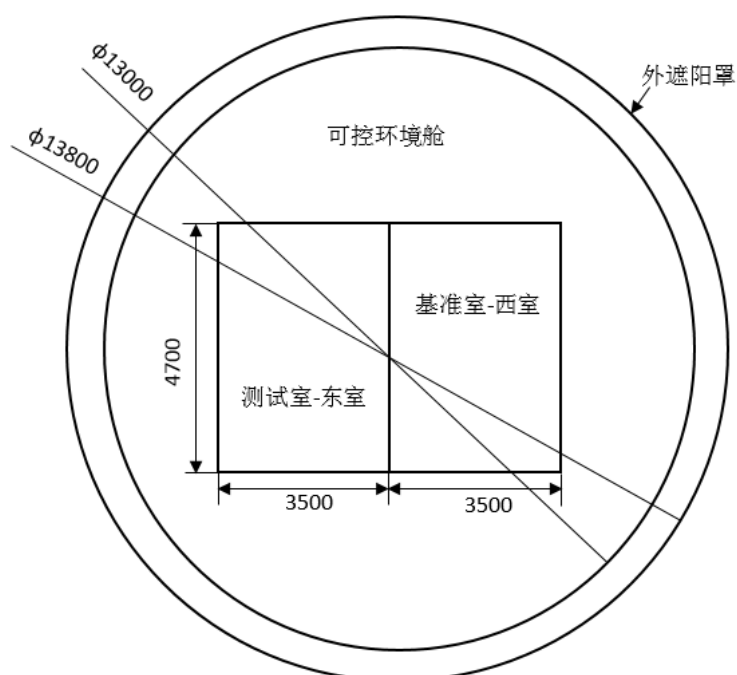


图 3.2 建筑全能效建筑测试平台平面图示意图



图 3.3 外遮阳壳打开后效果图

3.2.2 实验方案设计

本实验的验证包括三个方面：1) 建筑内部蓄热体电力弹性模型的验证；2) 空调系统（含储能水箱）电力弹性模型的验证；3) 人行为电力弹性模型的验证。在实验中，实验台需要根据以上三个主要目的进行设计，路线可参考图 3.1。

3.2.2.1 内部蓄热体弹性验证实验方案

对于不同的建筑类型，建筑内部蓄热体体量及布置方式存在较大差异，这些差异如何影响建筑热弹性有待研究。建筑内部蓄热体主要为内墙、地板、楼板、家具等设备。本实验通过改变家具体量，对不同情形下进行实验，包括的情形如下表所示，东西两室的面积均为 16 m²。情景 4 和情景 1 房间布置见图 3.4 和图 3.5。

表 3.2 建筑不同蓄热体情景设置

情景编号	情景描述、家具体量	备注
情景 1	无	模拟空房间
情景 2	办公桌椅 1 套，重量 60kg；文件及文件柜 75kg；其它配套办公设备 50kg	模拟利用率较低的办公建筑
情景 3	办公桌椅 2 套，重量 120kg；文件及文件柜 150kg；其它配套办公设备 100kg	模拟正常利用率的办公建筑
情景 4	办公桌椅 4 套，重量 240kg；文件及文件柜 300kg；其它配套办公设备 200kg	模拟利用率较高的办公建筑

东西两室可同时进行实验，用于不同蓄热体情形的对比实验。当两房间温度稳定后（24℃），通过重设房间温度（26℃），测试东西房间温度、蓄热体温度以及空调冷量变化情况。通过设置西室为情景 1，东室为情景 4，可实验测得家具对热弹性的贡献净值，同时，东室情景 3，西室情景 2 下可对不同蓄热体情形下的冷量释放量及释放系数进行分析，并在不同情景下分别验证第二章提出的电力弹性理论计算模型。

除此之外，预冷技术是一项常用的需求响应控制技术，本方案中考虑 2℃ 预冷深度，即需求响应来临前预设室内温度为 22℃，采用的是额外预冷策略（可参见 5.3.2 小节），即从凌晨 1:00 开始房间温度设置为 22℃，直到需求响应来临时设置为 26℃ 来研究空调系统的热弹性特征。



图 3.4 情景 4 房间布置-模拟高利用率办公室



图 3.5 情景 1-模拟空房间

3.2.2.2 空调系统及含储能水箱弹性验证实验方案

空调系统热弹性即热环境类弹性的汇总，由多个方面共同构成。在进行空调系统弹性验证前，需要选定场景，其中室内蓄热体采用情景 4，即模拟高利用率下办公建筑情形，见上表 3.2。空调系统弹性验证通过重置东室室内温度从 24℃ 到 26℃，西室则保持 24℃ 不变，记录之后两小时东西两室冷量的差值，则为空调系统的实验所得冷量需求弹性量，并与理论计算式 2-26 进行对比分析。

除建筑本身的蓄热体外，实验空调系统中还安装了储能水箱，水箱容量为 200L。当水箱储存较低温度的冷冻水时，关闭冷机，房间冷量由水箱提供，在东室房间温度达到 26℃ 时停止数据记录。

3.2.2.3 人行为弹性验证实验方案

人行为的验证方案与上一小节空调系统的验证类似，主要是通过设置不同可接受的室内温度来降低空调负荷的用电负荷。根据 ASHRAE 标准，办公建筑室内温度设置范围为 22.2-26.7℃，最高不应超过 28℃。本实验中人行为考虑两种室内温度可接受范围，一种为可接受室内温度设置为 27℃，另一种允许设置为 28℃。具体实施方法是在室温达到稳定的 26℃ 时，继续提高房间设置温度为 27℃ 和 28℃ 两种情形，实验测得空调冷量的减小量。

3.2.3 数据采集系统

3.2.3.1 数据采集方法

本实验温度测量采用热电偶温度计，热电偶总共 16 根。实验中测量的为室内外空气和墙体等的表面温度，通常，温度范围在 10~40℃ 之间，因此采用 T 型热电偶，其测温范围为 -200~350℃。热电偶采用热电偶点焊机在实验室自行制作，热电偶金属丝直径为 0.3mm，制作时点焊机电压约为 35V。热电偶温度采集采用研华 ADAM-4118 模块，该模块的作用是通过数模转换将热电偶产生的电势差信号经 RS-485 串口传输到上位机，上位机通过相应自编的数据采集软件（见图 3.7）对数据进行实时显示及保存，采集过程如下图所示。

空调冷量的测量采用 Shark-773 型冷量计，具有测试精度高，使用寿命长等特点。通过安装在冷冻水进口管道上，东西两室管道上各安装一个，进出口温度的测量采用 PT-500 铂电阻测温计，精确到 0.1℃，流量采用超声波流量计，测量数据可通过 M-bus 协议输出，如下图所示。

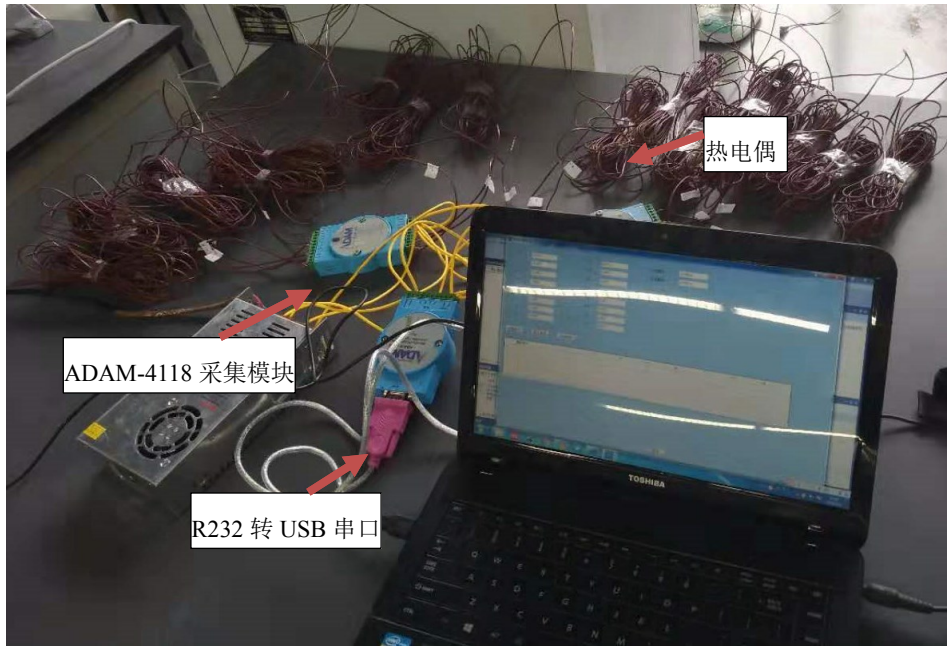


图 3.6 热电偶温度采集过程图



图 3.7 温度及流量实时采集软件



图 3.8 空调负荷计量-冷量计

3.2.3.2 热电偶的标定

由于热电偶材料的不均匀性、制作工艺及不同采集模块的差异，需要对热电偶连同采集模块一起进行标定后方可用于实验测量，标定现场见图 3.9。根据测温范围，所有热电偶利用标准恒温箱在 10~40°C 范围内进行标定，并拟合出相应的标定曲线，在测得实际温度值后在采集软件中进行修正得到准确的温度值，标定结果如下表 3.3 所示。

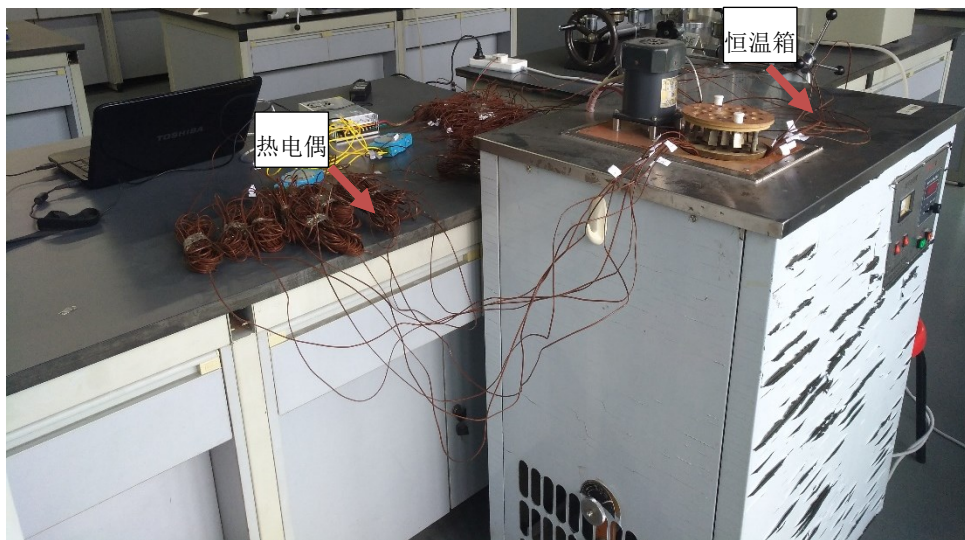


图 3.9 温度计标定实验（标定点包括 10°C、15°C、20°C、25°C、30°C、35°C、40°C）

表 3.3 热电偶标定拟合公式

测温点编号	线性拟合公式	R ²
T-1	$T_{\text{标}}=0.9901*T_{\text{测}} - 0.3064$	1
T-2	$T_{\text{标}}=0.9924*T_{\text{测}} - 0.0661$	1
T-3	$T_{\text{标}}=0.995*T_{\text{测}} + 0.0162$	1
T-4	$T_{\text{标}}=0.9916*T_{\text{测}} + 0.1325$	1
T-5	$T_{\text{标}}=0.9924*T_{\text{测}} - 0.0402$	1
T-6	$T_{\text{标}}=0.9918*T_{\text{测}} + 0.1490$	1
T-7	$T_{\text{标}}=0.995*T_{\text{测}} + 0.1528$	1
T-8	$T_{\text{标}}=0.993*T_{\text{测}} + 0.0516$	1
T-9	$T_{\text{标}}=0.9871*T_{\text{测}} + 0.7381$	0.9999
T-10	$T_{\text{标}}=0.9869*T_{\text{测}} + 1.0569$	1
T-11	$T_{\text{标}}=0.9894*T_{\text{测}} + 1.0752$	1
T-12	$T_{\text{标}}=0.9899*T_{\text{测}} + 1.1091$	1
T-13	$T_{\text{标}}=0.9901*T_{\text{测}} + 0.9384$	1
T-14	$T_{\text{标}}=0.9877*T_{\text{测}} + 0.8637$	1
T-15	$T_{\text{标}}=0.99*T_{\text{测}} + 0.9276$	1
T-16	$T_{\text{标}}=0.985*T_{\text{测}} + 0.8905$	1

备注： $T_{\text{标}}$ —标定后温度，℃； $T_{\text{测}}$ —热电偶测得温度，℃。

3.2.3.3 数据采集点布置

实验中所需采集的数据为温度及空调冷负荷。实验总共有 22 个测点，各测点布置安装见下图 3.10，其中温度测点 20 个，流量测点 2 个。需 2 个 ADAM-4118 温度采集器（每个 8 个信号通道，共 16 个热电偶温度计采集），Shark-773 冷热量表 2 个，各测点及布置信息见下表 3.4。

表 3.4 实验中各测点布置信息

测点编号	测试参数	布置位置	测点编号	测试参数	布置位置
T-1	室外空气温度	四面对称布置，距离地面及墙面各 1.5m	T-7	东室桌柜表面温度	桌面最大面中部
T-2	东室东墙内墙温度	墙面中部	T-8	东室文件表面温度	文件最大面中部
T-3	东室西墙内墙温度	同上	T-14	西室桌柜表面温度	桌面最大面中部
T-4	东室南墙内墙温度	同上	T-15	西室文件表面温度	文件最大面中部
T-5	东室北墙内墙温度	同上	T-16	备用	-
T-6	东室室内温度	房间中部	T-17	东室冷冻水进水温度	进口管道

测点编号	测试参数	布置位置	测点编号	测试参数	布置位置
T-9	西室东墙内墙温度	墙面中部	T-18	东室冷冻水回水温度	出口管道
T-10	西室西墙内墙温度	同上	Q-1	东室冷冻水流量	进口管道
T-11	西室南墙内墙温度	同上	T-19	西室冷冻水进水温度	进口管道
T-12	西室北墙内墙温度	同上	T-20	西室冷冻水回水温度	出口管道
T-13	西室室内温度	房间中部	Q-2	西室冷冻水流量	进口管道



图 3.10 各温度测点布置

3.2.3.4 空调系统控制

东西两室各装有电磁阀，通过 PID 控制器控制阀门开启程度来控制室内温度。风机盘管的风量则需手动调节，分为高、中、低三挡。冷机开启则通过回水温度设置进行调节，调节阈值为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。通过该种控制方式，房间温度的控制精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 实验结果分析

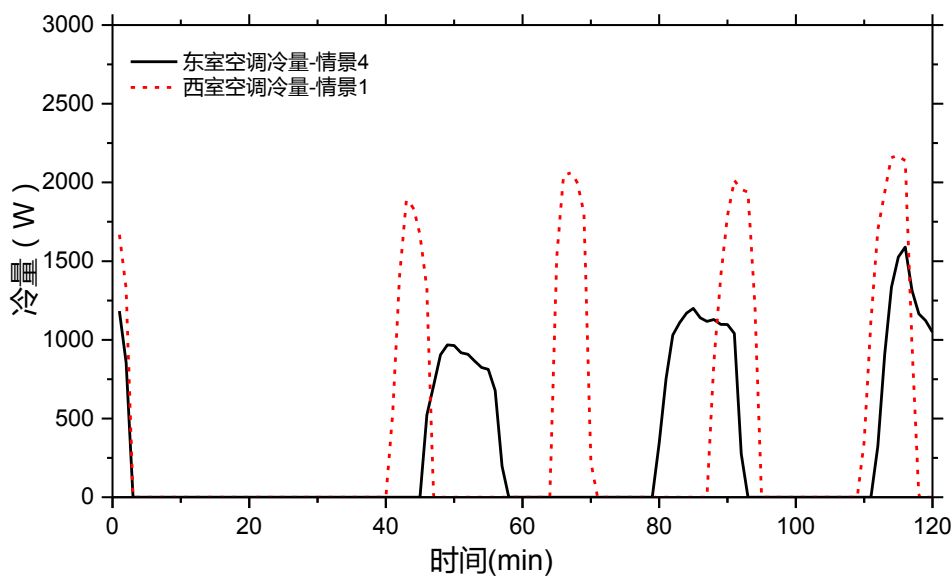
3.3.1 内部蓄热体结果分析

3.3.1.1 不同蓄热体情景下结果分析

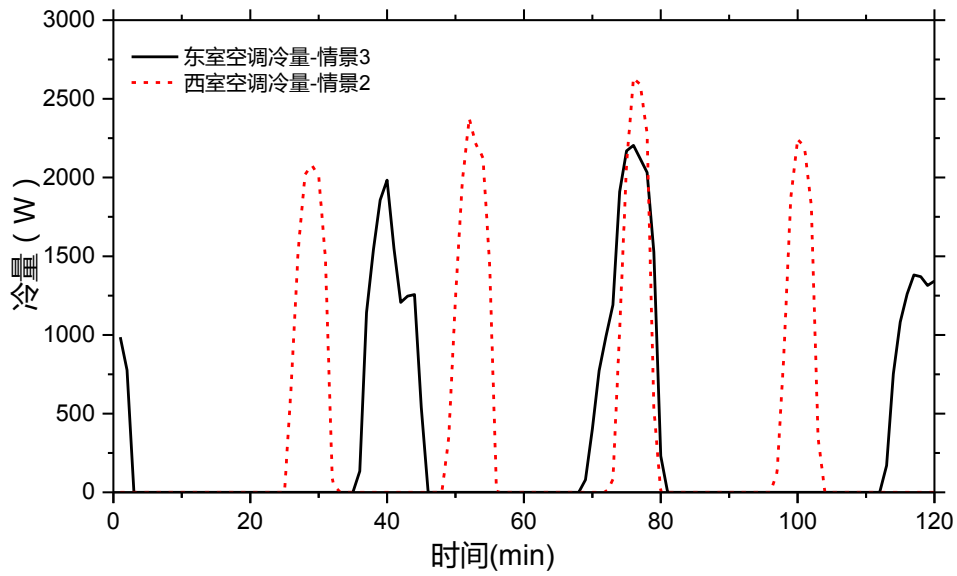
不同蓄热体情景体现的是建筑不同蓄热体体量下，对建筑形成的热需求弹性的影响。房间温度从稳定的 24°C 设置为 26°C ，记录东西两室温度及冷量在之后

两小时内的变化情况。当房间温度设置为 26°C 时，因电磁阀响应需要时间，东西两室在2分钟后电磁阀关闭，水流量为零，实际供冷量为零。需要说明的是，不同房间蓄热体情景下实验外部环境略有不同，其中情景4与情景1相同，情景3与情景2相同，故对两种实验环境下进行分别分析。图3.11(a)为情景4和情景1室内外平均温差为 6.1°C 的情形下，通过提高 2°C 的房间设置温度，东西两室不需供冷时长分别为42和38分钟，有蓄热体的东室可关闭冷机的时长更长。从空调提供的冷量可知，东西两室峰值冷负荷分别为1589W和2164W，均值冷负荷分别为285W和375W。图3.11(b)为情景3和情景2室内外平均温差为 5.9°C 的情形下，通过提高 2°C 的房间设置温度，东西两室不需供冷时长分别为33和25分钟。东西两室峰值冷负荷分别为2204W和2629W，均值冷负荷分别为321W和352W。

从以上空调冷量的分析可得，蓄热体量较大的东室（情景4和3）由于蓄热体冷量释放的原因，维持同样的房间温度需要的冷负荷更少。图3.12的温度变化曲线来看，东室桌柜及文件随着冷量慢慢释放，其表面温度从 24.3°C 升高到 25.8°C ，并释放了一定的冷量。

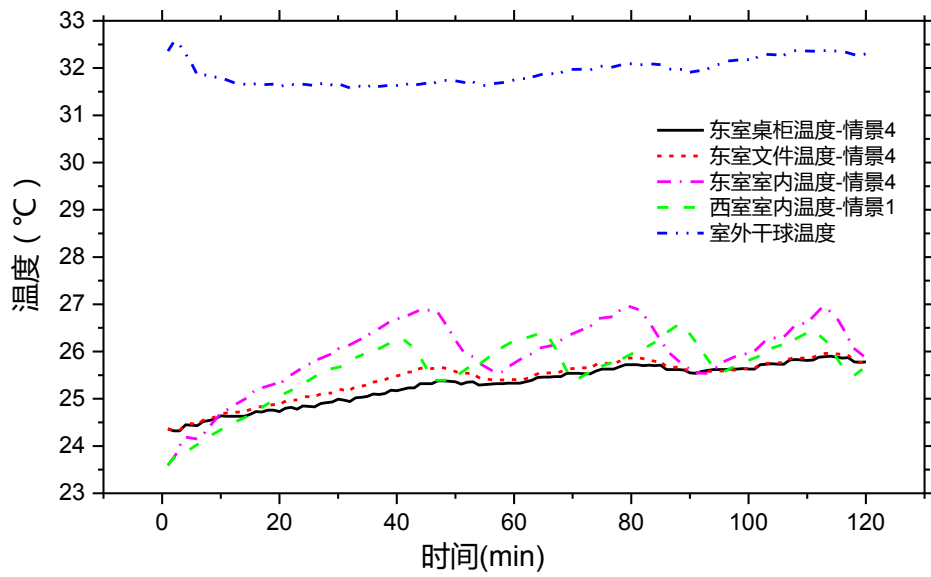


(a) 情景4及情景1结果

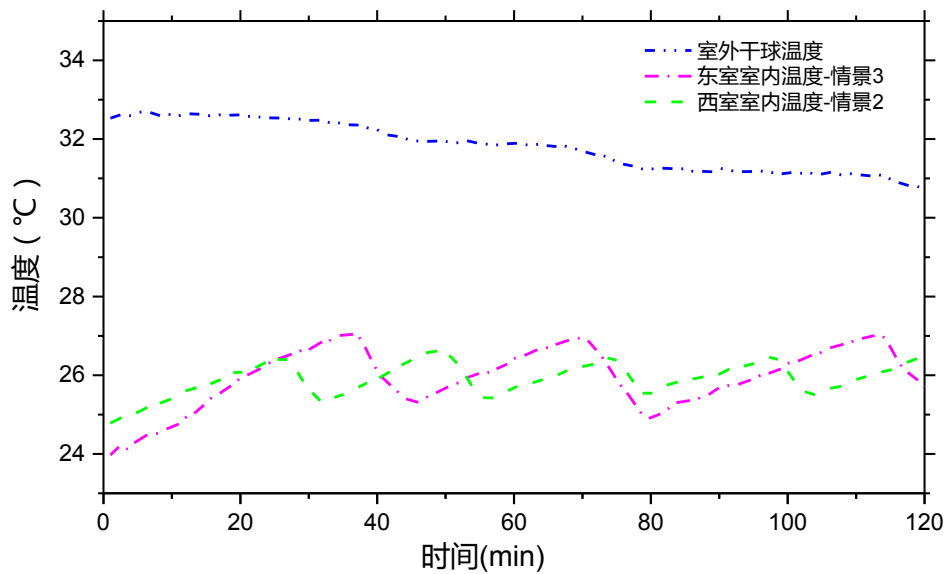


(b) 情景3及情景2结果

图 3.11 不同情景下房间温度从 24℃ 设置为 26℃ 时东西两室空调冷量变化曲线



(a) 情景4及情景1结果



(b) 情景3及情景2结果

图 3.12 房间温度从 24°C 设置为 26°C 时温度变化曲线

3.3.1.2 蓄热体热释放系数分析

根据传热学的理论，当物体的毕渥数 Bi ($Bi = \delta h / \lambda$) 较小时 ($Bi \leq 0.1$) 才可近似认为物体内部温度均匀，传热过程可采用集总参数法进行分析，此时物体中心温度与表面温度的差别小于 0.5%。根据表 3.1 蓄热体物性参数，并取平板和室内空气对流换热系数经验值 $8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [87]，可求得本实验中家具蓄热体的毕渥数约为 1.0~1.5。

本文中测量的为蓄热体表面温度，采用该温度计算蓄热体热释放率将带来一定的误差，需进行相应的温度修正。利用 Modelica 建模语言建立蓄热体温度为 24°C、房间温度为 26°C 时的传热过程模型，研究蓄热体内部温度分布情况。模型中蓄热体厚度为 0.04m，厚度方向分成十等份 ($dx = 0.002\text{m}$)，导热系数 $0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，表面与空气接触对流换热系数取 $8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，图 3.13 为 2 小时蓄热体内部温度分布曲线，相关 Modelica 传热模型源代码见附录 C。在开始阶段，蓄热体表面温升较快，大于平均温升，表面温度与蓄热体平均温度的最大温差约为 0.4°C ，但随后蓄热体内部温度温差逐渐减小，两小时后温差降低为 0.1°C 。因此，在利用蓄热体表面温度计算冷量释放率时，可根据表面温度与平均温度的关系进行相应的修正。

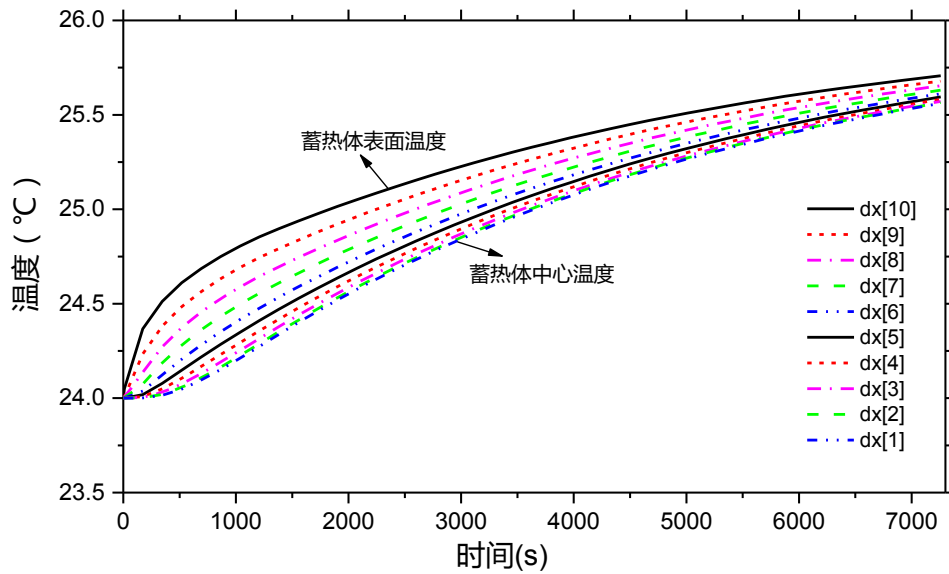


图 3.13 蓄热体内部温度分布

$$(n = 10, \delta = 0.04m, \lambda = 0.17W/(m \cdot K), h = 8.7W/(m^2 \cdot K))$$

图 3.14 给出了各蓄热体两小时时段内修正后冷量释放率。从曲线的斜率可以看出蓄热体冷量释放速率随着冷量的释放在逐渐减小，其中桌柜、文件及地板两小时后冷量释放率分别为 74%、76%和 60%，这意味着对于常规需求响应 (2h)，厚度较薄的家具能够释放大部分内部冷量。家具的冷量释放率与 4.4.1 小节的结果有较好的一致性，可进一步说明式 2-14 提出的热释放系数计算方法能够较好地体现实际冷量的释放过程。值得注意的是地板的结果相差较大，分析其主要原因是本次实验为架空的硅酸板地板，厚度为 40mm，而 4.4.1 小节的建筑案例地板为石膏板，其厚度为 200mm。因此，在蓄热体弹性量化模型公式 2-12 中，蓄热体的当量尺寸的选择尤为重要。

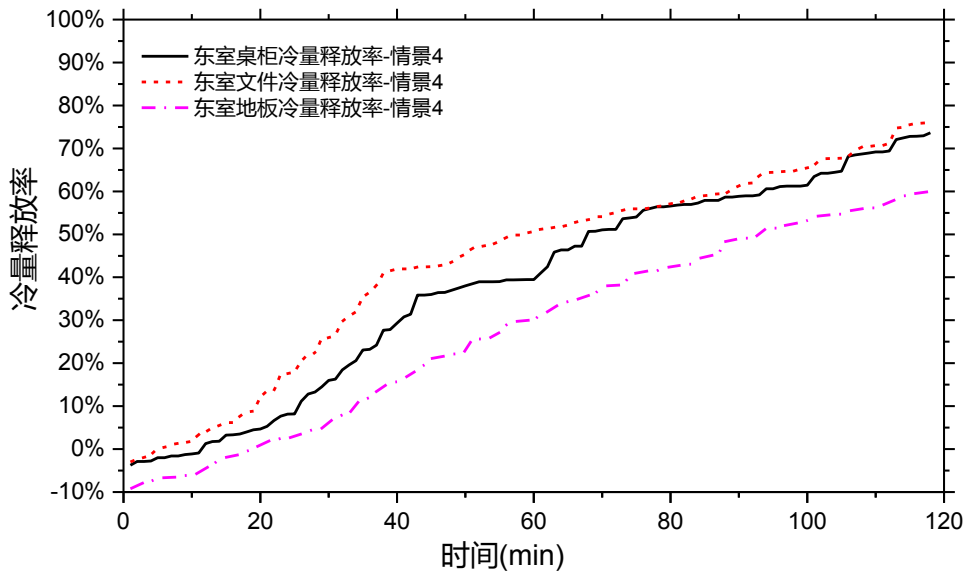


图 3.14 不同蓄热体类型冷量释放率

3.3.1.3 电力需求弹性的验证

在蓄热体的体量为情景 4 和情景 1 下，通过计算东西两室的空调冷量的差异，可得出家具的热弹性量结果，并与理论量化公式 2-12 的计算结果进行对比分析。本文中取冷机的 COP 为 3.5 计算电力弹性。图 3.15 为东室在情景 4 布置下的电力弹性对比结果，两者的平均绝对误差 MAE 为 25.3%，说明理论模型具有一定的可靠性。从图中可以看出，在开始阶段，理论模型计算与实验结果偏差较大，分析认为第二章的理论计算模型忽略了房间温升所需要的时间，即计算时假设房间温度即刻为所设定的温度值。而实际上，房间温度升高到重设温度需要一定的时间。此外，从上一小节蓄热体不同层的温度分析可知，蓄热体表面温度在初始阶段与蓄热体平均温度相差较大。以上两个原因将导致蓄热体温度与室内空气温度的温差小于温度调整幅度 T_{range} 。

为使量化模型更好的反映实际情况，可对初始阶段进行相应的修正，即对蓄热体的热释放率 α_i 进行修正，修正后热释放率 α_i' 由下式计算。图 3.16 为修正后的弹性结果，两者的平均绝对误差 MAE 降为 6.8%，修正后的理论量化模型的量化误差大大降低，在实际弹性量化中应采取相应的修正措施。在下一章的模拟量化过程中也出现了类似的问题，在初始阶段模拟结果明显低于理论计算结果如图 4.8 所示。

$$\xi_i' = \phi(t)\xi_i \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (3-1)$$

式中： t_0 ——房间温度达到设定温度值所用时间，与建筑及室内外温差有关，本实验条件下（室内外平均温差约为 6°C ）约为 30 分钟，min；

$\phi(t)$ ——随时间的修正系数，与不同建筑类型有关，对于高效利用的办公建筑，有近似拟合公式 $\phi(t) = 0.0312t + 0.0642$

从弹性结果图中可知，蓄热体电力弹性的实验测试结果具有一定的波动性，分析认为其受到房间温度的波动影响，从图 3.12 的温度变化曲线可以看出，房间温度在达到设定值 26℃后，受空调系统控制的局限性，温度在 26℃±0.5℃内波动。若房间温度能够精准控制，实验结果将更趋近于理论计算结果。

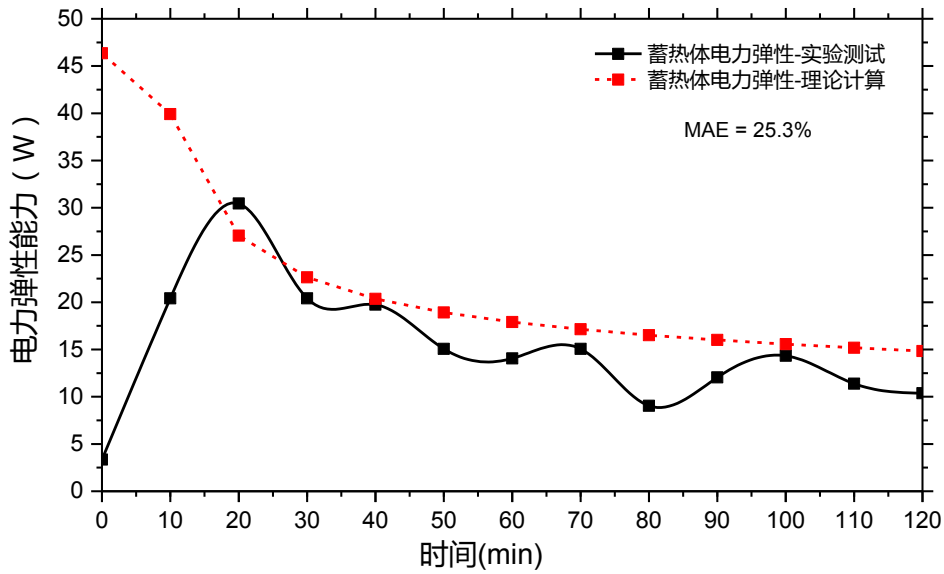


图 3.15 实验测试及理论计算蓄热体电力弹性量对比图

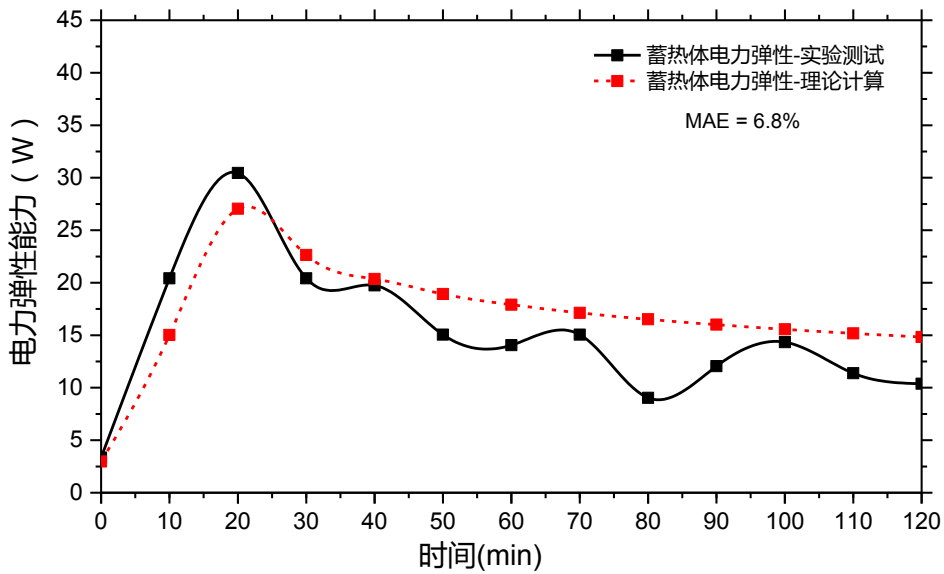


图 3.16 实验测试及理论计算电力弹性量对比图（修正后）

3.3.2 空调系统及含储能水箱结果分析

3.3.2.1 空调系统需求弹性结果分析

按照 3.2.2.2 小节空调系统弹性的验证方案，东室室温从 24℃ 重设为 26℃，西室保持 24℃ 室温设置不变下两室的空调冷量变化见图 3.17 所示。两者的冷量差值即为空调系统总的弹性能力，其包括蓄热体在内等其它弹性源的总和，见图 2.8。实验数据分析得出东西两室平均冷负荷为 241W 和 672W，通过 2℃ 的温度重设，空调系统能够提供较大的弹性。图 3.18 为通过理论计算及实验测试空调系统的电力需求弹性曲线，从图中可以看出，通过理论计算的电力弹性为一条平滑的曲线，而实际测试的情况下为阶跃曲线。分析可知，在实验过程中，当东室温度重设为 26℃，电磁阀随即关闭，电力弹性量为冷机电耗；约 55 分钟后，冷机重新开启，并使东室维持在设定的 26℃，此时弹性量为维持房间 24℃ 和 26℃ 的耗电量差。由于本实验系统冷机为定频冷机，无法实现冷量的无级供给，但从整个测试时段内的冷量消耗的平均总量进行分析，可进行电力弹性模型的验证，理论与实验结果的平均绝对误差为 18.0%。

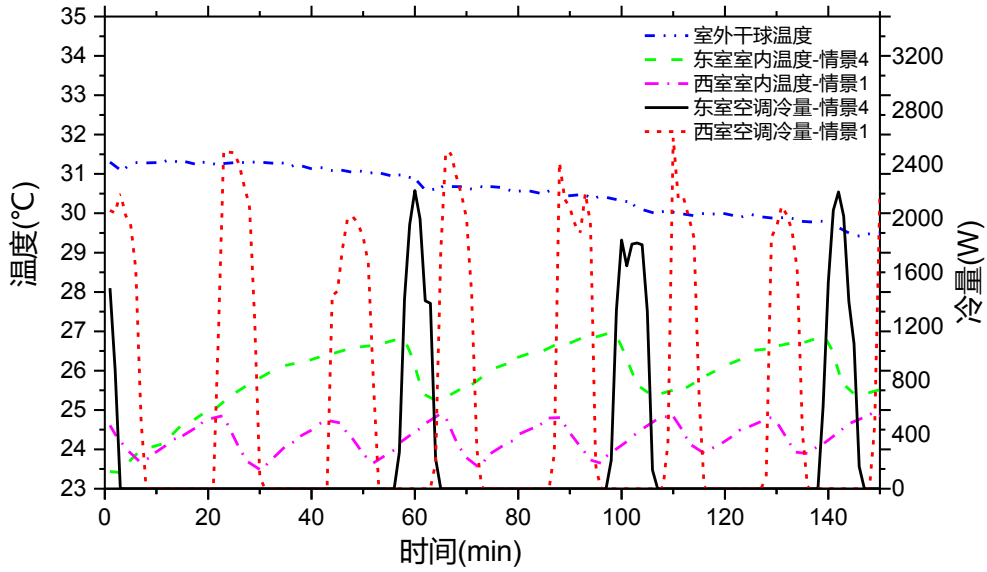


图 3.17 东西两室空调系统冷量及温度变化曲线（东室室温从 24℃ 重设为 26℃，西室保持 24℃ 室温设置不变）

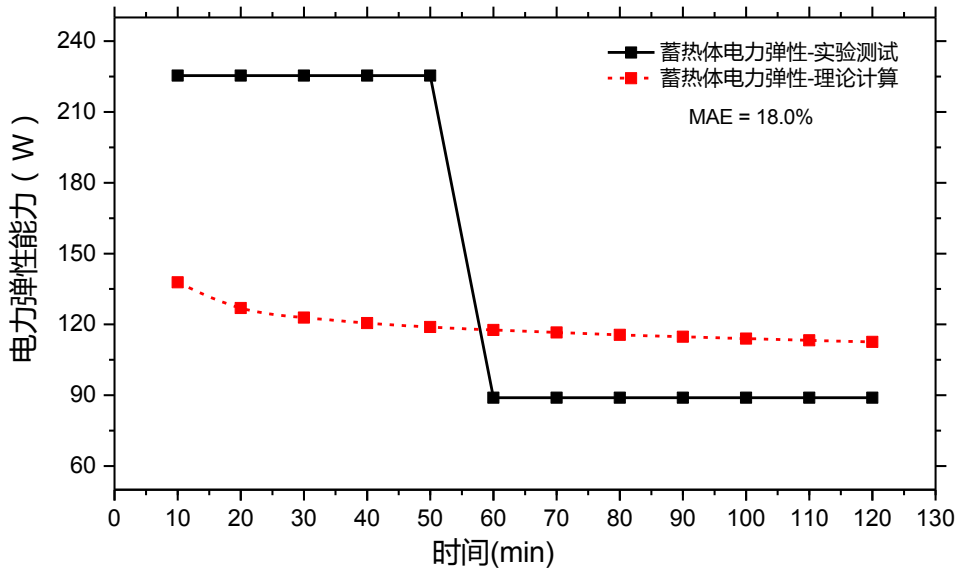


图 3.18 实验测试及理论计算空调系统电力弹性量对比图-东室情景 4

3.3.2.2 储能水箱需求弹性结果分析

对于具有储能水箱的空调系统，本实验中水箱的最低供水温度约为 9℃，冷机关闭后，风机和水泵继续保持运行状态。此过程冷量来自储能水箱，同时也有部分来自内部蓄热体和空调系统本身的热惰性。图 3.19 为冷机关闭后，供回水温度及房间温度的变化曲线，回水温度在半小时后有个升高过程，是由于东西两室流量不均衡导致东室流量减小，回水温度有所升高。随着水箱冷量的释放，在

约两小时内，供水温度从 9℃ 上升到了 23℃，此时，供回水温差仅为 0.4℃，水箱中的冷量消耗殆尽，不能够再维持舒适的室内环境，房间温度也超过 26℃。图 3.20 为两房间冷量供应曲线，即水箱能够提供的需求弹性量。东西两室冷量供应的平均值分别为 751W 和 800W，可进一步说明东室的蓄热体释放了相应的冷量，从而使维持同样室温的东室需要的冷量更少。

通过以上分析可以得出结论：在本实验条件下，利用 200L 的储能水箱，空调区面积 32 m²，储水最低水温为 9℃，室内外平均温差为 7.2℃ 的情况下，可维持两小时关闭冷机的需求，从而可实现常规需求响应（2h）的目标。由于冷机全程关闭，此过程能够提供的电力弹性量为冷机的电耗，房间所需冷量由储能水箱和系统的热惰性共同承担。

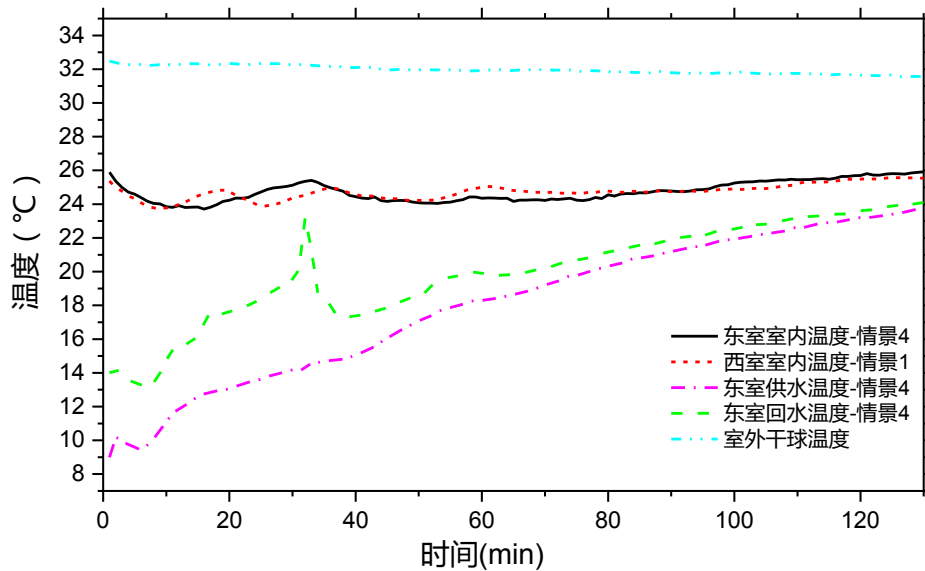


图 3.19 水箱供冷时房间温度变化曲线

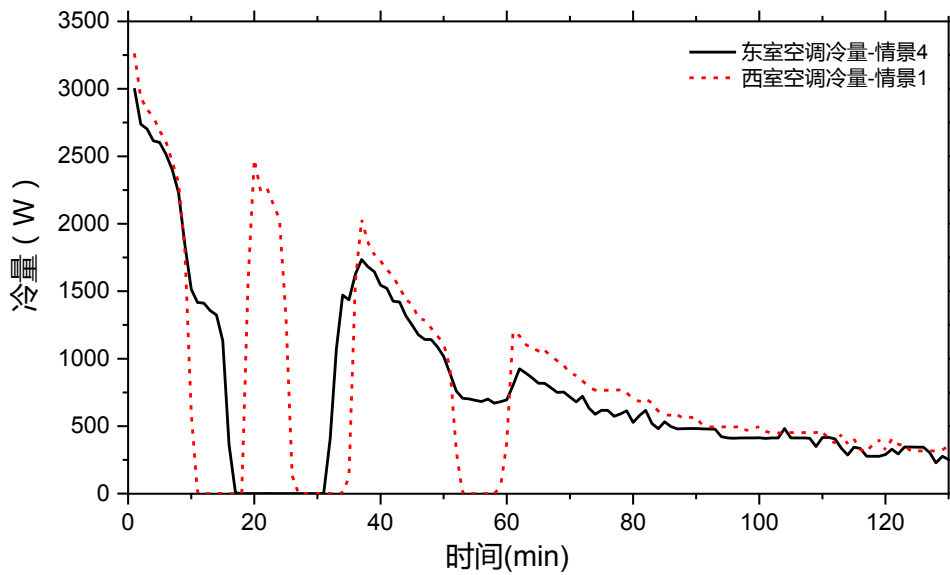


图 3.20 水箱供冷时两房间冷量变化曲线

3.3.2.3 预冷策略下需求弹性结果分析

最后，通过预冷措施进一步提升建筑电力需求弹性能力。图 3.21 为在 2℃ 预冷的策略下（即从凌晨 1:00 开始房间温度设置为 22℃）各温度的变化曲线，从图中可以看出，通过长时间的预冷，内部蓄热体的温度均接近 22℃，从而能够储存尽可能多的冷量。测试开始后，房间温度被设置为 26℃，此时房间温度迅速上升，在约 65 分钟后达到设置的 26℃（室内外温差约为 5.1℃），此后温度维持在 26℃ 上下。各内部蓄热体的温度则缓慢上升，桌柜和文件上升趋势基本一致，而地板相对较缓慢。

从图 3.22 中可知，在本实验条件下，通过 2℃ 的预冷措施，情景 1 和情景 4 房间不需冷量时间分别可达 73 分钟和 103 分钟，实验过程中平均冷量需求分别为 206W 和 186W。实验结果表明，通过预冷策略，基本可达到中长期需求响应的要求，通过关闭空调冷机实现负荷削减要求。

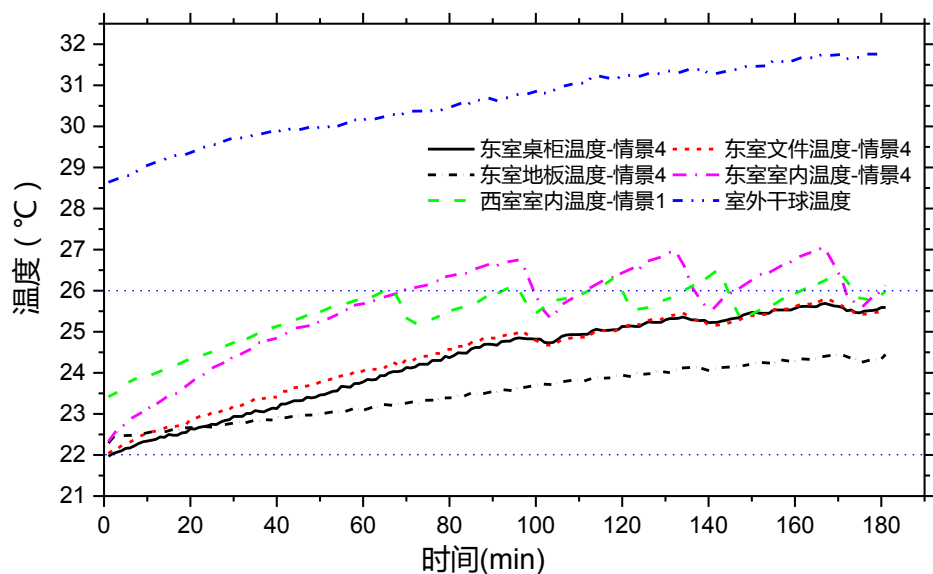


图 3.21 2°C 预冷下各温度变化曲线

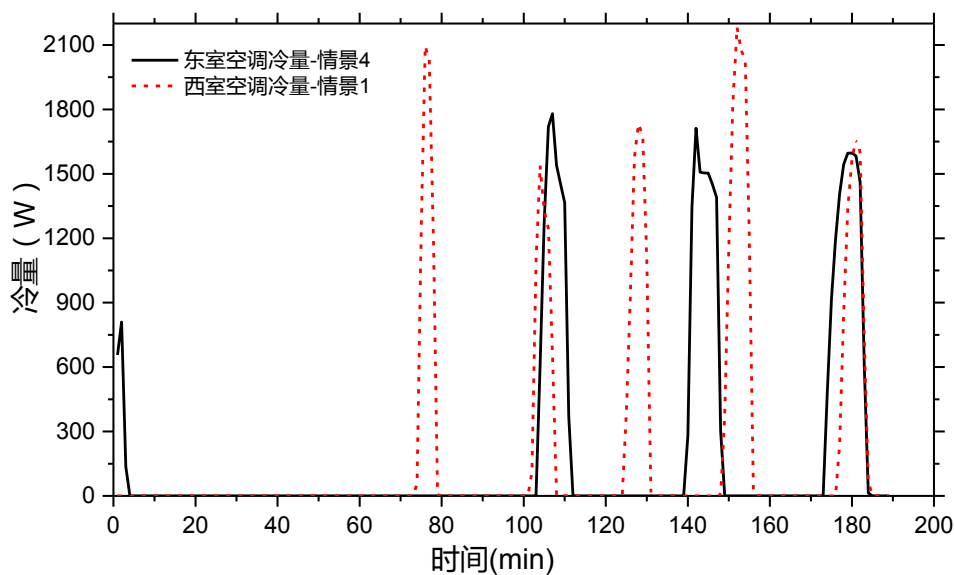


图 3.22 2°C 预冷下东西两室空调冷量变化曲线

3.3.3 人行为结果分析

当房间稳定在 26°C 后，设置房间温度为 28°C，东西两室房间温度和供冷量变化见图 3.23 所示。由于东室蓄热体冷量的释放，东室所需要的冷量较西室少，峰值冷量也较低。通过额外 2°C 的温度提高，在本实验的条件下（室内外温差约为 4.9°C），可额外增加约一小时冷机关闭的用电需求弹性，从而使用户能够参与更长时的需求响应项目。由于房间温度控制精度的原因，两房间温度均超过了舒

适度上限 28℃，这极有可能带来用户抱怨及投诉的风险，建议在温度控制精度不高的条件下，采用人为可接受最高 27℃ 的室内设置温度。

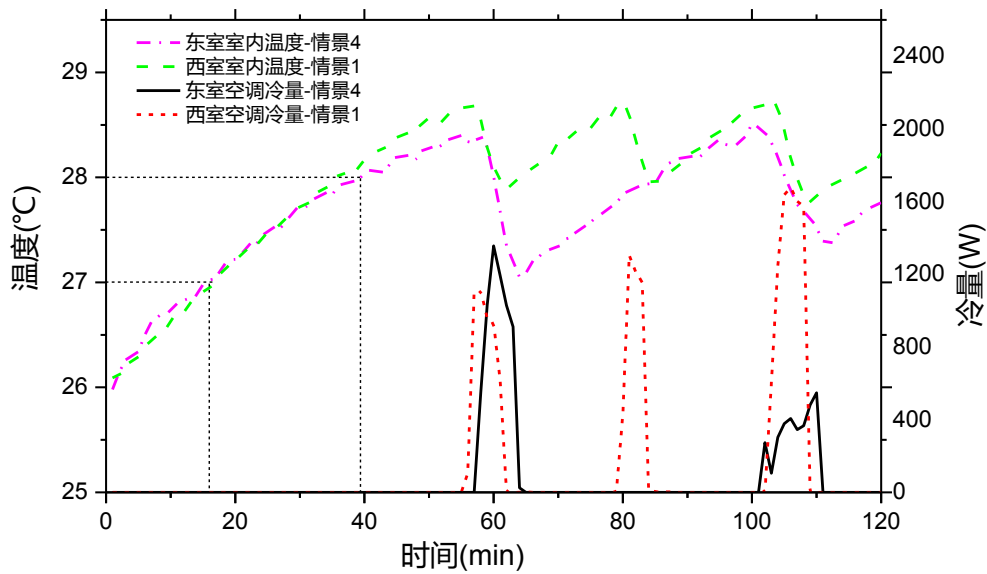


图 3.23 房间温度从 26℃ 设置为 28℃ 时东西两室空调冷量及室内温度曲线

下图为在整个房间温度重设的过程中（24℃到 28℃），内部蓄热体的温度变化情况，由于桌柜和文件较薄，其冷量释放较快，最后基本全部释放完毕。

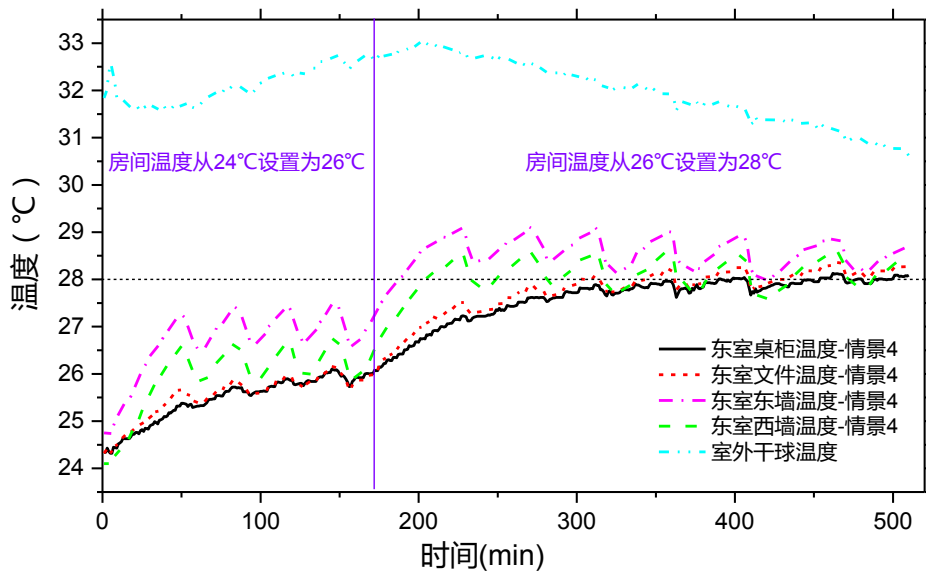


图 3.24 蓄热体随房间温度设置变化曲线

3.4 本章小节

本章通过设置不同的蓄热体情景及房间温度重设方案，分别对建筑蓄热体、空调系统及人行为的电力需求弹性进行了分析，并对第二章提出的电力需求弹性理论计算模型进行验证。

本章设置了四类建筑蓄热体情景模式，具体包括：“空房间”-情景 1、“利用率较低办公室”-情景 2、“正常利用率办公室”-情景 3、“利用率较高办公室”-情景 4。对于不同情景，设置了三种房间温度重设方案，具体包括：从 22℃ 重设为 26℃、从 24℃ 重设为 26℃、从 26℃ 重为 28℃。通过不同情景及温度重设方案的组合，并对各组合进行 2~5 小时的实验测试。

关于内部蓄热体验证部分，在情景 1~情景 4 测试中，随着蓄热体体量的增加，房间的热惰性逐渐变大，具体体现在所需空调冷量逐渐减小，分别为 375W、352W、321W、285W。通过对蓄热体的温度变化分析发现，两小时内，像家具等较薄的蓄热体能够释放出大部分冷量，桌柜、文件及地板冷量释放率分别为 74%、76%、60%，实验测得桌柜和文件的冷量释放率与理论计算结果具有较好的一致性。最后，通过实验与理论电力需求弹性量化模型对比分析，提出了一种在开始阶段(房间温度达到设定温度值阶段)的理论量化模型热释放率修正方法，对于高效利用的办公室，修正系数拟合公式为 $k(t) = 0.0312t + 0.0642$ ，修正后两结果的平均绝对误差为 6.8%。

关于空调系统验证部分，分别对空调系统、利用储能水箱以及采用预冷三种情形进行了分析，在保持房间温度不高于 26℃ 条件下，实验测得冷机可关闭的时长分别为 55、120、65 分钟。空调系统的电力需求弹性方面，实验结果与理论计算的平均绝对误差为 18.0%，仅空调系统可带来约 9 W/m² 电力需求弹性量(计算 COP 为 3.5)。对于人行为部分，2℃ 的房间温度的提高，可额外增加约一小时冷机关闭的用电需求弹性，从而使用户能够参与更长时的需求响应项目，但同时存在房间温度超过舒适度上限 28℃ 的风险。

通过实验的验证，进一步验证了第二章提出的理论量化模型的可靠性，并对初始阶段提出了相应的修正方法。

第4章 基于 Modelica 建模语言的办公建筑电力需求弹性模拟研究

4.1 概述

通过实验对所建物理模型的验证是最直接有效的一种方式，但受到实验平台等的限制，特别是对于复杂系统，计算机模拟以其良好的经济性和效果，提供了另外一种选择。上一章中通过实验对建筑热环境类弹性源进行了验证，由于实验平台的限制，难以对所有弹性源进行验证。因此，本章通过在 Dymola 平台上，利用 Modelica 建模语言建立建筑系统来对更多情形进行研究分析。

本章所用的办公建筑与第二章实验用办公建筑不同，为分析实际办公建筑的电力需求弹性潜力。通过调研上海的办公建筑，本章的模拟研究通过选取一典型的办公建筑的独立办公区域作为研究对象进行分析，该办公区域面积为 224 m^2 。通过两种方法分别计算该建筑的电力需求弹性量，一种是利用本文第二章提出的理论计算方法通过基本参数计算得出，另一种为根据本章中建立的 Modelica 模型直接通过用电负荷变化模拟得出。具体实现步骤如下，首先，在 Dymola 软件平台搭建包括空调系统、房间动态模型、照明、储能系统等组成的全建筑能耗模型，并根据实际建筑参数对模型进行设置；其次，对所搭建的模型进行热动态特性验证，主要为对温度的动态变化情况进行校验，确保模型能够准确地反应实际建筑动态特性。再次，对模型的模拟进行不同控制情景设定，包括房间调节综合温度方法，水箱的温度设定等；最后，通过全建筑的 Modelica 模型计算建筑的电力需求弹性量，并对第二章提出的弹性理论计算模型进行验证分析以及办公建筑电力需求弹性的特性分析。

4.2 Modelica 建模语言简介

Modelica 是面向对象的统一建模语言 (Object-oriented Language)，其应用日益广泛[88]。与传统的建模工具 (例如 Matlab) 不同，Modelica 是基于非因果建模方程的思想，而非传统的赋值语句，也就是在申明方程时不需要明确方程的求解方向，可实现不同的数据流向，通过节点 (Nodes) 的连接，更好地实现物理模型的灵活性和更强的功能。Modelica 建模时，方程的求解方向由仿真求解器根据系统的数据流自动确定，这一特性大大地减轻了建模的复杂程度，尤其是针对复杂的系统建模，可以避免公式的推导和转化引起不必要的错误。

目前, 基于 Modelica 语言仿真环境的平台有很多, 包括商业化的 Dymola、SimulationX、Mworks 等, 开源的有 Openmodelica 和 Jmodelica。目前 Dymola 发展最为完善, 各领域的模型库较多, 唯一的缺点是该软件较为昂贵, 所幸本课题组购买了商业正版授权。在 Dymola 平台上, 各大型复杂系统均可由组件模型连接组成, 组件是由数学方程描述的动态行为。Dymola 强大的模型库为各种复杂系统的建立提供了支撑, 目前, 用于建筑能源及区域能源系统设计与控制的开源模型库主要包括 Modelica buildings library、BuildingSystems、Aixlib、IDEAS[89]。本文采用 Modelica buildings library 模型库, 由伯克利国家实验室开发, 该模型库包含 HVAC 系统、建筑热平衡模型、控制模块以及需求响应模块等, 满足本课题的需求。各模型库中的数学方程及控制方法可根据实际建筑案例进行更改和调整。

4.3 Modelica 建筑模拟系统搭建

4.3.1 主要模型介绍

4.3.1.1 房间动态模型

房间模型采用的是 buildings library 模型库中的 MixedAir 模型, 该模型假设房间空气充分混合, 即房间内空气温度均匀。在 MixedAir 模型中可包含任意数量的墙体结构和表面, 这些构成了房间与环境导热传热、对流传热及辐射传热的基础。该房间动态模型的数学描述及其验证过程可参见文献[90]。图 4.1 为房间 Dymola 模型组件连接图, 房间通过组件的各连接节点与外部连接。各组件中输入的信号包括用于指定热对流、热传导及热辐射等形成的热量交换信息, 以及人员活动、窗户及遮阳的控制。其中, weaBus 节点可用于连接气象数据, 该气象数据从 TMY3 类型数据中获取; 空气热节点 (heaPorAir) 可用于空气温湿度及其显热的交换; 辐射热节点 (heaPorRad) 连接辐射温度信息以及辐射热流量; 流体节点 (ports[nPorts]) 一端为室内空气, 另一端则可以用来连接任意数量的空调系统, 是控制室内空气热湿平衡最为重要的节点; 热节点还包括室内空气连接外维护结构表面 surf_conBou[n] 节点, 以及室内空气连接内部墙体表面节点 surf_surBou[n]。内热源 qGai_flow[n] 节点可设置房间内热源信息, 具体包括辐射、对流及潜热散热的得热量, 例如人体散热、照明及设备能耗密度等。窗户控制 uWin[n] 节点可输入窗户控制信号, uSha[n] 为遮阳控制信号节点。除了与外部交互信息的节点外, MixedAir 模型包含内部子模型, 有各类型墙体结构子模型 (construction) 以及空气热平衡子模型 (Air) 等。相关 Modelica 代码可参见附录 B。

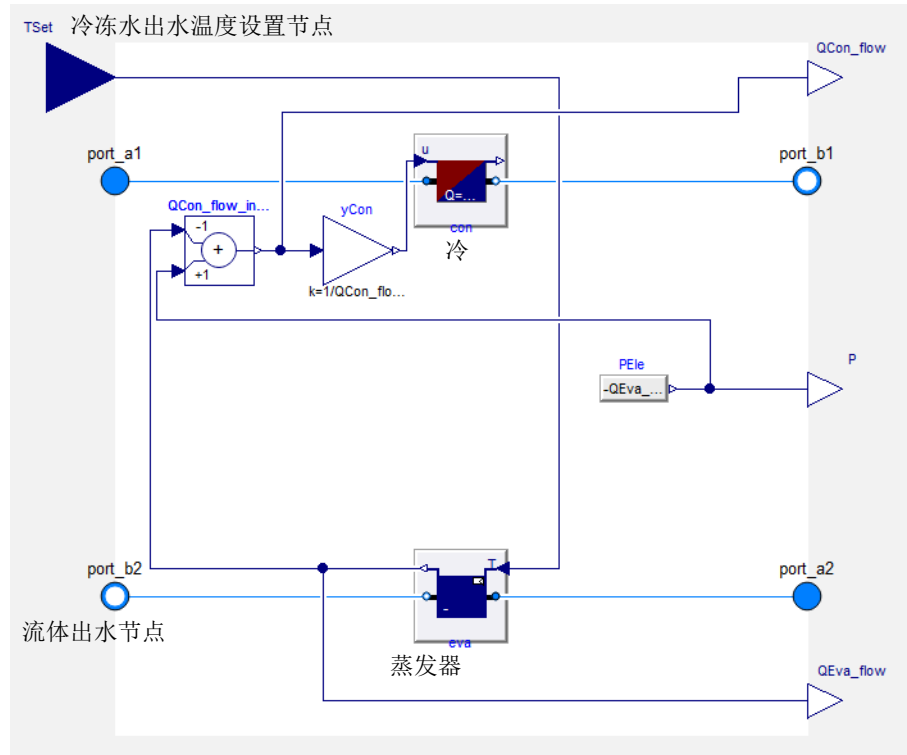


图 4.2 Dymola 中 Carnot_TEva 模型组件连接图

除此之外，空调系统中还包括 AHU 模型，管道模型及水泵模型等。AHU 采用的为 buildings library 库中的 Equipment.CoolingCoilHumidifyingHeating 模型，该模型包括冷却盘管、变风量风机、除湿/加湿器以及电辅热器。水泵及风机模型采用 SpeedControlled_y 模型。管道模型为 FixedResistances.Pipe 模型，该模型考虑对流体的阻力以及流体和环境的热交换。

4.3.1.3 储能系统模型

储能水箱采用 Storage.Stratified 模型，该模型为分层水箱模型，把水箱在垂直方向上分成多段，属于温度分层式水箱结构，图 4.3 为水箱模型的组件连接图。分层水箱相邻段之间及环境建立传热平衡方程进行描述，各段的热平衡方程见下式。通过热节点来连接不同层的温度及水箱外界环境温度。

$$\rho V_i c_w \frac{dT_i}{d\tau} = -Q_i - UA_i(T_i - T_\infty) \quad (4-4)$$

- 式中：
- ρ ——水的密度， kg/m^3 ；
 - V ——水箱各段有效容积， m^3 ；
 - c_w ——水的比热， $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ；
 - Q_i ——各层之间换热量，W；
 - U ——水箱与环境总换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

A ——水箱各段表面积， m^2 ;
 T_{∞} ——环境温度， $^{\circ}\text{C}$;

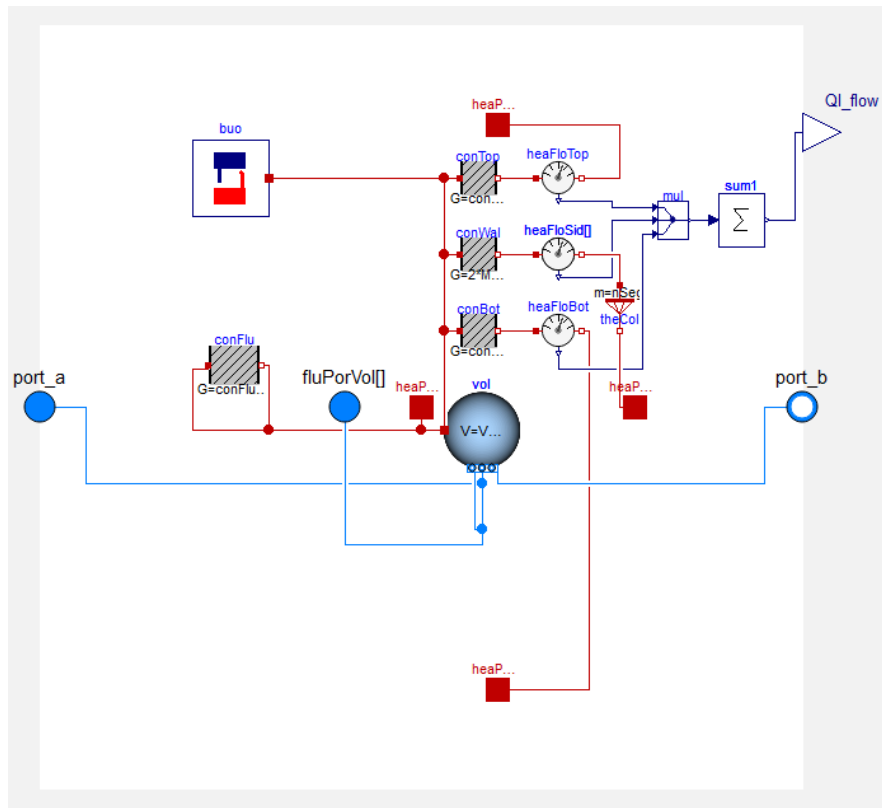


图 4.3 Dymola 中水箱模型组件连接图

4.3.2 Modelica 办公建筑模型实例

4.3.2.1 办公建筑描述

考虑到不同办公区间和不同公司之间内部蓄热体可能存在较大差异，因此在本节中选取了一完整独立办公区域进行弹性量的验证及分析。该独立办公区域的平面图如下图所示 4.4 所示，总面积为 224 m^2 ，可同时容纳 42 人办公。包括两个会议室、两个独立办公室及一个开放办公区域，办公区域的各部分由玻璃隔墙隔开，且各区域处于连通状态。

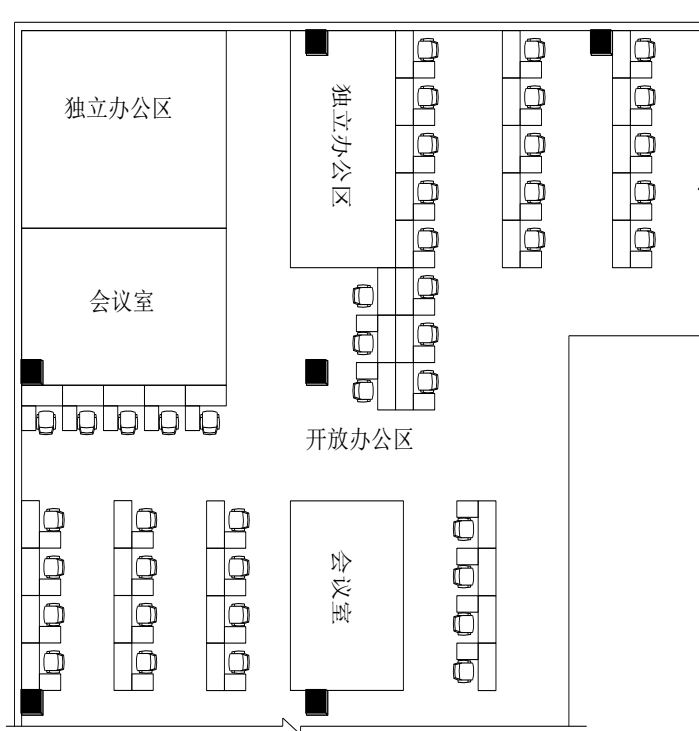


图 4.4 独立办公区域平面图

该办公区域各内部蓄热体详细参数信息如下表 4.1, 其中办公用具(含文件)配置按照每人配置一套桌椅和一个文件柜, 并每人计算若干文件资料, 规模大小按照桌子重量为 48kg/张, 椅子重量为 12kg/张, 文件及文件柜的重量分别为 40kg 和 15kg 每人。

表 4.1 办公区域围护结构及内部蓄热体参数信息

结构类型	几何参数		热物性参数			
	面积 (m ²)	厚度 (m)	材料	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/(m·K))	比热容 (kJ/(kg·K))
外墙	88.0	0.22	保温板+水泥	1490	0.95	0.94
内墙	71.0	0.18	砖头	930	0.42	0.93
外窗	43.0	0.01	玻璃	2500	0.76	0.84
天花板/楼板	224.0	0.20	石膏板	2080	1.33	0.97
办公用具/文件	254.0	0.03	胶合板+纸张	490	0.14	2.26

除此之外, 需对建筑内热源信息及运行时间表进行设定, 本文依据《公共建筑节能设计标准 GB50189-2015》进行设定。建筑内部人员热源、照明密度及设备密度按照 40W/m²、11 W/m² 和 13 W/m² 进行设定。空调系统运行时间表为 8:00 - 18:00, 同时考虑人员的逐时在室率, 可见下表 4.2。建筑空调系统容量可按照

整栋建筑进行比例分别分配，即空调系统额定功率为 9.0kW，蓄能水箱体积为 1.24 m³，夏季办公区域的默认温度设置为 24℃。

表 4.2 办公建筑房间人员逐时在室率

时间	0:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-12:00	12:00-14:00	14:00-18:00	18:00-20:00	20:00-24:00
在室率	0%	10%	50%	95%	80%	95%	30%	0%

4.3.2.2 模拟情景及天气参数

本文模拟的情景为典型夏季设计日（7月21日），建筑为制冷的需求。一方面，从需求响应开始时（14:00），房间温度从 24℃调节到 26℃，需求响应结束后（16:00）重新调回 24℃，同时考虑照明亮度降低 40%。模拟建筑在 14:00-16:00 时段参与需求响应项目情形下，得出建筑能够提供的电力弹性（即负荷削减）能力。

天气参数以上海市为例，天气数据由 Dymola 标准的.mos 文件提供，天气文件可在 EnergyPlus 官网[91]中下载，但需要把.epw 格式的文件转化为.mos 格式文件，相关方法可参见[92]。根据该天气文件，年平均环境干球温度为 16.7℃，年平均总太阳辐射为 1,271 kWh/m²。典型夏季设计日下，干球温度、空气湿度和总太阳辐射如下图 4.5 所示。

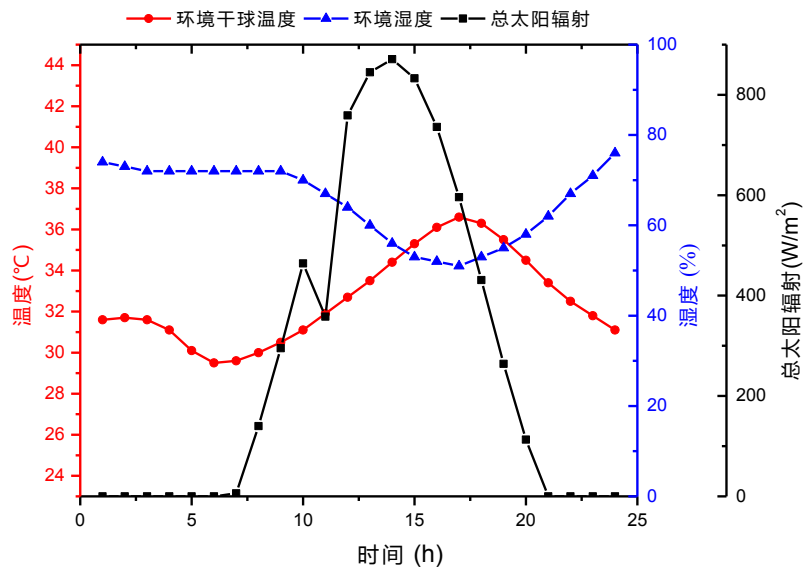


图 4.5 典型夏季日气象参数（7月21日）

4.3.2.3 Modelica 模型及参数设定

办公建筑 Modelica 模型包括办公房间、HVAC 系统(含冷水机组、循环水泵、空气处理单元、管道和阀门等)以及储能水箱。各模型组件的详细描述参考 4.3.1 小节。这里需要说明的是, Modelica 库中没有家具的相关模型, 本文中利用家具与内墙相似的传热特性, 家具通过有效面积法进行折算, 考虑家具的实际厚度, 从而等效为 Modelica 模型的内墙。Modelica 模型组件布局及连接形式如下图 4.6 所示, 模型中主要组件参数的设置列于表 4.3 中。

除了各系统组件外, 还包括一些控制模块, 针对房间温度、AHU、水泵、冷机及储能系统的控制。本模型中主要采用的是 PID 控制, 继承于 Continuous.LimPID 组件。

表 4.3 Modelica 建筑模型中主要组件参数信息

组件名称	继承的基础模型	主要参数设置
冷水机组	Buildings.Fluid.Chillers.Carnot_TEvap	蒸发侧名义水流量为 0.93kg/s
空调房间	Buildings.ThermalZones.Detailed.MixedAir	房间结构物性参数设置基于表 4.1; 空调开启时刻表 8:00-18:00; 内热密度为 40W/m ² ; 照明密度为 11 W/m ² ; 设备密度为 13 W/m ²
AHU	Buildings.Applications.DataCenters.ChillerCooled.Equipment.CoolingCoilHumidifyingHeating	名义风量为 2.43 kg/s
储能水箱	Buildings.Fluid.Storage.Stratified	水箱体积为 1.24 m ³ ; 水箱高度为 2 m; 水箱分段数为 5
天气数据 Bus	Buildings.BoundaryConditions.WeatherData.ReaderTMY3	上海地区.mos 格式天气文件

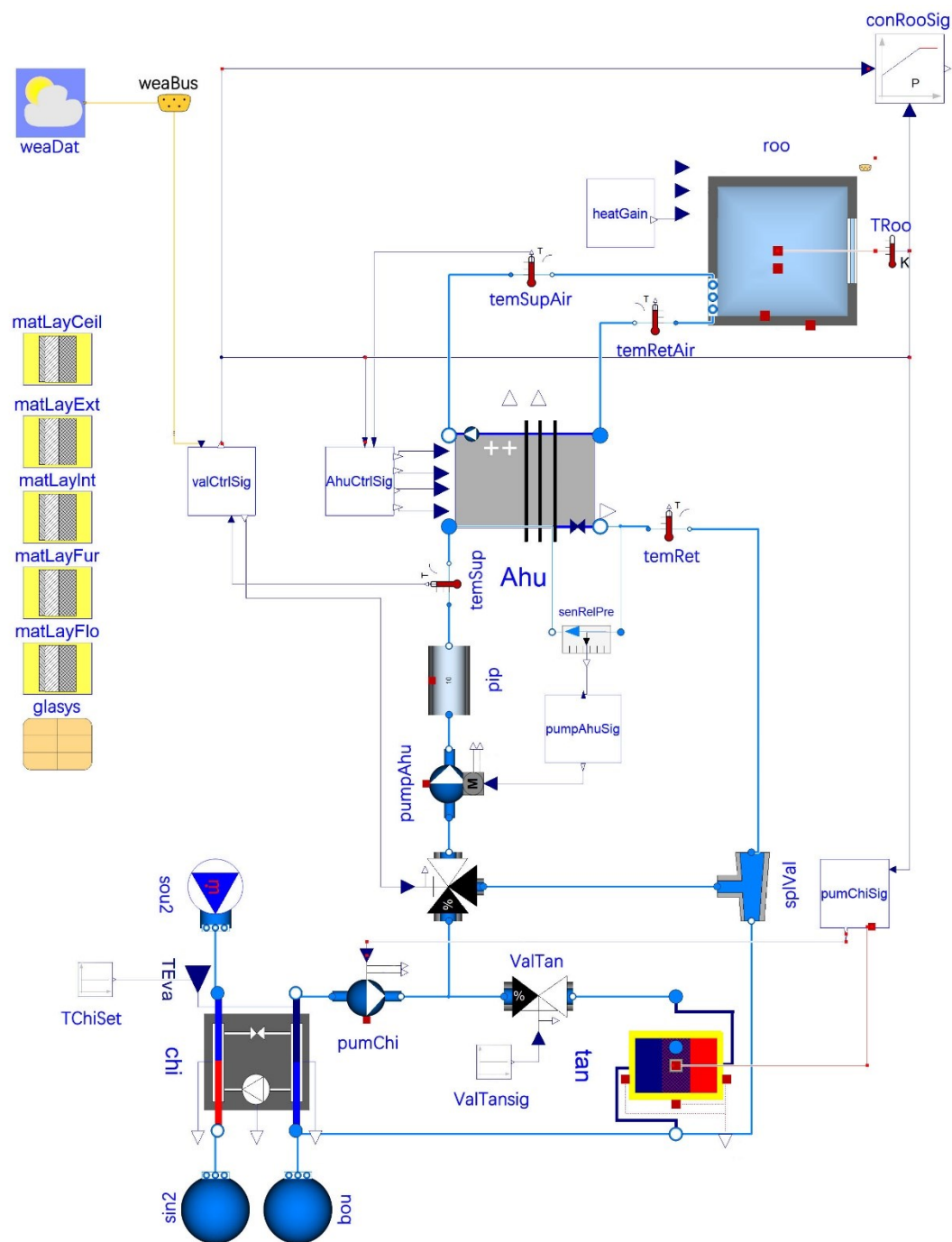


图 4.6 办公建筑 Modelica 模型系统布局图

4.3.2.4 Modelica 模型验证

所建建筑 Modelica 模型的准确性验证对于模型中参数调节至关重要，只有符合实际案例的 Modelica 模型才能准确计算实际建筑的弹性能力以及对于理论弹性量化模型的验证。因此，通过对本办公案例进行了数据采集。空调系统开启时间为 8:00-18:00，下图为 Modelica 模拟和现场测试的室内温度曲线。结果表明，

室温在模拟情况下和实际情况有良好的一致性，两者的均方根误差（RMSE）为 0.48°C ，表明 Modelica 模型能够较好地反映办公楼的传热特性。

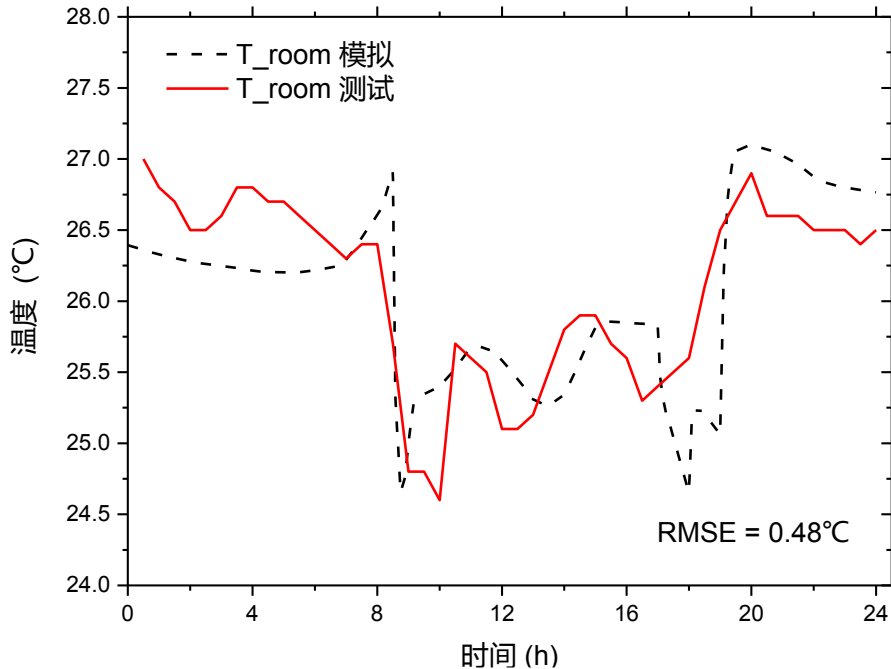


图 4.7 Modelica 模型及实测下室温曲线

在 Modelica 模型中，建筑电力弹性量可以直接通过模拟有无需求响应下电力的变化直接计算得出，称之为 Dymola 模拟。另一种为通过本文第二章提出的弹性理论计算模型，称之为理论计算模型。下图给出了两种方法计算 HVAC 系统的电力弹性的结果。模拟计算法的结果略大于弹性计算式，两者的平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）为 5.9%，进一步说明第二章提出的弹性量化模型具有一定的可靠性。

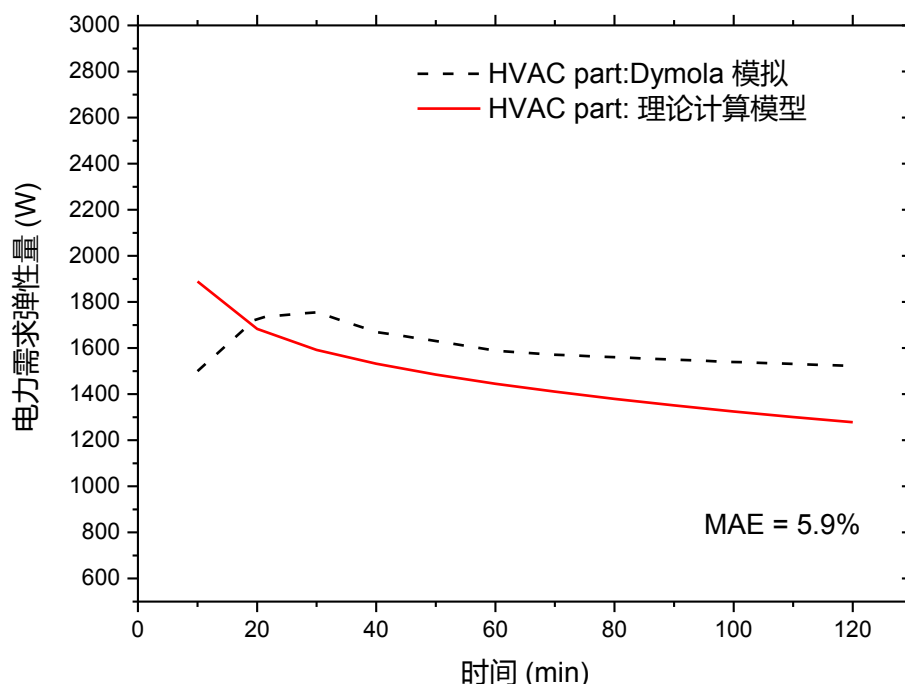


图 4.8 弹性计算式和 Modelica 模型模拟计算法下 HVAC 系统的电力弹性曲线

4.4 全建筑弹性模拟结果分析

4.4.1 蓄热体

建筑内部蓄热体主要包括内墙、家具、地板和天花板。本文分别计算了四种不同蓄热体的弹性贡献量，如下图 4.10 所示。与其它类型蓄热体相比，在需求响应短时间内，家具能够释放更多的冷量（具有最大的弹性潜能）。此外，家具一般较薄，热量容易释放出来，其冷热释放效率也更大。楼板和内墙具有较大的总热容，但属于厚重型蓄热体，冷热量释放是一个缓慢的过程。各类蓄热体冷量释放率参见图 4.9，内墙和楼板在两小时内的冷量释放量占总可释放冷量比例分别约为 23.9% 和 10.8%，而家具达到了 73.2%。这意味着对于内墙和楼板，仍然有很大一部分冷量留存在蓄热体内，这些蓄热体对于短时需求响应事件不起作用，不能转化有效的热弹性，但可作为长时需求响应的考虑对象。

对于本办公建筑案例，不同蓄热体类型的电力弹性占比见下图 4.11 所示。从图中可以得出，家具 41.24% 的贡献最大，而内墙的贡献最小，仅为 8.49%。利用蓄热体的热惯性和 2°C （从 24°C 到 26°C ）的室温控制范围的情况下，考虑模拟的动态 COP 并取平均冷机 COP 为 4.5（COP 在 DR 时段内变化较小），两小时时段内，内墙、家具、天花板和地板的等效电力弹性均值分别为 104.5W、507.5W、325.5W 和 293.0W，换成单位建筑面积则分别为 0.5 W/m^2 、 2.3 W/m^2 、 1.5 W/m^2 、

1.3 W/m²。此外，采用建筑预冷策略时，例如在尖峰到来若干小时前将室内空气温度设置为 23℃或更低，可提高空调系统峰值负荷削减的能力[23, 75]。

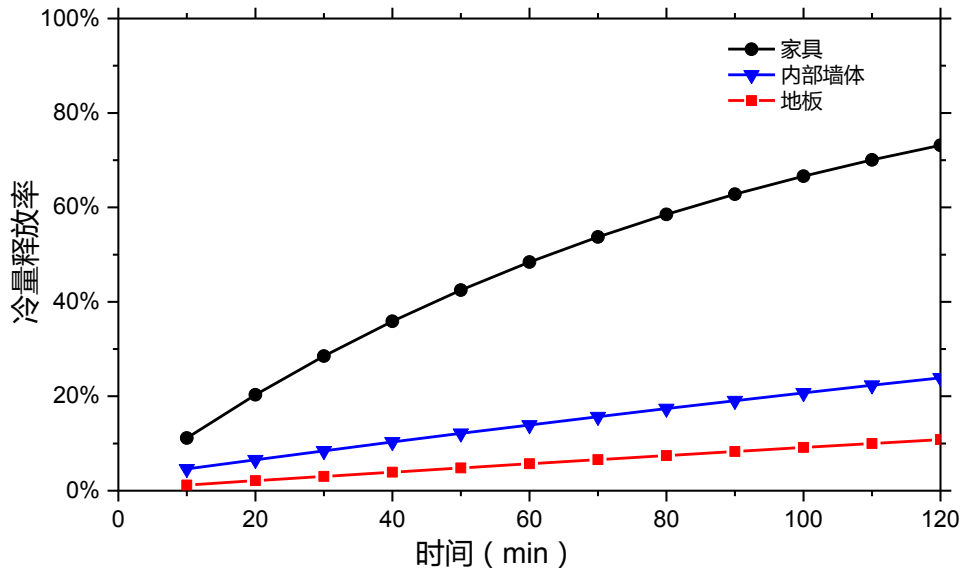


图 4.9 各蓄热体冷量释放率

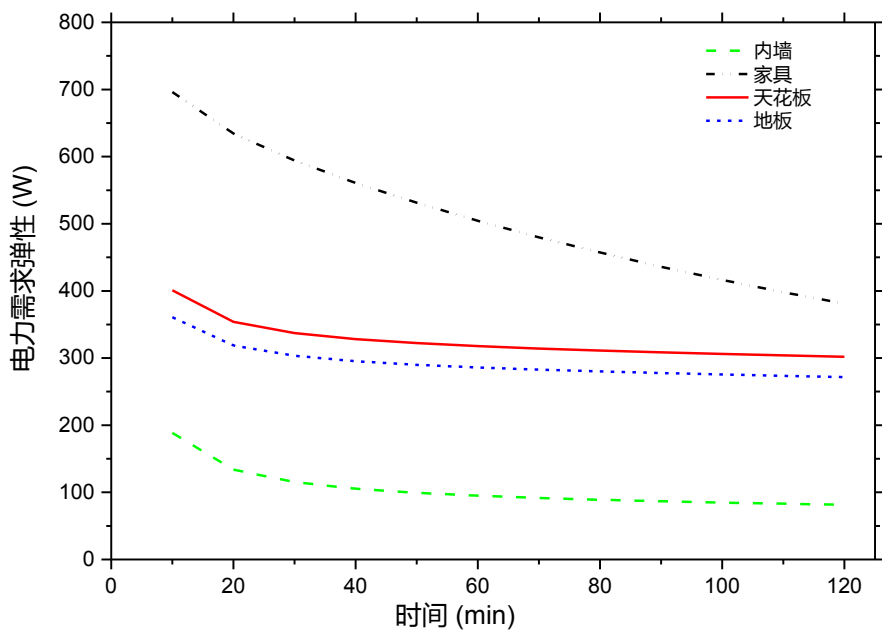


图 4.10 不同蓄热体类型电力弹性曲线

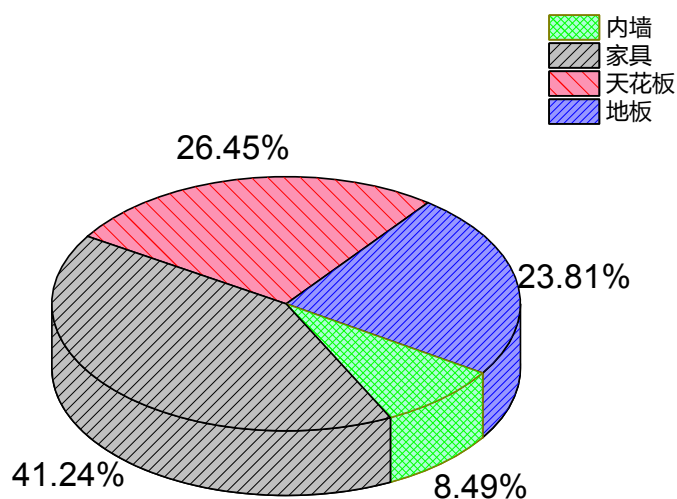


图 4.11 不同蓄热体类型的弹性贡献占比

4.4.2 用电设备

对于办公建筑，照明容易根据自然光亮度，通过调节照明亮度来控制照明的负载，从而为建筑提供电力弹性资源。本文考虑 14:00–16:00 时段，计算在照明亮度降低 40% 时能够提供的负荷削减情况，计算照明能够提供的电力弹性潜能为 985.5 W，单位面积下为 4.4W/m²。此外，照明负荷减少的同时也减少了设备的散热，从而间接地降低 HVAC 系统的冷负荷需求，该部分弹性量可利用式 2-16 计算。

4.4.3 HVAC 系统

HVAC 系统的电力弹性来源包含蓄热体等其它各部分的耦合，主要为与热环境相关的各类弹性源负荷的削减量，包括由于室内温度提高后外墙及外窗传热量的减少量、新风处理负荷减少量、照明负荷降低时散热减少量以及室内空气热惯性，见下图 4.12。结果表明，蓄热体对 HVAC 系统弹性贡献最大，为 72.74%，其次为照明亮度调节对 HVAC 贡献，为 12.95%，见下图 4.13。

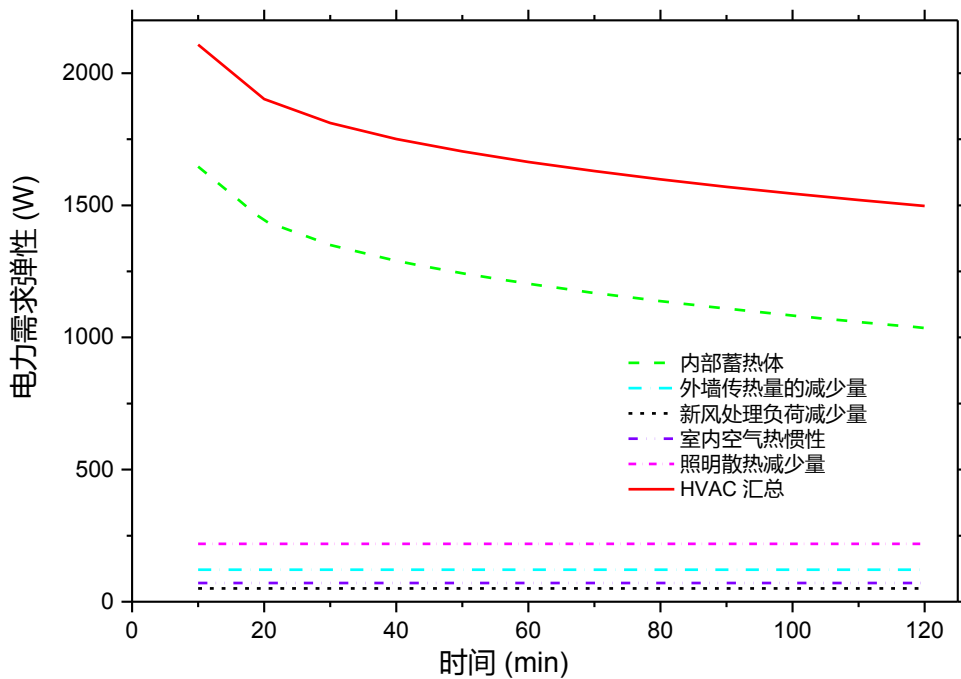


图 4.12 HVAC 系统中不同弹性源的曲线

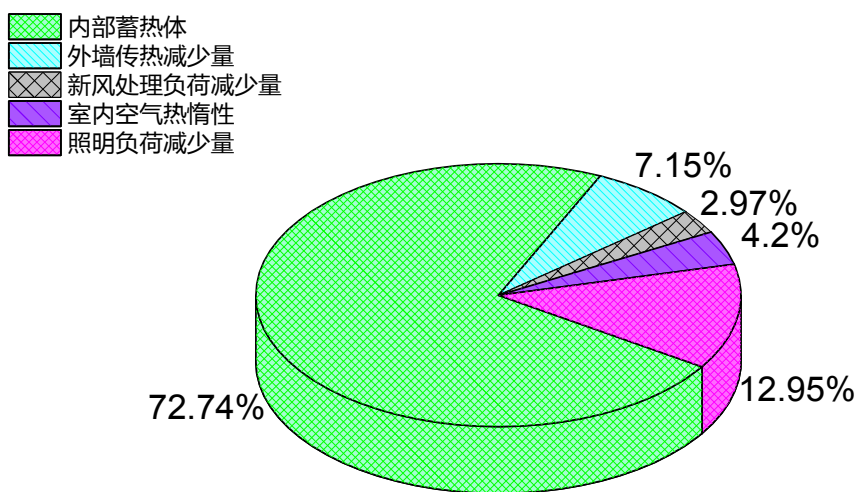


图 4.13 HVAC 不同弹性源的弹性贡献占比

当空调系统结合储能水箱运行时，电力弹性可以极大地提升。当水箱放冷时，冷机可选择关闭或者不关闭，若关闭，此时电力弹性能力为常规情形下冷机电负荷，建筑所需冷量全部由水箱提供，若不关闭，电力弹性能力可由水箱供冷量进行计算，建筑所需冷负荷由冷机和水箱共同承担。室温随着水箱水温升高缓慢升高，水箱的弹性曲线如下图 4.14 所示。在冷机关闭的情况下，室温在 92 分钟后提升了 2℃。经计算，水箱在两小时内平均电力弹性为 1,807W，单位面积弹性量为 8.1W/m²，在所有弹性源中潜能最大。

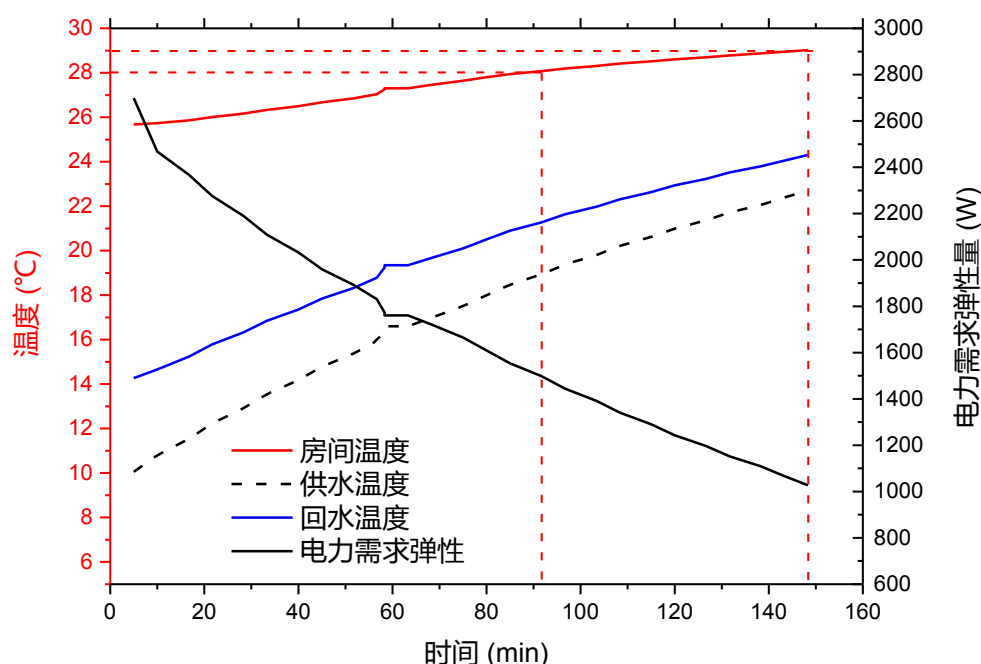


图 4.14 储能水箱的弹性能力曲线（水箱容积为 1.24 m³）

4.4.4 人行为

我国对各类建筑室内舒适温度范围做了相关规定，通常室内温度不宜超过 28℃，在夏季办公建筑的舒适温度为 24-28℃[71]。对于欧美等国家则要求更低的舒适温度，美国 ASHRAE 标准规定的舒适温度范围与湿度、风速及辐射影响相关[93]。本章模拟条件下，人行为考虑两种情形，一种为接受最高室内设置温度为 27℃，另一种为 28℃。下图 4.15 为这两种行为条件下电力弹性量随时间的变化曲线，两种人行为两小时内平均电力弹性贡献分别为 795 W 和 1473W，单位面积弹性量分别为 3.5 W/m² 和 6.6 W/m²。更宽广的可接受室内温度设置能够为建筑提供更多的弹性可能，对于更高温度的接受可能性，可以用相同的方法分析计算，这里不做具体分析。

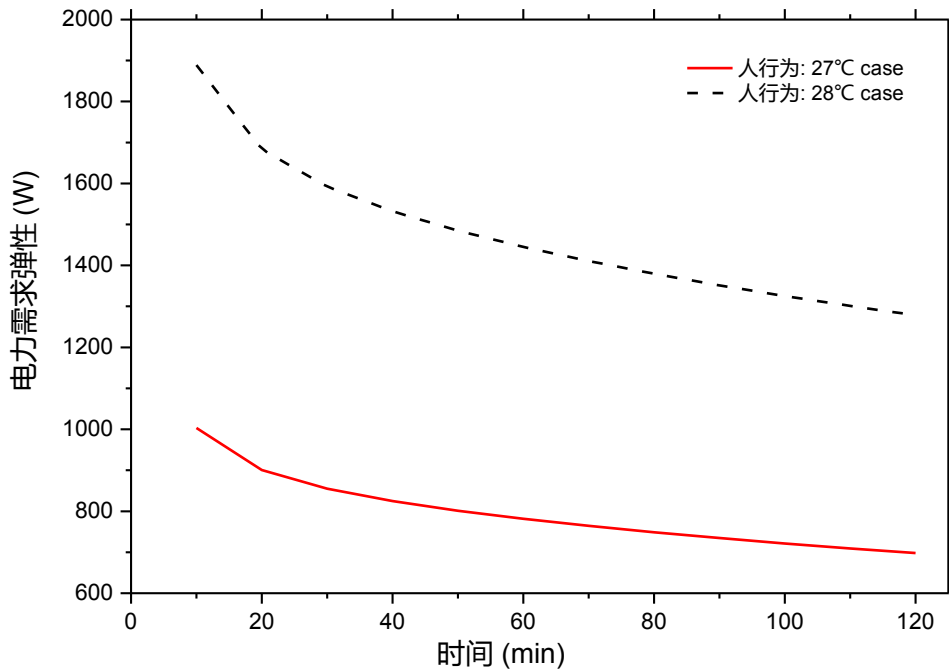


图 4.15 建筑人行为弹性曲线（27°C 的情形-允许室温设置从 26°C 提高至 27°C，28°C 的情形-允许室温设置从 26°C 提高至 28°C）

4.4.5 结果分析与讨论

为分析不同建筑系统类型电力弹性情况，把弹性源组合分成以下几种，见下表。

表 4.4 弹性组合模式

编号	包含的弹性源
弹性组合-1	HVAC 系统+照明设备
弹性组合-2	HVAC 系统+照明设备+人行为 27°C
弹性组合-3	HVAC 系统+照明设备+人行为 28°C
弹性组合-4	HVAC 系统+照明设备+储能水箱
弹性组合-5	HVAC 系统+照明设备+储能水箱+人行为 27°C
弹性组合-6	HVAC 系统+照明设备+储能水箱+人行为 28°C

图 4.16 为建筑各弹性源的占比情况，图 4.17 为不同弹性弹性组合电力弹性量，结果表明，在实际建筑中，储能水箱、蓄热体以及人行为贡献了大部分的弹性量。本案例中储能水箱贡献的弹性占比为 31.5%。需要说明的是，当关闭空调系统也可以满足室内空气要求时，与热相关的弹性最大潜能等于冷机的用电负荷。这种情况发生在弹性组合-3、弹性组合-4、弹性组合-5 及弹性组合-6 的情况下。

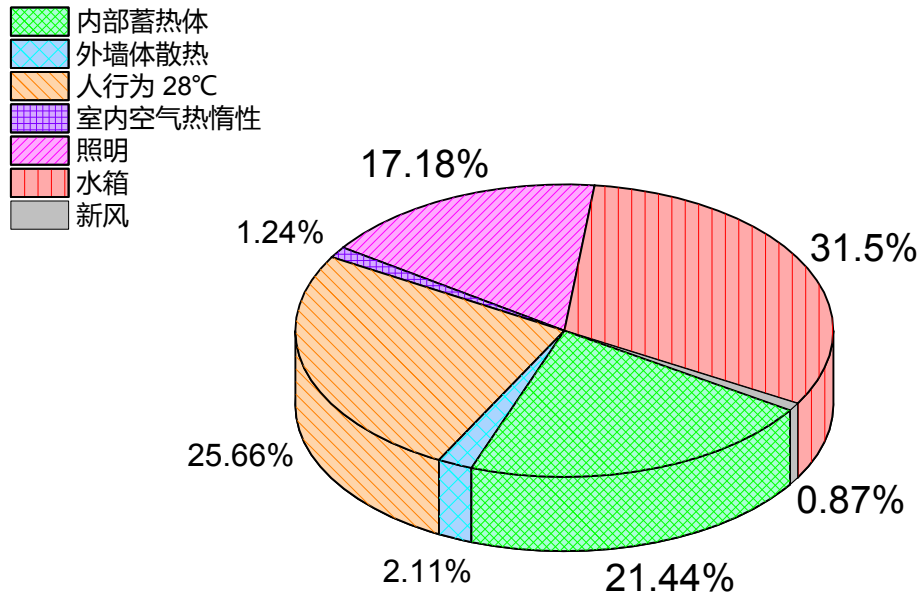


图 4.16 建筑各弹性源百分比

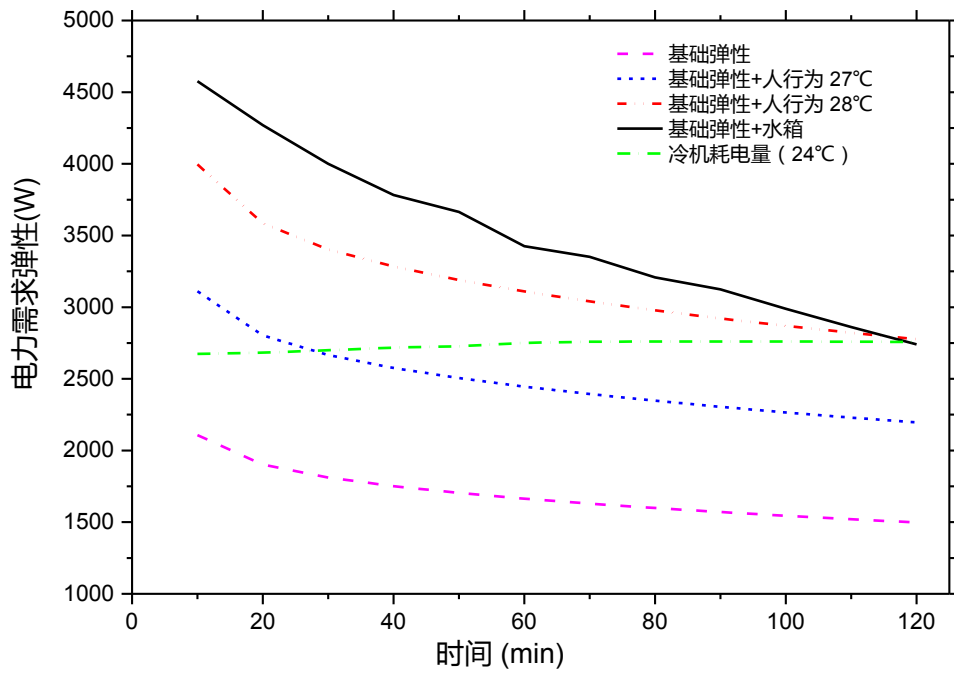


图 4.17 不同弹性弹性组合电力弹性量

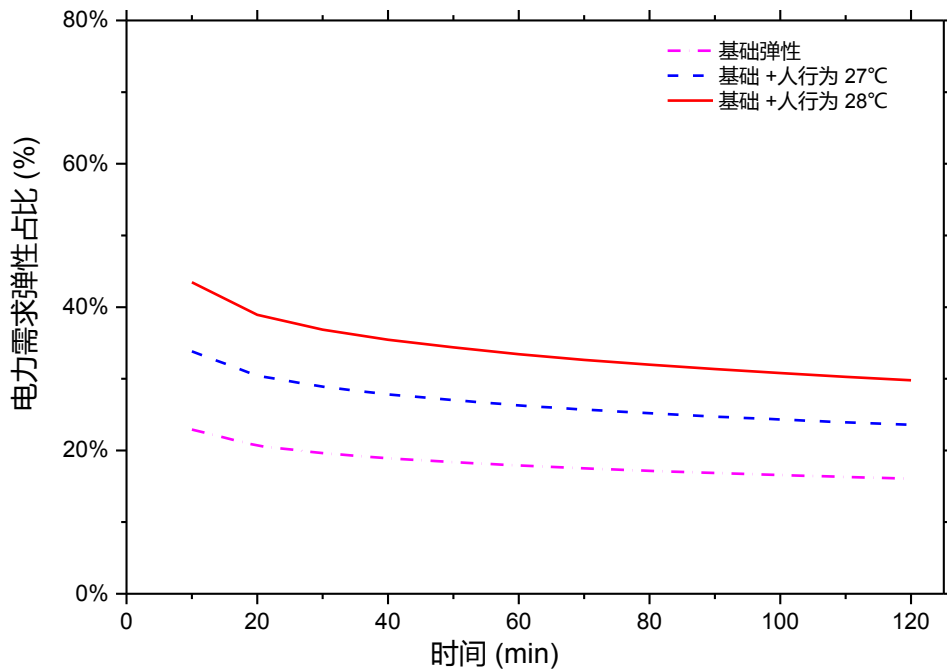


图 4.18 无储能水箱下不同弹性弹性组合弹性占比

对于建筑运营商和用户而言，电力弹性量与总建筑电力负荷的比（以下简称总用电占比）更加直观，反映了建筑在峰值情况下可削减负荷的比例。本案例中冷机的用电负荷大约占建筑总用电的 42%。图 4.18 给出了 HVAC 系统在无储能水箱时的弹性占比，从图中可以看出建筑本身的基本电力弹性总用电占比约为 18.2%，当考虑居住者可接受更高的室内温度时，弹性占比分别为 26.8%（接受 27°C 室温）和 34.1%（接受 28°C 室温）。此外，在具有储能水箱的 HVAC 系统的情况下，上述总用电占比分别提高到 37.7%，46.3% 和 53.6%。当电力计算弹性高于冷机的总电力负荷时，可以关闭冷机，最大弹性总用电占比为 42%。表 4.5 列出了不同弹性源的弹性占比随时间的变化情况。

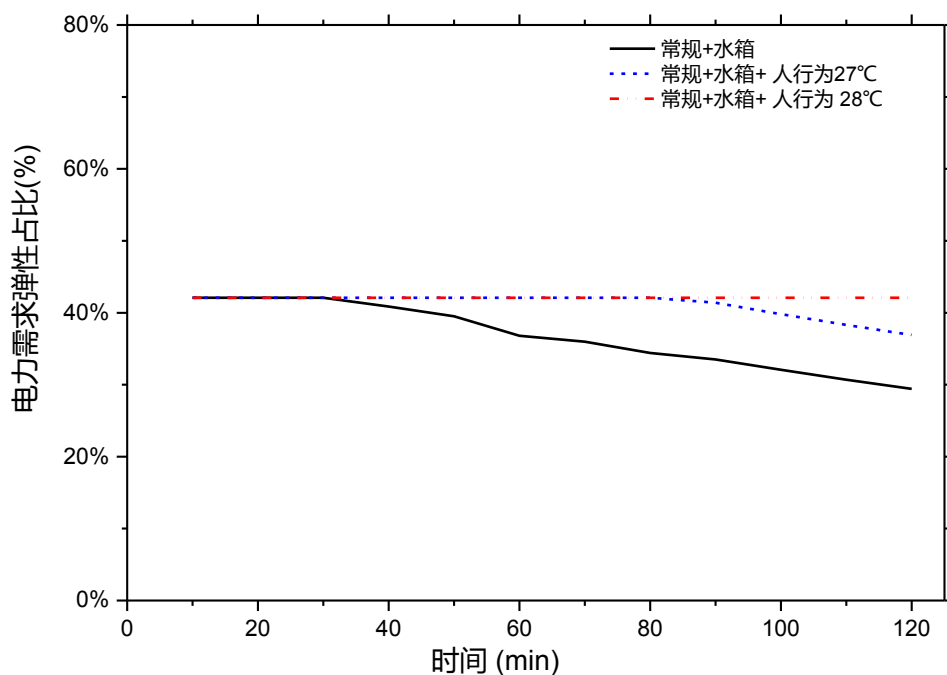


图 4.19 有储能不同弹性弹性组合弹性占比

表 4.5 各弹性源随时间的弹性总用电占比

时间(min)	蓄热体	照明	HVAC	HVAC + 热储能	人行行为 27 °C	人行行为 28 °C
10	17.90%	10.72%	22.92%	42.00%	10.91%	20.54%
20	15.65%	10.70%	20.66%	42.00%	9.78%	18.28%
30	14.62%	10.68%	19.62%	42.00%	9.26%	17.25%
40	13.93%	10.65%	18.91%	40.86%	8.91%	16.55%
50	13.40%	10.63%	18.38%	39.51%	8.64%	16.01%
60	12.93%	10.59%	17.89%	36.81%	8.40%	15.53%
70	12.54%	10.58%	17.49%	35.96%	8.20%	15.14%
80	12.20%	10.58%	17.15%	34.42%	8.03%	14.80%
90	11.90%	10.58%	16.85%	33.52%	7.88%	14.50%
100	11.62%	10.58%	16.57%	32.07%	7.74%	14.22%
110	11.36%	10.58%	16.31%	30.70%	7.61%	13.96%
120	11.12%	10.58%	16.07%	29.41%	7.49%	13.72%
均值	13.26%	10.62%	18.24%	36.61%	8.57%	15.88%

4.5 本章小节

本章以一实际办公建筑为研究对象，利用 Dymola 软件平台建立了该建筑的 Modelica 能耗模型。模型涵盖了建筑的物理围护结构、空调系统以及相应的控制系统等，并对各模型进行了详细地介绍。

首先，通过实测建筑温度数据对所建 Modelica 模型进行准确性校验，使其能够反映实际建筑的热动态特性，模型与实际建筑温度的 RMSE 为 0.48°C 。

接着，通过已校验的 Modelica 模型在需求响应情景下进行模拟，从而得到典型夏季设计日在需求响应时段内（14:00-16:00）电力需求弹性量，与本课题提出的弹性量化理论模型计算的结果进行对比分析，对理论模型的准确性进行分析，两种方法计算的弹性结果的 MAE 为 5.9%。进一步证明了本课题提出的弹性理论量化方法具有较好的准确度。

然后，通过分析办公建筑不同弹性源在需求响应时段内所能提供的弹性潜能，包括建筑蓄热体、照明、储能水箱、HVAC 系统以及人行为。蓄热体中不仅分析了围护结构，也分析了家具的弹性贡献。家具作为蓄热体往往被忽略，而从本文研究发现家具冷量释放速率最快，为 73.2%，而内墙和楼板仅为 23.9% 和 10.8%，家具在中短期需求响应中起到了关键的作用，其在蓄热体中的贡献占比约为 41.24%。照明是通过亮度的调节达到负荷的削减，弹性贡献来自直接的负荷削减以及间接照明设备散热的减少两方面。HVAC 系统则由多方面构成，蓄热体及储能水箱均通过与 HVAC 系统的耦合，最终反映到 HVAC 系统的电力弹性上，除此之外还包括新风处理负荷削减和内外传热量减少带来的负荷削减量。人行为作为一种附加的弹性潜能在本文中也进行了分析，包括两种可接受的室温设置情形，人行为的弹性量实质上由 HVAC 系统实现，通过此方法可对人行为的弹性进行独立分析，其它更高可接受的室温设置也可进行类似分析。上述负荷的削减量均统一换算为建筑的电力削减量，也即电力弹性量。

最后，针对六种不同的弹性源组合情形，分析建筑在不同情形下的弹性总用电占比。包括建筑最基础的弹性情形、有储能水箱情形以及考虑人行为情形下的弹性总用电占比情况。建筑具有更高的电力弹性意味着其参与电网响应的能力更高，并且可以应用更灵活的策略来实现经济效益及提高能效。在未来，建筑物的电力弹性将成为建筑除能源效率外又一重要性能指标。

第5章 典型建筑电力需求弹性特性及其需求响应策略研究

5.1 概述

建筑需求响应控制技术基于两个重要的基础支撑，一是以建筑智能控制仪表（Smart meter）为基础的硬件基础，另一个是以需求响应标准及控制策略算法的软件基础。随着建筑自动化及智能控制仪表的快速发展，硬件基础得到大力提升，软件基础建设方面包括 OpenADR 通讯协议标准以及不同建筑响应技术标准的制定，例如，美国加州非居民建筑的建筑标准（Title 24, 2019 Nonresidential Compliance Manual）对非居住建筑在 HVAC 系统、照明系统以及其它用电系统提出了实现需求响应所需达到的基准配置要求[16]。对于居住建筑，通常建立在家庭能源管理系统（Home Energy Management System, HEMS）上，HEMS 实现了电网与家庭设备的双向通信，从而能够实现电网用电信号与家用设备的联动响应[94]。近些年，智能电网和智能家居的发展，为 HEMS 在电网与家电设备的互联互通控制铺平了道路[95, 96]。不同于传统的能源系统，只是单向的从电网到用电设备的信息及能量流，而智能电网下家庭能源管理系统是双向的，信息流和能量流能够实现相互流动及控制，有利于建筑需求响应的实施与控制，从而优化电力的调度以及提高居民侧用电效率。正是有了这些基础的支撑，建筑需求响应控制才能够实现更加精细的负荷控制与管理。

目前，建筑需求响应控制策略有很多，常见的，有针对空调系统的需求响应控制和对家用电器的负荷管理。空调系统的需求响应控制技术具体包括建筑预冷、调节室内综合温度、降低管道静压、限定风机频率、减少风机开启数量、提高送风温度及限制水阀开度等。特别是近些年来建筑预冷技术的广泛利用，提升了空调系统用能弹性能力。家用电器的负荷管理主要为对家电设备的负荷转移及管理。若想实现需求响应的优化控制，理解各建筑电力弹性设备具有的弹性特征非常重要，也就是说各用电设备的弹性特征是进行建筑需求响应优化控制的基础。

本章首先分析不同用电设备及系统的电力弹性特征，根据设备特征分为可间断性弹性负荷、可转移型弹性负荷以及可调节型弹性负荷三类。然后，针对不同的建筑弹性特性制定与之相对应的需求响应控制策略，并举例研究了办公建筑及居住建筑案例的需求响应优化控制策略，对具有储能的能源系统仅做简要说明。最后，在不同建筑案例背景下，给出基于建筑弹性特性下的需求响应控制推荐方法。

5.2 弹性负荷种类

5.2.1 可中断型弹性负荷

可中断型弹性负荷（Interruptible Load, IL），也称为可中断负荷，它是一种较为理想的电力弹性源。IL 一般具有对供电的可靠性要求不是很高的特点，在一定经济补偿的条件下，允许在特定时段内有条件卸载，能够进行快速的电力响应[97]。IL 多在工业建筑中，例如，结合需求响应补贴收益及停产损失，在夏季用电高峰时适当关闭生产流水线[98]。在办公及居住建筑中，IL 较少。对于空调系统，当多台冷机同时运行时，可强行关闭其中部分机组，可视为 IL，但同时可通过调节综合温度及新风等措施削峰，此时可视为可调节型负荷。为分析方便，本文把空调负荷归类为可调节型弹性负荷，并在下一小节进行讨论。IL 的容量大小及可中断时长是评价该类型的重要因素，图 5.1 为各类型电力弹性负荷的实现示意图。

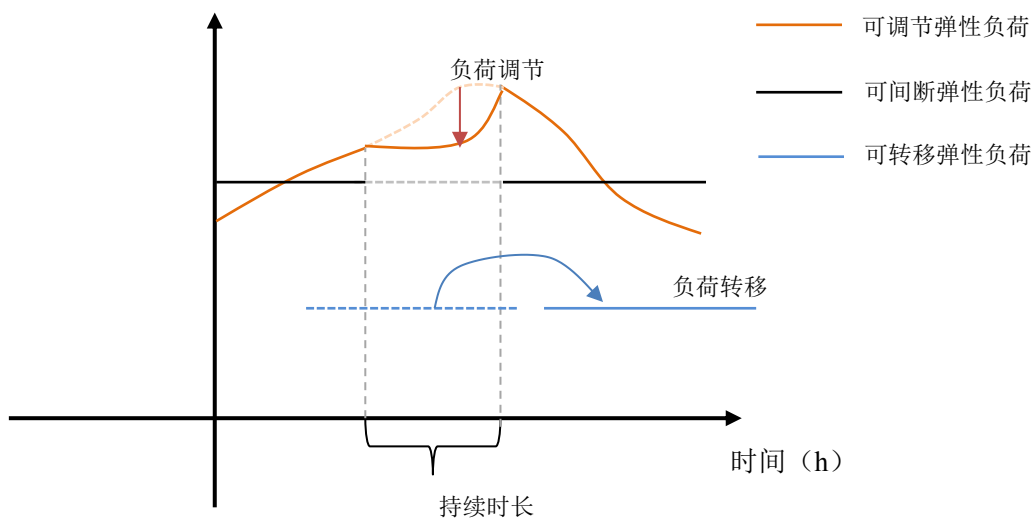


图 5.1 不同电力弹性负荷特征示意图

5.2.2 可转移型弹性负荷

可转移弹性负荷（Shiftable Load, SL）指的是可以从高峰负荷区转移到低谷负荷区的用电设备，其一般不全天工作。用电设备具有负荷转移潜能的前提是时间窗口大于工作时长，时间窗口及工作窗口的说明可见图 2.6。若可转移负荷设备的习惯工作时间不在用电高峰时段，则该设备不能够提供有效的负荷弹性。在时间窗口内，可转移负荷自由配置，提供负荷弹性的同时不影响完成任务，是一种最为理想的负荷弹性源，包括洗衣机、洗碗机、储能设备以及电动汽车等。

在需求响应控制过程中, SL 用电设备有两种不同工作模式, 一种为连续工作模式, 即设备一旦开始工作, 中间不容中断, 直至完成设定任务为止, 大部分用电设备属于该类型; 另一种为设备开始工作后可中断工作, 只要保证在时间窗口内完成既定任务即可, 例如储能设备。

5.2.3 可调节型弹性负荷

可调节型弹性负荷 (Adjustable Load, AL) 指的是可以在高峰用电时调节用电功率。建筑中存在两类 AL, 一类为不随时间环境变化的定负荷设备, 例如照明设备; 另一类为受外界环境影响的变负荷, 例如空调系统负荷。即使建筑可能不具备 IL 和 SL 设备, 但往往存在 AL 设备。负荷可调节的程度是该负荷一个重要的特征, 可用负荷降低比 (k_0) 表示。从前人研究来看, 办公建筑照明在用电高峰时期其负荷降低比可达 0.8, 全天平均值为 0.2[53]。通过对空调系统负荷调节, 例如重设温区综合温度, 负荷降低比为 0.1-0.5 不等[19, 26], 采用预冷等手段时, 峰值阶段其负荷降低比则更大[23, 75]。AL 设备需求响应控制时, 应考虑负荷可调节的上下限。

5.3 建筑需求响应控制技术介绍

5.3.1 调节综合温度(Global Temperature Adjustment, GTA)

GTA 也即调节室内设定温度, 在需求响应时段内最大温度调节幅度通常不超过 3°C , 否则会引起用户的不舒适抱怨[99]。但当受补贴等经济利益刺激下, 考虑不同建筑人行为情况, 温度调节幅度可以更大。根据温度调节方式的不同, GTA 可分为直接调节 (Direct Schedule) 和渐进调节 (Incremental Schedule)。温度直接调节指将房间设定温度即刻设置为目标温度, 本研究采用该方式; 渐进调节指通过控制系统, 在规定时间内设置升高的幅度, 例如 1.5 小时内升高 2°C , 如下图 5.2 所示。渐进调节能够实现房间温度均匀上升, 降低用户热不舒适性的风险, 也利于负荷的平稳削减, 但对控制系统提出更高的要求。

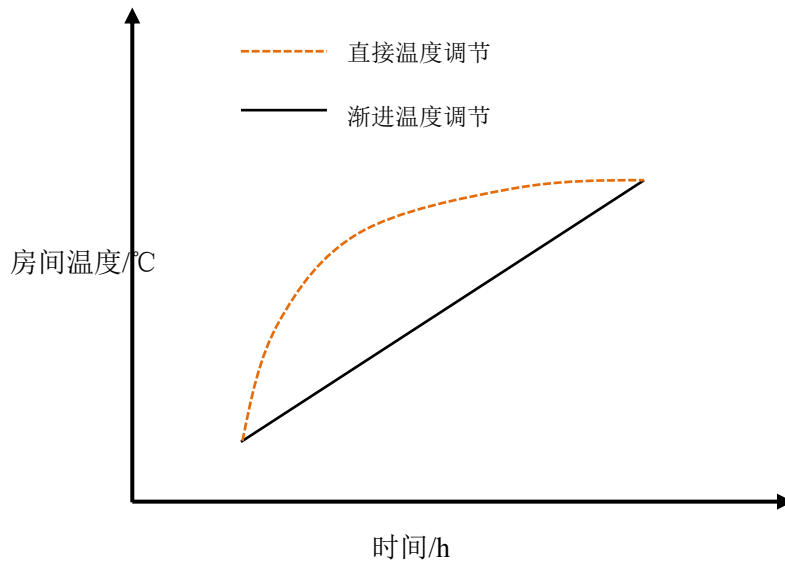


图 5.2 不同综合温度调节方式下房间温度变化曲线

5.3.2 建筑预冷(Pre-cooling)

建筑预冷是一种在非用电高峰时段冷却建筑物围护结构及内部蓄热体的策略，用以降低建筑物的峰值空调冷负荷。通过建筑预冷策略，建筑物的峰值冷负荷可以及时转移至非峰值时段，从而实现使用建筑内部蓄热体的热惰性显著降低建筑峰值制冷需求，但一般会增加空调系统整体的能耗。图 5.3 展示了普通温度设置，轻度、中度及额外的预冷策略这四种不同的控制策略下的工作日逐时室内设定温度，其中负荷高峰期的室内设定温度恒定为 26°C 。普通温度设置是此次多策略对比中的基准对照组。轻度预冷及中度预冷策略是较为简单的策略，是指在人员活动时间段之前，将室内设定温度恒定设在到 22°C ，以适当预冷建筑；在人员活动时间段中，则将室内设定温度设至 24°C 或峰值期 26°C ，使围护结构储存的冷量缓慢释放出来。轻度预冷策略的预冷开始时间为凌晨 3 点，而中度预冷则在凌晨 1 点开始。额外预冷也在凌晨 1 点开始预冷，但其试图维持围护结构的预冷状态直至负荷高峰期。人员活动时间开始后，室内设定温度恒定在舒适温度区的最低值 22°C ，直至负荷高峰期，例如下午 14:00 点以后，才将室内设定温度提高至 26°C 。

由于存在冷量储存及转移的损失，预冷策略通常会导致建筑总用能的增加，但能够把部分峰值负荷转移到其它时段。对于传统的建筑节能领域，建筑的节能是没有时间概念作为坐标的，即节约一度电无论是在早上还是在晚上都是一样的。然而，如果从整体社会利益角度看待节能，你就会发现，同样生产一度电的成本，发生在电网尖峰短缺时刻和电网富裕时刻是不一样的。无论是对于业主而言的经

济成本，还是对于整个社会而言的污染物排放，尖峰时候发出来的电往往是污染最严重的。所以不同的预冷策略，对于负荷削减最大化还是经济利益最大化的优化手段将是不同的，在下一节中将做更加详细的分析。

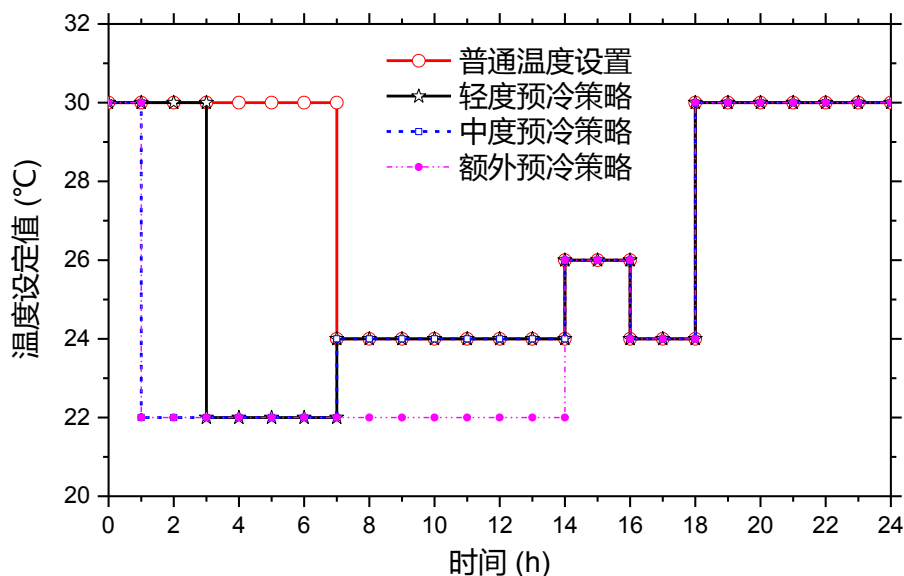


图 5.3 普通夜间设置，轻度、中度及额外预冷策略

5.3.3 调节新风风量 (Fresh Air Flow Adjustment)

根据人员入住情况来调节新风量及风机开启数量是常用的需求响应控制策略。入住率的准确预测是问题的根本，常用的预测方法包括马尔科夫链模型、多元高斯预测模型等。随着智能手机的普及，未来建筑区域内实时人流数据可通过社交软件定位功能准确获取，当这些信息与空调控制系统结合时，可为不同区域空调系统新风调节提供依据。目前，国内可通过腾讯人流数据平台付费模式获取精准的人员位置信息，可以得到每小时建筑内不同区域入住率分布情况[100]。当建筑入住率较低时可适当调低新风风量或者关闭部分风机达到削减空调负荷的目的。

5.3.4 系统平稳恢复策略

系统平稳恢复策略是避免峰值反弹的一种手段，主要包括温度缓慢复原和延长 DR 控制时间两种。例如，当需求响应事件结束后，房间温度的恢复采用渐进复原的方式，参见图 5.2；而延长 DR 控制时间通常指把 DR 控制范围延长至工作时间结束后，此时用电负荷已降低，避免二次峰值的出现。

5.3.5 其它

对于空调系统的需求响应控制，负荷削减的上限为空调系统总用电负荷。想要实现更大的用电负荷削减，还包括其它用电设备的需求响应控制。主要包括降低照明亮度、利用储能系统以及延长用电设备的时间窗口时长等。各详细控制策略可参见表 5.1 所示。

表 5.1 其它需求响应控制策略

响应控制策略	具体实施方法
降低照明亮度	① 高峰时段照明亮度降低 40% ② 自然光亮度达到 500 lx 时，关闭照明
利用储能系统	① 空调系统安装储能水箱 ② 安装电池储能系统
延长时间窗口时长	① 延长洗碗机的时间窗口至 20:00-次日 7:00 ② 延长洗衣机的时间窗口至 19:00-次日 7:00 ③ 延长充电汽车的时间窗口至 18:00-次日 8:00 ④ 其它用电设备时间窗口适当延长

5.4 不同建筑案例需求响应控制策略

5.4.1 需求响应优化目标

需求响应包括三种常见的优化控制目标，一种为负荷削减量的最大化，通过优化控制使建筑在需求响应阶段累计负荷削减量最大；一种为经济利益最大化，优化控制中通过考虑需求响应补贴及电费节省，使建筑获得最大的经济效益；最后一种为平稳削减及恢复，即建筑在响应时段内保证目标削减量的同时保持削减的平稳，特别是需求响应结束后避免二次峰值负荷的出现，该优化策略在建筑群中应用较多。以下详细介绍这三种优化控制目标。

5.4.1.1 目标 1-负荷削减最大化

当电网受极端天气、自然或人为灾难导致尖峰用电、临时性的设备故障及机组改造维修等情形，引起短时负荷短缺时，通常在不影响用户生产生活或很小影响的情况下，需要用户在短时间内尽最大可能降低用电负荷。此类需求响应的时长通常较短，常见的从半小时到几小时之间。以下以响应时段 t_d 内削减负荷量 ΔQ_{total} 最大化为目标函数，该问题的数学表达如下。

$$\max \Delta Q_{total} = Q_{IL} + Q_{SL} + Q_{AL} \quad (5-1)$$

$$\max \Delta Q_{total} = \int_0^{t_d} F_{IL} + F_{SL} + F_{AL} dt \quad (5-2)$$

式中： Q_{IL} ， Q_{SL} ， Q_{AL} ——分别为可间断型、可转移型和可调节型弹性负荷的总削减量， kJ ，式 5-2 列出了削减量与电力弹性的关系；

F ——需求响应情景下，建筑不同弹性负荷的电力弹性量， W 。

可转移负荷受到时间窗口 t_{window} 的限制，以下介绍可转移负荷的目标控制方法。可转移负荷削减最大化问题可转化为在需求响应时段 t_d 内实际需求负荷量最小化问题，如下式。

$$\max Q_{SL} = \min \sum_i^n \sum_{\theta=t_{d,s}}^{t_{d,e}} X_{i,\theta} P_{SL,i}(\theta) \quad (5-3)$$

式中： i ——对应可转移设备；

θ ——时间步长， min ；

$X_{i,\theta}$ ——可转移设备工作状态，0 为关闭，1 为开启；

$P_{SL,i}(\theta)$ ——可转移设备用电负荷， W 。

可转移负荷最小化问题实质是在可转移时间窗口 t_{window} 内，工作区间 t_{work} 与需求响应时段 t_d 交集最少问题，如图 2.6 所示。从而可以将交集最小问题转化为求距离最大问题，即 t_{work} 与 t_d 中心距离最大化问题，数学描述如下。

$$\max \sum_{i=1}^n \left| X_i - \frac{2t_{d,s}+t_d}{2} \right| \quad (5-4)$$

上式可以转为求解非线性规划最小问题，如下。

$$\min \sum_{i=1}^n \left(X_i - \frac{2t_{d,s}+t_d}{2} \right)^2 \quad (5-5)$$

$$s.t. \quad X_i + \frac{\Delta t_{work}}{2} \leq t_{window,e}$$

$$-X_i + \frac{\Delta t_{work}}{2} \leq -t_{window,s}$$

式中： X_i ——用电设备工作时间中心位置， min ；

s, e ——分别为起始时间和截止时间标记。

上述优化问题可方便利用相应非线性求解工具，本课题采用的为 Matlab 中 `fmincon` 函数，`fmincon` 函数是基于梯度的求解方法，得到的解可能为局部最优解，故本文中同时结合 `GlobalSearch` 函数进行全局寻优，得到全局最优解 X_i ，从而可根据 X_i 与未进行转移控制情形下 $X_{i,0}$ 的关系，求出最大转移的负荷量 Q_{SL} 。

可间断负荷和可调节负荷的负荷优化较为简单，可间断负荷的削减需要考虑的为可削减的时长；可调节负荷需要同时考虑可调节的时长及可调节的比例，

可调节的比例需要综合考虑牺牲用户舒适性的风险以及设备可调节上下限，优化求解过程如下。

$$\begin{aligned} \max Q_{IL}, Q_{AL} &= \min \sum_i^n \sum_{\theta=t_{d,s}}^{t_{d,e}} (1 - S_{i,\theta} k_{i,\theta}) P_{SL,i}(\theta) & (5-6) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{\theta=t_{d,s}}^{t_{d,s}+t_d} X_{i,\theta} \Delta\theta = M_i \\ & S_{i,\theta} = 0,1 \end{aligned}$$

式中： $k_{i,\theta}$ ——各用电设备负荷可调节比例，对于同一设备其可调节的比例通常为已知，对于可间断负荷， $k_{i,\theta} = 1$ ；

$X_{i,\theta}$ ——各用电设备负荷可调节状态，0 代表不可调节，1 代表可调节；

$\Delta\theta$ ——时间步长，根据设备可调整频率计算，可为分钟，也可为小时；

M_i ——各用电设备负荷允许被调节总时长。

通常设备短时间内不适合频繁的功率调节，例如频繁启停，故此类问题求解时时间步长 ΔL 不宜太短，时间步长的选择可根据设备可调整频率估计，可为分钟尺度，也可为小时尺度。式 5-6 为 0,1 规划问题，可利用 Matlab 中的 `bintprog` 函数进行求解。

5.4.1.2 目标 2-经济效益最大化

美国能源部报告将需求响应分为基于激励型需求响应(Incentive-based DR)和基于动态电价的需求响应(Price-based DR)两类[101]。激励型需求响应是指用户为获得补偿或其它时段内获得优惠电价而减少用电负荷的响应行为。动态电价型需求响应是指当用户接收到电价上升的信号后减少电力需求，而在低电价时段增加电力需求。对于建筑能源管理者而言，不同的需求响应类型需要实施不同的需求响应控制策略来实现能源效率及经济利益的最大化。

然而，我国现阶段电价比较固定，尚没有按照供需关系而形成的动态电价机制，而仅对不同用电时段（峰、平、谷）实行分时电价及总用电的阶梯电价。但近些年，我国在需求响应方面具有良好的政策导向，国家和各地区相继出台了相关的需求响应补贴政策，旨在推进我国电力需求响应的发展[102]。因此下文以激励型需求响应为例，并综合考虑分时电价，分析当建筑的需求响应目标为经济利益最大化时的优化控制策略。不同于针对需求响应时段削峰的削峰最大化问题，经济效益最大化问题中因部分负荷会转移到其它时段，应考虑全天中收益情况，该问题的数学表达如下。

$$\begin{aligned} \min Cost &= \min \left[\sum_{\theta=0}^{1440} \zeta(\theta) (P_{IL,\theta} + P_{SL,\theta} + P_{AL,\theta}) - \sum_{\theta=t_{d,s}}^{t_{d,e}} \psi(\theta) (P_{IL,\theta} + \right. \\ & \left. P_{SL,\theta} + P_{AL,\theta}) \right] / 60 & (5-7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s.t. \quad & \sum_{\theta=0}^{1440} P_{SL,\theta} = P_{SL,total} \\
 & \sum_{\theta=0}^{1440} P_{IL,\theta} = P_{IL,total} - \sum_{\theta=t_1}^{t_2} P_{IL,\theta} \\
 & \sum_{\theta=0}^{1440} P_{AL,\theta} = \bar{k} P_{AL,total}
 \end{aligned}$$

式中： $\zeta(\theta)$ ——电能费率，元/ kWh ；
 $\psi(\theta)$ ——DR 补贴标准，元/ kWh ；
 \bar{k} ——平均可调整比例；
 $t_2 - t_1$ ——间断的时长，其它符号同上。

5.4.1.3 目标 3-负荷平稳削减及恢复

平稳削减及恢复目标是指电网要求参与到需求响应中的用户在整个响应时段内保持平稳削减，同时避免需求响应结束后二次峰值的出现。这是因为当多个用户同时进行削减时，如果各用户削减曲线波动较大，则会造成新的波动，甚至二次高峰负荷更高的情形，不利于电网的平稳运行。因此在需求响应阶段对负荷削减率进行一定的限制。该目标在达到最大削减目标的同时，见式 5-1，还受到式 5-8 条件的约束。

$$\left| \frac{(P_{t_1} - P_{t_2})}{(t_2 - t_1)} \right| \leq k P_{t_1} \quad (5-8)$$

式中： P_t —— t 时刻下电力负荷， W ；
 k ——削减百分比，计算的时间步长可为分钟，具体削减比例需根据电网的具体要求，其它符号同上。

5.4.2 建筑需求响应优化控制案例

本节以一居住建筑和办公建筑为例，研究不同建筑类型在需求响应中的优化控制策略，分析以上三种不同需求弹性类型在不同削减目标情形下的控制策略以及总需求弹性量贡献，从而指导实际需求响应项目的高效运行。案例分析中的基线负荷通常可通过两种方式得到，一种是基于建筑本身的历史数据或通过历史数据进行预测，简单的有历史数据平均法，特征参数线性回归法，复杂的有通过神经网络预测，支持向量机（SVR）模型预测等，可参见本人前期的相关工作[84]；另一种为建立对应的建筑标准模型模拟求得。本文中采用第一种方法获得基线电力负荷。

5.4.2.1 居住建筑实例

该建筑坐落于德国北部的 Potsdam 市，共包含八套公寓，本文选取其中一套公寓进行冬季需求响应不同优化目标进行分析，该套公寓建筑面积为 110 m^2 。通

常, 该建筑全年没有供冷的需求, 本文的研究方法同样适用于供热情形, 故本文中对热负荷需求情形及其电力弹性进行研究, 适用于冬季需求响应项目参考。该建筑的空调系统为带有储能水箱的吸附式热泵系统, 由电加热器加热水提供热源, 该居住建筑案例及能源系统为本人在德国卡尔斯鲁厄理工学院联合培养期间所做的相关研究, 更为详细的介绍可参见已发表的研究成果[103]。表 5.2 为该建筑各设备信息, 该建筑弹性负荷来源于负荷可转移及负荷可调节型设备, 无可间断型弹性负荷。

表 5.2 居住建筑案例各弹性设备类型信息参数

设备类型	设备名	额定功率 (kW)	日工作时长 t_{work} (h) (正常工作时间)	时间窗口 t_{window} (h) (完成截止时间)
可转移型弹性负荷	洗衣机	1.34	2.0 (19:00-21:00)	7.5 (4:00)
	洗碗机	1.25	2.0 (20:00-22:00)	8.5 (6:00)
	烘干机	3.65	1.0 (21:00-22:00)	8.0 (5:00)
	电动汽车	7.00	4.5 (19:00-23:30) (例如 Nissan LEAF 30kWh, 充电功率 7kW 需要将近 4.5 小时完成充电)	8.5 (5:00)
可间断型弹性负荷	-	-	可间断时长 (h) -	
可调节型弹性负荷	设备名	额定功率 (kW)	负荷降低比	可调节时长 (h)
	照明	0.66	0.4 (6:00-8:00, 18:00-23:00)	整个需求响应时段内
	空调系统 (吸附式地源热泵+储能水箱系统)	4.50	0.2 (全天, 在房间无人时调低热负荷)	整个需求响应时段内

与夏季需求响应项目不同之处在于, 居住建筑需求响应触发的时段有所不同, 通常发生在傍晚时分[14], 本文以 19:00-21:00 的需求响应项目进行分析。为了达到该时段内的不同控制目标, 控制策略将不同。

在负荷削减最大为目标情形 (目标 1), 下图 5.4 给出了需求响应时段内负荷削减曲线。通过负荷的转移与调节控制, 在 19:00-21:00 时段内由用电负荷从基线负荷的 12.87kW 降低到 2.60kW, 降幅达到 79.83%。如果考虑电动汽车能够实现和电网双向互通, 即既可以充电, 同时具备放电功能, 则削减幅度将更大。

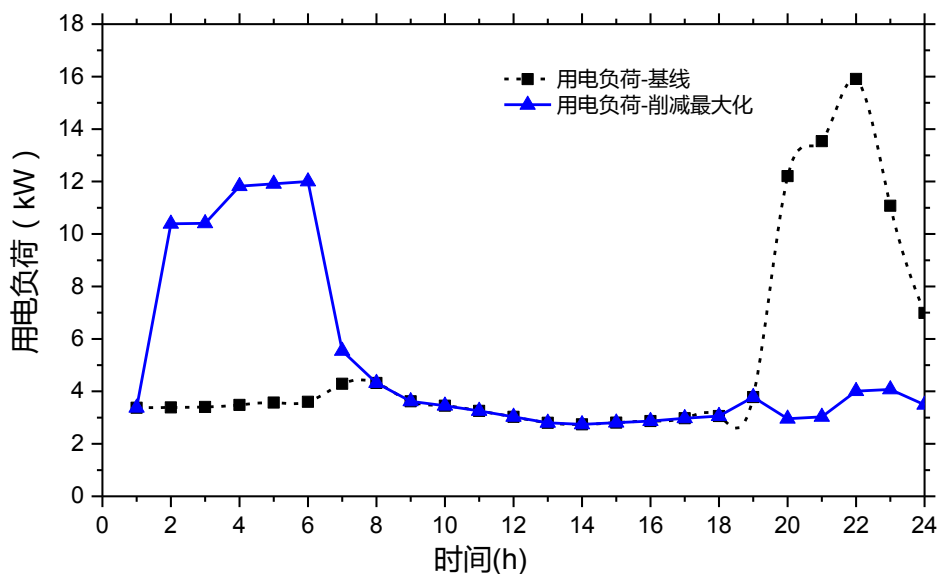


图 5.4 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况

(包含的控制设备：洗衣机，洗碗机，烘干机，电动汽车，照明及空调系统)

通常，电动汽车不需要每晚都充电或者所需充电时长不长，更特别地，有些家庭没有电动汽车。因此，本文分析中也考虑了无电动汽车情形，如下图 5.5 所示。通过负荷的转移与调节控制，在 19:00-21:00 时段内由用电负荷从基线负荷的 5.87kW 降低到 3.00kW，降幅为 49.02%，降幅明显较有电动汽车情形低。

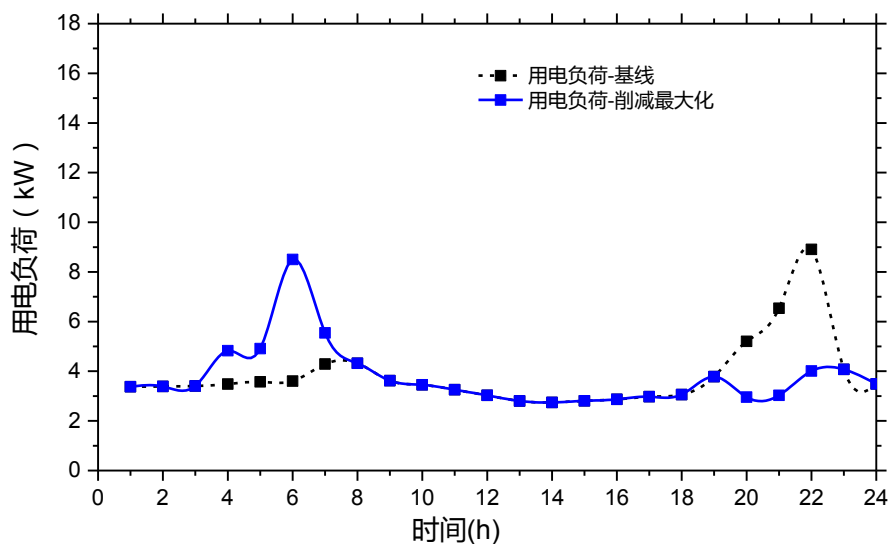


图 5.5 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况

(包含的控制设备：洗衣机，洗碗机，烘干机，照明及空调系统)

从图中可以看出大部分负荷转移到凌晨 4:00-6:00 之间,而不是深夜,是因为削减最大化控制算法通过在时间窗口内使用电设备用能远离需求响应时段最大化。通常负荷转移到深夜,例如 0:00-4:00 之间,是电网和用户所期盼的,通过经济效益最大化控制方法则能够实现负荷的转移。

由于本案例空调系统有热储能水箱,在需求响应时段内可通过储能水箱给系统供热,从而可断开电加热装置以减少电负荷需求。需求响应结束时(21:00),由于水箱温度较低,电加热器负荷会迅速上升,如下图 5.6 所示,需求响应时段内,建筑内仅有照明用电负荷,用电负荷从基线负荷的 5.87kW 降低到 0.40kW,需求响应结束后用电负荷为 5.51kW。

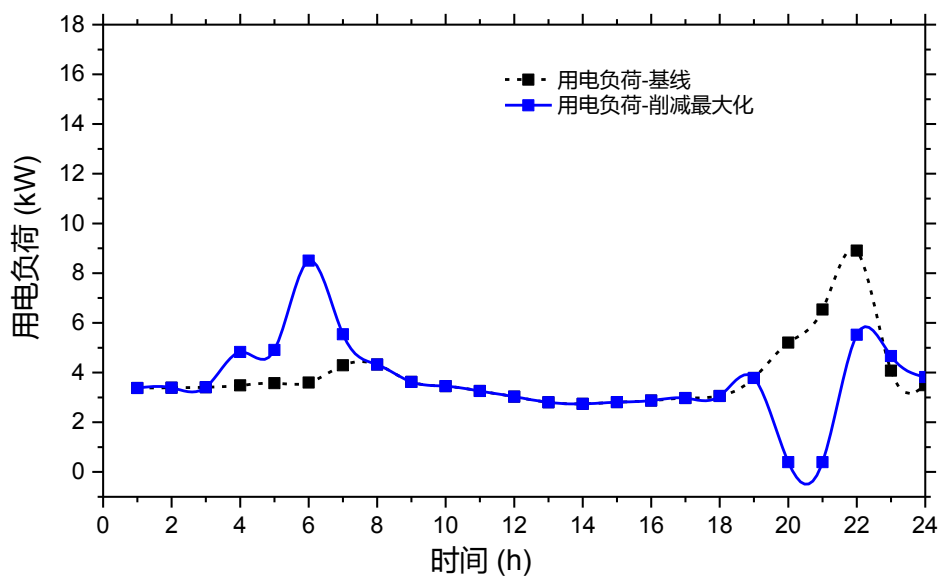


图 5.6 居住建筑案例需求响应下负荷削减情况-响应阶段全由水箱供热

(包含的控制设备: 洗衣机, 洗碗机, 烘干机, 照明及空调系统)

对于经济利益最大化(目标 2),用电费率为主要影响因素。目前德国居民电价为固定电价,为分析方便,采用上海地区电费率及需求响应补贴政策模拟分析。上海居民电价采用分档电价,本文按第一档进行计算分析。第一档峰、谷时电价分别按照 0.617 及 0.307 元/千瓦时。峰谷的时段划分为:峰时段为 6:00-22:00 以及 22:00-次日 6:00。补贴分为三类,即隔日通知避峰、当日通知避峰以及随时避峰,补贴标准每千瓦时分别补偿 0.30 元、0.80 元及 2 元,由于本建筑案例针对的为可转移弹性负荷,适合当日通知避峰类型,故按照 0.8 元/千瓦时进行分析。

本文在不考虑有充电汽车的情形下，通过目标 2 控制优化的用电负荷如下图 5.7 所示。与负荷削减最大化相比，经济效益最大化控制把大部分负荷转移到 22:00-24:00 之间，而非凌晨时段，这是由于 22:00-次日 6:00 实行统一的低谷电价，控制策略的倾向性是让各用电设备尽早完成指派任务。通过计算分析，在无需求响应控制的情形下，每天总电费为 47.9 元，而通过目标 2 的优化控制，在有无储能水箱供能下，总电费分别为 33.3 元和 39.5 元，费用节省比例达到 17.6% 和 30.5%。

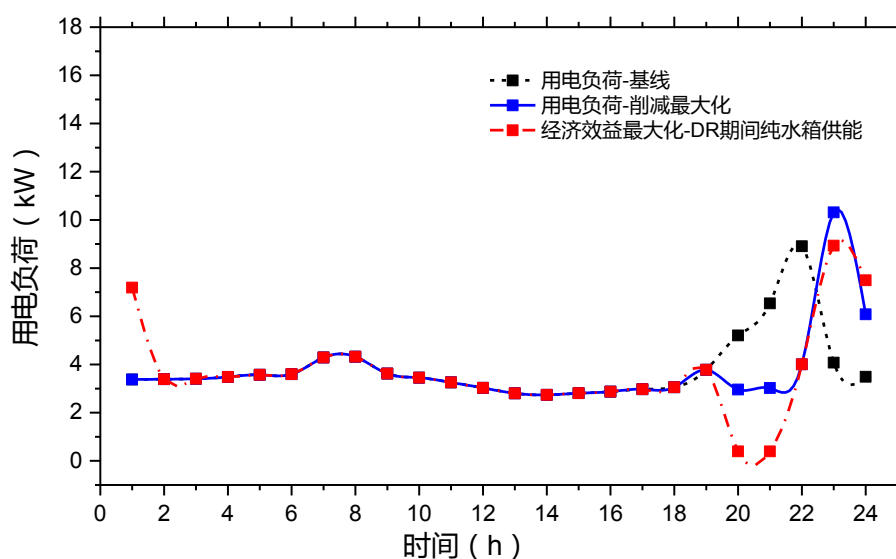


图 5.7 经济效益最大化下建筑负荷曲线

由于转移弹性具有非开即关的特性，不适合作为平稳削减控制，故在下一节针对办公建筑的可调节空调负荷时进行平稳削减目标分析。

5.4.2.2 办公建筑实例

办公建筑案例为上海市某栋办公楼，与本文 4.3.2 小节为同一建筑，不同的是在这里是对整栋办公建筑进行分析。建筑总面积为 51,072m²，其中空调区面积为 40,320 m²。本办公建筑需求响应来临时负荷的削减主要来自于可调节型弹性负荷，例如空调系统和照明设备，无可间断型和转移型设备，下表为该建筑各可调节型弹性负荷信息。

表 5.3 办公建筑案例各弹性设备类型信息参数

可调节 型弹性 负荷	设备名	额定功率 (kW)	负荷降低比 (正常 工作时间)	可调节时 长 (h)
	照明	562	0.4 (8:00-20:00)	整个需求 响应时段 内
	空调系统 (电 制冷冷水机 组)	561*2	根据弹性能力进行 综合调节分析 (8:00-20:00)	整个需求 响应时段 内
	空调系统 (冷 却水泵+冷冻水 泵+冷却塔+风 机盘管)	$90*2+90*2+37.5*2+(0.06*800+0.035*300)$ =493.5	根据冷需求及新风 需求进行综合调节 分析 (8:00-20:00)	整个需求 响应时段 内

本文以夏季 14:00-16:00 的需求响应项目为对象进行分析, 采用的需求响应控制策略为调节空调系统、照明亮度以及利用储能设备。一方面, 温区温度从需求响应开始时 (14:00) 24°C 调节到 26°C, 待需求响应结束后 (16:00) 重新调回 24°C, 期间照明亮度降低 40%。下图 5.8 显示为该建筑电力负荷的削减曲线, 从图中可以看出在需求响应阶段负荷削减较大, 均值用电负荷从 2,289kW 降低到 1,647kW, 削减比例为 28.1%。当温区温度重新调回到 24°C 后, 建筑用电形成了二次用电高峰, 其峰值为 2,435kW。

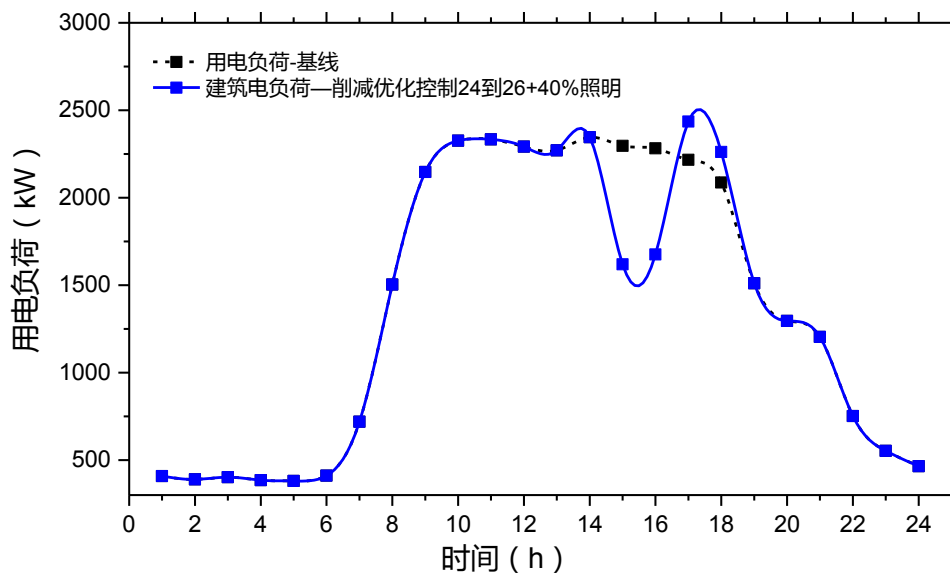


图 5.8 办公建筑需求响应负荷削减曲线
(需求响应策略: 室内温度从 24°C 调整为 26°C; 照明亮度降低 40%)

对比办公建筑负荷削减最大化和居住建筑削减最大化削减幅度，居住建筑削减幅度更大，这正是因为可转移负荷可以把大部分负荷转移到非用电高峰时段。但对于办公建筑，如果配备储能水箱、考虑接受更高的室内温度（例如 28℃）和降低新风要求等将能够削减更多的空调系统的负荷。

考虑接受更高的室内温度可归功于人行为带来的削减增加，本案例分析两种更高的可接受室温情形，一种为在需求响应阶段可接受上限设置温度为 27℃，另一种为 28℃，需求响应结束后室内温度设定调回 24℃。下图为两种情况下需求响应阶段负荷削减曲线，均值用电负荷从 2,289kW 分别降低到 1,450kW 和 1,280kW，总用电削减幅度分别为 36.7%和 44.1%。当温区温度重新调回到 24 后℃，建筑用电形成了二次用电高峰，其峰值分别为 2,538kW 和 2,628kW。

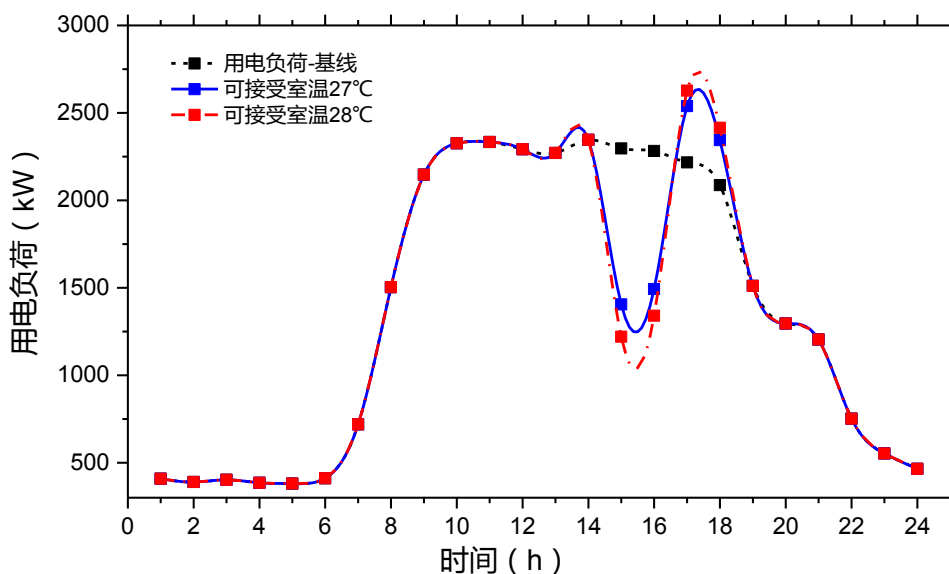


图 5.9 办公建筑需求响应负荷削减曲线

（需求响应策略：室内温度分别从 24℃调整为 27℃和 28℃；照明亮度降低 40%）

当空调系统配合水蓄冷装置时，其削减能力将得到进一步提升，此种情况下空调系统削减最大量为空调冷水机组用电负荷。本案例中空调系统水箱体积为 223.2 m³，当采用水箱供冷时，冷机关闭，但室内温度需保持在 26℃内，否则部分冷机将重新启动。下图为利用储能水箱削减的负荷曲线，均值用电负荷从 2,289kW 降低到 834kW，即建筑除去冷机后的用电负荷量，削减幅度为 63.6%。从图中可以看出，高峰负荷转移到了低谷的夜间，储能水箱利用低谷用电进行蓄冷。

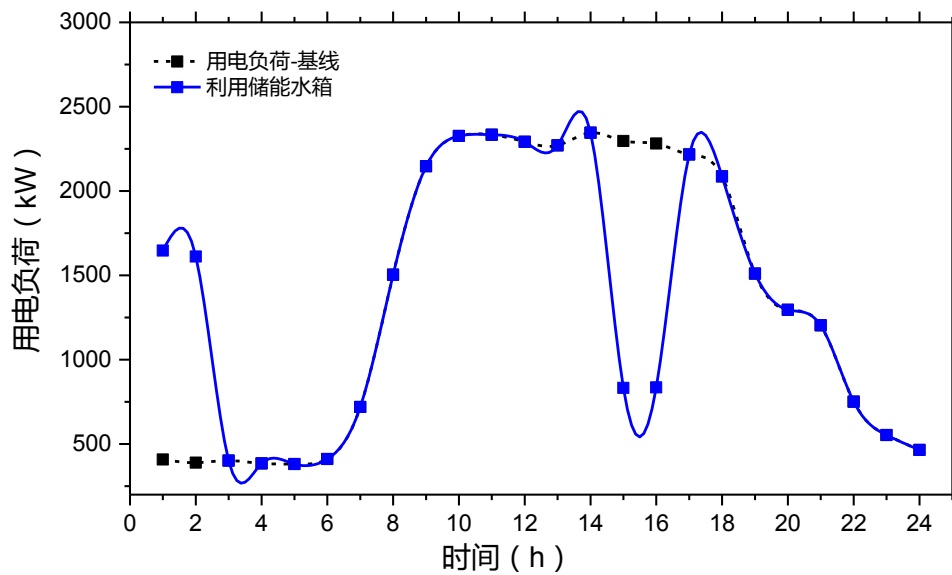


图 5.10 办公建筑需求响应负荷削减曲线

(需求响应策略: 关闭冷水机组, 直接利用水箱供冷; 照明亮度降低 40%)

本文针对不同控制策略收益最大化需求响应控制进行分析。在收益最大化的分析中, 电力价格及需求响应补贴标准是两个重要影响因素, 本文以上海的电力价格及补贴为例进行分析。上海工商业夏季电力容量为 10kV 的电价标准: 峰、平、谷时电价分别按照 1.257、0.787 及 0.299 元/千瓦时。峰平谷的时段划分: 峰时段为 8: 00-11:00、13: 00-15:00 以及 18: 00-21:00; 平时段为 6: 00-8:00、11: 00-13:00、15: 00-18:00 以及 21: 00-22:00; 谷时段为 22: 00-次日 6:00。补贴分为三类, 即隔日通知避峰、当日通知避峰以及随时避峰, 补贴标准每千瓦时分别补偿 0.30 元、0.80 元及 2 元, 由于本建筑案例针对的为可调节弹性负荷, 可随时参与避峰需求响应, 故按照 2 元/千瓦时进行分析。

与负荷削减情形类似, 以下分析几种不同需求响应控制情景下收益情况, 经计算, 在没有需求响应控制的情形下, 该建筑一天运行电费约为 32,632 元。不同情景下电费节省情况见下表 5.4。情景 1 为仅对空调系统进行负荷调节, 通过提高 2℃温区设定温度, 总电费节省比例约为 7.39%, 若提高 4℃时 (情景 2), 电费节省比例提高到 13.88%。考虑调低 40%照明亮度时 (情景 3 和情景 4), 上述两种情况的电费节省比例分别 11.87%和 18.36%。在利用蓄能水箱供冷时 (情景 5), 能够实现最大的收益, 达到 26.79%, 水箱的充冷过程则在夜间电费费率最低下进行。相比于无储能设备的空调系统, 储能系统需要额外的投资, 收益最大化需要综合考虑前期的初始投资。

表 5.4 不同需求响应控制情景下收益情况

需求响应控制情景	效益最优化控制电费 (元)	电费节省 (元)	电费节省比例
情景 1: 室温 24℃ 设置为 26℃	30,222	2,410	7.39%
情景 2: 室温 24℃ 设置为 28℃	28,103	4,529	13.88%
情景 3: 照明亮度降低 40% + 室温 24℃ 设置为 26℃	28,758	3,874	11.87%
情景 4: 照明亮度降低 40% + 室温 24℃ 设置为 28℃	26,640	5,993	18.36%
情景 5: 照明亮度降低 40% + 储能水箱供冷	23,890	8,742	26.79%

最后, 针对目标 3 的负荷平稳削减及恢复目标, 需求响应阶段需要对房间温度采取渐进式调节, 包括响应结束时温度恢复。此时, 室内温度设定值从需求响应开始的 24℃ 经两小时后达到 26℃, 在需求响应结束时, 温度设定值再经两小时恢复到 24℃。平稳削减曲线见下图 5.11 所示, 需求响应时段内削减比例为 21.4%, 较目标 1 (28.1%) 的削减比例低。对比目标 1 的控制策略, 目标 3 负荷削减更平滑, 负荷削减率分别为 -11.3 kW/min 和 -5.2 kW/min; 温度恢复后负荷的提升率则分别为 12.5 kW/min 和 5.4 kW/min。

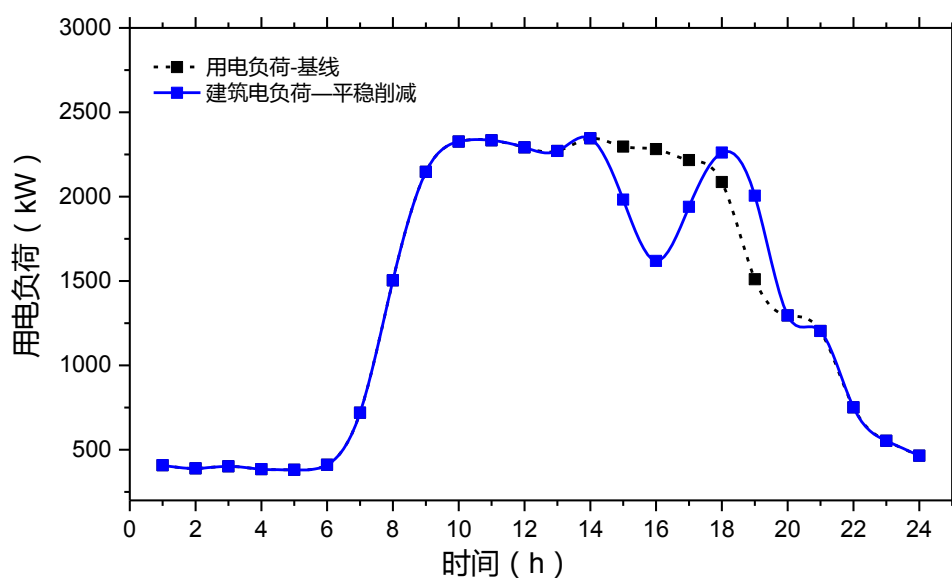


图 5.11 办公建筑需求响应负荷平稳削减曲线

(需求响应策略: 室内温度渐进式调节; 照明亮度降低 40%)

5.5 不同控制目标下需求响应控制方法推荐

根据以上的分析，对于不同的需求响应优化目标，表 5.5 列出了推荐的控制方法，供实际需求响应项目参考。

表 5.5 不同优化目标下需求响应控制方法推荐

需求响应优化目标	需求响应阶段优化控制策略及详细方法
目标 1: 负荷削减最大化	<ul style="list-style-type: none"> ① 直接温度调节：通过直接提高房间设定温度 2℃，在用户允许的情况下可为 3-4℃。 ② 建筑预冷：在夜间或用电高峰来临之前，设置较低的房间温度，例如 22℃，冷却建筑内部蓄热体。 ③ 调节新风量：降低或关闭入住率较低和空置房间的新风量。 ④ 安装储能设备：包括供冷、热系统中的储能水箱和能源系统中的储能电池。 ⑤ 降低照明亮度：在自然光充足的条件下，降低房间照明负荷 20%-60%，但需保证房间照明亮度在舒适范围内（大于 500 lx）。 ⑥ 延长用电设备时间窗口：对于洗衣机、洗碗机等家用电器设备及充电装置，工作时间尽可能避开需求响应时段。
目标 2: 经济效益最大化	<ul style="list-style-type: none"> ① 调节综合温度及预冷：同上，在低谷电价阶段预冷建筑，高峰电价阶段释放建筑冷量。 ② 调节新风量：同上 ③ 安装储能设备：同上，但需要进行投资的经济性分析决定是否应该安装。 ④ 降低照明亮度：同上 ⑤ 延长用电设备时间窗口：对于洗衣机、洗碗机等家用电器设备及充电装置，时间窗口尽可能涵盖夜间 0:00-6:00 峰谷电价时段。
目标 3: 负荷平稳削减及恢复	<ul style="list-style-type: none"> ① 渐进温度调节技术：通过渐进的方式提高房间设定温度，例如两小时内温度提高 2℃，恢复时同理。

5.6 本章小结

本章首先对建筑不同类型的负荷弹性类型进行分类，包括可间断型弹性负荷、可转移型弹性负荷和可调节型弹性负荷三类，目的是研究其在需求响应背景下对不同负荷弹性进行合理地优化控制。针对不同类型负荷弹性进行特征分析，例如可间断弹性负荷具有实时快速响应的特点；可转移弹性负荷虽然在特定时间可转移部分负荷，但受到设备时间窗口的限制；可调节负荷则需要根据外界环境的变化确定可调节比例等。这三类弹性负荷成为了建筑需求响应中电力弹性的源泉。

其次,详细介绍了建筑需求响应的控制技术。通过对不同控制技术的特点进行分析,这些控制技术构成了实现不同优化目标的基础。在理清建筑各类负荷弹性类型及特征的基础上,本章对三种需求响应优化目标进行了分析:一种为负荷削减最大化,这是负荷集成商在高峰负荷阶段所期盼的;一种为经济效益最大化,这是建筑用户所关心的;最后一种为负荷平稳削减和恢复,这是电网所要求的。通常,平稳削减与经济效益最大化和负荷削减最大化是相互矛盾的。

最后,通过一个居住建筑和一个办公建筑实例,得到不同目标下负荷削减和费用节省情况。居住建筑主要考虑可转移弹性负荷,包括各类家庭用电设备以及充电汽车,通过在时间窗口范围内的合理用电配置,实现需求响应阶段负荷的最大转移。通过该居住建筑的负荷削减最大化分析,在 19:00-21:00 的需求响应项目中,对于不同的建筑用电设备情景,至少能够实现一半以上用电负荷的转移,且实现了不少于 17.6%的电费节省。除此之外,以上海某栋办公建筑为例,在 14:00-16:00 的需求响应项目中,分析不同需求响应控制情景下的负荷削减及费用节省情况,通过对建筑温区调节综合温度、照明亮度以及利用储能水箱实现了高峰负荷的转移,建筑总用电负荷削减比例在 28.1%~63.6%之间,建筑电费节省比例在 7.39%~26.79%之间。本章中建筑案例的不同控制情景下的需求响应效果可作为其它建筑需求响应效果评估的参考,并在最后小节给出了不同控制目标下需求响应控制的推荐方法。

第6章 建筑电力需求弹性评价方法研究

6.1 概述

随着建筑技术的发展，建筑不单只是在节能、舒适方面得到提升，建筑与电网的交互式能力成为了新一代建筑发展更高的诉求。对于我国需求响应项目发展以及电网交互式建筑建设推广来说，建立一套系统的建筑电力需求弹性评价方法至关重要，从而促进现代化建筑与电网的交互式应用及建筑整体性能的评估。

建筑电力需求弹性本身是一个较新的研究领域，通过文献的研究，目前国内鲜有对于建筑弹性指标的评价方法。建筑弹性的评价可参考较为成熟的建筑能效评价等方法。一般来说，类似于此类综合评价过程包括三个过程，即指标体系的建立、指标权重测算和对象综合评估。就指标体系建立而言，文献对于能源弹性的评价指标定义不一，但主要包括弹性量（size），弹性持续时间（time）和成本（cost）这三个评价因素[29, 43, 104]。基于此，本章提出了五个评价指标，分别为弹性量（ $F_{capacity}$ ）、弹性占比（ F_{α} ）、弹性使用效率（ F_{eff} ）、效益因子（ F_{cost} ）及弹性爬坡速率（ F_{ramp} ）。其中 $F_{capacity}$ 和 F_{α} 用于衡量弹性量，反映的是建筑弹性的绝对量及相对量； F_{eff} 是时间与弹性量的度量，考虑弹性量的利用程度及利用效率； F_{cost} 是从经济收益方面进行弹性评价。

本章通过计算不同建筑实际案例的弹性指标，对不同建筑及系统类型进行弹性指标评价研究。通过建立基准建筑弹性模型，并提出了一套建筑弹性的评分方法。本章中对供冷季需求响应时段内指标评价进行了举例分析，但同时适用于供热情形评价。本章的研究路线如下图。

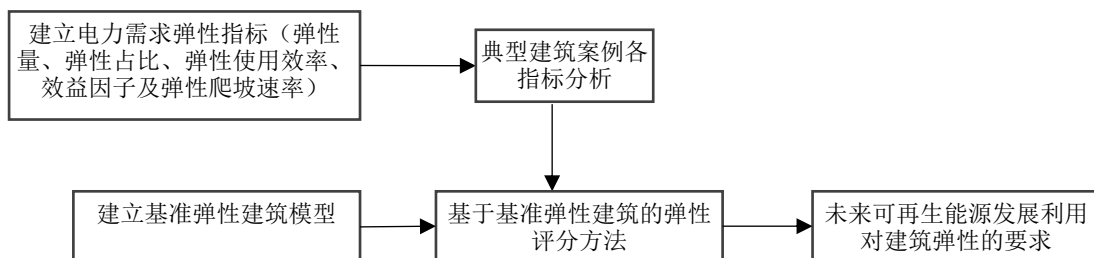


图 6.1 建筑电力需求弹性评价路线

6.2 建筑电力需求弹性评价指标

弹性的评价主要从弹性大小、持续时间、响应速率及效益等角度进行评价。弹性量及弹性占比从弹性大小方面进行评价，弹性使用效率及弹性爬坡速率则考虑了时间因素及响应速率，效益因子反映的是收益情况。

6.2.1 弹性量 ($F_{capacity}$)

$F_{capacity}$ 为建筑总的计算弹性容量，对于普通建筑，弹性来源包括建筑蓄热体和空调系统，同时可包含用电设备及人行为带来的弹性贡献。弹性容量一般与建筑的规模大小及建筑系统类型有关，例如，重型围护结构建筑的热惰性大于轻型建筑，当采用预冷策略时，其蓄热体的热弹性更大。 $F_{capacity}$ 的计算见下式，包含建筑所有弹性源。 $F_{capacity}$ 不是固定值，其大小随着建筑所处的环境条件发生改变。

$$F_{capacity}(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (6-1)$$

式中： $F_i(t)$ ——不同弹性源弹性量， W 。

6.2.2 弹性占比 (F_{α})

弹性量占比定义为总弹性容量与建筑总用电的比值，见下式，反应的是建筑中用电负荷需求的灵活性，弹性占比越大则用电灵活性越高。对于电网来说，弹性占比越大建筑与电网的交互的能力越强。在需求响应时段内，弹性占比为1的建筑可不从电网取电。

$$F_{\alpha}(t) = F_{capacity}(t) / P_{el,reference}(t) \quad (6-2)$$

式中： $P_{el,reference}(t)$ ——常规用电情况下建筑用电负荷， W 。

6.2.3 弹性使用效率 (F_{eff})

弹性容量大的建筑并不代表弹性的利用效率高。像重型围护结构的蓄热能力较大，但围护结构热量的释放是一个缓慢的过程，热量在实际需求响应项目中很难全部加以利用，特别是对于短时需求响应项目。因此，弹性使用效率的概念被提出， F_{eff} 指的是实际使用的弹性量与总弹性容量的比值。弹性使用率则能够更加准确体现建筑弹性的实际使用情况， F_{eff} 计算式方法如下。

$$F_{eff} = F_{use}(t) / F_{capacity}(t) \quad (6-3)$$

式中： $F_{use}(t)$ ——DR控制下建筑弹性用量（即DR负荷削减量）， W 。

6.2.4 效益因子 (F_{cost})

对于建筑用户或者管理者来说，一个重要的指标就是利用建筑弹性实现相应经济效益。像前一章所述，需求响应项目主要从两个方面得到经济的补偿，一是在用电高峰时期减少了建筑的用能，从而减少了用电费用，然而这部分用电需要考虑在用电低谷时用能补偿的增加量，在存在用电峰谷差的情形下总的用电费用将减小；另一部分则来自于需求响应项目负荷削减的补偿，相关介绍也可参照5.4小节。 F_{cost} 的计算方法如下。

$$F_{cost} = 1 - \frac{C_{DR}}{C_{reference}} \quad (6-4)$$

$$C_{DR} = \int_0^{t_d} [P_{el,DR}(t) \cdot \zeta(t) - \psi \cdot F_{use}(t)] dt \quad (6-5)$$

$$C_{reference} = \int_0^{t_d} P_{el,reference}(t) \cdot \zeta(t) dt \quad (6-6)$$

式中： C_{DR} ——DR控制下的电费，元；

$C_{reference}$ ——常规用电情况下（即无DR控制下）电费，元；

$P_{el,DR}(t)$ ——DR控制下建筑电负荷，W；

$\zeta(t)$ ——实时电能费率，元/kWh；

ψ ——DR补贴，元/kWh；

t_d ——需求响应时段，h或者min，其它符号意义同上。

6.2.5 弹性爬坡速率 (F_{ramp})

另外一个重要的弹性评价因素不是建筑具有多少总弹性量，而是能够提供弹性的响应速度——弹性爬坡速率（Flexibility Ramping Rate）， F_{ramp} (W/min)，由下式计算。

$$F_{ramp} = \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} \quad (6-7)$$

式中： Δt ——计算时间间隔，min；

$F(t)$ ——时间 t 下的弹性量，W；

弹性爬坡速率可以反应不同弹性源在需求响应触发后的响应速度。这对于需求响应来说非常地重要，例如可间断负荷可瞬间中断负载，其爬坡速率较大，而像建筑蓄热体等与热相关的弹性源，从热量的转移，再到空调负荷的响应，需要更长的时间，在短期的需求响应中不易得到利用。而对于电网来说，用电尖峰时刻需要快速的负荷削减响应能力，即需要较大的弹性爬坡速率。

6.3 典型办公建筑案例弹性评价指标分析

通常居住建筑的弹性主要来源于家电设备的负荷转移，空调系统方面弹性较少。原因之一为居住建筑空调系统多为独立式系统，不易于集中控制；原因之二为居住建筑空调系统弹性量相对家电设备来说较小。除此之外，各居住用户的家电设备种类不一，当增加或者减少用电设备时，其弹性指标即发生变化，故本案例中不对居住建筑进行弹性指标分析。办公建筑建成后，在没有进行改造的情形下，其弹性能力在建筑生命周期内都较为稳定，以下针对不同典型建筑类型进行弹性指标分析，包括典型小型办公建筑、大中型办公建筑及有储能水箱的大中型办公建筑。

6.3.1 典型小型办公建筑

建筑的基本信息可参照 4.3.2.1 小节，通过式 6-7 分别计算空调系统、照明设备和储能水箱的弹性爬坡速率，如下表 6.1 所示。在弹性利用初始阶段，把弹性贡献量定义为 $F_{rmap,0}$ ，此时代表弹性削减的初始值。下表列举了 2 小时时长下各弹性类型的弹性爬坡速率，负号表示弹性能力随着时间降低，正号则反之。

表 6.1 各弹性源爬坡速率

时间 (min)	蓄热体(W/min) ($F_{rmap,0}=1646W$)	照明系统(W/min) ($F_{rmap,0}=986W$)	蓄能水箱系统(W/min) ($F_{rmap,0}=2468W$)
10	-51.22	-98.6	-9.99
20	-20.59	0	-17.86
30	-9.06	0	-15.75
40	-6.03	0	-7.24
50	-4.70	0	-19.91
60	-3.96	0	-3.97
70	-3.47	0	-11.20
80	-3.11	0	-5.57
90	-2.83	0	-10.88
100	-2.61	0	-10.37
110	-2.42	0	-9.80
120	-2.25	0	-9.10

随着时间的推移，建筑蓄热体和储能水箱能够提供的弹性能力逐渐降低，而照明能够保持稳定弹性能力。除此之外，各弹性源的其它弹性指标与时间计算长度有关，例如长时需求响应能够提高弹性的使用效率。以下就不同的需求响应时长分为三类，分别为短时需求响应（0.5h），常规需求响应（2h），长时需求响应（4h）。本文分析该小型办公建筑各项弹性指标，同时考虑有无储能水箱的情况，

结果如下表 6.2。从表中数据分析可以得出，弹性使用效率在短时需求响应项目中较低，随着需求响应时间的增加，弹性使用效率改善明显。

表 6.2 典型小型办公建筑的各项弹性指标

需求响应类型	小型办公建筑-无水箱	小型办公建筑-有储能水箱
短时需求响应- 0.5h	$F_{capacity} = 3093W$ $F_{\alpha} = 0.33$ $F_{eff} = 0.09$	$F_{capacity} = 5561W$ $F_{\alpha} = 0.60$ $F_{eff} = 0.10$
常规需求响应- 2h	$F_{capacity} = 3093W$ $F_{\alpha} = 0.33$ $F_{eff} = 0.20$	$F_{capacity} = 5561W$ $F_{\alpha} = 0.60$ $F_{eff} = 0.33$
长时需求响应- 4h	$F_{capacity} = 3093W$ $F_{\alpha} = 0.33$ $F_{eff} = 0.34$	$F_{capacity} = 5561W$ $F_{\alpha} = 0.60$ $F_{eff} = 0.63$

6.3.2 典型大中型办公建筑-无热储能系统

某典型中型办公建筑总面积为 19,200m²，共 12 层，与计算弹性相关的基本信息见下表。

表 6.3 建筑围护结构及内部蓄热体参数详细信息

结构类型	几何参数		热物性参数			
	面积 (m ²)	厚度 (m)	材料	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/(m·K))	比热容 (kJ/(kg·K))
外墙	4608	0.20	保温板+水泥	2243	0.8	0.84
内墙	3072	0.10	水泥	2243	0.95	0.95
外窗	3063	0.01	玻璃	2500	0.76	0.84
天花板/楼板	19200	0.18	石膏板	2080	1.33	0.97
办公用具/文件	35265	0.03	胶合板+纸张	490	0.14	2.26

表 6.4 弹性计算所需的参数信息

基本参数	内部蓄热体总量 = 1.2×10 ⁶ kg 单位面积内部蓄热体量 = 63 kg/m ² 窗墙比 = 0.4 体型系数 = 0.14 外墙体总传热系数 = 0.8 W/(m ² ·°C) 温区温度设定值 = 26~28°C
空调系统	全水空调系统
其它用电设备信息	照明密度 = 8 W/m ² 设备密度 = 13 W/m ² 人员密度 = 5 m ² /人

通过上表的基本信息及第 6.2 节弹性指标的定义，对上述典型办公建筑进行计算，其各弹性指标见下表。因本案例没有储能系统，弹性使用效率的计算即内部蓄热体的弹性效率。弹性使用效率 16.52% 的意义为建筑蓄热体中冷量释放所占总可释放的百分比。由于内部蓄热体冷量释放是一个缓慢过程，特别是对于较厚重的内部蓄热体，很难在短时间内利用全部蓄能潜力。

表 6.5 典型办公建筑弹性指标

各指标情况 (需求响应为 2h 情形)	$F_{capacity} = 0.014 \text{ kWh/m}^2$
	$F_{\alpha} = 13.65\%$
	$F_{eff} = 16.52\%$
	$F_{ramp} = -433 \text{ W/min}$

为此，本文同时对不同时段的需求响应类型进行研究，分析蓄热体的弹性使用效率。下图 6.2 为办公家具和内部蓄热体的弹性使用效率。通常，办公用具类的内部蓄热体较内部墙体薄，更易于散热，同时考虑热量散失到总可散热量的 63% 所需时间，办公用具和内部墙体的散热时间常数分别为 1.5h 和 9.1h。该办公建筑在 0.5h、2h 和 4h 的需求响应中的平均弹性使用效率分别为 6.43%，16.52% 和 30.58%。

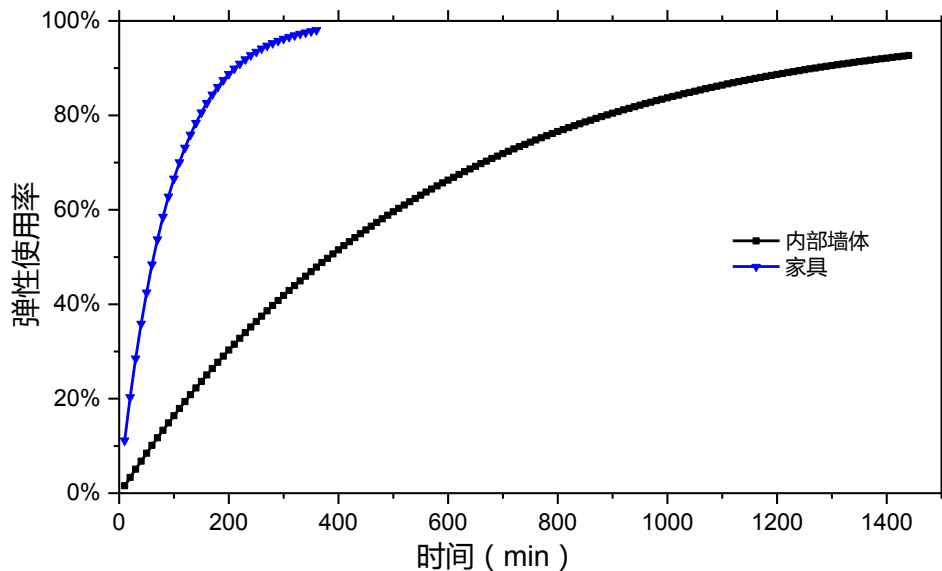


图 6.2 不同蓄热体类型弹性使用效率随时间变化关系

在建筑标准规范中，建筑各指标包括墙体传热系数等热物参数有一个规定的取值范围。建设中按照不同的设计指标将使建筑具有不同的弹性能力，以下分析上述典型办公建筑在满足设计要求下弹性指标的变化情况，从而有利于建筑弹性

的量化及利用。单位面积蓄热体重量是影响建筑弹性的一个重要因素，图 6.3 为改变单位面积蓄热体量建筑弹性量及弹性爬坡速率变化情况。从图中可以看出，随着蓄热体体量的增加，弹性量随之增加，但增加到一定程度后（ 120kg/m^2 ），蓄热体增加量对提高弹性能力的效果明显降低。其主要原因是因为随着蓄热体体量的增加，蓄热体也变得更加厚重，计算当量直径增大，导致热量不易从蓄热体中散出。

蓄热体量 x 与弹性量 y 为非线性关系，通过对曲线的拟合得到下列二次拟合公式。该式的适用范围：办公家具当量直径 $d_f = [0.03, 0.05]$ ，内部墙体当量直径 $d_w = [0.05, 0.4]$ 。

$$y = (-5\text{E} - 07)x^2 + (2\text{E} - 04)x + 0.0041 \quad (6-8)$$

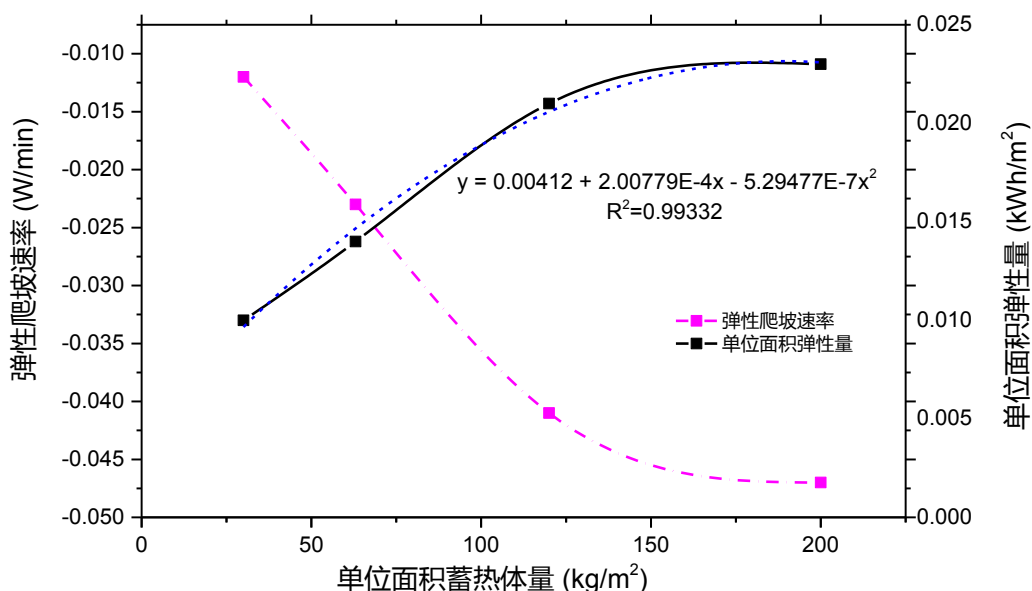


图 6.3 蓄热体体量与弹性量的关系曲线图

房间可设置温度范围越大，空调系统则可更加灵活地进行温度设定，从而提供更高的弹性用电。此外，通过适当的预冷技术也能提供更宽广的温度控制范围。图 6.4 为不同可控温度范围下弹性量及爬坡速率变化情况，虽然温度可控的范围增加能够带来弹性能力的提升，但同时要综合考虑给用户带来不适热舒适性的风险，通常温区温度舒适的控制范围在 $2\sim 4^\circ\text{C}$ 之间。温度控制范围 x 与单位面积弹性量 y 为线性关系，拟合公式如下：

$$y = 0.006x + 0.002 \quad (6-9)$$

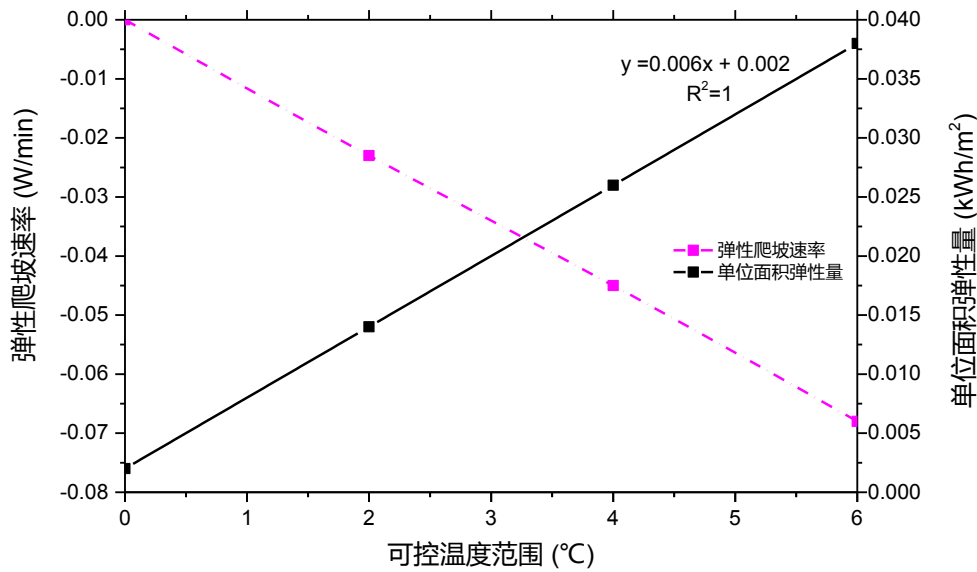


图 6.4 温度控制范围与弹性量的关系曲线图

6.3.3 典型大中型办公建筑-有热储能系统

和上一节所述的建筑案例相同，但本节所分析的建筑配置了储能水箱系统。储能系统能够极大地提升建筑的用电弹性能力，当水箱足够大时，在整个需求响应阶段，可以全程关闭冷水机组，此时空调系统的耗电只来自风机和水泵。按照相关工程经验，本案例水箱的体积为 69 m^3 ，水箱在夜间用电低谷时完成蓄冷，用电高峰时进行放能实现负荷的转移。

以下对 2h 的需求响应项目进行分析，起初关闭冷机，冷量全由水箱提供，当水箱不足以提供所需求的冷量时，启动部分冷机，下表为各弹性指标计算结果。

表 6.6 典型中型办公建筑弹性指标

各指标情况 (需求响应为 2h 情形)	$F_{capacity} = 0.030 \text{ kWh/m}^2$ $F_{\alpha} = 29.85\%$ $F_{eff} = 70.92\%$ $F_{ramp} = -1388 \text{ W/min}$
------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

对比表 6.5 可知，在安装储能水箱的情形下，建筑弹性量得到了较大的提升，从无储能系统的 0.014 kWh/m^2 提升到 0.030 kWh/m^2 。除此之外，由于水箱放能过程较快且基本不受到其它限制，弹性使用效率也得到了极大地提高。在建筑中，水箱容量的大小决定了弹性量的大小及弹性使用效率，同时也会导致初投资成本的增加，故需要针对不同的需求响应项目背景确定合理的水箱大小。

6.3.4 建筑弹性指标范围研究

建筑弹性能力的改善并非免费，在建筑基础弹性范围内，需要增加额外的控制系统对弹性加以利用，如果需要额外提升建筑的弹性能力，还需要增加具备用能需求的弹性系统，例如储能系统等，这将增加相应的成本[29]。对于不同的建筑系统类型，其弹性能力和成本的关系不同，下图 6.5 为建筑弹性占比的经济性示意。成本曲线由分段函数构成，在弹性利用的初始阶段，可将建筑本身的弹性合理的利用，其成本较低，如图中的阶段一；在中间阶段，负荷控制已达到弹性的最大化利用，此时需要对建筑进行适当改造来增加弹性能力，例如增加保温及蓄热体量等，如图中的阶段二；在最后阶段，需要增加相应的储能系统来提高弹性，此时投资成本也急剧增加，如图中的阶段三。收益随着弹性能力的增加而直线型增加，其与成本曲线的交点即为建筑弹性改善的最佳收益点，与成本曲线所构成的面积(图中阴影区域)为利润。当超出最佳收益点继续增加建筑弹性时，成本将大于收益，是不经济的。因此，对于建筑而言，弹性的改善不是越多越好，需根据实际建筑的弹性经济性曲线，找到建筑弹性改善的最佳点。

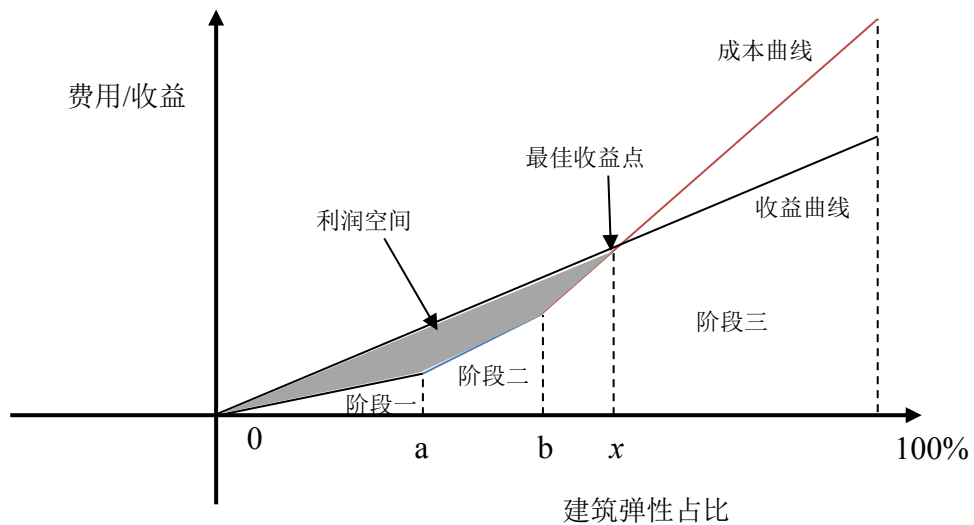


图 6.5 建筑弹性占比的经济性示意图

因此，研究建筑弹性能力的提升与成本之间的关系具有非常重要的意义。在得知弹性能力与成本曲线的基础上，结合现阶段我国需求响应的相关补贴政策及电力价格，找到我国建筑弹性改善及利用的最佳方式，并制定建筑各弹性指标合理的取值范围，指导建筑弹性的合理开发与利用。

本文中成本的计算分为上述的三段，则总利润的计算式如下：

$$Y = k_4 \int_0^x x dx - k_1 \int_0^a x dx - k_2 \int_a^b (k_2 x + m) dx - k_3 \int_b^x (k_3 x + n) dx \quad (6-10)$$

式中： a, b ——分别为阶段一和阶段二结束时建筑弹性占比；

k_1, k_2, k_3, k_4 ——曲线的斜率，与实际建筑相关；

m, n ——阶段二和阶段三成本曲线的截距，与实际建筑相关。

本文所用案例与 6.3.1 节相同，建筑平均用电负荷需求为 9.3kW，经计算，该案例阶段一和阶段二结束时建筑弹性占比分别为 $a=29\%$ 和 $b=48\%$ 。

提升及利用建筑弹性的成本来自两个部分，一部分为提升建筑弹性的初始设备投资，另一部分为运维费用。在阶段一中，需要安装需求响应控制仪表来实现需求响应控制，实施成本的计算可参考文献[105, 106]；在阶段二中，建筑的弹性改造包括对建筑围护结构的改良、智能家居的使用等，成本可根据文献[107]进行估算；在阶段三中，主要包括热储能和电池储能等储能设备，其成本曲线根据文献[108]进行估算。结合本节中的实际案例，各阶段成本参见下表。

表 6.7 不同项目阶段成本需求

项目	成本类型	成本（元/kW）
需求响应控制实现 (阶段一)	初投资	400
	运维费用（10 年期）	100
弹性改造（阶段二）	初投资	1500
	运维费用（10 年期）	500
安装储能系统（阶段三）	初投资	2500
	运维费用（10 年期）	1500

最后，收益曲线主要取决于当地电价和需求响应的补贴政策。根据国家发改委文件《关于疏导华东电网电价矛盾有关问题的通知（发改价格[2004]1039 号）》，目前在华东地区需求响应项目补贴的标准分为三种情形，隔日通知避峰、当日通知避峰以及随时可中断用电避峰每千瓦时分别补偿 0.30 元、0.80 元及 2 元。电价则按照我国的峰平谷电价政策，详见 5.4.2 小节。

随着弹性占比的增加，在需求响应阶段削减负荷增加，收益来源于峰谷差电价及负荷削减两个部分。需求响应项目年均参加的时长约为 20-100 小时[109]，根据不同需求响应时长，本文假设年均参与需求响应 50 次，每次持续 2 小时，利用峰谷差电价获取利益，并计算未来十年期内的收益情况，绘制了下图 6.6 所

示的成本及收益曲线图，从图中可以看出，本案例的最佳收益点为弹性占比 62% 时。下表列出了本案例各相关计算参数信息。

表 6.8 建筑案例成本及收益曲线参数值

参数	数值
a	0.29
b	0.48
k_1	9.30
k_2	37.2
m	-10.42
k_3	74.40
n	-35.71
k_4	33.00

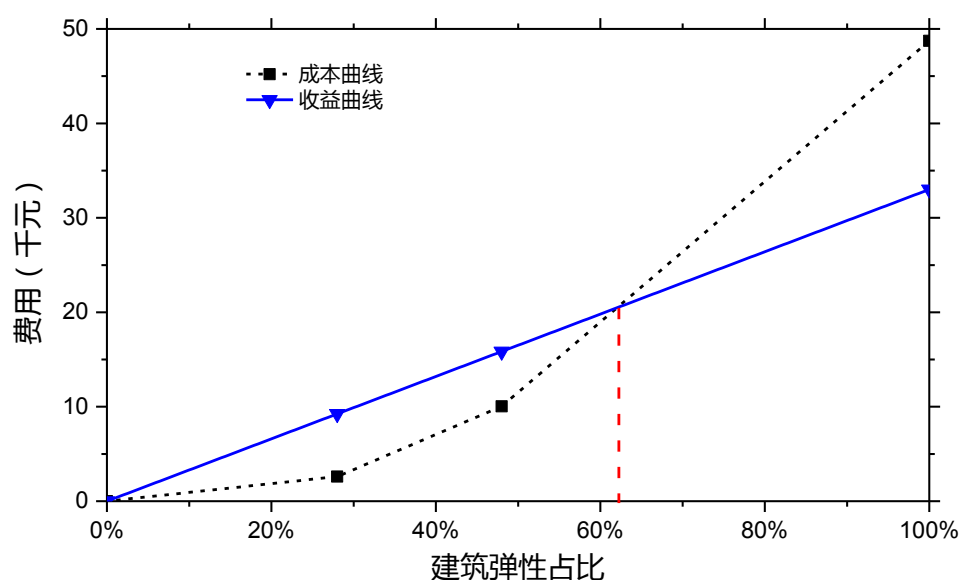


图 6.6 建筑案例成本及收益曲线

6.4 建筑电力弹性评分方法

建筑用电需求弹性能力大小如何合理评价是本节的重点，本节通过建立基准的建筑模型计算其电力弹性能力，从而进行实际建筑与基准建筑的对比，得出建筑的电力弹性评分体系。评分时考虑不同弹性源（蓄热体、用电设备、空调系统、人行为、储能设备等）的分项贡献，最后得出总得分。

6.4.1 基准建筑弹性模型

基准建筑弹性模型参考 ASHRAE 90.1-2010 能效标准中的基准模型，以该基准模型计算建筑基准弹性量。该基准模型包括对建筑围护结构、HVAC 系统、能源系统、照明设备及其它用电设备等在内的相关要求，包含的主要项目在下表 6.9 列出，其余相关要求可参照 ASHRAE 90.1-2010 标准。

表 6.9 建筑弹性基准模型各项目主要要求

项目	强制规定
围护结构	① 各类型墙体热阻、总 U 值详细提供 ② 门窗的总 U 值、空气渗透率详细提供
HVAC 系统	① 空调系统可实现自动控制 ② 各分区能够实现独立温度控制 ③ 当房间超过 30 分钟无人时，该区域空调系统自动关闭
照明系统	① 所有的内部照明均能进行手动和自动开关控制 ② 当房间超过 15 分钟无人时，该房间照明关闭 ③ 照明系统的照明效率不低于 35 lumens/W
其它	① 插座负荷可实现自动控制 ② 具有人员入住情况的识别设备及功能

6.4.2 弹性改善率 κ

弹性改善率是拟建或已建建筑与基准建筑弹性量的差值百分比，是基于 6.2 小节所提出的弹性大小角度进行评价。全面的电力弹性评分应同时考虑响应速率及效益等多方面，但因课题研究时间所限，本文简化为从弹性大小维度进行评分分析。其计算公式如下式，值为负时该建筑电力需求弹性低于基准建筑，为零时与基准建筑相同，为正时大于基准建筑。

$$\kappa = \frac{(\text{目标建筑弹性量} - \text{基准建筑弹性量})}{\text{基准建筑弹性量}} \times 100\% \quad (6-11)$$

6.4.3 建筑弹性评分表

基准建筑模型各项参数的限定考虑到建筑能效与收益之间的权衡，并不代表建筑弹性能力好坏。本文分析的弹性来源于内部蓄热体、HVAC 系统、人行为、用电设备及储能系统。对于几类不同的弹性源权重的选择至关重要，通过权重的设置体现不同弹性源的重要程度，比如，美国的能源环境先导 LEED 对不同评价项目设置了不同的权重，其中能源和大气环境权重为 0.25 最大。权重的确定方法有很多，包括德尔菲法、主成分分析方法及层次分析方法等[110]。德尔菲法由专家根据以往经验判断，主观性较强；主成分分析方法是一种客观方法，但本文中各弹性源权重多为定性因素。因此，本文采用层次分析方法对不同弹性源权重

进行确定。层次分析法中采用的评价标度和具体含义参见下表 6.10，其成对比较矩阵如表 6.11 以及表 6.12，分别计算两组矩阵的特征向量即为权重向量，为 $w_1=[0.12, 0.35, 0.35, 0.18]$ ， $w_2=[0.08, 0.21, 0.22, 0.11, 0.38]$ 。

表 6.10 层次分析法评价标度和含义[110]

标度	含义 (A 与 B 相比较)
1/9	A 比 B 极端不重要
1/7	A 比 B 强烈不重要
1/5	A 比 B 不明显重要
1/3	A 比 B 稍微不重要
1	A 比 B 同样重要
2	A 比 B 稍微重要
3	A 比 B 明显重要
7	A 比 B 强烈重要
9	A 比 B 极端重要
2,4,6,8,1/2,1/4,1/6,1/8	上述判断中间值

表 6.11 基于 Santly 1-9 标度法的成对比较矩阵 (不含储能系统)

各弹性源	A1	A2	A3	A4
A1	1	1/3	1/2	1/2
A2	3	1	1	2
A3	2	1	1	3
A4	2	1/2	1/3	1

备注：A1-内部蓄热体；A2-HVAC 系统；A3-人行为；A4-用电设备

表 6.12 基于 Santly 1-9 标度法的成对比较矩阵 (含储能系统)

各弹性源	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/3	1/2	1/2	1/5
A2	3	1	1	2	1/2
A3	2	1	1	3	1/2
A4	2	1/2	1/3	1	1/3
A5	5	2	2	3	1

备注：A5-储能系统，其它同上

建筑弹性综合改善系数可根据下式计算：

$$\kappa_{tot} = \sum_{i=1}^5 w_i \kappa_i \quad (6-12)$$

建筑弹性改善率与其实现难易程度如下图 6.7 所示。通常，在低改善率阶段，提升建筑弹性能力更加容易，越到后阶段则更加难于实现，到最后只有通过增加其它弹性源系统才能进一步提高建筑的弹性能力。因此，得分与弹性改善效果并非线性关系，而是指数型关系。以基准建筑模型的弹性能力作为评分基准，对新建建筑和已有建筑弹性能力进行评价，当所述建筑弹性小于基准弹性时，不得分；当所述建筑弹性大于基线弹性时，根据弹性改善率比例大小，计算弹性得分，一种建筑的弹性评分及评级方法可参见下表 6.13。

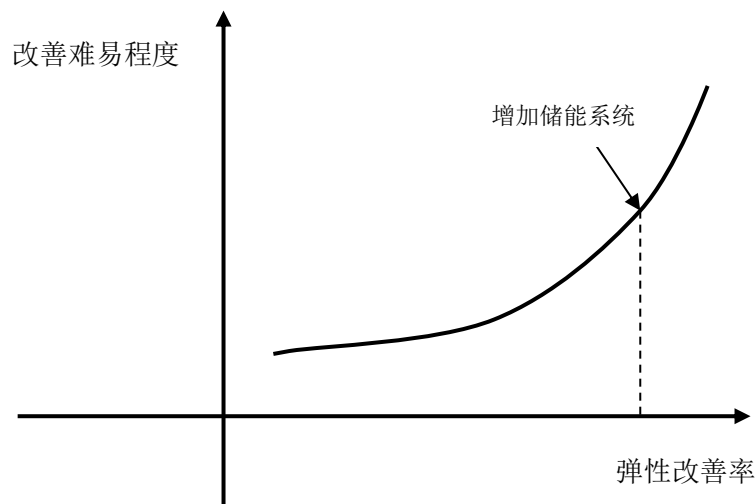


图 6.7 弹性改善率与难易程度关系

表 6.13 弹性改善率与得分、弹性评级

改善率	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	≥100%
得分	0	11	22	35	49	65	82	101	123	146	172
弹性评级	一星 (0~35 分)			二星 (36~82 分)				三星 (≥83 分)			

6.5 建筑弹性与可再生能源利用

可再生能源作为未来化石能源的理想替代者，其间歇性、不稳定等问题限制了其发展速度。近些年来，持续快速发展的太阳能和风能超过了电网的消纳能力，“弃风弃光”的问题日益凸显，特别是风能和太阳能较为丰富的我国三北（华北、东北和西北）地区[111]。间歇性可再生能源的接入导致电网的不稳定是目前普

遍存在的问题。传统的做法是通过建立大量储能电站[112, 113]、覆盖区域更大的电网等解决该问题,但存在投资成本过高等问题。如果能够通过建筑本身的建筑电力需求弹性,进行弹性合理调度利用,这是电网交互式建筑所期待的。建筑电力需求弹性体现其对电网负荷波动的平衡能力,通过弹性用电消纳电网波动,可促进更多的可再生能源在电网中的应用。在当今可再生能源快速发展的背景下,本节通过研究建筑弹性改善率与电网可再生能源接入比例之间的关系,旨在得出未来电网可再生能源快速发展下电网交互式建筑应具备怎样的电力需求弹性能力。

传统的电网调平衡问题依赖于调峰类电厂,该类电厂运行小时数和设备使用效率较低。当未来电网的弹性需求不再依赖于增加调峰电厂,而是通过建筑自身的电力需求弹性,那么建筑本身需要怎样的弹性能力或者如何对现有建筑进行弹性改善才能满足可再生能源发展的需求的问题将变得非常紧迫。本文以间歇式可再生能源风能和太阳能为分析对象,图 6.8 给出了风电+太阳能发电比例与建筑弹性改善的定性关系。因建筑本身具备一定的弹性能力,从而在不做任何弹性改善时建筑已具备了一定的弹性能力,可接纳间歇式可再生能源比例为 $X_0\%$ 。当未来电网中电能供给全部来源于可再生能源时(即风电+太阳能发电占比为 $X\%$ 时,可再生能源还包括其它水力发电等,故 $X\% < 100\%$),建筑弹性应该满足什么条件是非常值得研究的问题。

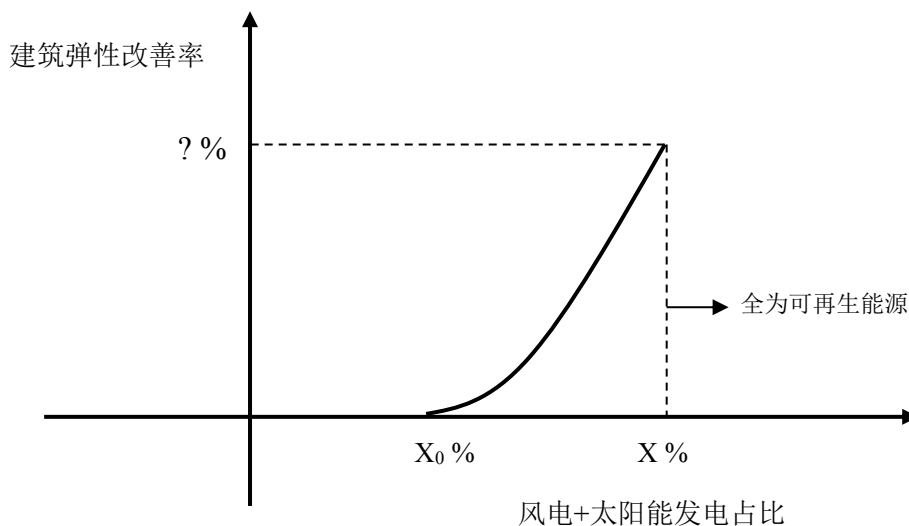


图 6.8 风电+太阳能发电比例与建筑弹性改善的关系曲线

为了研究上述问题,首先,做了如下几点假设和说明:

- ① 未来电网中弹性的需求全部来自于建筑弹性本身;
- ② 建筑总用电占整个电网总用电的 73%[114];

- ③ 通过理论模型计算，基准建筑的电力弹性占比约为 $F_{\alpha,base} = 30\%$ ；
 ④ 由于还包含其他发电相对较为稳定的可再生能源，如水电、生物质和地热等，当 $\alpha = 70\%$ 时可以认为电网用电全部来源于可再生能源[44]。

把风能和太阳能在电网中的发电比例定义为 α ；太阳能在间歇式可再生能源中的比例为 β ，分别由下式计算。

$$\alpha = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [P_{wind}(t) + P_{PV}(t)]}{D} \quad (6-13)$$

$$\beta = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{PV}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} [P_{wind}(t) + P_{PV}(t)]} \quad (6-14)$$

式中： P_{wind}, P_{PV} ——分别为风能及太阳能每小时平均发电功率，kW；

D ——全年总发电量，kWh

电网中的净负荷的变化率 $R_{NL}(t)$ 是实时负荷需求变化率、太阳能负荷变化率及风能负荷需求变化率的线性关系组合，由下式计算。净负荷的变化率即电网所需要的用电弹性需求，由建筑提供。

$$R_{NL}(t) = DR_L(t) - \alpha\beta DR_{PV}(t) - \alpha(1 - \beta)DR_{wind}(t) \quad (6-15)$$

$$F_{buildings}(t) = R_{NL}(t)/0.73 \quad (6-16)$$

$$F_{buildings}(t) = DF_a \quad (6-17)$$

$$\gamma = (F_a - F_{base})/F_{base} \times 100\% \quad (6-18)$$

式中： γ ——建筑弹性改善率，%；

$R(t)$ ——逐时负荷变化率，W/h， $R(t) = P(t) - P(t - 1)$ ， NL 表示净负荷需求， L 为实际负荷， $wind$ 为风电负荷， PV 为太阳能发电负荷，其它符号同上；

综合式(6-15) ~ (6-18)可得风能和太阳能总发电比例与建筑弹性改善率之间的关系式如下。

$$R_L(t) - \alpha\beta R_{PV}(t) - \alpha(1 - \beta)R_{wind}(t) = 0.73 * F_{base}(1 + \gamma) \quad (6-19)$$

风能和太阳能的负荷变化率受到所在地气候的影响。太阳能发电具有良好的周期性，在早晨的时候太阳能发电接入电网，建筑需提供增加用电的弹性能力，至傍晚太阳落山的时候，太阳能发电负荷骤降，建筑需提供减少用能的弹性能力。风能则比较难以预测，需通过历史统计数据进行分析。文献[44]中对风能和太阳能的负荷变化率做了大量研究，根据不同的可再生能源占比情况，绘制了不同地区风能和太阳能负荷变化率云图。

据国际能源署的预测[115]，在可再生能源利用较高的欧洲国家，到 2035 年，太阳能+风能发电将占总发电量的 35%左右，到 2050 年，这一数字将达到 50%。

我国相对较低些，分别为 28%和 36%[116]。为得到风能和太阳能总发电比例与建筑弹性改善率之间的关系，本文选取不同风电+太阳能发电比例 α ，分别为 10%、24%、30%、50%及 70%，太阳能和风能发电的比例为定值 $\beta = 50\%$ ，并根据文献[44]选择与我国气候环境接近地区 Italy，计算电网中的净负荷的变化率，见表 6.14。

表 6.14 不同风能+太阳能发电比下电网净负荷变化率[44]

α	10%	24%	30%	50%	70%
$R_{NL}(t)$	0.25	0.35	0.5	0.6	0.95

通过以上参数选取，绘制了如图 6.9 所示的关系曲线。从图中可知，风电+太阳能发电比例小于 41%时，建筑弹性改善率小于或者等于 0%，此时表明不需要对建筑弹性进行改善，充分利用建筑本身的弹性能力即能够满足风电和太阳能的接入要求；当再增加风电和太阳能在电网中的接入比例，则需要对建筑弹性进行改善才能防止“弃风弃光”现象的发生；当电网全为可再生能源供给时($\alpha = 70\%$)，需要对现有建筑弹性能力提升 2 倍左右才能满足电网供需平衡问题。从图中二次曲线拟合曲线可以看出，当风电+太阳能发电比例越大时，对建筑弹性的改善提出了更高的要求。

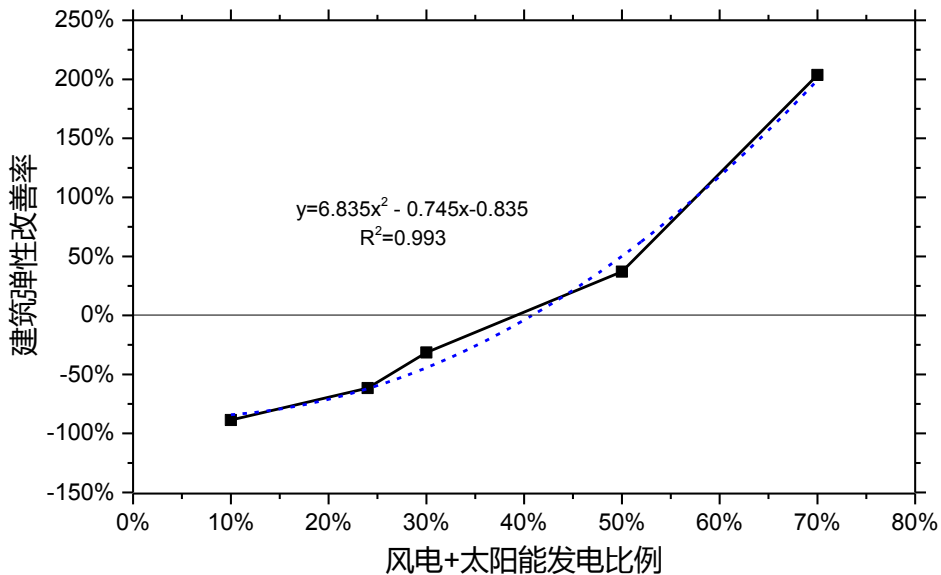


图 6.9 可再生能源发电比例与建筑弹性改善的关系

6.6 本章小结

本章首先从弹性大小、持续时间、使用效率等评价角度，提出了五种不同的评价指标。运用这些指标对典型小型及大型办公建筑进行各指标分析，得出目前

我国现有建筑电力弹性的基本现状。并对于有无热储能系统的建筑进行分析，结果表明热储能不但大大提升建筑弹性量，同时也能改善弹性整体使用效率。通过蓄热体与建筑弹性的关系研究，得出了蓄热体量（ x ）与弹性量（ y ）的关系式： $y = -5E-07x^2 + 0.0002x + 0.0021$ 。通过对一建筑案例的经济性分析，得出了最经济的建筑弹性占比约为 62%。

其次，采用层次分析方法对不同弹性源权重进行选择，得出综合弹性改善率的计算方法，研究表明弹性的改善随着改善率的增加变得更难。弹性的权重从大到小依次为储能系统、人行为、HVAC 系统、其它用电设备、内部蓄热体。并通过建立建筑基准弹性模型，基于该模型提出了一套弹性评分方法。弹性得分从 0 到 172 分，并把建筑弹性评价分为三个星级，一星级（得分 0~35 分）、二星级（36~82 分）、三星级（ ≥ 83 分）。

最后，利用该评分方法，得出了未来随着可再生能源的发展，建筑应具备的基本弹性能力，才能防止“弃风弃光”现象的发生。分析表明，基准建筑的需求弹性占比约为 30%，能够满足占电网总负荷 41%的可再生能源接入要求。在未来，若全由可再生能源作为能源供应，建筑的电力需求弹性占比需达到 90%左右，可再生能源发电比例（ x ）与建筑弹性改善率（ y ）的拟合关系式： $y = 6.8351x^2 - 0.745x - 0.8351$ 。

第7章 结论与展望

建筑需求响应是未来我国实现电网用电供需平衡极具前景的举措,也为未来实现大规模可再生能源接入电网提供了可能。本课题研究建筑的电力需求弹性是需求响应的基础,只有搞清楚建筑各弹性源传递及叠加机理的情况下,结合各弹性源特点,才能更好地实现精准的需求响应控制,充分利用建筑本身的电力需求弹性资源。因此本课题重点研究了建筑中各类与热有关及无关的需求弹性源其弹性量化方法。主要结论可为电网从供给侧到需求侧的供需交互控制提供理论依据及实际指导。

7.1 主要结论

本课题以办公建筑和居住建筑为对象,建立了一套建筑电力需求弹性的理论量化方法,可参见附录 A,并通过实验和模拟进行了较为全面的验证分析。以此为理论支撑,研究了建筑需求响应的优化控制策略及建筑电力需求弹性的评价方法。

主要结论如下:

(1)利用动态传热学分析方法,建立了热环境类电力需求弹性的量化模型,通过建筑及能源系统基本信息的输入,该模型能够在需求响应实施前计算建筑的需求弹性能力。通过实验验证分析,理论量化模型与实验结果 MAE 为 6.8%,所建理论量化模型具有一定的准确性。通过模拟研究的分析,与本课题提出的弹性理论量化模型得出的结果进行对比分析,两种方法计算的弹性结果的 MAE 为 5.9%,进一步证明了本课题提出理论量化模型具有一定的可靠性。

(2)蓄热体中不仅分析了围护结构,也分析了室内家具的弹性贡献情况。以两小时的需求响应为例,研究发现家具冷量释放速率最快,两小时内冷量释放达到总可释放冷量的 73.2%,而内墙和楼板仅为 23.9%和 10.8%,家具在中短期需求响应项目中起到了关键的作用,其在蓄热体中的弹性贡献占比约为 41.24%。通过不同蓄热体量对建筑弹性的研究,得出了单位面积蓄热体重量(x)与单位面积弹性量(y)的拟合关系式: $y = -5E-07x^2 + 0.0002x + 0.0021$ 。通过对空调系统 HVAC 弹性来源的分析表明,对于常规建筑,建筑蓄热体是 HVAC 系统具备弹性的最主要的因素,弹性源的贡献大小依次为建筑蓄热体、照明设备散热、外围护结构传热、新风处理负荷、室内空气热惰性。在常规需求响应中(响应时间为 2 小时),常规建筑系统即使考虑居住者能够接受更高的房间温度,也很难在

整个需求响应阶段全程关闭冷机来降低用电负荷。而对于采用储能水箱的建筑系统，其能够提供的建筑弹性大大地增加，甚至能在整个需求响应阶段关闭冷机，实现最大的 HVAC 系统弹性。

(3) 在已知建筑的电力需求弹性特征的前提下，建筑用电需求弹性资源能够实现更好的利用。以一典型居住建筑为例，在 19:00-21:00 时段内的需求响应项目中，至少可实现一半以上用电负荷的转移，且实现了不少于 17.6% 的电费节省。以上海某栋办公建筑为例，在 14:00-16:00 时段内的需求响应项目中，不同需求响应控制情景下建筑总用电负荷削减比例为 28.1%~63.6%，建筑电费节省比例为 7.39%~26.79%。通过对建筑三种不同特征的弹性负荷分析，得出“可间断型弹性负荷”适合削减量大的短时需求响应；“可调节型弹性负荷”适合削减量平缓的长时需求响应；“可转移型弹性负荷”则适合常规需求响应和短时需求响应。

(4) 通过典型办公建筑研究，弹性使用效率从短时需求响应的 0.09 提升到长时需求响应的 0.34，随着需求响应持续时间的增加，建筑弹性使用效率明显提高。同时，储能系统不但大大提升建筑弹性能力，也能够改善弹性的使用效率，常规需求响应的弹性使用效率从 0.20 提高到 0.33。建筑的弹性能力的提升并非免费，通过一建筑实例的经济性分析，得出了最经济的建筑弹性占比为 62%。

(5) 风能和太阳能类间歇性可再生能源的发展，对建筑电力需求弹性提出的要求。通过典型建筑的量化计算，得出我国现有建筑的电力弹性占比约为 20%~30%，若充分利用这些弹性资源，能够满足占电网总负荷 34%~41% 的可再生能源接入要求。在未来，若全由可再生能源作为能源，建筑的电力需求弹性占比需达到 90% 左右，才能防止“弃风弃光”现象的发生。可再生能源发电比例 (x) 与建筑弹性改善率 (y) 的关系式： $y = 6.8351x^2 - 0.745x - 0.8351$ 。

7.2 主要创新点

(1) 搭建了全建筑电力需求弹性量化模型框架，模型框架包含各类建筑子弹性源理论量化模型，并给出了建筑电力需求弹性从热需求弹性到电力需求弹性的传递及聚合机理过程的准确描述。所建量化模型仅需要输入建筑基本的热物参数及能源系统基本参数信息就能计算出建筑的电力需求弹性量。所提的量化模型不但适用于既有建筑，也可用于设计阶段的建筑。

(2) 本研究首次提出了基于建筑弹性特征下需求响应优化控制问题，给出在不同的需求项目下，各弹性源的优先使用级别及相关控制策略。

(3) 研究了建筑电力弹性改善与经济收益的相关关系, 为未来建筑最佳弹性设计提供了相关计算方法。结合未来可再生能源的发展, 给出了未来建筑弹性要求与可再生能源在电网中接入比例的关系式。

(4) 本研究首次提出基于基准建筑弹性模型的建筑电力需求弹性评价方法, 为未来电网交互式建筑的电力弹性评价提供合理的方法及途径。

7.3 研究的局限性与展望

7.3.1 局限性

(1) 由于受到课题组实验平台的限制, 课题不能对所有弹性源的理论计算模型进行实验验证, 仅验证了与热环境相关的空调系统类弹性源部分。其它弹性源部分则通过模拟的手段进行了验证, 在今后的研究中应该结合非热环境和热环境相关的全建筑弹性模型验证。

(2) 本课题提出的电力弹性量化模型对象为单栋建筑, 对于电网来说, 实际需求响应更关心的是一个地区的建筑群。而对于建筑群, 是否可通过单一建筑量化结果的简单叠加未知, 建筑群的需求响应调度是否影响建筑的电力需求弹性能力也未知, 需要未来在关于建筑群方面做更加深入的研究。

(3) 本课题对于人行为弹性的研究, 仅考虑了人对温度的要求方面, 把温度适应提供的弹性计入人行为的弹性, 并没有对像入住率变化和新风要求等引起的电力弹性进行研究, 人行为量子模型具有一定的局限性, 需要后期进一步的完善。

7.3.2 展望

在我国建筑需求响应及电力需求弹性还是一个较新的概念。在建筑需求响应方面, 我国商业化的需求响应起步较晚, 再加上我国电力体制及价格机制以政府主导为主, 国外已有的一些研究成果及成熟经验无法直接使用, 因此, 对于我国这些方面还需继续探索。我国已有的相关研究主要围绕电网供给侧(电厂侧)单向控制开展, 需求侧(用户侧)资源还未得到合理的开发利用。本文从建筑能源需求侧的弹性能力及特征入手, 旨在通过量化模型量化建筑所具有的电力需求弹性能力, 从而充分利用该资源, 促进电网供需平衡双向交互式管理与控制的发展。

本文的研究使基于建筑物理结构的电力需求弹性部分能够得到准确的量化, 然而, 建筑电力需求弹性受人行为影响部分则较难准确量化, 本文做了相应简化处理。人行为对能耗需求影响的研究是一个重要而复杂的课题, 其与建筑的入住

率、室内人员的年龄、性别、收入水平等因素有关。对人行为能够提供的电力弹性进行准确量化是极具挑战的。相信随着现代通讯技术及建筑大数据分析的快速发展,在准确得到建筑人行为数据信息和进行人行为准确预测的基准上,能够实现对全建筑电力需求弹性更为准确的量化。

此外,建筑群的电力需求弹性量化与单体建筑存在差异,一个区域的电力需求弹性受各单体建筑之间的相互影响,其相互影响关系未知。当研究尺度放大到一个电网片区、一个城市乃至一个国家时,电力需求弹性能力该如何描述也是值得继续探索的一个问题。在建筑电力弹性的应用层面,如何更好地开发利用建筑需求弹性资源,以及如何实现供给侧及需求侧的交互式控制管理等问题,相应的控制方法框架及算法逻辑值得更加深入的研究。

最后,在电力需求弹性评分方法上,由于本课题研究时间所限,仅考虑了弹性的大小这一维度,而对于响应速率及效益等维度未进行全面考虑。建筑电力需求弹性评价尚属探讨研究的初级阶段,制定完整的建筑电力需求弹性评价及评分方法体系是另一项重要而艰巨的任务,全面的评价体系有利于我国电网交互式建筑的长远发展。它是建筑电力需求弹性重要的组成部分,需进行更为深入的研究。

致谢

转眼间我在同济的博士生涯即将接近尾声。四年多时间里，发际线永远的撤退了两厘米，这记录着一路走来的艰辛，希望我之后的师弟妹们不需要用这样的方式来记录。科研的道路是要学会苦中作乐，苦乐并存的经历才有了她的意义。当感觉到累的时候，篮球场上、羽毛球场上你能看到我的身影，这也是我在“许门20年后实现目标”里写下的：篮球和羽毛球打的最好，希望能够实现。

这一路走来，成长是付出后必然的结果。成长的背后必然得到了很多人的帮助和鼓励。首先，由衷感谢我的博导许鹏教授。谢谢您在我博士期间对我的悉心指导和鼓励，才使得我的博士课题可以顺利完成。在外您总是喜欢说我们是您的宝贝学生，不管遇到什么难题，您总是以鼓励、信任为主，鞭策为辅，这使我们少了一些压力，但同时也让我担心以后遇到以打击鞭策为主的上级时是否具备相应的抗打击的能力。在许门有个优良的传统就是每周例会的brainstorming，您会在例会前结合本专业提出一个new idea或是open topic，让每个人在走神或者打瞌睡时就想想这些问题，并在例会结束后进行讨论。在您启发式的教育方式下，我也逐渐发现了思考和探索的乐趣，并时刻保持对新知识、新事物的热情。感谢您一路来给予我的鼓励和信任，能成为您的学生我感到很幸运。此外还感谢我在上海理工大学硕士研究生阶段的硕导章立新教授，是您培养了我的钻研及刻苦精神，为我后期读博打下了坚实的基础。

由衷感谢我在德国卡尔斯鲁厄理工学院联合培养期间的联合指导老师Ferdinand Schmit 博士，以及同事Aditya Desai 博士，在你们身上我学到了严谨的科研精神。异国他乡，Ferdinand 博士对我的学习和生活都给予了很大的帮助，特此还感谢Emmerich Tempfli 博士送我自行车，让我省了一大笔交通开销。

由衷感谢许门所有的同窗们，毕业后在北京工业大学任教的大师姐姬颖，现在郑州大学任教的二师姐李为林以及沙华晶师姐，当我遇到研究瓶颈的时候和你们的讨论使我得到突破。感谢在我实验阶段提供支持的师弟师妹们，这里就不一一提及。感谢你们陪我走过的这些时光，和你们在一起的时光定会留下美好记忆。此外，感谢在我实验搭建过程提供技术支持的史建国老师，帮助我编写数据采集软件的师弟许鹤华。

由衷感谢我的父母和家人，你们的每一句鼓励、每一次肯定都给了我前行的勇气。感谢我哥陈火保和我姐陈喜梅在我博士期间承担起了对整个大家庭的照料，使我少了很多后顾之忧。常年在外求学，我们聚少离多，感谢你们的理解和支持。最后，感谢我的妻子江晓春，感谢你九年来的陪伴以及对我科研无条件的支持，包括在实验台搭建及测试阶段的辛苦付出。

深深地感谢评阅我论文的老师，感谢你们在百忙之中审阅我的论文，感谢你们的意见和建议。

最后，再次感谢所有给过我帮助的老师、同学、朋友们。

陈永保
2019年9月

参考文献

- [1] 2014年度全国电力供需形势分析预测报告. 中国电力企业联合会. 2014.
- [2] Chen Y, Xu P, Gu J, Schmidt F, Li W. Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review. *Energ Buildings*. 2018;177:125-139.
- [3] 中国可再生能源发展报告, 水电水利规划设计总院, 2017.
- [4] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 张轩, 马子明, 钟海旺. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计. *电力系统自动化*. 2019;43(04):9-15.
- [5] Xue X, Wang S, Sun Y, Xiao F. An interactive building power demand management strategy for facilitating smart grid optimization. *Appl Energ*. 2014;116:297-310.
- [6] Li W, Xu P, Lu X, Wang H, Pang Z. Electricity demand response in China: Status, feasible market schemes and pilots. *Energy*. 2016;114:981-994.
- [7] 高赐威, 陈曦寒, 陈江华, 徐杰彦. 我国电力需求响应的措施与应用方法. *电力需求侧管理*. 2013;15(01):1-4.
- [8] 阮文骏, 刘莎, 李扬. 美国需求响应综述. *电力需求侧管理*. 2013;15(02):61-64.
- [9] 2019 Demand Response Operations Markets Activity Report: February 2019, PJM Demand Side Response Operations, 2019.
- [10] 2010 assessment of demand response and advanced metering, Federal Energy Regulation Commission, United States Department of Energy, 2011.
- [11] Lam T, Wan K, Wong S, Lam J. Impact of climate change on commercial sector air conditioning energy consumption in subtropical Hong Kong. *Appl Energ*. 2010;87(7):2321-2327.
- [12] Chen Y, Chen Z, Xu P, Li W, Sha H, Yang Z, et al. Quantification of electricity flexibility in demand response: Office building case study. *Energy*. 2019;188:116054.
- [13] Pothitou M, Hanna RF, Chalvatzis KJ. ICT entertainment appliances' impact on domestic electricity consumption. *Renew Sust Energ Rev*. 2017;69:843-853.
- [14] Nan S, Zhou M, Li G. Optimal residential community demand response scheduling in smart grid. *Appl Energ*. 2018;210:1280-1289.
- [15] Shakeri M, Shayestegan M, Abunima H, Reza SMS, Akhtaruzzaman M, Alamoud ARM, et al. An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid. *Energ Buildings*. 2017;138:154-164.
- [16] Nonresidential Compliance Manual, Demand Responsive Controls-Appendix D, U.S. Department of Energy, 2019.
- [17] Yin R, Kara EC, Li Y, DeForest N, Wang K, Yong T, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes. *Appl Energ*. 2016;177:149-164.
- [18] Aghniaey S, Lawrence TM. The impact of increased cooling setpoint temperature during demand response events on occupant thermal comfort in commercial buildings: A review. *Energ Buildings*. 2018;173:19-27.
- [19] Aduda KO, Labeodan T, Zeiler W, Boxem G, Zhao Y. Demand side flexibility: Potentials and

- building performance implications. *Sustain Cities Soc.* 2016;22:146-163.
- [20] Le Dréau J, Heiselberg P. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy.* 2016;111:991-1002.
- [21] Xu P, Demand Shifting with Thermal Mass in Light and Heavy Mass Commercial Buildings. 2009 ASHRAE Annual Conference, Louisville, Kentucky, 2009.
- [22] Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response-Appendices, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [23] Turner WJN, Walker IS, Roux J. Peak load reductions: Electric load shifting with mechanical pre-cooling of residential buildings with low thermal mass. *Energy.* 2015;82:1057-1067.
- [24] 李为林. 利用热惯性实现办公建筑需求响应的策略研究: 同济大学[博士学位论文], 2017.
- [25] Li W, Chu Y, Xu P, Yang Z, Ji Y, Ni L, et al. A transient model for the thermal inertia of chilled-water systems during demand response. *Energ Buildings.* 2017;150:383-395.
- [26] Li W, Xu P. A fast method to predict the demand response peak load reductions of commercial buildings. *Sci Technol Built En.* 2016:118-127.
- [27] Li W, Xu P, Jiao F. Optimal demand response strategy of a portfolio of multiple commercial buildings: Methods and a case study. *Sci Technol Built En.* 2016;22(6):655-665.
- [28] Ulbig A, Andersson GR. Analyzing operational flexibility of electric power systems. *Int J Elec Power.* 2015;72:155-164.
- [29] De Coninck R, Helsen L. Quantification of flexibility in buildings by cost curves - Methodology and application. *Appl Energ.* 2016;162:653-665.
- [30] Nuytten T, Claessens B, Paredis K, Van Bael J, Six D. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating. *Appl Energ.* 2013;104:583-591.
- [31] Pallonetto F, Oxizidis S, Milano F, Finn D. The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling. *Energ Buildings.* 2016;128:56-67.
- [32] Alemany JM, Arendarski B, Lombardi P, Komarnicki P. Accentuating the renewable energy exploitation: Evaluation of flexibility options. *Int J Elec Power.* 2018;102:131-151.
- [33] Stinner S, Huchtemann K, Müller D. Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages. *Appl Energ.* 2016;181:140-154.
- [34] Ma J. Evaluating and planning flexibility in a sustainable power system with large wind penetration: University of Manchester, 2012.
- [35] Tulabing R, Yin RX, DeForest N, Li YP, Wang K, Yong TY, et al. Modeling study on flexible load's demand response potentials for providing ancillary services at the substation level. *Electr Pow Syst Res.* 2016;140:240-252.
- [36] Chrysopoulos A, Diou C, Symeonidis AL, Mitkas PA. Response modeling of small-scale energy consumers for effective demand response applications. *Electr Pow Syst Res.* 2016;132:78-93.
- [37] D Hulst R, Labeeuw W, Beusen B, Claessens S, Deconinck G, Vanthournout K. Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium. *Appl Energ.* 2015;155:79-90.
- [38] Kristien Clement-Nyns EHJD. The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid. *Ieee T Power Syst.* 2010;25(1):371-380.

- [39] Electric Vehicles and the Grid, BMW North America, Smart Charging, PJM, 2017.
- [40] Bartusch C, Alvehag K. Further exploring the potential of residential demand response programs in electricity distribution. *Appl Energ.* 2014;125:39-59.
- [41] Newsham GR, Bowker BG. The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: A review. *Energy Policy.* 2010;38(7):3289-3296.
- [42] Mubbashir A, Amir S, Matti L, Demand Response Potential of Residential HVAC loads Considering Users Preferences. In: *Proceedings of the 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Istanbul, Turkey, 2014.*
- [43] Reynders G, Diriken J, Saelens D. Generic characterization method for energy flexibility: Applied to structural thermal storage in residential buildings. *Appl Energ.* 2017;198:192-202.
- [44] Huber M, Dimkova D, Hamacher T. Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements. *Energy.* 2014;69:236-246.
- [45] Cao S, Hasan A, Sirén K. On-site energy matching indices for buildings with energy conversion, storage and hybrid grid connections. *Energy Buildings.* 2013;64:423-438.
- [46] Walawalkar R, Fernands S, Thakur N, Chevva KR. Evolution and current status of demand response (DR) in electricity markets: Insights from PJM and NYISO. *Energy.* 2010;35(4SI):1553-1560.
- [47] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 杨胜春, 雍太有. 电力柔性负荷调度研究综述. *电力系统自动化.* 2014;38(20):127-135.
- [48] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 赵洁, 王贺. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法. *中国电机工程学报.* 2013;33(16):63-69.
- [49] Eid C, Codani P, Perez Y, Reneses J, Hakvoort R. Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design. *Renew Sust Energ Rev.* 2016;64:237-247.
- [50] 张韵淇, 张旭, 车昆明. 定热扰条件下被动系统墙体释冷特性影响因素分析. *建筑热能通风空调.* 2015;34(01):10-14.
- [51] 韩莹, 朱能, 田喆. 住宅建筑综合热惰性的实验研究. *建筑科学.* 2014;30(08):36-40.
- [52] 电子工业部第十设计研究院. *空气调节设计手册 (第二版)*: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [53] Sehar F, Pipattanasomporn M, Rahman S. An energy management model to study energy and peak power savings from PV and storage in demand responsive buildings. *Appl Energ.* 2016;173:406-417.
- [54] Shafie-khah M, Kheradmand M, Javadi S, Azenha M, de Aguiar JLB, Castro-Gomes J, et al. Optimal behavior of responsive residential demand considering hybrid phase change materials. *Appl Energ.* 2016;163:81-92.
- [55] Lund PD, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015;45:785-807.
- [56] Powells G, Bulkeley H, Bell S, Judson E. Peak electricity demand and the flexibility of everyday life. *Geoforum.* 2014;55:43-52.
- [57] Eid C, Codani P, Perez Y, Reneses J, Hakvoort R. Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design. *Renew Sust Energ Rev.*

2016;64:237-247.

[58] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 陈沼宇, 郭炳庆, 周海明, et al. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述. 中国电机工程学报. 2016;36(12):3292-3306.

[59] Gu W, Wu Z, Bo R, Liu W, Zhou G, Chen W, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. Int J Elec Power. 2014;54:26-37.

[60] 魏大钧. 小型冷热电联供系统多目标优化设计与能量管理策略研究: 山东大学[博士学位论文], 2016.

[61] Alva G, Liu L, Huang X, Fang G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. Renew Sust Energ Rev. 2017;68(1):693-706.

[62] Mills G, MacGill I. Assessing Electric Vehicle storage, flexibility, and Distributed Energy Resource potential. JOURNAL OF ENERGY STORAGE. 2018;17:357-366.

[63] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势. 电工技术学报. 2016;31(14):1-10.

[64] Aghamohammadi MR, Abdolahinia H. A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded Microgrid. Int J Elec Power. 2014;54:325-333.

[65] Guille C, Gross G. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. Energ Policy. 2009;37(11):4379-4390.

[66] Li W, Xu P, Wang H, Lu X. A new method for calculating the thermal effects of irregular internal mass in buildings under demand response. Energ Buildings. 2016;130:761-772.

[67] Yang S, Tao W. Heat Transfer. Version 4: Higher Education Press, 2006.

[68] Simon J, Olivieri GPHC. Evaluation of commercial building demand response potential using optimal short-term curtailment of heating, ventilation, and air-conditioning loads. J Build Perform Simu. 2014;7(2):100-118.

[69] Zinzi M. Exploring the potentialities of cool facades to improve the thermal response of Mediterranean residential buildings. Sol Energy. 2016;135:386-397.

[70] Zingre KT, Wan MP, Tong S, Li H, Chang VWC, Wong SK, et al. Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate. Renew Energ. 2015;75:210-223.

[71] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调. 第二版: 中国建筑工业出版社, 2007.

[72] Jiang T, Li Z, Jin X, Chen H, Li X, Mu Y. Flexible operation of active distribution network using integrated smart buildings with heating, ventilation and air-conditioning systems. Appl Energ. 2018;226:181-196.

[73] Rabl A, Norford LK. Peak load reduction by preconditioning buildings at night. Int J Energ Res. 1991;15(9):781-798.

[74] Keeney K, Braun J. Application of building precooling to reduce peak cooling requirements. ASHRAE Transactions. 1997(103):463-469.

[75] Xu P, Haves P, Piette MA, Braun J. Peak demand reduction from pre-cooling with zone temperature reset in an office building. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2006;14(2):83-89.

[76] Page J, Robinson D, Morel N, Scartezzini JL. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. Energ Buildings. 2008;40(2):83-98.

[77] Molavi H, Ardehali MM. Utility demand response operation considering day-of-use tariff and

- optimal operation of thermal energy storage system for an industrial building based on particle swarm optimization algorithm. *Energ Buildings*. 2016;127:920-929.
- [78] Bianchini G, Casini M, Vicino A, Zarrilli D. Demand-response in building heating systems: A Model Predictive Control approach. *Appl Energ*. 2016;168:159-170.
- [79] Patteeuw D, Bruninx K, Arteconi A, Delarue E, D Haeseleer W, Helsen L. Integrated modeling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems. *Appl Energ*. 2015;151:306-319.
- [80] Torriti J. Price-based demand side management: Assessing the impacts of time-of-use tariffs on residential electricity demand and peak shifting in Northern Italy. *Energy*. 2012;44(1):576-583.
- [81] Mirakhorli A, Dong B. Market and behavior driven predictive energy management for residential buildings. *Sustain Cities Soc*. 2018;38:723-735.
- [82] Sun K, Hong T. A framework for quantifying the impact of occupant behavior on energy savings of energy conservation measures. *Energ Buildings*. 2017;146:383-396.
- [83] Herter K, Wayland S. Residential response to critical-peak pricing of electricity: California evidence. *Energy*. 2010;35(4):1561-1567.
- [84] Chen Y, Xu P, Chu Y, Li W, Wu Y, Ni L, et al. Short-term electrical load forecasting using the Support Vector Regression (SVR) model to calculate the demand response baseline for office buildings. *Appl Energ*. 2017;195:659-670.
- [85] Marinakis V, Doukas H, Tsapelas J, Mouzakitis S, Sicilia Á, Madrazo L, et al. From big data to smart energy services: An application for intelligent energy management. *Future Generation Computer Systems*. 2018.
- [86] Zhou K, Fu C, Yang S. Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:215-225.
- [87] 中华人民共和国建设部. 民用建筑热工设计规范. GB50176-2016. 北京: 中国计划出版社; 2016.
- [88] Tiller M. *Introduction to physical modeling with Modelica*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [89] Open source library for building energy and control systems. <http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/index.html>. 2018.9.
- [90] Wetter M, Zuo W, Nouidui TS, Modelica of heat transfer in rooms in the Modelica "Buildings" library. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November, 2011.
- [91] EnergyPlus Weather Data. <https://energyplus.net/weather>. 2019.3.
- [92] Modelica buildings library. <https://github.com/lbl-srg/modelica-buildings/issues/463>. 2019.1.
- [93] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2013.
- [94] Zhou B, Li W, Chan KW, Cao Y, Kuang Y, Liu X, et al. Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;61:30-40.
- [95] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述. *电力系统保护与控制*. 2014;42(18):144-154.
- [96] 李晓倩, 陈新楚, 郑松, 张琦. 家庭能耗管理系统的研究进展. *机械设计与制造工程*.

- 2017;46(11):107-111.
- [97] 向月, 刘俊勇, 魏震波, 刘友波. 可再生能源接入下新型可中断负荷发展研究. 电力系统保护与控制. 2012;40(05):148-155.
- [98] Wang J, Bloyd CN, Zhaoguang H, Zhongfu T. Demand response in China. *Energy*. 2010;35(4):1592-1597.
- [99] Watson DS, Kiliccote S, Moteqi N, Piette MA, Strategies for demand response in commercial buildings. The 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, USA, August 13-18, 2006.
- [100] Gu J, Xu P, Pang Z, Chen Y, Ji Y, Chen Z. Extracting typical occupancy data of different buildings from mobile positioning data. *Energ Buildings*. 2018;180:135-145.
- [101] Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them, U.S. Department of Energy, 2006.
- [102] 中华人民共和国财政部. 《电力需求侧管理城市综合试点工作中央财政奖励资金管理暂行办法》财建[2012]367号.
- [103] Chen Y, Desai A, Schmidt F, Xu P. Electricity demand flexibility performance of a sorption-assisted water storage on building heating. *Appl Therm Eng*. 2019;156:640-652.
- [104] Reynders G, Lopes RA, Marszal-Pomianowska A, Aelenei D, Martins J, Saelens D. Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage. *Energ Buildings*. 2018;166:372-390.
- [105] 鞠立伟. 需求响应参与清洁能源集成消纳与效益评价模型研究: 华北电力大学[博士学位论文], 2017.
- [106] 全生明. 需求侧响应资源的经济性分析与市场均衡模型研究: 华北电力大学[博士学位论文], 2014.
- [107] 张奎. 既有建筑节能改造经济性评价研究: 华中科技大学[硕士学位论文], 2012.
- [108] 修晓青. 储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估方法研究: 中国农业大学[博士学位论文], 2018.
- [109] Faruqui A, Hledik R, Newell S, Pfeifenberger J. The Power of Five Percent: How Dynamic Pricing Can Save \$35 Billion in Electricity Costs. The Brattle Group, discussion paper. 2007.
- [110] 郭瑞. 公共建筑能耗评价指标体系研究: 湖南大学[硕士学位论文], 2007.
- [111] 范高锋, 张楠, 梁志锋, 王靖然. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析. *华北电力技术*. 2016(12):55-59.
- [112] 方治, 宋绍剑, 林子彰, 林小峰, 程港. 含光伏电站和蓄电池储能系统的主动配电系统状态估计. *电力系统自动化*. 2019;43(13):71-83.
- [113] 张熙. 大规模储能与风力发电协调优化运行研究: 山东大学[博士学位论文], 2016.
- [114] Energy consumption estimates by sector. <https://www.eia.gov/consumption/>. 2019.2.
- [115] 2018 Key World Energy Statistics, International Energy Agency, 2018.
- [116] 2018中国可再生能源展望, 国家发展和改革委员会, 2018.

附录 A 建筑电力需求弹性各弹性源量化模型汇总表

建筑电力弹性源	量化模型	计算所需建筑参数信息
家用电设备 (非热环境部分)	$F_{ap}(t) = \begin{cases} -\sum_{i=1}^n k_0 \cdot P_i(t) & \text{功率可调节型设备} \\ -\sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot X_i(t) & \text{功率可转移型设备} \end{cases}$ $X_i(t) = \begin{cases} 0 & t \in (t_{work} \cap t_{earliest}) + (t_{work} \cap t_{latest}) \\ 1 & t \in t_{window} - t_{work} \\ -1 & t \in t_{work} - (t_{earliest} \cup t_{latest}) \end{cases}$	设备可调节比例 k_0 , 设备功率 P , 设备工作时长 t_{work} , 设备时间窗口 t_{window}
储能电池	$F_{ba}(t) = X(t)(SOC_{ini} - SOC_t)E_{cap}/\Delta t \quad t \in t_d$ $X(t) = \begin{cases} -1 & t \in t_{charging} \\ 1 & t \in t_{discharging} \end{cases}$	电池额定容量 E_{cap} , 电池荷电状态 SOC
蓄热体	$F_{mass}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i T_{range} / (t \cdot COP_{AC})$ $C_i = c_i \rho_i A_i d_i$ $\alpha_i = 1 - [a_1 + b_1(1 - e^{-c_1 B_i})] \cdot \left(\frac{a_2 + c_2 B_i}{1 + b_2 B_i}\right) \cdot \exp[-Fo \cdot (a_3 + \frac{b_3}{B_i})^{-1}]$	蓄热比热容 c , 密度 ρ , 表面积 A , 当量直径 d , 房间温度调整幅度 T_{range} , 空调系统 COP
家用电设备 (热环境部分)	$F_{apH}(t) = \Delta P_{s,t}(t) \cdot C_{LQ} / COP_{AC}$	设备可调节比例 k_0 , 设备功率 P , 空调系统 COP
热储能系统	<p>冷机关闭时 $F_{tank}(t) = P_{chiller}(t)$</p> <p>冷机不关闭时 $F_{tank}(t) = c_w \dot{q} (T_{tank,t1} - T_{tank,t2}) / (\Delta t \cdot COP_{AC})$</p>	蓄能系统的质量流量 \dot{q} , 水箱温度状态, 空调系统 COP
HVAC 系统	<p>无设备散热时: $F_{HVAC}(t) = F_{mass}(t) + [\frac{\rho_a V_r c_a}{t_d} T_{range} + (U_A + \dot{m} c_a) T_{ave}] / (\Delta t \cdot COP_{AC})$</p> <p>有设备散热时: $F_{HVAC}(t) = F_{HVAC}(t) + F_{apH}(t)$</p>	温区体积 V_r , 新风质量流量 \dot{m} , 温区内外总传热系数 U_A
人行为	$F_{beh} = \Delta T_{extra} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i C_i}{t_d} + \frac{\rho_a V_r c_a}{t_d} + U_A + \dot{m} c_a \right) / (\Delta t \cdot COP_{AC})$	用户可接受的温度范围 ΔT_{extra} , 其它同 HVAC 系统

附录 B 建筑 Modelica 模型代码节选

墙体材料参数代码节选:

// Construction material for exterior walls

parameter

```
Buildings.HeatTransfer.Data.OpaqueConstructions.Generic matLayExt(
  material={Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.HuaGangYan(x=0.02),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.BaoWenShaJiang(x=0.02),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiangZhaoPin(x=0.03),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.JiaQiHunNiTu(x=0.12),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiangZhaoPin(x=0.03)},
  final nLay=5);
```

// Construction material for partition walls

parameter

```
Buildings.HeatTransfer.Data.OpaqueConstructions.Generic matLayPar(
  material={Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiangZhaoPin(x=0.03),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.JiaQiHunNiTu(x=0.12),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiangZhaoPin(x=0.03)},
  final nLay=3);
```

// Construction material for floor

parameter

```
Buildings.HeatTransfer.Data.OpaqueConstructions.Generic matLayFlo(
  material={Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.Concrete(x=0.2)},final nLay=1);
```

// Construction material for furniture

parameter

```
Buildings.HeatTransfer.Data.OpaqueConstructions.Generic matLayFur(
  material=
  {Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.Plywood_V1(x=0.03)},final nLay=1);
```

// Construction material for ceiling

parameter

```
Buildings.HeatTransfer.Data.OpaqueConstructions.Generic matLayCeil(
  material={Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiang (x=0.03),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.BaoWenShaJiang(x=0.02),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.GangJinHunNiTu(x=0.02),
  Buildings.HeatTransfer.Data.Solids.ShuiNiShaJiang (x=0.03)},
  final nLay=4);
```

房间模型代码节选:

```
// Room model
Buildings.ThermalZones.Detailed.MixedAir room1(
  redeclare package Medium = MediumA, // Medium air
  hRoo=4.0, // Room height[m]
  nConExt=0, // Number of exterior constructions

  nConExtWin=2, // Number of window constructions
  // Data for exterior construction with window
  datConExtWin(layers={matLayExt,matLayExt},
    A={42,48},
    glaSys={glaSys,glaSys},
    AWin={21,24},
    each hWin=3.5,
    each fFra=0.1,
    til={Buildings.Types.Tilt.Wall,Buildings.Types.Tilt.Wall},
    azi={Buildings.Types.Azimuth.N,Buildings.Types.Azimuth.S}),

  nConPar=5, // Number of partition constructions
  // Data for partition construction
  datConPar(
    layers={matLayFlo,matLayCeil,matLayPar,matLayPar,matLayFur},
    A={224,224,36,35,254},
    til={Buildings.Types.Tilt.Floor,Buildings.Types.Tilt.Ceiling,Buildings.Types.Tilt.
      Wall, Buildings.Types.Tilt.Wall,Buildings.Types.Tilt.Wall},
    azi={Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Az
      imuth.E,Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Azimuth.S}),

  nConBou=7, // Number of constructions that have their outside surface
  // Data for construction boundary
  datConBou(layers={matLayFlo,matLayCeil,matLayPar,matLayPar,matLayFur,m
    atLayExt,matLayExt},
    A={224,224,36,35,254,42,48},
    til={Buildings.Types.Tilt.Floor,Buildings.Types.Tilt.Ceiling,Buildings.Types.Tilt.
      Wall,Buildings.Types.Tilt.Wall,Buildings.Types.Tilt.Wall,Buildings.Types.T
      ilt.Wall,Buildings.Types.Tilt.Wall},
    azi={Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Az
      imuth.E,Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.Types.Azimuth.S,Buildings.T
      ypes.Azimuth.N,Buildings.Types.Azimuth.S}),

  nSurBou=2, // Number of constructions that have their outside surface
  // Record for data of surfaces whose heat conduction is modeled outside of this
  room
```

```

surBou(A={42,48},
  each absIR=0.73,
  each absSol=0.73,
  each til=Buildings.Types.Tilt.Wall),
energyDynamics=Modelica.Fluid.Types.Dynamics.FixedInitial,
linearizeRadiation=true,
extConMod=Buildings.HeatTransfer.Types.ExteriorConvection.Fixed,
AFlo=224, // Room area[m2]
nPorts=2, // Fluid inlets and outlets
lat=0.5579 // Latitude[rad]
);

```

储能水箱模型代码节选:

```

// Storage tank model
Buildings.Fluid.Storage.Stratified tan(
  m_flow_nominal=m2_flow_chi_nominal, // Nominal mass flow rate [kg/s]
  dIns=0.03, // Thickness of insulation [m]
  redeclare package Medium = MediumW, // Medium water
  hTan=2, // Tank height[m]
  nSeg=5, // Number of volume segments
  energyDynamics=Modelica.Fluid.Types.Dynamics.FixedInitial,
  // Formulation of energy balance
  VTan=1.24 // Tank volume [m3]
);

```

冷机模型代码节选:

```

// Chiller model
Buildings.Fluid.Chillers.Carnot_TEva chi(
  redeclare package Medium1 = MediumW, // Medium water
  redeclare package Medium2 = MediumW, // Medium water
  QEva_flow_nominal=QEva_flow_nominal,
  //Nominal cooling heat flow rate [W]
  COP_nominal=3.5, // Nominal COP
  dp1_nominal=1600, // Pressure difference over condenser [Pa]
  dp2_nominal=1600, // Pressure difference over evaporator [Pa]
  dTEva_nominal=-5); // Temperature difference evaporator outlet-inlet [K]

```

附录 C 蓄热体 Modelica 传热模型源代码

主程序：

```

model HTModel
  ConductingRod conductingSlab
    (k=0.17, cp=2510, rho=600, length=0.02, A=20, T_init=297.15, h=8.7);
  // Call and instantiate the heat transfer model
  FixedTemperature fixedTemperature(T_amb=273.15+24);
  // Thermal mass initial temperature
  FixedTemperature fixedTemperature1(T_amb=273.15+26);
  // Room temperature
equation
  connect(fixedTemperature.a, conductingSlab.port_a);
  connect(fixedTemperature1.a, conductingSlab.port_b);
end HTModel;

```

传热模型（基础模型）：

```

model ConductingSlab
  parameter Integer n=10; // Number of pieces in thickness
  parameter Modelica.SIunits.Length length=5; // Thickness
  parameter Modelica.SIunits.Area A=1.0; // Area
  parameter Modelica.SIunits.ThermalConductivity k=1.0;
  // Thermal conductivity
  parameter Modelica.SIunits.SpecificHeatCapacity cp=1000;
  // Specific heat capacity
  parameter Modelica.SIunits.Density rho=1000; // Density
  parameter Modelica.SIunits.Temp_K T_init=300; // Initial temperature
  parameter Modelica.SIunits.CoefficientOfHeatTransfer h=3.5;
  // Coefficient of heat transfer
  ThermalCapacitance cap[n]
    (dx=length/n, A=A, cp=cp, rho=rho, T_init=T_init);
  // Call and instantiate the thermal capacitance model
  ThermalConvection con_left
    (A=A, h=0); // Call and instantiate the thermal convection model
  ThermalConvection con_right
    (A=A, h=h); // Call and instantiate the thermal convection model
  ThermalConduction con[n - 1]
    (dx=length/n, A=A, k=k); // Call the thermal conduction model
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a port_a;
  // Heat port communicates with outside
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a port_b;

```

```

// Heat port communicates with outside
equation
for i in 1:n-1 loop
  connect(con[i].a, cap[i].a);
  connect(con[i].b, cap[i+1].a);
end for;
connect(con_left.port_b, cap[1].a);
connect(con_left.port_a, port_a);
connect(con_right.port_a, cap[n].a);
connect(con_right.port_b, port_b);
end ConductingSlab;

```

物体热容模型（基础模型）：

```

model ThermalCapacitance
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a a ;
  // Heat port communicates with outside
  parameter Modelica.SIunits.Area A=10;
  parameter Modelica.SIunits.Length dx=1.0;
  parameter Modelica.SIunits.Density rho=1;
  parameter Modelica.SIunits.SpecificHeatCapacity cp=1;
  parameter Modelica.SIunits.Temp_K T_init=300;
initial equation
  a.T = T_init;
equation
  A*dx*rho*cp*der(a.T) = a.Q_flow;
end ThermalCapacitance;

```

对流传热模型（基础模型）：

```

model ThermalConvection
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a port_a;
  // Heat port communicates with outside
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a port_b;
  // Heat port communicates with outside
  parameter Modelica.SIunits.Area A=1.0;
  parameter Modelica.SIunits.CoefficientOfHeatTransfer h=1.0;
equation
  port_a.Q_flow = A*h*(port_a.T - port_b.T);
  port_b.Q_flow = -port_a.Q_flow;
end ThermalConvection;

```

导热传热模型（基础模型）：

```

model ThermalConduction

```



```
import SI = Modelica.SIunits;
parameter SI.Area A = 1.0;
parameter SI.ThermalConductivity k = 1.0;
parameter SI.Length dx = 0.01;
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a a;
// Heat port communicates with outside
Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a b;
// Heat port communicates with outside
equation
a.Q_flow = A*k*(a.T -b.T)/dx;
b.Q_flow = -a.Q_flow;
end ThermalConduction;
```


个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

陈永保, 男, 1989年8月生。

2008.09-2012.07 景德镇陶瓷大学, 热能与动力工程专业, 获学士学位。

2012.09-2015.07 上海理工大学, 动力工程专业, 获硕士学位, 师从章立新教授。

2015.09- 现今 同济大学, 供热、供燃气、通风及空调工程专业, 师从许鹏教授

2016.12- 2018.07 卡尔斯鲁厄理工学院, CSC博士联合培养, 师从Prof. Hans - Martin Henning, 联合导师 Dr. Ferdinand Schmidt

已发表论文:

- [1] **Yongbao Chen**, Peng Xu, Yiyi Chu, Weilin Li, Yuntao Wu, Lizhou Ni, Yi Bao, Kun Wang, Short-term electrical load forecasting using the Support Vector Regression (SVR) model to calculate the demand response baseline for office buildings, *Applied Energy*(SCI, Q1), 195 (2017) 659–670 . (**ESI 高被引论文**)
- [2] **Yongbao Chen**, Peng Xu, Jiefan Gu, Ferdinand Schmidt, Weilin Li, Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review, *Energy and buildings*(SCI, Q1),177 (2018),125–139.
- [3] **Yongbao Chen**, Zhe Chen, Peng Xu, Weilin Li, Huajing Sha, Zhiwei Yang,Guowen Li, Chonghe Hu, Quantification of electricity flexibility in demand response: Office building case study, *Energy*(SCI, Q1), 188(2019) 116054.
- [4] **Yongbao Chen**, Aditya Desai, Ferdinand Schmidt, Peng Xu. Electricity demand flexibility performance of a sorption-assisted water storage on building heating. *Applied Thermal Engineering*(SCI, Q1), 156 (2019),640–652.
- [5] Gu Jiefan, Xu Peng, Pang Zhihong, **Chen Yongbao**, Ji Ying, Chen Zhe. Extracting typical occupancy data of different buildings from mobile positioning data. *Energy and buildings*(SCI, Q1), 180 (2018),135–145.
- [6] Li Weilin, **Chen Yongbao**, Xu Peng, Joshi Chirag, Schmit Ferdinand. Research on the performance of an adsorption heat pump in winter demand response. *Science & Technology for the Built Environment*(SCI, Q4), (2017)23, 449-456.
- [7] Sha, Huajing, Peng Xu, Zhiwei Yang, **Yongbao Chen**, and Jixu Tang. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(SCI, Q1), 108 (2019): 76-90.
- [8] Sha, Huajing, Peng Xu, Chonghe Hu, Zhiling Li, **Yongbao Chen**, and Zhe Chen. A simplified HVAC energy prediction method based on degree-day. *Sustainable Cities and Society* (SCI, Q1) , 51 (2019): 101698.

会议论文:

- [1] **Yongbao Chen**, Lixin Zhang, Peng Xu, Yiyi Chu, Weilin Li and Hongyu Ma, Research on the influence of the spatial layout of cooling tower on the air, IAQVEC 2016, The 9th

International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings, 23-26 October, 2016, Incheon Songdo, Republic of Korea.

- [2] **Yongbao Chen**, Peng Xu, Zhe Chen, A framework for building electricity flexibility quantification, Asim 2018, The 4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association, 3-5 December, 2018, Hong Kong.

专利:

- [1] 许鹏 (导师), **陈永保**, 吴云涛等, 发明专利, 授权时间:2018.02.09, 专利号: ZL 2016 1 0547950.5, 一种组合式相变装置及采用该蓄冷装置的空调系统。

参与学术会议:

- [1] 2016年10月, The 9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC). 仁川, 韩国 (宣读)
- [2] 2018年12月, The 4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association. 香港, 中国 (海报)

研究及项目经历:

- [1] 2018年9月-2019年9月: 数字化负荷模型研究课题, 中国航天能源, 21万元, 主要负责人;
- [2] 2016年3月-2017年5月: 佛山市新能源发展规划, 佛山市政府, 编号0809-1541CCG3A826, 97万元, 主要负责人;
- [3] 2015年9月-2016年2月: 超高层建筑能源系统最优水系统配置优化与控制, 美国联合技术公司, 30万元, 主要参与者。

获奖经历:

- [1] 2016-2017年同济大学新奥新能源奖学金, 2017, 同济大学
- [2] 国家公派出国 (博士联合培养项目) 奖学金, 2016, 国家留学基金委