

保密★2年



申请同济大学工学硕士学位论文

加州炎热气候地区大型商业 建筑的错峰策略研究

培养单位：机械工程学院

一级学科：土木工程

二级学科：供热、供燃气、通风及空调工程

研究生：殷荣欣

指导教师：潘毅群 教授

二〇〇九年三月

保密★2年



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

Demand Shifting With Thermal Mass in Large Commercial Buildings in California Hot Climate Zone

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Heating Ventilating Air-conditioning and
Gas Engineering

Candidate: Rongxin Yin

Supervisor: Prof. Yiqun Pan

Mar, 2009

学位论文版权使用授权书

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

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

年 月

摘要

随着世界经济的高速发展，能源作为经济发展的强大的推动力而越来越受到人们的关注。人们对能源的需求也日益增长，尤其是电力方面的需求。研究学者开始寻求新能源或可再生能源来实现可持续性发展。基于这个背景，电力需求响应被引入到了电力市场改革的大环境，其目的主要在于降低峰值电力需求负荷，提高整个电力系统的能源效率和市场的经济效益。从电力用户类型来看，商业建筑的电力能耗占了整个耗电量的 36% 左右^[1]，尤其是大型商业建筑的运行能耗和峰值电力需求持续增长的情况下，单方面的增加发电装机容量不仅会降低整个电力系统的能源利用效率，同时造成地球环境的进一步的恶化。在这个背景下，许多学者进行了大量的理论研究和实测调查，并提出不同的需求响应策略来降低大型商业建筑的峰值电力需求负荷。

本论文首先描述了在加州气候炎热地区利用建筑材料的蓄热能力进行错峰研究的背景，并介绍该论文实测建筑所在的气候区域特性，从生物气候图的角度阐述了建筑材料的蓄热能力在被动式降温 and 延迟峰值负荷方面的潜力。提出人为的预冷和室内设定温度重置策略，其目的是降低峰值时段的电力需求负荷，同时得益于不同时段的电力价格差，提高整个建筑运行的经济效益。其次针对几种不同的预冷和室内设定温度重置策略进行模拟分析，通过模拟结果的横向对比，了解不同策略在降低电力负荷方面的潜力。并选择两幢实际商业建筑，在不同的气候条件下针对不同类型的预冷策略进行实测调查。该部分内容涉及到基准日模型的选择与确定，并通过比较不同预冷和室内设定温度重置策略下建筑能耗变化与基准日模型之间的对比，了解每一种策略的错峰的潜力以及经济效益。实测结果表明预冷策略在炎热气候条件下可以提高建筑对需求侧变化的响应，并且不影响室内舒适度水平，此外预冷策略改善了峰值时段需求负荷降低的深度以及持久度。

为了能够在实测调查之前把握实测建筑在需求响应策略下的需求降低潜力和效果，我们利用需求响应快速评估软件 DRQAT 对两幢实测建筑进行能耗模拟及校正工作，在校正后的基准模型基础上，对实测的预冷策略进行模拟对比分析，将模拟结果与实测数据相对比，确定该软件在能耗负荷预测方面的可靠性，以及提供模型建立和校正的方法，为以后在做类似相关工作提供实测数据和研

究方法。

关键词：商业建筑，需求响应，生物气候图，基准日模型，需求响应策略，错峰，模型校正，预冷，室内设定温度重置

ABSTRACT

With the rapidly development of the global economy, energy has drawn more and more attention as a persistent impetus. The demand for energy has keep rising, expecially for the electricity. Researchers have been finding new energy and renewable energy to achieve sustainable development. Against this background, demand response is introduced into field study on the reform of power market. The purpose of this plan is to decrease the peak electric demand and to improve the efficiency and economic benefit of the power system. With respect to the type of power consumer, electricity consumption of commercial buildings accounts for 36% of the total electricity consumption in USA. With the sustained growth of electricity consumption and peak load of large commercial buildings, one-side increasing electric generator's capacity could decrease the efficiency of power system and also make earth environment much worse. Against such background, many researchers conducted large numbers of theoretical research and actual measurement, and proposed different demand response strategies for peak demand shed in large commercial buildings.

This thesis described the background for demand shifting with thermal mass in California hot climate zone and introduced the characteristics of climate zones that test buildings are located. The building bioclimatic charts indicated that thermal mass could be applied into passive cooling to save energy and delay cooling load of the building. Precooling with zone temperature reset strategies were proposed to decrease cooling load during on-peak period, and improve the economic benefit of price difference between on-peak period, mid-peak period and off-peak period. The author conducted simulation analysis on the potential for utilizing building thermal mass for load shifting and peak demand reduction. Two typical commercial buildings were selected and field study was conducted on the effect of proposed precooling strategies under different climate conditions. This part of work refered to the confirmation of the baseline model. Then through comparing energy consumption and demand profile

ABSTRACT

on baseline days and demand response days, we could understand the potential and effect of the optimal precooling strategy. The conclusion of the work is that pre-cooling in the hot climate zone has potential to improve the demand responsiveness of commercial buildings while maintaining acceptable thermal comfort conditions. The field test results indicated pre-cooling increased the depth and duration of the shed capacity of the tested building.

In order to evaluate the potential for utilizing building thermal mass for load shifting and peak demand reduction before field test, the author developed and calibrated the baseline model using DRQAT, and conducted simulation analysis for different precooling strategies with zonal temperature reset based on the calibrated baseline model. The comparison between the simulation results and measured data indicated calibrated model could predict energy consumption of the actual building in well agreement. This thesis can provide valuable field test data and study method for the future relevant research work.

Key words: commercial building, demand response, bioclimatic chart, baseline model, demand response strategy, demand shift, model calibration, pre-cooling, zonal temperature reset

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及目的	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究目的	2
1.2 国内外电力需求响应的研究动态	3
1.2.1 国外研究动态	3
1.2.2 国内研究动态	5
1.3 研究的主要内容及论文框架	6
1.3.1 研究内容	6
1.3.2 论文框架	7
第二章 错峰策略的提出及分析	9
2.1 错峰策略的介绍	9
2.1.1 研究背景	9
2.1.2 加州炎热气候区域特性	9
2.1.3 错峰策略的提出	13
2.2 需求响应策略的模拟分析	14
2.2.1 建筑模型简介	14
2.3 本章小结	18
第三章 需求响应策略的实测与分析	19
3.1 实测分析背景	19
3.2 实测方法介绍	20
3.2.1 背景简介	20
3.2.2 相关实测内容	20

3.3 实测结果分析-I	22
3.3.1 实测建筑描述	22
3.3.2 测试策略介绍	23
3.3.3 确定基准日模型	25
3.3.4 实测结果分析	26
3.4 实测结果分析-II	38
3.4.1 实测建筑描述	38
3.4.2 测试策略介绍	38
3.4.3 确定基准日模型	39
3.4.4 实测结果分析	41
3.5 本章小结	59
第四章 需求响应能耗模型建立与校正	60
4.1 介绍	60
4.1.1 背景概要	60
4.1.2 建模和模型校正流程	61
4.2 能耗模型建立和校正方法的应用	63
4.2.1 实测建筑模型-I	63
4.2.2 实测建筑模型-II	69
4.3 本章小结	77
第五章 结论和展望	79
5.1 结论	79
5.2 展望	80
致谢	82
参考文献	84
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果	87

第一章 绪论

1.1 研究背景及目的

1.1.1 研究背景

随着世界经济的高速发展，能源作为经济发展的强大的推动力而越来越受到人们的关注。尤其是 1973 年爆发第一次能源危机，世界经济面对突如其来的衰退和萎缩。能源价格变化会引起一连串的经济连锁反应，价格变化与整个市场的能源供求关系密切相关。能源危机通常涉及到石油、电力或其他自然资源的短缺。人们开始意识到能源的重要性以及部分能源的不可再生性等情况，开始寻求新能源或可再生能源来实现可持续性发展。特别是目前世界经济在不断的的发展，人们对能源的需求也日益增长，尤其是电力方面的需求。

基于这个背景，许多国家和地区进行了电力市场化改革，改革的目的是打破电力工业传统的垂直垄断模式，引入竞争机制，促进电力生产提高效率、降低成本、改善服务质量，在促进国内电力工业本身可持续发展的基础上，使全社会从电力工业改革中获得更多的经济效益和社会效益^[2, 3]。同时电力市场化改革给电力行业实施需求侧管理（DSM-Demand Side Management）带来了新的挑战，原有垂直垄断下实施 DSM 给电力公司带来的效益被分散，传统的 DSM 措施如负荷管理和能效管理的实施基础也发生了变化。随着竞争市场的发展和完善，电力系统的利益主体逐步的多元化，需求侧资源在竞争市场中的作用被重新认识^[4]。需求响应（DR-Demand Response）则被引入到市场竞争机制中，需求响应是指当电力批发市场价格升高或系统可靠性受到威胁时，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电力价格上升的信号后，改变其固有习惯的用电模式，达到减少或推移某时段的用电负荷而响应电力供应^[5]，通过价格信号和激励机制来增加需求侧在市场中的作用，并将供应侧和需求侧的资源进行综合规划，是适应电力市场发展的必要要求^[6]。

目前许多国家和地区对需求响应进行了广泛的研究和实践，尤其是美国在开展需求响应方面取得了良好的效果。美国政府在 2005 年 8 月发布了能源政策法案，提出了对需求响应方面的研究给予大力支持，之后美国能源部于 2006 年

2月向美国国会提交了需求响应的研究报告^[7]，详细阐述了需求响应方案的效益以及相关的实施建议。同时美国联邦能源监管委员会在2006年8月和2007年9月向美国国会提交了需求响应的年度报告，报告中系统的分析了需求响应的实施背景以及现状、需求响应对系统的影响以及高级计量基础设施在需求响应中的应用^[8, 9]。目前美国加州地区的能源公司在需求响应方面投入了很大的成本，做了很多的市场调查和研究，太平洋天然气和电力能源公司（PG&E）、南加州爱迪生能源公司（SCE）等电力公司都建立了一系列基于市场运作的需求响应项目。根据美国各个ISO/RTO的统计^[9]，2006年夏季高峰负荷时期，通过实施需求响应降低了系统1.4%~4.1%的高峰负荷。

关于电力需求响应的分类，美国能源部的研究报告提出电力市场下两种类型：补偿激励型类型和基于价格的需求响应类型^[7]。对于基于价格的需求响应类型主要涉及电力价格的变化，包括分时电价（TOU-Time of Use price）、实时电价（RTP-Real Time Price）、以及尖峰电价（CPP-Critical Peak Price）^[4]。目前加州地区的PG&E、SMUD、SCE等电力公司实施了不同类型的电力价格费率，其中涉及到上述的基于价格的需求响应类型。通过用户需求侧和电力公司供应侧之间的相互协作，降低电力负荷的峰值要求，通过对峰值电力负荷的调整和控制，满足日益增长的电力需求。

2008年美国建筑能源报告统计出2006年美国的住宅建筑和商业建筑的能源消耗量分别占全部能耗的20.9%和18.0%，预测2010年住宅建筑和商业建筑的能源消耗所占的比例分别为21.5%和18.1%^[11]。对于商业建筑的能耗来说，其单位面积的能耗相比住宅建筑来说要高出许多，目前大量的研究关于如何针对商业建筑进行需求响应实施，如何通过需求响应的实施来降低峰值需求负荷则成为研究的重点^[10, 11, 12]。

1.1.2 研究目的

本文主要通过分析电力需求响应策略在建筑内空调系统中的应用效果，提出利用建筑材料的蓄热特性进行空调系统电力负荷的降低或转移等方面的研究。通过模拟分析不同需求响应策略对空调系统的电力负荷的影响，并对不同的策略在不同的气候条件下进行实测分析，了解需求响应策略的效果。在此基础上，应用能耗模拟分析软件对实测建筑建立基准能耗模型，并在基准模型基础上模

拟分析实测中涉及到的需求响应策略，通过模拟结果与实际数据的对比分析，确定不同需求响应策略在降低或转移峰值负荷方面的潜力，以及应用的气候条件，为以后在其他建筑中应用类似的需求响应策略提供一定的理论研究和实测数据支持。

1.2 国内外电力需求响应的研究动态

1.2.1 国外研究动态

在加州能源委员会的发起下，劳伦斯伯克利实验室成立了需求响应研究中心，主要研究方向包括需求响应的控制策略、自动需求响应控制、工业领域内需求响应、利用建筑材料的蓄热特性进行需求响应分析等领域。在利用建筑材料的蓄热特性进行需求响应的研究领域内，主要有劳伦斯伯克利实验室、加州大学 Berkeley 分校的 CBE 中心、Purdue 大学以及南加州爱迪生 SCE 电力公司参与。

1990 年 J.E. Braun 进行了利用建筑材料的蓄热能力来降低峰值电力负荷的实测研究，主要策略是通过室内温度的重置将峰值时段的电力负荷转移到夜晚的低谷时段，实测结果证明该策略在降低峰值电力负荷方面的效果和潜力，同时也说明了影响室内温度重置策略的因素，例如气候条件、建筑蓄热能力、冷机的负荷特性等因素^[13]。Reddy 等人提出将建筑材料的蓄热能力的应用到峰值时段的电力负荷控制^[14]，Morris 等人通过实测方法和模拟方法相结合进而得出对建筑蓄热材料的最优化策略^[15]。Kevin R. Keeney 和 J.E. Braun 提出了一个建筑供冷控制策略，其策略的目的是利用建筑围护结构和内部装饰等蓄热材料来控制并限定冷机的峰值电力负荷^[16]，并将此理论模型应用到实际的建筑中进行实测调查，实测结果表明预冷控制策略可以将冷机的电力负荷控制在 75% 以内。通过降低建筑的供冷峰值电力负荷，可以降低空调系统的装机容量，减小空调系统的初期投资^[17]。2001 年 J.E. Braun 等人提出了 Inverse 模型来评估控制策略的效果，主要是根据实测能耗数据来估计建筑内部的运行特性以及冷机运行的负荷特性，从而预测某一种空调系统控制策略的效果，最终得出最优的控制策略可以降低总能耗的 40% 左右^[18]；同时 J.E. Braun 还比较了不同气候条件下控制策略的节能效果，作者选择了波士顿、芝加哥、迈阿密、菲尼克斯以及西雅图等 5

个城市进行实测调查,发现该策略只有在西雅图其节能效果不是很明显^[19]。2003 年 J.E. Braun 对利用建筑材料进行负荷控制的研究做了综述,并提出利用建筑材料的蓄热能力从而控制空调系统的电力负荷的计算模型以及实测调查研究,特别是对于商业建筑中该策略的在降低电力负荷方面的潜力,还提出关于利用建筑材料的蓄热能力的负荷控制策略的优化方法和实际应用^[20]。K.H. Lee 和 J.E. Braun 还对小型的商业建筑进行需求控制策略和舒适度等方面的实测研究,实测结果发现需求控制策略下的峰值电力负荷降低了 30%左右,但是在早上时段有部分人员有不舒适感觉^[21]。2007 年 K. Lee 和 J.E. Braun 利用实测数据提出了室内温度控制曲线的优化从而控制空调系统的电力负荷,包括三种计算方法: SA-Semi Analytical、ESA (Exponential setpoint Equation-based Semi-Analytical) 和 WA (Weighted-Averaging) 方法^[22],并在实际建筑中评估上述的三种方法^[23, 24]。

在自动需求响应控制研究领域,劳伦斯伯克利实验室需求响应研究中心的 M.A. Piette、S. Kiliccote 等人做了大量的研究和实测工作,提出了自动需求响应在商业建筑中的应用和实施^[11, 25]以及先进的自动需求响应控制策略^[12, 26]等, Motegi 等人详细介绍了需求响应在商业建筑中的控制策略和实测技术^[27, 28, 29]。M.A. Piette 等人还对需求响应计划里面涉及到的尖峰电力进行了实测分析,通过实测了解需求响应策略对尖峰电力时段的电力负荷和经济方面的影响程度^[30, 31]。

2007 年 K. Coughlin、M.A. Piette 等人针对需求响应实测结果的基准模型的确定方法做了相关方面的研究。研究结果提出了加州地区非住宅建筑的基准模型的计算方法以及基准模型的校正处理方法,该基准模型主要基于建筑的负荷曲线与室外气候参数之间的密切关系,从而根据室外温度和实测逐时能耗数据,拟合和优化计算,最终确定基准模型,从而计算需求响应策略的节能效果和降低峰值负荷的潜力^[32]。

2004 年劳伦斯伯克利实验室 Peng Xu 等人实测分析了预冷和室内设定温度重置策略在一幢中等密度的办公楼里应用的效果。所实测的策略比较简单,室内空调温度设定在最小允许值,直到下午 2 点钟开始升高室内设定温度值,发现空调机组电力负荷大约降低了 80%~100%,并且没有引起室内人员的不舒适感^[33]。2005 年 Peng Xu 等人对两幢商业办公楼进行了预冷和室内设定温度重置策略的实测以及利用 EnergyPlus 软件对不同需求响应策略进行模拟对比分析,通过实测结果和模拟结果的对比分析,得出不同的需求响应策略对能耗的影响程度,并确定最优化的控制策略^[34, 35];同时还对室内舒适度水平进行了调研,

以确定控制策略是否对室内舒适度有所影响^[36]。2006 年 Peng Xu 对加州地区的两幢建筑密度不同的建筑进行了错峰方面的实测研究。研究发现对于建筑密度轻和建筑密度重的建筑，预冷策略的效果都非常良好，凉爽气候条件下负荷可以降低 35%左右，炎热的气候下则可以降低 25%左右，实测期间并没有室内人员对室内舒适度抱怨^[37]。Morgan 等人实测分析了需求响应控制策略对建筑整个能耗费用影响，以及不同费率条件下的经济性比较，结果发现预冷控制策略可以降低整个运行费用的 10~20%左右^[38]。

本课题来源于劳伦斯伯克利实验室需求响应策略研究领域内关于气候炎热地区预冷策略在大型商业建筑中的应用。主要的实测内容是继续 Peng Xu 在 2004 年和 2005 年关于预冷和室内设定温度重置策略的应用研究工作，对几种不同的预冷和室内设定温度重置策略的模拟分析以及在两幢办公楼里的实测调查；并利用我们开发的 DRQAT 需求响应能耗分析软件对该两幢实测建筑进行建模分析，通过模拟结果与实际数据的对比，最终确定模型建立和校正的方法，以及如何对预冷需求响应策略进行计算优化。

1.2.2 国内研究动态

目前国内有关电力需求响应方面的研究主要涉及到分时电价优化以及中国电力市场改革等领域。东南大学的王蓓蓓博士论文主要针对需求响应在电力市场中所发挥的积极作用，并建立了需求曲线线性条件下的需求弹性对单个及 N 个发电商最优持留容量的详细数学模型；同时还建立了电力联营体模式的主能源市场出清电价的最优潮流模型和最优化的计算模型^[2]，郭联哲等人也提出了分时电价优化模型和方法，目的是提高用电效率，实现用户和电力企业共同赢利^[39]。李扬、王蓓蓓等人在另外文献中介绍了需求响应的基本概念，给出了电力需求响应计划在中国电力工业中的发展设想，指出中国的电力市场应充分借鉴国外的实践经验，有计划、有步骤地推行需求响应^[40]。

华东电力试验研究院的宋平介绍了需求响应在国外电力消峰填谷中的应用，特别介绍了美国主要的电力需求响应计划，并向国内推行类似的需求响应方案^[41]。东南大学赵欣等人也对美国的需求响应计划和高级计量方面做了简单的介绍^[42]。对于目前国内的电力结构，需要电力需求侧管理和电力需求侧竞价的相互协作，鼓励用户参与市场竞争，提高用电效率^[43]。

韩珺巧等人介绍了电力需求响应及其在空调制冷系统中的应用,通过空调房间温度设定值的调整、强制蓄冷、降低风道静压、限制变频风机转速、提高送风温度、停止部分风机或末端装置、提高冷冻水供水温度等方法来降低峰值时段的电力需求负荷^[5]。

由于目前国内电力价格机制较为简单,电力需求响应尚处于不断摸索和尝试的阶段。尤其是现在峰谷电力负荷差越来越大,我们可以利用需求响应来降低峰值负荷。目前国内大量研究主要针对利用冰蓄冷、蓄热锅炉等技术进行错峰。在利用建筑材料的蓄热能力进行负荷控制方面的研究较少。

同时本项目中涉及到能耗模型建立和校正的问题,在该领域国内外很多学者做了相关方面的研究。国外该领域 Reddy 对能耗模拟和校正方面进行了详细的理论研究和实测论证,涉及到模型的敏感度分析以及实际建筑模型校正的具体步骤等方面^[44]。从国内该领域来看,同济大学的潘毅群教授等研究小组做了很多关于能耗模拟与校正分析方面的实测和理论研究^[45, 46, 47, 48, 49]。她提出能耗模型校正过程中,实际气象参数、建筑内部负荷实际运行的负荷率、空调系统特性等因素与模型的准确度有密切的联系,基于校正后能耗模型基础上,进行不同节能措施的模拟分析^[47]。潘毅群教授在其他文献中也介绍了能耗模拟和校正方法在商业办公楼中的应用^[49],通过实测数据与校正后模型的模拟结果之间的对比,可以看出校正后模型能够准确的预测实际建筑能耗,在校正后基准模型基础上,可以了解不同节能措施的节能潜力和经济性分析^[47, 49]。

1.3 研究的主要内容及论文框架

1.3.1 研究内容

本课题是劳伦斯伯克利实验室需求响应研究中心的一个项目,关于利用建筑材料的蓄热能力进行负荷控制方面。主要工作则是继续 Peng Xu 在 2004 年和 2005 年针对不同预冷策略在实际建筑中的应用实测工作^[34, 37]。与前期工作有所不同的是该实测建筑为加州炎热地区的大型商业建筑类型,关于需求响应策略对电力需求负荷的影响分析方面,该论文对基准日模型的确定方法有所不同,提出基准日室外最高温度与逐时温度相结合的方法,对基准日进行选择确定。在实测数据的基础上,应用我们开发的需求响应快速评估软件 DRQAT 建立实测

建筑的能耗模型以及模型校正等，并最终确定快速建立模型以及模型校正的方法。

- (1) 首先介绍加州炎热地区的气候特性，从生物气候图的角度阐述了建筑材料的蓄热能力在被动式降温 and 延迟峰值负荷方面的潜力。提出不同预冷和室内设定温度重置策略并对其进行能耗模拟分析，通过模拟结果的横向对比，了解不同策略在降低电力负荷方面的潜力；
- (2) 选择两幢实际建筑，在不同的气候条件下针对不同类型的预冷策略进行实测调查。该部分内容涉及到基准日模型的选择与确定，并通过比较不同预冷和室内设定温度重置策略下建筑能耗变化与基准日模型之间的对比，了解每一种策略的错峰潜力以及经济效益；
- (3) 利用我们开发的需求响应快速评估软件 DRQAT 对两幢实测建筑进行建立能耗模型及校正工作，在校正后的基准模型基础上，对实测的预冷策略进行模拟对比分析，将模拟结果与实测数据相对比，确定该软件在负荷预测方面的可靠性，以及提供模型建立和校正的方法，为以后在做类似相关工作提供实测数据和研究方法。

因本论文的所有工作是针对美国加州地区的大型商业建筑进行需求响应策略的研究，全文均采用英制单位，如温度单位 ($^{\circ}\text{F}$)、建筑几何尺寸单位 (ft)、建筑材料传热性能参数单位 ($\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$) 等。

1.3.2 论文框架

图 1.1 为本论文的基本内容和框架结构，主要包括三个部分的内容：需求响应策略的提出、需求响应策略实测调查研究、以及能耗模型的建立和校正。

- (1) 第一章为绪论部分，介绍了需求响应的基本情况，并介绍了国内外在该领域的研究进展，特别是在利用建筑材料的蓄热能力进行错峰和负荷控制方面的研究，总结了相关领域的研究成果；
- (2) 第二章介绍加州炎热地区的气候特性，从生物气候图的角度阐述了建筑材料的蓄热能力在被动式降温 and 延迟峰值负荷方面的潜力；提出了不同类型的预冷和室内设定温度重置策略，并通过模拟结果之间的横向比较，了解不同策略的效果和潜力；
- (3) 第三章对两幢实际建筑进行预冷和室内设定温度重置策略的实测研究，

并在不同的室外气候条件下针对不同预冷策略进行数据实测和分析，并通过比较不同需求响应策略下建筑的实测日模型与基准日模型之间的对比，了解每一种策略的错峰潜力以及经济效益；

- (4) 第四章主要利用我们开发的需求响应快速评估软件 DRQAT 对两幢实测建筑进行建立能耗模型及校正工作，在校正后的基准模型基础上，对实测的预冷策略进行模拟对比分析，确定利用 DRQAT 进行模型建立和校正的方法。
- (5) 第五章是本课题的结论以及对以后工作的展望。

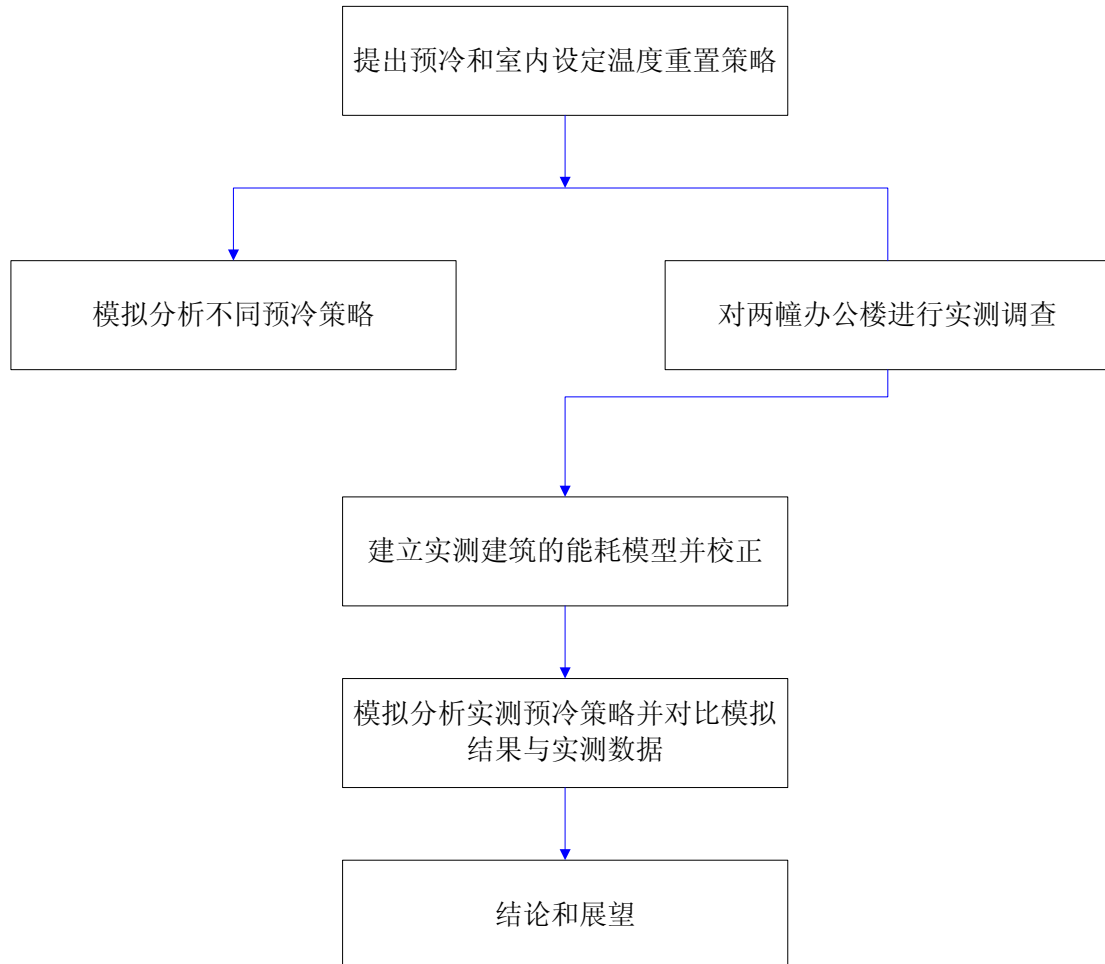


图 1.1 论文框架与研究内容

第二章 错峰策略的提出及分析

2.1 错峰策略的介绍

2.1.1 研究背景

利用建筑材料的蓄热特性来影响整个建筑的电力需求负荷变化，从而降低或者转移峰值负荷的大小及出现的时刻，尤其是目前加州地区的基于月峰值需求负荷的电力能耗费用在月总的能耗费用中占有很大的比例，如何利用围护结构的蓄热特性，对降低用户需求侧峰值负荷以及运行费用有着重要的意义。

大量的研究及实测分析阐述了利用建筑材料的蓄热能力在降低或转移峰值负荷方面的潜力和效果。在凌晨和早上低谷时段，由于室外气温相对较低，提前运行空调系统对整个建筑进行预冷，从而建筑材料得以储存冷量，在下午的峰值时段，建筑材料释放冷量从而降低峰值电力需求负荷。劳伦斯伯克利实验室环境能源部门的 Peng Xu 等需求响应研究组在 2006 年对北加州的两栋商业建筑进行了预冷和降低需求负荷策略的实测调查，实测分析结果表明了通过应用预冷等需求响应策略可以降低峰值时段需求负荷的 25~30% 左右^[37, 50]。

2.1.2 加州炎热气候区域特性

该项目主要针对加州炎热气候区域的预冷错峰策略的研究调查，实测建筑所在的气候区域分别为加州气候 10 分区和 13 分区。气候分区 10 区的地理位置为 33.95 N、117.38 W；气候分区 13 区的地理位置为 36.46 N、119.43 W。表 2.1 为该两个气候区域的基本气候信息，可以看出这两个气候区域全年的室外空气最高温度均超过了 110 °F，夏季设计日的室外空气干球温度分别为 100 °F 和 102 °F。由于 10 区和 13 区靠近内陆地区，其气候受海洋的影响较小，夏季和冬季的温度波动范围非常大，相比于其他气候区域来说，属于典型的夏季炎热且冬季寒冷的气候区域。对于该两个气候区域的夏季供冷季节来说，晚上和白天的温差较大，通常晚上的室外空气温度较低，适合利用建筑材料的蓄热特性进

行预冷或夜间通风等策略。

表 2.1 加州气候区域 10 区和 13 区的基本气候信息

气候分区	10 区	13 区
记录室外空气温度最大值 (°F)	116	111
记录室外空气温度最小值 (°F)	19	19
夏季室外空气温度波动范围 (°F)	32	34
夏季设计日室外干球温度 1% (°F)	100	102

图 2.1 和 2.2 分别是加州气候区域 10 区和 13 区的生物气候图。B. Givoni 提出并详细阐述了生物气候图在建筑设计中的作用^[51, 52]，涉及到被动式降温策略对整个建筑能耗以及室内舒适度的影响等有关内容。图 2.3 和图 2.4 分别是加州气候区域 10 区和 13 区的全年月平均室外空气干球温度曲线，从中可以看出两个气候区域的月平均室外温度分布大致相同，夏季 5~10 月份的月平均最高温度大约为 80~95 °F，在该温度范围内，我们可以看到高的建筑材料蓄热能力可以作为被动式降温的一种策略，从而降低整个建筑能耗及峰值电力需求负荷。

利用建筑材料蓄热能力可能够实现被动式降温或延迟峰值电力需求负荷出现的时刻的目的，但是其节能和降低峰值负荷的效果有限，并且受室外气候条件的影响较大。在该项目中，我们利用建筑材料的蓄热能力主要用来进行错峰的研究，通过人为的预冷和室内空调设定温度重置的策略来降低峰值时段的电力需求负荷，错峰的同时得益于不同时段的电价差，从而提高整个建筑运行的经济效益，另一方面，建筑材料的蓄热及放热能力在很大程度上能够削弱室内设定温度重置带来的室内舒适度的影响，从而满足室内人员的需求。

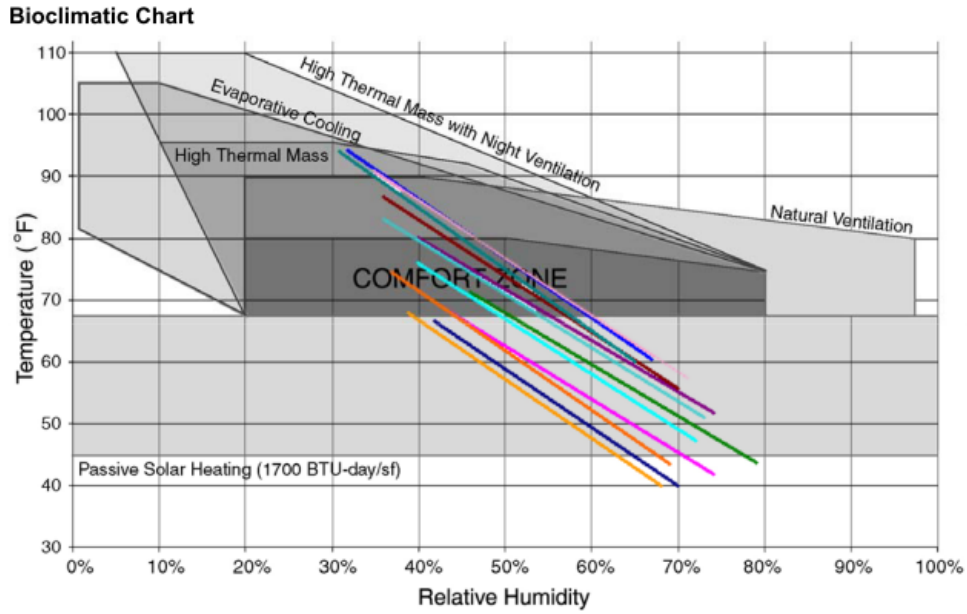


图 2.1 加州气候分区 10 区的生物气候图^[53]

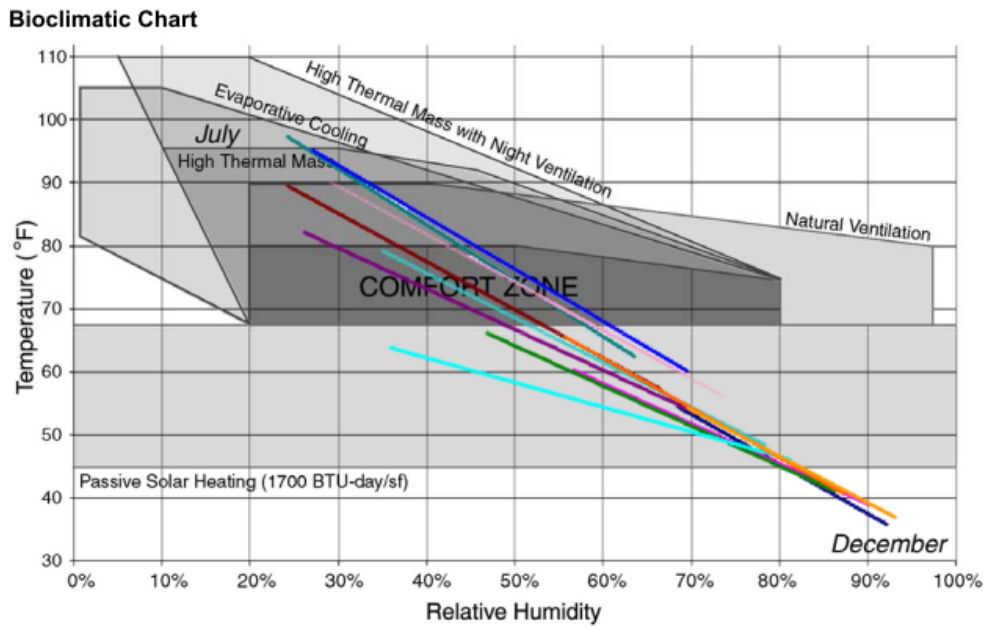


图 2.2 加州气候分区 13 区的生物气候图^[53]

Temperature
(Typical Comfort Zone: 68-80°F)

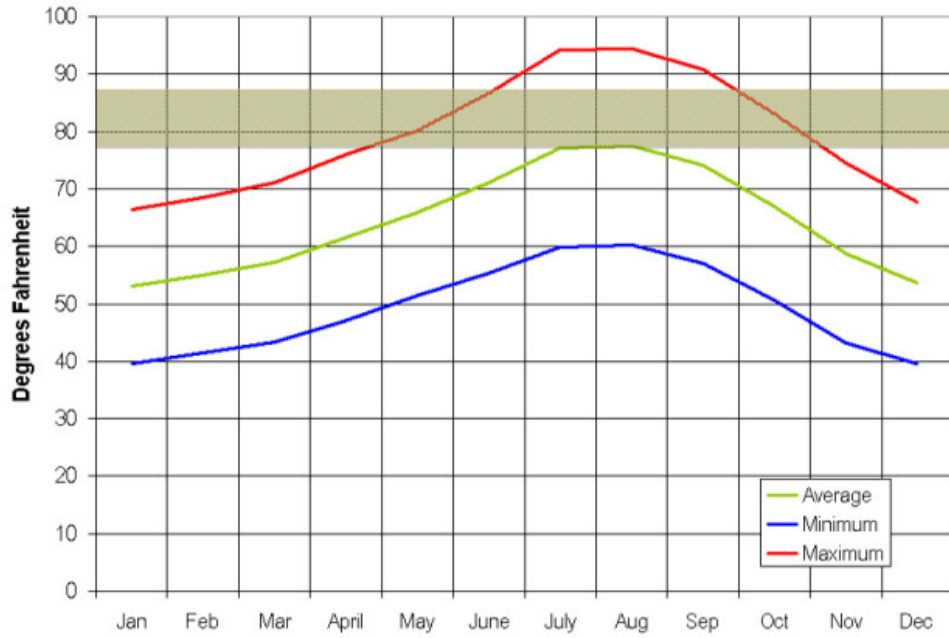


图 2.3 加州气候分区 10 区的月平均室外空气干球温度^[53]

Temperature
(Typical Comfort Zone: 68-80°F)

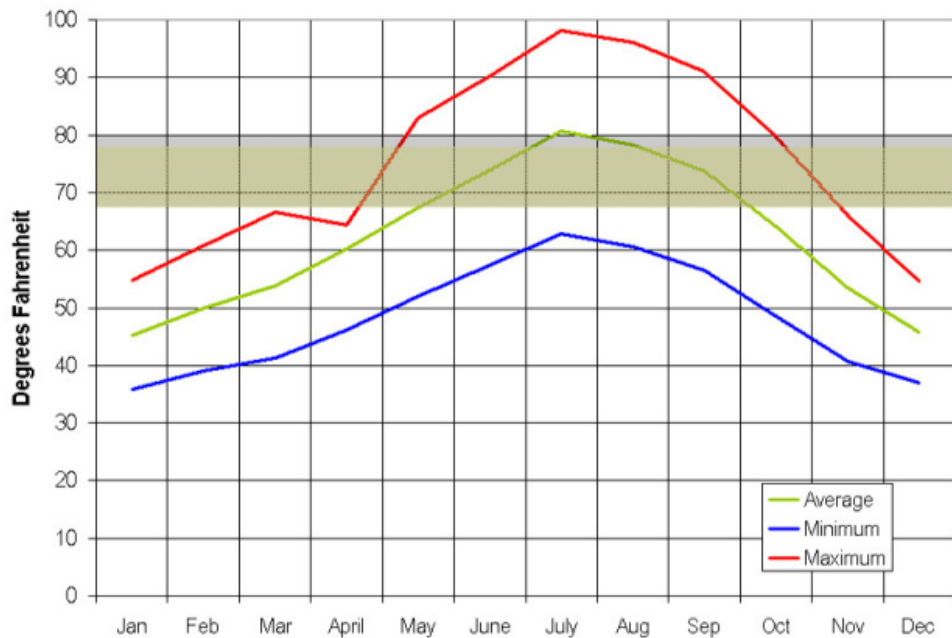


图 2.4 加州气候分区 13 区的月平均室外空气干球温度^[53]

2.1.3 错峰策略的提出

考虑到建筑围护结构以及室内装饰材料的蓄热特性，提出对其预冷的方法，围护结构以及室内的蓄热材料等将冷量储存起来，当室外温度不断升高的同时，提高室内空调设定温度，利用这些蓄热材料释放出来的冷量，从而抵消峰值时段由于室内外温差的增大所引起的冷负荷的增量。目前所存在的问题是当蓄热体的冷量释放完之后，整个空调系统的能耗是否会出现反弹的情况，因此我们在满足室内舒适度的情况下，利用不同的控制策略来实现能耗转移，并通过实测来评估和验证策略^[54]在降低峰值电力需求负荷方面的效果。

针对上述情况，我们提出需要实测来验证的几种能耗需求转移的策略，图 2.5 为我们提出的预冷和室内设定温度重置策略描述^[34]。

- (1) 重新设定空调房间温度，没有预冷；
- (2) 预冷并设定空调房间温度呈线型变化（房间设定温度逐渐升高）；
- (3) 预冷并设定空调房间温度呈指数型变化（房间设定温度初始时刻升高比较快，最后时刻变化比较缓慢）；
- (4) 预冷并设定空调房间温度呈阶梯型变化；

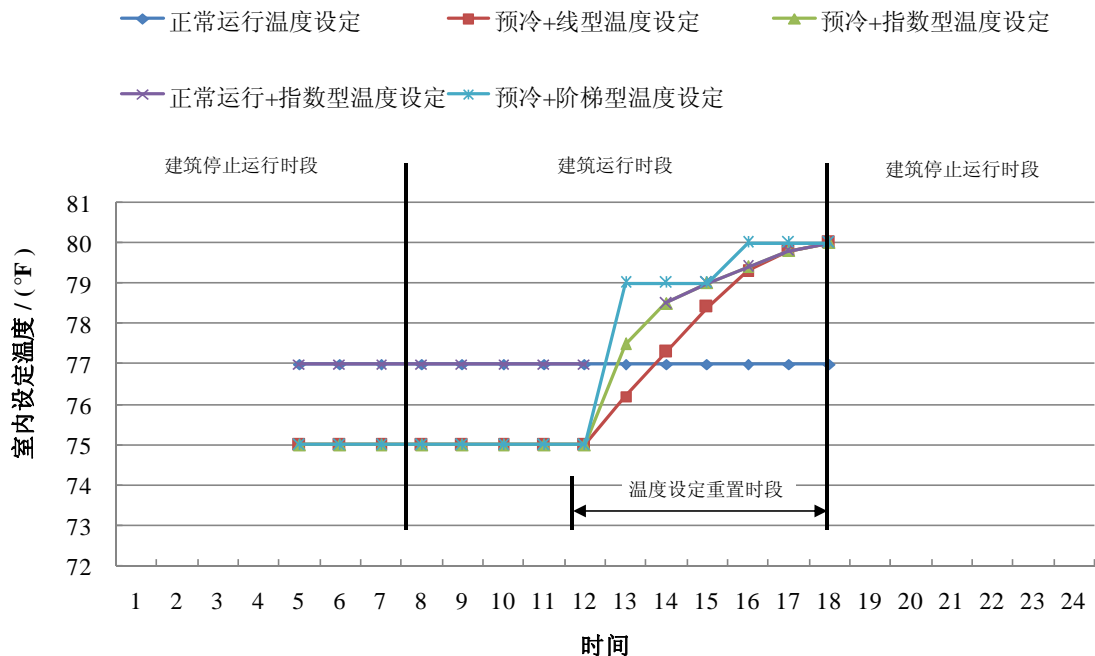


图 2.5 不同类型的预冷和室内设定温度重置策略

2.2 需求响应策略的模拟分析

图 2.6 为前面提出的几种预冷策略的能耗模拟结果。可以看出这几种控制策略均降低了峰值时段的电力负荷，相比之下，指数型和阶梯型室内设定温度重置策略的效果更为良好，其电力负荷曲线较为平稳，但还是会随温度设定值发生波动，主要是由于空调能耗模拟结果对室内温度设定值的变化非常敏感，不会有时间上的延迟。由于建筑材料中在预冷阶段所储存的冷量在峰值时段随室内温度设定值的升高而慢慢释放出来，不仅能够降低峰值时段的电力负荷，还能够维持室内舒适度的需要。

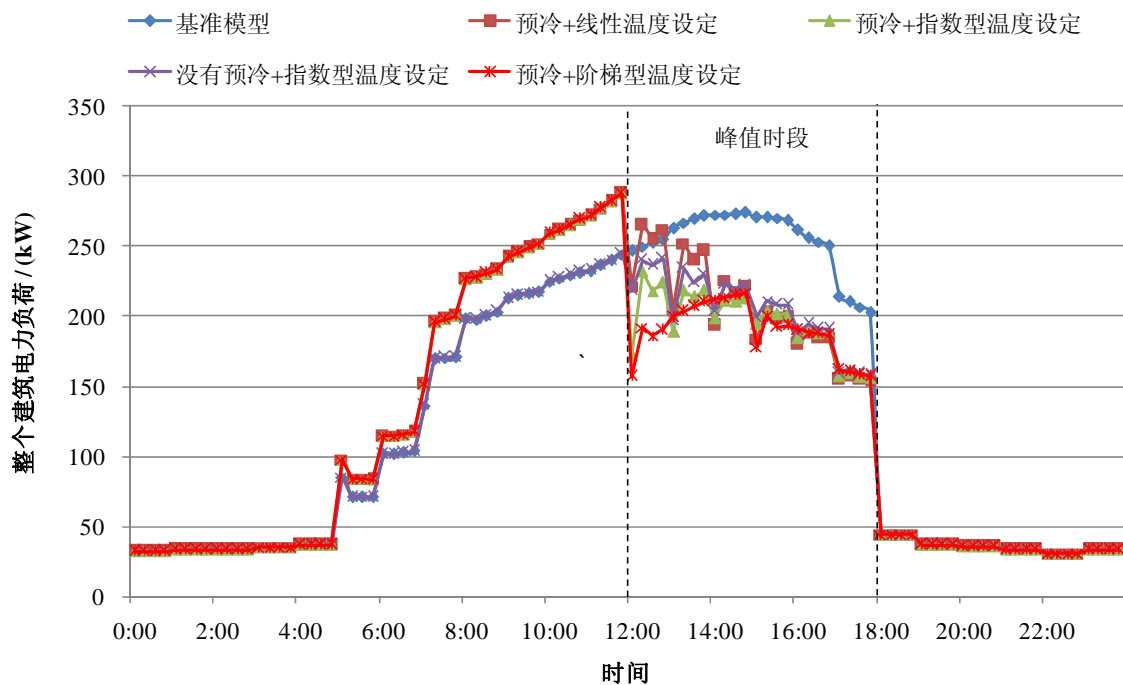


图 2.6 不同类型的预冷和室内设定温度重置策略的模拟结果

2.2.1 建筑模型简介

2.2.1.1 建筑原型

1991 年 Joe Huang 等人对美国 20 个城市的商业建筑进行了统计调研^[55]，报告中针对大型商业建筑的进行了划分，包括工厂建筑、教育建筑、餐饮建筑、商业建筑、办公建筑、宾馆建筑、医疗建筑以及其他具有商业功能的建筑等。

尤其对零售业建筑、办公建筑和宾馆建筑，根据建筑面积的大小进行了进一步的划分，对于零售业建筑和宾馆建筑来说，建筑面积 $60,000 \text{ ft}^2$ 作为大小型商业建筑的分界标准；对于办公建筑来说，建筑面积小于 $20,000 \text{ ft}^2$ 为小型商业建筑，建筑面积介于 $20,000 \text{ ft}^2$ 和 $60,000 \text{ ft}^2$ 为中型办公商业建筑，建筑面积大于 $60,000 \text{ ft}^2$ 则为大型办公商业建筑。该项目主要对大型商业建筑进行需求响应策略的实测研究，该项目中所选择的两幢实测建筑的建筑面积均大于 $60,000 \text{ ft}^2$ ，为典型的办公商业建筑类型。

Joe Huang 等人在 481 幢商业建筑统计数据的基础上，提出不同类型商业建筑的建筑原型，同时还应用 DOE2 能耗模拟软件对建筑原型进行了模拟分析并校正。劳伦斯伯克利实验室 Peng Xu 等人开发的需求响应快速评估软件 (DRQAT) 则应用 EnergyPlus 作为计算核心，以 Joe Huang 提出的典型办公建筑原型作为内部的能耗模型。该建筑模型为多区域能耗模型，每层有 5 个空调分区，其中 4 个外区，进深 15 ft，中间区域为内区。建筑原型为 Joe Huang 在 1991 年提出的典型办公建筑模型^[55]，建筑的几何尺寸和窗墙比则选择我们实测建筑中的一幢作为参考基准。建筑的围护结构按照加州地区非住宅建筑能源标准对加州 16 个气候区域的规定而确定，包括透明玻璃幕墙部分^[56]。对于 DRQAT 内部的建筑蓄热材料的特性，给出了高、中、低等三个有关建筑材料蓄热能力的级别程度。表 2.1 为该标准对加州不同气候区域的建筑围护结构性能参数的规定。根据该实际建筑所在的气候分区为 10 区，该建筑模型的屋面和地板的 U 值分别为 0.051 和 $0.090 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ ，外墙的传热性能参数则根据实际建筑的金属框架结构而定，U 值为 $0.217 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ 。建筑原型的南北朝向的窗墙比为 50%，东西朝向的窗墙比为 20%，通过窗墙比的值来确定该建筑模型中的窗户的性能参数。南向玻璃 U 值和太阳得热系数 SHGC 分别为 $0.47 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ 和 0.31；东西向玻璃 U 值和太阳得热系数 SHGC 分别为 $0.47 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ 和 0.36；北向玻璃 U 值和太阳得热系数 SHGC 分别为 $0.47 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ 和 0.47。

第二章 错峰策略的提出及分析

表 2.1 加州非住宅建筑能源标准对不同气候区建筑围护结构参数的规定^[56]

	CLIMATE ZONES										
	1, 16		3-5		6-9		2, 10-13		14, 15		
Roof/Ceiling											
U-factor	0.051		0.051		0.076		0.051		0.051		
R-value ¹	19		19		11		19		19		
Wall											
R-value or	13		11		11		13		13		
U-factor											
Wood frame	0.102		0.110		0.110		0.1024		0.102		
Metal frame	0.217		0.224		0.224		0.217		0.217		
Metal building	0.113		0.123		0.123		0.113		0.113		
Mass/7.0≤HC<15.0	0.330		0.430		0.430		0.430		0.430		
Mass/15.0≤HC	0.360		0.650		0.690		0.650		0.410		
Other	0.102		0.110		0.110		0.102		0.102		
Floor/Soffit											
R-value or	19		11		11		11		11		
U-factor											
Mass/7.0≤HC	0.090		0.139		0.139		0.090		0.139		
Other	0.048		0.071		0.071		0.071		0.071		
Windows											
U-factor ²	0.47		0.77		0.77		0.47		0.47		
Relative solar heat gain	Non-North	North	Non-North	North	Non-North	North	Non-North	North	Non-North	North	
0-10% WWR	0.49	0.72	0.61	0.61	0.61	0.61	0.47	0.61	0.46	0.61	
11-20% WWR	0.43	0.49	0.55	0.61	0.61	0.61	0.36	0.51	0.36	0.51	
21-30% WWR	0.43	0.47	0.41	0.61	0.39	0.61	0.36	0.47	0.36	0.47	
31-40% WWR	0.43	0.47	0.41	0.61	0.34	0.61	0.31	0.47	0.31	0.40	
Skylights											
U-factor ²	Glass w/Curb	1.18		1.42		1.42		1.18		1.18	
	Glass wo/Curb	0.68		0.82		0.82		0.68		0.68	
	Plastic w/Curb	1.04		1.56		1.56		1.32		1.32	
SHGC Glass	0-2%	0.68		0.79		0.79		0.46		0.46	
	2.1-5%	0.46		0.40		0.40		0.36		0.36	
SHGC Plastic	0-2%	0.77		0.79		0.77		0.77		0.71	
	2.1-5%	0.58		0.65		0.62		0.62		0.58	
Note: Construction assembly U-factors shall be calculated in accordance with Appendix IV.											
¹ R-value cannot be used for compliance when roof has metal framing members or a metal deck unless additional rigid insulation is installed. See Section 143 (a) 1 C.											
² U-factor adjustments are made to make the criteria consistent with revised NFRC rating procedures.											

2.2.1.2 内部负荷

该建筑模型内部的人员、照明和设备密度以及相应的运行时刻表均按照加州非住宅建筑能源标准对典型办公建筑的相关规定来确定^[56]。图 2.7 和图 2.8 分别为模型内部的人员、照明和设备的逐时负荷率^[47]。

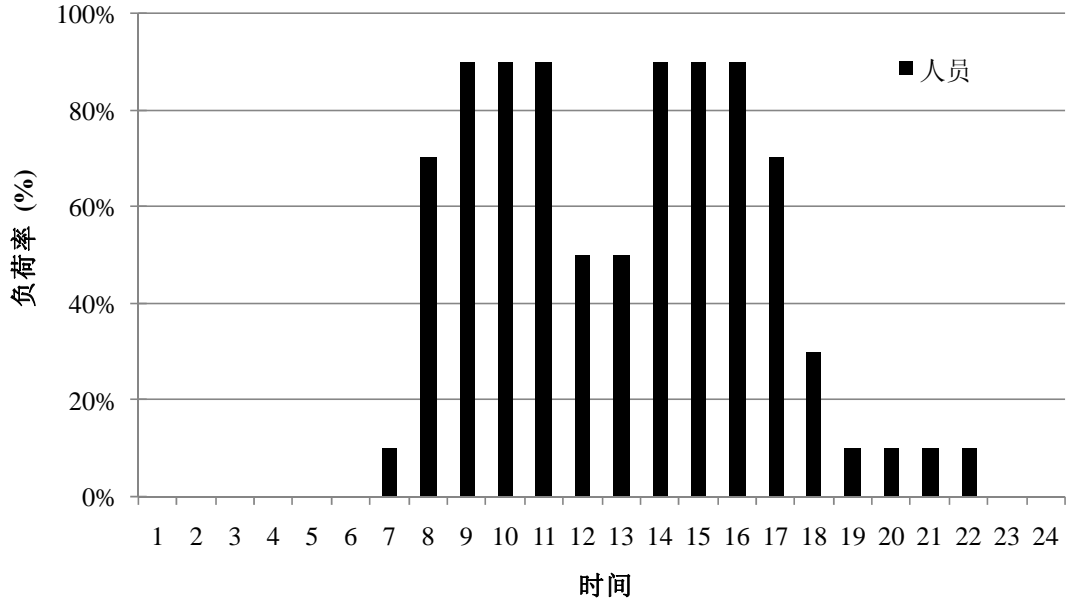


图 2.7 建筑模型内部人员的工作日负荷率

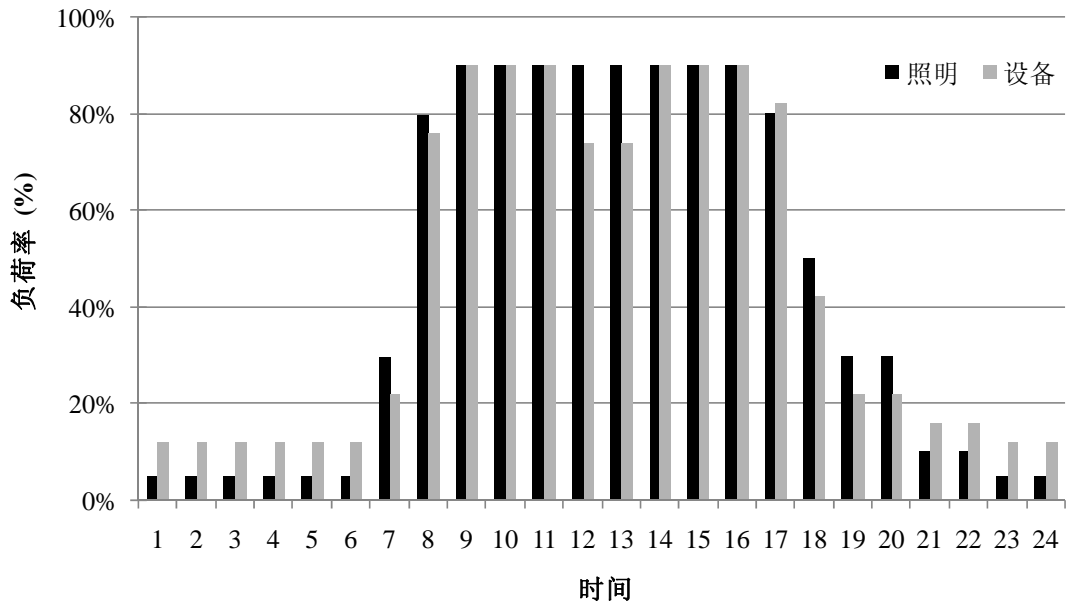


图 2.8 建筑模型内部照明和设备负荷的工作日负荷率

2.2.1.3 空调系统

空调系统采用屋顶式空调机组，设备的容量根据计算的冷负荷来确定，其他有关冷机的性能参数则均为默认值。空调系统的运行时刻表按照实测建筑提供的有关信息确定，从图 2.5 可以看出该系统早上 5 点钟开启空调系统，并于下午 6 点钟关闭。正常运行下室内设定温度为 77 °F，空调系统送风温度为 55 °F。

2.3 本章小结

本章节首先介绍了加州气候炎热地区利用建筑材料的蓄热能力进行错峰研究的背景，并介绍该论文实测建筑所在的气候区域特性，从生物气候图的角度阐述了建筑材料的蓄热能力在被动式降温和延迟峰值负荷方面的潜力；提出了不同类型的预冷和室内设定温度重置策略，并通过模拟结果之间的横向比较，了解不同策略的效果和潜力；同时介绍了大型商业建筑的基本特性和建筑模型的基本信息，例如建筑几何构造、围护结构类型、内部负荷的确定依据以及空调系统的运行特性。主要工作为基于简单的建筑模型，模拟分析所提出的几种预冷和室内设定温度重置策略的控制特性以及对整个建筑能耗的影响结果。

第三章 需求响应策略的实测与分析

3.1 实测分析背景

由于建筑材料的蓄热作用，通过比较简单的室内温度的重置进而可以降低空调系统的运行能耗，并且在一定程度上不会降低室内的热舒适度。一般来说在凌晨及早上的低谷时段提前运行空调系统，并且空调设定温度相比于正常运行设定温度要低 2~3 °F，在下午峰值时段提高室内空调设定温度。因此通过提高室内的空调设定温度，可以降低空调系统在夏季峰值时段的能耗及电力需求峰值负荷。

在 2005 年和 2006 年，劳伦斯伯克利实验室、加州大学 Berkeley 分校的建筑环境中心(CBE)、Purdue 大学联合加州的三家能源公司(PG&E、SCE 和 SMUD)对北加州的商业建筑进行了实测分析，主要就利用建筑材料的蓄热能力来进行不同错峰策略的研究。在 2003 年夏天，劳伦斯实验室对 Santa Rosa 的联邦大楼进行了实测分析。研究小组发现简单的需求响应策略对该大楼的效果非常好，该策略是在峰值时段(12:00~6:00)之前的一段时间空调设定温度降低至 70 °F，并在峰值时段空调设定温度升高到 78 °F。通过需求响应策略的实施，峰值时段的冷机负荷降低了 80~100%，并且没有室内人员对舒适度有所抱怨。2004 年夏季，劳伦斯实验室对 Santa Rosa 联邦大楼和 Sacramento 的一幢办公楼进行了预冷策略实测及在线舒适度调查，从而分析需求响应策略对室内舒适度的影响。调查结果显示室内设定温度维持在 70~76 °F 之间可以保证室内舒适度的需要^[34]。2005 年夏季，劳伦斯实验室对冷机的负荷曲线是否反弹问题，以及建筑材料蓄热能力测试和电力需求负荷的降低潜力等问题进行了详细的测试。研究小组选择了两幢大楼，其中一幢是轻密度的大楼，建筑的窗墙比达到了 100%左右，另外一幢是重密度大楼，建筑的窗墙比也相对较小。研究小组发现预冷错峰策略对于建筑材料密度较轻的建筑的效果非常好，冷机负荷大约能够降低 25~35%左右，但是舒适度水平有所降低^[37]。研究小组还发现 K.H. Lee 和 J.E. Braun 提出的指数型的温度设定能够很好的释放建筑材料中的冷量并且冷机负荷没有反弹^[22]。还有研究发现对于建筑密度较重的建筑来说，夜间预冷能够起到很大

的作用。

3.2 实测方法介绍

3.2.1 背景简介

在南加州爱迪生能源公司（Southern California Edison）的合作下，该项目研究小组选择了两个典型的办公楼来实测两栋建筑在电价峰值时段的自动需求负荷降低能力，其中一个办公楼位于 Visalia 地区，另一个位于 San Bernardino 地区，此次选择基于建筑所在的气候区域、技术可行性和业主是否愿意参与的意向。这次研究与 2004 年实施的负荷错峰研究比较类似，主要对这两栋建筑采用预冷和室内设定温度重置的策略。

选择这两栋建筑（CHCCC 和 TCCSB）的理由如下：1) 它们都是具有全方位数字控制的中型建筑，可以直接控制区域设定温度；2) CHCCC 是典型开放性的办公建筑，大部分空间均铺设地毯，在东西面，玻璃窗占有很大面积；而 TCCSB 建筑同样是典型的办公建筑，三层地板均铺有地毯，窗户为单层有色玻璃。研究小组可以根据对于典型建筑的研究测试从而确定建筑材料蓄热能力的量化模型，以便可以应用于其他办公建筑；3) 两栋建筑都是单一内部人员类型，并且建筑运行管理人员具有创新精神，非常愿意尝试新思想和新方法来减少能耗费用。更多关于建筑细节的描述参见下面章节。

3.2.2 相关实测内容

3.2.2.1 人员调查

只要不会阻碍雇员的工作效率和顾客的满意度，建筑用户可以接受错峰和降低负荷策略^[57]，在这次测试中，CBE 调查了用户的舒适度等级。在早上的预冷时段和下午的室内设定温度重置时段进行舒适度的调研，从而来评估预冷的在早上时段以及对下午室内舒适度的影响。这部分工作有加州大学 Berkeley 分校的 CBE 中心负责。

(1) 基于网络的人员调查

CBE 对北美和欧洲地区超过 230 栋的办公建筑开展了基于网络的室内环境

质量调查^[58, 59]。在 2004 年的调查中, CBE 使用测试舒适度仪器来评估雇员的热感、舒适度和工作效率。在 2006 年的调查中, 也使用了相同的舒适度仪器和方法。

基于网络的舒适度调查问卷包括前言和三页调查内容。前言主要对被调查者说明了调查的目的、自愿性、机密性和匿名性, 以及计划完成的时间。调查问卷的第一页需要填写被调查者的办公室门牌号来确定他们在建筑中的位置, 为稍后温度记录和分析做准备。第二页的问题包括了被调查者当前衣着和活动情况, CBE 可以用这些数据来计算他们的衣着率和新陈代谢率, 并估算人们是否随着温度的变化脱下或穿上衣服来保持自身的舒适性。第三页, 其中两个问题是评价感觉和舒适度, 另一个是询问温度对于他们工作效率的影响。这两个问题都是主观评价的问题, 而不是基于实际测量。而且这两个问题都有七个选项供被调查人选择。这次调查中, CBE 可以利用所搜集的信息和对人员详细的热测量记录来计算 PMV (Predicted Mean Vote)^[60], 与实际的舒适值相比较。

(2) 参与人员

通过发送邮件的方式邀请室内工作人员每天至少参加两次调查(一次在早上, 一次在下午), 有可能的话尽可能多的参加。调查非常简单, 只需要两三分钟便可完成第一次的问卷调查, 第二次只需要约一分钟便可完成。虽然理想情况是所有的员工都尽可能的多参与, 但是每天实际情况却无法完成。而且, 调查小组也不可能对员工有过多的要求。在 2004 年的测试中, 调查小组通知员工每一次希望他们参与调查的时间, 而其中有些员工会收到重复 email 的打扰。在 2005 年的测试中, 调查小组试图减少交流, 显然在 Oakland 地区得到了成功, 但是在 Chabot 地区参与调查人数却很低。在 2006 年的测试中, 提供了三个 Apple IPODs 作为对这些被调查人的奖励。这次调查进行得非常顺利, 相比之前所有飞调查, 参与率达到了最高值。

第一步, 发送邮件给建筑内所有员工介绍这次调查的目的并要求接受调查者在预冷实测前填写调查问卷来作为基准。同时发一个简短的通知提醒员工参加调查。

CBE 将直接发邀请给建筑运行管理主管, 主管转发邮件给所有的室内工作人员会员。总的来说, 员工可以自主选择是否接受监管人员或管理主管的邀请, 这样使调查变得更重要, 因此参与率也会有所提高。

3.2.2.2 气象和测试条件

2006 年夏末在 Visalia 地区进行测试，尽管我们选择了期间最热的几天，但是测得的气候条件相对所需要的温度还是要偏低。在 2005 年测试中，气候没有达到预期的那样热，所以大多数测试是在相对炎热的条件下进行。2006 年所有调查都是在九月到十月之间。大多数测试的温度为 95 °F 以上（室外空气温度最高值），但是有很少室外温度超过 100 °F。

在 2007 年的 San Bernardino 地区实测期间，气候条件非常好，这些测试都是在极其炎热、炎热和凉爽的条件下进行，室外温度在极其炎热条件下超过了 110 °F，而在炎热和凉爽实测条件的室外温度最高值分别为 104°F 和 85°F。

3.3 实测结果分析-I

3.3.1 实测建筑描述

CHCCC 建筑占地 87000 ft²，是一幢位于加州 Visalia 地区的典型中型办公建筑（见图 3.1）。该建筑内大部分都铺有地毯，墙体隔热性能良好，但是吊顶空间不隔热，西面和东面的窗墙比约为 30%。该建筑为长方形状，东西面长，南北面短。



图 3.1 测试建筑 I- Cigna Health Care Call Center (CHCCC)

制冷设备为 8 台制冷量为 50 冷吨的屋顶式空调机组，采用单管道变流量的空调系统，并且应用自动数字控制系统提供室内舒适度控制。

该建筑有单独供北部附楼屋顶的空调设备，但不包括在本次测试中。夏季，室外通风率为常数，室内 CO₂ 的水平维持在允许范围内。双管道系统的供回风机装配有变频驱动（VFD）。该建筑分 40 个空调区域，虽然该栋建筑都配有全方位数字控制，但没有全局区域温度调整能力，这项功能将作为本次研究的一部分补充到数字控制系统项目中。

该栋建筑凌晨 4 点开始运行，但是大多数员工在早上 8 点之后才开始工作。在平常的运行中，空调系统在凌晨 2 点开启，预热或预冷到早上 8 点，一般取决于室外天气情况。在测试之前，机械系统没有主要故障，但是一些控制器不能正常的运行，一些阀门和风阀在运行时会震动。由于部分变风量风阀被损坏，办公室的部分员工会有关于舒适性的抱怨。建筑维护工作人员对于机械系统非常熟悉，他们可以保证预冷和室内设定温度重置的策略的正确实施。

3.3.2 测试策略介绍

预冷和室内温度控制重置策略见图 3.2 所示。在启动和工作时间，该建筑正常空调设定温度是 74 °F。下午 6 点以后，关闭空调系统。在通常运行状态下(早晨 5 点到下午 6 点)，单独区域的设置温度变化幅度为 72~76 °F，平均值约为 74 °F。

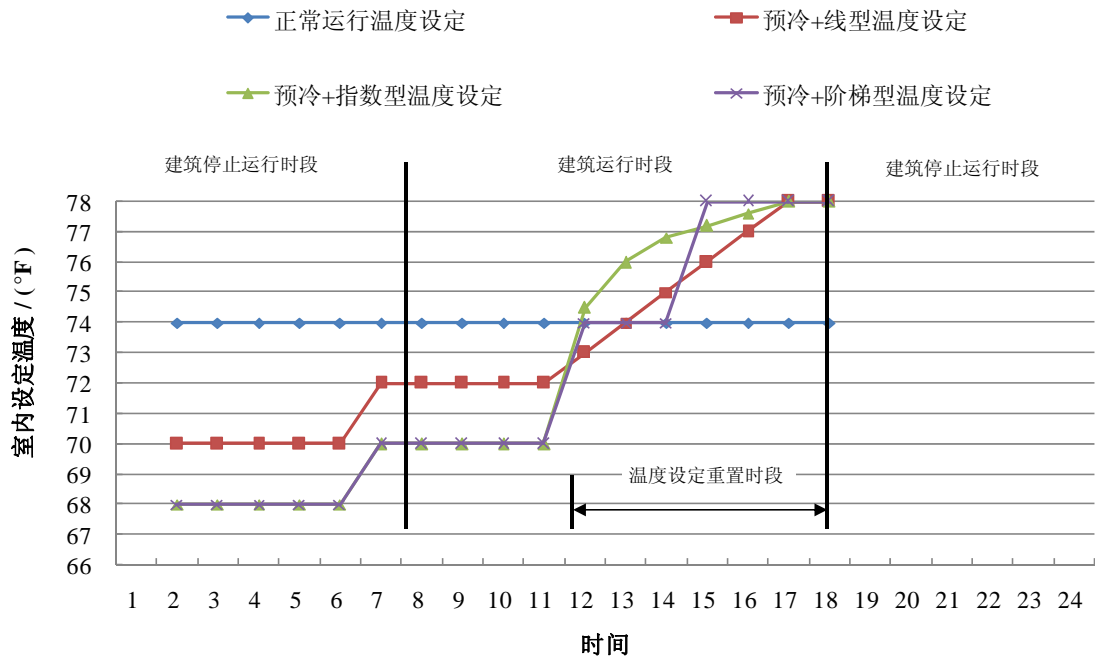


图 3.2 预冷和室内设定温度重置的需求响应策略

- 1) 第一种实测策略是预冷和线性室内设定温度重置。空调系统较平常稍早开启，从凌晨 3 点到早上 7 点，预冷到 70 °F，从早上 7 点到中午 12 点，为大部分的工作时间，设置区域温度到 72 °F。从中午 12 点到下午 6 点的峰值时段，室内空调设定温度线性上升到 78 °F。下午 6 点以后，空调系统停止运行。
- 2) 第二种策略是预冷和指数型室内设定温度重置。下午峰值时段，室内空调设定温度按指数而不是直线上升。
- 3) 第三种策略称为预冷和阶梯型室内设定温度重置。下午峰值时段，室内空调设定温度按阶梯型上升。实测的目的是为了确认在即将到来的高峰需求负荷减少时段延长预冷的影响。

本次实测研究中，我们测量了整个建筑能耗以及空调能耗数据，并没有分别测出各终端能耗。没有气象站测量室外温度和湿度。控制系统有专属的室外温度传感器。除此之外，我们将一个 Hobo 传感器放在屋顶采集室外温度数据。使用建筑控制系统记录空调系统性能参数。每 15 分钟约收集 50 个数据。8 个电力测量器安装在屋顶设备上来确定冷负荷和冷机负荷控制的影响。建筑控制系统可以记录这些区域的温度。这些温度数据需要与 CBE 在室内和展厅安装的设

备所测量的室内温度数据相比较。

3.3.3 确定基准日模型

在 2003 年和 2004 年的研究中，在所有实测的建筑中，可以分析出室外温度峰值和整个建筑能耗的密切联系。为了减少在基准日和实测日室外温度的差异，选择与每个实测日相同的室外温度作为基准日。对于 2007 年实测建筑的基准日模型的选择和确定主要基于室外空气最高温度和逐时温度等两个因素，而不是单单的考虑基准日模型的室外空气最高温度。

首先，根据与室外温度峰值的类似性，有一些天可以被用作基准日。然后计算这些基准日和实测日逐时室外温度的平均差值。

$$AVHOAT = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (B_i - T_i)^2 \quad (3.1)$$

B_i 为基准日逐时室外空气温度， T_i 为需求响应从策略实测日的逐时室外空气温度。实测始于 2006 年 9 月 11 日，到同年 9 月 25 日结束，每日室外温度峰值在 90°F 到 100°F 之间。气象预报温度相比设置在屋顶的 HOBO 传感器所实际测量温度高 3°F。HOBO 传感器所测定的最高温度为 102 °F。一共是 9 次实测，每次实测为期一天，采用预冷和室内设定温度重置，包括没有预冷的室内设定温度重置，7 次实测是在凉爽日，2 次实测是在室外温度较高的日期。有两次实测采用线型温度重置预冷，两次采用大幅度线性温度重置预冷实测，一次采用指数型温度重置预冷和两次无预冷加室内温度重置实测。所有的实测都是重复性的，除了指数温度重置预冷实测，因为该实测有时间限制。剩下的两天是无干扰的基准调查日。表 3.1 是实测的日期、策略以及气象条件。

表 3.1 预冷和室内设定温度重置策略描述

编号	日期	策略	室外温度最大值
1	9/11/2006	正常运行	99 °F
2	9/12/2006	预冷+线型室内设定温度重置	99 °F
3	9/13/2006	预冷+指数型室内设定温度重置	102 °F
4	9/14/2006	早上预冷+指数型室内设定温度重置	102 °F
5	9/19/2006	正常运行，舒适度调查	95 °F
6	9/20/2006	没有预冷+设定温度重置	95 °F
7	9/21/2006	预冷+设定温度重置	95 °F

8	9/25/2006	正常运行	95 °F
9	9/26/2006	没有预冷+设定温度重置	99 °F

表 3.2 表明预冷策略实测日和基准日逐时室外温度的比较,可以看出“9/7/06” (基准日) 是在炎热气候下需求响应策略实测日的最优化基准日。

表 3.2 预冷和室内设定温度重置策略描述

日期	需求响应策略 实测日期	基准模型日期				
		9/4/06	9/6/06	9/7/06	9/8/06	9/19/06
室外空气温度最大值(°F)	99.0	93.2	98.6	98.6	91.4	93
AVHOAT	-	22.67	12.22	4.36	4.36	13.14
日期	9/13/06	9/4/06	9/6/06	9/7/06	9/8/06	9/19/06
室外空气温度最大值(°F)	102	93.2	98.6	98.6	91.4	93
AVHOAT	-	39.77	7.17	7.05	51.01	67.07

3.3.4 实测结果分析

3.3.4.1 建筑总运行能耗变化

实测调查数据显示无论是在凉爽或者炎热的气候条件下,预冷和室内设定温度重置策略都可以在一定程度上降低建筑的运行能耗。

I. 预冷和线型室内设定温度重置策略

图 3.3 所示为在炎热气候条件下的基准日和采用预冷和线型室内设定温度重置策略实测日的整个建筑实测能耗对比。基准日早上时段的建筑运行能耗比实测日的要稍低。从中午 12:00 开始,室内设定温度开始上升,在预冷实测日中,需求能耗随着温度线性重置而减少。可以明显看到电力需求负荷从下午峰值时段转移到了早晨非高峰时段。峰值时段的电力需求负荷在 15:00 到 18:00 期间降低了 25%左右。

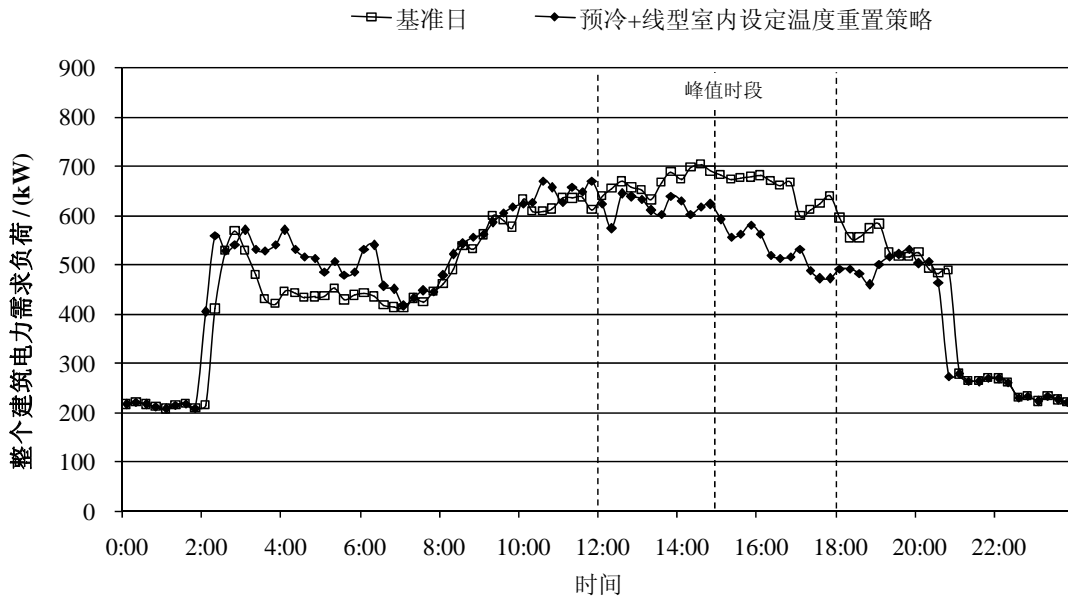


图 3.3 预冷和线型室内设定温度重置策略的能耗对比-CHCCC

表 3.3 为预冷策略实测数据与基准日的能耗对比情况。在高价电时段最大需求负荷的差值高达 166 kW。在实测中，在下午 6 点之前耗电量均无反弹，表明了温度还没有达到在最后实测设置的 78 °F，一些冷量没有完全被释放出来。

表 3.3 预冷和线型室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+线型室内设定温度重置	平时时段	94	49	1.08	0.56	13%	7%
	峰值时段	166	124	1.91	1.42	25%	19%

注：WBP (Whole Building Power)

II. 预冷和指数型室内设定温度重置策略

图 3.4 显示了下午峰值时段采用指数温度重置的能耗情况。峰值时段的电力需求负荷比线性温度重置明显减少，主要是因为室内设定的温度迅速升高的缘故。

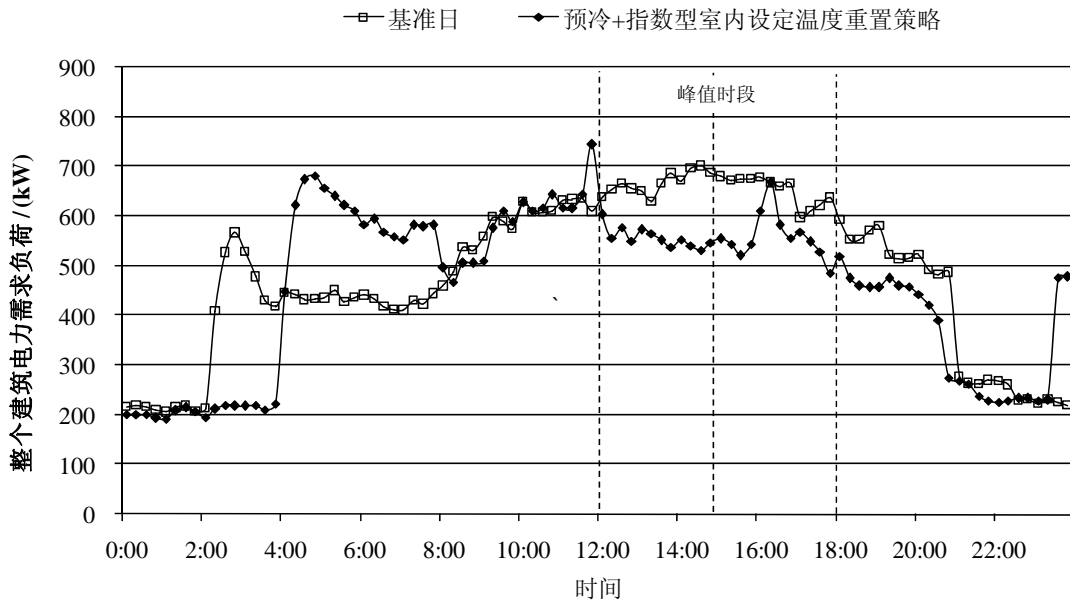


图 3.4 预冷和指数型室内设定温度重置策略的能耗对比-CHCCC

表 3.4 为详细的预冷和指数型室内设定温度重置策略的能耗数据对比。整个建筑电力需求负荷降低幅度在下午 4 点钟以前达到了 170 kW,但是 16:00~18:00 时段的电力需求负荷并没有减少很多,但是明显可以看出采用指数型室内设定温度重置策略也能够降低峰值时段的电力需求负荷。

但是相比于线性温度重置策略的实测情况,表 3.4 所示的建筑运行电力需求负荷在下午实测将要结束时有所反弹。表明了指数量室内设定温度上升幅度较大,我们需要更小的建筑时间常数来计算最优指数曲线,我们需要进一步的评估温度设定模型中的理论方法。但是这个反弹量仍然比原始的峰值电量要小,并且节能效果也是非常显著的。

表 3.4 预冷和指数型室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+指数型室内设定 温度重置	平时时段	170	110	1.96	1.26	24%	16%
	峰值时段	154	94	1.77	1.08	23%	14%

III. 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略

图 3.5 显示了在下午使用相同指数型室内设定温度重置策略的实测结果,夜

晚和早晨时段预冷。对于两次实测，下午电力需求负荷的降低幅度都是很显著的。但是夜间预冷相比于早晨预冷来说，对于早晨和下午电力需求负荷降低的程度没有很大的影响。下午峰值时段，早晨预冷策略所导致的电力负荷降低幅度稍低于夜晚预冷策略的效果。相比于图 3.4 所示，夜晚预冷在晚上储存冷量方面并没有显示出较大优势。在夜晚预冷实测日中，屋顶机组比正常的运行提前三个小时开启。夜晚预冷的效果不太显著，早晨负荷没有明显降低，有可能是因为建筑的蓄热能力相对较低，但下午温度重置将冷负荷从峰值时段转移到非峰值时段。在所实测过的蓄热能力高的建筑中，夜晚预冷能够降低早晨时的电力需求负荷。

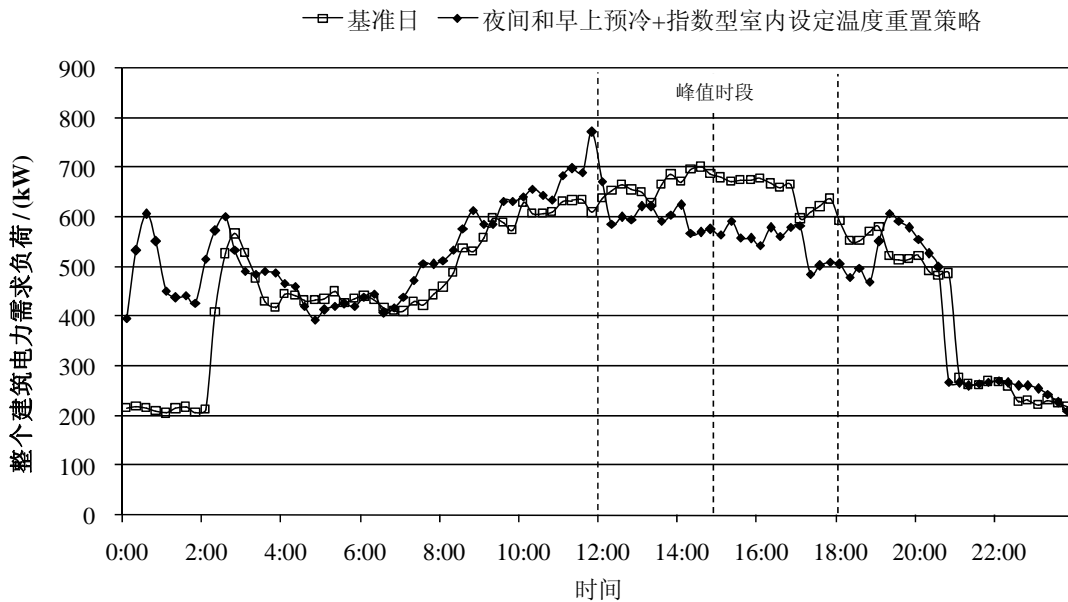


图 3.5 预冷和指数型室内设定温度重置策略的能耗对比-CHCCC

实测结果对于 2003、2004 以及 2005 年所存在的问题意义重大。2003 年和 2004 年的结果表明对于相对少的蓄热建筑，夜晚预冷的效果对于下午电力需求不显著，尤其是在气温相对较低的时段。2005 年实测结果表明对于大量蓄热建筑，夜晚蓄热效果十分明显。研究表明即使是在炎热气候条件下，少量或中等蓄热建筑，夜晚预冷的效果不显著。

表 3.5 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略的能耗数据-CHCCC

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+指数型室内设定 温度重置	平时时段	131	64	1.51	0.73	19%	10%
	峰值时段	136	101	1.56	1.17	20%	16%

3.3.4.2 空调运行能耗变化

如图 3.6 所示为预冷策略实测和基准日屋顶机组电力需求负荷的比较。在早晨预冷时段，预冷策略实测的机组电力负荷几乎是基准日的两倍。中午 12 点以后，屋顶机组电力负荷开始降低，在峰值时段 15:00~18:00 期间电力负荷降低幅度非常明显。但是对比结果也表明了对于该策略下的屋顶机组电力需求负荷曲线不是很平坦，有轻微的波动。

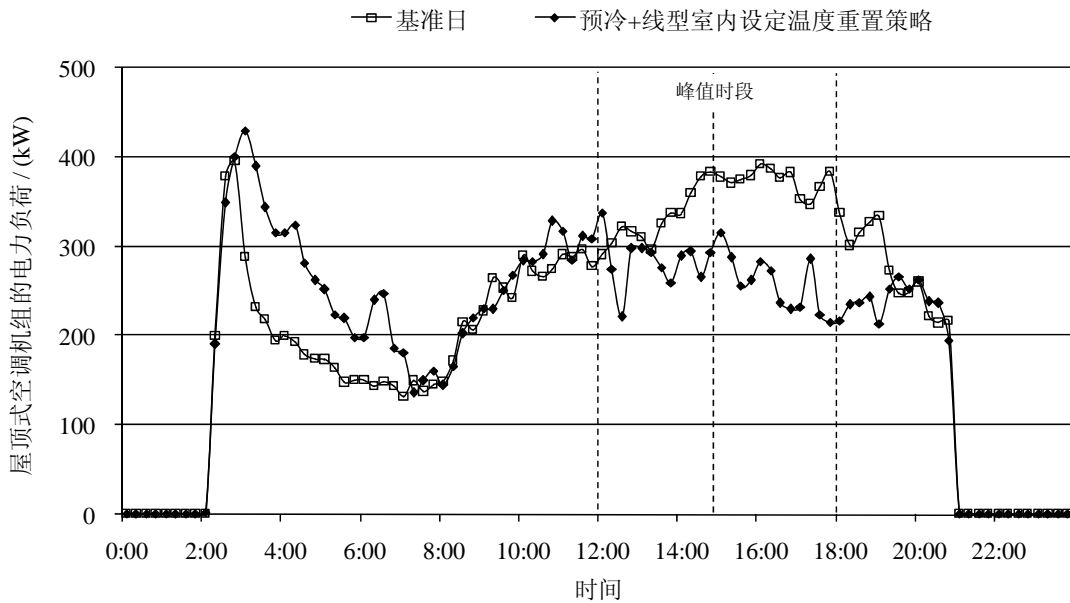


图 3.6 预冷和线型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-CHCCC

如图 3.7 所示，可以看出指数型室内设定温度重置策略下的早上 9:00~12:00 时段的空调电力负荷没有太大的变化，然而在峰值时段期间，空调电力负荷有非常大的反弹。12:00~16:00 时段，屋顶机组的电力需求负荷平均降低了 45% 左右，相比于线型的温度重置策略来说，其电力负荷降低的幅度非常大，但是同时我们需要保证其负荷变化的稳定性。

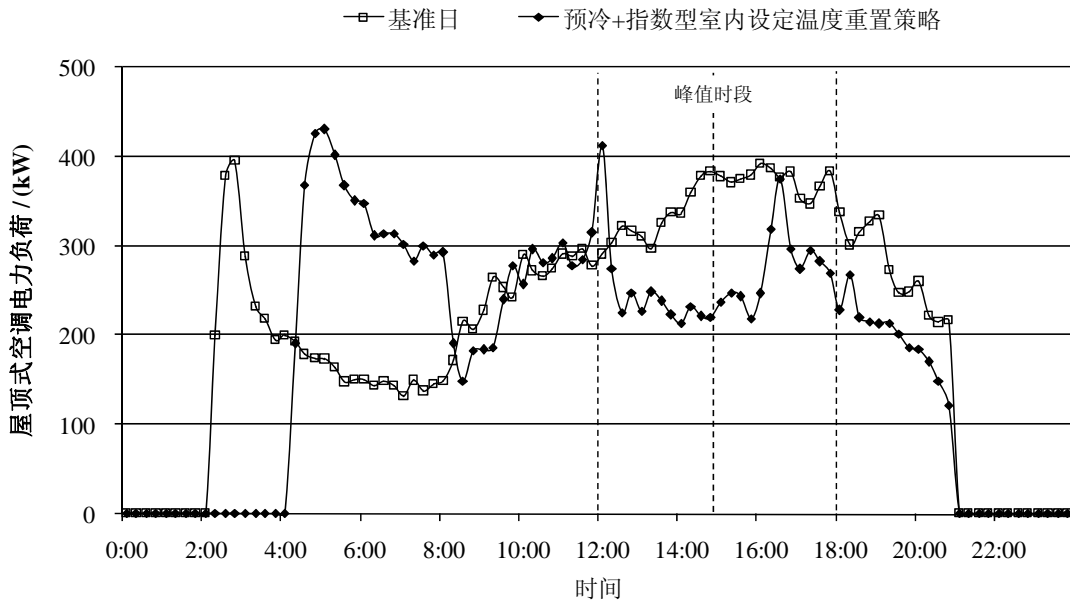


图 3.7 预冷和指数型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-CHCCC

图 3.8 为夜晚和早上预冷及指数型温度重置对于空调机组电力负荷的影响结果。室内设定温度重置时段的电力需求负荷曲线十分平坦。并且早上预冷时段的电力负荷相比正常运行情况来说没有发生大的变化；峰值时段电力负荷曲线平稳，电力需求峰值负荷降低了 100 kW 左右。

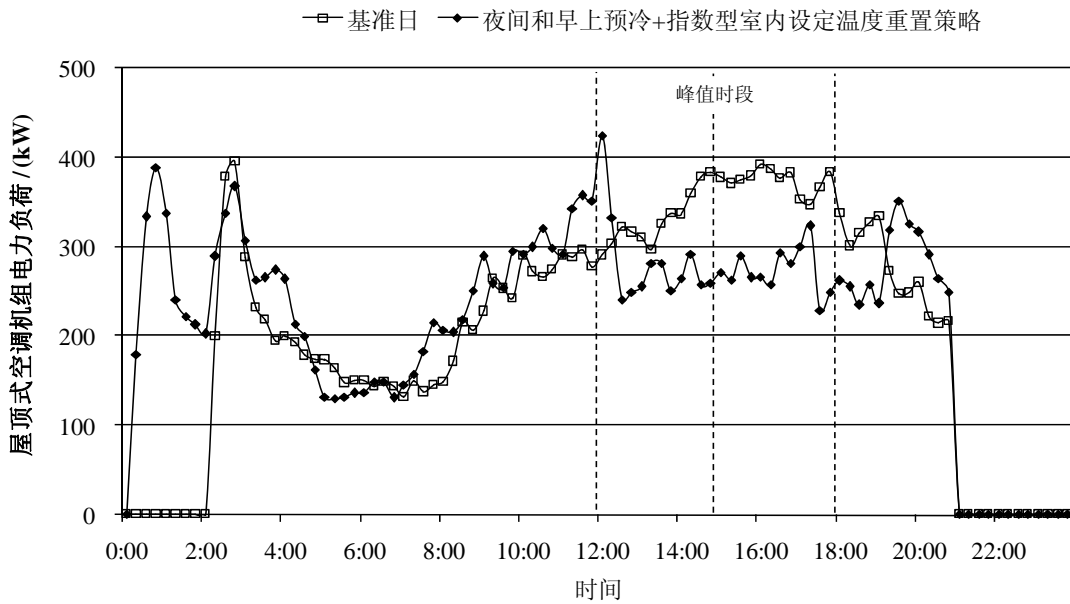


图 3.8 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-CHCCC

3.3.4.3 回风温度的变化

如图 3.9 所示，虽然在峰值时段结束时室内设定温度为 78 °F，但是典型指数温度重置实测的回风温度值不会高于 75 °F。在晚上和早上预冷时段，温度会随着设定温度而发生改变。但是，在下午，当设定温度重置为更高时，区域温度不能随之改变，主要是由于建筑材料将所储存的冷量随着室内温度的升高而慢慢的释放出来，从而维持室内设定温度。这是室内人员在下午不会对舒适度抱怨的原因之一，这是因为温度根本不高的缘故。

同时回风温度的变化与空调系统最小送风量的设定值有关。变风量系统的最小送风量设定值过高或者送风温度设置的过低。虽然 VAV 变风量风阀设置在最小位置，但是来自最小送风量的负荷已经完全可以维持室内温度在 75 °F 左右。为了完全利于建筑材料所储存的冷量，送风温度的值应该被设置得更高一些。我们没有对此方面做实测分析。



图 3.9 指数型室内设定温度重置策略下的回风温度变化-CHCCC

3.3.4.4 能耗费用

南加州爱迪生电力能源公司 (Southern California Edison) 是这两栋建筑的能量供给公司。表 3.6 是分时电价时段的定义划分。表 3.7 为不同电力需求负荷下的详细费率，包括分时电价与月基本需求负荷费用。

整个能源费用包括了用户基本费用、逐时能耗费用和峰值电力需求负荷费用。关于逐时能耗费用和峰值需求负荷费用，根据使用时段和相关时段需求负荷费用计算。特别是在尖峰电价 (Critical Price Period) 时段，这些预冷的策略在节约能耗费用方面尤为显著。逐时能耗费用在峰值时段 (15:00~18:00) 是标准费用的 9 倍。实测数据表明月电力需求峰值负荷通常发生在峰值时段，所以需求响应策略在一定程度上能够降低运行能耗以及用户所关心的能耗费用。

表 3.6 南加州爱迪生电力能源公司的分时电价时段

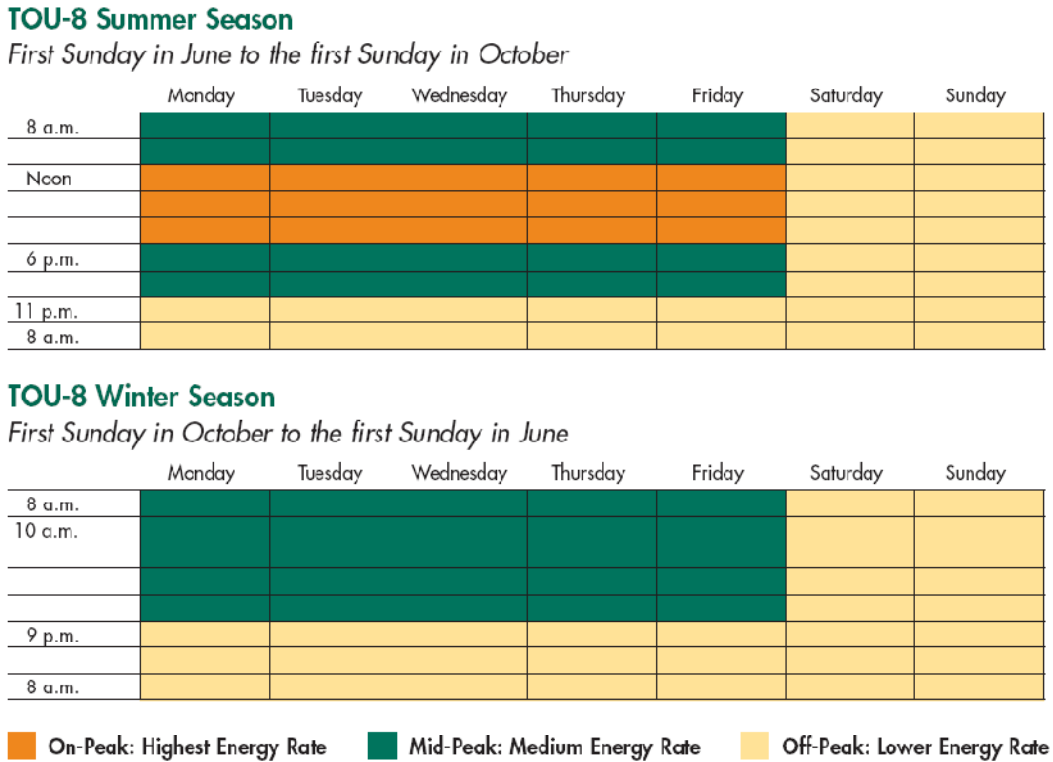


表 3.7 CHCCC 所应用的分时电价详细信息

Rate Schedule	Rate Structure	Customer Charge	Demand (kW) Charge	Energy Charge (per kWh)
TOU-8-CPP (Below 2 kV)	<ul style="list-style-type: none"> • Time-of-Use rates • Facilities- and Time-related demand charges • Seasonal structure • Benefits customers who can significantly reduce usage during an activated Critical Peak Pricing (CPP) period 	\$414.98 per month per meter	<p>Facilities-related demand charge per monthly maximum kW per meter <u>Delivery:</u> \$9.71 <u>Generation:</u> \$0.00</p> <p>Time-related demand charge per monthly maximum kW per meter in the summer season only <u>Delivery:</u> \$0.00/on-peak (Including CPP High-Price) \$0.00/mid-peak <u>Generation:</u> \$15.37/on-peak (Including CPP High-Price) \$5.19/mid-peak</p>	<p><u>Delivery:</u> \$.01390 <u>DWR Generation:</u> \$.09490 <u>SCE Generation:</u> Summer Season – \$.33377 (CPP Mod. Price Period Noon – 3:00 p.m.) High Price Period 3:00 p.m. – 6:00 p.m.) \$.73249 <u>Non CPP Event Time Periods</u> Summer Season – \$.08840/on-peak \$.06291/mid-peak \$.03637/off-peak Winter Season – \$.06547/mid-peak \$.04014/off-peak</p>

I. 预冷和线型室内设定温度重置策略

能耗费用包括逐时能耗费率、峰值电力需求负荷费用和其他电力输送及税率等费用。图 3.10 所示为不同费率时段的能耗量以及总能耗量，可以看出从尖峰 CPP 时段转移其他时段的能耗量几乎相等。相比于正常运行条件下，需求响应策略下能耗费用降低了\$278。由于 CPP 时段下的电力峰值负荷费用非常高，如果在相同的气候条件下，建筑内空调系统采用该策略运行，每月大约节约能耗费用\$1380。

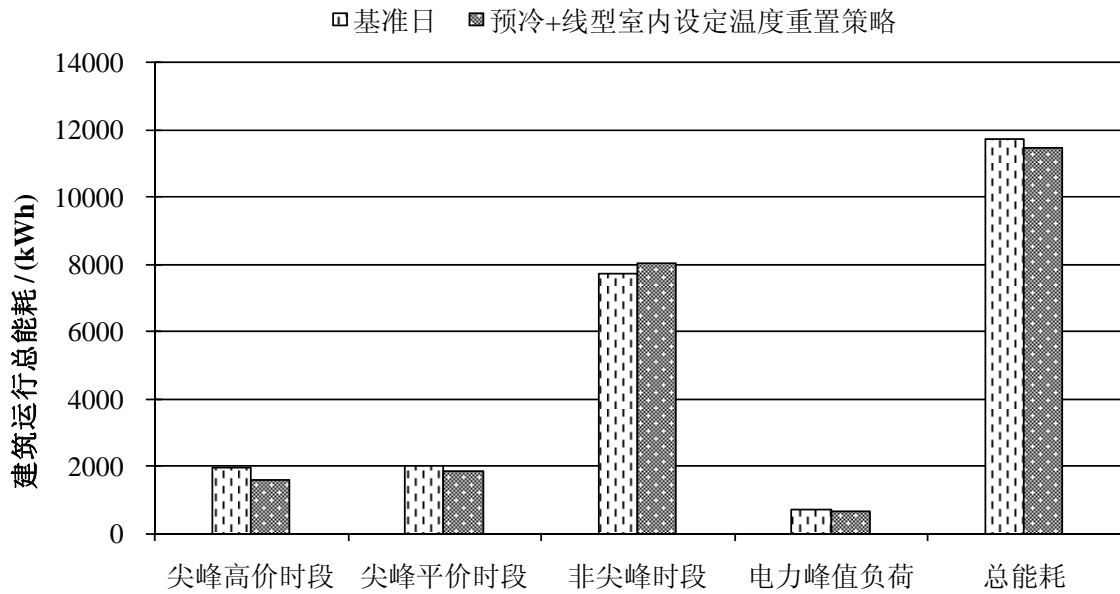


图 3.10 预冷和线型室内设定温度重置策略下的运行能耗-CHCCC

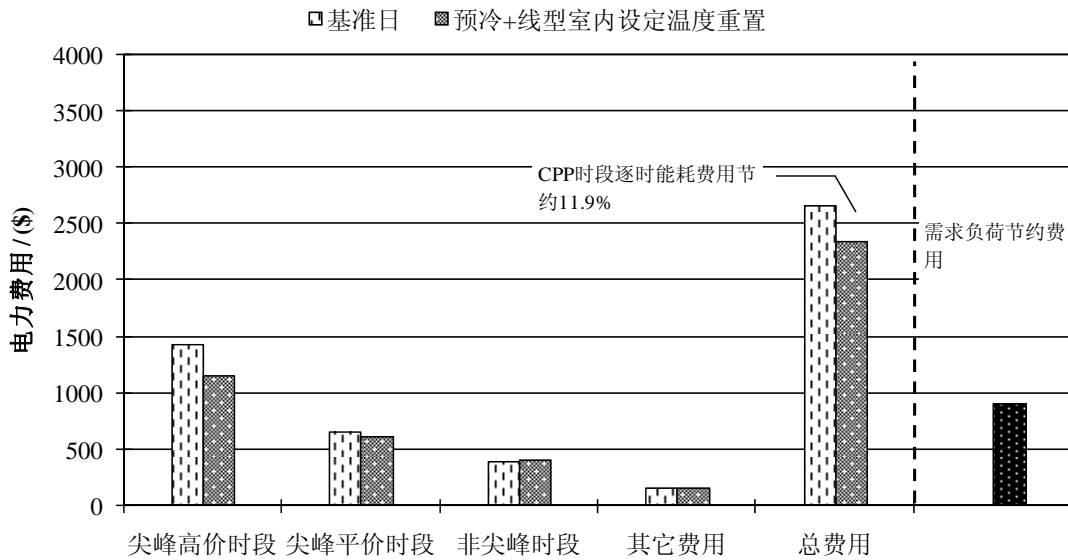


图 3.11 预冷和线型室内设定温度重置策略下的能耗费用-CHCCC

II. 预冷和指数型室内设定温度重置策略

图 3.12 和图 3.13 所示为指数型室内设定温度重置策略下能耗使用量和费用

的比较。可以看出指数型温度重置策略下整个建筑所减少的能耗总量要多于线性温度重置策略的效果。但是指数型温度重置策略下电力需求负荷在峰值时段发生反弹，导致电力峰值负荷费用降低不明显。因此在峰值时段限制电力需求负荷的反弹非常重要。

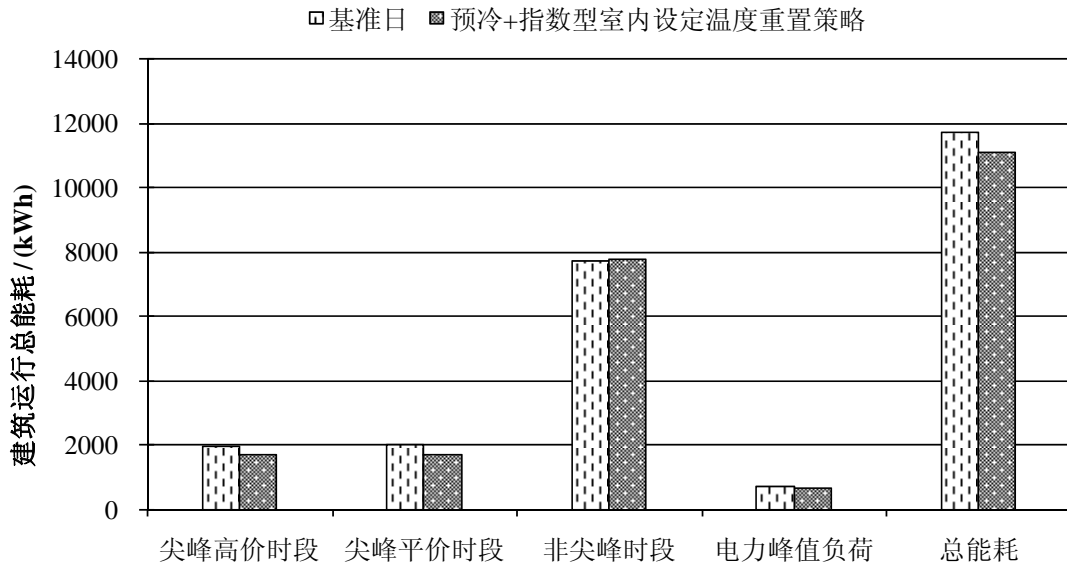


图 3.12 预冷和指数型室内设定温度重置策略下的能耗-CHCC

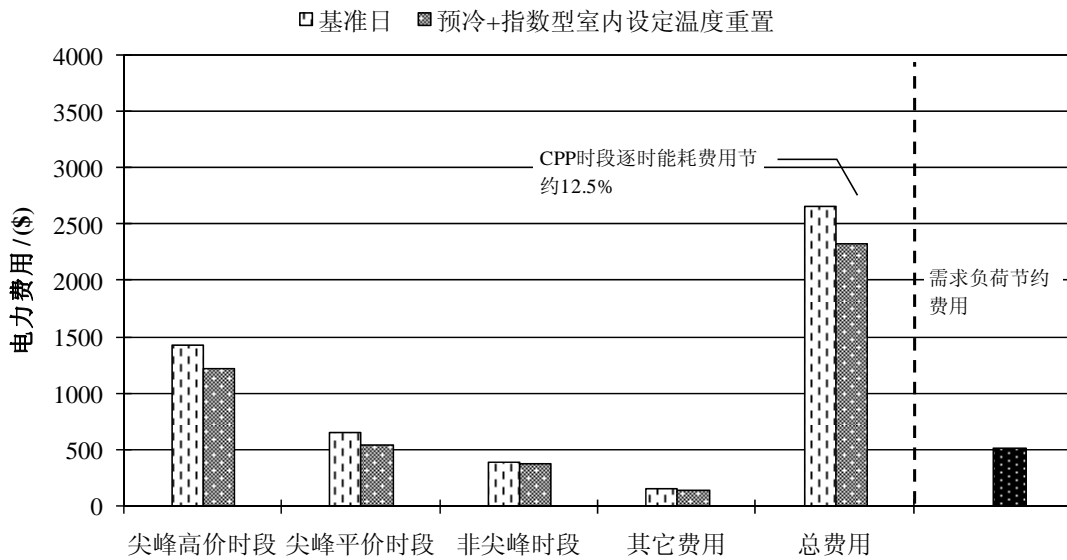


图 3.13 预冷和指数型室内设定温度重置策略下的能耗费用-CHCC

III. 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略

夜晚和早上预冷和指数型温度重置策略下早上时段的电力需求没有减少太多。并且这个策略由于夜间运行空调系统，从而导致总能耗比基准日要多 400 kWh，总的节约费用大约为\$1358，由于峰值时段的电力负荷曲线反弹的幅度较小。比单独的早上预冷策略的效果要好很多。

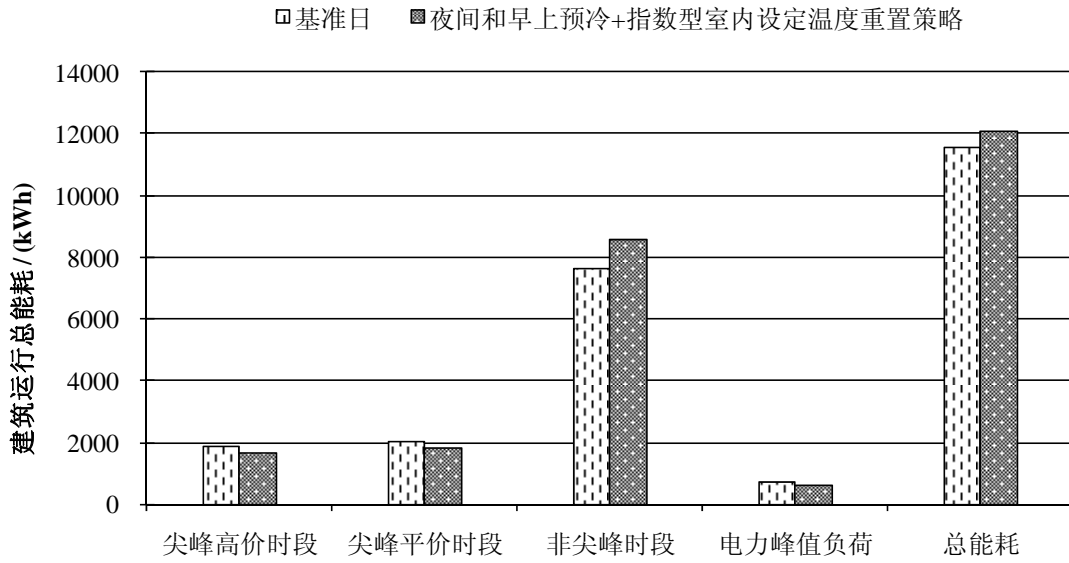


图 3.14 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略下的能耗-CHCC

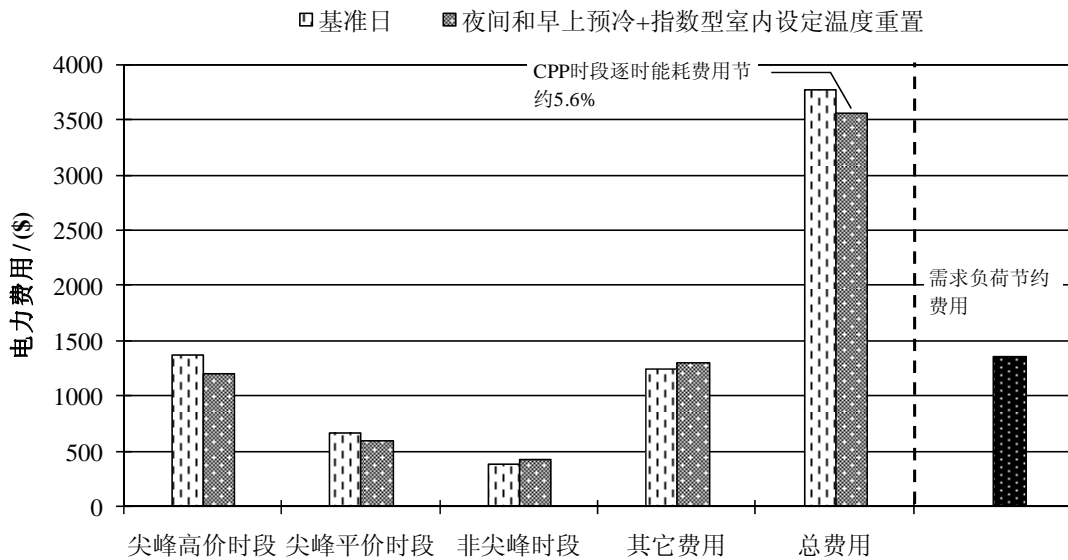


图 3.15 夜间&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略下的能耗费用-CHCC

3.4 实测结果分析-II

3.4.1 实测建筑描述

实测建筑 II 是位于加州 San Bernardino 地区 Tri-City Corporate Center 的一幢办公楼 (TCCSB)，该建筑面积为 87,000 ft²，地板均铺有地毯，没有外遮阳，采用内遮阳手动控制方式。空调系统采用三台屋顶式空调机组，单风道变风量系统。整个建筑划分为 150 个空调分区，应用自动数字控制系统控制空调分区内室内温度。

该建筑运行方式是典型的办公楼运行特性，整个控制系统设置为最优化模式，根据早上的室内外温度，自动优化决定何时开启空调系统。正常运行下的空调系统在早上 5:00 开启，预热或预冷至 8:00。该建筑内部控制中心负责每日的系统运行和维护。

3.4.2 测试策略介绍

该建筑的预冷和室内温度控制重置策略见图 3.16 所示。在启动和工作时间，该建筑正常空调设定温度是 74 °F。下午 6 点以后，关闭空调系统。在通常运行状态下 (5:00~18:00)，单独区域的设置温度变化幅度为 72~76 °F，平均值约为 74 °F。

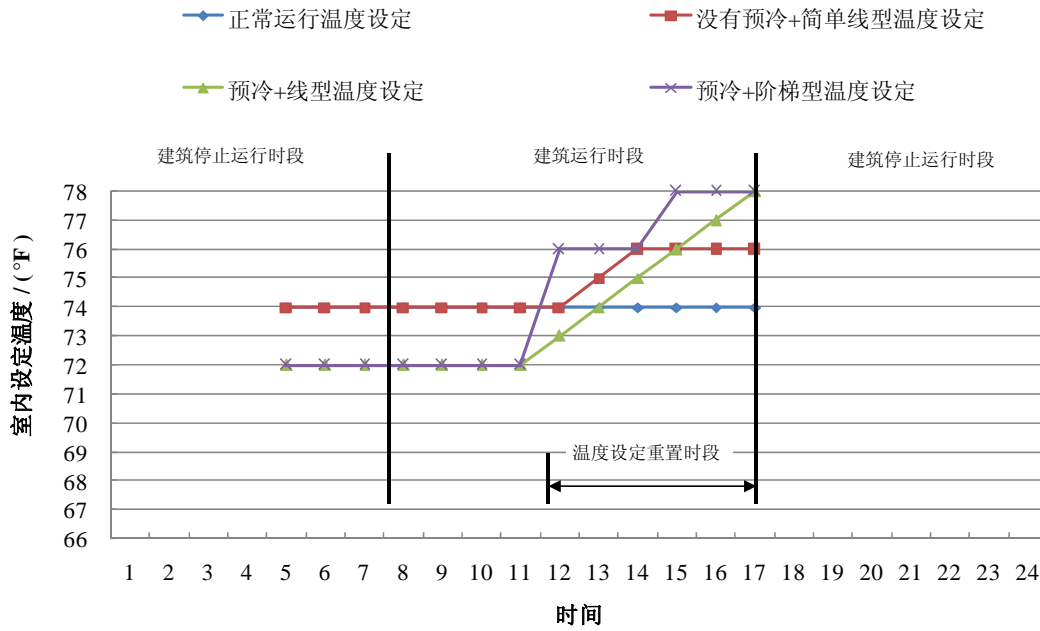


图 3.16 预冷和室内设定温度重置的需求响应策略

- 1) 第一种实测策略是没有预冷和简单的线性室内设定温度重置。空调系统早上正常运行，设定温度为 74 °F，从早上 8:00 开始，办公人员开始出入建筑，在峰值时段 12:00~15:00，设置温度线性上升到 76 °F。下午 3 点以后，室内设定温度稳定在 76 °F。空调系统在下午 6 点钟停止运行。
- 2) 第二种策略是预冷和指数型室内设定温度重置。下午峰值时段，温度按指数而不是直线上升。
- 3) 第三种策略称为预冷和阶梯型室内设定温度重置。下午峰值时段，温度按阶梯型上升。实测的目的是为了确认在即将到来的高峰需求负荷减少时段延长预冷的影响。

3.4.3 确定基准日模型

该建筑采用与 CHCCC 的基准日模型相同的选择方法。根据最高室外空气温度和逐时室外温度来确定每一个需求响应策略实测日的基准日模型。其原则是不但要找到与实测日的最高室外温度相近的基准日，同时保证实测日和基准日的逐时温度的差值最小。

通过分析 2007 年 8 月 13 日至 2007 年 9 月 3 日期间的逐时室外温度气象数据，可以看出，该时段的室外最高温度分布在 70 °F~115 °F 之间，包括了不同的气候条件，如凉爽气候，炎热气候和极热气候。

在此期间我们选择了 7 个实测日，每一次实测持续一天。有五天采用预冷和室内设定温度重置策略，其中的三天是在炎热气候下进行，一天是在极热气候下，还有一天是在凉爽气候条件下进行。另外，这五天实测一天采用室内温度重置无预冷，一天采用线性温度重置预冷，还有三天采用指数温度重置预冷。剩下的两天作为不被干扰的基准日，但是系统的启动比一般时间要早。表 3.8 描述了所有实测的日期、采用的策略和气候条件。

表 3.8 预冷和室内设定温度重置策略描述

编号	日期	策略	室外温度最大值
1	8/14/2007	无预冷+简单线型室内设定温度重置	104 °F
2	8/15/2007	预冷+线型室内设定温度重置	104 °F
3	8/16/2007	预冷+阶梯型室内设定温度重置	104 °F
4	8/17/2007	正常运行，无舒适度调查	101 °F
5	8/28/2007	正常运行，舒适度调查	103 °F
6	8/29/2007	预冷+阶梯型室内设定温度重置	111 °F
7	9/18/2007	预冷+阶梯型室内设定温度重置	84 °F

我们将所有的实测划分成三个不同的气候条件。当室外最高温度大约为 104°F 时称为炎热气候；当室外最高温度达到 111°F 时为极其炎热气候；当室外最高温度约为 84°F 时称为凉爽气候。表 3.9、表 3.10 和表 3.11 分别为不同气候条件下的需求响应策略与相应的基准日模型。

通过选择计算得出 8/17/07 是炎热气候下需求响应策略实测日（8/14/07, 8/15/07, 8/16/07）的最优基准日模型；8/28/07 是极其炎热气候下需求响应策略实测日（8/29/07）的最优基准日模型，9/17/07 是凉爽气候下需求响应策略实测日（9/18/07）的最优基准日模型，虽然 9/17/07 的最高室外温度比 9/18/07 低 5 °F，但该基准日与 9/18/07 的气候条件最为接近。

表 3.9 炎热气候下需求响应策略及相应的基准日模型-TCCSB

	需求响应策略 实测日期	基准模型日期				
		8/17/07	8/20/07	8/21/07	8/28/07	9/04/07
日期	8/15/07	8/17/07	8/20/07	8/21/07	8/28/07	9/04/07
室外空气温度最大值(°F)	103.5	100.6	102.1	103.2	102.6	103.8
AVHOAT	-	4.63	13.58	23.85	9.78	13.14
日期	8/16/07	8/17/07	8/20/07	8/21/07	8/28/07	9/04/07
室外空气温度最大值(°F)	103.5	100.6	102.1	103.2	102.6	103.8
AVHOAT	-	4.71	12.44	22.13	9.01	13.07

表 3.10 极其炎热气候下需求响应策略及相应的基准日模型-TCCSB

	需求响应策略 实测日期	基准模型日期				
		8/28/07	8/30/07	8/31/07	9/03/07	9/04/07
日期	8/29/07	8/28/07	8/30/07	8/31/07	9/03/07	9/04/07
室外空气温度最大值(°F)	110.7	102.6	109.1	108.6	111.1	103.8
AVHOAT	-	23.26	43.53	28.40	54.59	37.75

表 3.11 凉爽气候下需求响应策略及相应的基准日模型-TCCSB

	需求响应策略 实测日期	基准模型日期				
		9/06/07	9/17/07	9/19/07	9/21/07	9/24/07
日期	9/18/07	9/06/07	9/17/07	9/19/07	9/21/07	9/24/07
室外空气温度最大值(°F)	83.8	89.9	78.8	71.3	82.2	88.0
AVHOAT	-	250.1	4.41	16.84	35.96	19.00

注：(1) 2007 年 8 月 14 日的逐时室外温度未能记录；

(2) 所有的逐时室外温度来源于控制系统；

(3) 所有的基准日和需求响应测试日均为工作日，周末和节假日不包含在内。

3.4.4 实测结果分析

3.4.4.1 建筑总运行能耗变化

(1) 炎热气候条件

I. 无预冷和简单线型室内设定温度重置

图 3.17 为 8/14/07 需求响应策略的实测能耗与基准日模型的对比结果。在基准日 8/17/07，空调系统大约在早上 3:00 开启，比实测日要早 2 小时。从需求响应策略的实测能耗结果来看，对于下午的电量需求，下午 1 点钟以后电力需求

负荷平均降低了 30 kW。由于 2007 年 8 月 14 日的平均室外温度比基准日要高 3 °F，并且室外温度峰值比基准日高 6 °F。因此，相比较基准日，需求响应策略的效果并不是十分显著。但是仍然可以看出需求负荷在温度重置时段下降的幅度非常大，如果在相同气候条件下，该策略的在降低需求负荷方面的效果将更为显著。

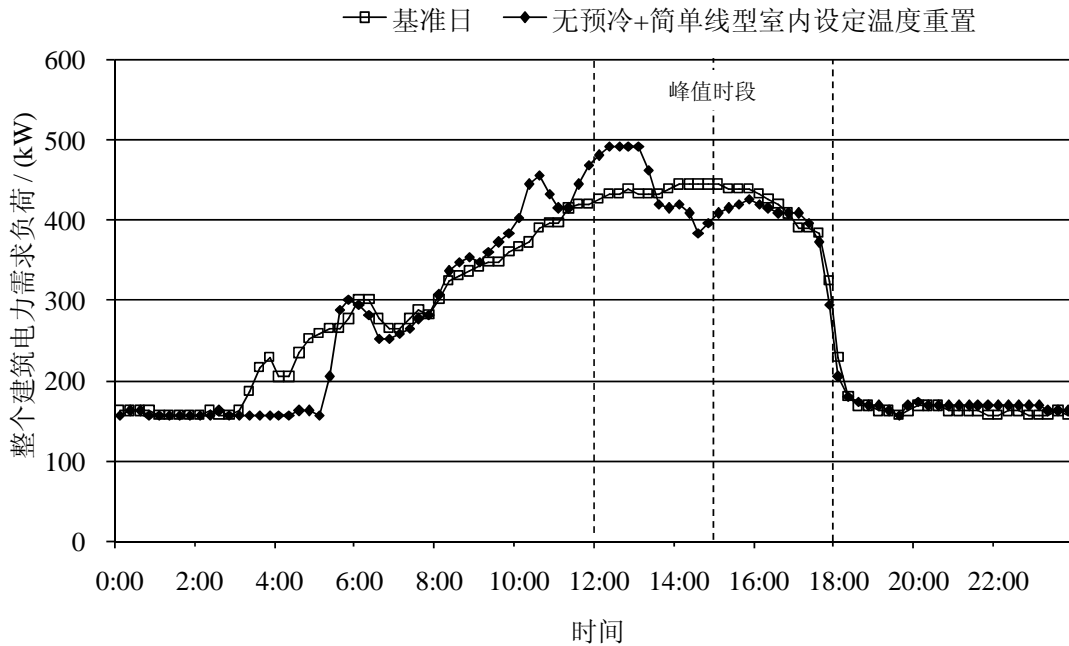


图 3.17 无预冷和简单线性室内设定温度重置策略的能耗对比-TCCSB

表 3.12 为预冷和温度重置策略的实测数据与基准日的能耗对比情况。由于基准日模型的室外温度相对较低，峰值时段的需求负荷并没有降低很多，平均降低了大约 3%。

表 3.12 预冷和线性室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+线性室内设定温度重置	平时时段	60	-10	0.68	0.69	14%	-2%
	峰值时段	36	12	0.41	0.41	8%	3%

II. 预冷和线性室内设定温度重置

图 3.18 为 2008 年 8 月 15 日预冷和线性室内设定温度重置策略的实测能耗与基准日模型的对比。该建筑凌晨 5:00 开始运行空调系统进行预冷，且 5:00~

12:00时段空调房间设定温度比常规设定温度低2°F,相比8月17日基准日模型,同时段的建筑运行能耗提高10~25%,约50~80kW;12:00~18:00峰值时段室内设定温度开始升高,电力需求负荷也开始随之降低,尖峰电价时段前半段12:00~15:00的峰值电力需求负荷降低了19%,后半段15:00~18:00的峰值电力需求负荷降低了15%左右,大约为53kW。但是在下午14:00左右电力负荷曲线出现反弹,通过比较基准日和需求响应策略实测日的逐时室外温度,我们发现8月15日的室外平均温度比基准日要高2°F,这就意味着如果在相同的气象条件下该策略的效果也同样更为显著。

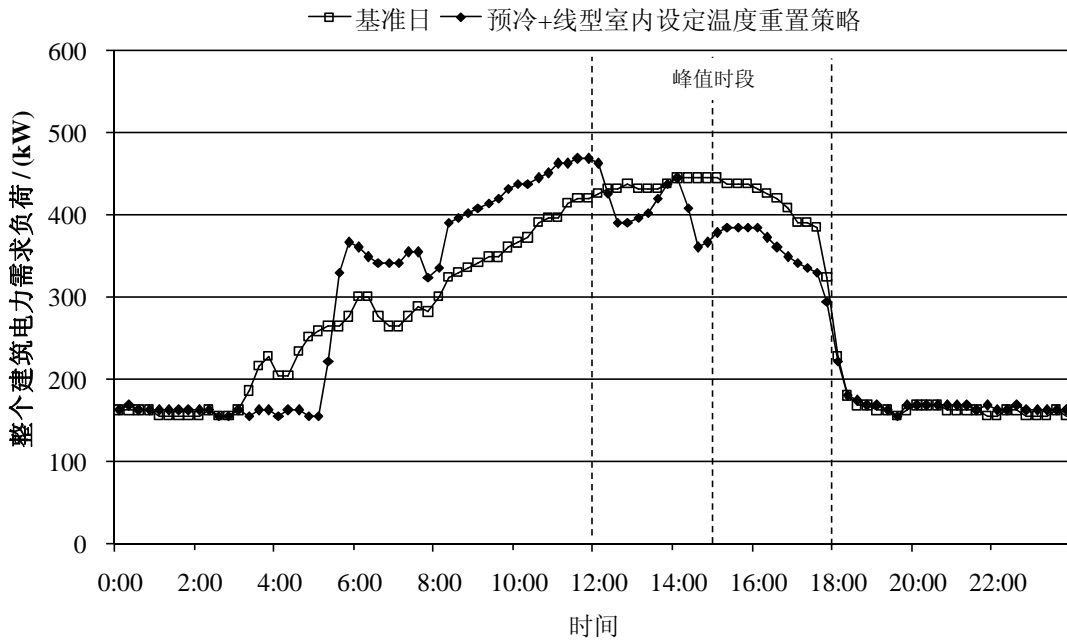


图 3.18 无预冷和简单线性室内设定温度重置策略的能耗对比-TCCSB

表 3.13 所示为尖峰时段的需求响应策略对整个建筑电力需求负荷的影响程度,可以看出在尖峰时段的后半段其策略的效果更为明显。

表 3.13 预冷和线性室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+线性室内设定温度重置	平时时段	84	28	0.97	0.32	19%	6%
	峰值时段	64	53	0.76	0.61	15%	13%

III. 预冷和阶梯型室内设定温度重置

8月16日的预冷策略与8月15日相同，但是峰值时段12:00~18:00的室内设定温度重置策略不同。图3.19为预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗结果与基准日模型的对比。相比于基准日模型，预冷期间同时段的电力负荷增加了10~20%；8月16日下午12:00~18:00时段的电力负荷没有大的波动，运行稳定，平均电力需求负荷降低了45 kW左右。表3.14表明尖峰电价时段的两个时段期间的电力负荷降低幅度大致相同，该策略运行非常稳定。

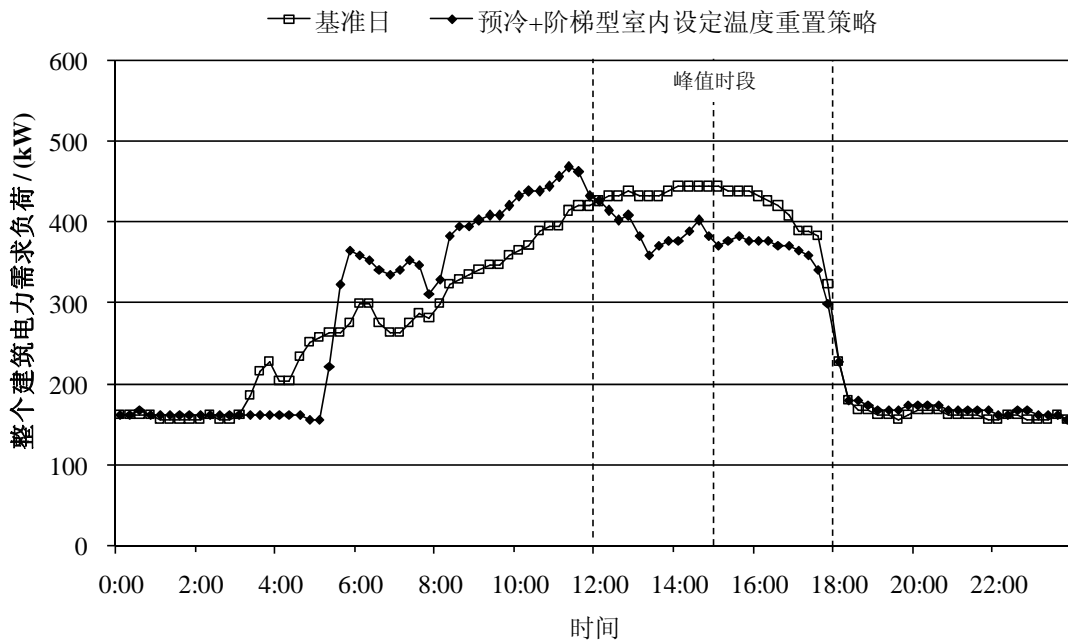


图 3.19 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗对比-TCCSB

表 3.14 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+阶梯型室内设定 温度重置	平时时段	72	45	0.83	0.52	16%	10%
	峰值时段	72	46	0.83	0.53	17%	11%

(2) 极其炎热气候

图 3.20 为 8 月 28 日与基准日模型的逐时室外空气温度对比结果。可以看出

基准日的室外温度最大值要比实测当天最高温度低 5~6 °F。即使如此,从图 3.21 可以看出该策略在极其炎热气候条件下的效果非常明显。特别是尖峰时段的后后半段 15:00~18:00 其电力需求负荷降低了接近 30%, 需求策略实测日与基准日的峰值电力需求负荷相差了接近 100 kW。

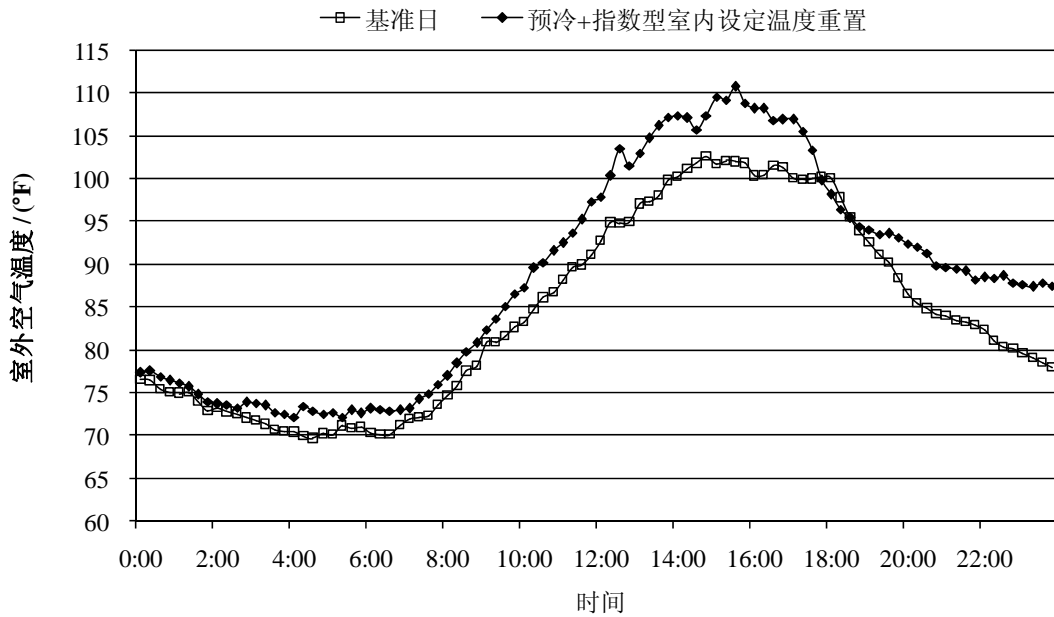


图 3.20 8 月 28 日与基准日的室外空气温度对比-TCCSB

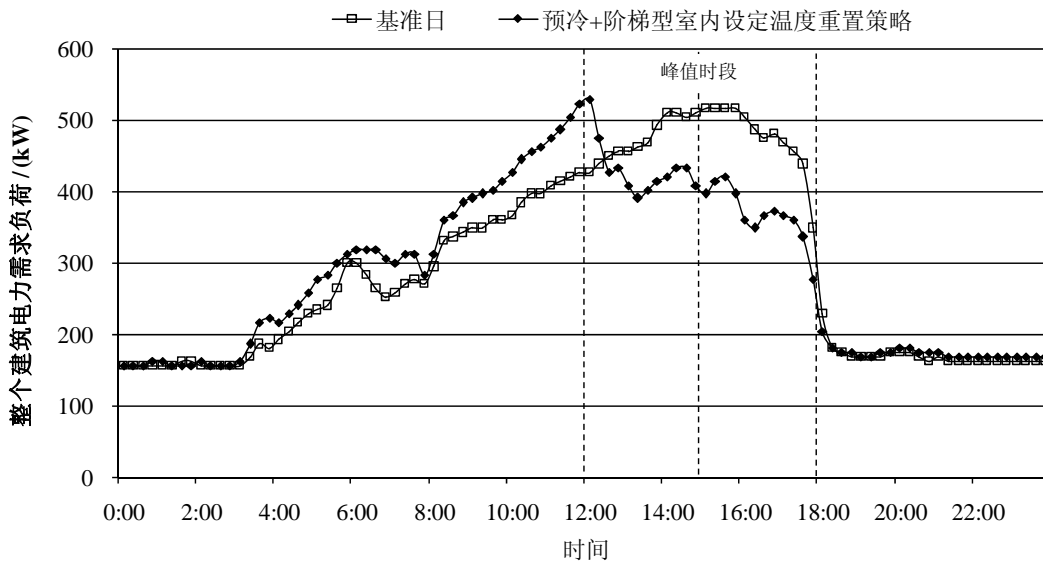


图 3.21 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗对比-TCCSB

表 3.15 列出了该策略在降低峰值时段电力负荷的变化，逐时电力负荷差值最多达到了 144 kW，平均电力负荷降低了 109 kW，表明该策略在该气候条件下的效果非常明显。

表 3.15 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+阶梯型室内设定温度重置	平时时段	102	43	1.17	0.49	20%	9%
	峰值时段	144	109	1.66	1.25	30%	23%

(3) 凉爽气候条件

图 3.22 为 9 月 18 日与基准日模型的逐时室外空气温度对比结果，可以看出基准日的 14:00~18:00 时段的室外温度平均要比实测当天低 4~5 °F。图 3.23 所示为该策略在凉爽气候条件下对整个建筑电力需求负荷的影响。可以看出该策略下的电力需求负荷曲线非常稳定，基本没有波动。虽然峰值电力负荷降低的幅度没有同样策略在极其炎热气候条件下那么大，但是其效果同样非常明显。

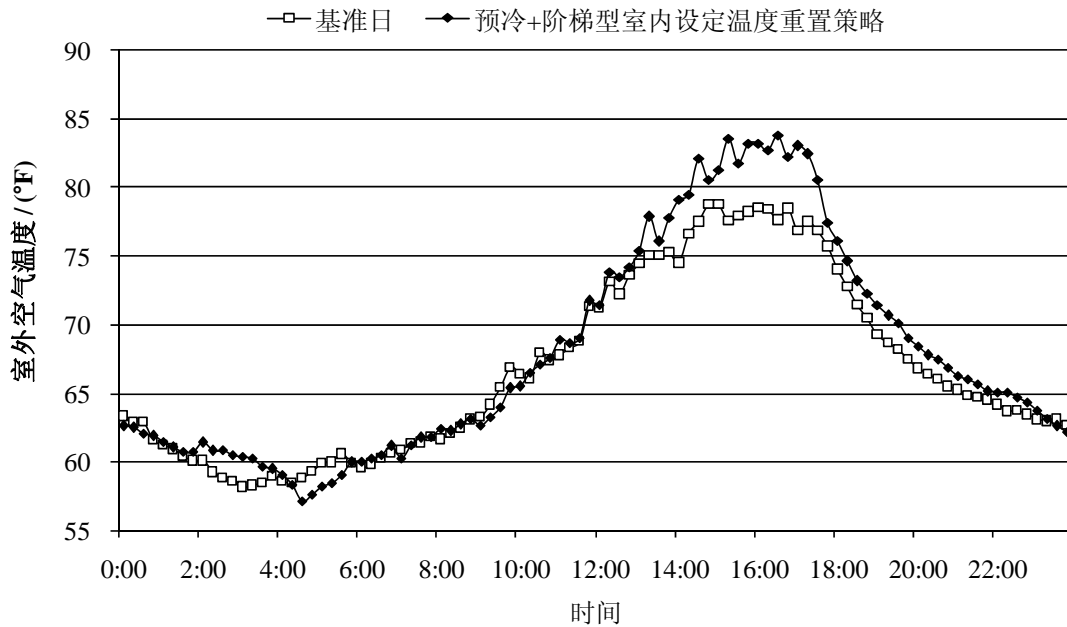


图 3.22 9 月 18 日与基准日的室外空气温度对比-TCCSB

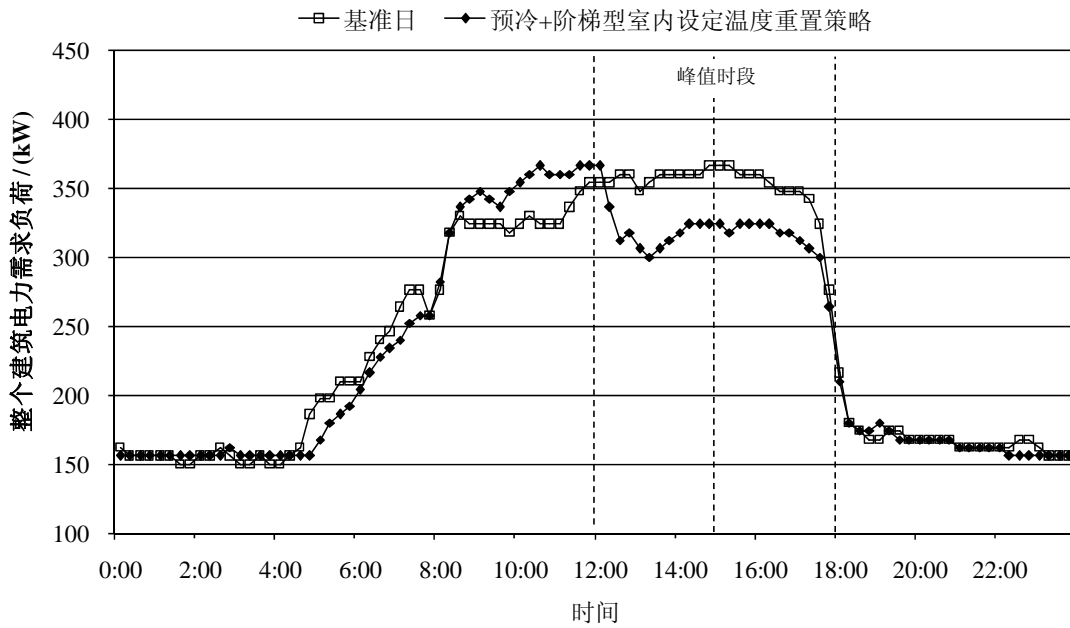


图 3.23 凉爽气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗对比-TCCSB

表 3.16 列出了该策略下基于基准日模型的电力负荷变化，可以看出整个尖峰时段的平均电力负荷降低幅度基本相同。

表 3.16 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的能耗数据

预冷策略	电力价格时段	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+阶梯型室内设定 温度重置	平时时段	54	38	0.62	0.43	15%	10%
	峰值时段	48	33	0.55	0.38	14%	10%

3.4.4.2 空调运行能耗变化

(1) 炎热气候条件

I. 无预冷和简单线型室内设定温度重置

图 3.24 为无预冷的简单线型室内设定温度重置策略和基准日模型的空调机组电力需求负荷对比结果。在温度重置的前半段 12:00~15:00 期间的电力需求负荷降低幅度达到了 75 kW，相当于同时刻基准日模型的空调机组电力负荷的 32%左右。但是实测结果显示电力需求负荷降低所持续的时间比较短，在 15:00

后, 电力需求负荷上升到一个较高的水平, 但仍然比基准日的峰值电力负荷低。

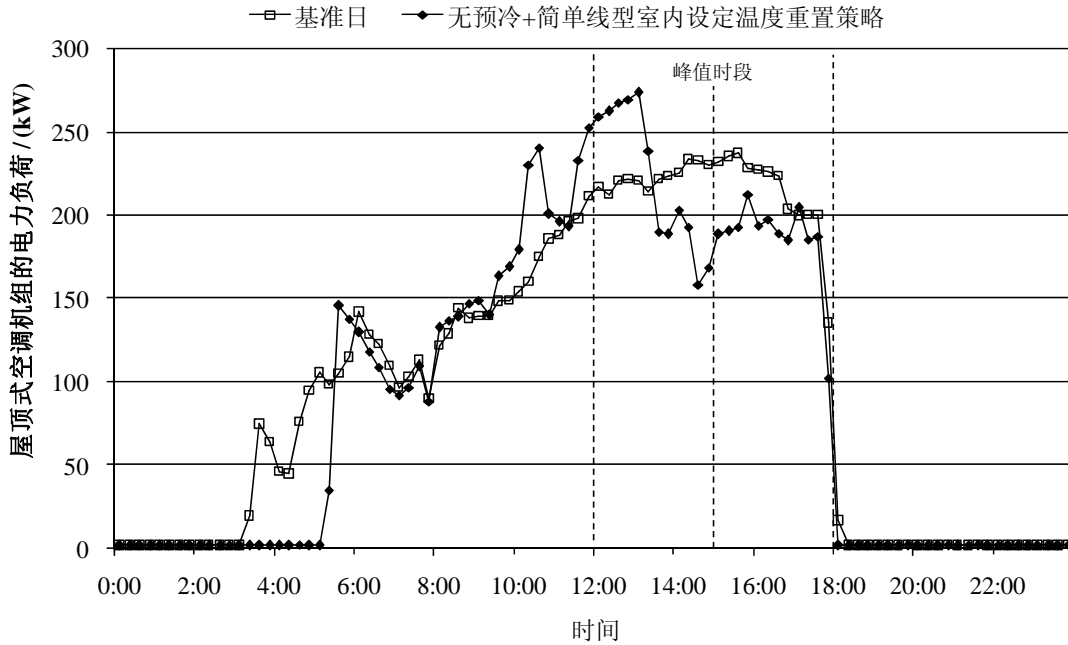


图 3.24 无预冷和简单线型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-TCCSB

II. 预冷和线型室内设定温度重置

图 3.25 为预冷和线型室内设定温度重置策略和基准日模型的空调机组电力需求负荷对比结果。该策略下屋顶机组的全天耗电量要略高于基准日模型 2.4%，可以看出预冷阶段增大的电力能耗近似与温度重置阶段所降低的空调机组能耗。在温度重置时段，电力需求负荷有个很大的反弹，但是没有超过基准日模型的同一时刻电力负荷。15:00~18:00 时段的平均电力需求负荷降低了 30%，峰值负荷降低了大约 70 kW。

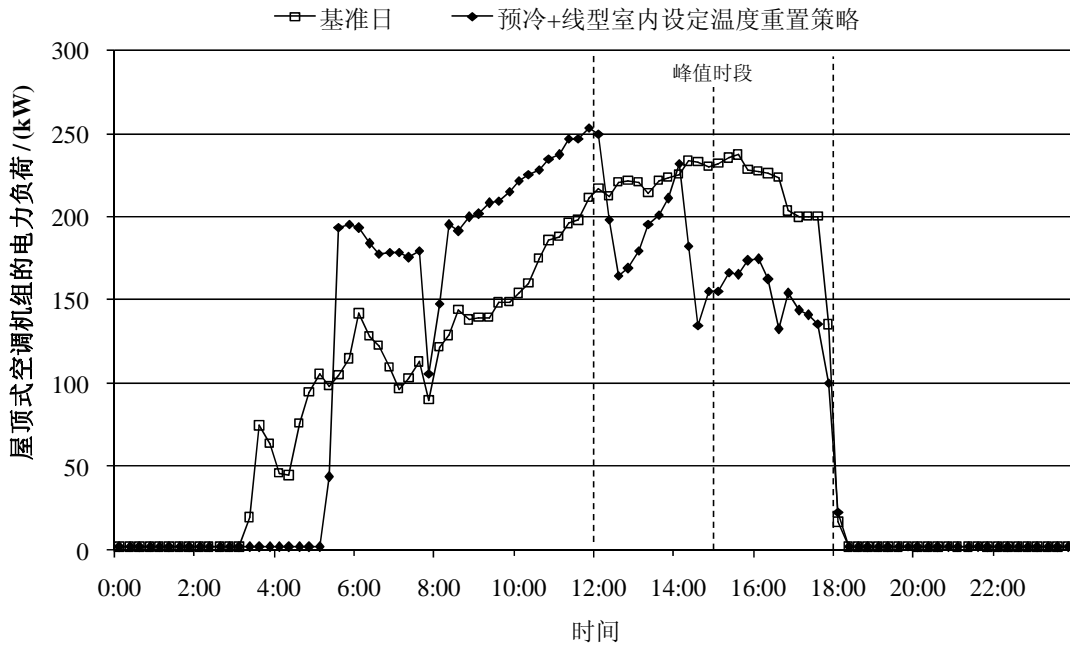


图 3.25 预冷和线型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-TCCSB

III. 预冷和阶梯型室内设定温度重置

图 3.26 为预冷和阶梯型室内设定温度重置策略和基准日模型的空调机组电力需求负荷对比结果。该策略下屋顶机组的全天耗电量要略高于基准日模型 1.7%，同样相等的负荷从峰值时段转移到早上的预冷时段。但是相比与线型温度重置策略，该策略可以很好的控制冷机运行的电力负荷，没有出现大的波动。

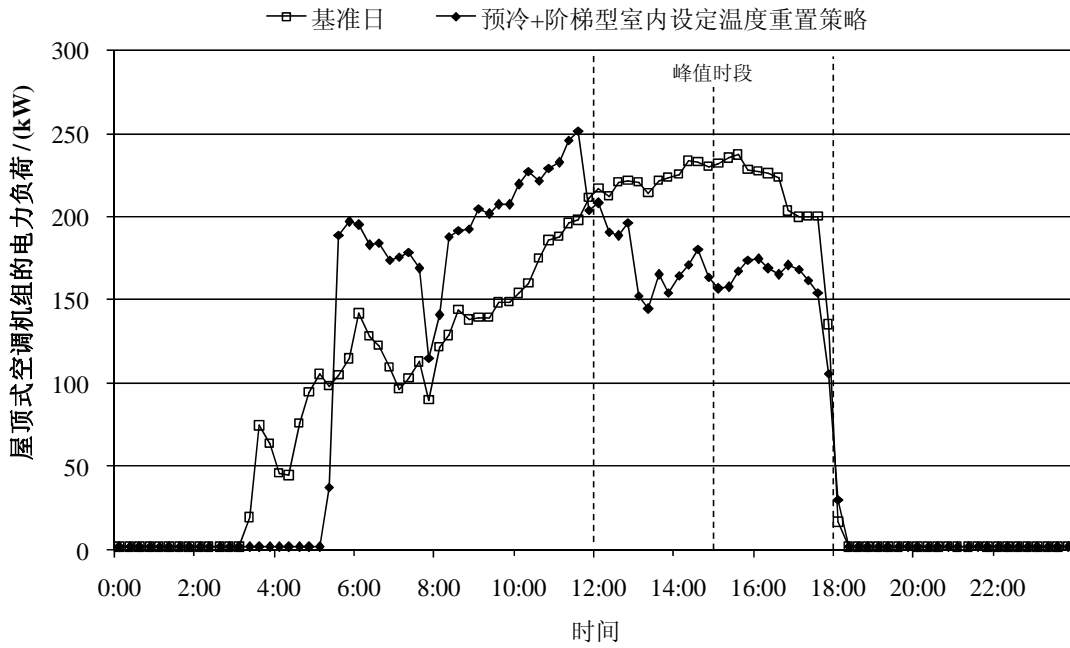


图 3.26 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-TCCSB

(2) 极其炎热气候条件

图 3.27 为极其炎热气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略和基准日模型的空调机组电力需求负荷对比结果。该策略下的空调机组全天耗电量比基准日模型的机组能耗低 1.7%，峰值时段的电耗降低了 30%，在峰值时段的后半段，屋顶空调机组的峰值电力需求负荷降低了 100 kW，但是整个温度重置时段的电力负荷曲线不是特别稳定。

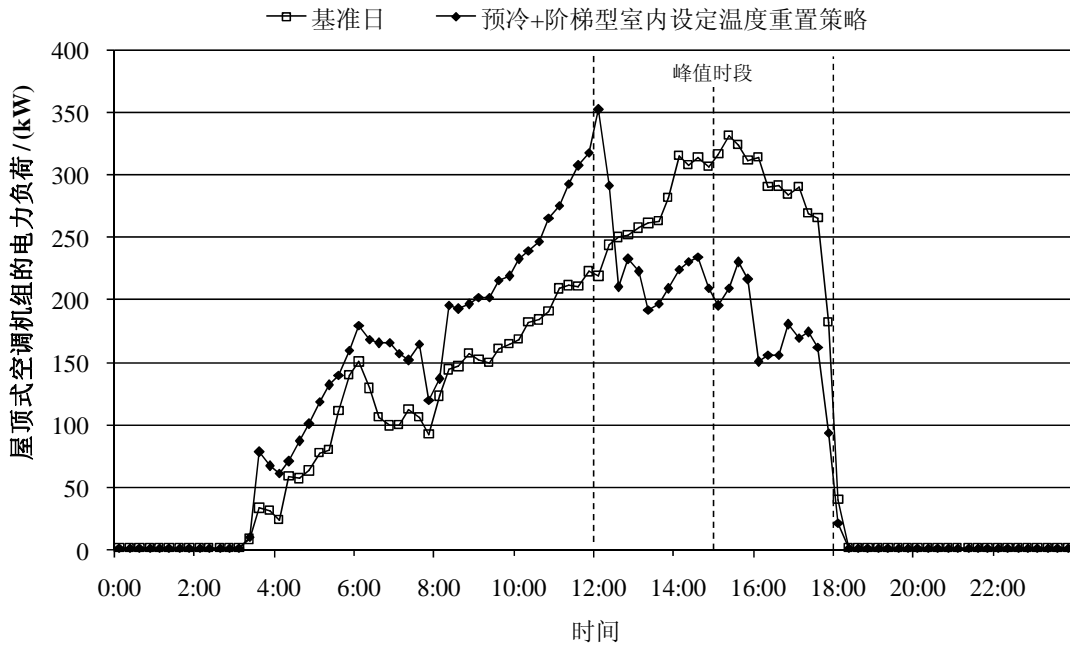


图 3.27 极其炎热气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-TCCSB

(3) 凉爽气候条件

图 3.28 为凉爽气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略和基准日模型的空调机组电力需求负荷对比结果。该策略下的空调机组全天耗电量比基准日模型的机组能耗低 11.1%，峰值时段的机组总耗电量减少了 27.5%。

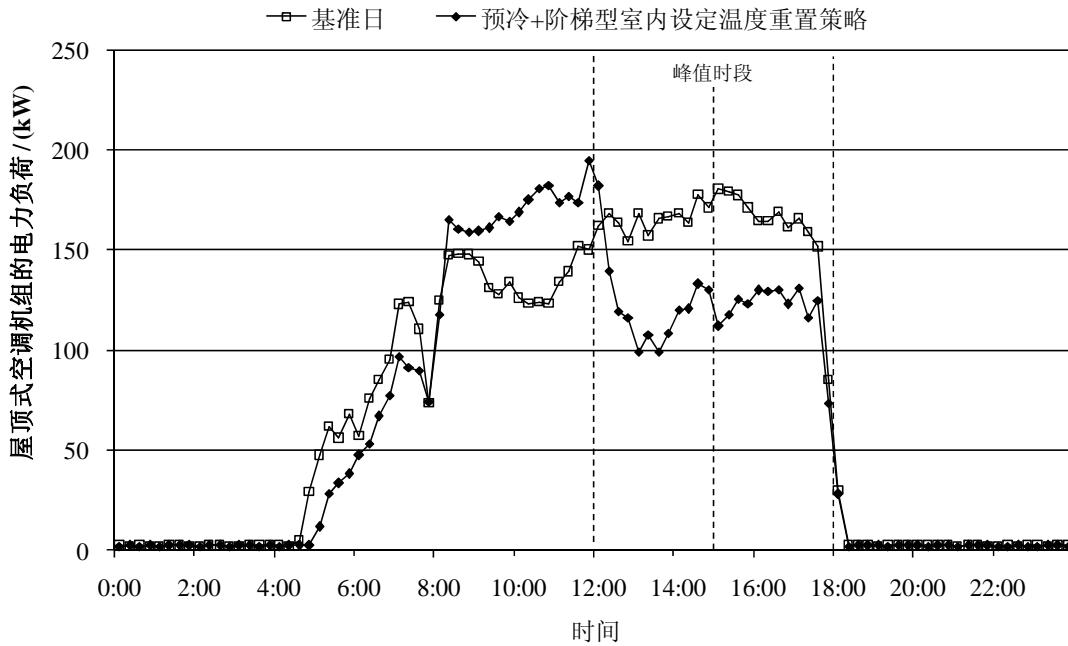


图 3.28 凉爽气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略的空调能耗对比-TCCSB

3.4.4.3 回风温度的变化

图 3.29 为炎热气候下三种不同预冷和温度重置策略下的回风温度变化。无预冷和简单线型室内设定温度策略下的回风温度高于峰值时段设定的 76 °F；而对于其他两种温度重置策略来说，其回风温度没有高于 76 °F，其原因是由于早上预冷的作用，建筑材料储存了足够的冷量并在峰值时段慢慢释放出来。早上预冷时段，回风温度不超过 73.5 °F，因此室内工作人员不会对室内舒适度有所抱怨。

图 3.30 和图 3.31 分别是极其炎热气候和凉爽气候条件下的相同预冷和温度重置策略下的回风温度变化。可以看出在极其炎热气候条件和凉爽气候条件下的预冷阶段的回风温度分别不低于 72.5 °F 和 71.5 °F；温度重置结束前回风温度分别不超过 76 °F 和 74.5；极其炎热气候条件和凉爽气候条件下的预冷阶段的回风温度分别不低于 72.5 °F 和 71.5 °F。总体上来说，在不同气候条件下的所有策略所引起回风温度的变化介于 71.5~76 °F，根据 Berkeley 大学 CBE 中心的热舒适性模型的结果来看，没有室内人员对室内温度变化有所不舒适感觉^[50]。

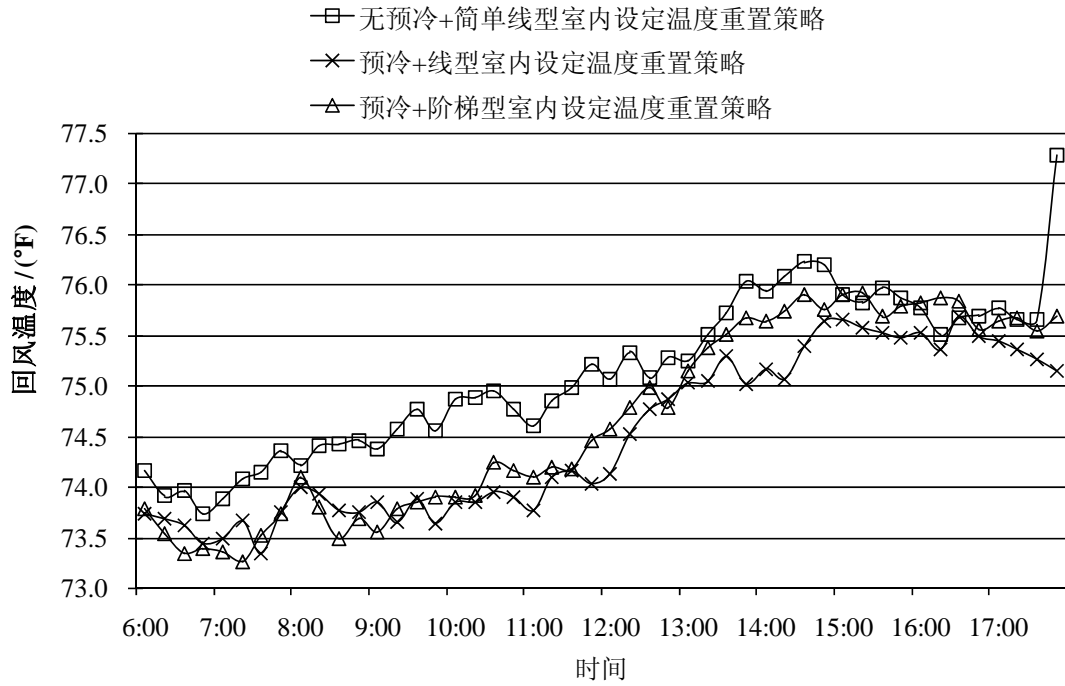


图 3.29 炎热气候下三种不同预冷和温度重置策略下的回风温度变化-TCCSB

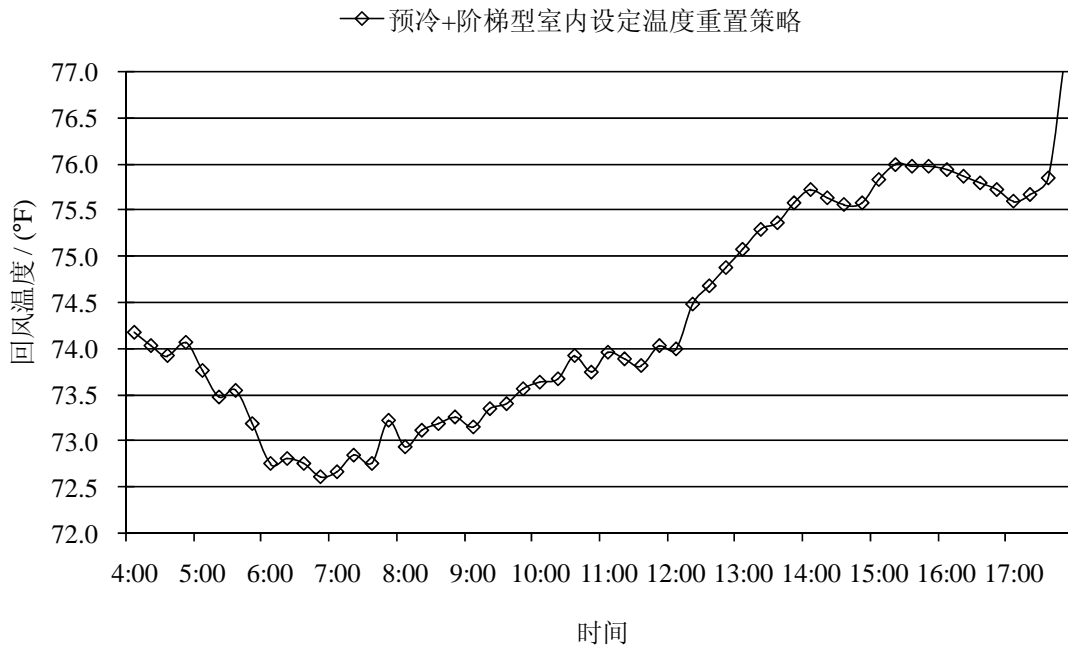


图 3.30 极其炎热气候下预冷和阶梯型温度重置策略下的回风温度变化-TCCSB

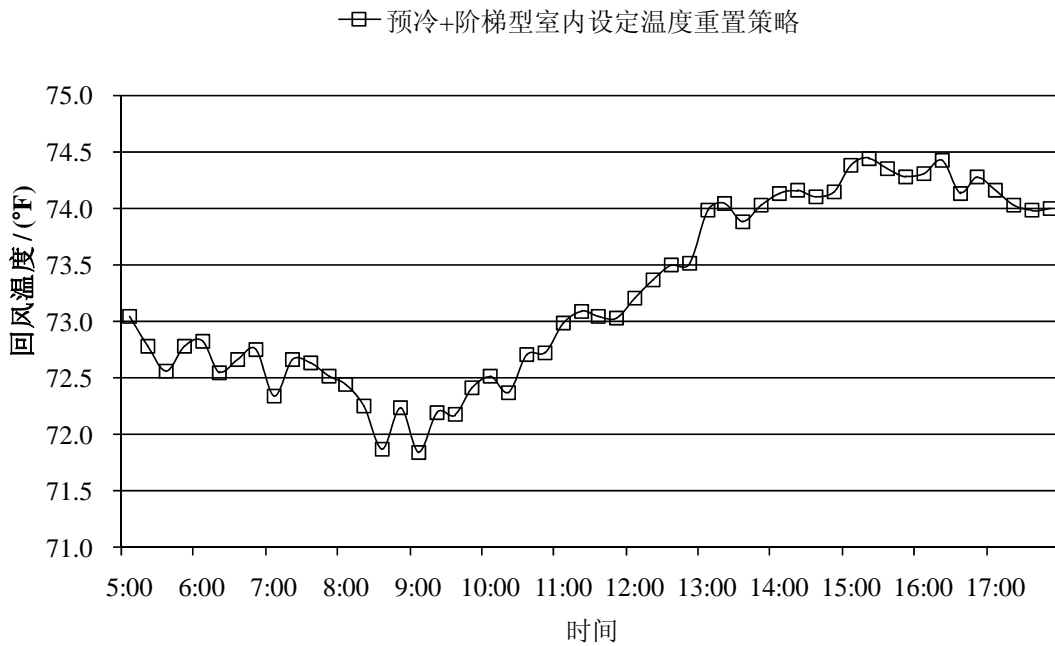


图 3.31 凉爽气候下预冷和阶梯型温度重置策略下的回风温度变化-TCCSB

3.4.4.4 能耗费用

(1) 炎热气候条件

图 3.32 为炎热气候条件下不同预冷和温度重置策略实测日的建筑运行能耗情况，可以看出不同策略下的总能耗大致相同，这就意味着几乎相等的电力负荷从峰值时段转移到平时时段或低谷时段。图 3.33 是这三种策略下的建筑运行能耗费用情况，对于第一种策略（无预冷和简单线型室内设定温度重置）来说，由于峰值时段的电力负荷降低的幅度不是很大，总体上来看能耗费用没有太大变化；对于后两种策略来说，虽然预冷阶段的电力负荷有所增大，但是由于预冷阶段与峰值时段的电价差的存在，总的逐时能耗费用大约降低了 7.8%，节约了\$128；同时峰值电力负荷降低了 60 kW，那么基于峰值电力负荷的基本需求费用节约了\$922。

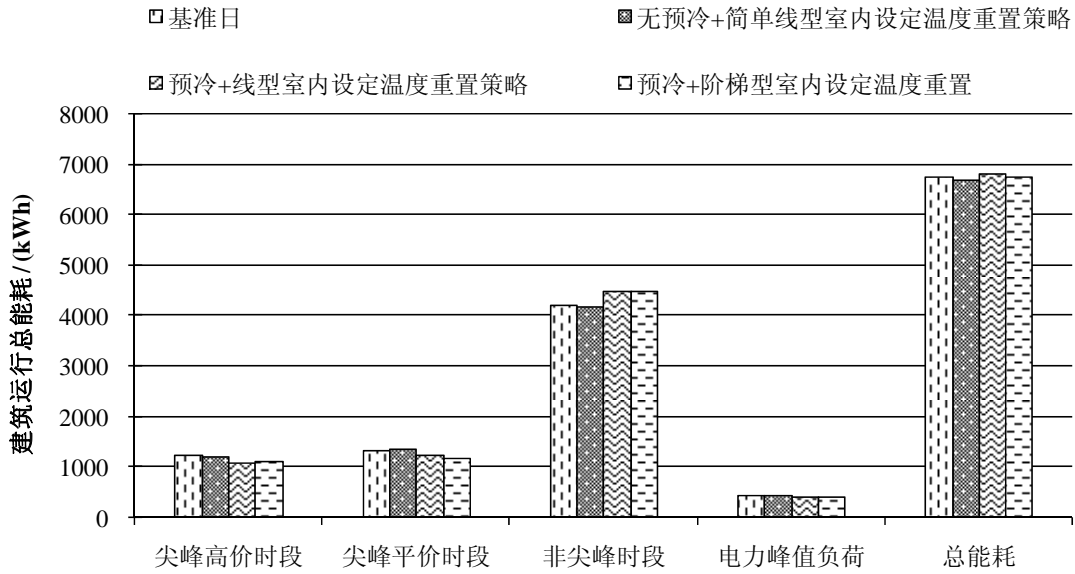


图 3.32 炎热气候下不同预冷和线型室内设定温度重置策略下的运行能耗-TCCSB

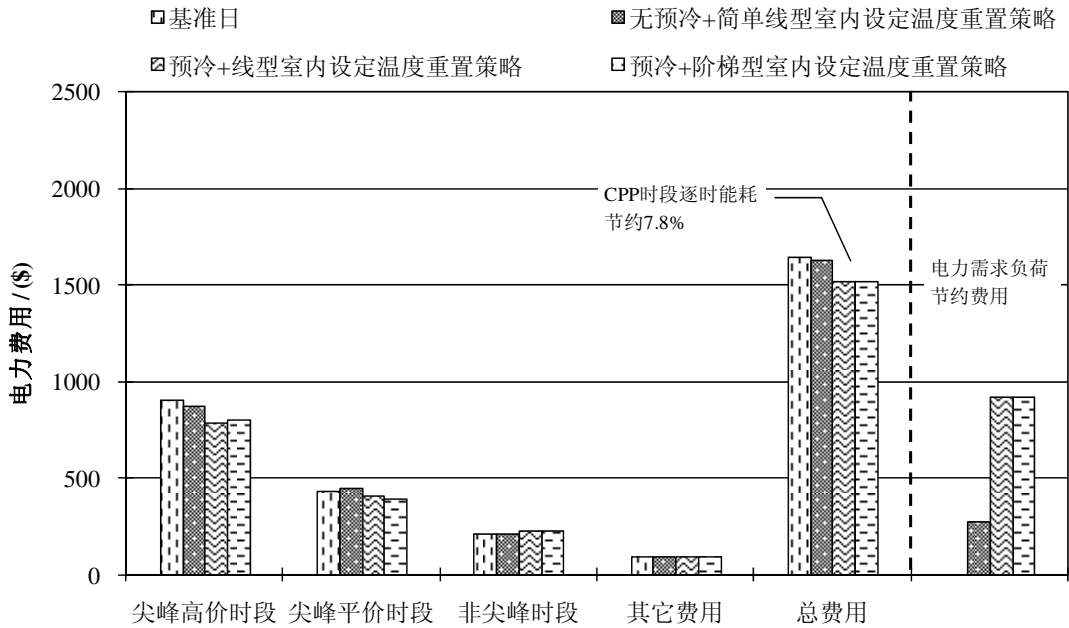


图 3.33 炎热气候下不同预冷和线型室内设定温度重置策略下的能耗费用-TCCSB

(2) 极其炎热气候条件

图 3.34 和图 3.35 分别是极其炎热气候条件下预冷和温度重置策略实测日的建筑运行能耗及费用情况，实测日与基准日的总能耗大致相同，表示几乎相等的电力负荷从峰值时段转移到平时时段或低谷时段。峰值时段的能耗大约降低了 23%，可见该策略在此气候条件下能够很大程度上降低峰值时段的电力负荷。同时由于预冷阶段与峰值时段的电价差的存在，总的逐时能耗费用大约降低了 14.3%，节约了\$263；峰值时段的峰值电力负荷降低了 96 kW，如果能够在相似的气候条件下每天运行该策略，那么基于峰值电力负荷的月基本需求费用节约了\$1476。

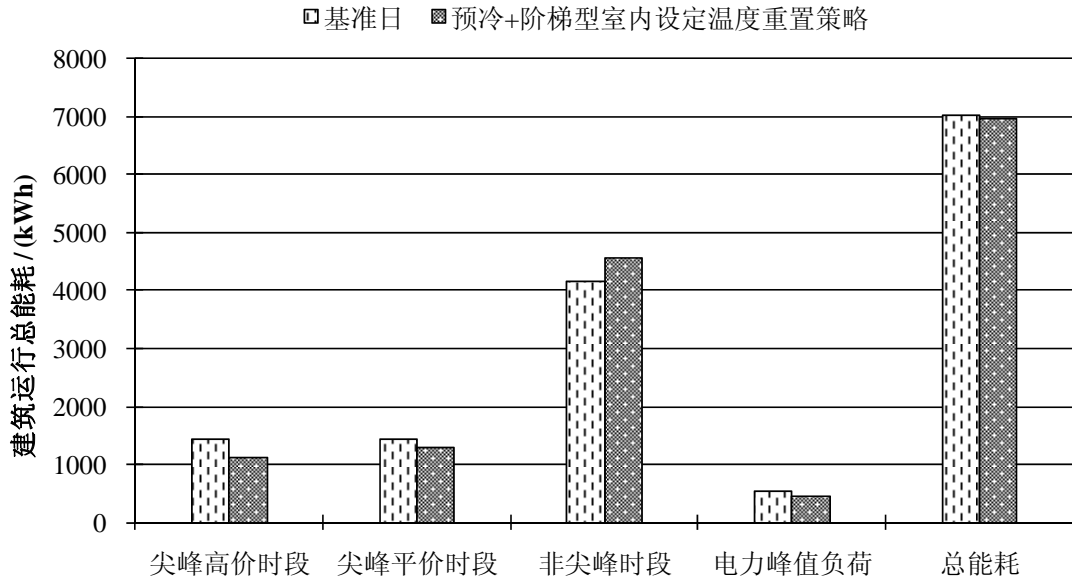


图 3.34 极其炎热气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的运行能耗-TCCSB

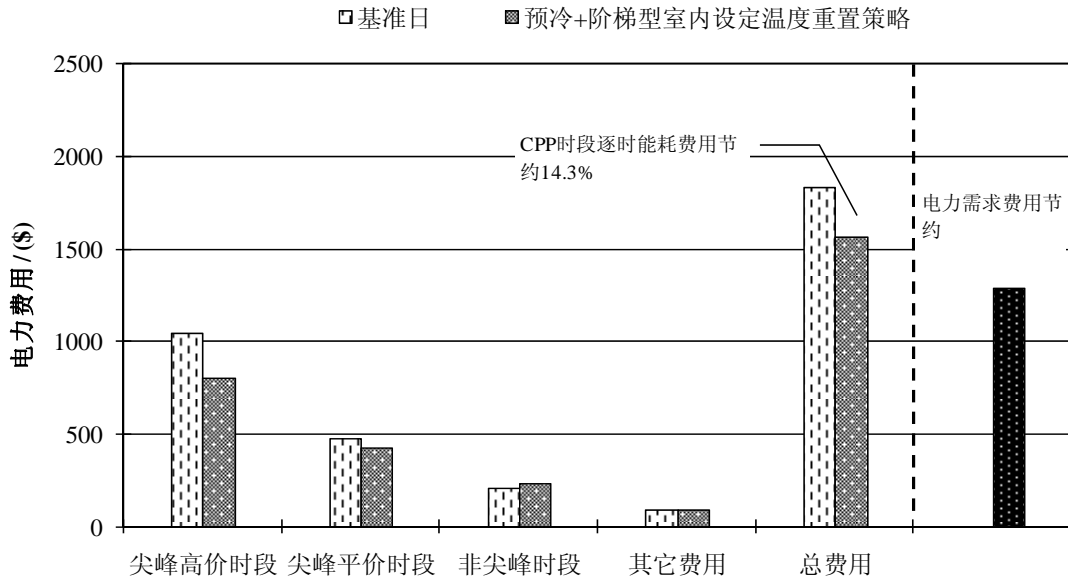


图 3.35 极其炎热气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的能耗费用-TCCSB

(3) 凉爽气候条件

图 3.36 和图 3.37 分别是极其炎热气候条件下预冷和温度重置策略实测日的建筑运行能耗及费用情况，实测日的总的运行能耗比基准日要稍低，主要是由于早上的室外温度较低，导致预冷阶段的电力负荷上升的幅度不是很大。总的逐时能耗费用大约降低了 7.8%，节约了\$127；峰值时段的峰值电力负荷降低了 42 kW，如果能够在相似的气候条件下每天运行该策略，那么基于峰值电力负荷的月基本需求费用节约了\$646。

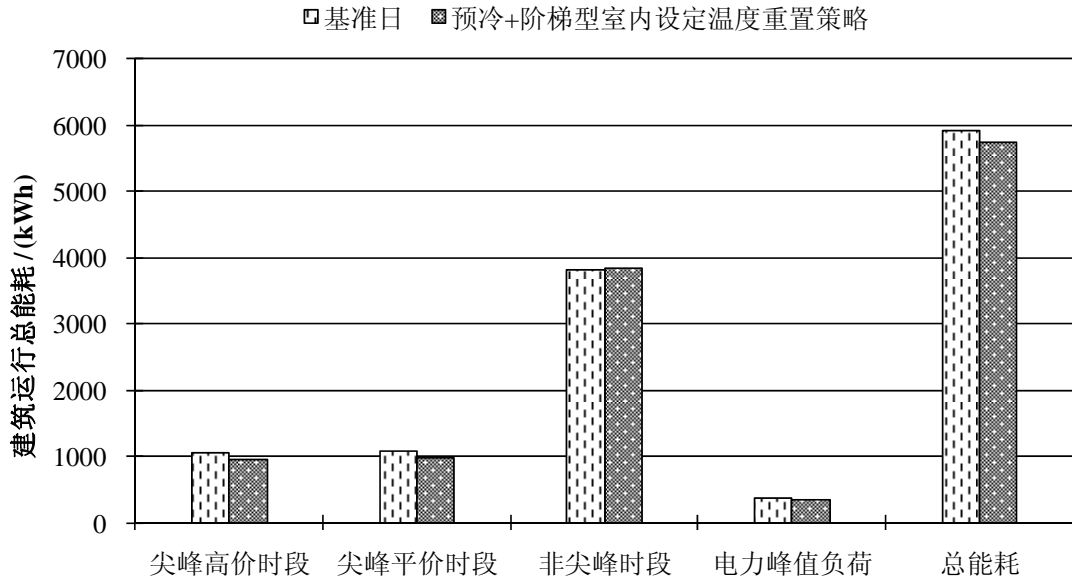


图 3.36 凉爽气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的运行能耗-TCCSB

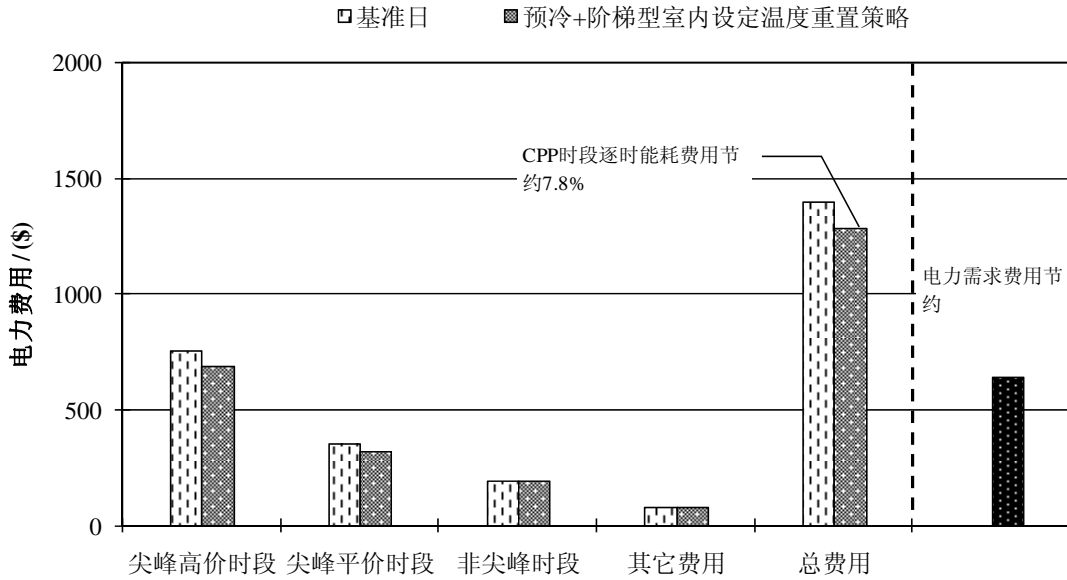


图 3.37 凉爽气候下预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的能耗费用-TCCSB

3.5 本章小结

本章节对两幢实际建筑进行预冷和室内设定温度重置策略的实测研究，并在不同的气候条件下针对不同预冷策略进行数据收集和分析，并通过比较不同策略下建筑能耗变化与基准日模型之间的对比，了解每一种策略的错峰潜力以及经济效益；主要从建筑总能耗的变化、空调机组的电力负荷变化、以及每一种需求响应策略下的经济性分析。基准日模型的选择确定主要基于基准日和需求响应策略实测日的室外气象条件的接近程度。通过实测的结果来看，无论是在凉爽气候下，还是炎热或极其炎热的气候条件下，我们所实测的控制策略均降低了峰值时段的电力需求负荷，尤其是阶梯型与指数型室内设定温度重置策略，峰值时段的建筑总能耗大约能够降低 25~30%左右，并且电力负荷运行平稳，没有大的波动；同时我们还对回风温度进行了实测分析，实测结果表明在峰值时段的温度重置结束前，室内回风温度最高不超过 76 °F，对室内舒适度不会有任何影响。

第四章 需求响应能耗模型建立与校正

4.1 介绍

4.1.1 背景概要

从 2001 年开始，劳伦斯伯克利实验室、加州大学 Berkeley 分校 CBE 中心以及 Purdue 大学联合加州地区的三家能源公司针对利用建筑材料的蓄热能力来转移峰值时段的电力负荷方面进行大量的研究和实测。其研究表明通过不同的预冷和室内设定温度的重置策略可以充分利用建筑材料的蓄热能力，从而降低并转移峰值时段的电力负荷，同时不影响室内的舒适度要求。

2006 年初，我们开发了两种快速能耗模拟评估软件，其功能主要是能够使用户在很短时间内评估出建筑的峰值时段电力负荷降低的潜力、节约的费用以及室内舒适度的影响程度等。其中 Purdue 大学负责开发适用于小型商业建筑的需求响应评估工具（DLAT）^[61]，劳伦斯伯克利实验室负责开发适用于大中型商业建筑的需求响应快速评估工具（DRQAT）^[62]。

DRQAT 软件采用 EnergyPlus 为计算核心，其建筑模型采用 Joe Huang 关于办公建筑能耗原型^[55]，建筑分区为 4 个朝向的外区和 1 个内区，建筑模型的围护结果按照加州关于非住宅建筑的能耗标准对不同气候区的规定，模型内部的人员、照明和设备的运行方式以及密度均有用户自定义输入。目前模型采用两种类型空调系统，主要区别在于冷机类型的不同，一种为冷水机组，另一种为屋顶式空调机组。

为了评估 DRQAT 对需求响应策略的模拟结果可靠性，我们根据上一章节所描述的两幢建筑信息，应用 DRQAT 建立并校正模型，最终将需求响应策略的模拟结果与实际测试结果相对比。

通过本章节，DRQAT 用户可以了解模型建立和校正的方法与思路，并在校正后模型基础上进行需求响应策略的模拟优化。根据不同需求响应策略的模拟结果的相互对比，最终可以确定最优化的需求响应策略。

4.1.2 建模和模型校正流程

目前许多的研究学者做了大量有关模型校正的研究，能耗模型的建立和校正主要依靠个人的专业知识、相关工作的经验、统计知识、专业人员的洞察力、以及深厚的计算分析能力等等。关于应用 DRQAT 进行模型建立和校正方法，由于涉及到模型变量参数较少，用户则不会就此问题感到无从下手。通过分析其他研究学者有关模型建立和校正的论文，我们在该章节所提到的模型建立和校正方法相比之下简单并具有可靠性。图 4.1 描述了能耗模型建立和校正的基本流程。

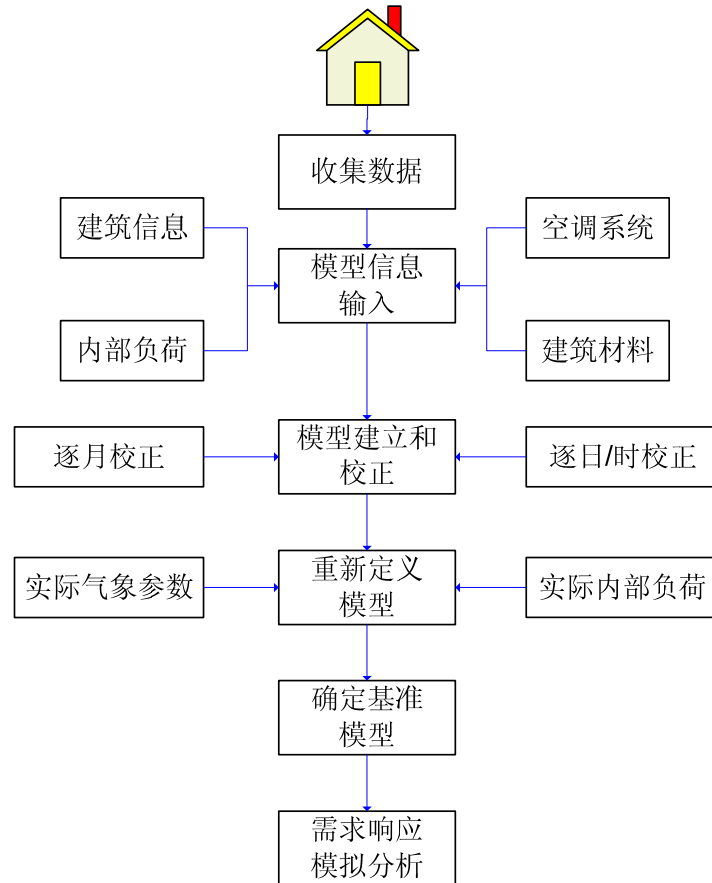


图 4.1 DRQAT 能耗模型建立和校正的基本流程图

4.1.2.1 收集数据

(1) 气象参数

实际的气象参数数据是模型校正的基础，DRQAT 所应用的气象文件均为典

型气象年的数据文件，在本章节校正模型所使用的气象文件是来源于 National Climate Data Center 所提供的该地区实际气象数据^[63]，并将气象数据转化为 EnergyPlus 气象文件。

(2) 建筑信息

建筑信息包括建筑所在的气候区域和城市、朝向以及建筑几何尺寸（楼层数及层高、长宽等参数）、建筑材料蓄热能力等级和窗墙比等。

(3) 内部人员、照明和设备负荷

需要调研得到工作日和礼拜日的人员、照明和设备负荷密度以及相应的运行时刻表信息，作为校正模型的实际参数输入信息。

(4) 空调系统

需要调查得知建筑空调系统类型、冷源类型、以及冷源和空调系统的运行特性，例如冷冻水和冷却水供回水温度、室内设定温度、空调系统送风温度以及相应的运行时刻表。

(5) 其他负荷

建筑内部非空调区域的其他设备负荷信息对于模型校正同样重要，例如建筑的电梯耗电、非空调区域的冰箱及电热水器等等，这些信息均要进行详细的实地调研来确定。

4.1.2.2 模型建立和校正

模型校正主要基于逐月、逐日、以及逐时的能耗对比。特别对于需求响应策略的模拟分析，仅仅满足逐月的能耗校正标准不足以保证逐时的模拟能耗来预测实际能耗。本章节中采用的校正标准为 ASHRAE14-2002 所规定的逐月相对误差 $\pm 2.5\%$ ，逐日误差 $\pm 10\%$ ，对于逐时的校正则需要保证一天 24 小时内的 20 小时的误差在 $\pm 20\%$ 以内^[64]。

对于模型校正来说，我们前期收集到的有关于整个建筑及内部负荷特性和系统特性的信息越多，那么所校正后的模型越接近实际建筑。但是校正后模型与实际建筑会有一定的差距，我们所要确定的是基准模型^[47]，在基准模型的基础上，从而进行需求响应策略的模拟分析。

4.1.2.3 建筑能耗数据采集

本章节中涉及到的两个实际建筑能耗数据采集的方法分为两种，第一个实

测建筑我们收集了夏季供冷时期一个月的建筑能耗以及空调机组的终端能耗，第二个建筑则只收集了需求响应策略实测期间的建筑能耗以及空调机组的终端能耗。通过分析建筑能耗与空调机组终端能耗之间的差值，我们可以了解到建筑运行时刻表，以及内部的照明和设备密度。

对于只能收集到整个建筑能耗的建筑，可以通过分析该建筑冬季在供暖期间，特别是室外气温低于 55 °F 气候条件下（冷机停止运行），整个建筑的能耗则可以在一定程度上能够反映内部照明和设备的密度以及运行时刻表。

4.2 能耗模型建立和校正方法的应用

4.2.1 实测建筑模型-I

4.2.1.1 建筑信息

我们通过 Google Earth 软件^[65]获得该实测建筑的建筑基本几何信息，例如建筑的朝向、长度和宽度以及所采用的制冷设备类型（屋顶式空调机组或冷水机组）。具体建筑的其他信息例如窗墙比例、墙体结构则通过调研获得。



图 4.2 实测建筑 CHCCC 的建筑平面鸟瞰图

表 4.1 所示为该建筑的基本建筑信息，根据加州非住宅能源标准的规定以及该建筑所在的气候区域，从而确定建筑的围护结构等信息，并输入到基准模型。

表 4.1 实测建筑 CHCCC 的基本建筑信息

建筑层数	建筑层高 (ft)	建筑长度 (ft)	建筑宽度 (ft)
2	13	580	150

4.2.1.2 空调系统

该建筑的制冷设备为 8 台制冷量为 50 冷吨的屋顶式空调机组，采用单管道变流量的空调系统，并且应用自动数字控制系统提供室内舒适度控制。模型中采用 DRQAT 内部默认的冷机相关性能曲线。

4.2.1.3 建筑运行方式

该建筑的运行方式是典型的办公楼模式，办公人员早上 8 点进入室内，下午 6 点之前离开大楼，正常情况下空调系统在凌晨 3:00 左右进行预冷或者预热直到早上 8:00。

4.2.1.4 建立模型和输入信息校正

(1) 气象参数

通过 National Climate Data Center 所提供的 Visalia 地区实际气象数据^[63]，我们将气象数据转化为 EnergyPlus 气象文件，替换掉模型原始的 TMY 气象文件。

(2) 内部照明和设备负荷

对于该建筑我们仅仅收集到了需求响应策略实测期间的整个建筑能耗和屋顶式空调机组终端能耗数据。通过建筑运行总能耗与空调机组终端能耗之间的差值，从而确定内部照明和设备的峰值负荷为 400 kW 左右；同时根据加州非住宅建筑能源标准^[56]，该建筑的灯光负荷密度为 1.5 W/ft²，从而确定建筑内设备用电负荷密度以及相应的运行时刻表。图 4.3 为校正后的该建筑内部照明和设备的逐时运行负荷率。

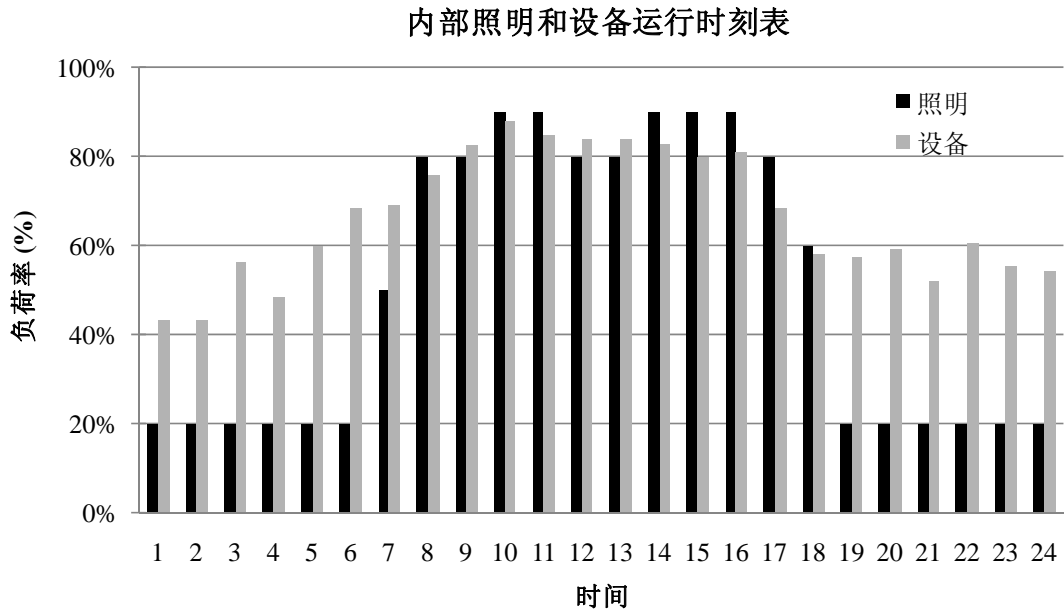


图 4.3 校正后照明和设备的逐时负荷率-CHCCC

4.2.1.5 校正后模型的模拟结果

在实测期间内 9 月 8 日为基准日，图 4.4 为校正后模拟的基准日的屋顶空调机组电力负荷与实际数据在 $\pm 15\%$ 误差范围内的对比。可以看出在一天内 24 小时中的 21 个小时的模拟结果在 $\pm 15\%$ 误差范围内，并满足 ASHRAE14-2002 标准所规定的误差范围 $\pm 20\%$ ^[64]。通过其他基准日的能耗对比，确定该模型可以作为需求响应的基准模型。

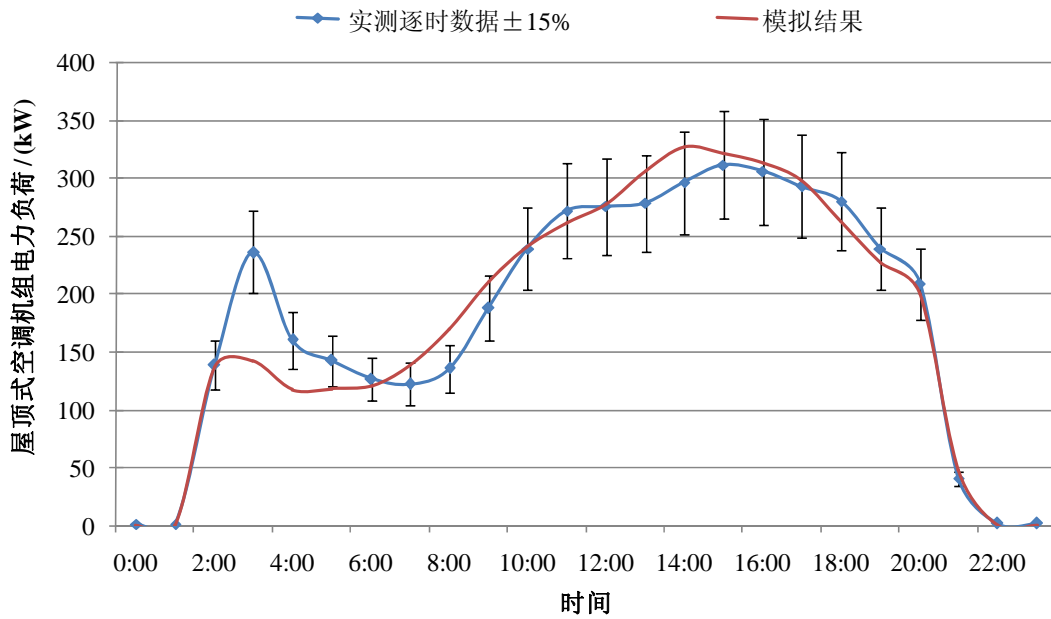


图 4.4 校正后模拟结果与实际数据在 15% 误差范围内的对比-CHCCC

4.2.1.6 需求响应策略模拟分析

对于该建筑需求响应策略实测期间，我们进行了预冷和线型室内设定温度重置策略、预冷和指数型室内设定温度重置策略、夜晚&早上预冷和指数型室内设定温度重置策略。由于后两种的需求响应策略没有太大区别，主要对室内设定温度重置策略进行模拟分析并与实测数据相对比。

图 4.5 和图 4.6 分别为预冷和线型室内设定温度重置策略下的屋顶式空调机组能耗的模拟结果和实测数据。可以看出温度重置时段的电力负荷曲线随着室内温度设定值的不断升高而变化。模拟结果相当于实测结果来说，其波动比较大，其原因是实测机组能耗变化与室内温度重置时刻有时间的延迟，而对于能耗软件来说，室内温度设定值的变化会立刻引起机组的负荷变化。

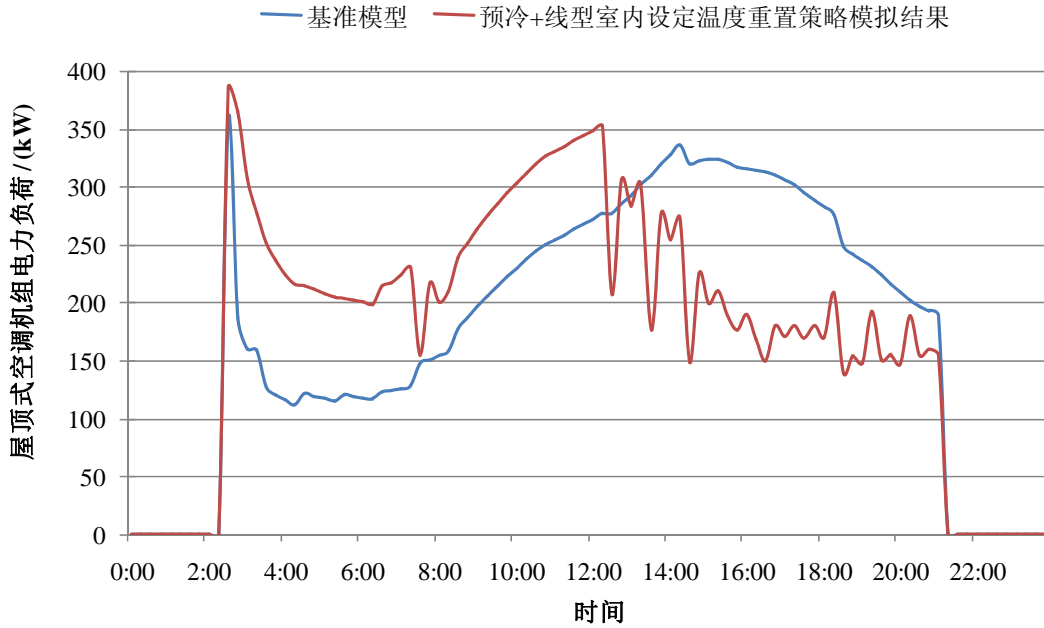


图 4.5 预冷和线型室内设定温度重置策略下屋顶式空调机组能耗模拟结果-CHCCC

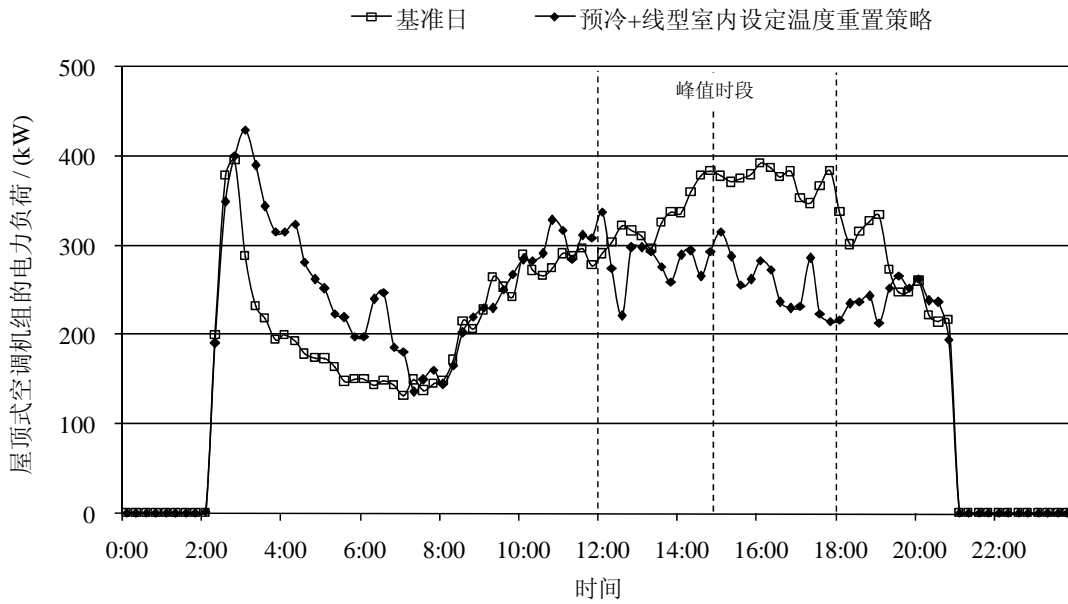


图 4.6 预冷和线型室内设定温度重置策略下屋顶式空调机组能耗实测结果-CHCCC

表 4.3 是实测数据与模拟结果的对比详细信息，可以看出峰值时段的峰值电力负荷降低量以及平均电力负荷降低量的模拟结果与实测数据之间的差距很小，误差范围在 10% 以内。

表 4.3 预冷和线性室内设定温度重置策略的实测数据和模拟结果对比

预冷策略	峰值时段的电力负荷	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+线性室内设定温度重置	实际数据	168	70	1.93	0.80	53%	19%
	模拟结果	195	67	2.24	0.77	62%	22%
	差别	27	-3	0.31	-0.03	9%	3%

图 4.7 和图 4.8 分别为预冷和指数型室内设定温度重置策略下的屋顶式空调机组能耗的模拟结果和实测数据。对于峰值时段的电力负荷曲线来说，模拟结果和实测结果的负荷曲线非常相似。模型里的温度重置时段一直持续到下午 6 点左右，而实测结果显示峰值时段期间温度重置策略提前结束。

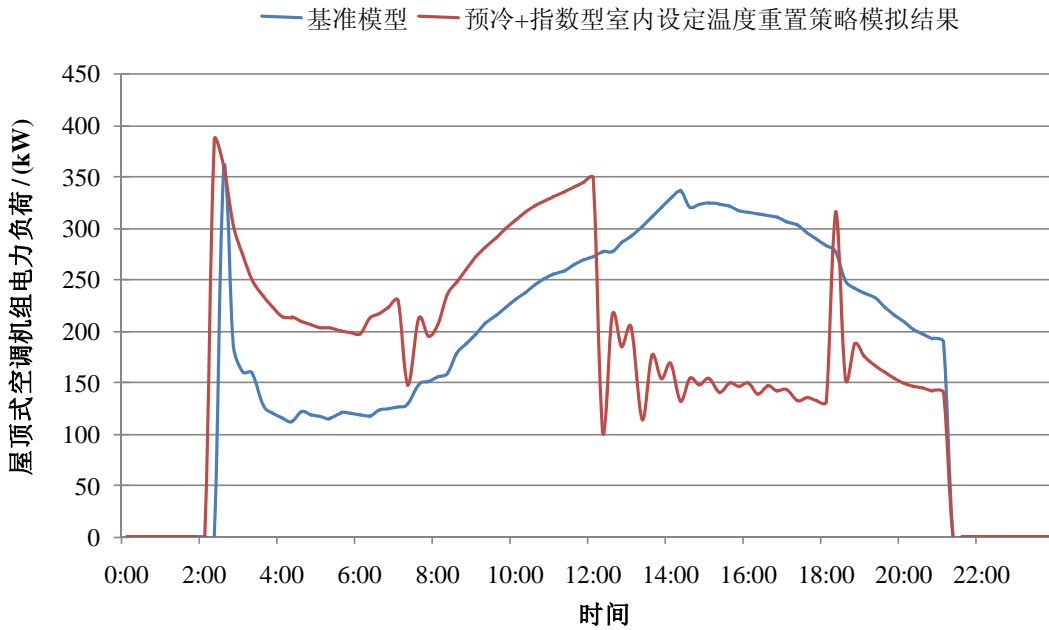


图 4.7 预冷和指数型室内设定温度重置策略下屋顶式空调机组能耗模拟结果-CHCCC

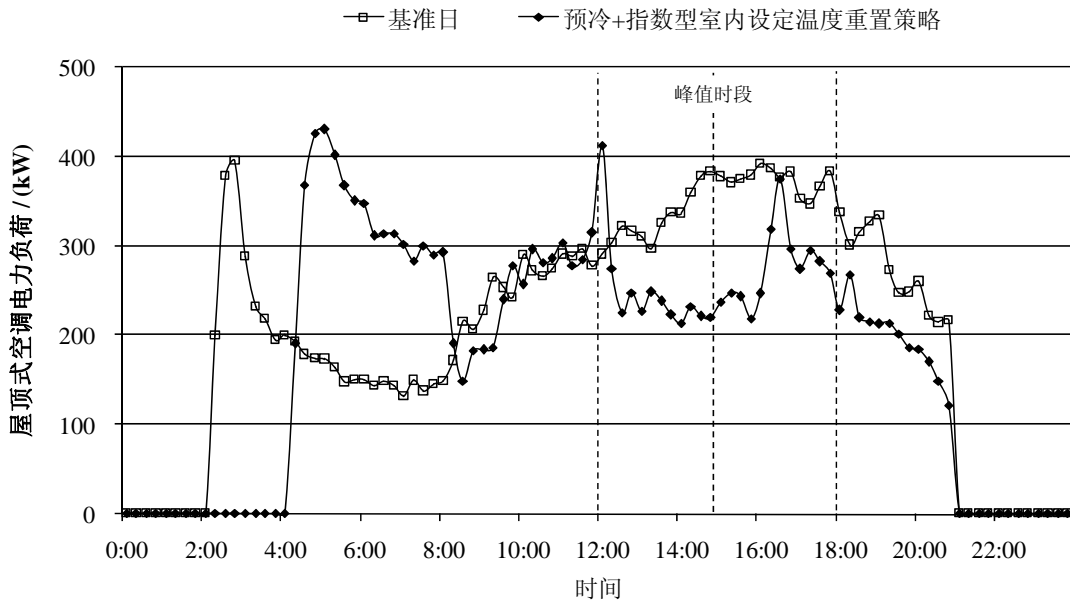


图 4.8 预冷和指数型室内设定温度重置策略下屋顶式空调机组能耗实测结果-CHCCC

表 4.4 是预冷和指数型室内设定温度重置策略下实测数据与模拟结果的对比详细信息，从峰值时段的峰值电力负荷降低量方面来看，模拟结果要比实际数据大 22%左右，从总体上来看，模拟结果与实测数据在平均电力负荷降低量方面的误差很小，不超过 15%。

表 4.4 预冷和指数型室内设定温度重置策略的实测数据和模拟结果对比

预冷策略	峰值时段的电力负荷	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+指数型室内 设定温度重置	实际数据	168	122	1.93	1.40	51%	40%
	模拟结果	204	140	2.34	1.61	62%	48%
	差别	36	18	0.41	0.21	11%	8%

4.2.2 实测建筑模型-II

4.2.2.1 建筑信息

图 4.9 为通过 Google Earth 软件获取的建筑基本几何尺寸，建筑的南北向窗墙比是 50%，东西向窗墙比是 20%左右。关于建筑围护结构的参数则根据加州

非住宅建筑能源标准的规定，输入到基准模型中。表 4.5 为实测建筑 TCCSB 的建筑基本信息。



图 4.9 实测建筑 TCCSB 的建筑平面鸟瞰图

表 4.5 实测建筑 TCCSB 的建筑基本信息

建筑层数	建筑层高 (ft)	建筑长度 (ft)	建筑宽度 (ft)
3	13	290	130

4.2.2.2 空调系统

该建筑的空调机组为 3 台屋顶式空调机组，其中 2 台机组的容量为 75 冷吨，另外的 1 台为 80 冷吨。空调系统为单风道变风量系统，其他的特性参数均为模型里面的默认值。

4.2.2.3 建筑运行方式

该建筑的运行方式是同样是典型的办公楼模式，办公人员早上 8 点进入室内，下午 6 点之前离开大楼，与实测建筑 I 不同的是该建筑的空调系统在早上的预冷或预热时段的开启时间是随着室外气候条件确定。正常情况下，空调系统早上 5 点开启，下午 6 点停止运行。

4.2.2.4 建立模型和输入信息校正

(1) 气象参数

通过 National Climate Data Center 所提供的 San Bernardino 地区实际气象数据^[63]，我们将气象数据转化为 EnergyPlus 气象文件，替换掉模型原始的 TMY 气

象文件。图 4.10 所示为该建筑控制系统实测气象数据与气象中心提供该地区的气象数据对比，可以看出两者之间没有太大差别，由于控制系统实测的气象数据只是室外空气温度逐时数据，而气象中心则包括太阳辐射照度、风速等影响建筑能耗的气象因素。

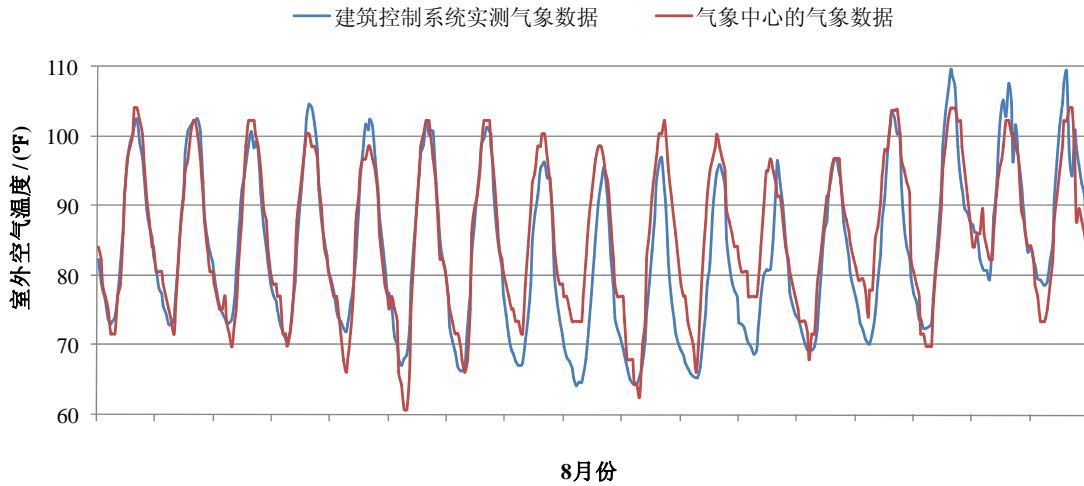


图 4.10 实测建筑 TCCSB 的控制系统与气象中心的气象数据对比

(2) 内部照明和设备负荷

该建筑的数据收集工作从 2006 年 8 月 14 日开始，持续到 2006 年 9 月 30 日。数据收集包括建筑总能耗以及空调机组的终端能耗，每 15 分钟记录一次数据。通过分析建筑总能耗与空调机组的终端能耗之间的差值，可以确定建筑内部照明和设备负荷密度以及相应的运行时刻表。计算结果显示照明和设备峰值电力负荷为 200 kW 左右，根据加州非住宅建筑能源标准对灯光密度的规定^[56]，该基准模型的照明密度为 1.1 W/ft^2 ，其余的电力负荷则为设备耗电，设备密度估计值为 1.77 W/ft^2 ，图 4.11 为照明和设备负荷的运行时间表及负荷率。

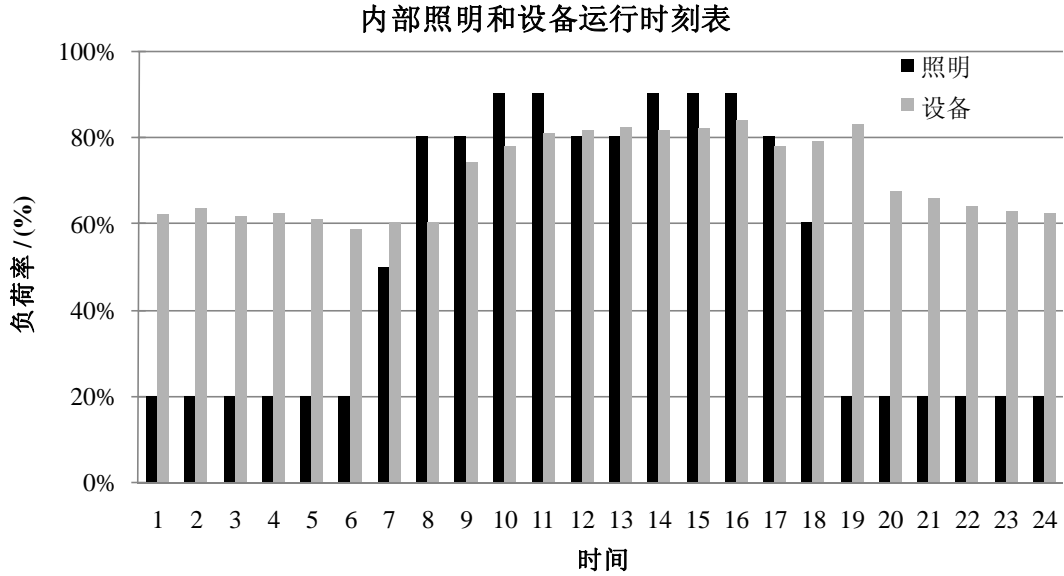


图 4.11 校正后照明和设备的逐时负荷率-TCCSB

4.2.2.5 校正后模型的模拟结果

由于该建筑的数据采集所持续的时间较长，因此除了比较某基准日的逐时能耗，还进行了一个礼拜的能耗比较。图 4.12 和图 4.13 分别是 8 月份和 9 月份某个礼拜的校正后模型模拟结果与实测数据的对比。在 8 月份的某个礼拜中，其中能耗模型在系统运行时的启动负荷相比较较大，其余时间内的模拟结果与实测数据很接近，基本在误差范围 $\pm 20\%$ 以内。

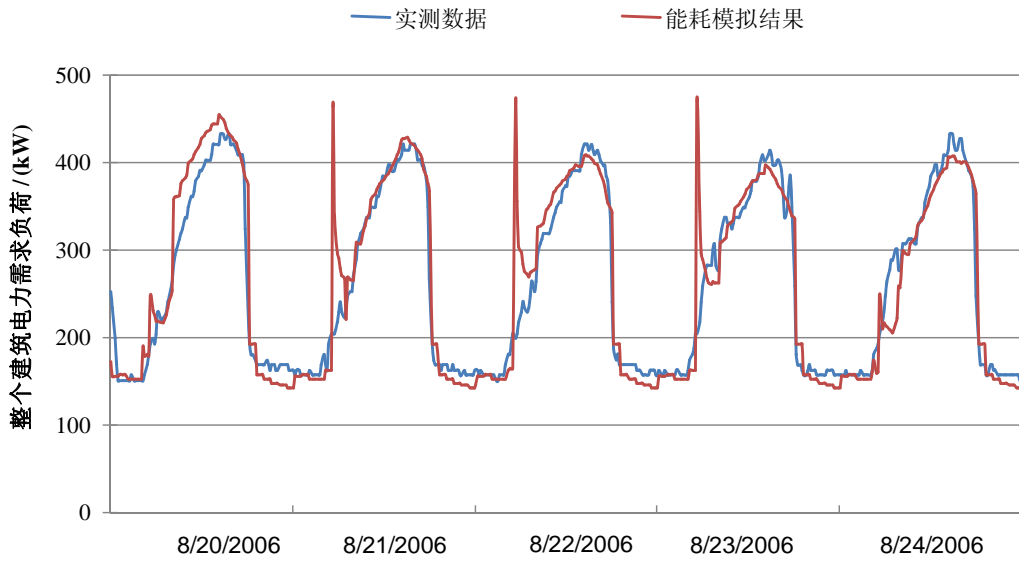


图 4.12 校正后模型的模拟结果与实测数据的一个礼拜数据对比-TCCSB

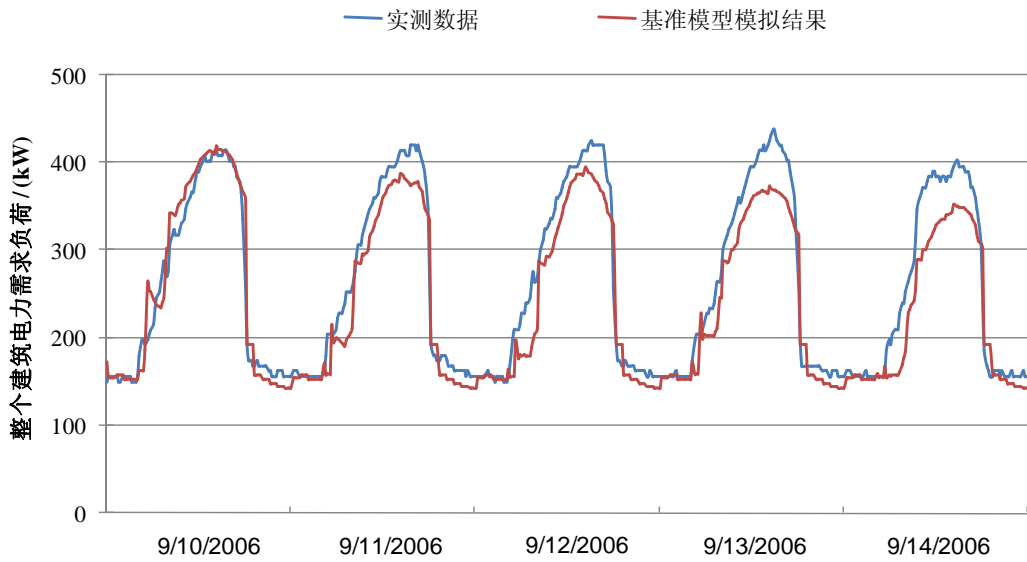


图 4.13 校正后模型的模拟结果与实测数据的一个礼拜数据对比-TCCSB

图 4.14 所示为校正后模型的某基准日模拟结果与实测数据的对比。其在误差范围 $\pm 10\%$ 以内，模拟结果与实测数据的电力负荷曲线基本完全相同，其他基

准日的能耗模拟结果也与实测数据很接近，最大的误差也在 $\pm 20\%$ 以内。

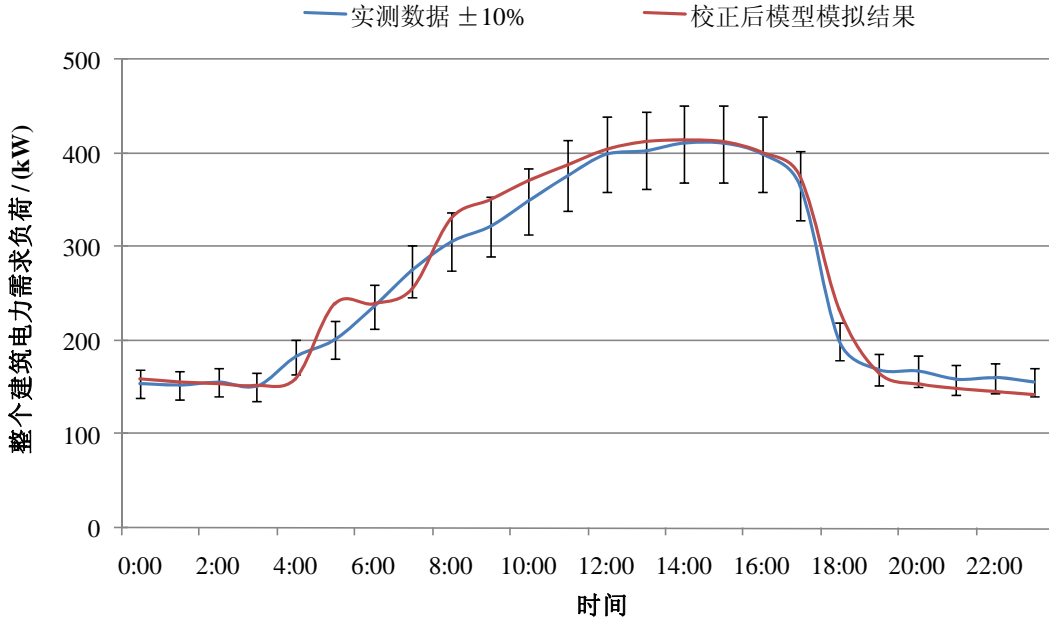


图 4.14 校正后模型的模拟结果与实测数据的某基准日对比-TCCSB

4.2.2.6 需求响应策略模拟分析

对于实测建筑 II，主要对比了另外两种需求响应策略的模拟分析对比，第一种为无预冷和简单线型室内设定温度重置策略，第二种为预冷和阶梯型室内设定温度重置策略。

图 4.15 和图 4.16 分别是无预冷和简单线型室内设定温度重置策略下空调能耗的模拟结果与实测结果。对于能耗模型来说，内部负荷的密度以及运行时刻表相同，通过比较基准日模型与需求响应策略下的模型，两者除了室内设定值的不同以外，其他模型内的参数均相同。从表 4.6 的对比结果来看，峰值时段的平均电力负荷降低幅度要比实测结果多 10 kW，通过对实测结果的分析，基准日和需求响应策略实测日的气象条件有所不同，实测日峰值时段的温度要比基准日高 3 °F，从而削弱了该策略下降低峰值负荷的潜力。

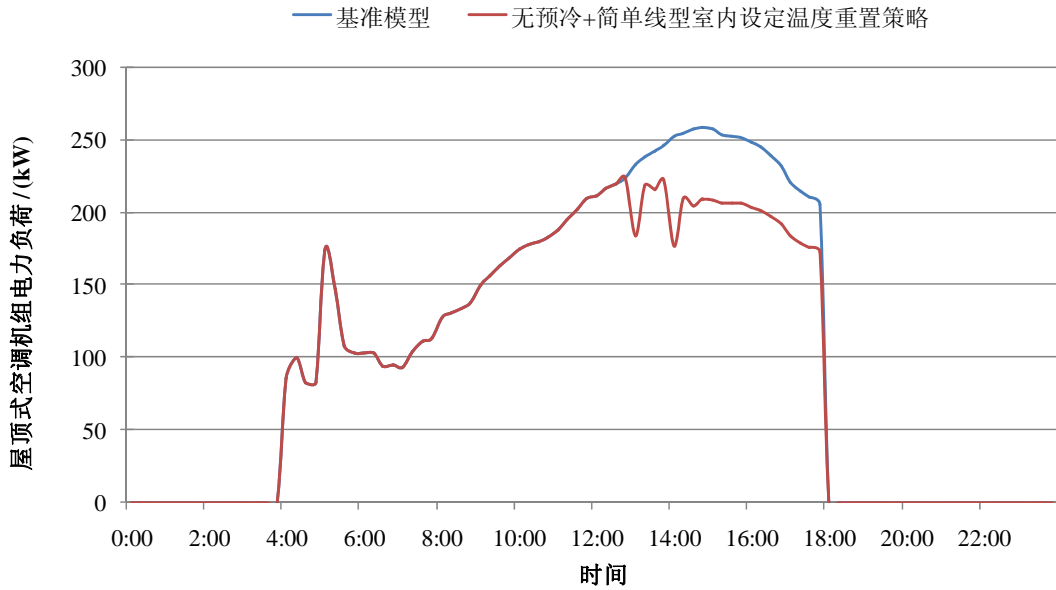


图 4.15 无预冷和简单线型室内设定温度重置策略下的屋顶式空调机组能耗模拟结果-TCCSB

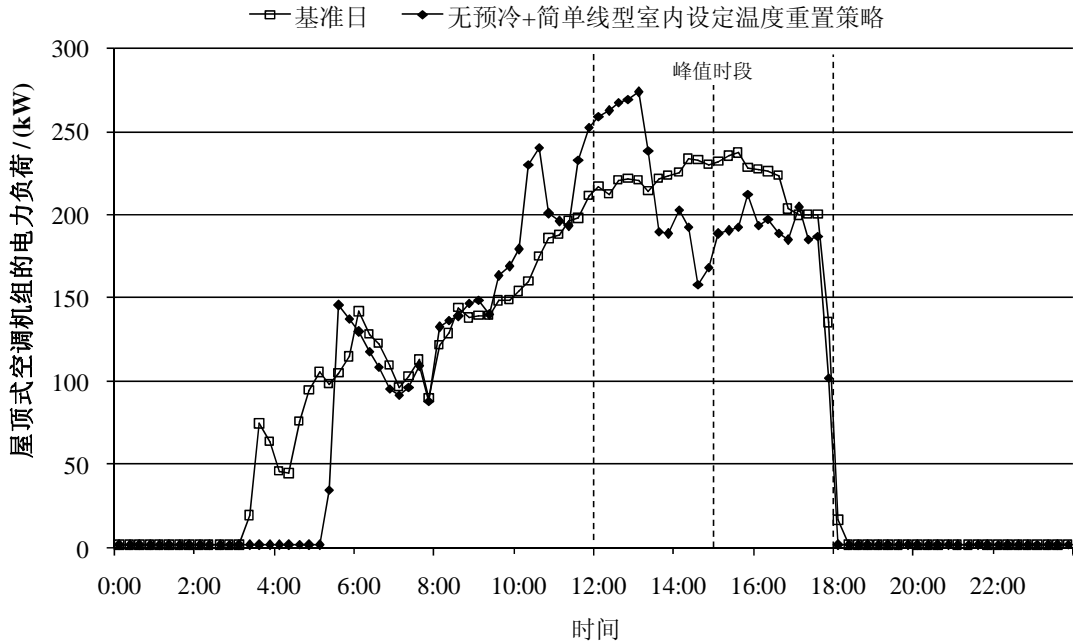


图 4.16 无预冷和简单线型室内设定温度重置策略下屋顶式空调机组能耗实测结果-TCCSB

表 4.6 无预冷和简单线型室内设定温度重置策略的实测数据和模拟结果对比

预冷策略	峰值时段的电力负荷	kW		W/ft ²		WBP%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
无预冷+简单线型 室内设定温度重 置	实际数据	75	32	0.86	0.36	28%	15%
	模拟结果	76	42	0.87	0.48	29%	19%
	差别	1	10	0.01	0.12	1%	1%

图 4.17 和图 4.18 分别为预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下空调能耗的模拟结果与实测结果，可以看出预冷时段和峰值时段的电力负荷曲线很相似，而对于能耗模型的模拟结果来说，对温度设定值的变化则较为敏感。总体上来看，预冷时段电力负荷增加的幅度以及峰值时段电力负荷降低的幅度非常吻合。表 4.7 为模拟结果与实测数据对比的详细信息。

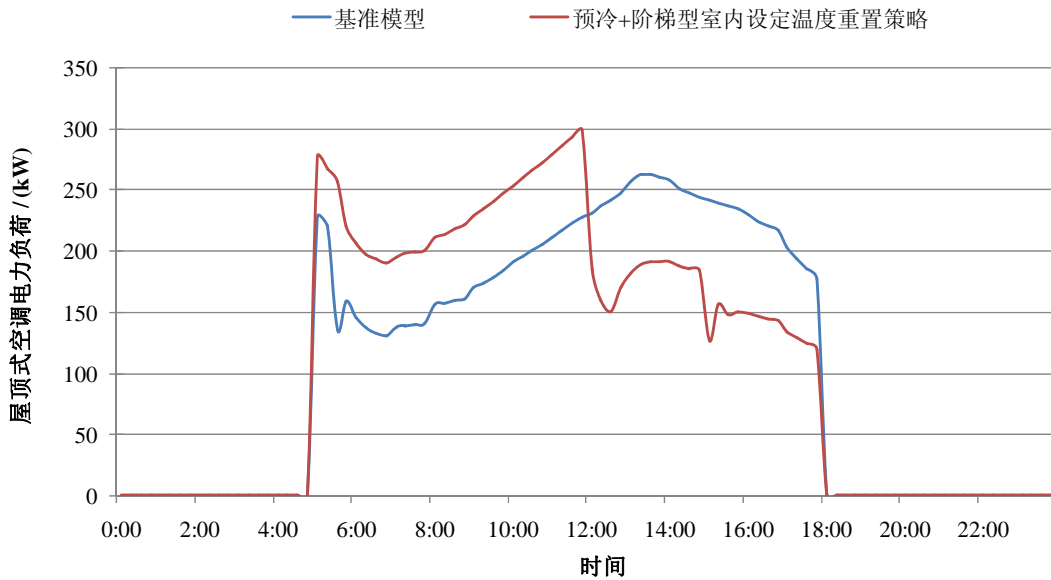


图 4.17 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的屋顶式空调机组能耗模拟结果-TCCSB

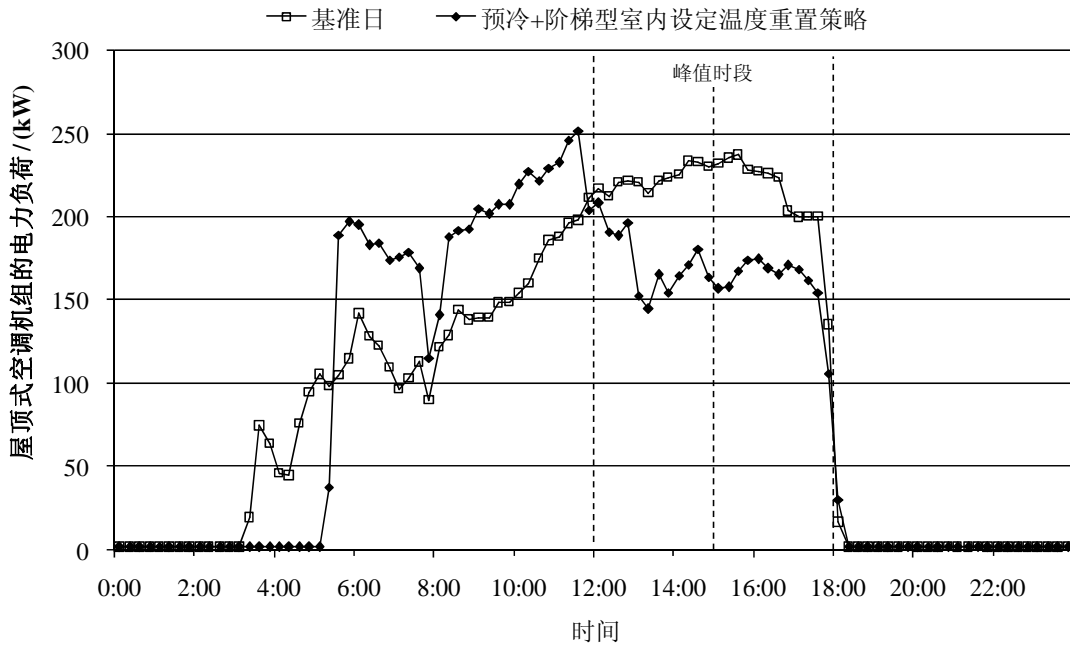


图 4.18 预冷和阶梯型室内设定温度重置策略下的屋顶式空调机组能耗实测结果-TCCSB

表 4.7 预冷和指数型室内设定温度重置策略的实测数据和模拟结果对比

预冷策略	预冷时段和峰值时段		kW		W/ft ²		WBP%	
			最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
预冷+阶梯型室内设定温度重置	预冷时段	实际数据	-84	-57	-0.96	-0.66	-33%	-23%
		模拟结果	-114	-62	-1.31	-0.71	-44%	-24%
		差别	30	5	0.35	0.05	11%	1%
	峰值时段	实际数据	77	51	0.89	0.58	31%	20%
		模拟结果	91	62	1.05	0.71	36%	25%
		差别	14	11	0.16	0.13	5%	5%

4.3 本章小结

本章节主要内容为通过利用我们开发的需求响应快速评估软件 DRQAT 对两幢实测建筑进行建立能耗模型及校正工作，在校正后的基准模型基础上，对实测的预冷策略进行模拟对比分析。

通过本章的研究分析，确定了应用 DRQAT 进行建模和模型校正的基本方法，并通过校正后模型的模拟结果与实测数据的比较，发现模拟结果能够很好的预

测实际建筑的能耗情况，尤其是预冷与室内设定温度重置策略对空调系统电力负荷的影响程度，模拟结果与实测数据之间没有太大的差别，其模拟结果具有可靠性，并且能够在短时间内完成模拟建立和校正工作。在校正后基准模型基础上，进行不同需求响应策略的横向比较，最终确定最优化的预冷和温度控制策略，从而在最大程度上降低峰值时段的电力负荷。

第五章 结论和展望

5.1 结论

随着世界经济的高速发展，能源作为经济发展的强大的推动力而越来越受到人们的关注。研究学者开始寻求新能源或可再生能源来实现可持续性发展。特别是目前世界经济在不断的发展，人们对能源的需求也日益增长，尤其是电力方面的需求。基于这个背景，电力需求响应被引入到了电力市场改革的大环境，其目的主要在于降低峰值电力需求负荷，提高整个电力系统的能源效率和市场的经济效益。

本课题则主要针对几种预冷和室内设定温度重置策略进行研究，其目的在于利用建筑材料的蓄热能力进行电力负荷错峰。论文首先描述了在加州气候炎热地区利用建筑材料的蓄热能力进行错峰研究的背景，并介绍该论文实测建筑所在的气候区域特性，从生物气候图的角度阐述了建筑材料的蓄热能力在被动式降温 and 延迟峰值负荷方面的潜力。在此基础上提出人为的预冷和室内设定温度重置策略，并通过不同策略的能耗模拟结果之间的横向比较，了解不同策略的效果和潜力；同时介绍了该建筑模型的背景信息，描述了大型商业建筑的特性以及划分标准，例如建筑几何构造、围护结构类型、内部负荷的确定依据以及空调系统的运行特性。主要工作是基于简单的建筑模型，模拟分析这几种预冷策略的控制特性以及对整个建筑能耗的影响结果。模拟结果发现指数型和阶梯型的室内设定温度重置策略的效果非常明显，因此在后面的实测工作中，主要对这两种策略做了重复测试。

论文的主体部分对两幢实际建筑进行预冷和室内设定温度重置策略的实测研究，并在不同的气候条件下针对不同预冷策略进行数据收集和分析，并通过不同策略下建筑能耗变化与基准日模型之间的对比分析，了解每一种策略的错峰潜力以及经济效益；主要从建筑总能耗的变化、空调机组的电力负荷变化、以及每一种需求响应策略下的经济性来分析。关于基准日模型的选择确定，主要通过基准日与需求响应实测日之间的气候条件相近程度来确定，参考因素为基准日和实测日的室外最高温度与逐时温度。通过实测的结果来看，无论是在

凉爽气候下，还是炎热或极其炎热的气候条件下，我们所实测的控制策略均降低了峰值时段的电力需求负荷，尤其是阶梯型与指数型室内设定温度重置策略的效果更为显著，峰值时段的建筑总能耗大约能够降低 25~30%左右，并且电力负荷运行平稳，没有大的波动；关于预冷策略的经济性效益，峰值电力负荷的降低导致了基于峰值电力负荷的月基本电力负荷需求费用降低的幅度非常大，在炎热和极其炎热的气候条件下其策略的效果更为显著，平均每月能够节约 \$1000~1500 左右；同时我们还对回风温度进行了实测分析，实测结果表明在峰值时段的温度重置结束前，室内回风温度最高不超过 76 °F，对室内舒适度不会有任何影响。

论文的后半部分确定了应用需求响应快速评估软件 DRQAT 进行建模和模型校正的基本方法，并通过校正后模型的模拟结果与实测数据的比较，发现模拟结果能够很好的预测实际建筑的能耗情况，尤其是预冷与室内设定温度重置策略对空调系统电力负荷的影响程度，模拟结果与实测数据之间没有太大的差别，其模拟结果具有可靠性，并且能够在短时间内完成模拟建立和校正工作。在校正后基准模型基础上，进行不同需求响应策略的横向比较，最终确定最优化的预冷和温度控制策略，从而在最大程度上降低峰值时段的电力负荷。

5.2 展望

通过本论文对几种需求响应策略的实测和模拟分析，可以得出在炎热的气候条件下预冷和室内设定温度重置策略的效果非常显著。整个建筑峰值时段的电力负荷大大的降低。但是本论文还有一定不足，有待进一步的研究。

- (1) 基准日模型的确定有待进一步的研究。目前本论文关于基准日的确定方法是基于基准日模型与需求响应策略实测日的气候条件的相近程度。如果建筑的能耗与内部负荷密切相关，而受室外气候条件的影响很小，在这样的情况下，基准日模型的确定方法还有待研究；
- (2) 实际建筑的蓄热能力的测量方法。本论文中主要是根据办公楼的建筑材料和内部装饰等情况从而估计出蓄热能力的程度高低，在以后的工作中，将提出一个理论方法或模型，从而能够准确的确定建筑的蓄热能力；
- (3) 能耗模型的校正方法。由于 DRQAT 内部的建筑原型是比较简单的能耗模型，因此与实际的建筑有较大的差别，如何能够提高该软件的模拟准确

性以及建模的简便性，是以后要重点做的工作；

- (4) 继续进行需求响应策略的实测工作。在以后的实测工作过程中，我们将对建筑本身的数据收集方面投入更多的精力和时间，为以后的建立模型和校正工作提供足够的信息。

致谢

从 2005 年步入同济校园到现在已经三年半的时间了，在这段时间里我一直生活得非常的愉悦，为自己是一个同济人而感到无比的自豪，非常感谢在这两年多的时间里我身边的每一个人曾经给过我的帮助和关怀，我将永远的记住这段我人生中极为美好的时光。

首先我要感谢我的父母，他们含辛茹苦的把我抚养大，为我付出很多心血，给了我最大的关怀和鼓励，让我一直在美好的环境中成长，爸爸妈妈，我永远爱你们！

感谢我的导师潘毅群教授，她在学习和研究工作中给我以宝贵的指导，使我在研究和学习中学到了很多，也进步了很多。此外，在生活上，潘老师也教导我们做人和做事的原则，让我明白了如何处理人生道路上的成功和挫折，在研究方面，通过这几年我在建筑节能领域的研究和学习，当我看到潘老师的论文的时候，我不禁被论文新奇的思想、缜密的方法、紧凑且有条理的组织结构而打动，使我学到了很多，在和潘老师相处的日子，她年轻、聪明、漂亮，和我们同门在一起的时候，时时刻刻充满着欢笑，在此深深的感谢亲爱的潘老师！

其次要感谢课题组的黄治钟老师，每次和黄老师交流学习过程中，会被他独特缜密的思维而倾倒，同时让我学到了认真做事、正直做人，虽然严厉，但不失幽默，感谢亲爱的黄老师！

2007 年 9 月份潘老师推荐我去美国劳伦斯实验室交流学习，在此期间，许鹏老师在学习和工作中给予了极大的帮助和指导。他在工作中严谨的态度，不时的灵光闪现，在我们领域的研究深度大大的影响了我，是我学习的榜样，同样他非常幽默，感觉时时刻刻充满活力，在以后的工作和生活中，我要努力的向您学习！

感谢我的亲爱的老婆一直给我的支持和鼓励，在研究生期间和你相处的日子充满着欢乐和泪水，尤其是在我外交流学习的日子里，你在背后默默的支持，每天早晚守在电脑旁的身影不时的浮现在我眼前，和你经历了两地分开的半年，让你我都明白彼此都是唯一的，亲爱的，你嫁给我了，你是我的唯一，在以后的日子里，我都将和你-漂亮的老婆，风雨同舟、同德同心、开始我们的幸福生活，不断的奋斗，享受生活！

致谢

感谢我的同门赖艳红，我们共同相处了两年的美好的学习时光，你平时看起来傻傻的，笨笨的，然而却让我大失所望啊，你聪慧、漂亮、善良，衷心祝福你在以后的日子幸福平安！

感谢我的师弟左明明、师妹李玉明，和你们在工作室一起学习和生活的日子，充满着欢笑，谢谢你们帮我做的任何事情，衷心祝福你们在以后的工作生活中平安幸福，大有作为！

感谢我亲爱的朋友们，老计、海波、小野、陈跃华、王育新、徐继华、潘刚军、李伟奇、季亮、邬振午、张海东..... 陪我度过了美好的研究生生活，踢球、喝酒、侃大山、一块学习.....

想要感谢的人还有很多很多，最后向所有关心和爱护我的人，衷心的说一声：谢谢你们！我永远爱你们！

殷荣欣
2009年2月26日

参考文献

- [1] DOE. 2008 building energy data book. D.O. Energy 2008
- [2] 王蓓蓓. 需求相应的电力市场运行问题研究. [博士学位论文]. 南京: 东南大学电气工程系, 2007
- [3] 张国新, 王蓓蓓. 引入需求响应的电力市场运行研究及对我国电力市场改革的思考. 电力自动化设备, 2008, Vol. 28 (10) 28-33
- [4] 张钦, 王锡凡, 王建学, 冯长有, 刘林. 电力市场下需求响应研究综述. 电力系统自动化, 2008, Vol. 32 (3) 97-106
- [5] 韩珺巧, M.A. Piette. 夏季电力短缺的解决方案——电力需求响应及其在空调制冷系统中的应用. 专家撰文, 2008, Vol. 119 (29)
- [6] 牛东晓, 陈志强. 电力市场下的需求响应研究. 华东电力, 2008, Vol. 36 (9) 5-9
- [7] DOE. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them: a report to the United State Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005 [EB/OL]. Section 1252, 2005
- [8] FERC. Assessment of demand response and advanced metering. F.E.R. Commission 2006 staff report, 2006
- [9] FERC. Assessment of demand response and advanced metering. F.E.R. Commission 2007 staff report, 2007
- [10] M.A. Piette, D.S. Watson, N. Motegi, N. Bourassa. Findings from the 2004 Fully Automated Demand Response Tests in Large Facilities. LBNL-58178, 2005
- [11] S. Kiliccote, M.A. Piette, D. Hansen. Advanced controls technologies and strategies linking demand response and energy efficiency. LBNL-58179, 2006
- [12] S. Kiliccote, M.A. Piette, D. Hansen. Advanced controls and communications for demand response and energy efficiency in commercial buildings. LBNL-59337, 2006
- [13] J.E. Braun. Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage. AHSRAE Transactions, 1990, Vol. 96 (2) 876-877
- [14] T.A. Reddy, L.K. Norford, W. Kemption. Shaving residential air-conditioning peaks by intelligent use of the building thermal mass. Energy, 1991, Vol. 16 (7) 1001-1006
- [15] F.B. Morris, J.E. Braun, S.J. Treado. Experimental and simulated performance of optimal control of building thermal storage. ASHRAE Transactions, 1994, Vol. 100 (1) 402-414
- [16] K.R. Keeney, J.E. Braun. A simplified method for determining optimal cooling control strategies for thermal storage in building mass. HVAC&R RESEARCH, 1996, Vol. 2 (1) 59-78
- [17] K.H. Lee, J.E. Braun. Application of building precooling to reduce peak cooling requirements. AHSRAE Transactions, 1997, Vol. 103 (1) 463-469

- [18] K.H. Lee, J.E. Braun. Development and application of an inverse building model for demand response in small commercial buildings. in: Proceedings of the 2004 IBPSA conference. Colorado, Boulder, CO. 2004
- [19] J.E. Braun, K.W. Montgomer, N. Chaturvedi. Evaluating the Performance of Building Thermal Mass Control Strategies. HVAC&R RESEARCH, 2001, Vol. 7 (4) 403-428
- [20] J.E. Braun. Load control using building thermal mass. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2003, Vol. 125 (2) 292-301
- [21] K.H. Lee, J.E. Braun. An experimental evaluation of demand-limiting using building thermal mass in small commercial buildings. AHSRAE Transactions, 2006, Vol. 112 (2) 559-571
- [22] K.H. Lee, J.E. Braun. Development of methods for determining demand limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements. Building and Environment, 2008, Vol. 43 1755-1768
- [23] K.H. Lee, J.E. Braun. Evaluation of methods for determining demand-limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements. Building and Environment, 2008, Vol. 43 1769-1783
- [24] K.H. Lee, J.E. Braun. Model-based demand-limiting control of building thermal mass. Building and Environment, 2008, Vol. 43 1633-1646
- [25] S. Kiliccote, M.A. Piette, G. Wikler, J. Prijyanonda, A. Chiu. Installation and Commissioning Automated Demand Response Systems in: 16th National Conference on Building Commissioning Newport Beach, CA 2008
- [26] M.A. Piette, O. Sezgen, D.S. Watson, N. Motegi, C. Shockman. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities. LBNL-55085, 2005
- [27] N. Motegi, M.A. Piette, D.S. Watson, S. Kiliccote, P. Xu. Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response. LBNL-59975, 2007
- [28] N. Motegi, M.A. Piette, D.S. Watson, O. Sezgen, L.T. Hope. Measurement and evaluation techniques for automated demand response demonstration. LBNL-55086, 2004
- [29] S. Kiliccote, M.A. Piette, D.S. Watson, G. Hughes. Dynamic Controls for Energy Efficiency and Demand Response: Framework Concepts and a New Construction Case Study in New York in: Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Pacific Grove, CA 2006
- [30] M.A. Piette, D.S. Watson, N. Motegi, S. Kiliccote. Automated critical peak pricing field tests: 2006 pilot program description and results. LBNL-62218, 2007
- [31] G. Wikler, A. Chiu, M.A. Piette, S. Kiliccote, D. Hennage, C. Thomas. Enhancing Price Response Programs through Auto-DR: California's 2007 Implementation Experience in: 18th National Energy Services Conference and Exposition. Clearwater Beach, FL 2008
- [32] K. Coughlin, M.A. Piette, C. Goldman, S. Kiliccote. Estimating Demand Response Load Impacts: Evaluation of Baseline Load Models for Non-Residential Buildings in California. LBNL-63728, 2008
- [33] P. Xu, P. Haves, J.E. Braun, L.T. Hope. Peak Demand Reduction from Pre-Cooling with a Zone Temperature Reset in an Office Building. in: 2004 ACEEE Summer Study on Energy

- Efficiency in Buildings. Pacific Grove, CA. 2004
- [34] P. Xu, P. Haves, M.A. Piette, L. Zangreus. Demand shifting with thermal mass in large commercial buildings: Field tests, simulations and audits. LBNL-58815, 2005
- [35] P. Xu. Evaluation of demand shifting strategies with thermal mass in two large commercial buildings. in: Proceeding of SimBuild 2006. Cambridge, MA. 2006
- [36] L. Zangreus, C. Huizenga, E. Arens, D. Lehrer. Listening to the occupants: a web-based indoor environment quality survey. Indoor air, 2004, Vol. 14 (8) 65-74
- [37] P. Xu, L. Zangreus. Demand shifting with thermal mass in light and heavy mass commercial buildings. LBNL-61172, 2007
- [38] S. Morgan, M. Krarti. Impact of electricity rate structures on energy cost savings of pre-cooling control for office buildings. Building and Environment, 2007, Vol. 42 2810-2818
- [39] 郭联哲, 谭忠富, 李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法. 电网技术, 2006, Vol. 30 (5) 24-28
- [40] 李扬, 王蓓蓓, 宋宏坤. 需求响应及其应用. 电力需求侧管理, 2005, Vol. 7 (6) 13-18
- [41] 宋平. 需求响应在国外电力削峰填谷中的应用. 上海节能, 2004, Vol. (2) 47-50
- [42] 赵欣, 高山. 美国市场中的需求响应与高级计量. 电力需求侧管理, 2007, Vol. 9 (4) 68-71
- [43] 朱成章. 电力需求侧管理要重视需求响应. 供用电, 2005, Vol. 22 (5) 7-8
- [44] T.A. Reddy. Calibrating detailed building energy simulation program with measured data. HVAC&R RESEARCH, 2007, Vol. 13 (2) 221-242
- [45] 潘毅群, 左明明, 李玉明. 建筑能耗模拟——绿色建筑设计 with 建筑节能改造的支持工具之一: 基本原理与软件. 制冷与空调, 2008, Vol. 22 (3) 10-16
- [46] 潘毅群, 吴刚, V. Hartkopf. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用. 暖通空调, 2004, Vol. 34 (9) 2-7
- [47] 潘毅群, 吴刚. 建筑能耗模拟的校验方法及其应用. 暖通空调, 2007, Vol. 37 (7) 21-26
- [48] 陈晨, 潘毅群, 吴刚. 上海市某商用建筑能耗分析与节能评估. 暖通空调, 2006, Vol. 36 (4) 88-93
- [49] Y. Pan, Z. Huang, G. Wu. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. Energy and Buildings, 2007, Vol. 39(6) 651-657
- [50] P. Xu, R. Yin. Demand shifting with thermal mass in large commercial buildings in California hot climate area. LBNL-61172, 2006
- [51] B. Givoni, Man, climate and architecture. London: Applied Science Publishers Limited, 1976.
- [52] M. Milne, B. Givoni, Architectural design based on climate. New York: McGraw Hill Book Company, 1979.
- [53] P.E. Center. Guide to California Climate Zones. <http://www.pge.com/mybusiness/edusafety/training/pec/toolbox/arch/climate/index.shtml>
- [54] N. Motegi, M.A. Piette, D.S. Watson, S. Kiliccote, P. Xu. Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response-Appendices. LBNL-59975, 2007
- [55] J. Huang, H. Akbari, L. Rainer, R. Ritschard. 481 Prototypical commercial buildings for 20

- urban market areas. Technical documentation of building loads data base developed for the GRI Cogeneration Market Assessment Model, 1991
- [56] DOE. California's Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. D.O. Energy Title 24, 2005
- [57] L.G. Berglund, R.R. Gonzalez. Application of acceptable temperature drifts to building environment as a mode of energy conservation. AHSRAE Transactions, 1978, Vol. 84 (1) 110-121
- [58] S. Abbaszadeh, L. Zagreus, D. Lehrer, C. Huizenga. Occupant satisfaction with indoor environment quality in green buildings. in: Healthy Buildings 2006. Lisbon, Portugal. 2006
- [59] C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus, E. Arens. Air quality and thermal comfort in office buildings-Results of a large indoor environmental quality survey. in: Healthy Buildings 2006. Lisbon, Portugal. 2006
- [60] ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, 2005
- [61] R.W.H. Laboratory. Demand-limiting assessment tool (DLAT). <https://engineering.purdue.edu/DLAT/manual.html>
- [62] LBNL. Demand Response Quick Assessment Tool (DRQAT). <https://gaia.lbl.gov/people/ryin/public/DRQAT.html>
- [63] NCDC. National Climatic Data Center. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>
- [64] ASHRAE. Measurement of Energy and Demand Savings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2002
- [65] Google. Google Earth 5.0. <http://earth.google.com/>

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

殷荣欣, 男, 1984年8月10日生于河南省禹州市, 汉族。

2005年7月毕业于西安建筑科技大学 建筑环境与设备工程专业 获工学学士学位。

2005年9月进入同济大学攻读工学硕士研究生, 专业为供热、供燃气、通风及空调工程

已发表论文:

Yiqun Pan, Rongxin Yin, Zhizhong Huang. Energy modeling of two office buildings with data center for green building design, 2008, Vol.40 (7) :1145-1152

研究报告:

[1] Peng Xu, Rongxin Yin, etc. 2006. Demand Shifting With Thermal Mass in Large Commercial Buildings in California Hot Climate Zone. LBNL 61172.

- [2] Rongxin Yin, Peng Xu, Sila Kiliccote. 2008. Auto-DR and Pre-cooling of Buildings at Tri-City Corporate Center. SCE Report in process.