同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

结合人员行为的分散式空调系统能耗模拟研究

姓　　名：徐蕾

学　　号：1530921

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：潘毅群 教授

副指导教师：黄治钟

二〇一八年三月

同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master

Research on energy simulation of distributed air conditioning system integrated with occupant behavior

Candidate: Lei Xu

Student Number: 1530921

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Engineering

Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation and Air Conditioning Engineering

Supervisor: Prof. Yiqun Pan

March, 2018

结合人员行为的分散式空调能耗模拟研究

徐　蕾

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；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年　　月　　日

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

年　　月　　日

摘要

能源供给压力的不断增加导致种类繁多的节能技术应运而生。能耗模拟能够在建筑设计之初或运行阶段对其能耗水平进行评估，近年来在建筑节能领域得到广泛应用。随着模拟技术的不断发展和进步，能耗模拟软件被应用于更加广泛的领域。同时，新的应用场景也给能耗模拟软件的模拟精度和准确度提出了新的挑战。分体式空调被大量安装于我国各类建筑当中，对其用能及运行情况进行准确刻画具有十分重要的意义。由于人行为对建筑能耗具有显著影响，并且对于采用分散式空调的建筑，人行为的随机影响更加明显，因此，在分散式空调的模拟当中加入人行为模型变得非常必要。本文针对现有一款主流能耗模拟软件 EnergyPlus 中对分散式空调系统模拟的缺陷以及并未考虑人员影响因素的问题，从人行为和软件自身空调模块出发，通过实验及调研，对模拟软件中分体机模块进行改进开发，并在模拟中加入人行为影响因素。

本文着眼于对全楼尺度的人员在室率以及人员空调使用行为进行研究，并不研究单个个体的行为及行为驱动因素。人员在室率的数据通过动作探测进行获取，将记录数据处理为全楼逐时在室率并进行分析。人员对空调的调节行为监测数据通过室内温控器进行记录并上传，通过对数据的处理后得到人员对设定温度及室内温度选择的分布规律。

在对人行为进行模拟时，为体现出人行为的随机性和多样性，本文采用马尔可夫链及蒙特卡洛随机模拟的方法，对全楼各个房间的人员在室率以及空调调节行为进行模拟。通过生成各个房间人员在室率以及空调设定温度的时间表，对人行为进行模拟。采用此种方法得到的人行为模型，既能够体现出人行为的不确定性，也能在全楼尺度上服从统计规律。

由于 EnergyPlus 原有空调模块在模拟时无法反映出分体机运行时的启停特性和室内温度波动的特点，本文对 EnergyPlus 程序源码进行修改，使其在对分体机模型进行模拟时能够反映其运行特征。本文使用改进后的分体机模型对单个房间模型进行模拟，结果显示改进后的模型能够体现出分体空调运行时的启停以及室温波动。此外，结合人行为模型，本文对一酒店模型进行模拟，结果显示改进后的模型在长时间尺度上能耗计算结果与原有模型之间的差值大于模拟误差，因此可以认为此种改进是有必要和有价值的。

本文的研究成果能够实现对全楼尺度的人行为在室情况以及空调使用行为的模拟，同时也能够对分散式空调能耗情况进行更加准确的刻画。

关键词：EnergyPlus，人行为模拟，分体机模型，能耗模拟

ABSTRACT

Various kinds of energy-saving technologies come into being under the increasing pressure of energy supply. Energy simulation which can provide energy usage estimation at building design or retrofitting stage has gained extensive popularity. Energy simulation programs are being applied in wider fields with the progress of simulation ability. Meanwhile, emerging applications challenge the accuracy and precision of those tools. Split-type air conditioners are widely used in China's buildings. Thus, it's meaningful to simulate this kind of air conditioner in a more detailed and accurate way. Occupant behavior has been recognized as a significant factor that influences the building energy consumption. In a building that is equipped with distributed air conditioning system, the stochastic impacts of occupants are especially salient. Therefore, it's quite necessary to integrate occupant behavior with the simulation of distributed air conditioning system. According to the problem that a prevailing simulation program- EnergyPlus has some blemish in its distributed air conditioner module and lacks consideration about occupant behavior, this research improved the module and add the occupant behavior model in simulation with the help of experiment and investigation.

This thesis aims to study the occupancy and occupants' interactions with the thermostat at whole building scale rather than individual's behavior and motivation. The occupancy data is collected by motion sensors and processed into hourly profile. Occupants' interactions with the thermostat are recorded and uploaded directly by sensors in thermostats. Occupants' preferences towards set-points and indoor air temperatures are analyzed.

This research proposed to use Monte-Carlo stochastic simulation and Markov Chain method to model occupancy and occupants' interactions with the thermostat. Occupant behavior is simulated by generating the occupancy and set-point schedule of each room. The proposed method can reflect the diversity and randomness of occupant behavior and also conform to statistical regulation.

The original module in EnergyPlus cannot present the intermittent operation and temperature fluctuation characteristics of split-type air conditioner. This research modified the source code of EnergyPlus to reflect those characteristics. The modified system model are simulated on a single room. The results suggest that the modified

model can demonstrate the on-off operation and the temperature fluctuation. Besides, this thesis conducts a simulation on a hotel building integrating the occupant behavior model with the modified split-type air conditioner model. The results show that this method can incorporate both the features of occupant behavior and split-type air conditioner. The results' difference between the modified model and conventional model is larger than the generally accepted simulation error which means the proposed method is necessary and meaningful.

The results of this thesis can be applied to model occupant behavior at whole building scale. Besides, the modified split-type air conditioner model can perform more accurate simulation at shorter time step.

Key Words: EnergyPlus, occupant behavior modeling, split-type AC model, energy simulation

目录

摘要 I
ABSTRACT III
第 1 章 绪论 7
1.1 课题背景 7
1.2 研究目的与意义 9
1.3 国内外研究现状 9
1.3.1 分散式空调系统模拟研究现状 10
1.3.2 人行为模拟 12
1.4 研究问题的提出 15
1.5 研究内容及技术路线 15
1.5.1 研究内容 16
1.5.2 技术路线 16
1.6 本章小结 18
第 2 章 人员在室率与空调使用行为调研 19
2.1 人行为研究范围界定 19
2.2 人行为的数据收集方法 20
2.3 数据处理与结果分析 22
2.3.1 人员在室率 22
2.3.2 人员空调使用行为 25
2.4 本章小结 27
第 3 章 人员在室率与空调使用行为模拟 29
3.1 现有人行为模拟方法 29
3.1.1 固定作息法 29
3.1.2 统计分析法 29
3.1.3 随机模型 30
3.1.4 Agent-based 模型（ABM） 30
3.2 人员在室情况模拟 31
3.3 人员空调使用行为模拟 37
3.3.1 随机抽样 38
3.3.2 随机数产生 39
3.3.3 蒙特卡洛随机模拟 40
3.4 本章小结 42
第 4 章 EnergyPlus 分散式空调模型改进 44
4.1 现有能耗模拟软件 44

4.2 EnergyPlus 分体机模型 46
4.3 改进方法 48
4.4 模拟结果与分析 53
4.5 本章小结 61
第 5 章 分散式空调模拟案例 62
5.1 案例设置 62
5.2 人行为模型 64
5.2.1 人员在室情况模拟结果 64
5.2.2 人员空调调节行为模拟结果 68
5.3 模拟结果 71
5.4 本章小结 76
第 6 章 结论与展望 78
6.1 结论 78
6.2 进一步工作的方向 79
致谢 80
参考文献 81
附录 A EnergyPlus 输出文件处理代码 86
附录 B 分体机模型修改代码 90
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 91

第 1 章 绪论

1.1 课题背景

能源是社会、科技和人类进步与发展的根本动力。随着世界经济的快速发展，为了应对人口的快速增加以及日益增长的舒适度需求而带来的能源问题和环境压力，世界各国都在积极出台种类繁多的节能减排措施方案。从上世纪 90 年代签订京都议定书[1]达成世界范围的应对全球变暖的共识，到 2015 年签署的巴黎协定[2]进一步延续和强化应对气候变化的决心。欧洲各国开始从单体建筑到社区尺度积极推行零能耗或零碳排放，美国大力推动新能源建筑及城区的发展，中国也出台各种各样的标准规范以及鼓励政策促进建筑领域的节能和新能源的应用。

在全球的能源消耗中，建筑用能占据了相当大的比例。根据国际能源署公布的数据，建筑能耗在全球总能耗中占比达 30%[3]。在美国和欧洲地区，商业及住宅建筑用能占比高达 40%；在中国，这一数据也攀升至 20%以上[4-6]。因此，建筑领域的节能减排迫在眉睫。因此，应运而生了多种多样的节能措施旨在减少建筑自身负荷，提高建筑系统用能效率，同时也增加可再生能源的使用比例。同时，能够较为真实准确反映建筑负荷变化的能耗模拟方法也在世界范围内的能源危机后愈加受到重视。此外，计算机计算能力的大幅提升也使得建筑热湿过程中大量复杂计算成为可能。从初期的 DOE-2,ESP-r,BlAST 等，到今天主流的 EnergyPlus, eQuest, TRNSYS 等。模拟的重点也渐渐从单纯地模拟建模（modeling）发展到模拟应用，把现有的能耗模拟软件应用于实际的工程项目中去，改善和提高建筑系统的能效和性能：在设计初期或既有建筑节能改造时，用作建筑冷、热负荷计算以及设备选型，优化设计或改造方案；用于建筑能耗管理和控制模式的设计与制定，保证室内环境舒适度的同时，挖掘节能潜力；还能与建筑环境模拟（气流模拟，光照模拟，污染物模拟等）或建筑性能仿真软件联合模拟，进行系统运行预测，故障诊断，控制优化等。

在各类影响建筑用能的参数中，人行为对建筑能耗的影响越来越受到重视。根据国际能源署（IEA）Annex66 中对人行为的定义，人行为包括了人员在室情况，位移以及与建筑内设备系统的交互[7]。目前国内外的人行为研究主要针对办公人员和住宅人员的行为研究。室内人员行为的不确定性、多影响因素、实际数据有限等限制因素决定了人行为研究的复杂性。人行为的研究从最初的研究办公建筑中人员的数量及分布，到办公人员对照明，办公设备，遮阳及外窗的使用，到如今的人员对采暖空调的调节行为，人员在室内的位移和多人房间人员间的相

互影响。如何准确有效地反映建筑中的人行为以及其对建筑能耗的影响依然值得学者深入研究探索。

分散式空调（多联机，分体机）是直膨式系统的一种，与其他系统相比，没有中间的换热系统，减少了中间的热交换次数，因此其具有较短的响应时间和较小的能量损失，具有舒适、节能、控制灵活方便等特点。正是由于其末端易于调节，部分负荷性能好，易于安装以及维护方便，用电量便于计量等优点，分散式空调大量广泛地应用在家庭、机关办公、酒店、写字楼、学校和医院等建筑当中。由图 1- 1 与图 1- 2 可以看出我国房间空调器产量近十年来呈稳步上升趋势，城市和农村居民百户空调器拥有量也逐年上升。分散式空调系统中分为定速和变频两种，对于定速空调，压缩机通过在启动和停止两种状态之间相互切换以达到室内空气状态点在设定温度上下小幅度波动。因此，对此类空调的模拟中，既要准确反映其用能情况，也要反映其运行的特性。

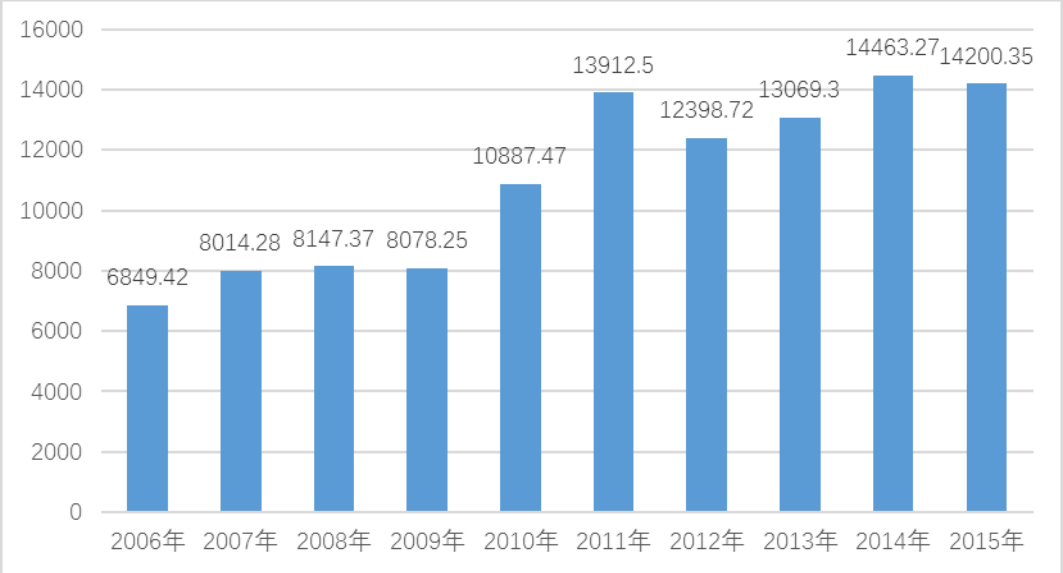

图 1- 1 我国房间空气调节器近 10 年产量（万台）

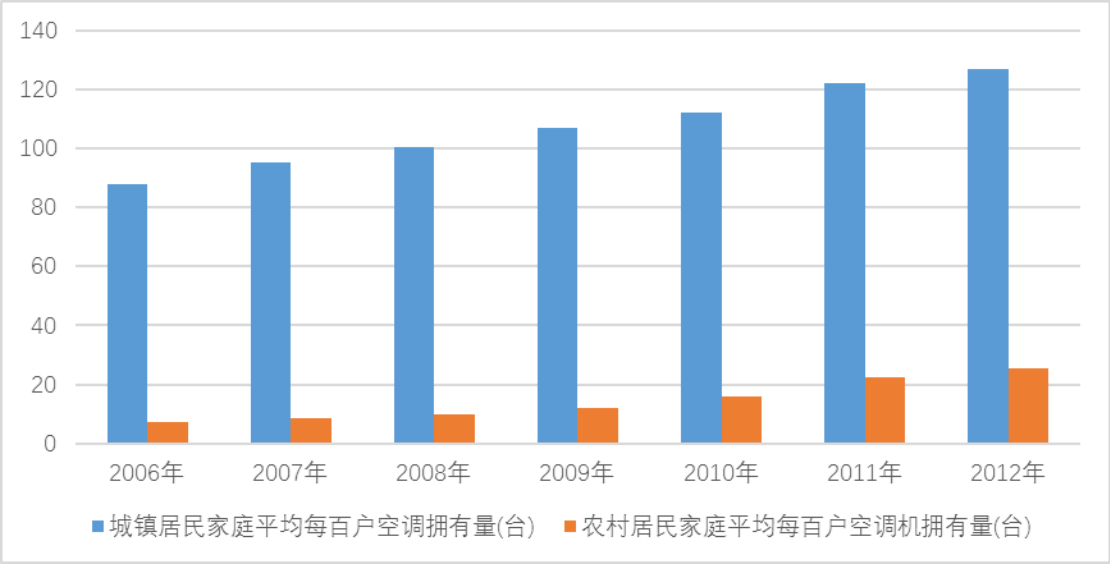

图 1- 2 我国居民家庭平均百户空调拥有量（台）

1.2 研究目的与意义

能耗模拟软件当前被广泛应用于绿色建筑设计，设计优化和既有建筑节能改造领域。然而随着能耗模拟软件的广泛推广与应用，其设计中的局限于不足也日益凸显。如何提高模拟的准确性，以及反映真实的建筑系统运行特性是推动能耗模拟软件发展的重要问题。分散式空调由于其灵活高效的特点广泛应用于各种建筑当中，若能够对其用能情况进行准确的模拟，对于建筑节能具有十分重要的意义。由于人行为对能耗有显著影响，并且 EnergyPlus 中分体机模块存在缺陷，本课题通过在模拟中加入人行为影响因素并编译开发新的分体机模块，实现分散式空调更准确的模拟。其意义不仅仅局限于能耗模拟软件的传统应用场合，并且对于其新兴的应用领域也具有重要价值。在对需求响应策略进行评估时，需要能耗模拟软件能够反映设备在较小时间内的用能需求及室内空气状态变化情况，因此改进后的模块相对于原有模块能够更加真实反映用能行为，对于需求响应具有较高的应用价值。在对建筑进行能效诊断时，需要对每个设备的运行进行评价，因此能够准确反映实际运行情况的模型对于能效诊断也十分必要。

1.3 国内外研究现状

由前文的背景介绍可以看到，分散式空调空调系统由于其灵活高效的特点，在我国各类建筑中具有广泛的应用，如何更加准确的刻画其运行特性具有十分重要的意义；室内人员对建筑能耗的影响也日益得到广泛关注和重视。因此，本节

关于国内外的研究现状将分为以下两部分来展开：

1）分散式空调系统模拟的研究现状

2）人行为模拟的研究现状

1.3.1 分散式空调系统模拟研究现状

目前对于分体式空调器的研究中，一部分研究着眼于系统能效的提高，包括通过实验或者仿真使用新型制冷剂，使用提高能效的措施，更好的气流组织等。在进行设备仿真时，研究通常往往关注其启停机过程的动态特性，或是机组整体或各部件的静态和动态仿真模型以求更加准确地刻画分体空调的运行特性。

Joudi 和 Al-Amir[8]通过实验和模拟研究了在分体空调系统中四种制冷剂在室外高温环境下的稳态运行特性。系统主要性能参数包括最优制冷剂容量，系统能效（COP），系统容量，能耗，总当量变暖影响（TEWI）等。研究发现，R290 在高温环境下是替代 R22 的最优选择。

陈则韶[9]等人对压缩制冷空调系统建立动态仿真模型，以家用空调器为例，建立了包括压缩机、冷凝器、毛细管以及蒸发器四个模块，考虑了各个组件之间以及与周围环境间的热质交换，实验结果与实测数据基本吻合。

Yau 和 Pean[10] 使用 Vapcyc[11]和 CoilDesigner[12]对马拉西亚某幢建筑进行分体机性能模拟。通过 CoilDesigner 模拟详细的内外机盘管的换热性能，并将模拟结果作为 Vapcyc 的输入来模拟分体机的整个循环过程。模拟结果发现，室外温度每升高 1℃，分体机能效 COP 和制冷量将会降低 2%。

Martínez 等人[13]为了降低夏季室外机进风温度提高系统能效，将冷凝盘管与蒸发冷却板耦合。通过实验确定蒸发冷却板的最优厚度已达到最优能效比，能耗包括分体机能耗，以及冷凝器风扇和冷却板循环水泵能耗。研究发现，在冷却板厚度达到 100mm 时，系统能效（COP）提高最多，可以达到 10.6%。

李越峰[14]等人研究将分体机室外机的管式换热器更换为平流换热器后，研究系统制冷性能以及成本的变化。结果显示，尽管室外机材料成本有所增加，但系统能效能从 5 级提高到 2-3 级，同时制冷剂充注量也明显降低。

在某些建筑中，由于建筑设计的限制，往往需要将空调室外机安装在建筑立井中，从而造成冷凝盘管温度过高，系统效率低下的问题。Nada 和 Said[15]针对此情况，采用 CFD 模拟的方法，研究最优的室外机排布。结果显示，若立井下部封闭，机组运行状况将大幅恶化；随着室外机安装高度增加，运行能效降低；对于开口立井，底楼层外机安装在某一面墙，高楼层外机安装在相邻墙面最利于机组运行。Avara 和 Daneshgar[16]针对分体机室外机对室外温度较为敏感从而影响运行能耗的特点，使用 CFD 模拟研究室外机最优的放置位置，对于安装在支撑墙

面上的计算其最优距墙面距离，对于安装在屋顶的研究最优安装高度。结果发现对于屋顶室外机，安装高度 0.5 米最为理想；对于墙面室外机，最优安装距离根据两平行墙面距离而定。王洪磊等[17]人针对分体式空调室外机存在较大噪声的问题，使用 Fluent 软件对空调室外机进行了有限元模拟，找到了影响室外机噪声的关键耦合部件风扇罩，并对其结构进行了优化，通过实验与模拟验证，有效地降低了出风涡流噪声，提高了出风量。

在各个仿真平台建立的静态和动态模型尽管能反映机组运行情况，但是在对于楼宇尺度的能耗模拟上，仍具有局限性，往往需要和能耗模拟软件进行协同仿真。但在能耗模拟软件中直接添加或更改对应的设备模型少有人涉及。除对机组局部部件建立详细的模型进行仿真外，研究同样关注分散式空调系统的能耗模拟。A. Gomes[18]等人针对新兴的能耗模拟应用场景需要更短时间步长的更准确的能耗模拟结果问题，建立了定频和变频空调的物理模型，考虑了其在运行时存在启动和停止的模式切换和室内温度的波动，并且能够模拟多房间尺度下的负荷和空调运行情况。但其模型对于建筑负荷的计算过于简化，同时对于定速空调运行特性也考虑得不够全面，还需要进一步的完善。

Hong[19]等人在 EnergyPlus 中开发了新的变频空调系统（VRF）模块，并且使用实测数据对模型进行校验，结果显示新模块能够更加准确的对 VRF 系统进行模拟，能够便于添加更先进的控制策略，使用了更加准确的管道散热计算方法，在部分负荷率的情况下更加精确的模拟，大大减少用户需要输入的修正曲线的数量来达到更高的可用性。周宴平[20]等人针对 EnergyPlus 中变频多联机采用单只直膨盘管模型存在不足，对该系统模块进行开发，并且将次模块应用到一栋中国典型商业楼模型上，发现相比于传统常见空调系统，变频多联机系统更加节能。

EnergyPlus 是一款开源的能耗模拟软件，用户可以根据自己需求向其中添加所需功能及模块。现在的模块开发是由其开发团队以及世界各地的研究人员将改进后的代码以及模块上传到开源软件项目托管平台 GitHub 中，由开发团队人员判断是否将该功能添加到新版本的软件当中去。研究人员也可以根据自己需求更改软件源码实现特定需求的模拟。但国内还少有学者对软件界面[21, 22]，设备模拟计算的基础传热传质方程，热平衡方程等进行改进，或增加更加符合中国实际使用情况的设备模型[23]。同时，作为一款在能耗模拟领域广泛使用的模拟工具，新兴的应用场景对其在更短时间内的模拟准确度提出了挑战。

Yoon 等人[24]提出在需求响应下，通过改变空调系统设定点的方法来削减建筑峰值负荷。文章在 EnergyPlus 中建立居住建筑模型，并通过模拟验证该方法的应用效果。此外，他们在另一研究中[25]提出使用 EnergyPlus 与 Matlab 联合模拟的方法，针对需求响应中的实时电价进行系统控制。其他学者[26-29]在研究需求

响应下建筑系统控制策略时，也同样提出使用 EnergyPlus 对建筑系统的响应情况及室内人员舒适度情况进行模拟。

Zhang 和 Hong[30]针对现有故障诊断方法中缺乏对故障在全楼尺度影响的研究的问题，在 EnergyPlus 中增加了能够对建筑运行中可能出现的故障的模拟，同时能够模拟出故障对能耗及人员舒适度的影响。

Horrigan 等人[31]针对商业建筑运行数据与设计数值存在偏差的问题，通过建立EnergyPlus与Modelica耦合模型对商业建筑能耗模拟进行校核与运行故障诊断。

Muhammad Afrtab 等人[32]提出使用价格更加低廉数据更加准确的人员在室情况监测方法，同时根据监测数据实现建筑系统的智能控制。论文提出使用EnergyPlus 实时的模拟数据对空调系统的运行进行预测控制。

Zhao 等人[33]针对现有模型预测控制的研究中缺乏对混合制冷模式以及人员舒适度的关注，使用 EnergyPlus 对预测控制系统以及人员舒适度进行模拟，从而提高系统能效。

Ma 等人[34]通过建立 EnergyPlus 的建筑和系统模型并且与 Matlab 耦合，实现在需求响应中的经济模型预测控制，以达到最低费用的目标。

1.3.2 人行为模拟

人行为的模拟主要包括四方面的内容[35]：1）建筑内部人员行为的监测和数据收集；2）模型的建立；3）模型的评价；4）将模型应用到建筑能耗模拟软件当中。在实际应用中，此四个步骤常常需要循环迭代来保证模型的准确性。建筑能耗模拟领域的人行为包括人员位移和人员动作，人员位移即人员在各房间之间的随机移动过程；人员动作包括对窗户、照明、采暖空调系统、遮阳、电气设备等的人为控制[36]。

学者们在多年前就开始关注室内人员对建筑能耗的影响，随着近年模拟软件的广泛推行与应用，人行为模拟得到越来越广泛的重视。清华大学李兆坚[37]等人对北京市 5 栋住宅楼夏季空调用能进行调研，发现各住户之间空调能耗差异巨大，尽管大多数住户空调用能低于平均值，但部分用户用能远高于平均用能水平数倍。同时，高档住宅空调用能（集中空调）明显高于普通住宅空调（分体机，多联机）用能。此外，他们还分析了环境参数与空调行为对空调用能的影响，发现室内温度对空调能耗的影响十分显著，若室内设定温度从 25℃提高到 26℃，空调能耗可以减少 23%左右[38]。

最初的办公建筑人员行为的模式研究，主要关注如何预测或计算办公建筑中的人员密度与分布。对于人行为的模拟计算，传统的能耗模拟使用确定的时间表

来描述建筑物内的人员数量、作息和对空调系统状态点的设定。不同于其它确定性的输入参数，建筑中的人员动作和行为往往是随机进行的[39, 40]。其概率与当时的环境状态和是否有事件发生等因素有关，并且在完全相同的环境中，由于个人对于环境的感知和反应，以及生活习惯上的差别也会导致不同的动作结果[41, 42]。为了从这种多样性里提取出典型行为模式，随着监测技术和数据分析手段的进步，国内外学者提出了若干种基于数据驱动，或使用随机过程等方法的模拟方式。

Yang 和 Becerik-Gerber[43]提出了一种模拟人员在室率的框架：根据室内环境参数监测数据（光照，声音，动作，二氧化碳浓度，温度，门磁等等），通过一系列数据处理的方法建立人员在室率的预测模型，并根据预测出的每天的在室率时间表对时间表进行聚类，将在室率时间表分为工作日和非工作日时间表。并且测试了几种建模方法（回归，时间序列，模式识别，随机过程）的准确性。此外，他们根据预测出的在室率时间表，对各个办公房间空调运行设置进行优化（邻域搜索），包括人员离开后设定温度上调（夏季）以及上调启动时间间隔。通过模拟发现，使用此优化方法后节能率在 10.4%到 28.3%之间[44]。

清华大学王闯[45]提出了一套建筑内人员行为的研究框架和定量描述方法。他提出将人行为的模拟视作人员的一系列动作，其中包括人员的移动和人员的动作（开关窗，开关空调，开光灯），引入了模式和特征参数的概念对动作进行简化和量化，并且建立多种人员行为的典型模型。对于人员移动的数学描述，他建立了基于马尔可夫链和事件的描述方法，对于人员动作模型，基于无记忆性假设，通过概率函数来定量描述动作发生的概率与环境参数或时间的关系。

O’Brien 等[46]监测了 16 个单人办公室的人员在室情况，并且采用 Page[47]等的模型对每个办公室的数据分别进行拟合，得到单人模型中需要的参数。之后根据参数服从正态分布的假设，估计总体人群中各参数的概率分布，并分类得到几种不同的模式。

Yu 等[48]基于监测的能耗数据，采用聚类分析的机器学习方法，对人行为产生的能耗影响进行分类。Abreu 等[49]也采用聚类分析方法，从网络调研的数据中分类获得了三类用能特征，并构造了这三类用能特征下逐时的用能曲线。

Ren 等[50]对一栋 62 户的住宅的采暖温度设置和供暖系统运行情况进行监测，采用聚类分析和决策树的方法对人员使用行为模式进行分类，根据室内温度曲线分类出了 5 种住户，并分析了这 5 种住户对采暖系统的不同使用模式。

但是，这种采用实测案例结合数据挖掘来描述典型行为模式的方法，受限于实测的案例的样本数，也就难以说明获得模式的代表性，并且从表象的能耗数据出发，缺乏对人行为本身的描述，也就无法对行为本身进行分类。

丰晓航[51]从问卷调研数据得到定量化的人行为模拟参数，以各行为模式模拟

得到的采暖能耗作为指标，对大量行为模式做聚类分析得到若干个代表不同能耗水平的类别，以及这些类别在人群中的比例。这种以能耗作为不同行为模式分类标准的方法，为典型行为模式的提取提供了新的思路。

关于采暖空调使用行为模型，已有的研究中，从建立模型方法的角度可分为阈值模型、统计性模型、随机模型和数据挖掘模型四类。

Schweiker 等[52]对日本 320 户单人间的空调使用情况进行实测，采用 logistic 回归的方法，建立空调开启比率与平均室外空气温度的统计关联，并且结合人员的使用偏好和背景信息对模型进行拓展。

Haldi 和 Robinson[53]以拟合优度作为指标，挑选了行为的多种影响因素，建立了室内外环境条件，例如温度、湿度和风速等，和多种行为动作之间的回归模型，并利用时间离散马尔可夫链和生存分析方法对模型进行优化。Carmo 等[54]基于 139 户住宅的采暖能耗实测，采用聚类和回归分析方法，得到 high demand、medium demand、low demand 三种采暖使用模式。但是，数据挖掘方法需要以大量数据为基础，并且难以定量描述人行为本身，多用于空调系统的控制及优化。

Ahmadi-Karvigh[55]等对人员对住宅建筑室内设备（照明及家用电器）自动控制水平的偏好，结果显示人员对于不同设备具有不同程度的自动控制喜好。并且，偏好结果也和人员性格和人口统计参数相关。对于基于事件使用的设备及照明，人员偏好于更高程度的自动控制水平。对于改变设备使用时间来避开用能高峰的情况，人员更倾向于参与到控制中去。

关于采暖空调设定温度的研究中，Moon 等[56]沿用作息表的方式描述房间温度设定值的变化在不同气候区对采暖空调能耗的影响。Urban 等[57]通过从实测数据集中随机抽样生成人员时间表的方法，研究温度设定值对能耗的影响。Endravadan 等[58]则通过假设房间设定温度与室外温度满足标准中使用的热舒适关系，这种关系在本质上也是根据大量的样本分析获得的。简毅文等[59]通过对北京 42 户住宅空调使用的实测和调研发现，房间空调的开启温度为 29℃，而设定温度通常在 26℃，这类模型认为动作发生于温度等环境因素高于或者低于一定阈值的时候。

对于人员开关窗或调节遮阳的研究中，Nagy[60]等人发现常用的照明自动控制系统常常由于人员行为的干预而无法达到预期的运行效果或者导致节能效果出现反弹，因此设计了一套能够自动适应个人对光环境喜好的照明系统，能够在保证个人舒适的前提下自动调节光照度或者遮阳措施以减少能耗。

Yao 和 Zhao[61]对北京 19 户住宅开窗行为进行了 4 个季度的监测，研究人员开关窗模型以及其主要的影响因素，包括室内外空气状态、污染物浓度以及季节时间等。研究使用多元线性逻辑回归的方法建立了人员开窗预测模型，并指出室

外温度和二氧化碳浓度是影响人员开关窗的主要因素。

李翠等[62]人对某办公建筑遮阳使用情况进行实时监测，分析了人员对遮阳设施的调节行为。结果发现遮阳处于全遮挡或无遮挡状态为主，且遮阳状态与建筑朝向、季节及时间密切相关。潘嵩等[63]人对北京某办公建筑进行了开窗行为的长期监测，分析了影响开窗行为的关键因素包括了室内外温度，室外 $PM_{2.5}$浓度，时间段，窗户状态以及个人偏好等。

陈伟煌[64]对夏热冬冷地区的 5 间办公室人员开窗行为进行监测，并发放 944 份问卷，并对测试现场进行实测，使用二元 logistic 回归建立人员开窗行为模型，发现室内外温度是影响开窗行为的主要因素。

范瑞娟[65]对重庆某办公建筑人员开窗行为进行为期两个月的测试，发现在过渡季室外温度是影响开窗行为的主要因素，并建立了开窗行为的 logistic 模型，使用蒙特卡罗方法对模型进行模拟。

1.4 研究问题的提出

随着建模与模拟的不断发展和广泛使用，研究人员对现有能耗模拟软件的需求不再是简单的全年能耗值，而是需要其能适应更加多样的研究情景，包括需求响应，能效诊断等。这些新的应用情景给现有的能耗模拟软件提出了新的挑战，新的研究场景也往往要求模拟软件能够实现更短时间内更精确的能耗模拟。

分体式空调系统广泛应用于我国各类建筑中，能够对其的运行状况更加准确的描述对建筑节能具有十分重要的意义。同时，越来越多的研究人员意识到人员行为是影响建筑能耗的主要因素之一，也是给模拟结果与实测数据带来偏差的重要原因，因此如何在对人行为进行更加准确的刻画描述和模拟非常关键。尤其对于分散式空调系统而言，由于其末端更加灵活可调，室内人员对其调节带来的影响更加显著，因此在模拟中实现对人员行为的刻画十分必要。

本课题针对现有的一款广泛使用的能耗模拟软件（EnergyPlus）中对于分散式空调系统的模拟无法反映机组启停特性的缺陷以及并未考虑人员影响的问题，从人行为和软件自身空调模块出发，通过实验及调研，对模拟软件中分体机模块进行改进开发，并在模拟中加入人行为影响因素。

1.5 研究内容及技术路线

本节主要介绍本文的主要研究内容以及论文具体实现的技术路线。

1.5.1 研究内容

针对 EnergyPlus 中分体式空调系统模块存在不合理以及软件本身未考虑人员行为（本文主要关注人员对空调的调节行为以及人员在室情况）等问题，本文的主要研究内容如下：

第二章：人员在室率与空调使用行为调研

本章着重关注人行为对能耗影响的两个方面：人员对空调的调节以及人员的在室率。首先对本文人行为的研究范围进行了界定。回顾了常见的人员行为监测及预测方法，在充分考虑人行为监测的样本量以及事件独立性要求后，通过酒店客房的监测数据，研究全楼尺度上人员对空调设定点以及室内温度的偏好及概率分布，分析了人员的逐时在室率。

第三章：人员在室率与空调使用行为模拟

本章首先总结了常见人行为模拟方法，为体现出人行为的随机性及多样性特点，提出使用蒙特卡洛随机以及马尔可夫链的模拟方法，实现对人行为对空调调节行为以及在室率的模拟。

第四章：EnergyPlus 分散式空调模型改进

本章首先分析了 EnergyPlus 程序的调用逻辑和分体机模型。通过实验数据，分析分体机运行特性。针对 EnergyPlus 软件的分体机模型无法真实反映机组的启停运行的特点，使得模拟出的室内温度恒定的缺陷，对软件源代码进行修改，使之能够反映分体机的运行特性以及室内温度的波动，并将模型改进前后模拟数据进行对比分析。

第五章：分散式空调模拟案例

基于改进后的分体机模型，以及人行为模型（空调调节行为及在室率），对某间客房安装有分体机的酒店模型进行模拟，分析并对比改进前后分体机模型的能耗水平，以及室内温度的变化情况。

第六章：总结与展望

本章将对全文的主要工作以及结论进行陈述，并针对现有工作中存在的不足进行了分析和展望。

1.5.2 技术路线

根据上述研究内容确定本文的研究路线，如图 1-3 所示。

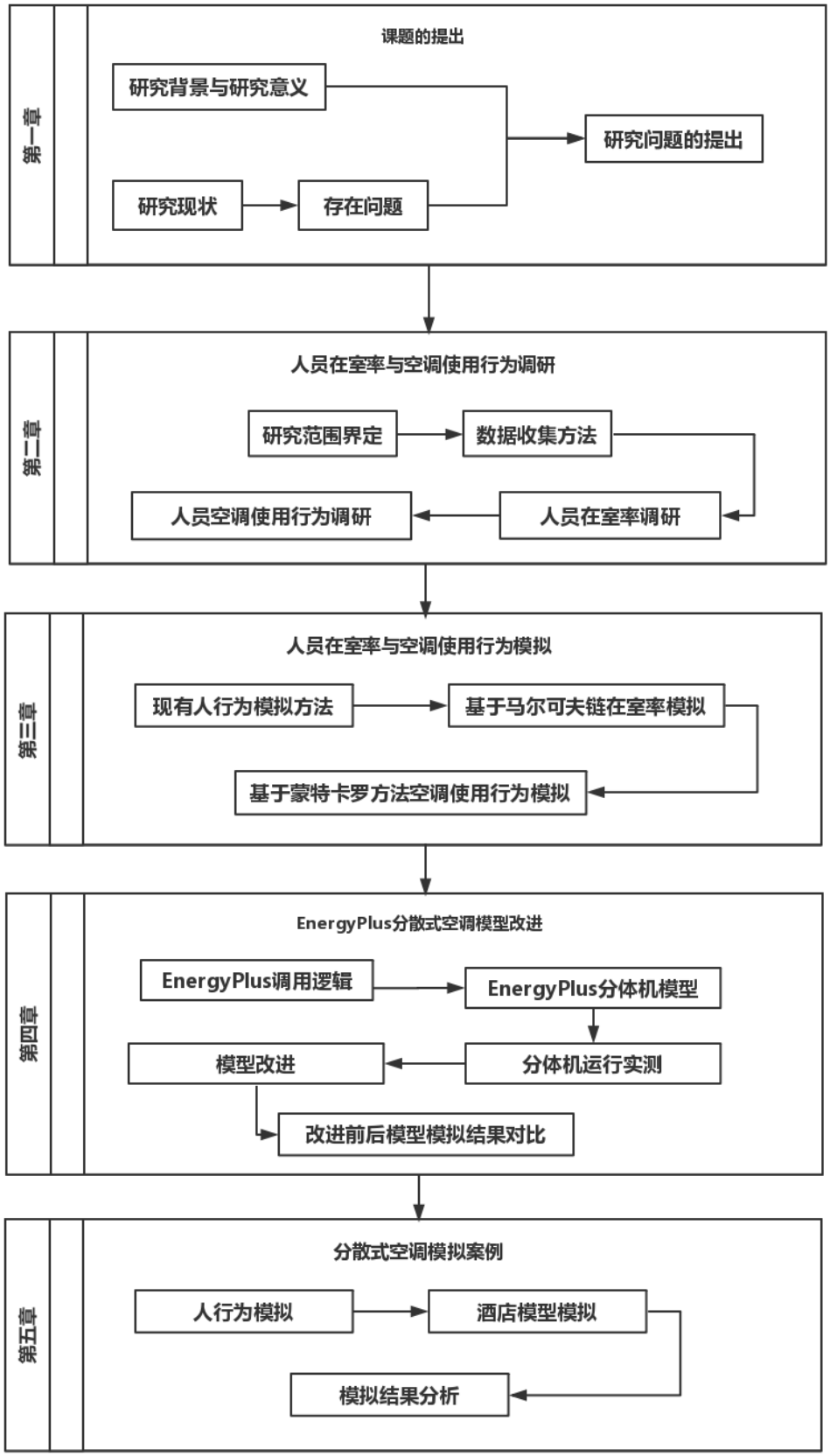
第一章
课题的提出
研究背景与研究意义
研究现状
存在问题
研究问题的提出
第二章
人员在室率与空调使用行为调研
研究范围界定
数据收集方法
人员空调使用行为调研
人员在室率调研
第三章
人员在室率与空调使用行为模拟
现有人行为模拟方法
基于马尔可夫链在室率模拟
基于蒙特卡罗方法空调使用行为模拟
第四章
EnergyPlus分散式空调模型改进
EnergyPlus调用逻辑
EnergyPlus分体机模型
模型改进
分体机运行实测
改进前后模型模拟结果对比
第五章
分散式空调模拟案例
人行为模拟
酒店模型模拟
模拟结果分析

图 1- 3 研究路线图

1.6 本章小结

本章首先介绍了本文研究的背景和意义。然后，对人行为模拟和分体机模型两方面内容进行了国内外研究现状的总结。针对主流模拟软件 EnergyPlus 中分体机模型存在不足以及无法对人行为进行模拟的缺陷，提出了本文的研究问题，并介绍了本文的研究内容和技术路线。

第 2 章 人员在室率与空调使用行为调研

2.1 人行为研究范围界定

首先，我们需要对本文的研究范围进行界定。由于人行为的研究涉及多个学科领域，包括社会学，心理学等。在不同研究领域，对人行为研究的关注点也不尽相同，比如心理学更加关注人员行为产生的内在驱动因素，社会学更加关注人与人之间的相互影响。而在能耗模拟领域，对人行为研究在于其是如何对建筑能耗产生影响的，更加关注人行为“是什么”而不是“为什么”。因此，在本文中我们仅关注人行为是什么样的，而不深究造成此种人行为的原因。在能耗模拟领域，研究者们着重关注人员的在室情况和动作对建筑系统能耗的影响。人员在室情况研究包括了人员是否在室、何时在室、有多少人、人员身份的识别，人员活动类型的判断等方面。而人员动作的研究又包括人员对外窗、遮阳、照明的控制和调节，人员对空调的开关和调节，人员对建筑内部其他设备的调节等等。

在上述的能耗模拟人行为研究范围里，本文着重关注人行为的在室情况中的人员是否在室以及人员对空调温度的调节行为。人员对建筑能耗的影响的前提是人要在建筑内，因此，对人员在室情况进行量化模拟时进行人行为模拟的重要部分。此外，空调的设定温度显著影响着空调系统的能耗，然而在模拟中，我们一般仅仅对供冷或供热工况分别设置一个固定的空调设定点，并没有考虑人行为对空调温度调节的行为。因此，研究人员对空调设定温度的调节和对其进行模拟变得十分必要。

此外，根据人行为模拟的最终目的，在对其进行模拟时，需要权衡可行性与准确性之间的平衡关系。在大多数情况下，并不要求对所有人行为的所有影响因素进行模拟。Melfi[66]认为在建立模型和进行模拟时需要考虑三个维度的分辨率要求：（1）时间分辨率（秒、分钟、小时、日或者年）；（2）空间分辨率（房间、热区、建筑或区域）；（3）人员分辨率（在室率、人员数量、人员身份、人员活动类型等）。

在本文的人行为研究中，主要着眼于全楼尺度的模拟，并不研究单个个体的行为或者单个房间的状态变化。因此，在人行为模拟中我们不考虑单个个体行为的驱动因素，仅考虑人员在室率以及空调设定温度在全楼尺度上的分布与特性。

根据上述研究范围的界定，本章及下一章将对全楼尺度的人员在室率以及人员对空调设定温度的调节行为进行模拟研究。本章将着重分析人员在室率及人员空调调节行为的调研数据。

2.2 人行为的数据收集方法

数据收集已经成为可持续建筑领域的前沿话题。通过对人行为数据的收集，可以对设计进行指导，为运行控制提供帮助，还可以作为人行为模拟的基础。人员行为的监测和数据获取是人行为研究的重要因素[67]。大量多样的传感器被应用在人行为的研究中，以探寻人员信息以及其与建筑环境的交互，包括：在室情况、动作、能耗等。同时，借助调研问卷来得到更为广泛的样本信息也是人行为数据收集的重要方法。随着数据收集技术的进步和传感器精度的提高，人行为的数据收集主要集中在以下几个方面：1）人员的在室情况和位移；2）热舒适；3）人员对窗户以及遮阳百叶的使用；4）人员对照明和设备的使用情况。这些数据为分析人行为在心理学、生理学及社会学方面的影响因素提供依据。本节将介绍在人行为数据收集中的案例实测和问卷调研方法及其各自的优势和弊端。

案例实测是在人行为监测中最常用也是发展非常成熟的一种方法。在案例实测中，人员行为、在室情况和环境参数都将被传感器记录。并使用监测到的数据建立人员行为和环境参数的概率模型。前沿的传感技术主要分为以下六类：图像分析，阈值与机械（threshold and mechanical），动作感应，无线信号，用能监测，基于人员交互（human-in-the-loop）[68]。由于人员的行为常常表现出随季节变化的特征，监测的时间段也根据需要研究的行为类型往往持续数月。监测的手段也根据所需监测行为分为直接监测和间接监测，例如用能数据或者开关窗数据可以直接通过传感器监测得到，而人员在室数据有时需要通过其他监测数据（如：二氧化碳浓度，动作等）间接分析得到。监测数据的维度也根据所研究行为需要从一维到多维。同样地，也有研究指出传感器的类型和放置位置也会对监测结果产生难以预见的影响。

人员在室情况的监测方法主要包括动作探测，二氧化碳浓度监测，图像监测，穿戴式传感器，移动终端信号分析和日记等。动作探测器是人员在室情况监测的最广泛使用的传感器，其类型主要有红外和超声波传感器，但是动作传感器难以判别静坐或静止不动的人员。其仍可作为准确的人员进入和离开的监测手段。同时，动作监测也可以和二氧化碳浓度监测、座椅压力传感或其他监测方法结合起来，综合多种监测数据进而判断人员在室与否。人员在房间内由于会呼出二氧化碳从而导致其浓度上升，故而产生使用二氧化碳浓度判断室内是否有人的方法，但是其探测往往存在滞后，导致人员在室情况在时间尺度上存在偏差。图像监测的方法相比于动作传感器更为准确，但是往往需要人工介入进行分析和处理，也有使用图像处理方法的研究，但此种方法也会造成计算量的增加。近年来，利用移动终端设备或者可穿戴设备对人员在室情况进行监测的手段逐渐增加，建筑内部的无线信号接收器可以根据接收到的移动终端信号判断人员距离和方位，从而

判断人员在室情况。此种手段的在人员在室情况的监测中具有广阔前景。

人员对外窗以及遮阳设施的操作一直以来都是人行为领域研究的热点，以便更好地进行采光遮阳的设计和控制。在监测人员行为的过程中，采样间隔和状态离散化程度（窗户全开，半开，全关）等因素都会影响最终模型的准确性。一部分学者[69]使用延时摄影（time-lapse photography）的方法，这种方法价格便宜非侵入式，但限于图像画面的分辨率，无法得到较为具体的人员行为参数，如百叶调节角度等。但随着图像处理技术的发展，此种监测方法将会有进一步的发展。除了图像监测外，各式各样的传感器（门磁或距离传感器）被用于外窗和遮阳调节行为的监测。此种方法能够实现更小时间粒度上的人员行为的监测和记录。但此种方法在研究中往往存在样本量不足的情况，远远小于图像分析和问卷能够得到的样本量。在部分研究中，手持式的传感器与图像监测方法或问卷相结合，从而克服了样本量不足的这一缺点。

在人行为的研究中，人员设备使用行为的研究囊括了对各种各样的建筑内部用能设备的使用和调节。设备用能的检测通常可以直接通过传感器检测得到。但是，由于设备种类繁多数量巨大，对单个设备使用进行监测成本太高，如何对总的设备用能进行分解，需要将能耗数据分解到多大的尺度都是需要进一步研究的。人员对于温控器的调节可以直接从温控器上的传感器和数据日志中读取到。高级的温控器已经可以实现数据的记录、存储和传输的功能。现有对温控器的使用和调节数据一般是通过问卷调研的形式得到，不能得到较为详细的统计模型。

人行为监测数据的收集方法的评价指标主要包括[70]：成本，部署区域，收集方式，用能方式，传感范围，精度，数据存储，传感器数据质量和部署水平。

问卷调研由于其能够收集大量的样本信息也是人行为数据获取的另一重要手段。在人行为研究中，问卷调研一般用于获取人员动作信息，触发因素，以及环境满意度中，从而能够定性或定量地对人行为进行描述和分析，找到人行为与环境因素，生理心理因素及社会因素（人与人之间）的关系[51]。问卷调研中样本量的确定，调研数据的存储和处理都是在问卷设计中为了避免产生偏差需要深入考虑的。研究表明，给予被调研人员一定的奖励，问卷的回复率将会保持在较高水平[71]。问卷调研同样存在其弊端，参与者是否能够真实地填写其行为？参与者能否准确回忆其行为？都是在问卷调研中存在的不确定因素。因此，在研究中通常需要结合实测来对问卷回复进行验证。

Hong 等人[67]在其论文中总结了研究人员开关窗、在室率监测和问卷、使用遮阳、照明、热舒适、插座负荷、空调调节等行为推荐的收集参数种类。此外，无论何种人行为数据获取方式都需要考虑在监测下人员行为是否发生改变以及人员隐私的问题。

值得注意的是，在人行为的调研中，我们往往需要通过对调研的样本进行分析，并对其中关键特征进行提取和量化，从而建立能够反应人员行为的典型模型。因此，在调研中，如何确定足够的样本量以保证对总体进行较为准确的描述和估计，是进行调研时需要考虑的主要问题之一。

从理论上来说，样本容量当然越大越好，但是随着样本量的增加也伴随着调研成本的增加。Boomsma[72]建议在结构方程模型（SEM）中样本容量最少大于 100，最好大于 200。Bentle 和 Chou[73]指出样本与每个被观测参数的比值要达到 5:1 的比例才能保证参数的估计值可信，至少 10:1 的比例才能保证显著性检验的有效性。Kline[74]提出在确定性参数分析中，N:q 的值要达到 10:1(每个估计参数要有 10 个观测值)甚至 20:1 才能认为结果是合理的。Jackson[75]认为使用极大似然法进行估计，数据连续且符合正态分布的结构方程模型时，可以使用 N:q 法则来大致确定所需样本，建议的比例为 20:1 也可以放宽到 10:1。因此，样本量与估计参数比例至少要高于 10:1，我们才认为结果是可信的。

同时，在人行为模拟中，我们常常使用概率模型对人行为进行描述。在概率统计中，要得到某一变量的分布规律，需要该变量在随机过程中任何时刻取值都为随机变量，且服从同一分布相互独立。因此，在调研中的各个事件也需要是独立同分布的，也就是说在人行为调研，特别是案例实测时，要想使用概率分布对人行为进行描述，要尽量选取单人房间，避免人员间的相互影响。

2.3 数据处理与结果分析

2.3.1 人员在室率

人员在室情况数据来源为某酒店客房监控系统。该酒店为位于上海市市中心的一四星级酒店，共 26 层，509 间客房，其中 266 间客房安装有智能监控系统，能够对房间内是否有人，人员类型，空调及风机设定状态及室内温度进行监测和记录。本文选取 2017 年 10 月 13 日至 19 日酒店监控系统的记录数据对人员在室率进行分析。

由于酒店常常存在客人离开后不拔出取电槽内房卡的情况，简单通过监控系统中房间取电卡槽内插卡情况及类型对客房内是否有人进行判断往往不够准确。因此，需要借助其他人行为监测手段对客房人员在室信息进行采集。考虑到酒店建筑私密性要求，人员在室率的数据收集采用案例实测方法中的动作探测。该酒店各间客房的各个房间（卧室，洗浴间，衣帽间等）吊顶内均有安装超声波动作探测器。超声波动作探测器工作时，探测器会发出并接收超声波。类似于多普勒

效应，通过声波发射和接收产生的偏差来判断是否存在动作。客房房门安装有门磁探测器来判断房门是否有开闭动作，每当门磁探测器监测到一次房门动作，客房内的声波动作探测器就会启动，对房间内动作进行监测，若某间客房内任一探测器判断出房间内存在动作，则判断房间内有人。

客房数据记录在数据库软件 MySQL 中，首先使用 SQL 查询语句将记录有人员在室信息的数据从数据库中导出，并且只保留插卡类型为客人卡以及房间无人的数据（如图 2-1）。

BuildName	FloorID	RoomName	MessageTy	MessageInfo	LogTime
某某客房06-10F	6	601	消息上传	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/13 21:37
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/13 21:54
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/13 22:55
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/13 23:56
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 0:57
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 1:59
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 3:00
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 4:01
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 5:02
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 6:04
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 7:05
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 8:06
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 9:07
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 10:08
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 11:10
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 12:11
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 13:12
某某客房06-10F	6	601	消息上传	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 13:41
某某客房06-10F	6	601	消息上传	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 13:53
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 14:13
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 15:15
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 16:16
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间有人,插卡类型为:客人卡	2016/10/14 17:20
某某客房06-10F	6	601	消息上传	房间无人	2016/10/14 17:35
某某客房06-10F	6	601	状态检测	房间无人	2016/10/14 18:22

图 2- 1 人员在室信息导出数据

通过编程对房间在室率数据进行处理，各个房间若记录时刻有人则记为 1，无人则记为 0。各个房间的第一条数据对应的状态则为房间初始状态，读取到此房间下一时刻的数据时，两条数据记录时间间隔内的房间在室状态等于上一条记录的在室情况。例如，某房间 15:00 记录为房间有人，17:15 记录为房间无人，则认为 15:00 到 17:15 之间，房间内有人。同时，将房间 15:00-16:00 在室率记录为 1，16:00-17:00 在室率记录为 0。17:00-18:00 在室率记录为 0.25。若某小时内有多次人员在室情况记录，数据处理方法同理，同一小时内在室率可以叠加。若某房间某天全天各个小时在室率求和为 0，则认为该房间未出租，剔除该房间数据。最后求出所有房间各个小时在室率的平均值，即为酒店逐时客房在室率。计算公式如式 2.1 及 2.2 所示：

$$单个房间(t) = \frac{t小时房间有人的总分钟数}{60\ 分钟} \quad （式 2.1）$$

$$所有房间(t) = \frac{\sum 单个房间(t)在室率}{总房间数 \times 记录天数} \quad （式 2.2）$$

最终生成酒店客房逐时在室率图表如图 2-2 所示。该图纵坐标表示在室率，横坐标表示各个小时。如 0:00 表示 0:00 到 1:00 该小时，并以此类推。从图中可以看出，酒店在室率在夜间基本趋于平稳，从早上 7 点开始直到上午 10 点，在室率出现明显下降，此阶段为酒店客人大量退房或离房的时间。中午 11 点到 12 点，客房在室率有所上升，此时间段应为有一部分新客人入住以及部分客人回房。从下午 1 点到 2 点再次出现在室率的明显下降，也是由于酒店客人大量退房导致。从下午 2 点到傍晚 6 点，在室率呈缓慢下降趋势，新入住客人在此时间段内逐渐离开房间。从傍晚 7 点开始，房间在室率明显上升，说明此阶段客人结束一天行程大量回到酒店内。

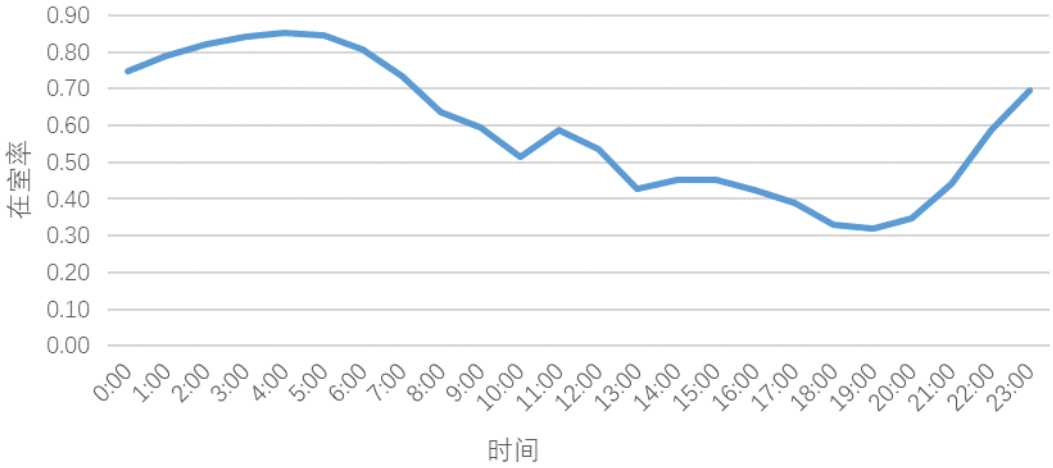

图 2- 2 酒店客房逐时在室率

图 2-2 中酒店客房的逐时在室率数据符合我们的普遍认知。同时，公建节能标准[76]中对宾馆建筑的逐时在室率给出了建议值，如图 2-3 所示。标准中的在室率是针对整个酒店建筑，该在室率的取值和变化规律也能一定程度地印证客房在室率数据的合理性。此外，鲜有研究统计酒店客房在室率数据，本研究中得出的酒店客房在室率数据在能耗模拟和酒店空调系统设计中都具有一定的应用价值和意义。

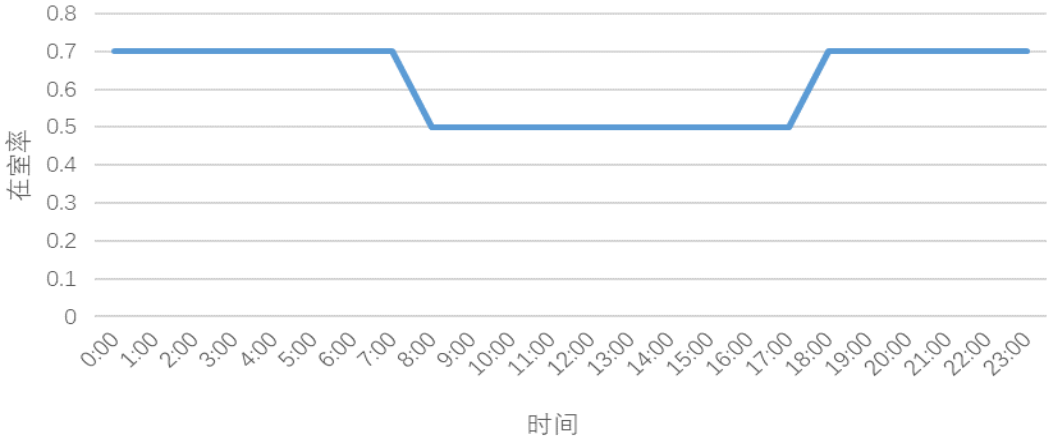

图 2- 3 公建节能标准建议宾馆建筑逐时在室率

2.3.2 人员空调使用行为

人员对温控器的调节行为属于人行为中可以直接通过温控器自带的传感器进行监测和记录的。由于部分高级酒店在人员离开房间后并不会关闭空调或将空调设定点调节到预先设定的保温温度，会导致人员重新回到房间后的对空调温控器调节行为发生变化甚至不做调节，因此选择客人离房后关闭空调的酒店作为人员对空调调节行为的数据来源。

人员对房间温控器的调节及室内温度记录数据来源于成都某四星级酒店。该酒店共有 395 间客房及套房，数据记录时间段为 2016 年 6 月 1 日至同年 9 月 30 日，故本文仅研究在制冷工况下，人员对温控器的调节行为。本研究期望得到人员对空调设定温度的概率分布，因此为保证概率分布事件的独立性，仅选取标准间（共 315 间）客房数据进行分析。同时，该酒店客房空调需要房间插卡槽内插入房卡时才能运行，因此选取温控器数据中空调处于制冷模式且风机开启的数据进行分析。在研究中，我们可以近似认为每间客房每天居住的客人均不相同，因此每间客房每天的数据可以视作一个样本。对于温度设定点概率分布而言，参数个数为温度设定点可取值个数，一般温控器可调节范围为 16-30℃，即为 15 个。若要取得统计学上有意义的数据，样本量最少需要 150 个（N:q=10:1），或者 300 个（N:q=20:1）。该酒店温控器调节数据的样本量远远超出样本量最低要求，因此可以认为得出的结果是可信的。

通过 C++编程逐条读取筛选出的酒店温控器记录数据，首先将数据按照房间号和日期进行排序，然后将有效的温控器温度调节数据写入文件。程序对某条记录判断其是否有效时的逻辑为：若相邻两条数据不属于同一房间或同一天，则认为第一条数据有效。若两条数据属于同一房间同一天记录，首先判断温度设定点

是否一致，若温度设定点相同，则往下读一条数据。若温度设定点不同，则根据调节时间间隔是否大于 5 分钟进行判断，若调节间隔大于 5 分钟则认为第一条数据为有效数据。此外，还需剔除数据中设定温度以及室内温度不合理的数据。最终得到，所有酒店客房在制冷工况下，人员对温控器设定温度的选择的分布如图 2- 4。

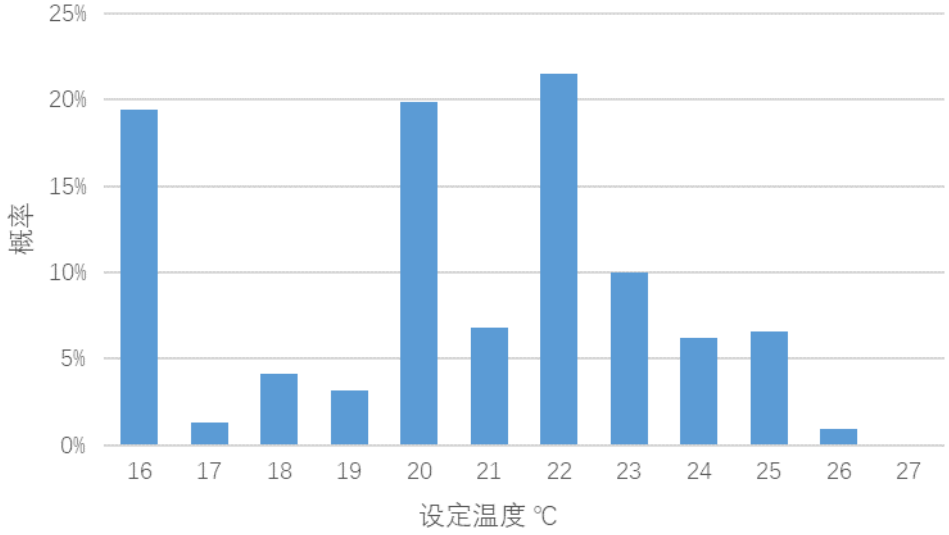

图 2- 4 人员对温控器设定温度选择

从图 2- 4 可以看出，酒店客房人员对温控器温度设定点的选择并不存在明显分布。在制冷工况下，客人倾向于将温度设定在较低值，如 16℃，20℃及 22℃。由于 22℃是温控器面板上的默认温度值，可以看出也有一大部分客人倾向于不对设定温度进行调节。同时，也有一部分客人将温度设定值调高。在模拟中，我们关注人员对温控器设定温度的调节是由于温控器设定温度改变将会影响室内气温随之波动，而真正影响能耗的是室内空气温度。因此，我们得到在制冷工况下，温控器调节时对应的室内温度分布情况，如图 2- 5 所示。需要注意的是，图中的室内温度是房间人员对温控器进行调节时的室内温度。人员通常在对室内温度不满意时才会对温度进行调节，因此该图是人员希望离开的室内温度的分布图。但由于图中的温度分布呈现出明显的对称性，我们可以认为在监测期间，离开某室内温度点的人数基本等于进入某室内温度点的人数。因此，该图也可以看作是室内人员对室温选择的温度分布。

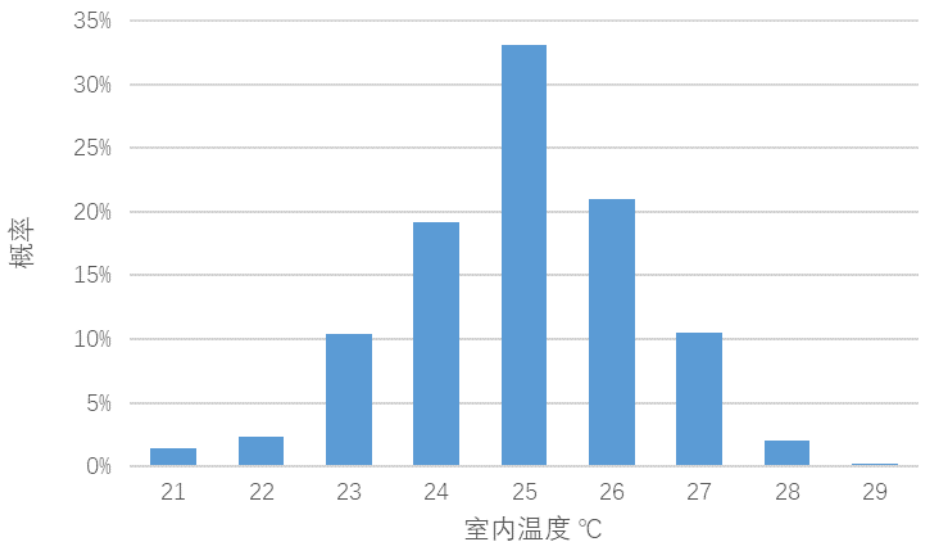

图 2- 5 人员对室温的选择分布

从图中可以看出，人员对室内温度的选择存在近似于正态分布的概率分布。超过 94%的人员对室内温度的喜好选择，集中在以 25℃为中心，正负 2℃（23-27℃）范围内。与图 2- 4 中人员对设定温度的选择不存在明显分布形成对比，人员对室温偏好存在明显的规律分布。两图对比可以发现，尽管人员倾向于将设定点调节至较低温度，但是人员偏向于选择高于设定点的室内温度。因而，我们可以推断出人员对温控器的调节行为反映出了人员对空调系统的实际运行情况的理解偏差。人们倾向于认为温度设置得越低，室温下降得越快，这一观点同样也被 Kempton 提出[77]过。并且人员对温控器的设定点选择存在明显的倾向性。此外，两者的差异也可能是人员对温度的认知与实际室温存在偏差所致。

2.4 本章小结

本章首先对全文的人行为研究范围作了界定，本文着眼于对全楼尺度的人员在室率以及人员对空调设定温度的调节行为进行模拟研究，并不研究单个个体的行为。本章着重对人员在室率及人员空调调节行为的调研数据进行了分析。人员在室率的数据通过案例实测方法中的动作探测进行获取，采用室内超声波动作探测器与门磁联合的方式对室内是否有人进行判断。并通过 C++编程将记录数据处理为逐时在室率并进行了分析。人员对空调的调节行为监测数据通过室内温控器自带传感器进行记录并上传到数据库中。同样地，通过 C++编程处理人员对温控器设定温度及室温的选择。结果发现，人员对设定温度的选择与对室内温度的选择存在明显偏差，人员对温控器设定温度的选择不存在明显分布，而对室温的选择具有明显规律分布。绝大多数人员对室内温度的选择集中在 23-27℃范围内。

第 3 章 人员在室率与空调使用行为模拟

3.1 现有人行为模拟方法

有了前文提及的多种多样的数据收集技术的帮助，其收集到的有用信息可以帮助我们进行人行为的模拟。由于人员行为的不确定性与多样性，我们在对其进行模拟时，需要对人行为进行一定的简化和抽象。如何在模拟时，既能够保留人行为的特点，能够较为准确的反应人行为的特征以及其对能耗的影响，又能以降低建立的复杂度，是人行为研究领域的重点之一。本节将回顾在人行为模拟中较常见的模型建立方法。

3.1.1 固定作息法

固定作息法是在现有的主流能耗模拟软件中对人行为进行描述的最常见的方法。对于能耗模拟而言，在模拟人员在室情况时，模拟人员需要在软件中设置模拟时间段室内人员的逐时在室状态及人数。至于人员动作，包括对外窗及遮阳的操作，对照明以及室内设备的控制，对空调启停以及温控器设定点的设置等，都需要模拟人员在对应设备的运行时间表中，事先输入逐时的设备运行状态信息，如设备和照明的逐时功率密度，温控器的设定温度等。固定作息中人行为相关参数的选取一般是根据相关规范、建筑设计参数以及模拟人员的经验进行选取，人员逐时的行为是事先确定的，根据模拟人员对时间表的设置，人行为相关参数周期性地进行循环反复。在固定作息法中，相同日期类型（周末，工作日，节日等）相同房间类型（办公室，会议室，住宅，商场等）的时间表一般是相同的。

采用固定作息法对人行为进行描述时，能够一定程度反映在全楼尺度的人行为随时间变化的特点，此种方法最为简单直观，同时在人行为模拟上也存在较大的局限性。固定作息法由于是模拟人员事先直接给定所有相关参数及设定值，无法反映现实中人行为的随机性；同时，由于各个动作设置参数都是分开设置的，除非模拟人员人为设置，也无法反映室内各设备运行状态与人员状态的关系。此外，固定作息是在全楼尺度上对全部室内人员行为进行刻画，无法反映单个人员的行为和人员的多样性。

3.1.2 统计分析法

统计分析的建模方法是根据收集到的人行为数据，建立人员行为与其他参数

（如：环境参数，能耗信息，时间等）之间的关系。在统计分析方法中，研究人员通常通过建立回归模型来研究人员某特定行为发生概率与相关输入参数的关系。同时，也有研究人员采用数据挖掘的方法直接根据监测数据对人行为进行预测。统计分析法较多用于对人员动作（如：开关窗，照明调节，空调调节）的模拟中，研究人员通过问卷调研或实测建立人员动作与周围环境参数的概率模型。比较常见的有阈值模型：觉得暗了开灯，觉得冷了开空调等；线性或多项式回归模型：灯具开关概率与室内照度之间的关系，外窗开启概率与室内环境参数之间关系等；更为常见的是 logistic 回归：空调开启概率与室内外环境参数的关系等。采用统计分析法，能够一定程度反映人员对于环境参数变化产生的反馈动作，同时也能够体现出人员动作的随机性。但是，用于统计回归或者数据挖掘的数据通常都是通过大量的问卷调研或者长时间的监测得到的，只能反映整体动作的规律，无法体现个体行为的差异。

3.1.3 随机模型

由于人员行为本身具有随机性的特点，使用随机模型对人行为进行描述和模拟不失为一种有效的手段。使用随机模型的研究中主要采用以下三种方法[35]：伯努利过程，马尔可夫链，生存分析。

伯努利过程：此种方法是随机模型中最简单的方法，在应用此种方法时，人员行为发生的概率和前一时间步长行为是否发生无关。这种随机方法较适用于全楼尺度的模拟，但是无法对个体的行为进行描述，同时也无法预测个体行为发生的时间。这种方法计算较为简便，适用于有效信息较少的设计阶段。

马尔可夫链：此种方法是随机模型中最为基础的方法，与上一种方法不同的是，在此种模型中，某时刻人员进行某动作的概率与上一时刻的状态相关。但此种方法不适用于人员较多的情况，因为需要对每个个体建立其各个时刻的概率转移矩阵，在人员数量上升时，计算量也随之快速增加。

生存分析：不同于其他模型对于动作发生概率的描述，此种方法关注于状态持续时间的概率。这种方法关注于人员某状态持续多久直到下一动作发生。例如，Lee 等人在期研究中假设人员在建筑内逗留的时间呈正态分布，模拟时可以通过随机的方法对单个个体在建筑停留的时间进行预测和模拟。

3.1.4 Agent-based 模型（ABM）

前文中提及的方法大多数都是针对单个个体，但是在实际生活中，人员行为其实是受到周围人员行为的影响的。因此，研究人员提出适用 Agent-based 模型来模拟人与人，人与环境之间的交互作用[78]。此种方法，通过定义个体单元（agent）的自身属性，行为的规则，记忆，决策等特点，对人员行为及人员之

间，人与环境间相互影响进行模拟和反映。此种方法能够直观且易懂地对于人员行为进行描述，但是如何定义人员行为的规则以及量化人与人之间相互影响的参数是此种方法应用的难点所在。

3.2 人员在室情况模拟

前文我们已经得到了酒店逐时的在室率数据，为了对各个房间的在室率进行建模从而反应人员在室和离开的状态变化的随机性，并且在整体上能够服从酒店在室率的变化规律，我们选用基于马尔可夫链的方法进行建模。

马尔科夫过程是随机过程中的一种，按照其状态和时间参数是连续还是离散的可以分为三类：

（1） 时间和状态都是离散的马尔可夫过程，称为马尔可夫链.

（2） 时间连续，状态离散的马尔可夫过程，称为连续时间的马尔可夫过程.

（3） 时间和状态都是连续的马尔可夫过程。

马尔可夫链的定义如下，假设马尔可夫过程$\{x_n, n \in T\}$的参数集 T 是离散时间的集合，即$T = \{0,1,2,\dots\}$其相应 Xn 可能取值的全体组成的状态空间是离散的状态集$I = \{i_0, i_1, i_2, \dots\}$。

若随机过程$\{x_n, n \in T\}$对于任意的非负整数$n \in T$和任意的i_0，$i_1, i_2, \dots i_{n+1} \in I$，其条件概率满足

$$P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_n = i_n\} = P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n\} \quad (3.1)$$

则称$\{x_n, n \in T\}$为马尔可夫链。其中条件概率$P\{X_{n+1} = j | X_n = i\}$是指系统在时刻 n 处于状态 i 条件下，在 n+1 时刻处于状态 j 的概率。因此将条件概率

$$p_{ij}(n) = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} \quad (3.2)$$

成为马尔可夫链$\{x_n, n \in T\}$在 n 时刻的一步转移概率，简称为转移概率。一般地，转移概率$p_{ij}(n)$不仅与状态 i, j 有关，而且与时刻 n 有关。若$p_{ij}(n)$不依赖与时刻 n 时，表示马尔可夫链具有平稳的转移概率。

由转移概率组成的矩阵称为一步转移矩阵，或转移矩阵。对于具有 m 种状态的马尔科夫链，其在 n 时刻的转移矩阵表示为

$$P_n = (p_{ij})_{m \times m} = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1(m-1)} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2(m-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{(m-1)1} & p_{(m-1)2} & \cdots & p_{(m-1)(m-1)} \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

对于该状态转移矩阵，具有以下性质

（1）所有元素非负，$p_{ij} \geq 0, i,j \in I$

（2）任一行元素之和为 1，$\sum_{j \in I} p_{ij} = 1, i \in I$

因此在任一时刻 n，可以根据当前的状态以及对应时刻的转移矩阵P_n，通过蒙特卡洛法进行随机模拟就可以预测出下一时刻的系统状态。因此，马尔可夫链的关键特性是由转移矩阵 P 所决定的。

运用马尔科夫链对人行为进行模拟时，通常是对某个人员个体的状态及状态的变化进行描述。也有研究人员使用此种方法对人行为的状态进行模拟。需要区别的是，前者的模拟对象是个体人员，转移矩阵一般通过基于动作的统计模型获得；后者的模拟对象可以是其他建筑部件（如：外窗，遮阳等），转移矩阵一般通过基于状态的统计模型获得。

Richardson 等人[79]在其研究中运用马尔可夫链蒙特卡洛方法，基于调研得到的大量的英国居民时间安排调查（Time-Use Survey，TUS）中的数据，对居住建筑人员在室率情况进行了 10 分钟步长的模拟。该模拟中，将建筑中在室人员数量作为人员在室的状态参数。Widen 和 Wackelgard[80]同样使用马尔可夫链方法对室内人员状态进行随机模拟，不同于 Richardson 将房间人员数量作为状态参数，他们将个体正在进行的活动作为状态参数，研究中共包含 9 种活动状态，包括离开，睡觉，做饭等，数据同样来源于居民时间安排调查。这两篇论文中，人员状态的转移矩阵都是通过统计数据回归得到的。

在本文中，模拟对象为每个房间，我们也将房间是否有人作为状态参数 I，通过监测得到的酒店人员在室情况数据，计算出逐时的状态转移矩阵，从而生成各个房间的逐时在室率时间表。具体方法如下：

要产生马尔可夫链，首先需要对初始状态进行设置。在前面的章节中，我们已经知道了全楼尺度的逐时在室率信息，起始时间为 0:00，则可以得到该小时的在室率，通过蒙特卡洛随机的方法就可以确定某个房间的初始状态。

由于需要产生逐时的时间表，且每小时的转移矩阵不相同，因此共需要计算 24 个转移矩阵。对于某个房间，共有 m 种可能存在的状态，从第 k 个时间步长到第 k+1 个时间步长，从状态 i 转移到状态 j 的个数$n_{ij}(\mathrm{k})$，以及在 k 时刻处于状态 i 的个数$n_i(\mathrm{k})$，其中：

$$n_i(\mathrm{k}) = \sum_{j=1}^{m} n_{ij}(\mathrm{k}) \tag{3.4}$$

那么第 k 个时间步长从状态 i 转移到状态 j 的转移概率为，

$$p_{ij}(\mathrm{k}) = \frac{n_{ij}(\mathrm{k})}{n_i(\mathrm{k})} \tag{3.5}$$

按照此种计算方法，可以计算得到每小时的转移概率以及转移矩阵。

得到了转移矩阵和初始状态，则可以随机生成逐时的马尔可夫链。每个计算时间步长都会随机产生一个在（0,1）上均匀分布的随机数，使用此随机数与状态转移矩阵中对应的转移概率进行比较，从而确定下一个时间步长的状态。如图 3-1 所示，若在 k 时刻处于状态 i，共有 m 种状态，产生一个随机数 U，则可以根据 U 的值与转移概率进行比较，从而确定 k+1 时刻的状态。

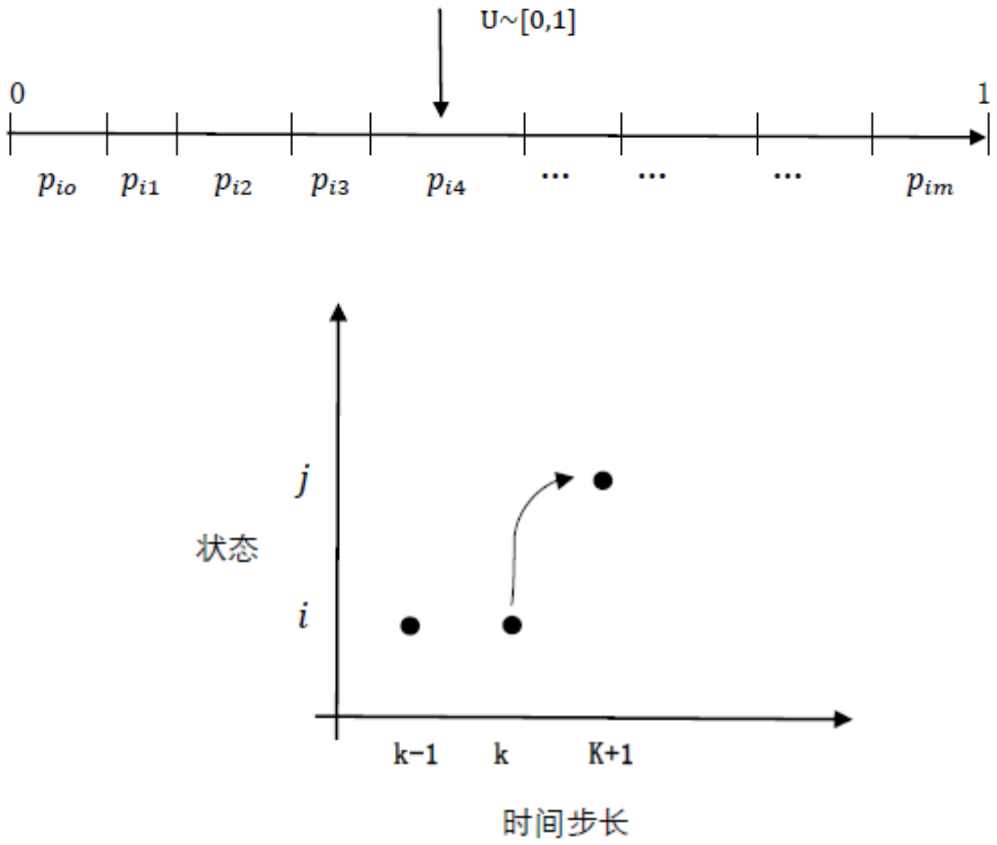

图 3- 1 在室率计算示意图

此外，我们假设室内其他负荷（照明以及设备）跟随房间在室率变化。也就是说，当房间有人时，照明和设备才会被使用，当房间无人时，照明和设备为关闭状态。由于缺少房间照明及设备的使用情况的数据，在模拟中，照明设备的功率密度设定值根据《公共建筑节能设计标准》[76]进行选取，默认时间表也根据标准中建议的宾馆建筑照明和设备使用时间表进行设置，实际的时间表跟随人员在室率变化，有人的时间内，照明和设备的使用系数取值和标准相同。标准中建议的时间表如表 3- 1 所示。

表 3- 1 房间照明及设备默认设置值

照明功率密度 (W/m^2)	7	
设备功率密度 (W/m^2)	15	
时间	照明使用比例（%）	设备使用比例（%）
1	10	0
2	10	0
3	10	0
4	10	0
5	10	0
6	10	0
7	30	0
8	30	0
9	30	0
10	30	0
11	30	0
12	30	0
13	30	0
14	30	0
15	50	0
16	50	0
17	60	0
18	90	80
19	90	80
20	90	80
21	90	80
22	80	80
23	10	0
24	10	0

因此，本文中基于马尔可夫链方法的人员在室率时间表生成方法如图 3- 2 所示。

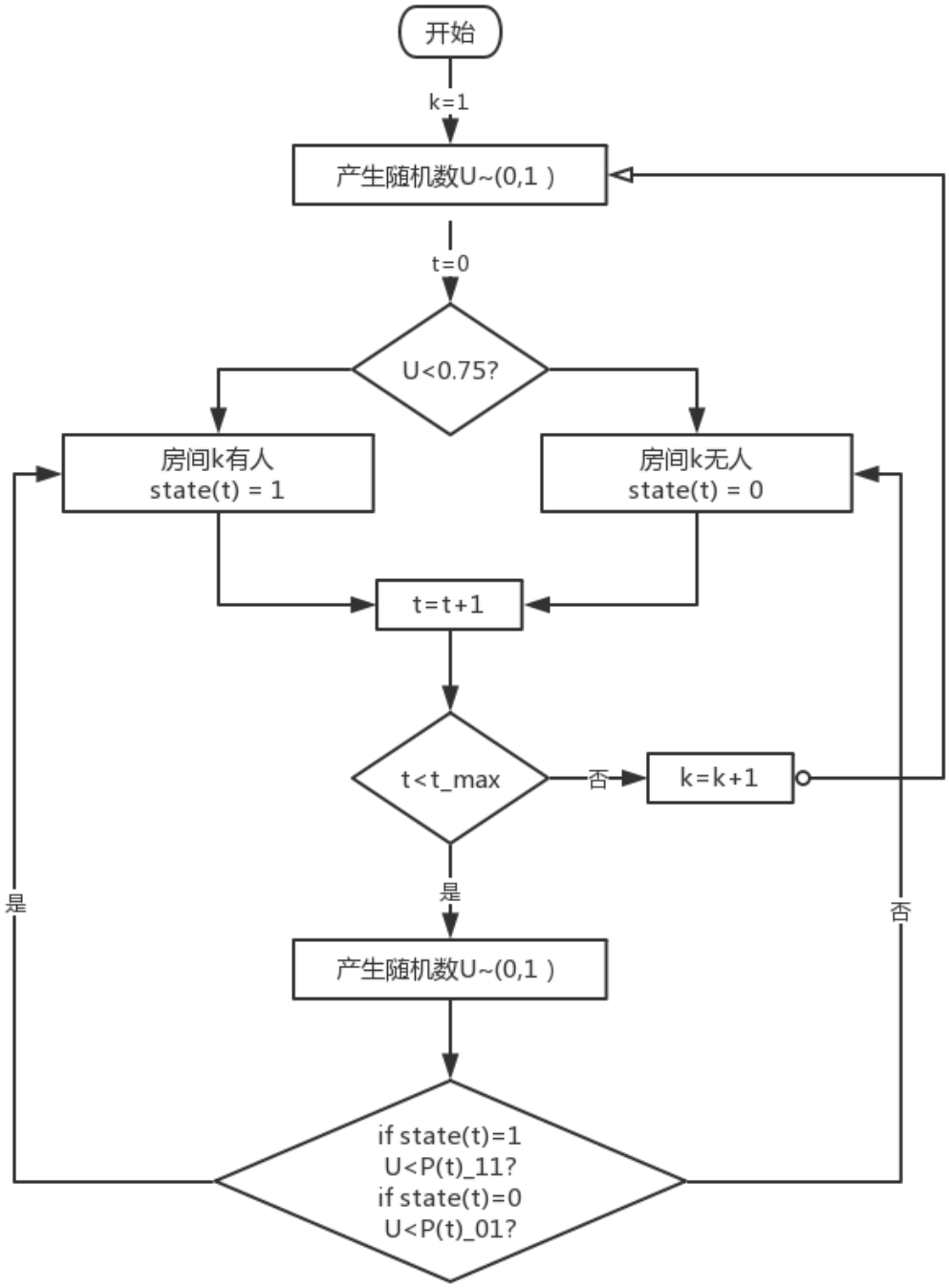

图 3- 2 人员在室率生成方法流程图

使用马尔可夫链生成各个房间逐时的在室率时，我们首先要对房间状态进行初始化。根据上一章节中得到的全楼客房的综合在室率信息，我们知道在初始时刻 0:00 时，所有客房的平均在室率为 0.75，也就是说在 100 间客房中有 75 间客房内有人。初始状态使用蒙特卡洛随机模拟的方法生成，对于某房间 i，生成一随机数 U(0,1)，若 U 值不超过 0.75，则认为此房间初始状态为有人，否则则认为房间初始状态为空。房间每小时在室率状态的转移矩阵可以根据式（3.5）

计算得到。由于需要生成逐时的在室率，因此需要计算出共计 24 个转移矩阵。房间状态有两种可能（有人，无人），因此每小时的转移矩阵大小为2×2。根据调研得到的在室率结果，计算得到每小时的人员在室状态的转移矩阵，具体结果见表 3- 2。

根据任一房间上一时刻 k 的状态，以及 k 到 k+1 时刻的转移矩阵，我们通过上文提及的蒙特卡洛随机的方法，产生一随机数 U(0,1)，并将 U 值与转移概率进行比较，从而确定 k+1 时刻的房间状态。不断循环此过程，直到生成指定时间段的各个房间的逐时在室率时间表。同时，根据各个房间的在室率时间表以及默认的逐时使用率时间表，可以得到各个房间逐时的照明及设备的使用率时间表。由此方法可以随机得到全楼尺度上任意个数房间的逐时在室率时间表以及照明设备使用率时间表。

表 3- 2 酒店房间在室率逐时转移矩阵

时间	K 时刻状态	K+1 时刻状态	
		无人	有人
0:00-1:00	无人	0.8360	0.1640
	有人	0.0052	0.9948
1:00-2:00	无人	0.8151	0.1849
	有人	0.0010	0.9990
2:00-3:00	无人	0.8986	0.1014
	有人	0.0019	0.9981
3:00-4:00	无人	0.9188	0.0812
	有人	0.0019	0.9981
4:00-5:00	无人	0.9727	0.0273
	有人	0.0166	0.9834
5:00-6:00	无人	0.9694	0.0306
	有人	0.0476	0.9524
6:00-7:00	无人	0.9502	0.0498
	有人	0.1014	0.8986
7:00-8:00	无人	0.8498	0.1502
	有人	0.2366	0.7634
8:00-9:00	无人	0.6448	0.3552
	有人	0.2320	0.7680
9:00-10:00	无人	0.7968	0.2032

	有人	0.2876	0.7124
10:00-11:00	无人	0.5774	0.4226
	有人	0.2179	0.7821
11:00-12:00	无人	0.7275	0.2725
	有人	0.3073	0.6927
12:00-13:00	无人	0.8514	0.1486
	有人	0.3338	0.6662
13:00-14:00	无人	0.7503	0.2497
	有人	0.2903	0.7097
14:00-15:00	无人	0.7773	0.2227
	有人	0.2758	0.7242
15:00-16:00	无人	0.8521	0.1479
	有人	0.2535	0.7465
16:00-17:00	无人	0.8464	0.1536
	有人	0.3257	0.6743
17:00-18:00	无人	0.9111	0.0889
	有人	0.3312	0.6688
18:00-19:00	无人	0.8913	0.1087
	有人	0.2604	0.7396
19:00-20:00	无人	0.8591	0.1409
	有人	0.2368	0.7632
20:00-21:00	无人	0.8028	0.1972
	有人	0.1253	0.8747
21:00-22:00	无人	0.7011	0.2989
	有人	0.0527	0.9473
22:00-23:00	无人	0.4180	0.5820
	有人	0.2390	0.7610
23:00-0:00	无人	0.2225	0.7775
	有人	0.2561	0.7439

3.3 人员空调使用行为模拟

在本研究中，人员对空调的调节行为采用蒙特卡洛随机的方法进行模拟，旨

在产生全楼尺度上，各个房间的制冷工况下温度设定点的时间表，使得各个时刻整个建筑内部各个房间的温度设定点符合前章节得到的概率分布。

由于我们已经得到了全楼尺度的室内温度概率分布，并且本研究着眼于全楼尺度的模拟，不考虑个体温度调节的影响因素，采用蒙特卡洛随机模拟的方法足够反映全楼尺度上的人行为的随机特点。使用蒙特卡洛随机模拟主要包括两部分内容：随机抽样和随机数的产生。

3.3.1 随机抽样

随机抽样方法是指从随机变量和随机过程服从的概率分布获得其样本值的数学方法。从随机抽样原理来分，随机抽样方法分为直接抽样方法，马尔可夫链蒙特卡洛方法和未知概率分布抽样方法。直接抽样方法用于完全一致概率分布，马尔可夫链蒙特卡洛方法用于已知概率分布，包括不完全已知概率分布和直接抽样方法失效的完全概率分布。由于我们已知了温度点的概率分布，故可采用直接抽样的办法来获取样本值。直接抽样的方法原理是从完全已知概率分布出发，利用均匀分布 U(0，1)的随机数，使用严格精确的数学方法，构造抽样算法，产生随机变量的样本值 X，使得样本具有独立同分布。使用直接抽样算法时，首先产生随机数数列，然后从中抽取随机数，使得满足概率累积分布函数 F(x)，一个合理的直接抽样算法应该满足：

$$P(x \le X) = F(X) \tag{3.6}$$

由于我们已知了室内温度点的概率分布，可以使用直接抽样的方法来求取样本值。本文选取直接抽样方法中的逆变换算法作为抽样算法。逆变换算法的原理是：随机变量 X 的概率分布函数为 f(x)，累积分布函数 F(x)是非降函数，则其逆函数定义为

$$F^{-1}(y) = \inf\{x \in [a,b]: F(x) \ge y, 0 \le y \le 1\} \tag{3.7}$$

逆变换算法首先是产生随机数 U，样本值就是累积分布函数的逆函数：

$$X = F^{-1}(U) \tag{3.8}$$

逆变换算法又根据概率密度函数分为离散分布逆变换算法和连续分布逆变换算法。

离散分布逆变换算法又根据随机变量分布情况分为等概率间隔算法和列表查找算法。如果离散随机变量呈均匀分布，其概率密度函数为：

$$f(x_k) = 1/(b-a) \tag{3.9}$$

如果密集点间隔相等，则样本值为：

$$X = a + [(b - a)U] \tag{3.10}$$

如果间隔不相等，为$\{a_1,a_2,\ldots a_n\}$,则先产生$i = [nU_1] + 1$, 样本值为：

$$X = U_2 a_i + [1 - U_2]a_{i+1} \tag{3.11}$$

如果离散随机变量呈非均匀分布，样本值可以根据下式求出：

$$X = \min\{x: U \le \sum_{k=1}^{k} f(x_k)\} \tag{3.12}$$

上式中，X 的值为满足右边不等式的最小的变量 x 的值。

若变量为连续分布，同理，可以得到其逆变换算法的样本值为：

$$X = \min\left\{x: U \le \int_{-\infty}^{x} f(y)dy\right\} = F^{-1}(U) \tag{3.13}$$

值得注意的是，对于连续分布的概率函数来说，要使用逆变换算法进行求解需要保证其累积分布函数和其对应的反函数都有显式的解析表达式，并且是能够求解反函数的。

3.3.2 随机数产生

由上文可以得知，要想得到逆变换算法解出的样本值 X，首先需要产生随机数 U。如何产生随机数也是在随机抽样中一直以来存在的挑战之一。

随机数定义为，从均匀分布 U(0,1)抽样得到的简单子样称为随机数，其概率密度函数为：

$$f(x) = 1, 0 \le x \le 1 \tag{3.14}$$

随机数用专门符号 U 表示，随机数序列（U_1，U_2，…U_n）具有独立同分布。

真随机数是借助于物理方法产生的，具有独立性和均匀性好的特点，不具有任何周期。但是要产生真随机数往往意味着随机数列的不可复现，也就是无法复算；同时，也需要大量的硬件成本和费用。

因此，研究人员通过数学方法构造出能够尽量接近真随机数特征的随机数，称为伪随机数。好的伪随机数产生器应该具有以下特点[81]：

（1） 能够通过严格的统计检验.

（2） 产生伪随机数的算法有坚实的数学理论支撑.

（3） 伪随机数序列可以重复产生.

（4） 速度快而且有效

（5） 周期长，至少有 10^{50}，如果问题需要 N 个随机数，周期需要 $2N^2$.

（6） 多流线产生

（7） 不产生 0 或 1 的伪随机数，避免零溢出或其他数值计算困难。

随机数产生器的数学结构分为如下 5 个部分：

（1） 定义伪随机数的状态空间 S，必须是有限域.

（2） 必须有初始状态 S_0，给定伪随机数的初始值.

（3） 包含一个转换函数 $S_t = f(S_{t-1})$, 一般是递推式，是数学结构的主体.

（4） 定义伪随机数的输出空间 U，通常是整数.

（5） 包含一个输出函数 $U = g(S_t)$, 把整数随机数变成（0,1）随机数。

重复上述（3）-（5）可以产生伪随机数数列。为了得到一个好的伪随机数产生器，产生好的数学结构，选择参数和初始值，都需要数学理论支持。

3.3.3 蒙特卡洛随机模拟

本文着眼于根据已知的温度概率分布使用蒙特卡罗随机的方法产生制冷工况下人员在室时的温度设定点时间表。由于本研究中的室内温度点的概率分布是一种离散概率分布，需要使用离散概率分布逆变换算法对样本值进行求解。根据拉依达准则，在正态分布中，σ代表标准差，μ为均值，数值落在$(\mu-\sigma,\mu+\sigma)$范围内的概率为 68.26%；数值落在$(\mu-2\sigma,\mu+2\sigma)$范围内的概率为 95.44%；数值落在$(\mu-3\sigma,\mu+3\sigma)$范围内的概率为 99.74%。由前文可知，室内温度概率分布的均值为 24.95℃，标准差为 1.36℃，我们选取$(\mu-2\sigma,\mu+2\sigma)$作为模拟范围，同时由于温度设定点只能取整的特点，本文在对温度设定点进行随机模拟时，只考虑 23-27℃的温度范围。各个温度设定点对应的概率为：

$$f(x)=\begin{cases}0.11, & x=23\\ 0.21, & x=24\\ 0.35, & x=25\\ 0.22, & x=26\\ 0.11, & x=27\end{cases} \tag{3.15}$$

因此，在每次随机抽样时，产生随机数 U，选择满足式（3.16）的最小样本值 X。例如，产生一个介于（0,1）的随机数 U，若 U 值不超过$\sum_{k=1}^{k} f(x_k)$，则样本值为满足此条件的最小变量取值。

$$X=F^{-1}(U)=\begin{cases}23, & 0<U\le f(23)=0.11\\ 24, & 0.11<U\le f(23)+f(24)=0.32\\ 25, & 0.32<U\le \sum_{k=23}^{25} f(x_k)=0.67\\ 26, & 0.67<U\le \sum_{k=23}^{26} f(x_k)=0.89\\ 27, & 0.67<U<1\end{cases} \tag{3.16}$$

随机数的产生使用 C++自带的随机数生成函数 rand()，该函数根据给定的种

子（seed）数值进行随机数的生成，使用 srand()函数对种子进行赋值，为了保证每次模拟产生的温度设定点时间表不同，在 srand()函数中指定当前系统时间作为随机数生成的种子。需要注意的是，C++官方网站[82]中提到，此种伪随机数产生的方法产生的伪随机数不完全是均匀分布的，较小数值的随机数产生的概率比较大数值的随机数产生概率略微高一些。对于对随机数分布均匀度较高的场合，可以选择更加适用的随机数发生器。

有了随机抽样和随机数生成的方法，人行为对空调调节行为的模拟方法如下图 3-3 所示。建筑内共有 n 个房间需要进行蒙特卡洛温度设定点随机模拟，从第一个房间（k=1）开始，读取当前房间一小时的在室率数据，若此房间在室率数据已读取结束，则从头读取下一个房间（k+1）的在室率数据；由于我们研究的情况是房间内有人空调才开启，无人时空调关闭，在制冷工况下室内温度设定点的值应该要跟随随机生成的人员在室率时间表，若某小时某房间内无人，此刻的空调应该处于关闭状态；若房间有人，才使用蒙特卡洛随机模拟的方法产生当前小时室内设定温度的值。因此，若当前房间读取到的在室率数据显示当前房间在该小时（t 小时）室内无人，则设置当前房间当前小时的室内空调设定温度为 40℃，也就是不开启空调；若显示当前小时房间内有人，则生成两个随机数，使用上文所述的逆变换抽样算法得到两个温度设定点的值，将这两个值设置为该小时内，每半小时的温度设定点。

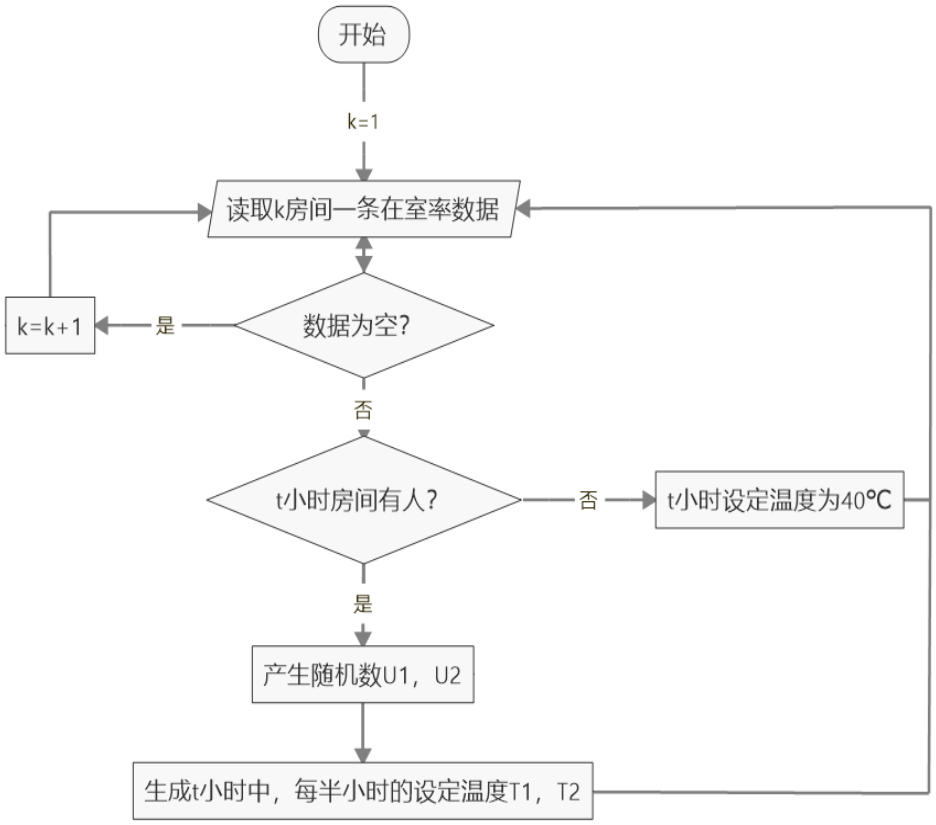

图 3- 3 人员空调调节行为模拟方法

由于本文人行为监测数据均来源于某特定建筑类型，因此前一章节与本章节处理的到人员在室情况模型以及人员的空调使用行为模型的应用范围需要进一步的界定。本文中得到的人员空调使用行为模型中，人员对设定点以及室内温度选择的概率分布适用于酒店客房人员拥有对客房温度进行独立调控的情况；此外，本文基于人员在房间空调就开启，人员离开空调就关闭的假设对房间温度设定点进行随机模拟，并未考虑人员开关空调的概率模型。同样地，由于在室情况监测数据来源的酒店中入住人员类型主要为商务或旅游，本文的人员在室情况模型更适用于具有相似客人类型的酒店建筑。由于监测数据的周期有限，无法针对不同季节或不同日期类型进行分析，本文得到的在室情况数据可供功能类似的酒店建筑客房在室率模拟参考。

3.4 本章小结

本章首先回顾了现有的人行为模拟的主要方法，主要分为固定作息法，统计分析法，随机模型法和 Agent-based 模型法。在对人员在室率的模拟中，本文选

用了马尔可夫链的方法，计算出房间一天 24 小时的逐时在室状态转移矩阵，通过蒙特卡洛方法对房间初始状态进行随机模拟，生成人员逐时的在室率情况，并假设房间内的照明和设备的使用率时间表跟随在室率时间表进行变化。在对人员空调调节行为进行模拟时，本文采用蒙特卡罗随机的方法对空调制冷温度设定点进行模拟，同样地，我们认为仅当房间内有人时空调才会开启，房间内无人时，空调处于关闭装态。因此，在生成空调制冷设定温度时间表时，当读取到该房间该小时有人时，我们才对设定温度进行每半小时一次的随机。随机温度的概率分布要服从前文计算得到设定范围的概率分布。

第 4 章 EnergyPlus 分散式空调模型改进

4.1 现有能耗模拟软件

建筑能耗分析软件可以协助建筑师和工程师在建筑设计或运行阶段对建筑负荷或者能耗进行计算，从而指导节能设计或改造。建筑能耗模拟软件可以分为简化能耗分析软件、逐时能耗模拟计算引擎、通用逐时能耗模拟软件、特定用途逐时能耗模拟软件以及在线逐时能耗模拟软件五类。简化的能耗分析工具一般使用简化的能耗计算的方法，如度日数法对建筑设计日、逐月或全年能耗进行计算，此种方法虽然较为简便快捷，但是精确度不高。逐时的能耗计算引擎一般没有用户界面或仅有简单的用户界面，用户通常需要自行编辑输入文件，输出文件也需要单独处理，包括 DOE-2,BLAST,EnergyPlus 等。更为通用的能耗模拟软件有较为成熟的用户界面，是在能耗计算引擎的基础上开发的，能够方便用户对输入输出文件进行处理，包括 DesignBuilder,eQuest,VisualDOE,Energy10 等。特定用途的能耗模拟软件是专门为某种系统或者某一类建筑设计的，例如 SST 用于模拟超市空调系统和冷冻系统；Retroficiency 用于模拟商业建筑的节能改造措施。在线的能耗模拟软件具有网页版的用户输入界面，也是在能耗模拟计算引擎的基础上进行开发的，通常输入和模型建立较为简单，例如 Home EnergySaver,RVSP 等。目前世界上较为流行的建筑全能耗分析软件主要有：HAP、TRACE、BLAST、DOE-2、Energy-10、EnergyPlus、TRNSYS、ESP-r、DeST 等。其中，EnergyPlus[83] 是由美国能源部和劳伦斯伯克利国家实验室共同开发的。在此之前由美国能源部资助的 DOE-2[84]和由美国国防部资助的 BLAST 是较为主流的模拟软件，它们的主要区别在于其负荷计算的原理，DOE-2 使用的是传递函数法，BLAST 采用热平衡法。EnergyPlus 吸取了两者的优点，同时也增加了许多新功能。

EnergyPlus 的出现很大程度和其父代程序 DOE-2 和 BLAST 存在明显的缺陷相关。尽管这两款软件仍在多种场合有应用，但是也逐渐显露出其年代久远的特征。两款程序都是使用较老版本的 FORTRAN 语言，其中一些语言特征在现有的编译器中已经过时。同时，两款软件的代码冗长混杂，逻辑模糊没有清晰的层次和模块，难以对程序进行维护、支持或者改进。此外，两款程序都没有对空调系统或者房间状态的反馈的处理。此外，随着 HVAC 领域新技术的快速出现和增长，要在已有能耗模拟软件中增加新的功能或系统时间成本和人力成本太高。因此，EnergyPlus 针对其父代程序的不足，做出了以下改进：

（1） 由于其父代程序代码冗杂，导致难以厘清程序中的信息流向。因此，

EnergyPlus 在开发之初的目标之一就是减少程序各部分之间的相互联结。程序的结构使用了“manager”的概念，使得程序由很多小部分（如：模块 modules）组成，程序结构类似于反向的树状结构。在 EnergyPlus 里，ManageSimulation 充当了程序总的“manager”的角色；该子程序控制着四个主要的模拟环路。此外，此子程序会设置全局标志来确定当前的模拟状态以供其他子程序和模块使用。通常来说，每个模块仅能通过其“manager”进行调用。开发者不用担心子程序间隐藏的联结。

（2） EnergyPlus 在程序结构上的改进主要是相较于父代程序，其具有面向对象和模块化的特点。因此，能够更加便于向其中增加新的特征和与其他程序连接。模块化带来的最大便利是，开发者可以同时对模块进行开发而不用相互干扰；同时，对开发者对于整个程序结构的了解要求并不太高。2014 年起，EnergyPlus 开始使用 C++对程序进行编译，并且将代码公布在开源项目管理平台 Github 上。

（3） 模块化使得 EnergyPlus 能够更加便于开发者加入新的模拟模块。这也意味着与其他程序建立连接也变得更加容易。由于 EnergyPlus 中包含了大量的模块，因此在其中加入与其他程序的连接将会有多种选择。图 4-1 显示了 EnergyPlus 是如何和其他软件进行连接的示意图。

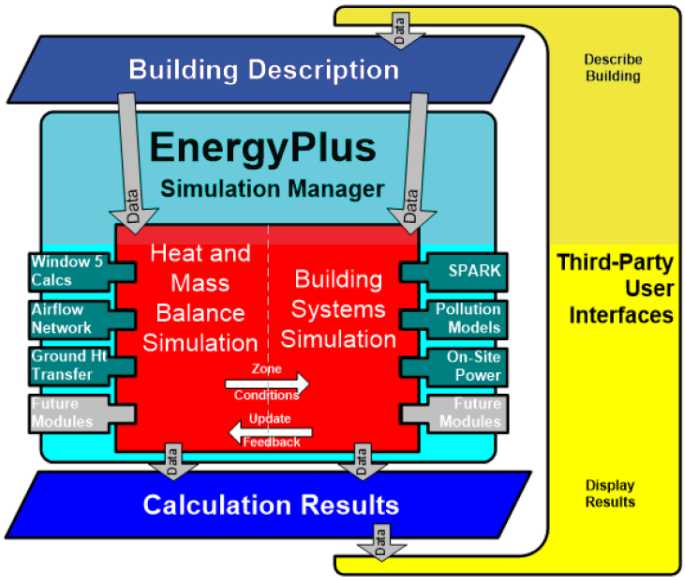

图 4- 1 EnergyPlus 外接软件示意图[85]

（4） 如图 4- 2 所示 EnergyPlus 采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法。在 BLAST 中，系统和设备侧的输出直接影响建筑的热响应而不是先计算负荷，再模拟系统和设备。在 EnergyPlus 中，这些部分是耦

合模拟的，能够做到更加精确的模拟出设备运行情况和室内热舒适。

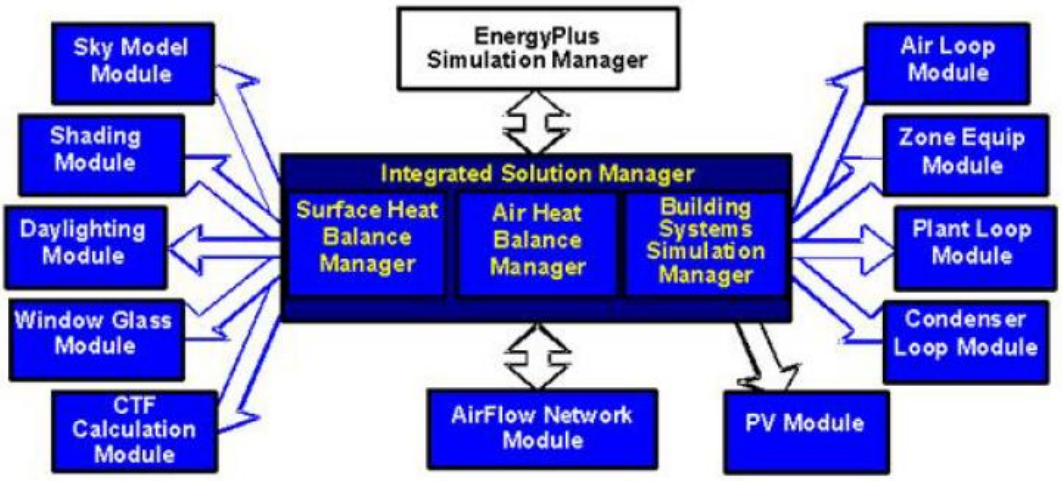

图 4- 2 EnergyPlus 集成求解方法示意图[86]

EnergyPlus 由于其强大的计算功能以及能够灵活地较为简便地增加模块或与外界程序连接在能耗模拟领域得到了广泛的关注和使用。同时，EnergyPlus 的应用范围也不仅仅限于能耗模拟，越来越多的研究人员将其用于需求响应或能效诊断[24-29, 34, 87]中去。通常的能耗模拟时间步长在 15 分钟到 1 小时，这些新兴的研究领域对更短时间步长的模拟精度提出了更高的要求。因此，需要其能够使用出更加真实更加符合设备特性的模块进行模拟计算。本章将针对 EnergyPlus 分体机模型存在的缺陷进行改进，使其能够更加贴近分体机运行时的特点，从而做到对能耗更加精细的刻画。

4.2 EnergyPlus 分体机模型

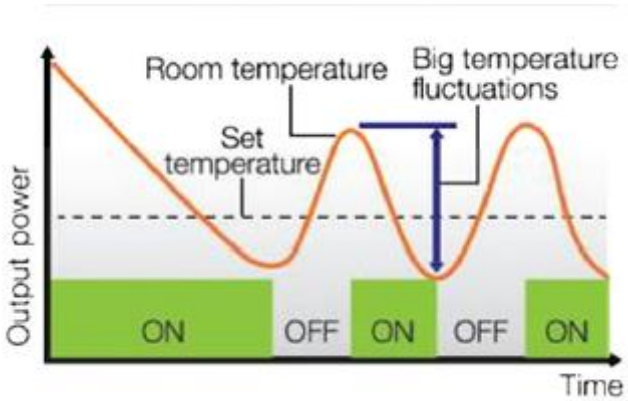

图 4- 3 分体空调运行及室温情况示意图[88]

在对 EnergyPlus 中现有分体机模型进行介绍之前，我们先要对定速分体机

的运行特性进行了解。如图 4-3 所示，定速分体机在工作时是间歇运行的；以制冷工况为例，当室温高于设定温度时，空调开始运行直到室温下降到设定点以下一定温度时（通常为 0.5℃或 1℃），空调停止运行。直到室内温度高出上限温度（一般为设定温度以上 0.5℃或 1℃）并且压缩机恢复平衡压力时，空调再次启动。如此周期性地启停间歇运行，因此也会造成室内温度随之在设定温度值上下波动。同时，对于定速分体空调，它在运行时是处于满功率运行，并不能对机组出力进行调节。

但在 EnergyPlus 的分体机模型中并没有体现出上述的分体机运行特点。下文将介绍其分体机模型。

EnergyPlus 中没有专门的分体机模块，通常是通过在单元机系统（Unitary System）中设置相应的冷热直膨盘管进行模拟。对于定速分体机我们选用单速直膨盘管作为盘管类型（Coil:Cooling:DX:SingleSpeed 和 Coil:Heating:DX:SingleSpeed），并且将室外新风量设置为 0。由于两种盘管能耗计算方法相似，下文主要介绍冷盘管的计算方法。

对于制冷的直膨盘管，用户必须输入额定工况下盘管的容量、显热比、空调制冷效率（COP）和空气流量。此外，用户必须输入五条在部分负荷时描述容量和效率的修正曲线，包括：温度对容量的修正，空气流量比对容量的修正，温度对 EIR 的修正，空气流量比对 EIR 的修正，部分负荷比（Part Load Fraction, PLF）与部分负荷率（Part Load Ratio, PLR）的关系。其中，温度修正曲线是进入盘管空气湿球温度和进入压缩机空气干球温度这两个温度的双二次曲线。空气流量比是指实际流量和额定流量的比值，修正曲线是流量比的二次或三次函数式。部分负荷比（PLF）也是部分负荷率（PLR）的二次或三次函数，该函数体现了压缩机循环工作造成效率损失。值得注意的是，在 EnergyPlus 模拟中，部分负荷率（PLR）一般是指显热负荷与稳态显热负荷的比值。部分负荷比（PLF）与部分负荷率（PLR）的计算式如下：

$$\mathrm{PLF} = \mathrm{a} + \mathrm{b}(\mathrm{PLR}) + \mathrm{c}(\mathrm{PLR})^2 \tag{4.1}$$

$$\mathrm{PLF} = \mathrm{a} + \mathrm{b}(\mathrm{PLR}) + \mathrm{c}(\mathrm{PLR})^2 + d(\mathrm{PLR})^3 \tag{4.2}$$

$$\mathrm{PLR} = \frac{sensible\ \ cooling\ \ load}{steadystate\ \ cooling\ \ capacity} \tag{4.3}$$

当部分负荷率为 1 时，部分负荷比也应该为 1。也就是说，如果压缩机在当前时间步长一直运行，将不会有效率损失。对于任一部分负荷率$0 \le \mathrm{PLR} \le 1$，如下规定：

$$\mathrm{PLF} \ge 0.7$$

$$\mathrm{PLF} \geq \mathrm{PLR}$$

盘管的运行时间系数（Runtime Fraction, RTF）定义为:

$$\mathrm{RTF} = \frac{PLR}{PLF} \tag{4.4}$$

因此，每个时间步长的能耗计算为：

$$\mathrm{Power} = (\dot{Q}_{total})(EIR)(RTF) \tag{4.5}$$

上式中，Power为每个时间步长的功率，$\dot{Q}_{total}$为修正后的容量，EIR为修正后的 EIR。我们一般理解的功率就冷量除以 COP，也就是上式中的前两项。而 EnergyPlus 中乘以了一个运行时间系数。由此可以得知，在 EnergyPlus 对分体空调进行模拟时，在每一个时间步长内，在盘管能够提供的冷量足够的前提下，室内的负荷刚好消除，室温稳定在设定温度值，机组运行时间就是时间步长与运行时间系数（RTF）的乘积。运行时间系数在一定程度上体现了定速分体机间歇运行的特点，但是在最终能耗与室温结果上机组的运行功率和室内空气温度都无法体现出定速分体空调的启停特性。

因此，本文针对 EnergyPlus 分体机模拟中所存在的不足进行改进，以期能够对分体空调运行特点以及其造成的室温波动进行更加贴近实际的刻画和模拟。

4.3 改进方法

想要对 EnergyPlus（简称 E+）中的分体机模型进行改进，首先需要了解 E+程序在运行时的调用逻辑，以确定在何处进行更改。

E+的调用结构类似于倒置的树状结构。顶层的块主要是对输入文件的处理（ProcessInput）和对模拟进程进行管理的程序“CEO”块（ManageSimulation）。在 ManageSimulation 中又主要分为了天气参数管理模块和热平衡管理模块。空调系统模拟的管理模块（ManageHVAC）属于热平衡管理模块下的子模块，如图 4-4 所示。

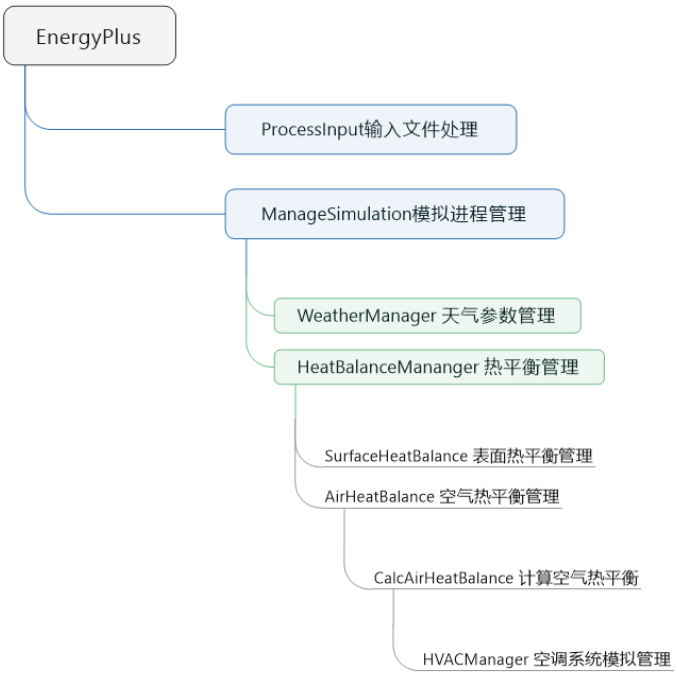

图 4- 4 EnergyPlus 顶层调用树结构

同样地，空调系统的管理模块也被分为数个模拟管理模块，包括：空气系统，房间设备，主机设备，电气设备等。在每一个时间步长内，空调系统管理模块中的子模块按顺序不断迭代重复模拟，直到每个模块的参数达到收敛。类似地，在空调系统管理模块的子模块中也包含有层层树状的调用模块。

如图 4-5 所示，程序运行后首先对输入参数进行处理，然后开始根据设计日参数对系统进行选型计算。在进入正式模拟之前，需要进行一段时间的“预热模拟”（warm-up）。由于如果在模拟正式开始前参数并没有收敛，会造成比较大的误差，尤其是模拟周期较短的情况，因此需要对模型进行一段时间的“预热”，在 E+中检验是否收敛的参数为热区的温度和负荷。在“预热”阶段，模拟周期的第一天会不断重复模拟，在重复次数不超过设定值的前提下，前后两天同一时刻的最高温度之差、最低温度之差、最大热负荷百分数差和最大冷负荷百分数差的数值小于收敛的阈值时，就认为模拟达到了收敛（见式（4.6）-式（4.9）），可以进入正式的模拟。

$$T_{day-1,max} - T_{day,max} < T_{tol} \tag{4.6}$$

$$T_{day-1,min} - T_{day,min} < T_{tol} \tag{4.7}$$

$$\frac{q_h - q_{h,prev}}{q_h} < q_{tol} \tag{4.8}$$

$$\frac{q_c - q_{c,prev}}{q_c} < q_{tol} \tag{4.9}$$

式中：

$T_{day-1,max}$为前一天最高温度；

$T_{day,max}$为当前天最高温度；

$T_{day-1,min}$为前一天最低温度；

$T_{day,min}$为当前天最低温度；

T_{tol}为温度收敛阈值；

q_h为当前天热负荷；

$q_{h,prev}$为前一天热负荷；

q_c为当前天冷负荷；

$q_{c,prev}$为前一天冷负荷；

q_{tol}为负荷收敛阈值。

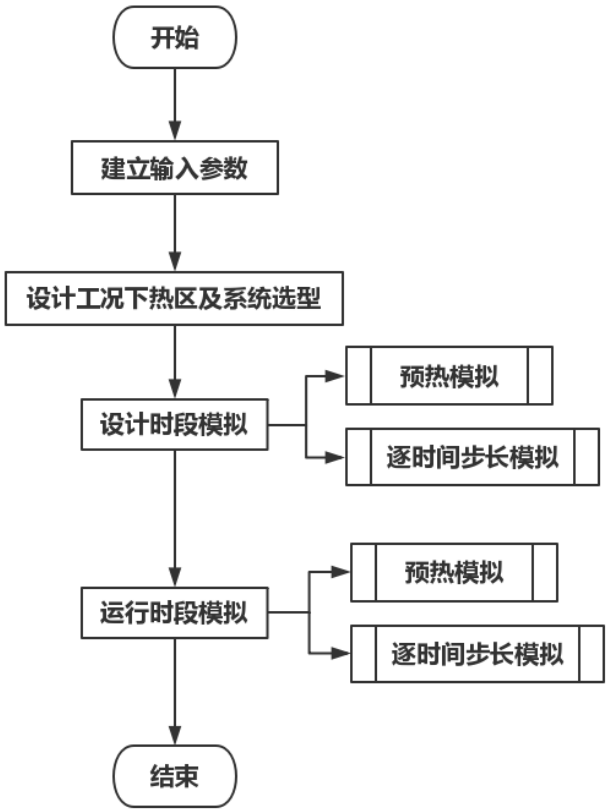

图 4- 5 E+程序流程图

如图 4- 6 所示，在对空调系统进行模拟时，首先对每个热区要达到设定点的冷热需求进行预测计算，然后根据计算出的显热和潜热负荷传递到建筑系统的

模拟模块中，然后依次对空气环路（空气和房间设备等），设备环路（包括盘管和主机等），冷凝环路（冷凝器，冷却塔等）进行模拟。此步骤需要不断迭代，保证系统各个节点的状态达到收敛，从而计算出当前时间步长建筑系统中各个设备的能耗。然后，根据系统能够提供的能量对热区的状态进行修正，计算出当前时间步长的房间内空气状态。

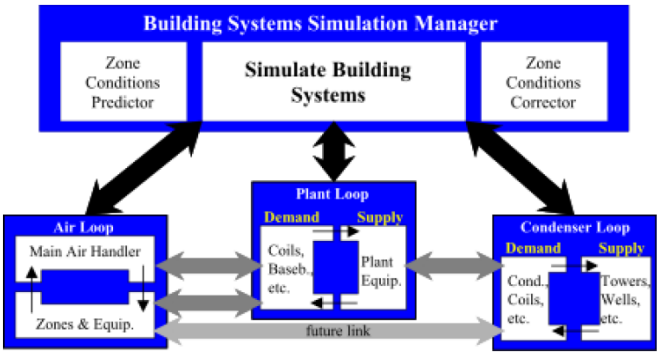

图 4- 6 EnergyPlus 空调系统模拟流程（HVAC Manager）[86]

由前文可以对 E+在运行时的程序流程和调用逻辑有大致的了解。由于分体空调属于房间设备（ZoneEquipment），所以在对建筑系统进行模拟时，将会在空气环路中（Air Loop）对其进行模拟，建筑系统中不存在主机环路和冷凝环路。因此，负责空调系统模拟的模块将会在每个时间步长调用房间设备模块，再由此模块对单元机系统进行调用，从而对分体空调进行模拟。通过上文可知，对于每个时间步长，直膨盘管模型在对其能耗进行计算时，乘以了每个时间步长内的运行时间系数，从而造成了室内温度稳定不波动，空调连续运行的情况。而运行时间系数是由当前时间步长的部分负荷率（PLR）决定的，而直膨盘管当前时间步长的部分负荷率（PLR）是在其上一级模块单元机系统模块（UnitarySystem）中进行计算的。在对此模型进行改进时，我们希望模拟结果能够体现分体机间歇运行以及其导致室温波动的特点，也就是说空调运行时，其部分负荷率 PLR 达到 1，当室内温度达到下限时，空调关闭，部分负荷率 PLR 等于 0。

因此，本文将在单元机系统模块中对计算系统部分负荷率的部分进行修改，使得空调系统能够实现间歇运行。本文选用 E+ V8.4 版本源码进行修改，源码从 GitHub 网站下载得到。并在 Linux 系统下使用 CLion 以及 GDB[89]对程序进行调试及生成。

如图 4- 7 所示，单元机系统模块中，包含多个调用函数，首先是从输入文件中读取单元机系统相关的输入参数，然后对系统进行初始化计算；接下来根据系统是依据负荷控制还是设定点控制调用不同的函数；在本文中，我们都是设置为根据室内设定点进行控制。接着，将会首先对系统中设置为自动选型的参数（包括：容量、流量等）进行选型计算，接下来将会计算出系统在当前时间步长的部

分负荷率，将该值传递到接下来的计算函数当中，该函数调用直膨盘管模块并且将部分负荷率传入。

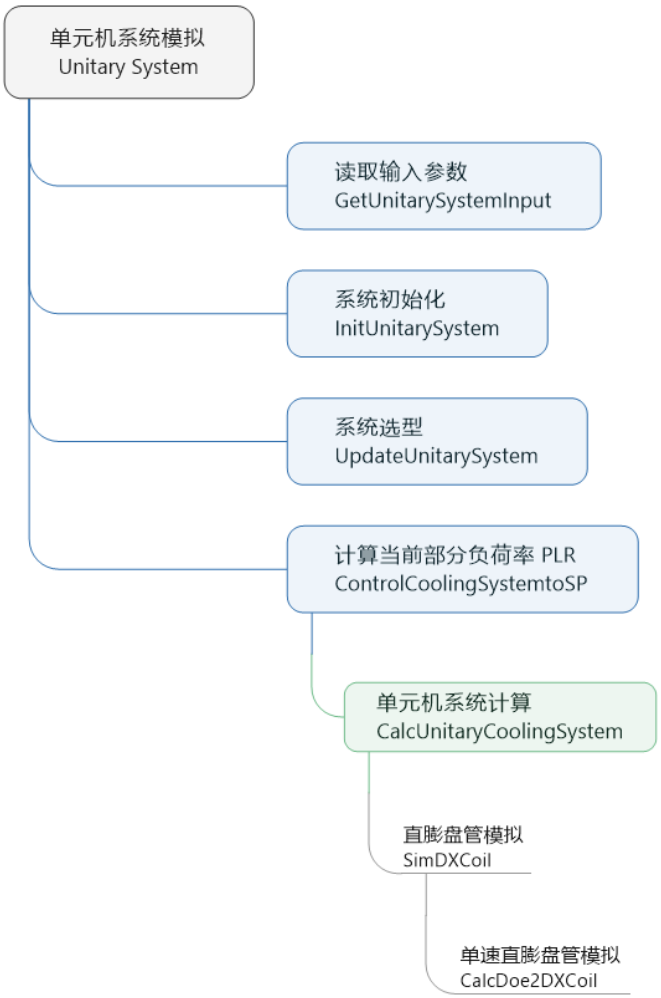

图 4- 7 EnergyPlus 单元机系统调用顺序

根据本文期望实现的模拟目标和上述的单元机系统模块中函数调用顺序，本文在部分负荷率计算之后，单元机系统计算函数之前，加入代码对当前计算出的部分负荷率进行判断，若部分负荷率大于某阈值时，空调系统满负荷运行，将当前部分负荷率设为 1；当部分负荷率小于该阈值时，空调系统关闭，将部分负荷率设为 0。此外，为了避免在预热模拟阶段由于空调启停运行，造成相邻两天同一时刻的参数收敛减慢，当处于预热模拟阶段时，不进入上述程序。此外，对于分体式空调而言，停机后需要等到高低压恢复平衡后才能再次启动。一般来说，空调停机后一分钟高低压基本能够恢复，由于空调不断启动停止造成的延时，通常为 3 分钟。因此，我们在模拟时将时间步长设置为 3 分钟，从而保证当分体空调停止运行后，需要间隔至少三分钟才会再次启动。另外，E+程序中有语句对前

后两个时间步长的热区温度差值进行判断，若前后两个时间步长室内温度差值超过 0.3℃，后一个时间步长的模拟步长减半再次进行模拟，如此重复，直到相邻时间步长的室内温度不超过 0.3℃为止。由于改进后的分体空调模型间歇性地启停，室内温度必然在设定点上下浮动，关机后室温上升，在一个时间步长内温度变化很可能大于 0.3℃，但是此温度波动是合理的。因此，对于分体式空调模型进行模拟时，不进行两个时间步长间的温差判断。修改部分的程序源码见附录 B。

4.4 模拟结果与分析

我们对某安装有定速空调的房间的空调运行情况及室内温度进行了监测。监测时间内，室内无人。房间外窗朝北，有两面外墙，一扇门。温湿度自计议放置在房间对角线中点，离地面 1.1 米高处。

室内温度使用德图温湿度记录仪进行自动记录并储存，该记录仪型号为 174H，测量范围为-20~+70℃，测量精度为 0.5℃，分辨率为 0.1℃，测量时间间隔设置为 1 分钟。空调功率采用新物科技的商用机智能插座进行测量，智能插座型号为 SP101B；并采用智能集中控制器对测量数据进行读取并保存到云端，控制器型号为 1000C，采样间隔为 1 分钟。分体机型号为格兰仕 KFR-26GW，制冷量为 2600W，标况制冷功率为 790W，能效比为 3.29。图 4-8 中显示了 7 月 23 日至 7 月 24 日的温度和功率监测数据，空调从 7 月 23 日 19:00 开启到 7 月 24 日 8:00 关闭。从图中可以看出，空调开启后室温迅速下降，但由于测试时间段气温非常高，即使没有太阳辐射的影响，建筑负荷依旧很大，空调开启后连续运行了较长时间才将室温降至设定点以下，此后空调间歇运行来维持室温在设定点上下波动。实测结果证实了前文所述的分体机运行特性和室温波动的特点，因此，我们将在本节建立模型，对比改进前后的分体机模型的模拟数据，检验其能够反映出此种特性。

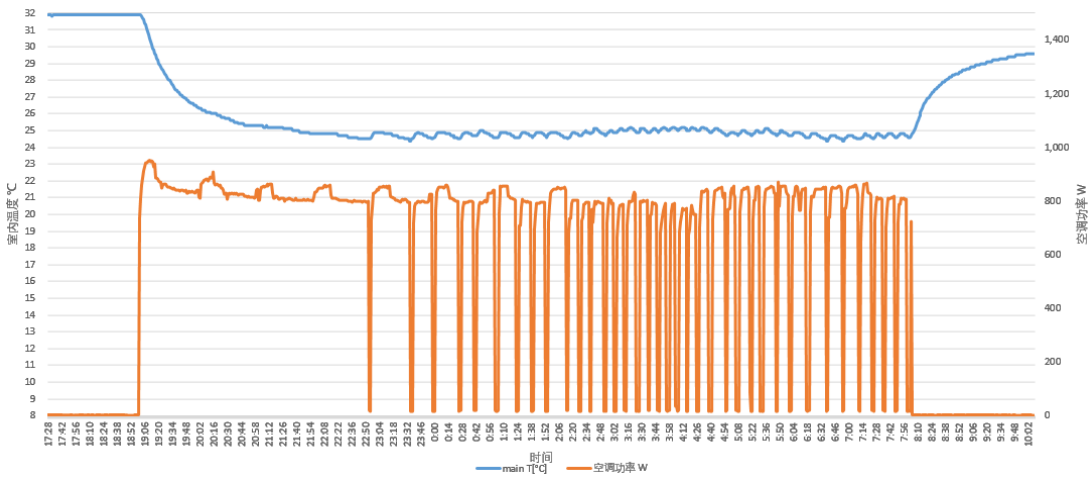

图 4- 8 房间温度及分体空调功率监测情况

本节内容将对上文提及的改进后的分体机模型进行模拟，检验其是否能够有效地体现出预期的模拟效果。因此，我们建立了单个房间模型进行模拟验证。如图图 4- 9（右）中所示，星号标注的房间为模拟中关注的各个朝向的单个房间，这四个房间除一面外墙外，其余面都与相邻房间连接，在模拟时所有房间温度设置相同，可以近似的把内墙视为绝热。

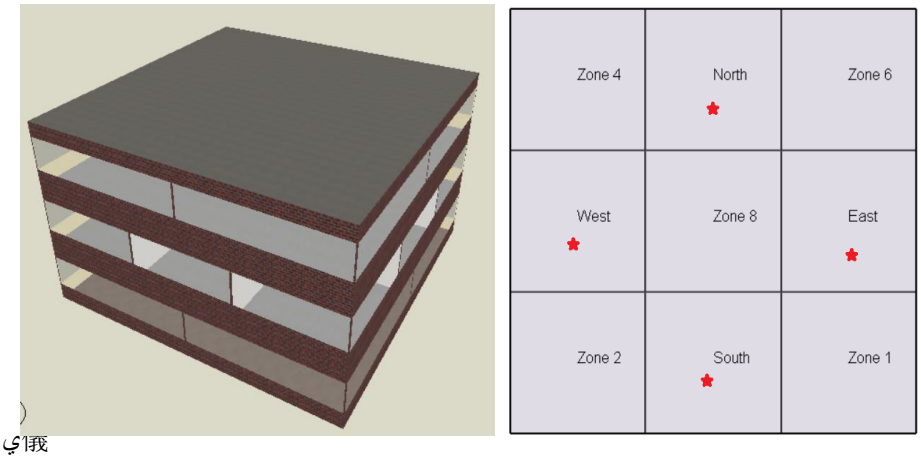

图 4- 9 模型 3D 图（左）及模型平面图（右）

建筑类型选为办公建筑，模型参数围护结构参数及室内照明设备等负荷设置根据《公共建筑节能设计规范》进行选取。主要设计参数见表 4- 1，时间表如图 4- 10。

表 4- 1 模型主要输入参数

房间面积	25 m2
窗墙比	0.5
层高	3m

围护结构部位	传热系数 K[W/(m2·K)]	
屋顶	0.5	
外墙	0.8	
外窗	传热系数 K[W/（m2·K）]	1.96
	可见光透射系数 VT	0.74
	太阳得热系数 SHGC	0.69

夏季		冬季	
温度（℃）	相对湿度（%）	温度（℃）	相对湿度（%）
25	40~60	20	≥30

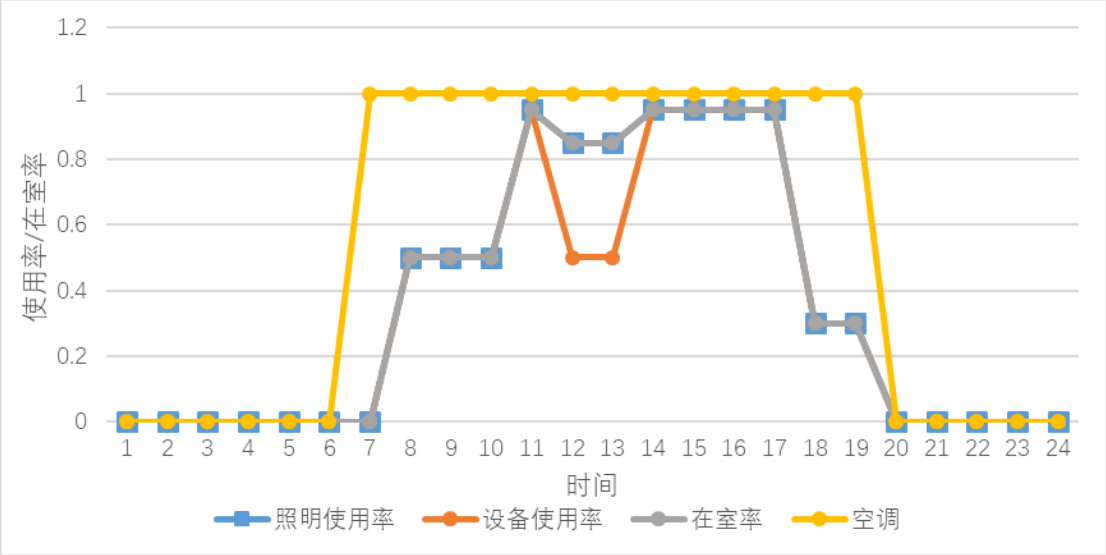

图 4- 10 模型时间表

对上述模型各个房间建立分体空调模型并分别在 EnergyPlus 原有分体机模型及改进后的分体机模型上进行模拟。各朝向房间均建立一个单元机系统，系统主要由风机和单速冷热直膨盘管组成。对于制冷的直膨盘管其制冷效率（COP）为 3。盘管额定冷量，显热比（SHR）以及额定流量均由软件进行自动选型。盘管设置为空气冷却型，盘管容量及 EIR 的修正曲线使用 EnergyPlus 中自带修正曲线，室外新风量设置为 0。风机设置为简单的定速风机并且跟随空调压缩机运行情况而启停。

E+原有模型的模拟结果结果如图 4- 11 至图 4- 14 所示。图中显示了四个朝向间房间在设计日（7 月 15 日）的空调部分负荷率以及室内温度情况。从图中可以看出，从空调开启之后，室温基本都可以维持在设定温度 25℃，空调部分负荷率除开机后保持了短暂时间的满负荷运行外，其余时间部分负荷率都在 1 以下。

北面和南面房间的空调部分负荷率在上午 8 点到 11 点和下午 13 点到 17 点

均保持较高数值，室温会略微上升，主要是由于这两个时段负荷较大所致，上午太阳辐射造成大量冷负荷；由于太阳负荷和建筑蓄热对负荷产生的延迟作用，导致下午的高部分负荷率。东面房间的负荷主要集中在上午，从图中可以看出开机后东面房间的机组负荷率较长时间都保持在较大范围，室内温度下降也明显慢于其他房间，这是由于上午太阳辐射直射东面房间造成的。对于西面房间，由于其在早晨开机后受太阳负荷影响小，上午的空调部分负荷率保持在较低水平，同时室温也快速降低至设定温度；而下午 2 点开始空调部分负荷率逐渐上升，直到下午 5 点左右出现明显的突降，这也是由于下午开始西面房间逐渐受到太阳直射导致室内负荷快速增加所致。所有房间 5 点后部分负荷率的突降主要都是由于太阳辐射消失造成的。图中的结果虽然能从总体上反映出机组运行情况，室内负荷在一天内的变化情况，但是无法体现出分体空调在运行时的启停特性和室内温度波动的特点。

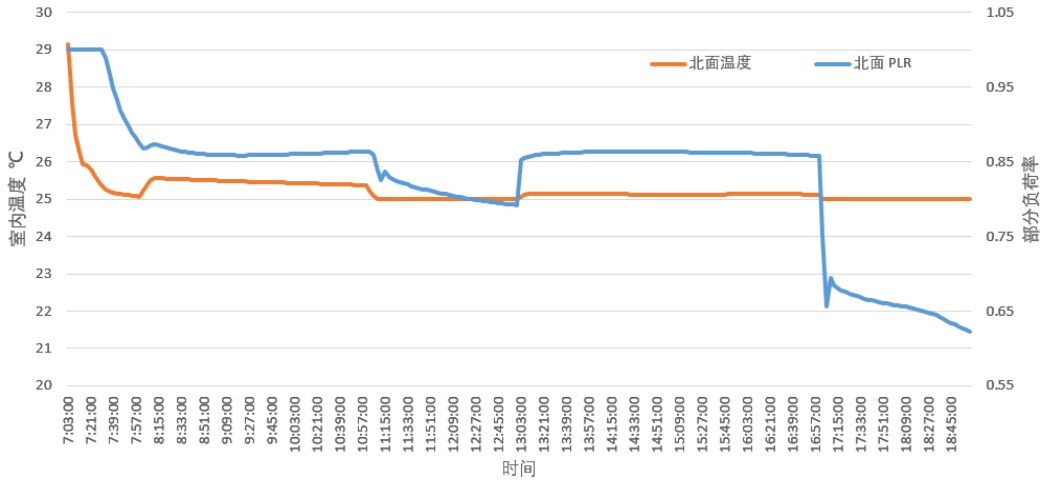

图 4- 11 EnergyPlus 原有分体机模型北面房间设计日模拟结果

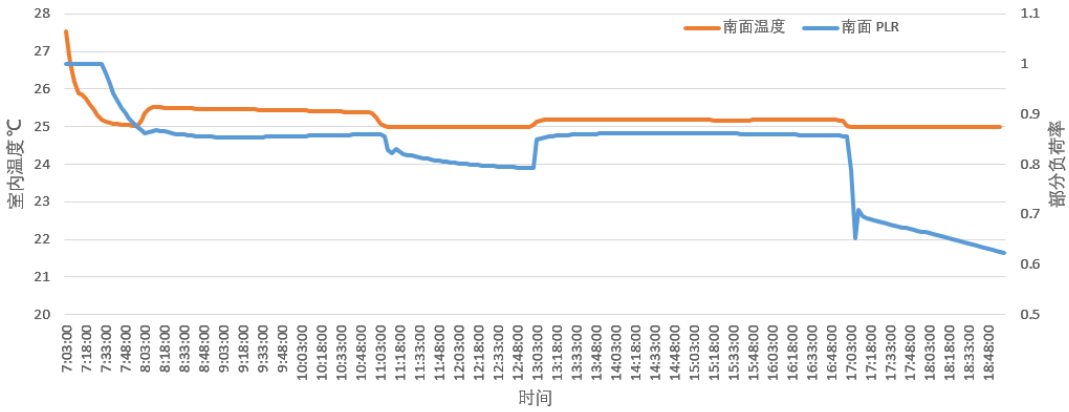

图 4- 12 EnergyPlus 原有分体机模型南面房间设计日模拟结果

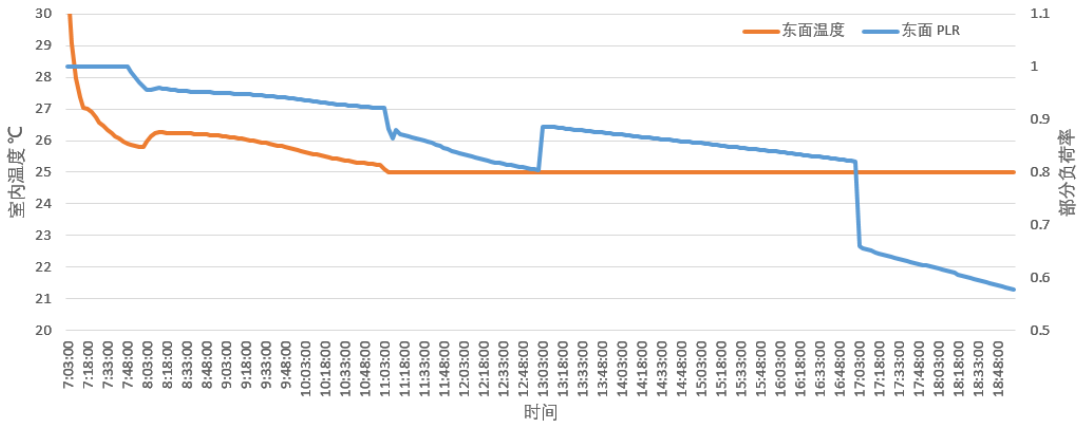

图 4- 13 EnergyPlus 原有分体机模型东面房间设计日模拟结果

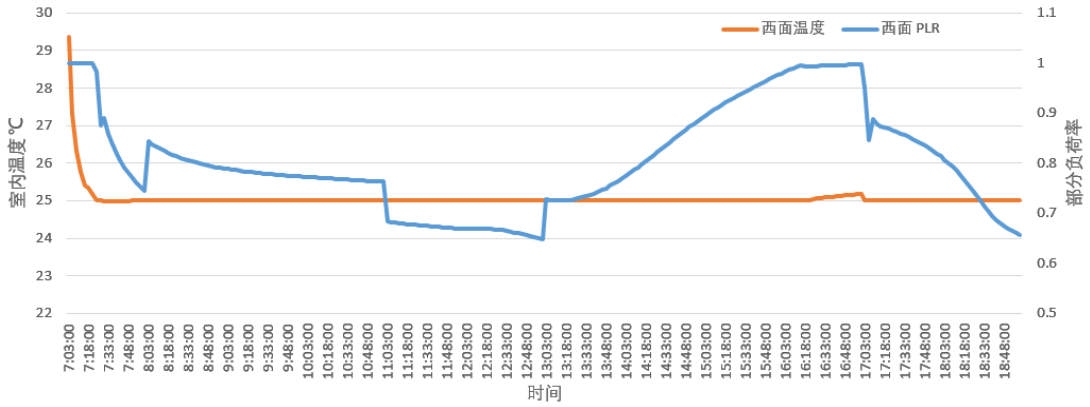

图 4- 14 EnergyPlus 原有分体机模型西面房间设计日模拟结果

改进后的分体机模型的模拟结果结果如图 4- 15 至图 4- 18 所示。图中显示了同样的四个朝向间房间在设计日（7 月 15 日）的空调部分负荷率以及室内温度情况。从图中可以看出，空调开启之后，室内温度快速下降，然后在设定温度上下波动。空调开启后，机组部分负荷率在机组运行时为 1，在机组停机时为 0。从图中可以看出，随着空调的不断启停运行，室内温度也随之上下波动。

类似地，从图中我们可以看出在室内负荷较大时，空调开启时间长，图中的部分负荷率曲线就显得“宽”，当室内负荷较小时，空调更为频繁的启停，部分负荷率曲线显得“窄”。同样地，当室内负荷较大时，空调一旦关闭，室温上升幅度明显高于负荷较小的时段。对于北面和南面房间，上午和下午负荷较大的时段，空调每次运行的时间都较长，空调关闭后，室温上升较快。其他负荷较小的时段，空调每次连续运行时间较短，室温波动也较小。东向房间上午负荷较大，空调一直保持连续运行，直到室温下降到低于设定温度近 1 摄氏度时，机组关闭，然后同样地不断启停运行。对于西面房间，其负荷主要集中于下午时段，从图中可以看出，在下午负荷较大时，空调保持连续运行，但从 2 点半到 5 点之间，空

调出力略小于负荷，造成室内温度上升至略高于设定温度。其余时间段，空调也是反复启停使得室温在设定点附近波动。

通过改进前后的模拟结果可以看出，原有的分体机模型能够在较长时间尺度上一定程度地反映出分体机运行的情况，例如，我们通过其每小时的运行时间系数（Runtime Fraction）可以大致了解，在这一小时中，空调有多少时间是处于运行状态的，有多少时间是关闭的。但是，当时间步长较小时，其对分体空调运行特性的描述并不够准确。改进后的模型能够很好地反映出分体机运行时的启停特性，当机组运行时部分负荷率就为 1，关闭时，部分负荷率为 0。随着机组的不断开启和停止，室内温度也随之在设定点上下不断波动。

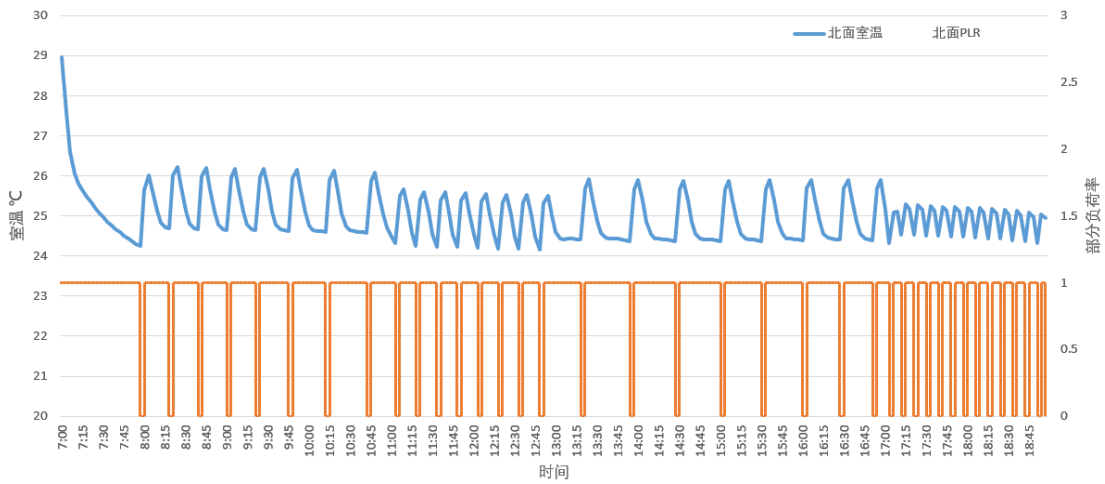

图 4- 15 改进后分体机模型北面房间设计日模拟结果

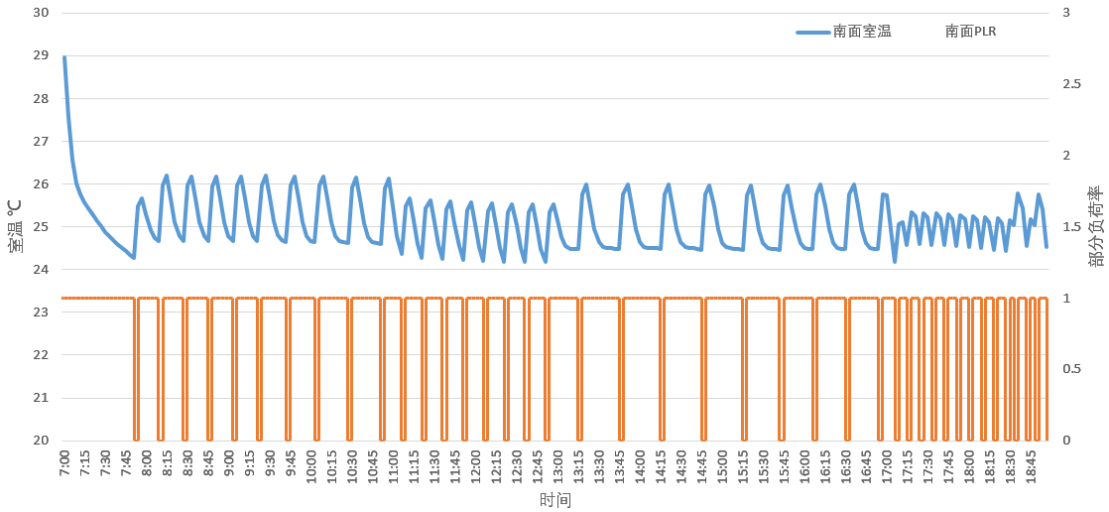

图 4- 16 改进后分体机模型南面房间设计日模拟结果

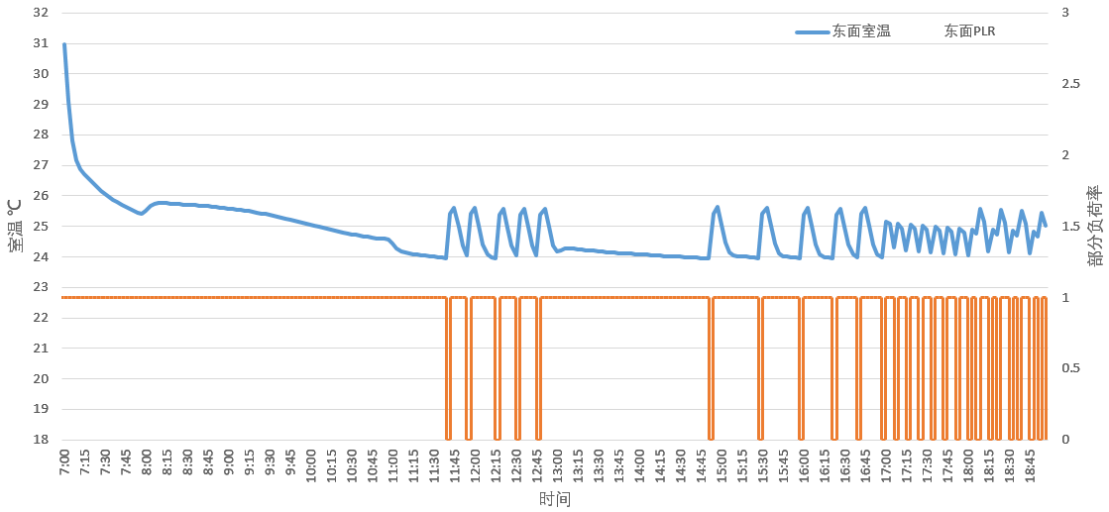

图 4- 17 改进后分体机模型东面房间设计日模拟结果

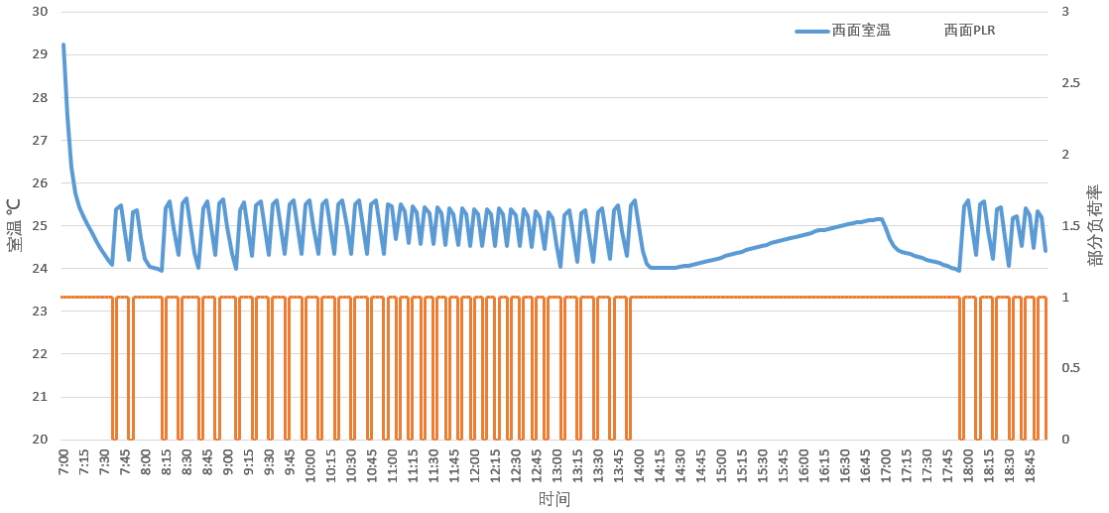

图 4- 18 改进后分体机模型西面房间设计日模拟结果

我们对制冷季（6-9 月）分体机运行情况进行了模拟，将改进前后两个模型的模拟结果进行了对比。表 4- 2 中对比了改进前后两模型模拟出的空调开启时间内的逐月平均室内温度，图 4- 19 显示了改进后的模型在制冷季工作时间内的日均室内温度，可以看出，在个别日期负荷较高的情况下，空调出力有限，导致室温略微上浮，总体上两个模型均能使得室内温度均能够保持在设定点 25℃左右。

表 4- 2 改进前后分体机模型各朝向房间逐月工作时间平均温度对比

月份	温度 ℃

	原模型北面	改进模型北面	原模型南面	改进模型南面	原模型东面	改进模型东面	原模型西面	改进模型西面
6	25.00	25.00	25.00	25.00	25.01	24.99	25.00	25.03
7	25.17	24.96	25.18	25.03	25.10	24.90	25.05	24.87
8	25.09	25.09	25.10	25.20	25.06	24.91	25.03	24.94
9	25.01	25.04	25.01	25.03	25.01	25.06	25.00	25.07

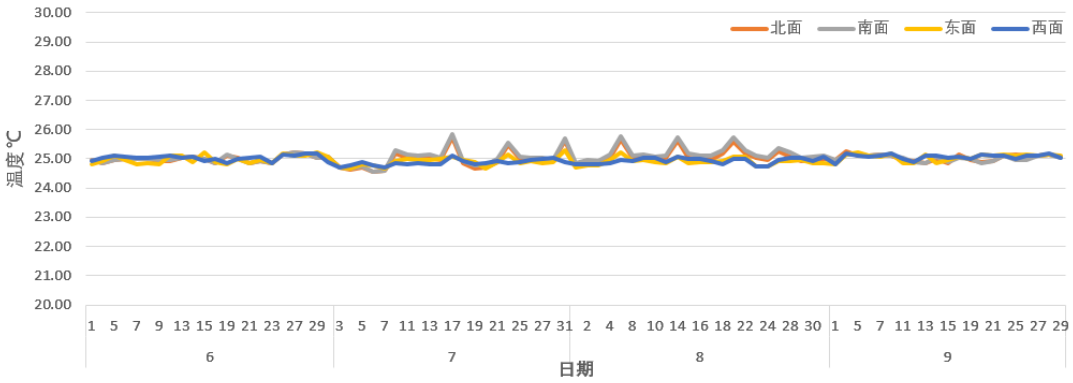

图 4- 19 改进后分体机模型制冷季工作时间平均温度

表 4- 3 中列出了改进前后模型的逐月空调能耗结果对比，图 4- 20 中显示了改进前后模型各朝向房间逐月的能耗对比。从能耗模拟结果可以看出，空调改进前后的模型能耗计算结果差值远远小于模拟误差限值 5%，改进后的模型能耗略微高于改进前模型主要是由于改进后模型的平均温度稍稍低于原有模型。因此，我们可以认为，改进后的模型在能耗计算结果没有偏差的情况下，相对于原有模型能够实现对分体式空调更加准确的模拟。

随着能耗模拟软件应用领域的拓宽，能耗模拟需要在更小时间尺度上实现对建筑用能更加准确的刻画。改进后的分体机模型在长时间尺度上对能耗模拟的结果未与原模型并未有显著差异的前提下，在更小时间尺度上实现了对分体机运行特性更为准确的描述。

表 4- 3 改进前后分体机模型制冷季逐月能耗对比

模型类型	空调能耗 J					百分数差
	6 月	7 月	8 月	9 月	合计	
改进后模型	1.11E+09	1.57E+09	1.69E+09	9.77E+08	9.63E+11	0.39%
原有模型	1.12E+09	1.55E+09	1.7E+09	9.63E+08	9.59E+11	

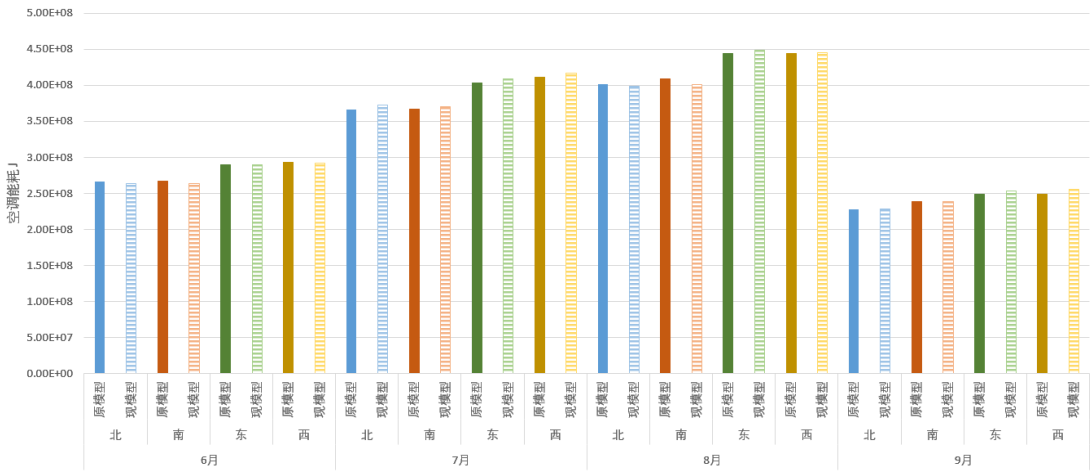

图 4- 20 改进前后分体机模型各朝向房间逐月能耗对比

4.5 本章小结

本章首先回顾了现有的主流能耗模拟软件，EnergyPlus 由于其功能强大，开发灵活的特点被广泛应用。随着其应用范围的扩大，对 EnergyPlus 在更短时间尺度上的模拟准确度提出了新的挑战。本章针对 EnergyPlus 中分体机模型中存在的不足进行改进，使得改进后的分体机模型能够反映出分体机在实际运行中的循环启停过程和室内温度随之产生的波动。本章通过对比改进前后的分体机模型模拟结果，证明了改进后的模型能够实现预期效果。

第 5 章 分散式空调模拟案例

本章将结合前文的人行为模型和改进后的分体机模型，对一使用分体式空调的酒店建筑进行能耗模拟。在模型中体现出人员在室情况及人员空调使用行为的多样性和随机性的特点，以及检验改进后的分体机模型是否依然具有反映出间歇运行、室内温度波动和空调运行及室温跟随时间表变化的能力。

5.1 案例设置

本文使用 DesignBuilder 建立了一酒店模型，酒店共 7 层，中间 5 层为客房层，共有 100 间客房，每层 20 间，东南西北四个朝向各 5 间。模型外观如图 5-1 所示，客房层俯视图如图 5- 2 所示，模型呈 L 型，过道宽 2 米，客房面积均为 $5\mathrm{m} \times 5\mathrm{m}$。所有区域均为空调区，每间客房空调系统均设置为分体式空调系统，其他区域则设置为理想负荷区域，即没有明确的空调系统，维持室内设定温度的能量均由理想系统完全提供。

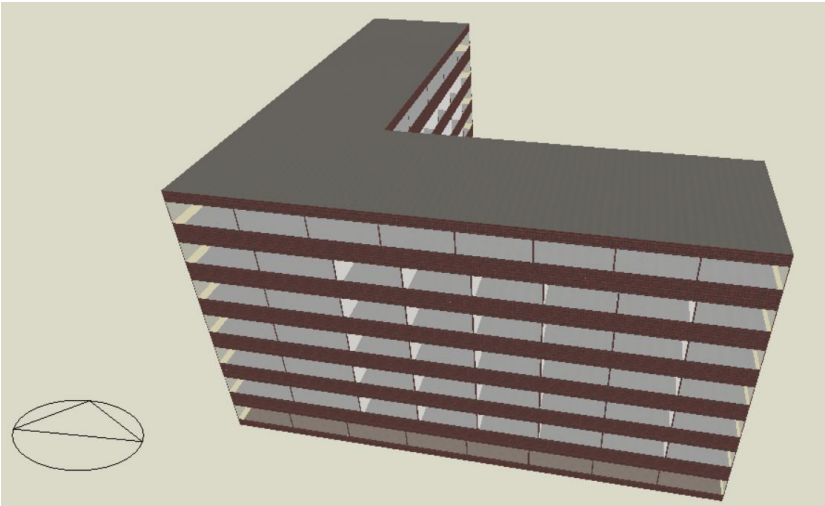

图 5- 1 酒店模型 3D 图

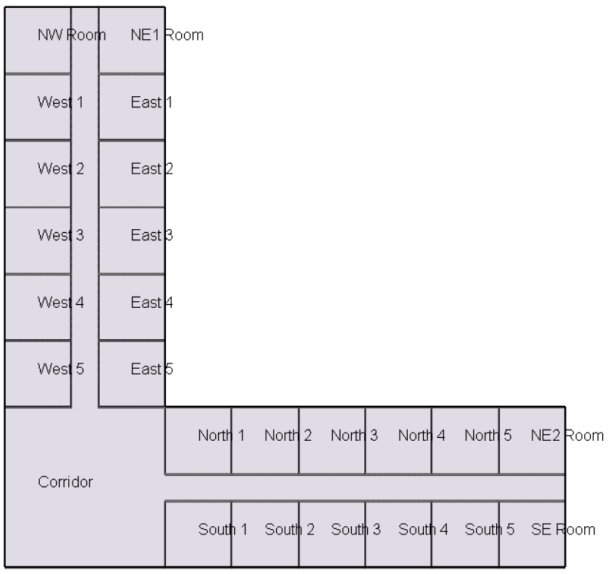

图 5- 2 客房层平面图

室内环境设置参数及建筑围护结构参数主要是根据《公共建筑节能设计标准》进行选取。由于我们仅有酒店中供冷季的人员调节行为数据，模型中仅对供冷季（6-9 月）运行情况进行模拟。同样地，我们将非客房区域的制冷温度设定为酒店室内温度概率分布的平均值 25℃。模型主要输入参数如表 5-1 所示。照明与设备的默认时间表同样参照标准选取，如表 3- 1 所示。

表 5- 1 酒店模型主要输入参数

客房房间面积	25 m2	
窗墙比	0.5	
层高	3.5m	
围护结构部位	传热系数 K[W/(m2·K)]	
屋顶	0.5	
外墙	0.8	
外窗	传热系数 K[W/（m2·K）]	1.96
	可见光透射系数 VT	0.74
	太阳得热系数 SHGC	0.69
室内负荷	照明：7 W/m² 设备：15 W/m² 人员：2 人/间	

对于客房模型，每间房间均建立一个单元机系统，系统主要由风机和单速冷热直膨盘管组成。对于制冷的直膨盘管其制冷效率（COP）为 3。盘管额定冷量，显热比（SHR）以及额定流量均由软件进行自动选型。盘管设置为空气冷却型，

盘管容量及 EIR 的修正曲线使用 EnergyPlus 中自带修正曲线，室外新风量设置为 0。风机设置为简单的定速风机并且跟随空调压缩机运行情况而启停。模拟时段同样设置为制冷季（6-9 月）。

5.2 人行为模型

本文对人行为的模拟主要集中于对人员在室情况以及人员对空调的使用行为的模拟。在本节，需要通过前文的对人行为模拟的方法，生成酒店每间客房在模拟阶段的人行为相关时间表，包括：在室率时间表，空调设定点时间表，照明和设备使用率时间表。

其中，人员在室率时间表采用蒙特卡洛马尔可夫链方法进行生成。时间表的初始状态是根据统计出的平均在室率使用蒙特卡罗方法进行初始化。照明和设备使用率的时间表跟随人员在室率时间表，仅当室内有人时，使用率为当前时段的默认使用率；当室内无人时，使用率为零。空调设定点的时间表使用蒙特卡罗随机模拟的方法得到。同样地，对于任一客房，当室内无人时，空调设定为关闭（设定点为 40℃），当室内有人时，进行每半小时一次的随机模拟，得到逐半小时的随机的设定温度时间表。为防止出现某房间设计日（7 月 15 日）无人时间较长，导致系统选型过小的情况出现，所有房间设计日均设置为人员全天在室，空调全天开启。

5.2.1 人员在室情况模拟结果

有第二章所述的人员在室率模拟的方法可以随机得到任意个数房间的逐时在室率时间表。在本章节使用此方法生成随机时间表时，设置共有 100 个房间。因此，可以得到酒店模型中 100 间客房逐时的在室率以及跟随在室率生成的照明及设备使用率时间表。图 5- 3 至图 5- 6 中列出了各朝向的某一间房间 7 月 1 日的逐时在室率以及照明设备使用率时间表。从图中可以看到，照明和设备使用率很好地跟随着在室率变化，在室率时间表也呈现出随机性。同时，马尔可夫链在生成时间表时通过转移矩阵对下一时刻的状态进行计算，和完全随机的方法不同，其具有“记忆性”，表示人员此刻在房间的状态和上一时刻的状态相关；此外，每小时都有一个转移矩阵，也能够体现人员状态的变化与时间相关。

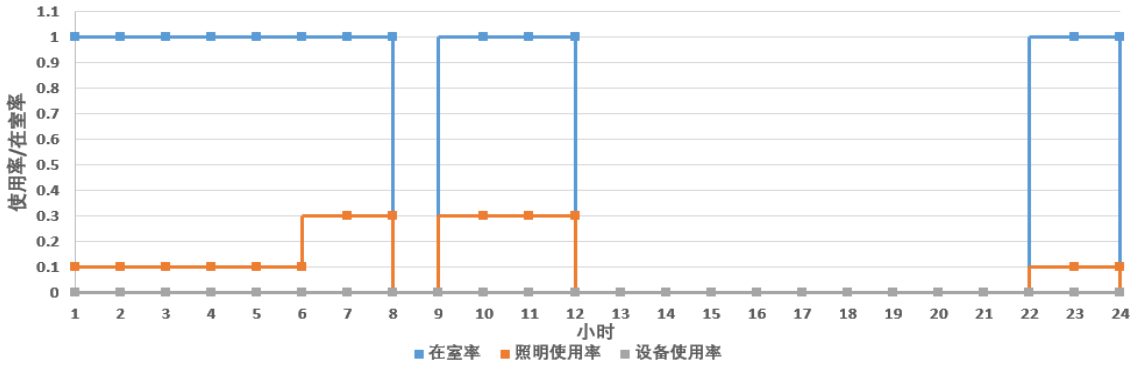

图 5- 3 东面某客房 7 月 1 日在室率及照明设备使用率时间表

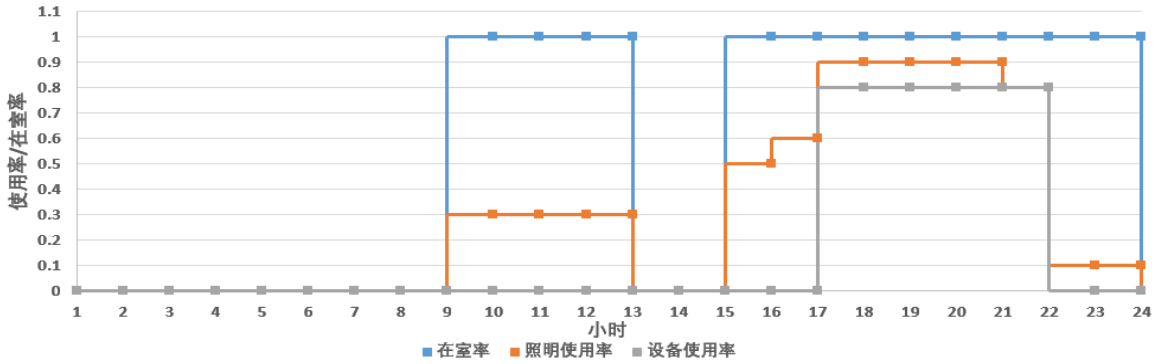

图 5- 4 北面某客房 7 月 1 日在室率及照明设备使用率时间表

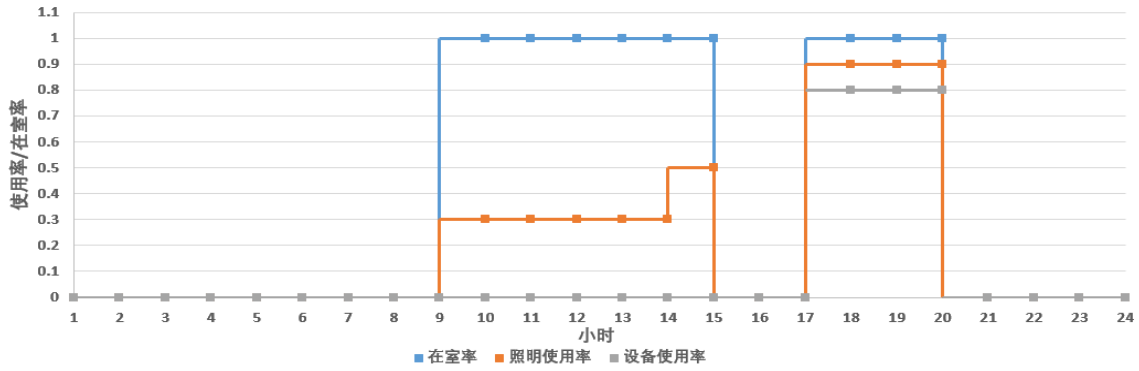

图 5- 5 西面某客房 7 月 1 日在室率及照明设备使用率时间表

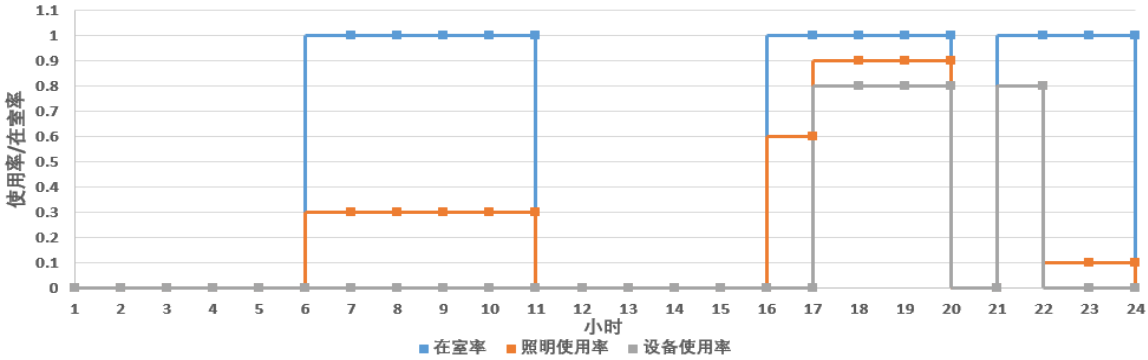

图 5- 6 南面某客房 7 月 1 日在室率及照明设备使用率时间表

图 5- 7 至图 5- 10 显示了该四间房间某两周的通过马尔可夫链生成的逐时在室率。从图中可以看出在室率的时间表体现出人员行为的随机性以及多样性特点。

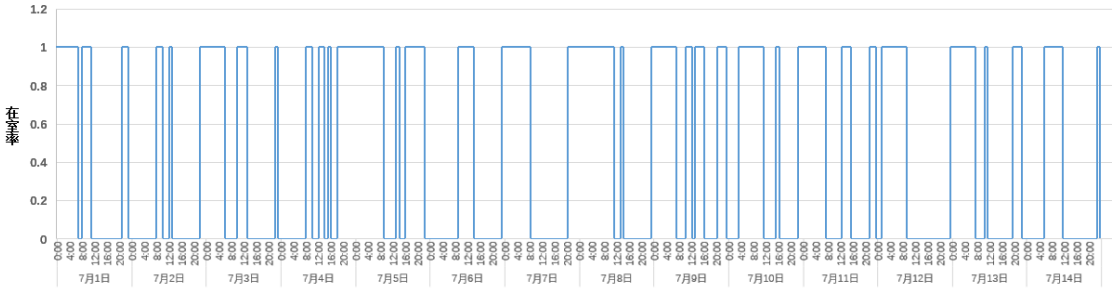

图 5- 7 东面某间客房两周在室率

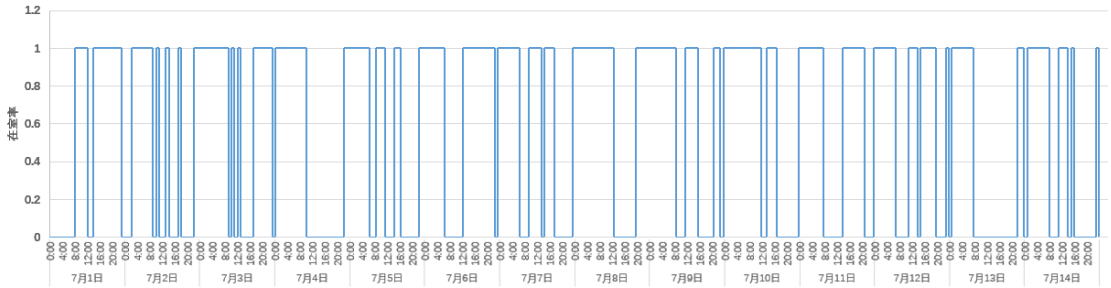

图 5- 8 北面某间客房两周在室率

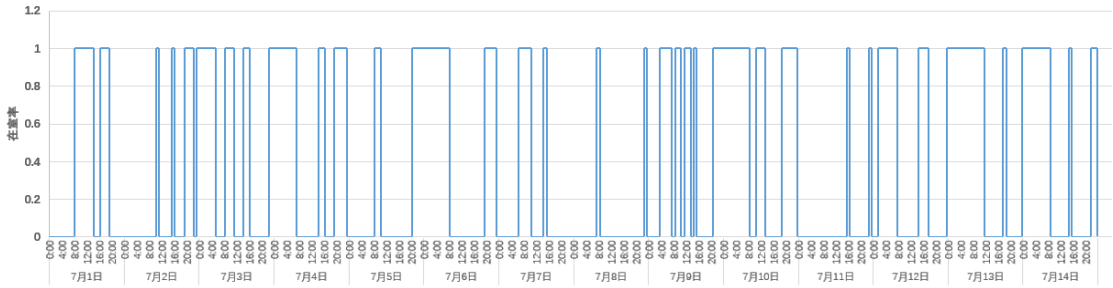

图 5- 9 西面某间客房两周在室率

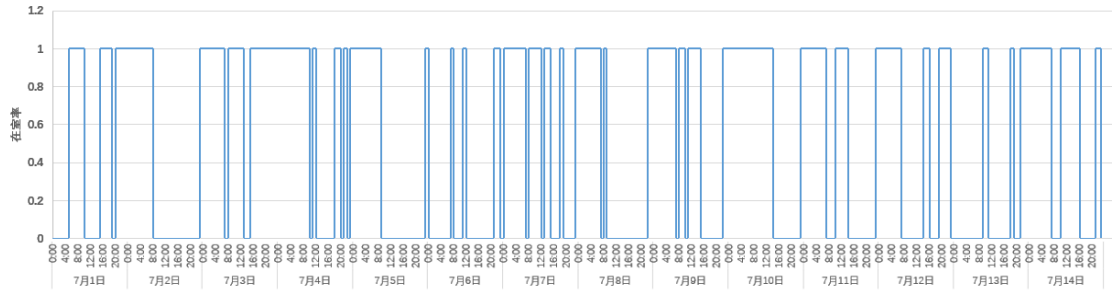

图 5- 10 南面某间客房两周在室率

图 5- 11 中显示出该 100 间房间全年 8760 个小时的平均在室率与上文计算出的逐时在室率的比较，两组在室率数值与变化趋势基本相同，说明随机生成的在室率数据在全楼尺度上的均值能够基本反映真实的在室率。随机生成的在室率略少低于理想的在室率，由于在室率的生成除了依赖于转移矩阵的数值，同样也和初始值有关，从第二章的在室率结果可以知道，初始时刻的在室率为 0.75，因此理想的初始随机模拟结果是 100 个房间中有 75 个房间是有人的，但由于随机数生成的不确定性难以保证每次随机都能有 75 个房间是有人的。因此，每次随机模拟的结果都会略有不同，但所有房间的平均在室率变化情况和数值都会基本服从上文得到的在室率情况。

为了检验随机生成的在室率曲线与通过监测处理得到的在室率曲线之间是不是具有统计学意义上的一致性，本文采用皮尔逊系数来检验两组变量之间的相关程度。两个变量之间的皮尔逊相关系数的计算公式如下：

$$\rho_{X,Y} = corr(X,Y) = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

其中，$cov(X,Y)$表示两变量之间的协方差，σ_X表示变量 X 的标准差，σ_Y表示变量 Y 的标准差。皮尔逊系数取值在[-1,1]之间，数值越靠近 0，代表量变量相关性越低，越远离 0，代表相关性越高。因此，我们可以求得两组在室率数据间

的皮尔逊系数为 0.998，因此我们可以认为这两组数据是高度相关的。

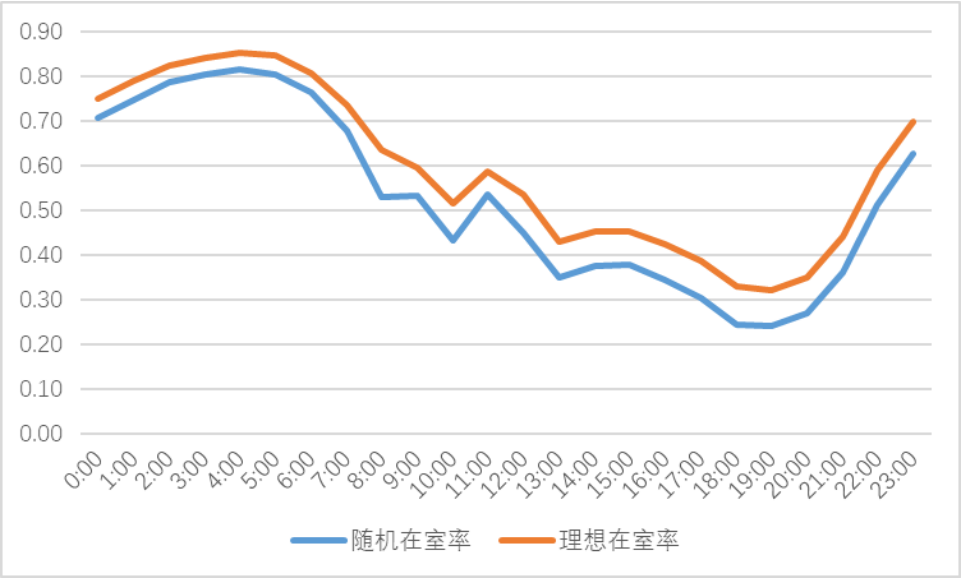

图 5- 11 酒店模型客房在室率与调研在室率对比

通过模拟结果可以看出，使用马尔可夫链生成在室率时间表，能够较好地反映出人行为的随机性和多样性的特点。并且，我们对每小时的状态转移矩阵进行了设置，也能够体现出人员在室情况与时间的相关关系。同时，也能体现出人行为的“记忆性”。照明和设备的使用率时间表也能够很好地跟随在室率时间表进行相应的变化。此外，此 100 间房间全年的逐时平均在室率和前文计算出的逐时在室率数据也基本吻合。使用马尔可夫链方法对人员在室情况进行模拟时，重点和难点在于转移矩阵的计算，转移矩阵的准确度影响着生成的时间表的精确程度。

5.2.2 人员空调调节行为模拟结果

在对设定温度时间表进行蒙特卡洛随机模拟时，我们认为各个房间温度设定点的时间表也跟随人员在室率时间表进行变化。本文中有以下假设：仅当房间内有人时，空调才开启，无人的情况下，空调关闭。因此，对于每间房间，我们通过编程逐条读取其每小时的在室率数据，当在室率为 0，也就是房间无人时，我们设置空调制冷温度为 40℃，相当于不开启空调；当在室率为 1，房间有人时，我们对当前小时的制冷设定点每半小时进行一次蒙特卡洛随机模拟，生成空调制冷设定点时间表。同样地，我们也对酒店模型中的 100 个房间的温度设定值进行随机模拟。

图 5- 12 至图 5- 15 中显示了上文中四间客房某天的在室率和温度设定点数据。从图中可以看出，当房间无人时，温度设定点能够设置在 40℃，当房间有

人时，温度设定点半小时进行一次随机。在房间有人的时间段内，房间设定点随时间变化而波动，体现出了人行为的随机性。

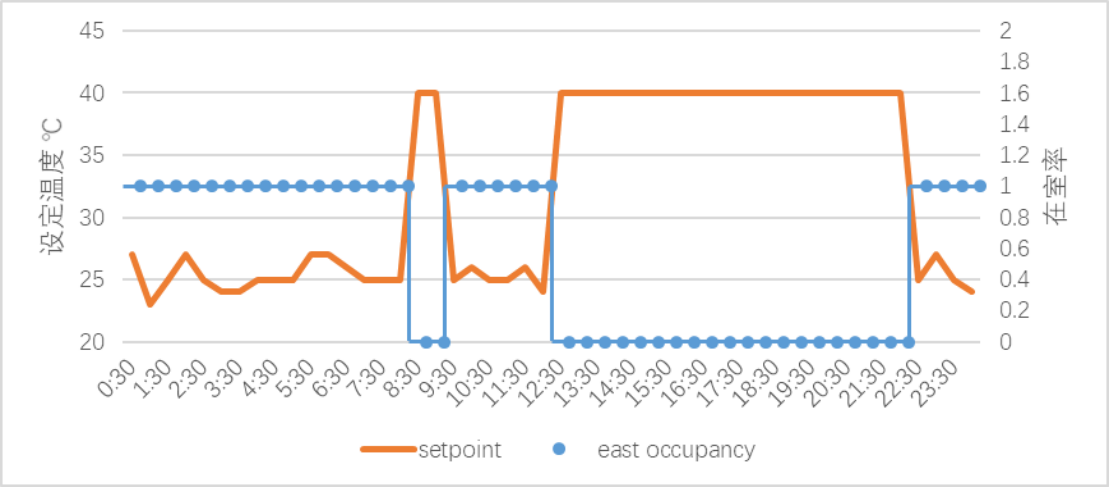

图 5- 12 东面某客房 7 月 1 日在室率与设定温度时间表

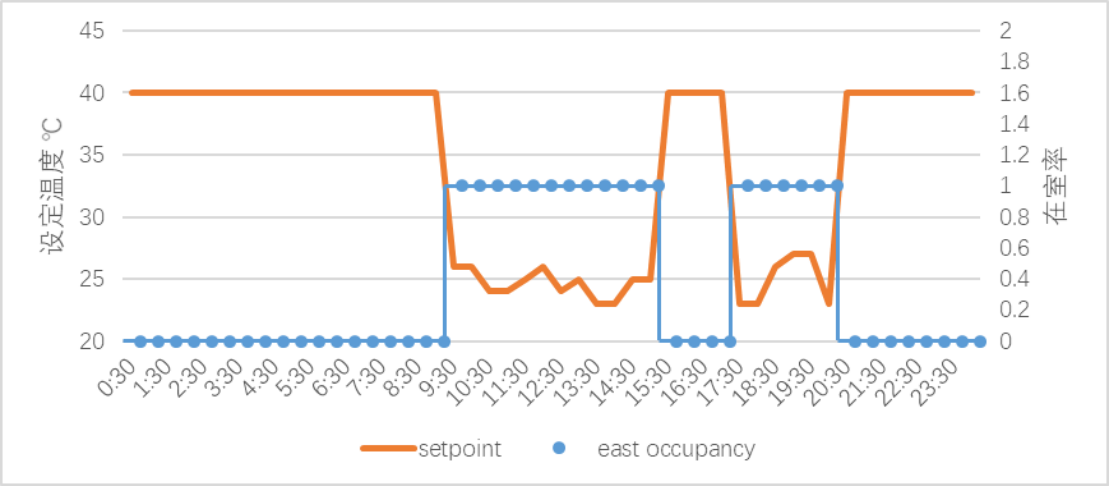

图 5- 13 西面某客房 7 月 1 日在室率与设定温度时间表

图 5- 14 北面某客房 7 月 1 日在室率与设定温度时间表

图 5- 15 南面某客房 7 月 1 日在室率与设定温度时间表

我们将使用蒙特卡洛方法在房间有人时间内随机生成的温度设定点出现的概率与上文计算出的 23-27℃的理想概率分布进行比较。从表 5- 2 中可以看出两种温度设定点的概率大小和分布也是基本相同的。类似地，同样使用皮尔逊系数检验两组数据之间的相关性。两组数据间的皮尔逊系数为 0.997，同样地，我们可以认为这两组变量是高度相关的。

表 5- 2 酒店模型设定温度概率分布与调研概率分布对比

设定温度℃	调研概率	模拟概率
23	0.11	0.11
24	0.21	0.21
25	0.35	0.37
26	0.22	0.21

27	0.11	0.11

5.3 模拟结果

结合前文人行为模拟方法以及改进后的分体机模型，依据调研得到的人行为数据，本节对上述酒店模型进行模拟。由上一章的内容可知，改进后的分体机模型能够实现机组启停以及室温在控制点上下波动的特性。在这一章，在第四章改进后分体机模型的基础上增加了人行为模型。因此，我们对结合人行为的分体机模型模拟结果进行分析，检验其是否能够同时反映出人行为及分体机运行两者的特性。

酒店共有 100 间客房，各朝向客房各 25 间，本节选取其中四间不同朝向的房间模拟结果进行分析。由于房间数量多，所需计算和分析的变量数也较多，常用的 E+输出文件文件类型（模拟文件名.csv）中没有包含全部所需输出变量及其数值，因此需要对包含全部变量及数值输出文件（模拟文件名.eso）进行处理，得到各间房间的模拟出的变量结果。文件处理代码见附录 A。

如图 5- 16 至图 5- 19 所示，列出了四间房间 7 月 14 日的改进后分体机模型模拟出的逐半小时的室内平均温度与设定温度的对比。从图中可以看出，在空调关闭的时间内（设定温度 40℃），改进后的模型模拟出的室内温度均从较低室温上升至较高数值。由于设定温度点数值较大，即使空调关闭室内温度点也基本不会达到 40℃，西面房间房间无人时间段正好为室内负荷非常大的时间段，导致室温上升很快。在空调开启的阶段，室内设定点每半小时进行一次随机，从图中可以看出，室内温度在大部分情况下基本能够按照设定点进行变化，在图中表现为设定点曲线和室温曲线基本重合。在部分情况下，当房间状态从一段时间无人变为有人时，室内温度需要从较高值降低到设定点时，由于机组出力有限，无法在短时间内将室内空气冷却到设定点，因此出现室内温度和设定点曲线出现分离的情况。总体上来说，改进后的模型能够模拟出室温跟随设定点时间表随机变化的特点。

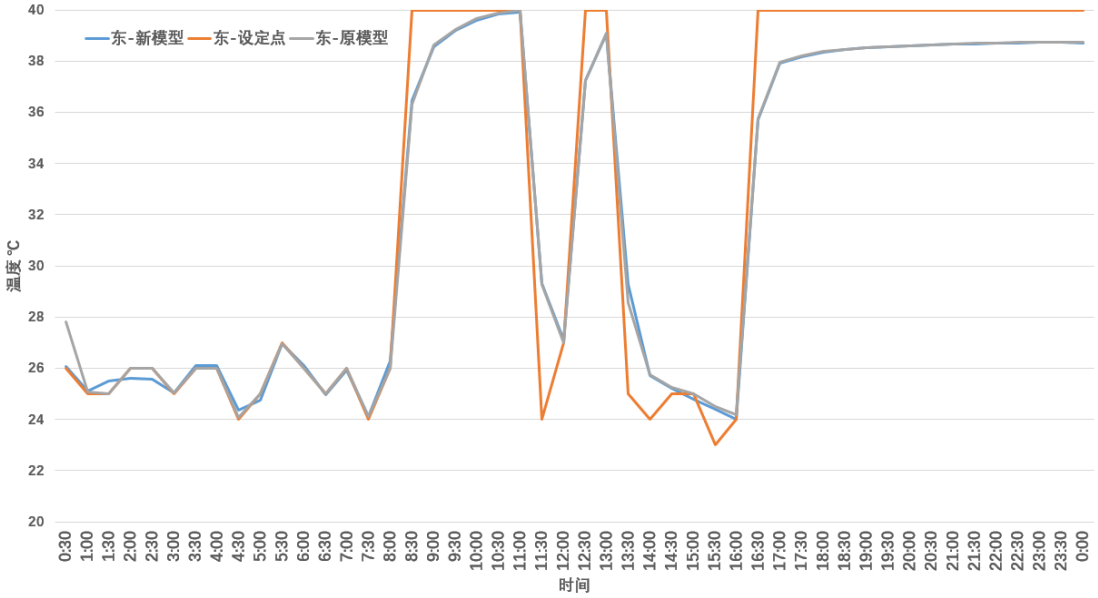

图 5- 16 东面某客房 7 月 14 日设定温度与改进前后模型模拟温度对比

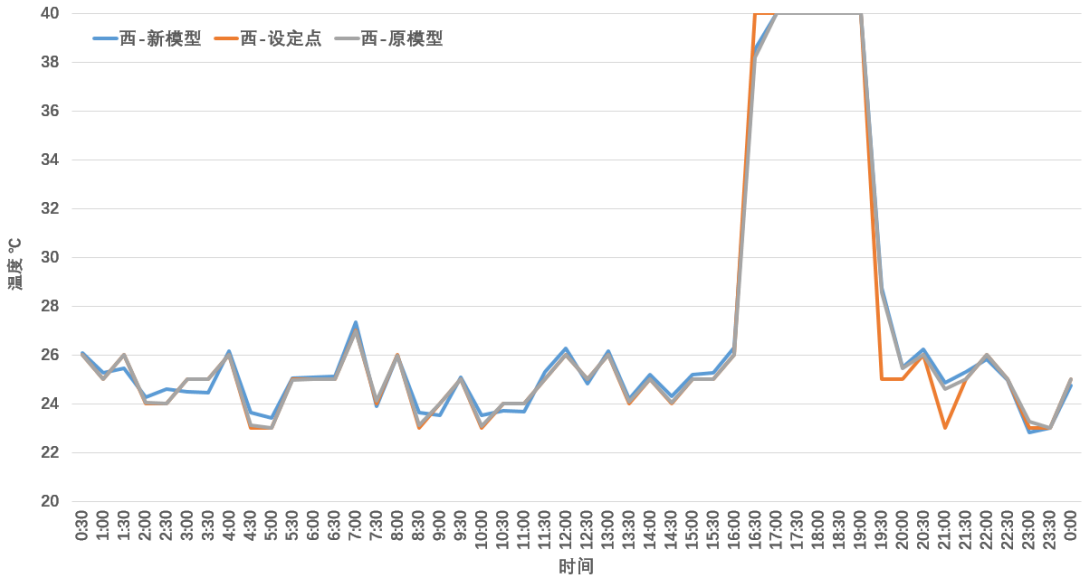

图 5- 17 西面某客房 7 月 14 日设定温度与改进前后模型模拟温度对比

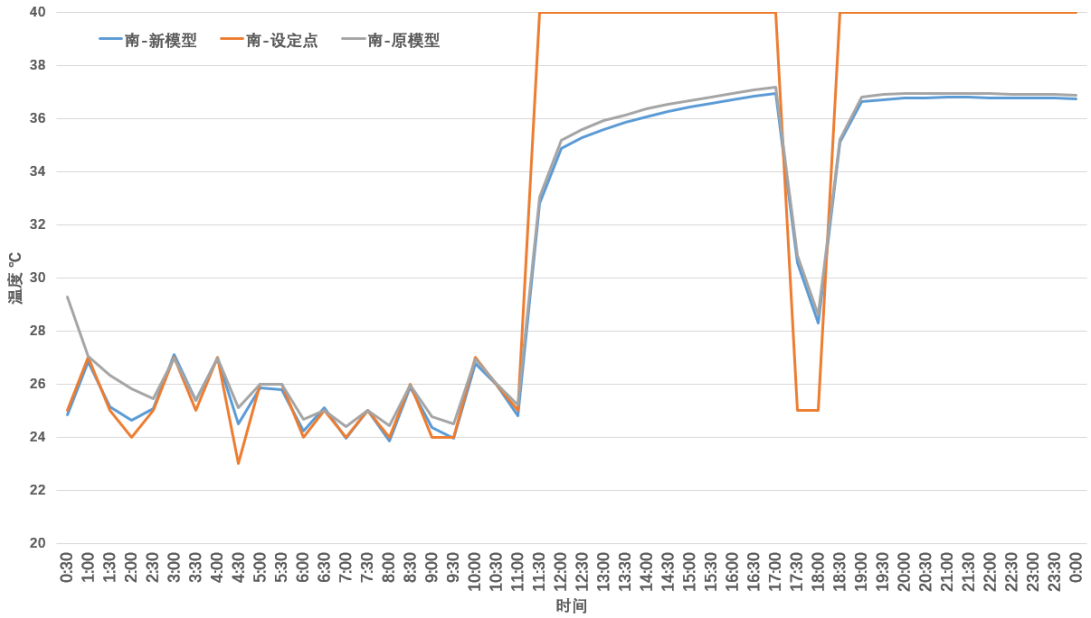

图 5- 18 南面某客房 7 月 14 日设定温度与改进前后模型模拟温度对比

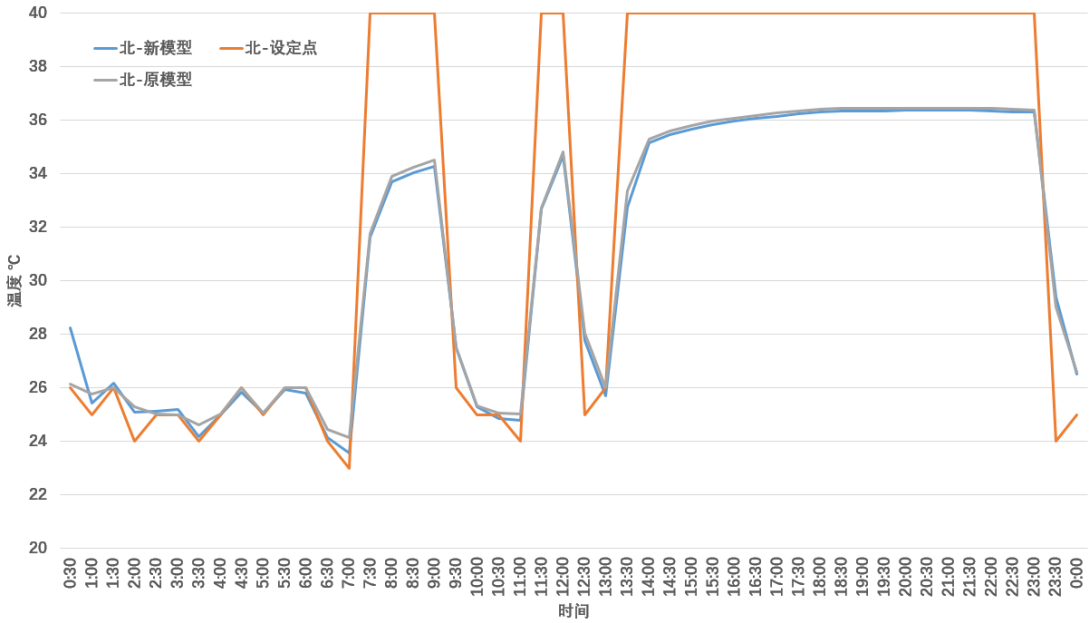

图 5- 19 北面某客房 7 月 14 日设定温度与改进前后模型模拟温度对比

图 5- 20 至图 5- 23 中为上述四间客房同一天（7 月 14 日）逐时间步长（3 分钟）的分体机运行情况以及室内温度变化情况。从图中看出各房间在室内无人时间段内，空调的部分负荷率均是 0，也就是处于关闭状态，同时室温也随着空调关闭快速上升，特别是对于东面和西面房间其关闭时段负荷较大，室温上升更加快速，也达到更高的温度数值。当房间内有人时，空调基本能够做到启停运行

使得室温在设定点附近上下波动。当设定点较高时，空调的部分负荷率曲线显得更为“稀疏”，这是由于空调停机时间较长，启动时间较短所致。同理，当设定点较低时，部分负荷率曲线更加“紧密”，空调需要更为频繁的启停使得室温能够维持在设定点附近。当设定点从较高值（如 27℃）变化至较低值（如 23℃）时，或空调从关闭状态变化为开启时，空调需要连续运行较长时间才能将室温冷却至设定点附近；当室温下降至设定点以下时，空调才会再次开始不断启停运行以维持室温。

从图中模拟结果可以看出，改进后的分体机模型与人行为模型相结合，既能够反映出人员在室情况和空调调节行为的随机变化，同时也能够体现出分体空调运行时的启停特性和造成的室温波动。

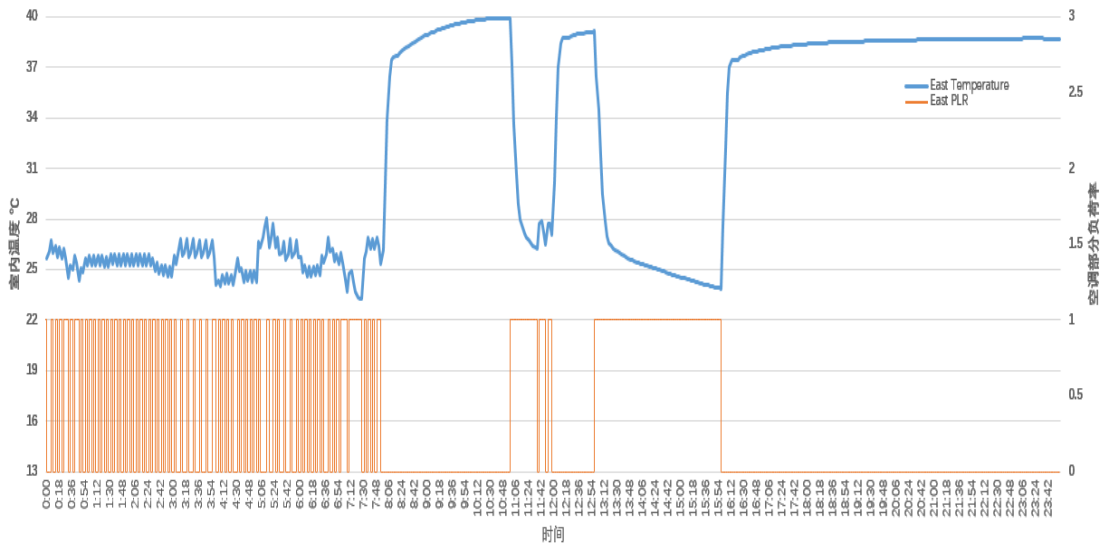

图 5- 20 东面某客房 7 月 14 日逐时间步长室内温度及空调启停状态

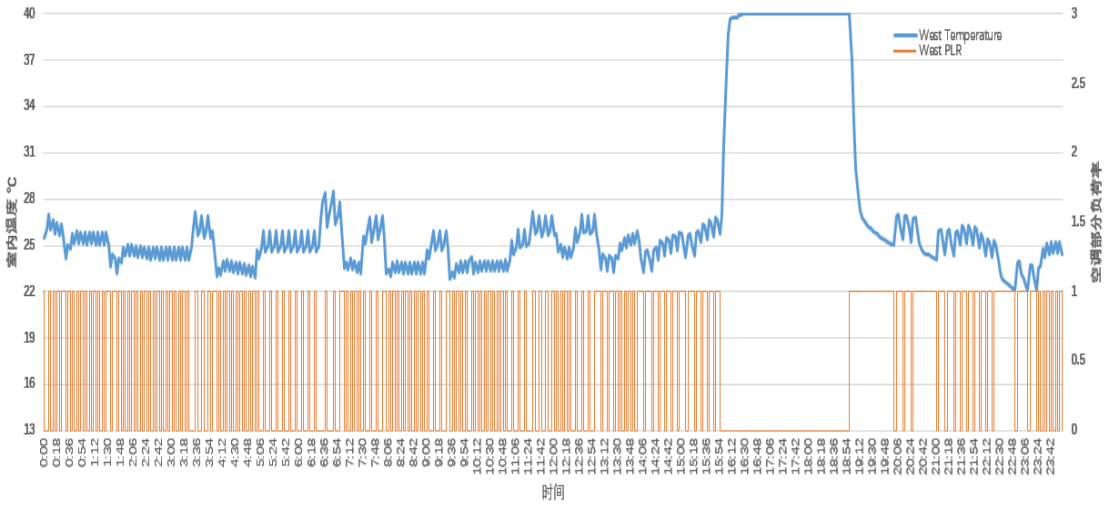

图 5- 21 西面某客房 7 月 14 日逐时间步长室内温度及空调启停状态

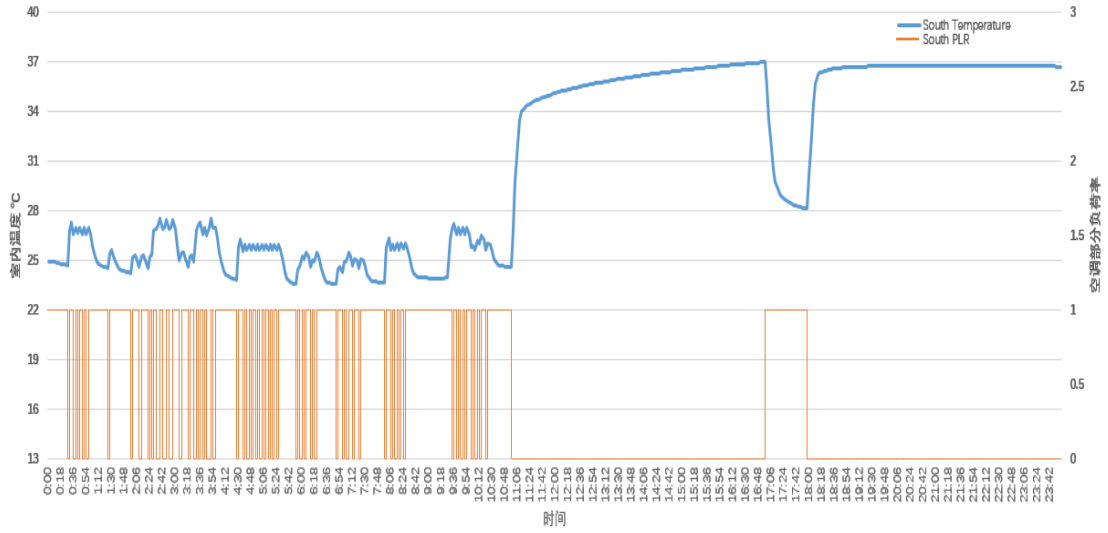

图 5- 22 南面某客房 7 月 14 日逐时间步长室内温度及空调启停状态

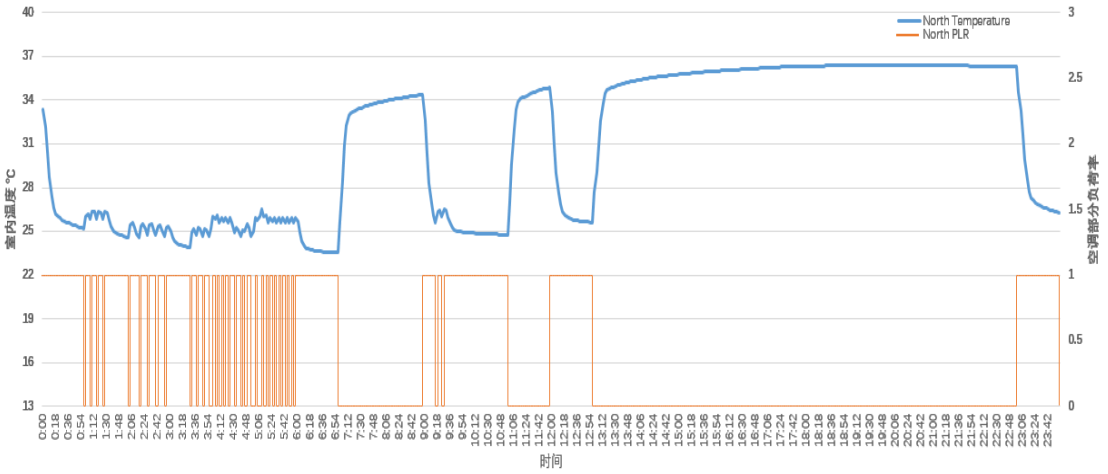

图 5- 23 北面某客房 7 月 14 日逐时间步长室内温度及空调启停状态

从以上结果可知，改进后的分体机模型与人行为模型结合后仍能后很好地反映出分体机运行时的启停特性与室温波动的特点；同时室内温度也能够基本跟随设定温度进行变化，空调的开启与否也能跟随室内人员在室情况进行调节，说明模型也能够做到对人行为的多样性和随机性的模拟。在此基础上，本文将上述模型使用 EnergyPlus 原有的分体机模型进行模拟，对比两者制冷季（6-9 月）能耗数据，如表 5- 3 所示；从能耗模拟结果可以看出，改进后的模型能耗略小于改进前的模型能耗。但空调改进前后的模型能耗计算结果差值小于模拟误差限值 5%，因此改进后的分体机模型在长时间尺度上的模拟结果与原模型的差异并不显

著。

表 5- 3 改进前后模型制冷季逐月能耗模拟结果对比

模型类型	能耗 J					百分数差
	6 月	7 月	8 月	9 月	合计	
改进后模型	5.22E+10	6.38E+10	6.25E+10	5E+10	4.11E+13	-1.58%
原有模型	5.29E+10	6.5E+10	6.37E+10	5.05E+10	4.18E+13	

为了验证结合了人行为模型和改进后分体机模型的模拟方法与原有酒店模型模拟方法的模拟结果是否存在差异，我们使用 EnergyPlus 原有分体机模型进行模拟，同时在模拟中并不考虑人行为的影响因素：人员在室及室内温度设定值均按照标准建议值进行选取，对两次模拟结果进行对比分析，如表 5-4 所示。从模拟结果看出，添加人行为模型对照明以及设备的能耗结果影响最大。这是由于在添加人行为模型的模拟中，照明与设备的使用情况与人员是否在室相关，仅当室内有人时照明和设备才会开启。空调系统（制冷及风机）能耗差异较小，空调系统能耗受多种因素的影响主要是温度设定点、人员在室率以及其他室内负荷。由于标准建议的空调设定点为 25℃，与人员室内温度选择分布的平均温度一致，因此反映空调使用情况的人行为模型在此案例中对能耗影响并不十分显著。从表 5- 4 中可以看出，在模拟中考虑人行为影响因素以及使用改进后的分体机模型的模拟结果与无人行为以及使用原有分体机模型的酒店客房能耗模拟结果存在 7.86%的差异，超过模拟误差，因此可以认为使用结合人行为的改进后分体空调模拟方法是有必要的。

表 5- 4 改进前后模型制冷季能耗对比

能耗分类	人行为加改进模型 kWh	无人行为未改进模型 kWh	百分数差
制冷	63452.11	65873.92	3.68%
照明	7935.29	9821	19.20%
设备	5257.8	9150	42.54%
风机	31762	32807.14	3.19%
求和	108407.2	117652.06	7.86%

5.4 本章小结

本章结合前文人行为的模拟方法和改进后的分体机模型，基于调研得到的人行为数据，对一拥有 100 间客房的酒店模型进行模拟，模型中各间客房均安装有

分体空调。使用前文中的马尔可夫链以及蒙特卡洛方法对全楼客房的人员在室率，室内设定温度以及照明设备使用率时间表进行生成，结果显示随机生成的时间表能够体现出人行为的随机性和多样性。改进后的分体机模型模拟结果显示，室内平均温度基本能够随着随机的设定温度时间表进行波动。在较短时间步长尺度上，改进后的模型依然能够体现出分体空调不断启停调节室温的特点。本文在 EnergyPlus 分散式空调基础上增加了人行为的模拟并对分体空调模块进行了改进，从而在结果上能够反映出人行为的特征和分体机的运行特性。结果表明，结合了人行为的改进后分体机模型与原模型的模拟结果存在明显差异。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

作为在建筑节能领域得到广泛应用的工具，能耗模拟软件的应用场景不断扩大。新的应用场合也对其模拟精度和准确度提出了新的挑战。同时，人行为对建筑能耗的影响也越来越受到研究人员的重视。本文针对一主流能耗模拟软件 EnergyPlus 中分散式空调模型存在缺陷以及并未考虑人员影响因素的问题，进行了如下的研究：

（1） 本文首先对人行为的研究范围进行了界定，研究着眼于全楼尺度的人员在室率以及空调使用行为的研究和模拟。总结整理了常见的人行为调研的方法及各自的优势与不足。

（2） 使用动作监测的方法，通过超声波动作探测器与门磁结合的方式对酒店客房人员在室率进行监测。对监测数据进行处理和分析后，得到了酒店客房的逐时在室率情况。酒店客房逐时在室率变化与客观规律及普遍认知相符。

（3） 通过客房温控器对房间空调设定点及室内温度进行记录和上传，对数据处理后得到制冷季酒店客房空调设定温度以及室内温度的概率分布。结果发现，客房人员对温度设定点的选择不存在明显分布，然而对室温的偏好具有明显规律分布。绝大多数客人倾向于将室温保持在以 25℃为中心，正负 2℃的范围内。

（4） 总结了现有的人行为模拟的常见方法。基于调研得到的全楼尺度人行为在室率及空调使用情况数据，本文提出使用蒙特卡罗方法对人员空调使用情况进行模拟，使用马尔可夫链方法对人员在室率进行模拟，并对方法的具体实施步骤进行了阐述。

（5） 针对 EnergyPlus 分体机模型存在的不足，通过实测数据对分体空调实际运行情况进行分析。整理并分析了 EnergyPlus 程序的调用逻辑和分体机模型的模拟流程，对程序模块进行修改，使得模拟结果能够反映分体空调在实际运行中的启停特性以及室温波动情况。并建立单个办公房间模型，对改进前后模型的模拟结果进行对比和分析。结果显示，改进后的模型在长时间尺度上的总能耗计算结果与原模型无明显差异，在短时间步长模拟中，能够实现对空调启停特性以及室温波动特征更加准确的模拟。

（6） 结合人行为模拟方法和改进后的分体机模型，基于调研得到的人行为数据，对一酒店模型进行模拟。结果显示，此种模拟方法能够体现出人员在室率以及空调使用行为的多样性和随机性；同时，也能在全楼尺度上服从统计规律。改进后的分体机模型能够通过启停调节使得室温在随机设定点附近波动；此外，结合了人行为模拟的改进后分体机模型模拟结果与传统模拟方法的结果存在明显差异，说明了在模拟中加入人行为影响因素以及对分体机模型进行改进的必要性。

6.2 进一步工作的方向

本文的研究虽然取得了初步的果，但依然任重道远，尚有许多有待进一步深入进行的研究工作，这里择其要者简要讨论如下：

（1） 人员在室情况调研中采用声波动作探测器对室内是否有物体移动进行判断可能存在误判，因此研究中往往需要使用多种探测器结合的方式进行判断。对人员空调使用行为进行分析时，认为两次调节的时间间隔超过五分钟才为有效调节，此时间间隔的取值仍需要进一步推敲。

（2） 本文人行为研究范围仅限于全楼尺度，基于统计出的全楼在室情况与空调使用情况数据进行模拟。因此，无法做到对个体或单个房间的准确刻画和模拟。若要对个体行为进行模拟，仍需进一步的监测，同时也需要考虑个体行为的驱动因素。

（3） 本文以 EnergyPlus 原分体机模型的模拟结果作为基准，对改进后的分体机模型能耗模拟情况进行校验仍需要更为准确的实测数据和模型。

（4） 分体空调在实际运行中是对回风温度与设定温度进行比较从而对机组启停进行判断，因此，分体空调模型的启停逻辑仍需要更加贴近实际。

致谢

三载光阴，短短一瞬。我算是误打误撞地读上了研究生，却未曾料到这三年能够赠与我如此多的养分与力量。在论文结稿之际，向在这段时间里给予我爱和我爱的人表达感谢。

感谢我的导师潘老师，您既是良师也是益友。感谢您在学习上给我的指导和提点，在生活中对我的建议和帮助。谢谢您让我看到一个自信自强的女性和您对待生活的积极与豁达，让我认识到不断努力的未来的可能性和自信达观带来的魅力。感谢让我“又爱又恨”的黄老师，感谢您愿意不厌其烦地解答我的疑惑，同时也在我倦怠时及时批评我指引我。感谢您的聪明与唠叨，带给了我太多启迪与欢乐，也让我感受到不断思索不断学习的生命中的乐趣。感激生命让我能够与良师相逢，谢谢你们传授与我的人生智慧。

感谢温暖有爱的潘门：感谢无私指导我学术，带给我欢乐和启迪的朱朱；感谢在项目和课题上给我意见和帮助的王秋涧；感谢像姐姐一样照顾我，陪伴我的刘海静；感谢和我互相支持鼓励的王尉同；感谢可爱聪慧的潘媛，踏实可靠的吕岩，“失联的”杨一昆，美丽的李诗尧，温柔的佘昭，体贴可爱的谢建彤。

感谢研究生阶段的同学和朋友，谢谢你们的陪伴与关怀。感谢我可爱的室友经纬，谢谢你教会我理性，勇敢和真诚。感谢我的闺蜜黄滢滢，感谢你的支持与爱。

感谢我的父母，谢谢你们不计回报的爱与奉献，谢谢你们为我撑起温暖的家，教会我善良，热爱生活。

感谢生活让我越来越能够认清自己、接纳自己、爱自己；让我能够拥有充满激情与力量的内心。

2018 年 3 月

参考文献

[1] United Nations Climate Change. Kyoto Protocol[Z].: 2017.

[2] United Nations Climate Change. The Paris Agreement[Z].: 2017.

[3] International Energy Agency IEA. World: Balances for 2012[Z].: 2017.

[4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2012[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5] Aste N, Adhikari R S, Pero C D. Photovoltaic technology for renewable electricity production: Towards net zero energy buildings[C]. 2011.

[6] Crawley D, Pless S, Torcellini P. Getting to Net Zero[J]. Ashrae Journal. 2009, 51(51): 18-25.

[7] Yan D, Hong T, Dong B, et al. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings[J]. Energy and Buildings. 2017, 156: 258-270.

[8] Joudi K A, Al-Amir Q R. Experimental Assessment of residential split type air-conditioning systems using alternative refrigerants to R-22 at high ambient temperatures[J]. Energy Conversion and Management. 2014, 86: 496-506.

[9] 陈则韶，戚学贵，程文龙，等. 压缩制冷空调装置动态仿真研究[J]. 低温工程. 2000(6): 35-39.

[10] Yau Y H, Pean H L. The performance study of a split type air conditioning system in the tropics, as affected by weather[J]. Energy and Buildings. 2014, 72: 1-7.

[11] Engineering C F E E. An Advanced Vapor Compression Cycle Simulation Tool (VapCyc)[Z].: 2017.

[12] Engineering C F E E. A sophisticated tool for design and optimization of air-cooled heat exchangers[Z]. 2017: 2017, CoilDesigner.

[13] Martínez P, Ruiz J, Cutillas C G, et al. Experimental study on energy performance of a split air-conditioner by using variable thickness evaporative cooling pads coupled to the condenser[J]. Applied Thermal Engineering. 2016, 105: 1041-1050.

[14] 李越峰，陈俊智，王晰. 平行流换热器在家用空调的应用和分析[J]. 家电科技. 2009(1): 46-48.

[15] Nada S A, Said M A. Performance and energy consumptions of split type air conditioning units for different arrangements of outdoor units in confined building shafts[J]. Applied Thermal Engineering. 2017, 123: 874-890.

[16] Avara A, Daneshgar E. Optimum placement of condensing units of split-type air-conditioners by numerical simulation[J]. Energy and Buildings. 2008, 40(7): 1268-1272.

[17] 王洪磊，向东，段广洪，等. 分体式空调室外机风道系统的流场分析[J]. 流体机械. 2009(06): 65-69.

[18] Gomes A, Antunes C H, Martinho J. A physically-based model for simulating inverter type air conditioners/heat pumps[J]. Energy. 2013, 50: 110-119.

[19] Hong T, Sun K, Zhang R, et al. Development and validation of a new variable refrigerant flow system model in EnergyPlus[J]. Energy and Buildings. 2016, 117: 399-411.

[20] Meissner J W, Abadie M O, Moura L M, et al. Performance curves of room air conditioners for building energy simulation tools[J]. Applied Energy. 2014, 129: 243-252.

[21] 李振华，简毅文. EnergyPlus建筑能耗分析软件图形化应用接口开发研究[J]. 制冷空调与电力机械. 2011(03): 68-71.

[22] 刘俊杰刘洋朱能. EnergyPlus建筑能耗分析软件汉化用户应用界面的开发[J]. 暖通空调. 2005(09): 114-118.

[23] 李准. 基于EnergyPlus的建筑能耗模拟软件设计开发与应用研究[D]. 湖南大学, 2009.

[24] Yoon J H, Bladick R, Novoselac A. Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity[J]. Energy and Buildings. 2014, 80: 531-541.

[25] Yoon J H, Baldick R, Novoselac A. Dynamic Demand Response Controller Based on Real-Time Retail Price for Residential Buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2014, 5(1): 121-129.

[26] Yin R, Kiliccote S, Piette M A. Linking measurements and models in commercial buildings: A case study for model calibration and demand response strategy evaluation[J]. Energy and Buildings. 2016, 124: 222-235.

[27] Yin R, Kara E C, Li Y, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes[J]. Applied Energy. 2016, 177: 149-164.

[28] Pallonetto F, Oxizidis S, Milano F, et al. The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling[J]. Energy and Buildings. 2016, 128: 56-67.

[29] Christantoni D, Flynn D, Finn D P. Modelling of a Multi-purpose Commercial Building for Demand Response Analysis[J]. Energy Procedia. 2015, 78: 2166-2171.

[30] Zhang R, Hong T. Modeling of HVAC operational faults in building performance simulation[J]. Applied Energy. 2017, 202: 178-188.

[31] Horrigan M, Turner W J N, O Donnell J. A statistically-based fault detection approach for environmental and energy management in buildings[J]. Energy and Buildings. 2018, 158: 1499-1509.

[32] Aftab M, Chen C, Chau C, et al. Automatic HVAC control with real-time occupancy recognition and simulation-guided model predictive control in low-cost embedded system[J]. Energy and Buildings. 2017, 154: 141-156.

[33] Zhao J, Lam K P, Ydstie B E, et al. Occupant-oriented mixed-mode EnergyPlus predictive control simulation[J]. Energy and Buildings. 2016, 117: 362-371.

[34] Ma J, Qin J, Salsbury T, et al. Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control[J]. Chemical Engineering Science. 2012, 67(1): 92-100.

[35] Yan D, O Brien W, Hong T, et al. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges[J]. Energy and Buildings. 2015, 107: 264-278.

[36] 燕达，丰晓航，王闯，等. 建筑中人行为模拟研究现状和展望[J]. 建筑科学. 2015(10): 178-187.

[37] 李兆坚，江亿. 住宅空调方式的夏季能耗调查与思考[J]. 暖通空调. 2008(02): 37-43.

[38] 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析关[J].

[39] Lee B, Trcka M, Hensen J L M. Building energy simulation and optimization: A case study of industrial halls with varying process loads and occupancy patterns[J]. Building Simulation. 2014, 7(3): 229-236.

[40] Fabi V, Andersen R V, Corgnati S P, et al. A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings[J]. Building Simulation. 2013, 6(4): 415-427.

[41] Voss C F. Monitoring Manual Control of Electric Lighting and[J]. Lighting Research & Technology. 2003, 35(3): 243-258.

[42] Al-Mumin A, Khattab O, Sridhar G. Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences[J]. Energy & Buildings. 2003, 35(6): 549-559.

[43] Yang Z, Becerik-Gerber B. Modeling personalized occupancy profiles for representing long term patterns by using ambient context[J]. Building and Environment. 2014, 78: 23-35.

[44] Yang Z, Becerik-Gerber B. Assessing the impacts of real-time occupancy state transitions on building heating/cooling loads[J]. Energy and Buildings. 2017, 135: 201-211.

[45] 王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究[D]. 清华大学, 2014.

[46] O Brien W, Gunay H B, Tahmasebi F, et al. A preliminary study of representing the inter-occupant diversity in occupant modelling[J]. Journal of Building Performance Simulation. 2016: 1-18.

[47] Page J, Robinson D, Morel N, et al. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence[J]. Energy & Buildings. 2008, 40(2): 83-98.

[48] Yu Z, Fung B, Haghighat F, et al. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption[J]. Energy & Buildings. 2011, 43(6): 1409-1417.

[49] Abreu P H, Silva D C, Amaro H, et al. Identification of Residential Energy Consumption Behaviors[J]. Journal of Energy Engineering. 2016, 142(4): 4016005.

[50] Ren X, Yan D, Hong T. Data mining of space heating system performance in affordable housing[J]. Building & Environment. 2015, 89: 1-13.

[51] 丰晓航. 面向应用的建筑中随机人行为模拟方法研究[D]. 清华大学, 2017.

[52] Schweiker M, Shukuya M. Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions[J]. Building & Environment. 2009, 44(10): 2137-2149.

[53] Haldi F, Robinson D. Interactions with window openings by office occupants[J]. Building & Environment. 2009, 44(12): 2378-2395.

[54] Carmo C M R D, Christensen T H. Cluster analysis of residential heat load profiles and the role of technical and household characteristics[J]. Energy & Buildings. 2016, 125: 171-180.

[55] Ahmadi-Karvigh S, Ghahramani A, Becerik-Gerber B, et al. One size does not fit all: Understanding user preferences for building automation systems[J]. Energy and Buildings. 2017, 145: 163-173.

[56] Jin W M, Han S H. Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings[J]. Energy & Buildings. 2011, 43(2–3): 338-346.

[57] Urban B, Elliott D, Sachs O. TOWARDS BETTER MODELING OF RESIDENTIAL THERMOSTATS[J]. Simbuild. 2012.

[58] Endravadan M, Thellier F, Bedrune J P. Modelling of occupant-controlled global heating in buildings[J]. 2004.

[59] 简毅文，江亿. 住宅房间空调器运行状况的调查分析[J]. 供热制冷. 2005(6): 66-68.

[60] Nagy Z, Yong F Y, Schlueter A. Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption[J]. Energy and Buildings. 2016, 126:

310-322.
[61] Window opening behavior of occupants in residential buildings in Beijing[J].
[62] 李翠，李峥嵘，肖琳. 建筑遮阳调节行为特性研究[J]. 建筑科学. 2015(10): 218-221.
[63] 潘嵩，许传奇，魏绅，等. 北京某高校办公建筑人员开窗行为研究[J]. 建筑科学. 2015(10): 212-217.
[64] 陈伟煌. 夏热冬冷地区夏季热舒适状况及居民开窗行为研究[D]. 湖南大学, 2009.
[65] 范瑞娟. 基于蒙特卡罗方法的重庆地区过渡季节办公建筑人员开窗行为研究[D]. 重庆大学, 2013.
[66] Melfi R, Rosenblum B, Nordman B, et al. Measuring building occupancy using existing network infrastructure[C]. 2011.
[67] Hong T, Taylor-Lange S C, D Oca S, et al. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings[J]. Energy and Buildings. 2016, 116: 694-702.
[68] Bing Dong M B K M. Sensing and Data Acquisition[M]. Exploring Occupant Behavior in Buildings, Wagner A. O B W D, Springer, Cham, 2018.
[69] Gunay H B, O'Brien W, Beausoleil-Morrison I. A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices[J]. Building and Environment. 2013, 70: 31-47.
[70] Yan D, Hong T, Dong B, et al. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings[J]. Energy and Buildings. 2017, 156: 258-270.
[71] Ajzen I, Fishbein M. Attitude-behavior relations: A theoretical analysis and review of empirical research.[J]. Psychological Bulletin. 1977, 84(5): 888-918.
[72] Boomsma A. The robustness of LISREL against small sample sizes in factor analysis models[M]. 1982: 149-173.
[73] Bentler P M, Chou C P. Practical Issues in Structural Equation Modeling[J]. Sociological Methods & Research. 1987, 16(1): 187-196.
[74] Kline R B. Principles and Practice of Structural Equation Modeling, Second Edition[J]. 2004.
[75] Jackson D L. Revisiting Sample Size and Number of Parameter Estimates: Some Support for the N:q Hypothesis[J]. Structural Equation Modeling A Multidisciplinary Journal. 2003, 10(1): 128-141.
[76] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 公共建筑节能设计标准 [S]. 2015.
[77] Kempton W. Two theories of home heat control[J]. Cognitive Science. 1986, 10(1): 75-90.
[78] Jia M, Srinivasan R S, Raheem A A. From occupancy to occupant behavior: An analytical survey of data acquisition technologies, modeling methodologies and simulation coupling mechanisms for building energy efficiency[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2017, 68: 525-540.
[79] Richardson I, Thomson M, Infield D, et al. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model[J]. Energy and Buildings. 2010, 42(10): 1878-1887.
[80] Widén J, Wäckelgård E. A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand[J]. Applied Energy. 2010, 87(6): 1880-1892.
[81] 手塚集. Uniform random numbers : theory and practice[M]. Kluwer Academic Publishers, 1995.
[82] Cplusplux. function rand[Z].: 2018.

[83] Nrel V D N L. EnergyPlus[Z]. 2018: 2018.
[84] Energy U D O. DOE-2[Z]. 2018: 2018.
[85] Enegyplus. GettingStartedwith EnergyPlus[Z]. 20134.
[86] Energyplus. EnergyPlus Engineering Reference[Z]. 2013.
[87] Marija Trcka M W J H. COMPARISON OF CO-SIMULATION APPROACHES FOR BUILDING AND HVAC/R SYSTEM SIMULATION[Z]. 2007.
[88] Panasonic. Panasonic Air Conditioning[Z]. 2012: 1.
[89] Foundation F S. GDB: The GNU Project Debugger[Z]. 2018: 2018.

附录 A EnergyPlus 输出文件处理代码

EnergyPlus 包含所有输出变量值的文件为.eso 文件，其中第一部分为标题部分，包含了时间标签以及各个热区输出变量的名字及对应的编号。第二部分为模拟变量部分，每行第一个数值为变量对应的编号，编号后为变量对应的数值。因此，在对输出文件进行处理时，我们首先要制定哪些变量需要存入输出文件以及时间标签所在行编号。接下来程序在对输出文件标题部分进行读取时，每读到一行需要输出的数据名，就将其行编号存入字符串向量中，并将变量名作为最终输出文件的行标题输出。在对输出文件模拟变量进行读取时，每读一行将该行行编号与存入的行编号进行对比，若符合则将数据存入，如不符合则读取下一行。如此循环直至文件结尾。具体执行代码如下：

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <vector>
#include <algorithm>
using namespace std;

// 将字符串根据分隔符拆分
vector< string> split(string str, string pattern);
// 读取一行数据
vector<string> readLineSave(ifstream &infile);


int main(){
    //定义变量
    char filename[256]; //文件名
    vector<string> temp_1;
    string timeLine("0");
    vector<string> recordLine;
    // 输出变量含有的关键词
    string temp("Zone Air Temperature");
    string PLR("Unitary System Part Load Ratio");
    string Power("Cooling Coil Electric Power");
    int column =0;
    int count=0;
    bool titleFlag = true;

    //指定输入输出文件
```

```
    cout << "please enter input file name:" << endl;
    cin >> filename;
    // Line number
    cout << "enter time stamp line number:" << endl;
    cin >> timeLine;
    ifstream infile(filename,ios::in);
    ofstream outfile;
    outfile.open("output filename",ios::out);

    //open succeed
    if (infile.is_open()){
        while(!infile.eof() ){

            if(column ==0){
                temp_1 = readLineSave(infile);
                column ++;
            }

            // 读取行标题并写入
            if(temp_1[0] != "End of Data Dictionary" && titleFlag) {
                if (temp_1[0] == timeLine) {
                    for (int i = 3; i <= 9; i++)
                        outfile << temp_1[i] << ",";
                    temp_1 = readLineSave(infile);
                } else if (temp_1.size() > 3) {
                    string::size_type index_temp = temp_1[3].find(temp);
                    string::size_type index_Power = temp_1[3].find(Power);
                    string::size_type index_PLR = temp_1[3].find(PLR);
                    if (index_temp != string::npos || index_Power != string::npos ||
index_PLR != string::npos ) {
                        outfile << temp_1[2] << " " << temp_1[3] << ",";
                        recordLine.push_back(temp_1[0]);
                        cout << recordLine[count] << endl;
                        count++;
                    }
                    temp_1 = readLineSave(infile);
                } else {
                    temp_1 = readLineSave(infile);
                }
            }else{
                titleFlag = false;
            }

            //读取输出文件内容
```

```
                if(!titleFlag){
                    if(temp_1[0]== timeLine){
                        outfile<<endl;
                        for (int i = 2; i <= 8; i++)
                            outfile <<temp_1[i] << ",";
                        temp_1 = readLineSave(infile);
                    }else{
                        vector<string>::iterator iter;
                        iter = find(recordLine.begin(),recordLine.end(),temp_1[0]);
                        if(iter != recordLine.end()){
                            outfile<< temp_1[1]<<",";
                            temp_1 = readLineSave(infile);
                        }else{
                            temp_1 = readLineSave(infile);
                        }
                    }
                }
            }
        }
        //open failed
        else
        {
            cout << "File open fail" << endl;
            return -1;
        }
        cout<<"count="<<count<<endl;
        cout<<"recordLine size="<< recordLine.size()<<endl;
        cout<< titleFlag<<endl;
        outfile.close();
        infile.close();
        return 0;
}

vector<string> split(string str, string pattern)
{
        vector<string> ret;

        //if(pattern.empty()) return ret; here should be str is empty
        if(str.empty()) return ret;

        size_t start=0,index=str.find_first_of(pattern,0);
        while(index!=str.npos)
        {
            if(start!=index)
```

```
                ret.push_back(str.substr(start,index-start));
            start=index+1;
            index=str.find_first_of(pattern,start);
        }
        if(!str.substr(start).empty())
            ret.push_back(str.substr(start));
        return ret;
}

vector<string> readLineSave(ifstream &infile)
{
        vector<string> result;
        string value;
        getline(infile,value);
        string pattern = ",";
        result = split(value, pattern);
        return result;
}
```

附录 B 分体机模型修改代码

代码插入到 EnergyPlus 源代码中 HVACUnitarySystem.cc 源文件中。位置为 ControlCoolingSystemToSP 函数（此为制冷函数，供热同理为 ControlHeatingSystemToSP）末尾，指定系统部分负荷率代码之前。当系统不处于预热模拟阶段且用户选择的盘管类型为单速直膨盘管时，根据函数计算出的部分负荷率 PLR 进行机组启停的判断。若当前时间步长的 PLR 高于限值时，设定部分负荷率为 1，空调满负荷开启。若当前时间步长的 PLR 不超过限值，则设定当前部分负荷率为 0，空调关闭。

```
//制冷
 if(CoilType_Num == CoilDX_CoolingSingleSpeed && ! WarmupFlag){
     if(PartLoadFrac >= PLR 限值){
         DisplayString("PLR=" + TrimSigDigits(PartLoadFrac,2));
         PartLoadFrac = 1.0;
         UnitarySystem( UnitarySysNum ).CompPartLoadRatio = PartLoadFrac;
     }else{
             DisplayString("PLR=" + TrimSigDigits(PartLoadFrac,2));
         PartLoadFrac = 0.0;
         UnitarySystem( UnitarySysNum ).CompPartLoadRatio = PartLoadFrac;
     }
 }else{
 }

//制热
if(CoilType_Num == CoilDX_HeatingEmpirical && ! WarmupFlag){
     if(PartLoadFrac >= PLR 限值){
         DisplayString("PLR=" + TrimSigDigits(PartLoadFrac,2));
         PartLoadFrac = 1.0;
         UnitarySystem( UnitarySysNum ).CompPartLoadRatio = PartLoadFrac;
     }else{
             DisplayString("PLR=" + TrimSigDigits(PartLoadFrac,2));
         PartLoadFrac = 0.0;
         UnitarySystem( UnitarySysNum ).CompPartLoadRatio = PartLoadFrac;
     }
 }else{
 }
```

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历：

徐蕾，女，1992 年 12 月生。

2015 年 7 月毕业于同济大学　建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2015 年 9 月入同济大学，攻读硕士研究生学位。

已发表论文：

[1]Lei Xu, Yiqun Pan, Yuan Yao, Dandan Cai, Zhizhong Huang, Norber Linder. Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. Energy and Buildings, 2017, 138:127-139

[2]Lei Xu, Yiqun Pan, Meishun Lin, Zhizhong Huang. Community load leveling for energy configuration optimization: methodology and a case study. Sustainable Cities and Societies, 2017, 35:94-106

[3]Lei Xu, Yiqun Pan, Meishun Lin, Zhizhong Huang. Community load prediction: methodology and a case study. The 10th International Symposium on Heating Ventilation and Air Conditioning, 2017

待发表论文：

[1] 徐蕾，潘毅群. 智能酒店客房末端控制系统节能潜力分析模型与软件开发. 2017 年全国暖通空调模拟学术年会（已接收）