同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

（专业学位）

办公空间空调使用行为多人模型研究

“十三五”国家重点研发计划项目“建筑全性能仿真平台内核开发”
（项目编号：2017YFC0702200）

姓　　名：潘媛

学　　号：1630900

所在院系：机械与能源工程学院

专业学位名称：工程

专业领域：动力工程

指导教师：潘毅群 教授

二〇一九年三月

同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master

Research on air-conditioning usage behavior modeling in multi-occupants' office

Candidate: Pan Yuan

Student Number: 1630900

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Mechanical Engineering

Major: Power Engineering

Supervisor: Prof. Pan Yiqun

March, 2019

办公空间空调使用行为多人模型研究

潘　媛

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

多样性的人员用能行为是决定建筑能耗的关键因素，科学评估人行为对系统性能、建筑用能的影响，对于能耗模拟技术在实际工程中的应用具有重要意义。由于人员空调使用行为具有随机性、差异性等特点，造成行为的定量化描述较为困难，尤其是多人办公室空间中，空调使用行为还受到不同角色人员之间的交互影响，目前尚未有合适的模型进行准确描述。针对能耗模拟中对多人行为刻画不够准确、未考虑办公建筑人员之间交互影响的用能行为等问题，本文基于广泛调研和案例测试，提取典型空调行为模式，建立办公空间中空调使用行为的多人模型，在 DeST 软件中实现对多人动作及空调运行状态的模拟计算，从而反映行为的个体差异性与群体统一性的真实、复杂特征，同时满足能耗模拟中对人行为影响的准确分析和科学评估。

为了获得不同人员行为习惯及特征的描述，本文着眼于典型行为模式研究，通过科学严谨的问卷调研方法，获取四个气候区办公建筑中大量人员的空调行为特征数据，提取可应用于能耗模拟的典型行为模式及其人群分布。同时，有针对性地开展办公空间案例测试，建立空调动作与驱动因素之间的函数关系，从而对办公室内各人员的空调行为进行定量化描述。

考虑人行为的多样性和人与人之间的交互关系对空调行为的影响，本文提出多人行为的模型方法，利用直觉模糊偏好关系来描述个体行为偏好及意愿，通过主观评价方法构建反映多人之间社会关系的层次结构，并结合群体决策方法对多人商议过程进行刻画，从而建立多人模型。在此基础上，本文实现对多人行为的模拟计算，通过 obFMU 接口形式将多人模型集成到现有能耗模拟软件 DeST 中，从而获得多人办公空间的空调运行状态时间表。

本文对两间多人办公案例的空调行为进行模拟，结合随机过程检验方法，利用测试数据对模拟结果进行评估和验证，结果显示案例实际的空调运行状态指标均落在多次模拟结果的置信区间内，多人模型可有效适用于群体关系及行为模式的描述与空调运行状态的模拟。此外，与 DeST 软件中现有模型的模拟结果进行对比，本文提出的多人模型能够实现对多人房间中空调运行作息更加准确的模拟。

初步的研究成果表明，本文提出的多人模型能够对多人办公空间中的群体关系和空调行为模式进行定量化描述，同时能够实现对多人空调使用行为和设备运行状态更为准确的模拟计算。

关键词：空调使用行为，多人模型，人行为模拟，办公空间

ABSTRACT

Occupant behavior is non-negligible in the study of building energy consumption. Reflecting the impact of diverse occupant behavior on building energy consumption is of great significance for the practical application of energy simulation technology. In the multi-occupants office space, the behavior is affected by individual preference as well as the interaction between different occupants, and yet there is no suitable model to characterize the behavior. Based on large-scale survey and behavioral measurement, this paper extracted typical air-conditioning behavior patterns. The multi-occupants model of air-conditioning usage behavior in office space was proposed and implemented in DeST software to simulate the multi-occupants behaviors and air-conditioning operations.

In order to obtain the behavior habits and characteristics of different people, this paper focuses on the study of typical behavior patterns. This paper obtained the air-conditioning behavior data of a large population in office buildings through questionnaire survey methods, and extracted the typical behavior patterns and their population distributions. Meanwhile, the behavior measurement was carried out in office space and the functional relationship between the air-conditioning usage behavior and the driving factors was established, thus quantitatively describing the air conditioning behavior of each occupant in the office.

This paper proposed a novel method of air-conditioning usage behavior modeling in multi-occupants office, using intuitionistic fuzzy preference relationship to describe individual behavioral preferences, and constructing a hierarchical structure that reflects the social relationship among multiple occupants through subjective evaluation methods. The multi-occupants negotiation process was solved by intuitionistic fuzzy group decision-making method. On this basis, this paper integrated the model into the existing building energy simulation software DeST, and calculated the air-conditioning operation schedule of the multi-occupants office.

In this paper, the air-conditioning behavior of two multi-occupants office cases were simulated and the measurement data were used to verify the simulation results. The results showed that the multi-occupants model were effective and accurate in describing group relationships and behavior patterns, and can be applied to the simulation of air-conditioning operations. In addition, compared with the simulation

results of the existing models in DeST, the multi-occupants model could achieve a more accurate simulation of air-conditioning operations in multi-occupants office.

Preliminary research results showed that the multi-occupants model proposed in this paper can quantitatively characterize the group relationships and air-conditioning behavior patterns in multi-occupants office space, and realized a more accurate simulation of air-conditioning behavior and equipment operations.

Key Words: Air-conditioning usage behavior, multi-occupants' model, occupant behavior modeling, office space

目录

摘要 I
ABSTRACT II
第 1 章 绪论 6
1.1 课题背景 6
1.2 研究目的与意义 8
1.3 国内外研究现状 8
1.3.1 典型行为模式研究现状 9
1.3.2 单人动作模型研究现状 10
1.3.3 多人动作模型研究现状 13
1.4 研究内容及技术路线 15
1.4.1 研究内容 15
1.4.2 技术路线 15
1.5 本章小结 16
第 2 章 空调行为问卷调研与典型行为模式提取 17
2.1 问卷设计与样本抽样 17
2.2 问卷的信度效度检验 19
2.3 基于聚类分析的典型行为模式提取方法 21
2.4 空调使用行为问卷调研案例 23
2.4.1 调研问卷与初步结果分析 23
2.4.2 空调典型行为模式的提取 27
2.5 本章小结 31
第 3 章 人员空调使用行为案例测试与结果分析 32
3.1 人员空调使用行为测试方法 32
3.2 案例测试对象 33
3.3 测试结果与分析 34
3.2.1 空调开关行为 35
3.2.2 设定温度调节行为 40
3.4 研究案例的空调行为模型建立 41
3.4.1 办公室 A 的空调行为模型 41

3.4.2 办公室 B 的空调行为模型 44
3.4.3 基于个体的行为模型建立 47
3.5 本章小结 51
第 4 章 多人空调使用行为模型的建立 52
4.1 多人空调行为模型方法 52
4.1.1 描述个体行为意愿的直觉模糊偏好关系 53
4.1.2 个体权重确定方法 56
4.1.3 基于直觉模糊层次分析法的群体决策方法 59
4.2 多人模型的模拟方法 60
4.2.1 计算过程及简单算例 60
4.2.2 多人模型的模拟流程 63
4.3 本章小结 66
第 5 章 多人办公空间空调使用行为模拟案例 67
5.1 案例设置 67
5.2 模拟结果评价方法 69
5.3 空调使用行为模拟结果 71
5.3.1 办公室 A 的模拟结果 71
5.3.2 办公室 B 的模拟结果 75
5.4 多人模型与 DeST 现有模型对比 79
5.5 本章小结 83
第 6 章 结论与展望 84
6.1 主要成果 84
6.2 进一步研究方向 85
致谢 86
参考文献 87
附录 A 多人模型模拟代码 92
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 104

第 1 章 绪论

1.1 课题背景

社会、科技与人类的发展离不开能源和资源的驱动力。全球经济迅猛发展，城市化进程加快使建筑的能源消耗量急剧上升，伴随能源危机而来的是日益严重的环境污染问题。能源、资源和环境问题的日益严峻使节能减排工作成为当务之急。一直以来，各国的建筑用能都在总能源消耗中占据相当可观的比重。据统计，全球 30%的能源被用于建筑采暖、通风和照明[1]。在美国，超过 40%的一次能源被商业建筑和居住建筑所消耗；而我国将近 20%的社会总能耗被用于建筑运行[2]，具有巨大的节能潜力。

建筑用能水平通常与其热工性能、室外气象条件、系统设备、以及人员行为密切相关。这些因素之间的相互影响，尤其是建筑运行阶段的人员行为与建筑环境之间的相互作用，导致不同建筑的用能水平存在巨大差异。建筑中人的行为包括人员活动、对室内环境参数的调节、用能设备的运行管理等，建筑的运行状况及能耗与人的行为密切相关。Santin 等[3]利用回归模型分析了荷兰住房部的公共数据集，得出住宅人员的特征和行为显著影响住宅能耗水平（造成 4.2％的供暖能耗差异）的结论。Masoso 和 Grobler[4]通过对非洲 6 栋办公建筑的能源审计发现，非工作时间或无人在室时间消耗的建筑能源占总能耗的 65%，很大程度上是由于办公人员在下班前没有关闭照明灯具或用电设备（图 1 － 1）。Zhou 等人[5]研究发现相比室外照度，人员作息时间表对大型办公楼的照明能耗的影响更显著。

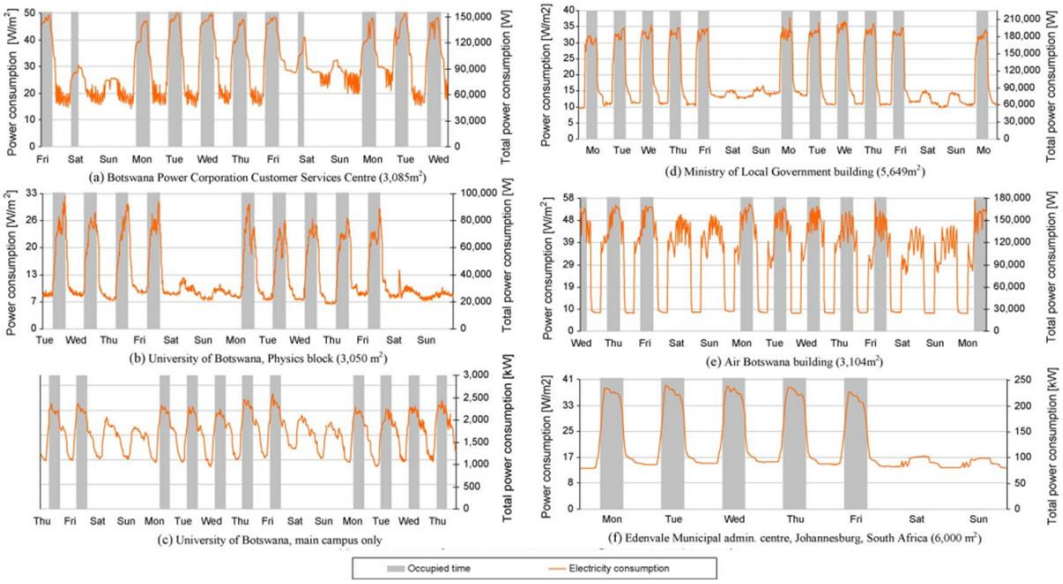
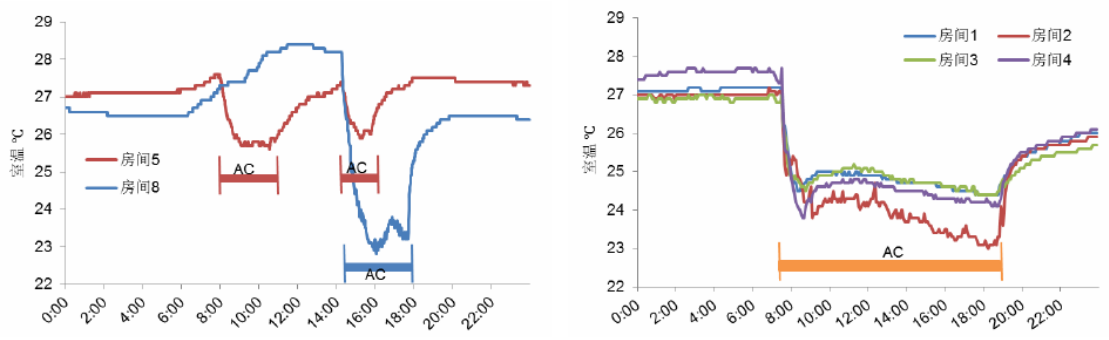


图 1 － 1 办公建筑逐时用电量水平与人员在室情况[4]

由于生活作息、偏好习惯的不同，不同人员表现出的行为各不相同。特别是在系统形式灵活可控的情况下（如分散式空调），室内人员对各种用能设备的调节和控制，导致建筑用能水平的显著不同。王闯[6]调研了北京市采用不同空调系统的办公建筑，发现不同房间末端的室内温度设定和空调开启时间与人员使用模式密切相关（图 1- 2）。Ouyang 和 Hokao[7]对比了经过节能教育培训的家庭和未培训家庭的用电量，发现改变用能行为的平均节能潜力可达到 14.8%。因此，建筑能耗研究中不可忽视人行为的影响。在同等的建筑系统形式和气候条件下，建筑用能水平很大程度上取决于人员使用行为。要准确分析和评估建筑能耗，就必须仔细考虑实际建筑的使用方式和人行为。



(a) VRF 末端：需要时开、不需要时关　　(b) VAV 末端：工作时段一直开

图 1- 2 北京某办公楼空调系统的实际使用情况[6]

建筑能耗模拟是利用计算机仿真建筑环境、热工性能、设备系统的技术，它是建筑节能设计和改造评估的重要分析工具，也可以用于建筑运行阶段的系统优化控制。然而，根据对 LEED 建筑能耗情况的调查[8]，模拟计算的能耗结果与建筑实际用能水平之间存在一定差异，对模拟技术的实际应用产生限制。模拟与实际能耗的偏差很大程度上是由于模拟技术对建筑中人行为的描述还不够完善，难以准确反映人行为对建筑用能水平的影响，也难以体现一些节能措施结合人员使用模式所带来的实际节能潜力。由于人行为因素造成的模拟和实际能耗产生偏差，对模拟工具在节能设计、能耗评估等方面的可靠性提出挑战。

随着能耗模拟软件的广泛使用及其应用范畴的拓宽，对其模拟的准确性提出了更高的要求，需要其能更准确地反映影响系统设备的建筑能耗和人员行为。如何实现人行为的准确刻画和科学计算，已成为建筑能耗模拟技术中亟待解决和必须攻克的难题。

建筑模拟中的人行为包括人员位移和人员动作，人员位移即人员在建筑物内的随机移动过程；人员动作包括对窗户、采暖、空调、照明、电气设备等的使用和调节行为[9]。近年来，如何刻画建筑中的人员行为成为研究热点。Annex 66 为

人行为研究建立了科学的理论框架，包括行为数据收集、行为描述与模型建立、模型评估方法、以及与建筑模拟软件集成四个方面[10]。目前国内外的人行为研究主要针对办公建筑和住宅中的行为。人行为的研究从最初的关注建筑整体水平的人员数量，到房间水平的在室状态与人员分布，到如今的单个人员移动过程追踪和对窗户、采暖空调、遮阳等的使用行为模拟。

结合马尔科夫链，我们能够模拟每个人的随机位移过程并确定其在某个时刻的空间位置；而对于人员动作模拟，目前的研究多着重于单人动作的刻画，很少考虑房间内存在不同角色人员对调控行为产生的干预和互相影响。单人动作模型不能直接拓展至房间内存在多个人的情况，因为人与人之间的社会关系和交互影响会导致空调使用行为的驱动因素和概率分布都有所改变。

因此，本课题将重点研究人员之间的交互作用和社会关系对空调行为的影响，建立多人空调行为的模拟计算模型，从而预测房间空调的开关状态和运行作息，使其能够反映人员个体独立性与群体决策的真实、复杂的特征，同时满足能耗模拟中人行为的准确刻画和科学评估。

1.2 研究目的与意义

能耗模拟技术目前被广泛应用于绿色建筑设计、运行优化和节能改造领域，人员行为是影响建筑能耗的关键因素，也是建筑节能技术评估的参考基准。本研究基于广泛调研总结典型空调使用行为模式，研究多人办公室空调使用行为模拟模型，为建筑用能与室内环境状况的预测、优化和评价提供客观准确的科学定量依据。其意义不仅仅是提高能耗模拟技术的准确性，对于解决人行为模拟在工程中的应用壁垒也具有重要价值。在工程设计、标准编制时，需要采用具有广泛人群代表性的典型模式作为模拟的基准输入，确保模拟结果能够反映我国建筑的实际用能水平。

同时，办公建筑的空调系统设计以及节能措施需要与人员用能模式相适应。多人办公室中，空调使用行为不仅与环境刺激和个人习惯有关，还受到不同角色人员之间的交互影响，而目前的研究难以定量刻画多人交互的动作行为特点。本研究将建立多人空调行为的模拟模型，预测空调开关状态及运行时间表，从而实现对多人员行为的定量描述和模拟计算。建筑能耗研究和节能工作对模拟工具的可靠性要求很高，因此准确模拟办公建筑人员的空调使用行为十分必要。

1.3 国内外研究现状

由前文的背景介绍可以看到，建筑能耗模拟技术在建筑设计、节能评估等实际工程中具有广泛的应用，提升模拟工具的准确性和可靠性十分必要；人员行为对建筑能耗水平的影响及其评估方法也日益受到广泛关注和重视。因此，本节关于国内外研究现状将分为以下三部分展开：

1）典型行为模式研究现状

2）单人动作模型研究现状

3）多人动作模型研究现状

1.3.1 典型行为模式研究现状

与其它确定性的输入参数有所不同，建筑中人员的动作行为通常是随机进行的[11],[12]。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[13,14]。在人行为模拟的实际应用中，例如节能设计和标准制定，通常需要能够反映大多数人行为特征的典型行为模式作为模拟输入或是评价基准。尤其在多人办公空间中，每个成员的空调使用行为习惯各有不同，需要应用典型行为模式来描述各人的行为特征。

为了从多样化的行为中归纳出典型行为模式，随着监测技术和数据分析手段的发展，国内外学者提出了若干种方法。从数据获取方法上来看，关于典型行为的研究可分为案例实测和问卷调研两种。

Yu 等[15]基于日本 80 户不同地区的住宅能耗监测数据，采用聚类分析方法对人行为产生的能耗影响进行分类，并且考虑了不同属性间的关联性和加权系数。

Ren 等[16]对美国 62 户住宅的采暖设定温度和系统运行情况进行监测，采用聚类分析和决策树的方法对住户采暖行为进行分类，提取出 6 种典型的采暖室内温度曲线，并分析了这 6 类住户对采暖系统的使用频率和时长等特征。

Carmo 等[17]基于丹麦 139 户住宅的采暖能耗实测，通过聚类分析方法对工作日和非工作日的日热负荷曲线进行分类，得到 high、medium、low demand 三种采暖使用模式。

O’Brien 等[18]对加拿大 16 间单人办公室的人员在室情况进行监测，并且基于 Page 等[19]的位移模型对实测数据进行拟合，获得单人模型所需的特征参数。在此基础上提出模拟位移行为多样性的方法，并通过聚类分析得到几种不同的人员位移曲线。

上述研究中，采用案例测试结合数据挖掘来的方法来描述典型行为模式，一方面受限于实测案例的覆盖面，难以说明获得模式的代表性，另一方面，根据表象的能耗数据对使用模式进行分类，缺乏对人员行为本身的刻画和描述，也就无

法对行为特征本身进行分类。为了获得基于大范围人群统计的行为特征数据，典型行为模式的研究中引入了问卷调查的方法。

Andersen 等[20]分别在冬夏两季对住宅人员的室内环境控制行为进行问卷调研，调查内容包括窗户、采暖设备、照明、遮阳的开关情况，并采用多重逻辑回归方法分析人员行为的各项影响因素。

Santin[21]基于荷兰 313 户住宅的用能行为和建筑特征调研，通过五个潜在的行为变量将住户行为划分为高能耗型、自然通风型、节能取暖型、舒适型、机械通风型 5 类，并给出了建筑特征与行为变量的相关关系。

Diao 等[22]获取了美国时间使用调查（ATUS）和住宅能耗调研（RECS）数据，采用 k-modes 聚类与概率神经网络相结合的无监督聚类方法，将住户在家里的活动状态进行分类（包括离家、睡觉、炊事、打扫等），识别出 10 种不同的居家行为模式和相应的时间表。

丰晓航[23]从问卷调研数据得到定量化的行为模式参数，以不同模式模拟得到的采暖能耗作为样本，通过聚类分析得到若干种代表不同能耗水平的类别，以及这些类别在人群中的比例。这种以能耗作为行为模式分类依据的方法，为典型模式的提取提供了新的思路。

问卷调研能够获得关于大范围人群行为本身的描述，例如在何种环境下会开关空调、调节设定温度的频率和幅度等。但是要将调研结果应用于能耗相关的人行为模拟中，需要结合定量指标来衡量不同行为模式之间的差异，例如开空调的具体温度、对降温速率的要求等。同时，由于对问卷结果缺乏严谨的验证过程，难免使人对问卷调研的可靠性提出质疑。

因此，为了广泛收集人员行为特征的基础数据，提取可应用于能耗模拟的典型行为模式及其人群分布，需要制定科学的问卷设计和调研方法，并且与人行为监测手段相结合，从定性和定量相结合的角度对行为模式进行分类和描述，以用于人行为模拟。

1.3.2 单人动作模型研究现状

从人行为模拟的不同应用层面来分，可将模型分为四个层面[24]：1）传统能耗模拟中大多采用固定作息表来描述建筑层面的照明、设备运行状态和总人数；2）关注空间层面的人员在室状态，即在某个时刻房间内是否有人，根据人员在室与否来确定用能设备的运行时间表；3）研究空间层面的人员数量，即在某个时刻房间内有多少人，人员数量信息可以提高建筑负荷计算与能耗预测的准确性；4）最详细的人行为模型可以做到在空间层面追踪某个人的位移过程和动作行为，使行为成为定义在个体身上的自身属性，以反映其真实的行为动机和过程。

从模型建立的方法上来看，单人动作模型可分为确定性模型、回归模型、随机模型和数据挖掘模型。

确定性模型，包括固定作息法和阈值模型。这类模型的特点是在同一时刻或相同环境下，人员动作的发生与否是确定的。Moon 等[25]研究了住宅空调的待机时间、设定温度和待机温度对建筑能耗的影响，沿用作息表的方式描述室内设定温度的变化情况。简毅文等[26]通过对北京 42 户住宅空调使用行为调研发现，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、照度等环境因素高于或者低于一定阈值的时候。

回归模型可分为基于状态和基于动作两种。基于状态的回归模型以大量的测试案例数据为基础，建立设备状态（如空调开启率）与物理参数之间的回归关系。例如，Schweiker 等[27]基于日本 320 户单人间的空调和采暖使用情况实测，采用 Logistic 回归通过平均室外空气温度预测夜间空调开启比率，并加入人员主观行为习惯对模型进行补充。徐蕾等[28]通过监测温控器数据统计得到酒店客房空调设定温度的分布规律，在模拟时采用蒙特卡洛法生成空调设定温度时间表。这类模型计算得到的设备状态虽然在全年或全楼尺度上服从统计意义，但是各个时刻的设备状态不具备时间上的连贯性。

基于动作的回归模型则建立动作发生概率（如开空调动作）与驱动因素之间的关联式，例如，Yasue[29]等采集住宅中的空调运行和室内温度数据，利用 sigmoid 函数来描述室内温度和开关空调概率之间的关系。Haldi 和 Robinson[30]基于瑞士 8 栋办公建筑的长期测试数据，采用 logistic 回归模型对人员自身调节行为（衣着、活动和喝水）和环境调控行为（门窗、风扇和遮阳）的发生概率进行预测。此类模型可以保证设备开关状态的交替执行，但通常是基于大样本群体数据的统计结果，仅能反映大量人员行为的平均特征，无法描述个体行为特征。

随机模型也可分为基于状态和基于动作两种。基于状态的随机模型利用 Markov 转移概率来描述设备状态的变化过程，转移概率是环境、时间等物理参数的函数。Tanimoto 等[31]利用两状态马尔可夫链，通过室内外温度来模拟预测房间空调状态从开到关或者从关到开的转移概率。Yun 和 Steemers[32]选取室内温度和上一时刻窗户状态作为自变量，利用转移概率模型来判断窗户状态发生改变的概率。这类模型能够保证设备状态的时间连贯性，但当房间内人员组成变化时，对设备状态产生的动作结果也随之变化，需要建立新的马氏过程来描述。

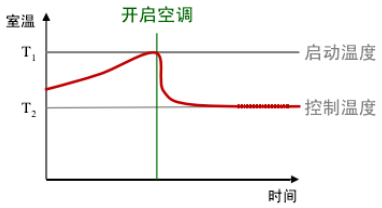
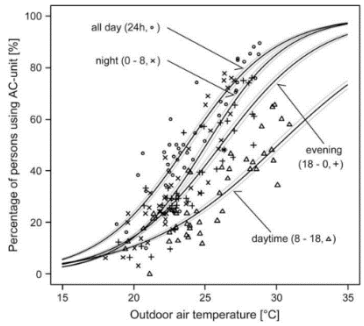
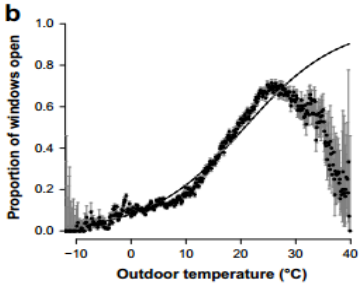
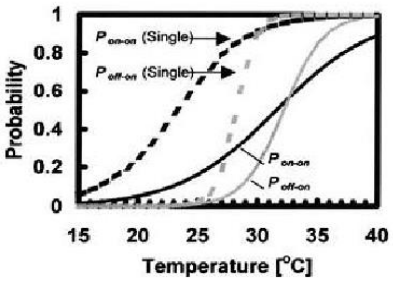
基于动作的随机模型以王闯[33]和任晓欣[34]提出的条件概率模型为代表。该模型的动作触发条件为时间和环境因素，对于开关空调、照明、窗户等动作，分别构建动作发生概率与触发条件之间的函数关系式。此类模型采用基于个体和动作的描述方式，能够反映个体行为特征的随机性和多样性，对不同动作的描述具

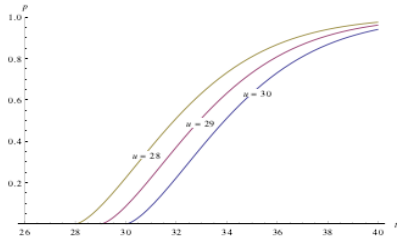
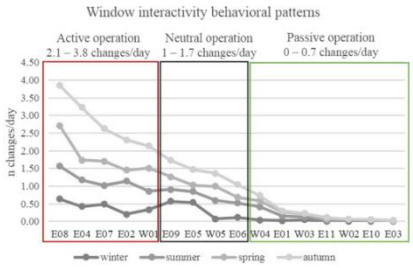
有很好的可扩充性。其局限性在于概率曲线仅与单一的环境因素有关，难以考虑多种因素的共同作用。

数据挖掘模型通过监测到的数据对行为模式进行分类和描述，Zhou 等[35]基于监测得到的环境变量（室内温度、相对湿度），采用 C4.5 决策树和曲线描述算法来识别人员对空调系统的控制行为。Magalh ães 等[36]通过 ESPr 软件模拟获得不同类型住宅和采暖行为模式下的建筑基础数据库，采用人工神经网络（ANN），建立不同行为模式下的供暖能耗和室内温度与住宅供暖需求之间的关系。但是，数据挖掘模型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。

对上述各类模型的描述方法、特点和局限性进行总结，结果如表 1- 1 所示。

表 1- 1 各类单人动作模型的对比与总结

	描述对象	数学描述方法	特点	局限性
阈值模型[26]			通过阈值来反映设备状态改变与环境因素的反馈作用	在给定的时间或环境条件下，设备状态的变化与否是确定的
回归模型[27,30],	基于状态的回归模型		利用大量实测数据，建立设备状态比例与驱动因素的统计回归关系	应用于能耗模拟时，各个时刻的设备状态不具备连贯性
	基于动作的回归模型		利用大量实测数据，建立动作发生概率与驱动因素的统计回归关系	反映大样本群体行为的平均特征，无法对个体行为进行描述和模拟
随机模型[31,33]	基于状态的马氏链随机模型		引入随机过程，利用转移概率来预测设备状态的变化	设备状态变化依赖于特定的人员构成，该模型的拓展性较差

	基于动作的条件概率模型	 (b) 热了开空调	基于个体行为特征，针对不同的触发条件建立动作发生概率与影响因素之间的函数关系	需要对个体进行长期跟踪测试，并且难以考虑多种因素的共同作用
数据挖掘模型[37]	行为模式的分类与描述		以大量数据为基础，对行为的发生频率、持续时间、能耗结果等特征进行分类	难以定量描述行为本身，无法用于人行为模拟

1.3.3 多人动作模型研究现状

以上模型主要针对单人房间的空调使用行为，并且不能直接拓展至房间内存在多个人的情况。对于多人情形，基于设备状态的模型是将房间内多个人的行为进行平均化处理，而基于动作的模型则强调个体的差异性和独立性，不考虑个体之间行为的相互影响。这类模型要么只表现出群体的共性，要么忽略个体之间的行为干预和相互影响，如果不加修正直接应用到多人房间的行为描述上，极有可能造成模拟结果“失真”的情况[38]，而无法反映多个人员的真实行为特性。

当一个房间内存在多人时，人与人之间的社会关系和交互影响会导致空调使用行为的驱动因素和概率分布都有所改变。一些研究者将人行为中受他人影响的部分进行简化[39],[40]，目前尚未有很好的模型进行刻画[41]。

Zhang 等[42]采用 Agent-based 模型来模拟办公建筑中的照明、电脑设备使用行为和用电能耗，考虑了能源管理制度、能源管理技术、电器设备和他人行为四个因素对人员行为的共同作用，认为个体与环境、与他人的相互作用导致了 Multi-agent system 的总体行为。

Lee 和 Malkawi[43]采用 Agent-based 模型来模拟办公室中的多人员行为，结合 Fanger’s PMV 模型对衣着调整、活动强度、窗户、遮阳、局部采暖使用等行为进行模拟，探究人员对动态热环境的适应过程。

Azar 和 Menassa[44]模拟办公室中不同用能习惯的人员之间的相互作用，考虑了由于环境和他人影响而导致的用能行为潜在变化，并对模拟结果进行评估。

Langevin 等[45]基于美国某中型办公楼为期一年的空调实测数据，根据知觉行为控制理论建立 Agent-based 模型模拟人员的环境适应性行为，并利用案例测试获得的个人特征和环境参数对模型进行验证，将个人和多人对风扇、采暖和窗

户使用行为的预测结果与其他几种模型进行对比。

以上研究均采用 Agent-based 模型（ABM）对房间中人员的位移和动作进行逐一模拟。ABM 将个体视为能够自主与环境及他人进行互动，并且可以基于热舒适条件产生相应行为的智能体。通过对大量数据的学习和模型训练，Agent 能够模拟人类感知、思考和行动的过程，通过感知环境并适应变化来达到某个预设的目标[46],[47]。ABM 可以结合物理机理和行为理论对个体进行详细建模，但在实际应用中，ABM 的决策流程和建模过程过于复杂，并且以高舒适低能耗作为群体行为的总体目标，与实际情况不完全相符。

Goldstein 等[48]将人机交互领域中所使用的虚拟人物的描述引入到建筑性能模拟中，来实现人员动作的个性化和多样化。在后续研究中，他们通过给不同动作行为赋予权重系数获得模型校验后的 schedule，以此反映人与人之间的交互作用和行为定制[49]。

Chapman 等[50]采用经过验证的随机模型来模拟个体的位移和动作，加入简单的折中原则来模拟不同成员之间的协商过程，并结合机器学习方法，获得多人房间供暖温度设定点的时长分布曲线。

上述研究中，多人房间的动作模拟大多结合数据挖掘的方法，或者通过赋予权重系数的方法考虑较为简化的决策过程，不涉及沟通协商等主动交换信息的过程，难以反映实际情况中人与人之间的社会关系和心理因素对空调使用行为的干预和交互作用。

社会网络分析（Social Network Analysis）被广泛应用于研究社会群体中个体之间的相互关系，通过建立网络模型来度量群体的中心性、威望、信任程度等[51]。不少研究者将其引入建筑能耗的研究领域中，研究社会心理因素对处于社会关系中的个体用能情况的影响。

Peschiera 和 Taylor[52]在一栋带有用能反馈系统的建筑进行实测，22 个房间的人员能够互相知晓各自的用电量信息，研究社会网络的特征值与个体节电量百分比的关系，并利用社会关系来激励用户的节能行为。

Chen 等[53]基于住宅用能情况实测，将 Agent-based 模型与随机网络模型相结合，利用网络模型的特征值来描述群体的人员数量和关系疏密程度，模拟建筑中用能行为的决策和信息传递过程。

Wu 等[54]引入信任关系来描述人和人之间的信息传播过程，采用模糊决策方法（Fuzzy Decision Making）来模拟多人之间的协商过程以及建议机制，为多人模型的建立提供了新思路。

在多人动作模型中，每个成员对于环境的感知和反应各有不同，对于空调使用的习惯和偏好也各不相同，动作发生之前的群体决策过程必然存在。因此，如

何将人员的社会属性与动作发生的概率相结合，反映各个成员在决策过程中的由时间和环境因素驱动的动作独立性，以及由社会心理因素驱动的群体一致性，成为本研究的重点和难点。

1.4 研究内容及技术路线

1.4.1 研究内容

针对建筑能耗模拟中对多人行为刻画不够准确、未考虑办公建筑人员之间交互影响的用能行为等问题，本文基于广泛调研和案例实测，结合群体决策方法建立多人办公空间的空调使用行为模型。本文的主要研究内容如下：

第二章基于在全国范围内开展的大规模人行为问卷调研，分析环境状态、作息时间、社会关系等因素对人员空调使用行为的影响，通过聚类分析方法，总结和提取办公建筑中典型的空调使用行为模式。

第三章通过对上海地区不同类型办公室的室内环境、空调行为进行监测，基于 DeST 软件中已有的空调动作模型对实测数据进行拟合，获得模拟计算所需的模型参数，并结合调研结果归纳若干种典型行为模式及其相应的动作概率曲线。

第四章首先研究多人使用空调时的交互影响和决策过程，利用直觉模糊理论来描述人员的行为意愿和偏好，通过层次分析法确定不同角色人员在空调使用行为中的重要性和优先级。基于以上分析，引入群体决策过程，建立办公空间中的多人空调动作模拟模型，并在 DeST 软件中实现对多人空调行为的模拟，从而获得空调系统的开关状态及运行时间表。

第五章通过在 DeST 软件中设置计算案例，对某多人办公室的空调使用行为进行模拟，将模拟结果与该办公室的实测数据进行对比，包括空调开关状态、设定点温度情况等，通过统计指标和模拟结果分布情况对多人模型进行评价。

第六章将对全文的主要工作与结论进行陈述，并针对现有工作中存在的局限性进行分析和展望。

1.4.2 技术路线

根据上述研究内容确定本文的技术路线，如图 1- 3 所示。

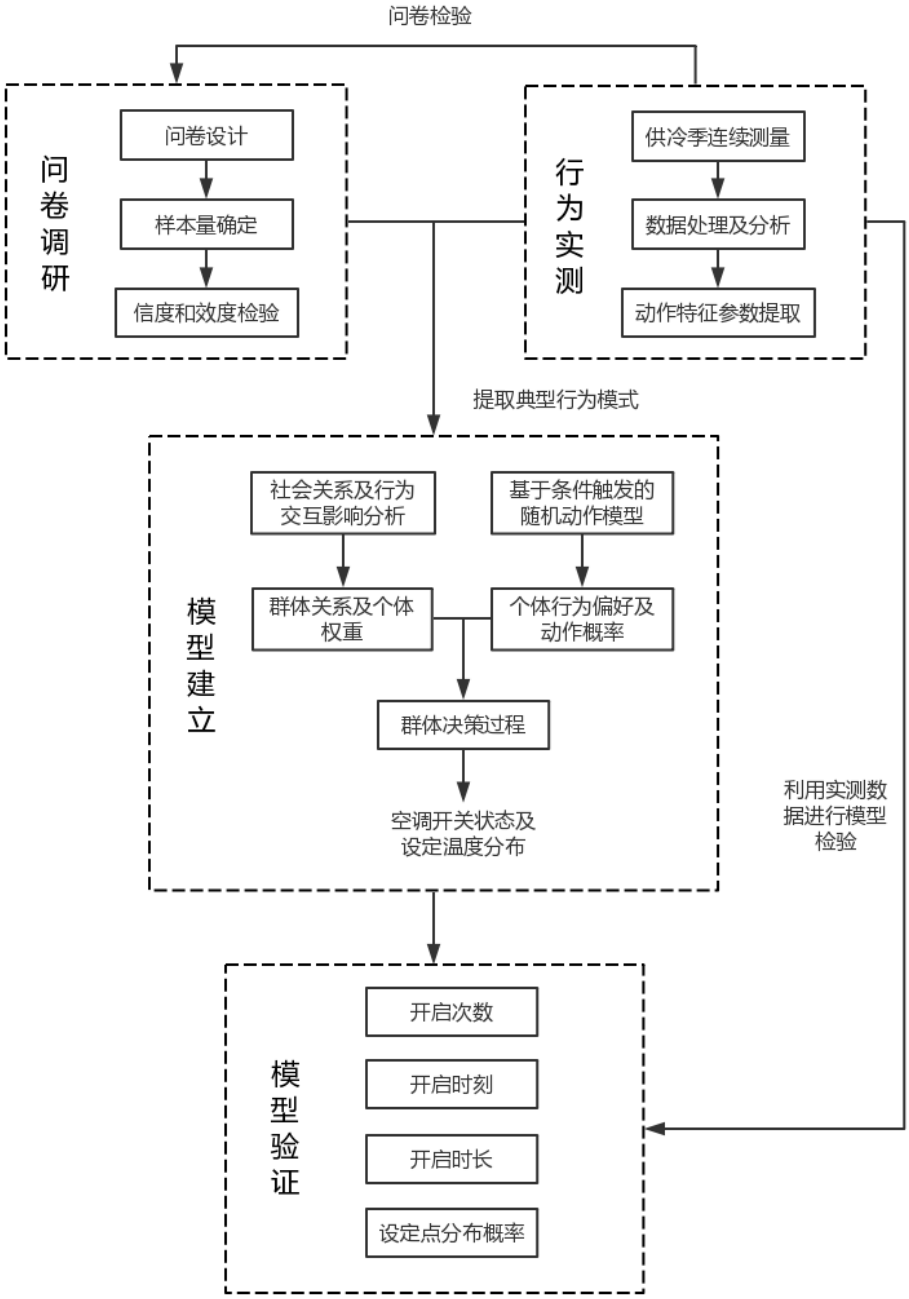


图 1- 3 技术路线图

1.5 本章小结

本章首先介绍了本文的背景和研究意义，对人行为模拟中关于典型行为模式、单人和多人动作模型的国内外研究现状进行了总结。针对现有研究中多人行为模型的缺陷以及多人员之间用能行为的相互影响刻画不够准确的问题，提出研究的关键问题和研究目的，并介绍了本文的研究内容和技术路线。

第 2 章 空调行为问卷调研与典型行为模式提取

由于问卷调研具有覆盖面广、易于统计分析的特点，本研究通过问卷调研的方法获取大量不同人员的行为特征数据，从定性的角度对空调使用行为进行描述和分类，提取可应用于能耗模拟的典型行为模式及其人群分布。为了保证调研的严谨性和可靠性，本章对问卷设计方法和抽样调查方法进行研究，通过对问卷进行信度和效度检验来控制调研的质量，以便进一步生成典型行为模式。

2.1 问卷设计与样本抽样

通过可靠的测量手段和适合的社会科学理论，问卷调查对于测量潜在变量或无法直接观察到的变量特别有用[55]，如节能意识、行为意图、态度、信任关系等[56]。在人行为调研中，研究者对于调查问卷设计、样本抽样、误差来源分析、变量定义与信度效度检验等方面的认知与分析决定了行为调研的质量[57]。问卷本身的质量直接影响受访者在填写问卷时的态度和行为，词不达意或冗长重复的问卷都会导致答卷的质量低下，因此，需要制定科学的问卷设计和调研方法，以获得有效的行为模式基础数据。

问卷设计一般遵循以下几个步骤[58]，图 2- 1 为问卷设计的基本流程。

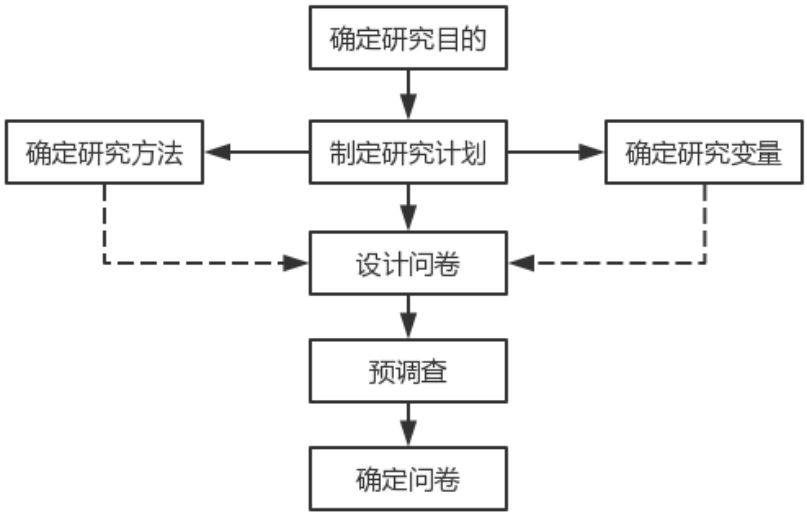


图 2- 1 问卷设计流程

本次调研的目的是采集大范围人群的行为习惯及偏好，归纳具有代表性的、并且可用于能耗模拟的典型行为模式，因此首先基于现有的人行为模型框架确定问卷调研的研究方法及测量变量。在 1.3 节对人员动作模型的总结中，王闯[33]提

出的条件概率模型将动作的驱动因素分为事件和环境两大类，建立开关动作概率与驱动因素之间的函数关系。其中，由事件驱动的行为（例如下班时关空调）采用单一的概率值 p 进行描述，如式 2.1 所示。由环境因素驱动的行为（例如觉得热时开空调）则表达为动作概率随环境参数变化的概率曲线，如式 2.2 所示。

$$P_{on} = \begin{cases} p & , if\ \tau = \tau_0 \\ 0 & , if\ \tau \neq \tau_0 \end{cases} \qquad （式 2.1）$$

式中P_{on}表示人员动作概率；τ为模拟的当前时刻；τ_0为相关事件发生的时刻。

$$P_{on} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-u}{l}\right)^k \Delta\tau} & , if\ t > u \\ 0 & , if\ t < u \end{cases} \qquad （式 2.2）$$

式中 t 表示房间温度（℃）；Δτ 为模拟的时间步长（h）；u,l,k 为特征参数，通过对案例实测数据进行拟合来确定。

该模型对行为的驱动因素进行了清晰的分类，将日常生活中直观易懂的行为模式通过严格的数学形式进行表达，并且易于嵌入 EnergyPlus、DeST 等能耗模拟软件中进行人行为模拟[59],[60]，因此本研究采用该动作模型作为问卷调研的理论框架。问卷可用于收集人员开关空调等行为的驱动因素，而对于同一种行为模式下人员在敏感程度和动作频率上的差异，难以通过问卷进行测量，因此需要结合案例实测进一步定量分析不同模式的行为特征，从而确定模型参数。

问卷设计与调研质量密切相关，主要包括问题设计与结构布局两个方面。问题设计需要考虑问题措辞、形式、选项设置等，以保证得到的答案能够对研究变量进行有效测量。问卷结构则需要考虑内容的逻辑结构、重要性、作答时间等，对所有问题进行合理编排。Dillman[61]给出了问卷设计时需要遵循的几点原则，包括表述通俗易懂与具体、避免歧义、选项互斥、避免需要回忆和估计的问题等。在人行为调研中，一些研究通过直接询问的方法来测量潜在变量，例如，您对建筑室内温度是否满意？您是否具有节能意识？但是，人们基于以往经历在进行选项对比后做出的选择，往往更能准确和一致地反映行为动机及特征[57]。因此，本研究中与行为相关的问题均列举出足够多、但不致引起混淆的行为模式供受访者进行选择。

设计好的问卷初稿必须通过预调查进行测试与修改，之后才能用于正式调查。预调查的方法主要有两种[58]，一种是主观评价法，邀请该领域的专家对问卷初稿进行讨论和修改；另一种是客观评价法，将问卷在小范围的受访对象中进行发放，收集意见和问题对问卷进行修改。本研究首先邀请人行为研究领域的专家对问卷初稿进行讨论和修改，再随机邀请 100 位受访者对问卷初稿进行填写并收集建议。经过预调查之后，本研究对问卷初稿的修改主要包括以下两点：

（1）问卷初稿考虑采用李克特量表来测量人员行为的敏感程度，用 1 至 5

的等级来划分行为频率，而预调查时发现这一方法会引起受试者频繁回忆自己的感受和行为频率，导致结果不准确并引起反感，故而从正式问卷中去掉；

（2）行为模式的多样性导致部分问题的选项过多，因此采用因子分析方法对选项进行精简，并将询问开启动作和关闭动作的问题进行整合，避免重复回答。

预调查后，针对存在的问题不断完善问卷，最终形成可以正式使用的调查问卷。为了保证调查样本能够很好地反映总体特性，必须选择科学合理的抽样方法，从群体中获取代表性样本，同时确保适当的样本量[62]。

在典型行为模式调研中，绝大多数问题仅需选填问卷中所列的选项，因此总体目标量是所选的选项的比例[63]。对于比例估计问题，样本量较易确定，按照简单随机抽样方法中估计总体比例时对精度的要求进行确定[64]。假设需要估计的参数 P 是某种行为模式在人群中的比例 P_0，采用样本比例 p 作为估计量。根据中心极限定理，当选取的样本量 n 较大时， p 近似服从正态分布，$p \sim N(P_0, S)$，设 d 是 p 的绝对误差限（置信度为 1-α），则有：

$$\mathrm{d} = u_\alpha S \qquad \text{（式 2.3）}$$

式中u_α是正态分布的 α 分位数，S 为估计量的方差$\mathrm{S} = \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}\frac{N-n}{N-1}}$。

因此，为了估计一种行为模式在人群中的比例，所需的最低样本量为：

$$n_0 = \frac{u_\alpha^2 P(1-P)}{d^2} \qquad \text{（式 2.4）}$$

在行为与社科领域中，一般将置信度设为 95%，P 取其样本变异程度最大时的值 0.5，如果取人群比例的绝对误差限d不超过 3%，那么所需要的样本量为 1067。采用这种方法，即可确定在典型行为模式问卷调研中所需要的样本数量。

2.2 问卷的信度效度检验

在问卷调查等定性研究方法中，评价调研结果的科学合理性可采用信度（reliability）和效度（validity）两个指标[65]。信度用于检验测量结果的稳定性，即短时间内受试者对同一份问卷的回答是否一致。效度则用于判断问卷结果能够准确反映所要研究的心理或行为特质的程度[66]。

信度的度量一般通过实施多次反复测量，计算相关系数来检验调研结果的一致性和可重复性。评价方法可分为三种：1）重测信度：采用同一份问卷在不同时间对相同的对象测量两次，计算结果的相关系数；2）复本信度：采用两份等价的问卷对相同的对象进行测量，计算相关系数；3）折半信度：将问卷中实质内容相同的问题拆分为两组，计算两组结果间的相关系数。

对于典型行为模式研究，由于行为模式种类多样并且调研的样本数量较大，

难以在问卷中对每个问题设置等价题组或是对同一群受访者进行反复测量。因此，本研究采用折半信度的推广方法进行信度检验，即在问卷前后设计相近问题来测量同一变量，并判断结果是否一致，这种方法在社会学领域应用较为普遍[67]。例如，问卷中涉及对工作时长的调查，在问卷起始部分让受访者选择每周的工作小时数，在结尾部分则设置相近的问题，让其填写上下班时间的具体数值，通过计算二者结果之间的相关系数来评价问卷信度。对于连续变量，采用 Pearson 相关系数进行计算，见式 2.5。

$$\mathrm{r(X,Y)} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma X \sigma Y} \qquad \text{（式 2.5）}$$

式中$\mathrm{C}ov(X,Y)$为变量 X 与 Y 的协方差，σX、σY分别为 X、Y 的标准差。

问卷的效度则用于判断测量结果能否如实反映研究变量，其一是问卷测定了什么变量，其二是对该变量测得有多准。效度是针对调研结果而言，而不是指测量工具（问卷）自身[68]。评价方法包括三种：1）内容效度：通过经验或者请专家评判问卷能否准确测量某种行为或特征；2）结构效度：检验研究者所设想或构建的某种假设是否能被问卷测量出来；3）准则关联效度：计算调研结果与某种外部准则间的关联程度。

采用结构效度对调研结果的正确性和有效性进行检验。因子分析是最常用的检验结构效度的方法，用于判断测量结果是否符合问卷设计时的假设性结构。例如，问卷设计时预想通过若干个问题来测量人员对室内环境的满意程度，对调研结果进行因子分析，若上述几个问题的结果提取出共同因子，则证明这几个问题确实能够测量同一个变量，问卷效度良好。

因子分析方法假定每个变量（如问卷问题、题项、观察值）都由两部分组成：共同因子（common factor）和唯一因子（unique factor）[69]。其理论模型如下：

$$Z_j = a_{j1}F_1 + a_{j2}F_2 + a_{j3}F_3 + \cdots\cdots + a_{jm}F_m + U_j \qquad \text{（式 2.6）}$$

式中Z_j为第 j 个变量的标准化得分；F_i为共同因子；m 为共同因子数目；U_j为唯一因子；a_{ji}为因子载荷量，表示第 j 个变量与第 i 个共同因子间的相关系数。

因子分析包括以下几个步骤：

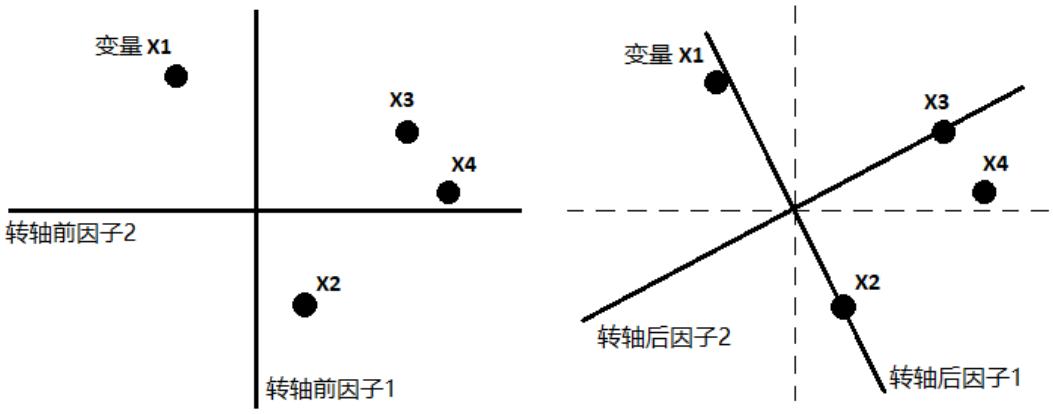
（1）计算变量间的相关矩阵；

（2）估计因子载荷量，主成分分析法（PCA）是最常用的因子提取方法，即利用线性变换将一组相关变量转换成另一组不相关的新变量，这些新变量中方差最大的变量称为第一主成分，按照方差递减的顺序依次类推，n 个变量就有 n 个主成分；

（3）确定转轴方法，调节因子载荷量的大小使其具有实际意义（（a）（b）

图 2- 2)，常用的最大变异法中，先将各因子载荷量进行平方，再使同一因子上各平方值的方差最大，使得变量在各因子上的因子载荷量有明显差异，从而对变量进行归类；

（4）决定因子数目与命名。



（a）　　（b）

图 2- 2 转轴前（a）与转轴后（b）的因子载荷图

因子分析的可靠性与样本的抽样方法以及样本数有关。Gorsuch[70]认为问卷题项与受访者的比例最好为 1:5，并且样本总数不得少于 100 人。Comrey[71]则认为因子分析的样本数在 500 左右是极佳的，在 1000 左右是十分理想的。在行为及社会科学领域中，多数学者认为样本数至少在 300 以上才能保证因子分析的质量，如果变量间的相关度高、因子间的相关度低，则 50-100 的小样本也可以接受[72]。

以上信度和效度检验方法大多应用于量表形式的问卷，即针对问卷中的连续变量，目前社会科学领域对于分类变量尚未有很好的方法进行检验。在典型行为研究中，行为模式及驱动因素多为分类变量，难以用 1 至 5 级量表进行测量。因此，本文针对问卷中的连续变量进行信度效度检验，例如人员对室内环境的满意程度、环境对工作效率的影响程度、上下班时间及工作时长等，以此衡量调研结果的质量。

2.3 基于聚类分析的典型行为模式提取方法

基于调研获得的大规模行为基础数据，直接汇总可以得到大量多种多样的行为模式，需要通过科学合理的方法从中提取典型行为模式，用于模拟分析。问卷调研中获得的行为模式及驱动因素，实际上是难以直接从定量的角度进行区分的，例如，无法直接说明热时开空调和下班时关空调这两种行为模式之间的定量差异。

因此，需要选取适当的指标来衡量行为模式之间的差别，从而对不同的行为模式进行分类。

聚类分析是一种无监督的分类方法，根据样本之间的相似性对数据集进行合理划分，使彼此相似的样本点划分为同一类，不同类中的样本点彼此相异[73]。K-means 算法是传统的基于划分的聚类算法，其基本流程如所图 2- 3 示。先在样本中随机选取 k 个样本点作为聚类中心，将剩下的样本点分给离它最近的中心组成一类，然后更新各个聚类中心，重复以上过程，直至各类的中心点不再改变。

输入：样本集 D=$\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$；聚类簇数 k

过程：

1：从 D 中随机选择 k 个样本作为初始均值向量$\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}$
2：repeat
3：　令$C_i = \emptyset (1 \le \mathrm{i} \le \mathrm{k})$
4：　for $\mathrm{j} = 1,2, \dots, \mathrm{m}$ do
5：　　计算样本x_j与各均值向量$\mu_i (1 \le \mathrm{i} \le \mathrm{k})$的距离：$d_{ji} = \|x_j - \mu_i\|_2$；
6：　　根据距离最近的均值向量确定x_j的簇标记：$\lambda_j = \arg\min_{i \in \{1,2,\dots,\mathrm{k}\}} d_{ji}$；
7：　　将样本x_j划入相应的簇：$C_{\lambda_j} = C_{\lambda_j} \sqcup \{x_j\}$；
8：　end for
9：　for $\mathrm{i} = 1,2, \dots, \mathrm{k}$ do
10：　　计算新均值向量：$\mu_i' = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x$；
11：　　if $\mu_i' \ne \mu_i$ then 将当前均值向量μ_i更新为μ_i'
12：　　else 保持当前均值向量不变
13：　　end if
14：　end for
15：until 当前均值向量均未更新

输出：簇划分$C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$

图 2- 3 k-means 聚类算法流程[74]

K-means 算法中，通过计算两个变量之间的距离来反映变量间的差异，如二维平面上的欧氏距离、曼哈顿距离等，但是这些距离算法只针对连续型变量有意义[75]。对于分类属性（或称离散属性），以开空调行为为例，假设定义域为{上班时开，热时开，闷时开}，调研结果在这三个属性上的取值只有 1 或 0 两种（选中或未选中），转化为向量形式得到{[1,0,0], [0,1,0], [0,0,1]}这三个属性，若采用欧式距离进行计算，则任意两个行为模式之间的距离是相等的，无法进行区分。当考虑多种空调行为模式的组合时，例如将“热时开、冷时关”和“上班时开、下班时关”进行比较，这种分类属性之间的差异就更无从体现，也就难以判断两

种行为模式间的相似性。

对于分类属性，可采用 VDM (Value Difference Metric) 距离[76]来计算各个行为模式的属性值之间的距离。样本中第 u 个属性上的两个离散值 a 与 b 之间的 VDM 距离如式 2.7 所示。VDM 距离考虑了各个属性值在总体样本中出现的概率，将离散值间的距离转化成 0 至 1 之间的连续变量，从而衡量两个属性值之间的差异。在聚类分析中，VDM 距离属于基于概率的分类属性距离度量，由于较好的泛化能力，得到广泛重视和应用[77]。

$$\mathrm{VDM}_2(a,b)=\sum_{i=1}^{k}\left|\frac{m_{u,a,i}}{m_{u,a}}-\frac{m_{u,b,i}}{m_{u,b}}\right|^2 \qquad \text{（式 2.7）}$$

式中$m_{u,a}$为属性 u 上值为 a 的样本总数；$m_{u,a,i}$为第 i 个样本簇中属性 u 上值为 a 的样本数；k 为样本簇数。S

将 Minkowski 距离与 VDM 距离结合即可计算两个样本之间的距离，如式 2.8 所示。

$$\mathrm{MinkovDM_P}(x_i,x_j)=\left[\sum_{u=1}^{n}\mathrm{VDM}_2(x_{iu},x_{ju})\right]^{\frac{1}{\mathrm{p}}} \qquad \text{（式 2.8）}$$

式中x_i为第 i 个聚类样本；x_{iu}为第 i 个聚类样本中属性 u 上的值；n 为分类属性的数量；p 为范数，取 2。

因此，本文将问卷调研结果作为聚类样本，采用 k-means 聚类算法作为基本的算法流程，利用 VDM 距离计算各个行为模式的不同属性值之间的差异，将分类变量转换为连续变量，再通过 Minkowski 距离计算两个样本之间的距离，从而将特征相似的行为模式划分为同一类，最终得到的几类模式即为典型行为模式。

2.4 空调使用行为问卷调研案例

本章设计了针对办公建筑空调使用行为的调查问卷，在全国范围内开展调研获得行为模式的基础数据，对问卷结果进行信度效度检验后，进一步提取空调典型行为模式，以反映不同人员的行为偏好及特征。

2.4.1 调研问卷与初步结果分析

基于以上对于问卷设计方法、样本抽样，以及信度效度检验的讨论，本研究设计了用于调研全国各地区办公建筑空调使用行为的调查问卷。为了研究环境因素、作息时间以及多人之间的交互作用对空调使用行为的影响，问卷调研内容主要分为工作环境、空调使用行为、同事间共享行为、信息统计四个部分，各部分

的内容及研究变量如表 2- 1 所示。问卷中的每个问题由若干个子问题（题项）组成，例如，问题 Q1.2“环境满意程度”要求受访者分别对室内温度、空气质量、自然光照明质量、人工照明质量、声环境质量 5 个方面进行评价，故问题 Q1.2 包含 5 个题项。因此，该问卷共包含问题 19 个，总题项数 55 个，其中连续变量 18 个，分类变量 37 个。

表 2- 1 空调行为调研问卷设计

问题编号	变量名称	变量类型	水平数值标记
一、工作环境			
Q1.1	热感觉	连续变量	1-7：冷-热
Q1.2	环境满意程度		1-5：非常不满意-非常满意
Q1.3	工作效率影响		1-5：极有影响-完全无影响
二、空调使用行为			
Q2.1	空调权限	分类变量	1：是 2：否 3：不清楚
Q2.2	空调调节方式		1：遥控器 2：面板 3：物业 4：其他
Q2.3	空调开关行为		8种行为模式，0：未勾选 1：勾选
Q2.4	温度调节行为		6种行为模式，0：未勾选 1：勾选
Q2.5	设定温度偏好	连续变量	18℃-29℃
三、共享行为			
Q3.1	共享人数	分类变量	1：0个 2：1个 3：2-3个 4：4-7个 5：8个以上
Q3.2	商议频率		1：少于每周一次 2：每周一次 3：每天一次 4：多于每天一次 5：从不讨论
Q3.3	共享方式	分类变量	0：未勾选 1：勾选
四、统计信息			
Q4.1	职业	分类变量	1：行政 2：技术 3：营销 4：科研 5：研究生
Q4.2	上下班时间	连续变量	
Q4.3	工作时长	连续变量	1：1-10 2：11-20 3：21-30 4：31-40 5：41-50 6：50以上
Q4.4	办公室类型	分类变量	1：封闭私人 2：封闭公共 3：封闭开敞 4：其他
Q5.1	年龄	连续变量	1：18-28 2：29-39 3：40-50 4：51-61 5：62以上
Q5.2	性别	分类变量	1：男 2：女 3：不愿透露
Q5.3	地区		
Q5.4	教育背景		1：高中 2：大专 3：本科 4：硕士 5：博士 6：其他

问卷中主要询问了人员对于调节办公室空调的行为偏好和习惯，包含影响空调使用行为的驱动因素，例如在何种环境下会开启或关闭空调、或调整办公室的温度。由于人员的动作行为可能是由多种因素触发，所以原则上与行为模式相关的选项允许多选。问卷中与空调行为模式相关的问题如下所示。

夏季时，您通常在什么情况下会开启/关闭办公室的空调？（多选题）

[a] 夏天一直开着　　[e] 觉得热时开

[b] 一进办公室就开　　[f] 感觉冷时关

[c] 同事或上级建议时进行开关　　[g] 暂时离开办公室时关

[d] 感觉闷时开　　[h] 下班时关

您通常如何调节办公室空调设备的设定温度？（多选题）

[a] 固定温度　　[d] 同事或上级建议时进行调节

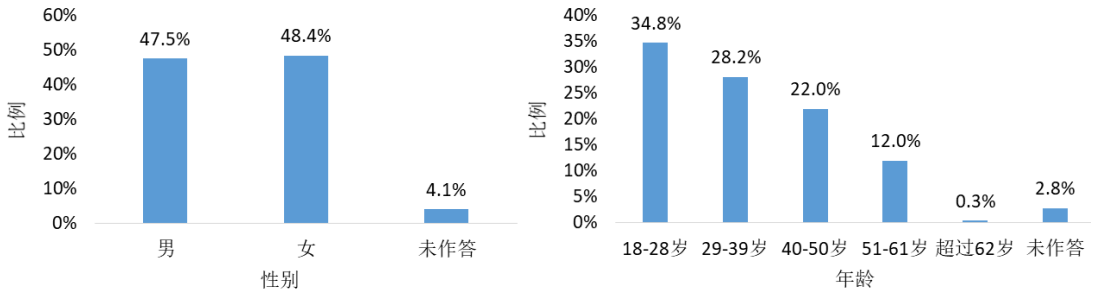
[b] 觉得冷时调节 1~2℃　　[e] 暂时离开办公室时，调高温度

[c] 觉得冷时调节 3~4℃　　[f] 无法调节温度

夏季时，您办公室的空调温度通常设置为多少？

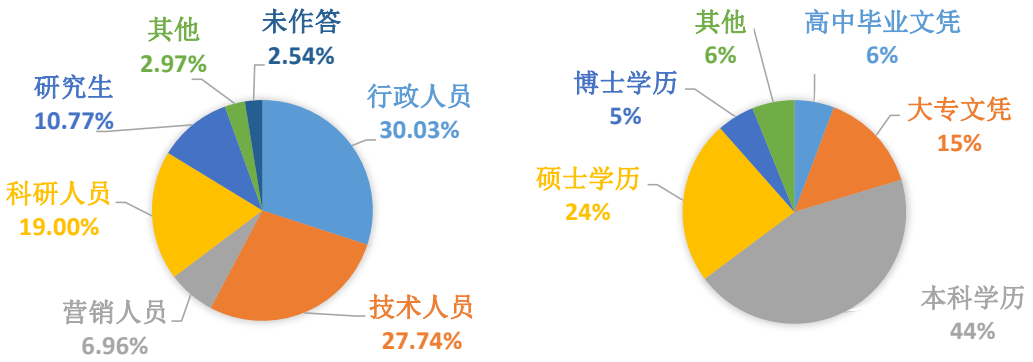
18℃以下	18~19℃	20~21℃	22~23℃	24~25℃	26~27℃	28~29℃	29℃以上

本研究采用问卷星平台，以电子版的形式通过邮件和移动端进行问卷发放。为了避免季节性因素和让受访者回忆自己的行为而造成结果偏差，因此调研在 5~8 月份进行。本次行为调研在全国范围的办公建筑中开展，覆盖 4 个气候区 30 个城市，共回收有效问卷 1179 份。其中，严寒及寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖、温和地区的样本占比分别为 28.8%、48.6%、21.6%和 0.4%，其余未作答。图 2-4 和图 2- 5 是办公建筑空调行为调研的问卷回收情况及样本分布。回收的有效问卷中，男性占 47.5%，女性 48.4%，其余未作答；调研人群的职业类型包括行政、技术、营销、科研人员和研究生等，教育水平从高中毕业到博士均有覆盖。



（a）　　（b）

图 2- 4 调研人群的性别（a）和年龄（b）分布



（a）　　（b）

图 2- 5 调研人群的职业（a）和教育背景（b）分布

问卷的样本量和覆盖面满足信效度检验的基本要求，因此本文采用 SPSS 软件中[69]的统计分析功能对调研结果进行信度和效度检验。问卷中的问题 Q4.2“上下班时间”以分钟为单位，由受访者自由填写上班和下班时间的具体数值，Q4.3

“工作小时数”则以选项的形式给出，因此 Q4.2 和 Q4.3 可作为检验问卷信度的等价问题。计算两者答案之间的相关系数，结果如表 2- 2 所示。可以看出，每周工作小时数与上下班时间的调研结果呈显著相关（显著性水平 p≤0.05），因此调研结果具有一致性和可靠性。

表 2- 2 相关系数计算结果

		Q4.3 每周工作小时数	Q4.2 上下班时间
Q4.3 每周工作小时数	Pearson 相关系数	1	.072*
	显著性 (双尾)		.025
	个数	1179	974
Q4.2 上下班时间	Pearson 相关系数	.072*	1
	显著性 (双尾)	.025	
	个数	974	974

*. 相关系数在0.05水平具有显著意义（双尾）

针对问卷中与工作环境相关的问题，采用因子分析法检验问卷的结构效度，表 2- 3 为因子分析结果。表中数值为各题项变量在共同因子上的因子载荷量，其平方反映各个变量与共同因子的关联程度。从表 2- 3 可以看到，共同因子一包含 Q1.3_1~Q1.3_5 五题，共同因子二包含 Q1.2_1~Q1.2_5 五题，共同因子三包含 Q1.1_1、Q1.1_2 两题。从调研结果中提取出的三个共同因子与本研究在问卷设计时所构思的理论框架一致，即采用以上问题分别测量“环境对工作效率的影响程度”、“人员对室内环境的满意程度”和“人员热感觉”三个方面。

表 2- 3 转轴后的因子矩阵 a

	因子		
	1	2	3
Q1.3_3 (人工照明质量)	.810	.286	.054
Q1.3_5 (声环境质量)	.807	.293	.062
Q1.3_4 (室内温度)	.805	.318	-.042
Q1.3_1 (室内空气质量)	.794	.297	-.049
Q1.3_2 (自然光照明质量)	.760	.353	-.005
Q1.2_3 (声环境)	.273	.803	-.021
Q1.2_4 (室内温度)	.330	.784	-.116
Q1.2_5 (室内空气质量)	.294	.758	.004
Q1.2_1 (人工照明)	.369	.742	-.007
Q1.2_2 (自然光照明)	.330	.727	.057
Q1.1_2 (冬季热感觉)	.131	.234	.794
Q1.1_1 (夏季热感觉)	.127	.330	-.717

提取方法： 主成分分析
转轴方法： 含 Kaiser 正态化的最大变异法

a. 转轴收敛于4次迭代

由上述分析可知，问卷信度和效度良好，可对调研结果进行进一步分析，提取空调典型行为模式。

2.4.2 空调典型行为模式的提取

本文的调研在全国范围内开展，而由于气候条件和系统形式的影响，不同气候区人员的空调使用行为模式可能存在差异。本节针对夏热冬冷地区回收的有效问卷样本（573 份）分析人员空调使用行为，并提取典型行为模式，其他气候区的调研结果也可以按照同样的方法进行分析。

在夏热冬冷地区的有效样本中，有 360 份选择了具有办公室空调系统的调节权限，后续的行为模式分析主要针对这一部分样本。图 2- 6 统计了调研结果中开关空调行为驱动因素的数量占比。调查结果表明，冷热感觉是导致人员开启办公室空调的首要因素，而关空调行为则主要发生在人们下班时，并且很少有人会午饭时间或者开会等临时离开办公室时将空调关闭。由于办公室中存在多人的情况，同事或上级的需求也是影响人员空调行为的重要因素。

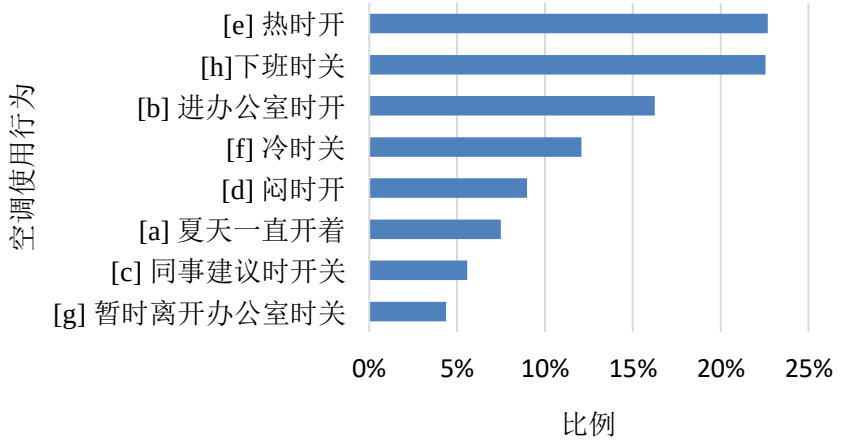


图 2- 6 空调使用行为调研结果统计

对于空调设定温度调节行为，图 2- 7 和图 2- 8 分别给出了驱动因素的数量占比和人们对设定温度的偏好分布情况。可以看出，大部分人员会对办公环境的设定温度进行 4℃以内的小幅度调节或者维持固定温度，暂时离开办公室时调节温度的可能性较小。由图 2- 8 可以看出，办公建筑中人员对空调设定温度的选择集中在 22℃~26℃的范围内，将近 25%的受访者倾向于将空调温度设为 26℃。这一设定温度指的是受访者能够观察到的空调面板温度，由于设备等因素，与实际工况中空调系统温控器所接收到的设定温度存在一定的差异。通常情况下，室内人员产生温度调节行为是来自于对室内温度的不满意，在模拟中，我们关注的设定温度也是指空调系统达到稳定状态时的室内温度。要获得人员对于室内温度的选择分布，还需结合案例测试数据进行分析。

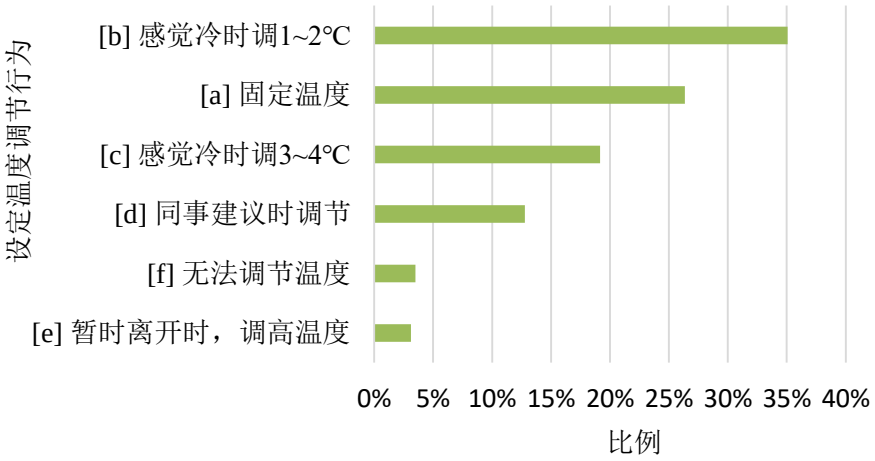


图 2- 7 空调设定温度调节行为调研结果统计

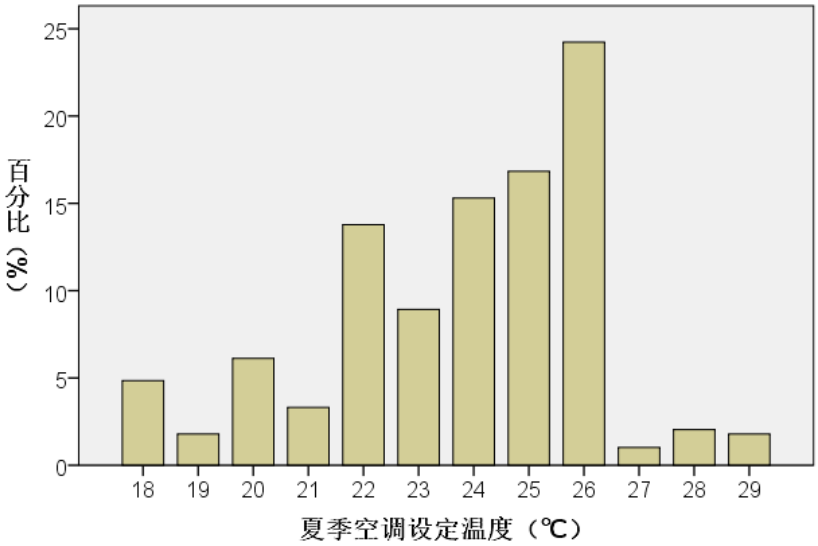


图 2- 8 设定温度偏好调研结果统计

同时，问卷对办公建筑中同事间空调的共享调节行为进行调研，图 2- 9 和图 2- 10 分别给出了共享人数和共享方式的调研结果。可以看出，各类办公建筑中 3~4 人间的封闭型办公室和 8 人以上的开敞型办公室数量较多。在进行空调调节时，不同使用者做决定的方式也各不相同，大多数人会优先满足不舒适者的要求、或通过集体商议的方法进行决策，一部分人无需征求他人意见而进行自由调节，少部分人会听从管理者的意见。由此可见，对于多人办公室，来自同事或上级的干涉是空调使用行为不可忽视的驱动因素。

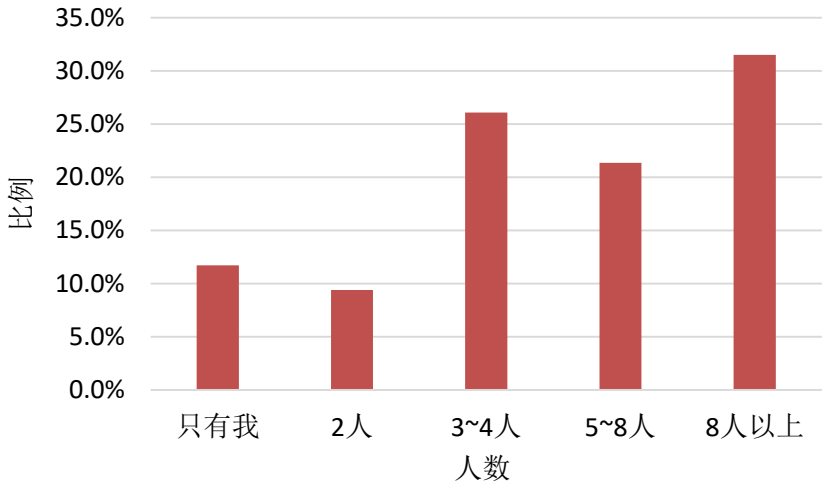


图 2- 9 办公室中共享空调调节权限的人数

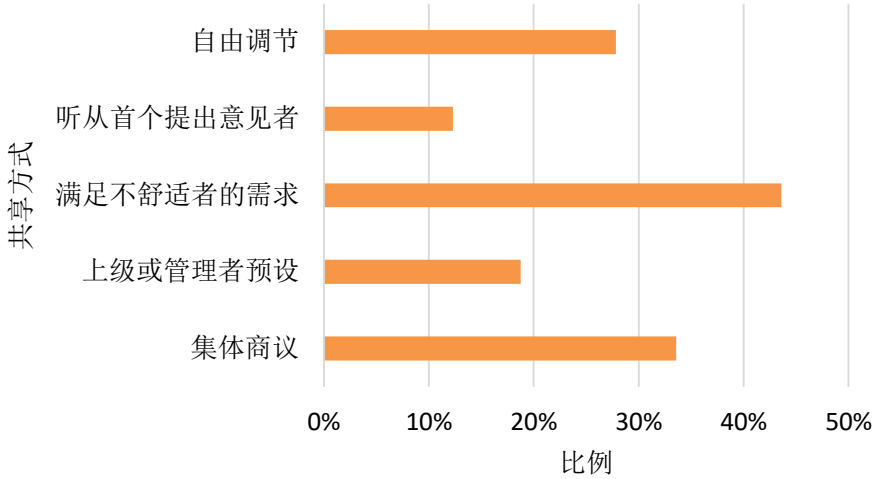


图 2- 10 多人办公室空调使用的共享方式

问卷中与行为模式有关的选项允许多选，将调研得到的空调开关行为进行组合，可得到若干种不同的行为模式组合。图 2- 11 统计了调研结果中各个组合的数量分布情况，图中横轴上的字母与问卷中（图 2-6）的行为模式相对应。从图中可以看出，即使不考虑这些行为模式在敏感程度和动作频率上的差异，由于行为受到多种环境或事件因素的驱动，仍存在大量排列组合的情况，并且在人群中的分布相当分散。这种多样性使得典型行为模式的提取具有实际意义。

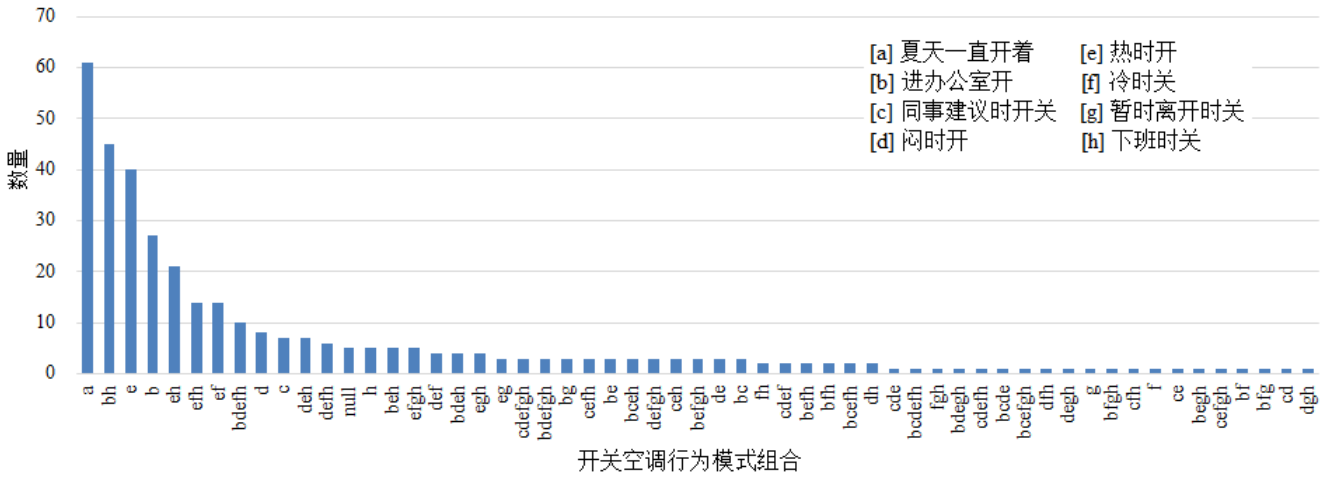


图 2- 11 开关空调行为模式的组合统计

本文采用针对分类变量的聚类分析方法，从上述调研结果中归纳出若干种典型行为模式。在聚类数 k 值的选取上，本文分别取 k=6、k=10 和 k=20 三种情况进行计算，结果中数量占比排在前 6 位的行为模式固定不变，因此最终选取 k=6 作为聚类数，得到典型空调行为模式及其在人群中的分布情况，如表 2- 4 所示。

表 2- 4 空调使用典型行为模式

聚类	空调开关模式	人群占比
1	进办公室时开+下班时关	23.3%
2	热时开+冷时关+下班时关	20.0%
3	热时开	18.9%
4	夏天一直开着	16.9%
5	进办公室时开	10.8%
6	同事建议时开 or 闷时开 +下时班关	10.0%

由聚类结果可以看出，以上典型行为模式基本上可以代表人们在日常生活中的空调行为习惯。模式 1 表示以事件为主导的开关空调行为模式，类别 2 的开关行为以温度驱动为主。模式 3 和模式 5 中，“热时开”和“进办公室时开”这两种模式缺少对于关闭行为的描述，表示这部分人员选择忽略关空调的动作，让同事或办公楼的管理人员进行操作，即存在“让别人管”的情况，这在办公建筑中是很常见的。模式 4“夏天一直开着”表示在整个供冷季中，人员所在办公环境的空调一直保持开着的状态，无论是不是由人员自己开启的。

表中列出的典型空调行为模式可进一步用于人行为模拟和建筑用能分析中。进行人行为模拟时，用户可依据已知的建筑信息及人员信息，选择最相近的空调行为模式，结合实测数据拟合得到的模型参数，作为动作模拟的基准输入。

2.5 本章小结

为了获得具有代表性的典型行为模式，本章采用问卷调研的方法采集大范围人群的行为特征数据，针对问卷设计、样本抽样、问卷信度和效度的检验开展研究和讨论，并选取了合适的聚类分析方法对调研结果进行分析。最后，以空调使用行为问卷调研作为案例说明从问卷设计到调研的具体实施过程，并对空调开关和设定温度调节行为的调研结果进行分析。本章采用基于条件触发的动作模型作为问卷设计的理论框架，通过预调查和科学的抽样方法保证问卷设计质量和样本量限值，并采用相关系数和因子分析方法对问卷的信度和效度进行检验，以保证调研结果的准确性和有效性。针对行为模式的分类变量特征，本章采用 k-means 聚类算法与 VDM 距离相结合的方法，从问卷结果中提取典型的空调使用行为模式，并获得每种模式在人群中的分布，聚类得到的 6 种空调典型行为模式可作为人行为模拟计算的输入参数。

第 3 章 人员空调使用行为案例测试与结果分析

前文的典型行为模式研究获得了人员行为模式的定性描述，要得到每种模式下人员对于各驱动因素的敏感程度，还需结合案例测试数据进行分析。本章对办公建筑中空调使用行为的测试方法和测试案例进行介绍，统计分析室内环境和空调行为的测试结果，并建立驱动因素与空调动作之间的函数关系。

3.1 人员空调使用行为测试方法

本文选取中小型办公建筑进行测试，主要针对人员组成基本固定、并且具有空调系统及其他设备的控制权限的单人或多人办公室。测试内容分为室内环境和空调行为两部分，测试仪器大多选用具有固定采样间隔并且能够自动记录和储存数据的自记仪器，测试参数包括人员在室状态、室内温度、CO_2 浓度、空调开关状态、空调设定温度。

分体式空调的开关状态通常采用功率自记仪进行测试，连接于插座和用电设备之间，通过记录空调的实时功率来判断空调的开关状态。而办公建筑中大多采用集中式空调系统或是多联机系统，难以安装功率计测试单个房间末端空调的实时功率。对于多联机系统，可采用单相电能表接入空调末端线路进行测试，通过有线网络将测试数据上传至云平台进行储存。对于全空气系统及风机盘管系统，可以安装空调控制面板传感器来监测空调的开关状态和设定温度，有条件的办公室案例也可以监测房间末端的水流量和进出口水温。

对于未安装控制面板的空调系统，设定温度可通过对室内人员的问卷调研获得，也可以通过树莓派 Raspberry Pi 和红外信号接收器对遥控器的设定温度进行自动记录，但这种方法容易丢失数据。本研究采用监控摄像头记录空调遥控器的设定温度和调节动作，并利用一段时间的人工记录结果进行验证。实际测试中，若案例房间不能满足某些测试条件，则可采用替代方案作为补充。例如，若无线座椅感应记录仪和磁开关自记仪对于人员中途离开办公室的情况判断不准时，可通过 CO_2 浓度数据间接判断房间内人员的在室情况[78]。

本研究中，办公人员空调行为测试中所用到的仪器及其布置方法如表 3- 1 所示。

表 3- 1 案例测试仪器及布置方法

测试仪器	测试参数	采样间隔	布置方法	安装示意图

温湿度、CO_2浓度三合一自记仪	室内温度、CO_2浓度	5min 或 10min	布置于与人员活动区高度接近的垂直墙面上，避开空调风口处或房间墙角，避免阳光直射	
无线座椅感应记录仪	人员在室状态	5min 或 10min	布置于固定工位的座椅上，放置坐垫避免仪器的移动和掉落	
磁开关自记仪	门的开关状态	动作时刻进行记录	将记录仪和永磁铁分别安装在门和门框上，关门时二者相距 30mm 以内	
单相电能表	空调开关状态	5min 或 10min	接入空调终端电路中，远离其他可能造成干扰的电路，记录空调电流和功率来判断空调的启停状态	
动作识别摄像头	设定温度变化	连续采样	摄像头与空调遥控器垂直布置，要求能够清晰拍摄遥控器的温度显示面板	

3.2 案例测试对象

本文选取上海市某高校办公楼作为研究案例，针对其中的两间办公室进行空调使用行为测试，测试时间为 2018 年 4 月 1 日至 2018 年 9 月 31 日，气候区位于我国的夏热冬冷地区。

图 3- 1 为办公室案例 A 在该办公楼四层平面上的位置。该办公室窗户一侧朝南，面积 5.3m×6m，是一间行政办公室，房间中有 4 名工作作息基本固定的行政办公人员。图 3- 1 为该办公室的内部构造和测试仪器布置的示意图。房间正中央有一台多联机空调，接入电能表记录空调的电流和功率，温湿度、CO_2浓度测点布置于房间一侧与人员工作区高度相等的墙面上，采样间隔为 10 分钟步长。

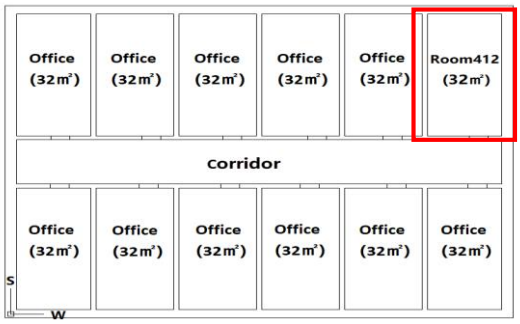


图 3- 1 办公室 A 所在建筑平面示意图

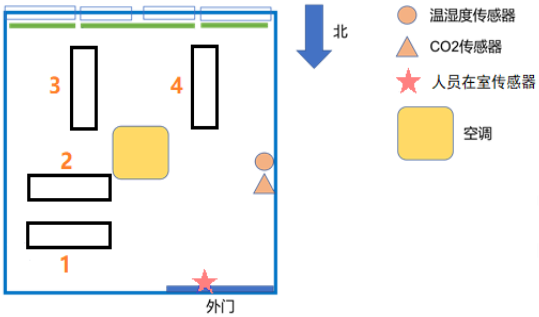


图 3- 2 办公室 A 内部构造示意图

图 3- 3 为办公室案例 B 在平面图上的位置。该办公室窗户一侧朝北，面积为 4.7m×4.2m，是一间研究生办公室，房间中有 5 名作息不固定的博士和硕士研究生。图 3- 4 为该办公室的室内实景，图 3- 4 为该办公室的内部构造和测试仪器布置的平面图。房间中央同样有一台多联机空调，空调功率和室内温度、CO2 浓度的测试方法与办公室 A 类似，采样间隔为 5 分钟步长。该办公室增加了监控摄像头对空调设定温度进行记录，布置于放置空调遥控器的桌面上。

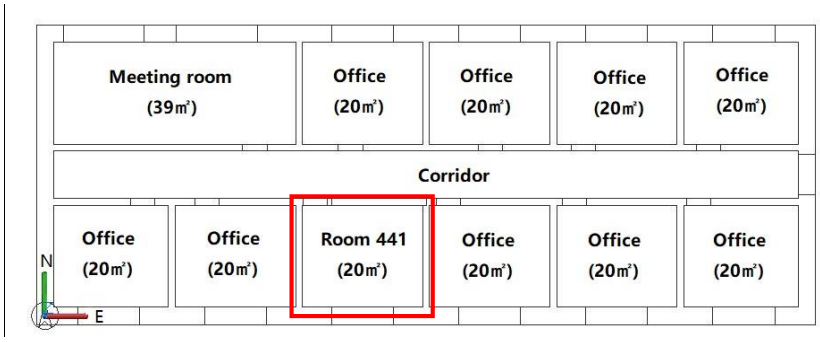


图 3- 3 办公室 B 所在建筑平面示意图

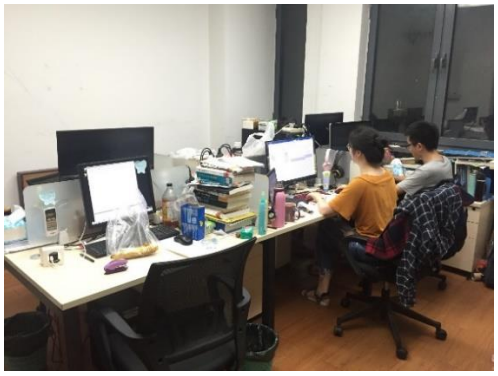


图 3- 4 办公室 B 内部实景图

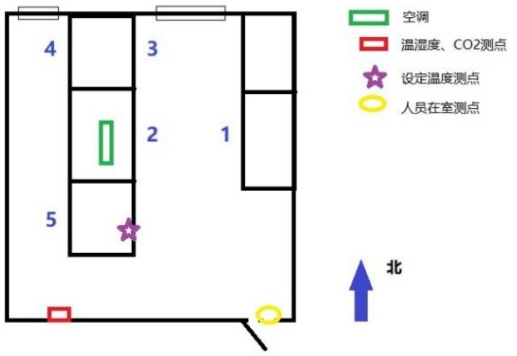


图 3- 5 办公室 B 内部构造示意图

3.3 测试结果与分析

经过 6 个月的连续测量，获得两间办公室的详细测试数据。本节选取上海供冷季 6 月 1 日至 8 月 31 日的数据，分别对办公人员的空调开关行为和设定温度调节行为进行分析。

3.2.1 空调开关行为

对于两间办公室，处理人员在室状态、空调开关状态和室内温度的测试数据，对空调使用情况进行详细分析，以获得不同人员的空调行为模式。多人办公室中人员的行为模式各不相同，可能是由温度或者事件单独驱动，也可能是由二者共同驱动，因此本文对所有可能的情况进行统计分析。首先考虑受温度影响的开空调行为，根据实测数据，统计在各个温度条件下开空调行为的发生概率。室内温度取 1℃为统计区间，空调运行状态以 5min 步长为一个统计频次。由于开空调动作只能发生于人员在室、并且空调关闭的情况下，因此某温度区间内开空调的概率可由式 3.1 进行计算：

$$P_{on}(t) = \frac{n_{t,O=1,D=1}}{n_{t,O=1,A=0}} \qquad \text{（式 3.1）}$$

式中$n_{t,O=1}$为 t 温度下室内有人且开启空调的次数；$n_{t,O=1,A=0}$为 t 温度下室内有人且空调处于关闭状态的总次数。

针对行政办公室 A 的测试数据进行分析，将由温度驱动的开空调行为区分为平时在室时间段和进办公室时刻两种。除去进门时刻，室内人员在不同温度下开空调的概率统计结果如图 3- 6 所示。由图可知，开空调的概率随着室内温度的升高而增大，当室温高于 32℃时一定会开空调，而低于 25℃时开空调的概率为零。统计每天进办公室时刻（包括早上上班、午饭回来），人员在各温度下开空调的概率，结果如图 3- 所示。可以看出，进办公室时刻的室内温度普遍较高，与平时在室开空调的行为规律类似，室内温度越高，开空调的概率越大。如果将进办公室一次产生开空调动作的判断与经历一个时间步长产生的判断等效来看，那么在同一温度区间内，进门时开空调的概率要明显高于平时在室的时候。

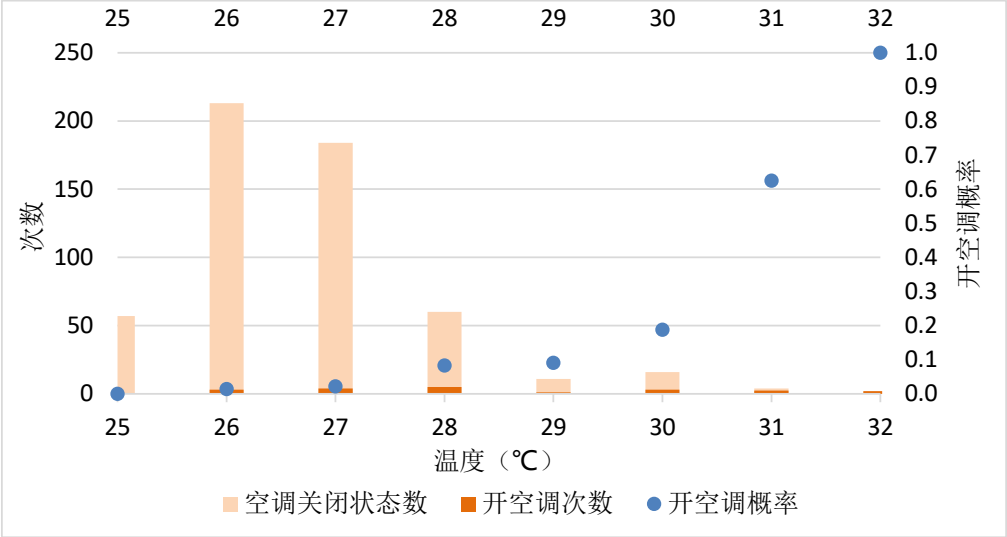


图 3- 6 办公室 A 平时在室热时开空调概率统计

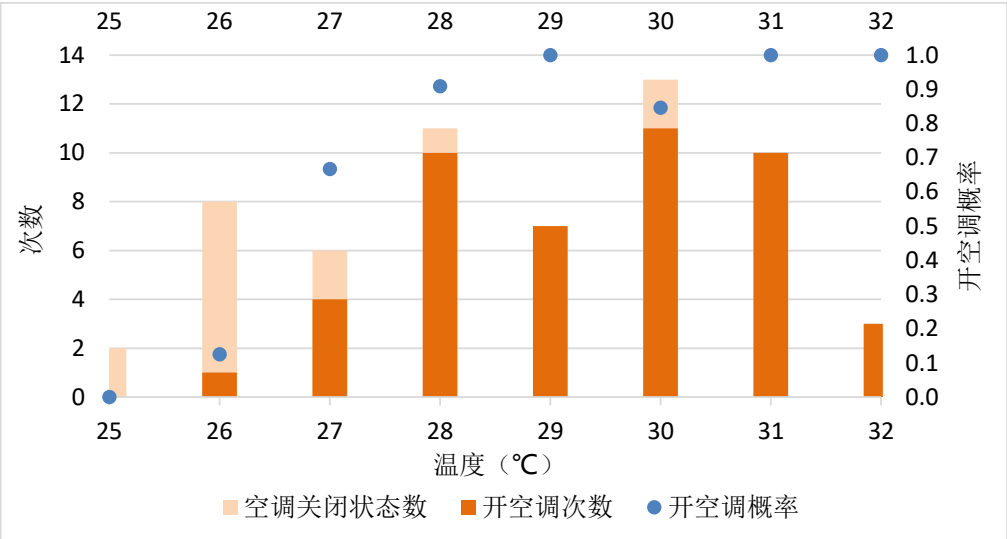


图 3- 7 办公室 A 进门热时开空调概率统计

对研究生办公室 B 的测试数据进行同样的分析过程，观察其开空调概率的变化情况。办公室 B 的人员平时在室和进办公室时由于温度开空调的概率统计结果分别如图 3- 和图 3- 所示。由图可知，开空调的行为规律与办公室 A 类似，动作概率随室内温度的升高而增大，同一温度下，进办公室时刻开空调的概率更高一些。与办公室 A 相比，由于办公室 B 的人员密度和设备功率密度较大，室内温度分布整体较高，而相同温度下无论平时在室或者进门时开空调的概率都更低，这反映了不同办公室中人员对于温度的敏感程度和用能习惯的差异。

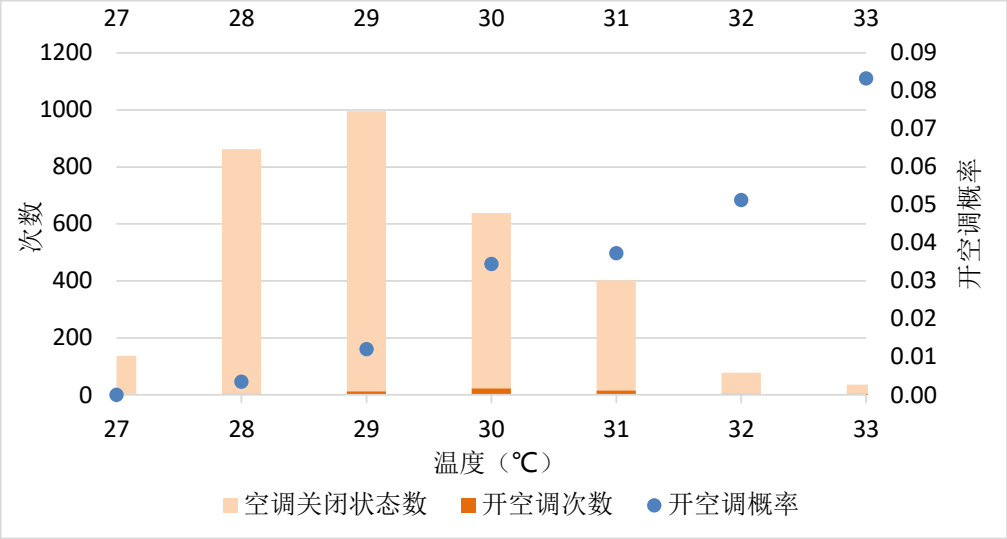


图 3- 8 办公室 B 平时在室热时开空调概率统计

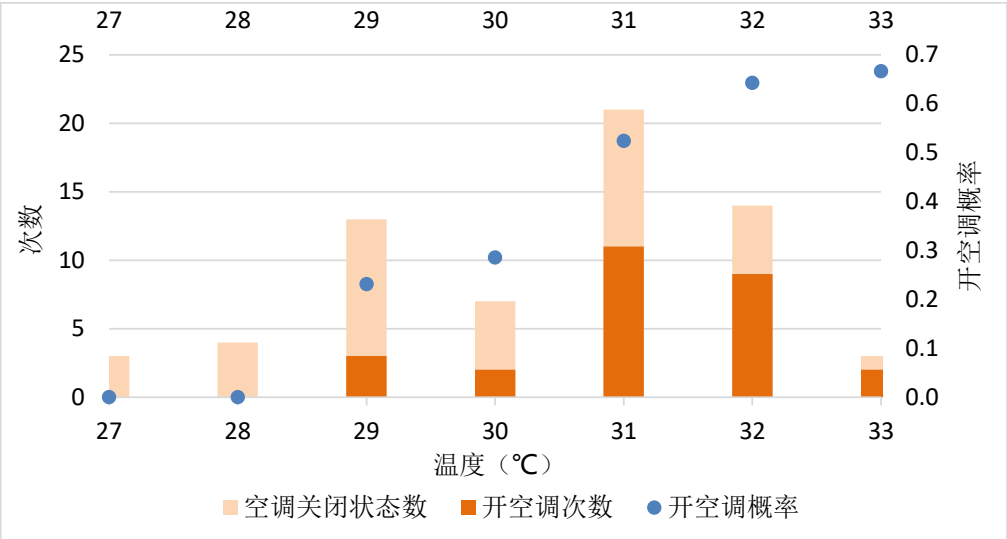


图 3- 9 办公室 B 进门热时开空调概率统计

同时，开空调行为也可能是由于受到事件的驱动，例如在典型行为的问卷调研中，相当一部分人群选择了“进办公室时开”的行为模式。因此，分别统计办公室 A 和办公室 B 进办公室时刻和这一时刻开空调的次数，结果如图 3- 10 和图 3- 11 所示。图中的进门时刻包括了早上上班、午饭回来和中途离开办公室返回的时刻。由图可见，行政办公室 A 中人员进门时开空调的概率为$P_{on,A} = 46/60 = 0.77$，而研究生办公室 B 开空调的概率为$P_{on,B} = 31/63 = 0.49$。可见，办公室 B 进门就开空调的情况不多，由温度触发的开空调行为所占的比重较大。

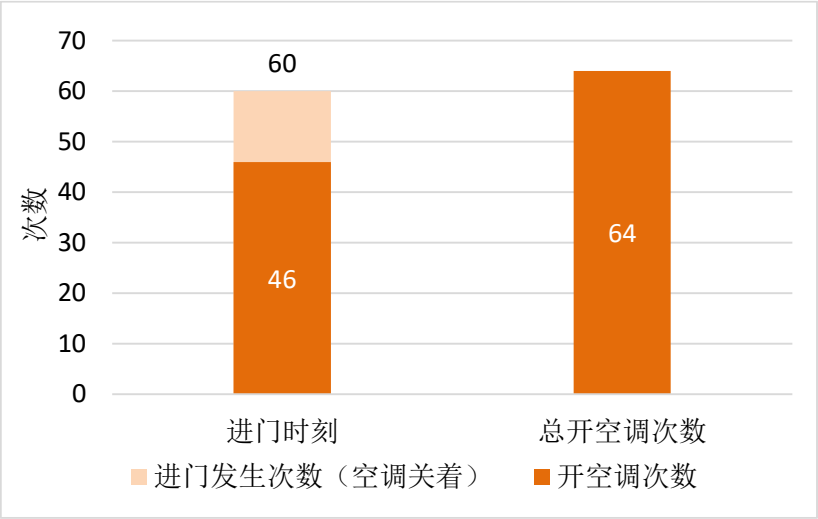


图 3- 10 办公室 A 进办公室时开空调概率统计

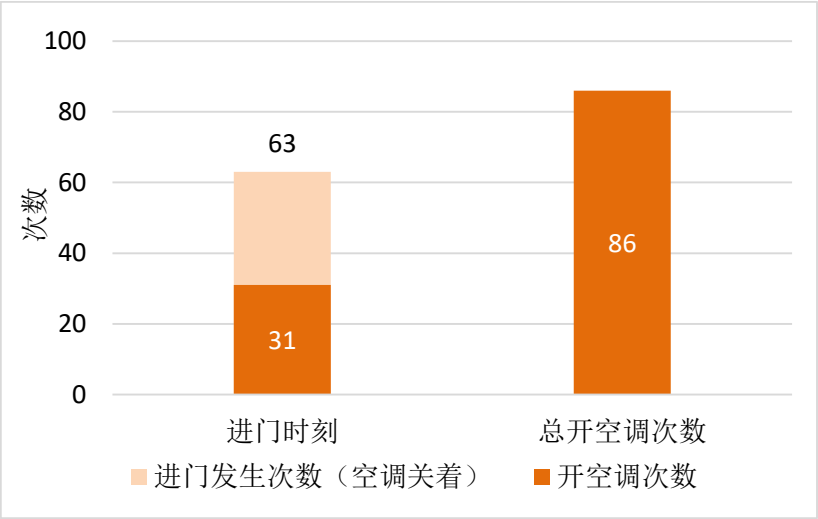


图 3- 11 办公室 B 进办公室时开空调概率统计

另一方面，对于办公室中的关空调行为，大多发生于人们下班离开办公室的时刻，也有小部分暂时离开办公室时关空调的情况存在。统计测试的 3 个月中办公室 A 的离开时刻与这一时刻关空调动作发生的次数，如图 3- 所示。由图可知，办公室 A 中人员下班时关空调的概率为$P_{off} = 49/56 = 0.88$，仅有两次发生忘记关空调的情况。午饭时刻、下班时刻关空调的次数共为 58 次，而测试期间总的关空调次数为 64 次，可见由“离开办公室”事件触发的关空调动作可以覆盖绝大部分的情况（91%）。

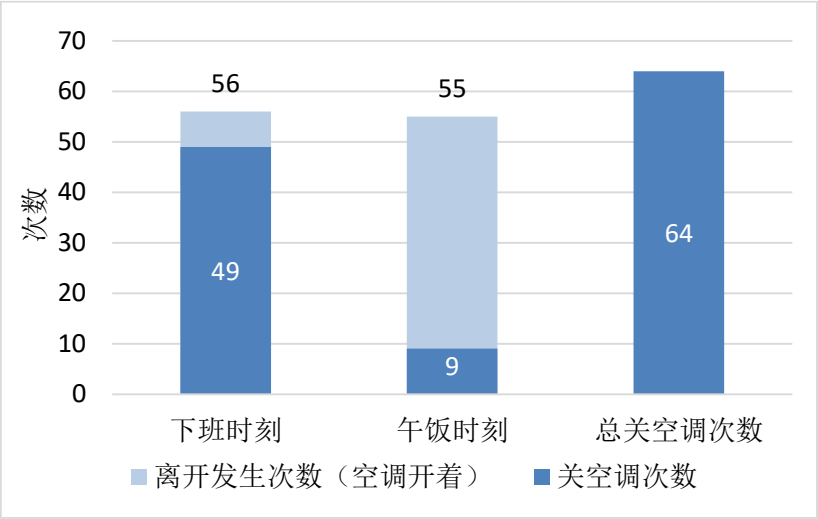
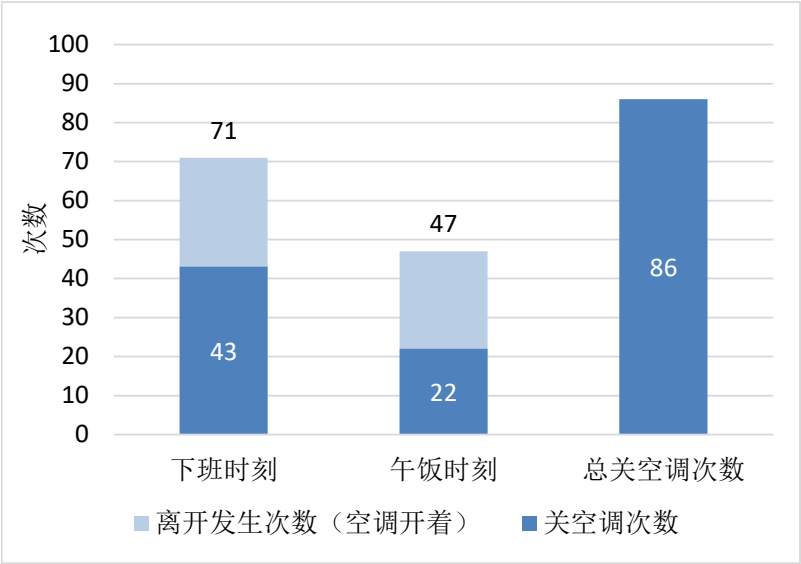
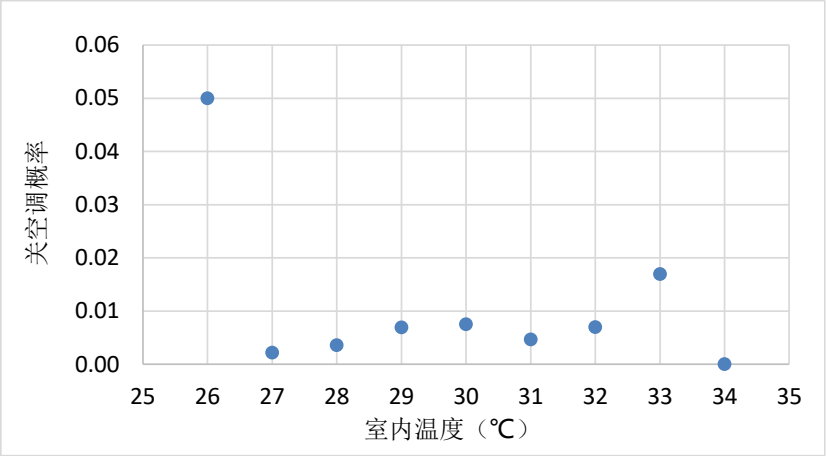


图 3- 12 办公室 A 离开时刻关空调动作的统计结果

办公室 B 的关空调动作统计结果如图 3- 13 所示。与办公室 A 相比，研究生办公室 B 下班时关空调的次数明显减少，概率仅为 0.61。该办公室午饭时刻、下班时刻离开办公室关空调的次数共为 65 次，占关空调总次数的 76%。采用与开空调概率类似的统计方法，图 3- 13（b）统计了办公室 B 关空调概率与室内温度的关系。可以看到，各个温度下人们关空调的概率都很小，关空调动作与室内温度之间不存在显著的阈值特征与单调性，与开空调概率曲线的特征有明显差异。可以理解为，实际情况中由于温度低而将空调关闭的行为确实存在，但这种情况非常少，前文的调研显示大部分人员感觉冷时更倾向于将空调温度调高，而不是直接关闭空调。因此，关空调动作主要与离开办公室的时刻有关，不能当作受温度驱动的行为进行处理。



（a）与离开时刻的关系



（b）与室内温度的关系

图 3- 13 办公室 B 关空调动作的统计结果

3.2.2 设定温度调节行为

空调设定温度调节行为的测试数据较难获取，因此本文仅对办公室 B 进行了设定温度的数据收集，选取 7~8 月的温度数据进行分析。通过对空调遥控器的视频监控记录分析，得到每次调节温度动作的发生时刻和调节后的设定温度，以 5min 为步长对温度数据进行补充，若空调处于开启状态，则当前时刻的设定温度与前一次调节后的设定温度相等，直到下一次调温度的动作发生，从而得到两个月完整的设定温度测试数据。

图 3- 6 是办公室 B 中人员在室并且空调处于开启状态时的设定温度分布情况。可以看出，房间内人员对设定温度的选择不存在明显的分布，设定温度处于 25~28℃范围内的概率占 87%。室内人员大多倾向于将温度设为 25℃和 27℃，同时 26℃和 28℃所占的比例也较大。这一结果侧面反映了办公室 B 中人员在调节温度时，通常以 1~2℃的幅度进行温度的增减。

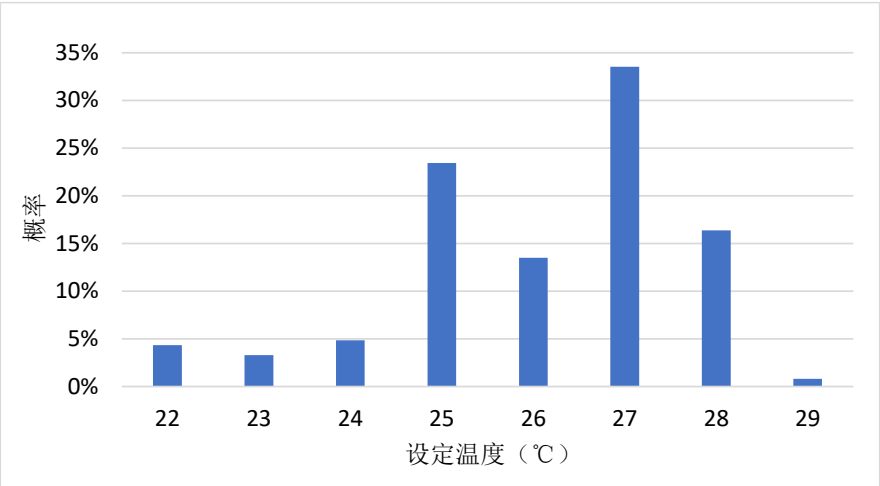


图 3- 6 办公室 B 空调处于开启状态时的设定温度分布

在模拟中，我们关注人员对设定温度的调节行为是因为设定温度改变会导致室内温度变化，而真正影响空调制冷能耗的是室内温度。因此，图 3- 75 统计了人员在室并且空调处于开启状态时的室内温度分布情况。可以看出，室内温度的分布近似于正态分布，超过 99%时间内的室温集中在以 28℃为中心，正负 2℃（26~30℃）范围内。与设定温度分布图进行对比发现，在空调开启的情况下，办公室 B 的室内温度整体略高于设定温度。一方面是受空调设备容量的限制，另一方，通过对该办公室中人员的调研和询问得知，该办公室存在开空调的同时也开着门的情况，导致大部分时间的室内温度高于设定温度。此外，两者的差异也可能是由于人员对于温度的感知与实际室温存在的偏差所致。

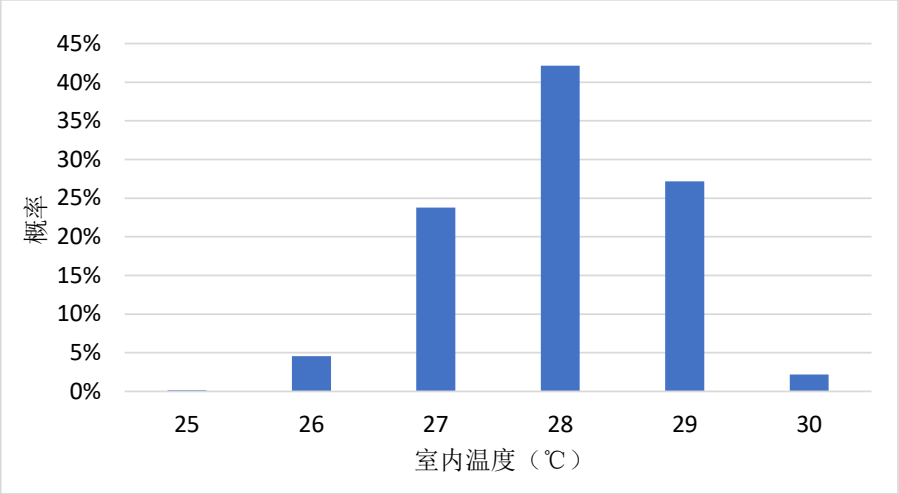


图 3- 75 办公室 B 空调处于开启状态时的室内温度分布

3.4 研究案例的空调行为模型建立

为了获得各个行为模式的定量描述和特征参数，本节以王闯[33]提出的基于条件触发的动作模型为理论框架，基于案例测试数据的统计分析结果，分别对两间办公室的空调使用行为建立相应的模型进行描述。在多人办公室中，每个成员的行为模式各不相同，由测试数据无法判断开关空调的动作具体是由哪一个人产生的，因此，本节的分析中将考虑所有可能的触发条件，建立不同行为模式相应的动作模型。

3.4.1 办公室 A 的空调行为模型

结合对办公室 A 测试结果的统计分析，该办公室的开空调行为模式可概括为“平时热时开”、“进办公室时开”，关空调模式为“下班时关”、“午饭离开办公室时关”，其空调行为模型可用下列函数进行表述：

$$P_{on}=\begin{cases}1-e^{-\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}\Delta\tau}, & \text{平时在室时，且}t>u\\ 1-e^{-c_{enter}\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}}, & \text{进办公室时，且}t>u\\ p_{entering}, & \text{刚进办公室时}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \quad \text{（式 3.2）}$$

$$P_{off}=\begin{cases}p_{leaving}, & \text{下班离开办公室时}\\ p_{lunch}, & \text{午饭离开办公室时}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \quad \text{（式 3.3）}$$

式中，u, l, k，c_{center}，$p_{leaving}$，p_{lunch}均为特征参数或概率值，通过对办公室 A 实测数据进行拟合来确定；Δτ 是以 h 为单位的模拟时间步长，取与测试数据采样间隔一致的 10 分钟步长；基于人员对温度本身的敏感程度不变的假设，增加参数 c 来描述在同一温度水平下，进办公室时刻与平时在室开空调概率的差异。

根据测试数据的统计结果对该函数进行拟合，首先对办公室 A“平时热时开”的行为模式进行拟合。u 值为开空调概率由零向非零递增的临界值，此案例中为 25℃，意味着低于此温度时人员不会产生由温度驱动的开空调动作。在 Matlab 程序中利用测试数据对函数进行拟合，得到特征参数 l 和 k 的取值，同时计算拟合优度 R^2。由此得到平时在室时开空调的概率随室内温度变化的拟合结果，如图 3- 8 所示。图中室内温度 30℃所对应的样本点属于离群点，因此不参与拟合。

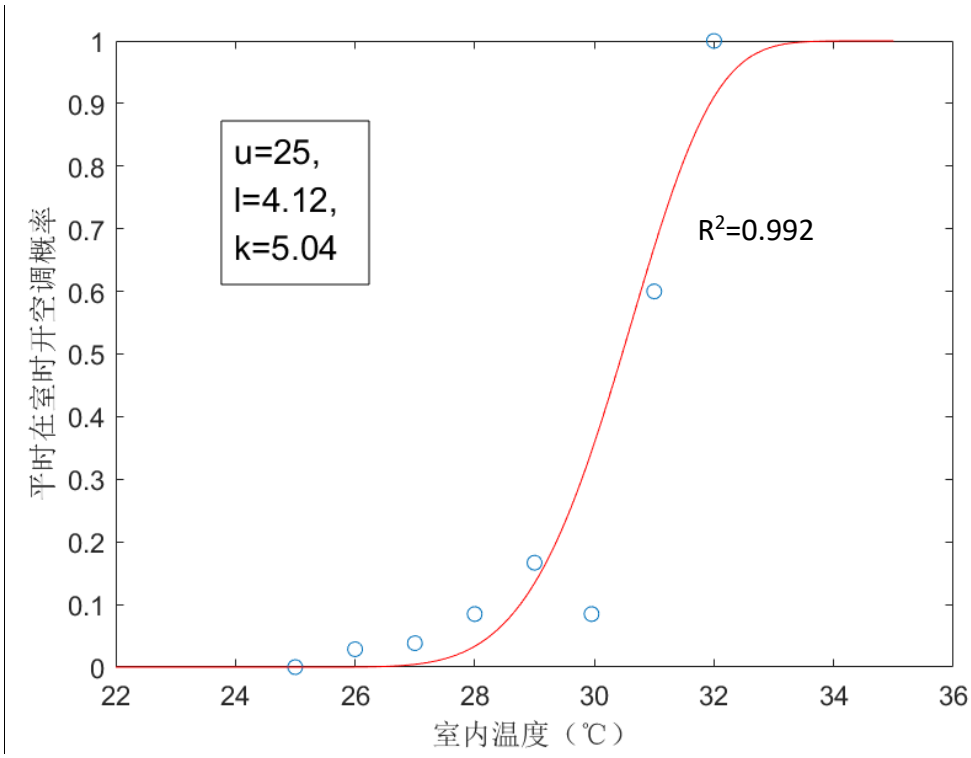


图 3- 8 办公室 A 平时在室热时开空调概率的拟合结果

将以上特征参数 u, l, k 代入进办公室时开空调的概率函数，再根据办公室 A 实测数据的统计值对修正系数 c_{enter} 进行拟合，得到刚进办公室时开空调概率的拟合结果，如图 3- 9。

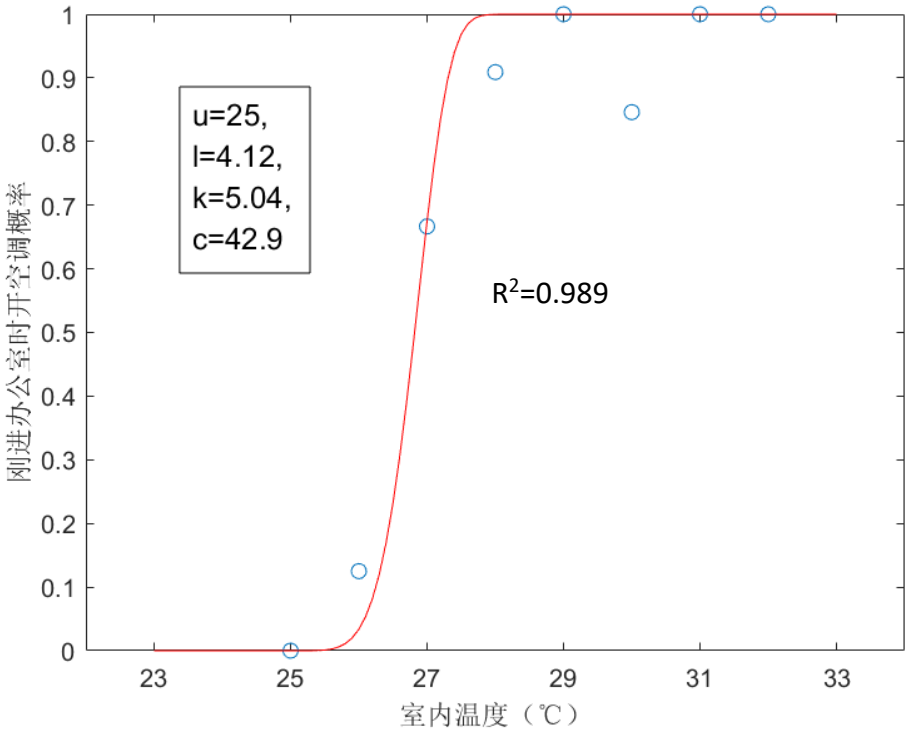


图 3- 9 办公室 A 进门热时开空调概率的拟合结果

对于由事件触发的开关空调行为，例如“进办公室时开”、“下班时关和”和“午饭离开办公室时关”，采用固定的概率值进行描述，其取值分别为办公室 A 进门时刻开空调和离开时刻关空调测试数据的概率统计值。由此得到：

$$p_{entering} = 0.77 \tag{式 3.4}$$

$$p_{leaving} = 0.88 \tag{式 3.5}$$

$$p_{lunch} = 0.16 \tag{式 3.6}$$

由以上函数拟合结果，总结得到办公室 A 空调使用行为模型的完整描述：

$$P_{on,A} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-25}{4.12}\right)^{5.04}\Delta\tau}, & \text{平时在室时，且 } t > u \\ 1 - e^{-42.9\left(\frac{t-25}{4.12}\right)^{5.04}}, & \text{进办公室时，且} t > u \\ 0.77, & \text{刚进办公室时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{式 3.7}$$

$$P_{off,A} = \begin{cases} 0.88, & \text{下班离开办公室时} \\ 0.16, & \text{午饭离开办公室时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{式 3.8}$$

3.4.2 办公室 B 的空调行为模型

对于办公室 B 的空调使用行为，其开空调行为模式与办公室 A 类似，主要受室内温度的驱动，而关空调行为除了发生在人员下班和吃午饭时刻外，平时短暂离开办公室时也有可能将空调关闭。根据办公室 B 测试数据的统计结果，采用相同的方法对概率函数进行拟合，时间步长取与测试采样间隔一致的 5 分钟步长，可以得到其空调使用行为的模型表述。图 3- 18 和图 3- 10 分别为办公室 B 平时在室和刚进办公室时刻开空调的概率拟合结果。

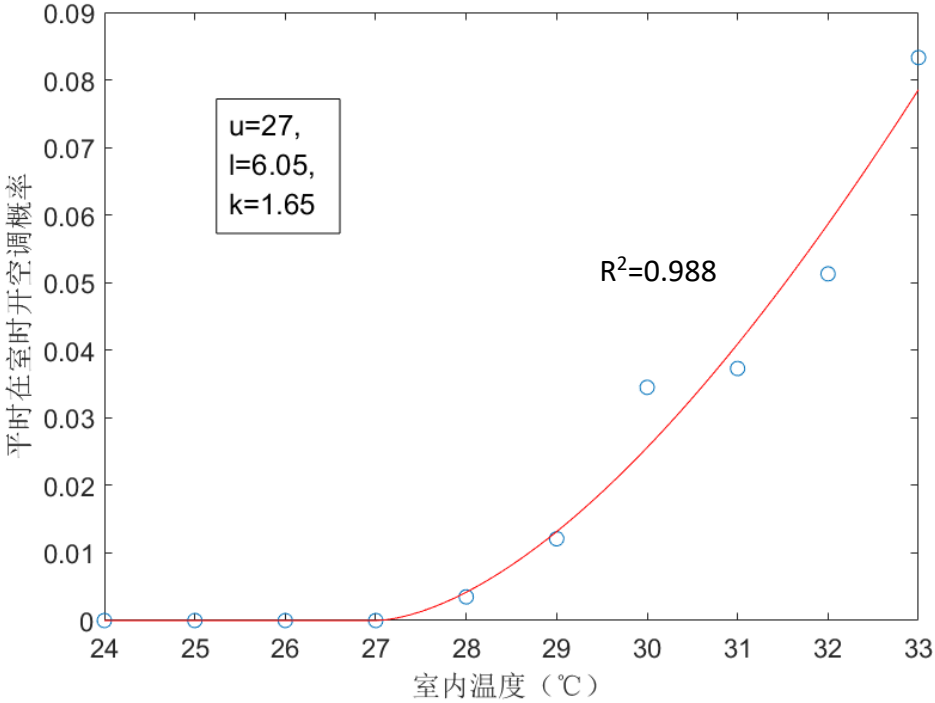


图 3- 18 办公室 B 平时在室热时开空调概率的拟合结果

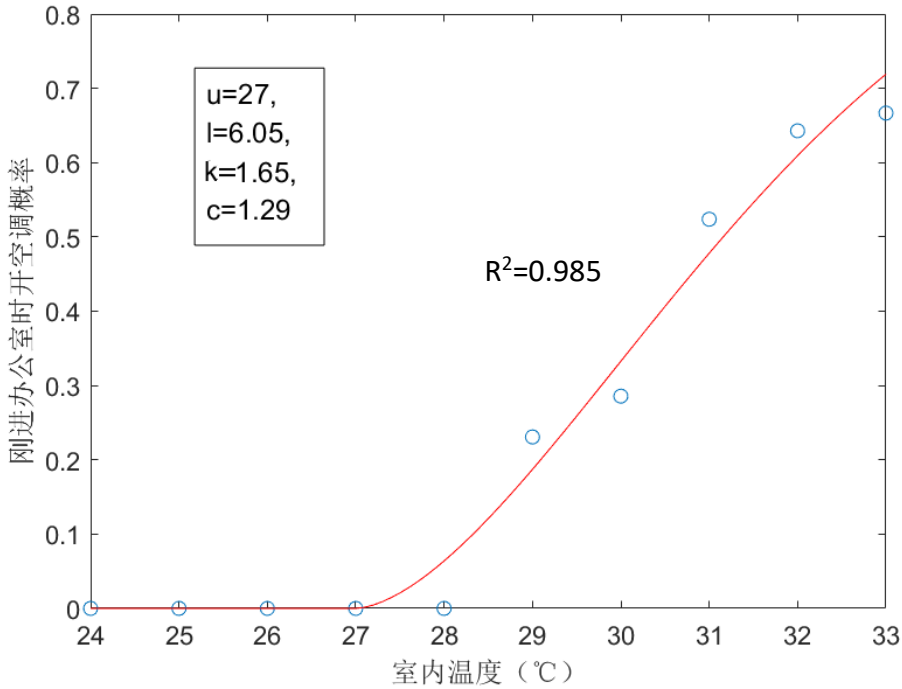


图 3- 10 办公室 B 进门热时开空调概率的拟合结果

由离开事件触发的关空调行为采用固定的概率值进行描述，根据实测数据得到的概率统计值为：

$$p_{entering} = 0.49 \tag{式 3.9}$$

$$p_{leaving} = 0.61 \tag{式 3.10}$$

$$p_{lunch} = 0.47 \tag{式 3.11}$$

总结以上函数拟合结果得到办公室 B 空调使用行为模型的完整描述：

$$P_{on,B} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-27}{6.05}\right)^{1.65}\Delta\tau} & ,\ \text{平时在时室，且 } t > u \\ 1 - e^{-1.29\left(\frac{t-27}{6.05}\right)^{1.65}} & ,\ \text{进办公室时，且 } t > u \\ 0.49 & ,\ \text{刚进办公室时} \\ 0 & ,\ \text{其他} \end{cases} \tag{式 3.12}$$

$$P_{off,B} = \begin{cases} 0.61 & ,\ \text{下班离开办公室时} \\ 0.47 & ,\ \text{午饭离开办公室时} \\ 0 & ,\ \text{其他} \end{cases} \tag{式 3.13}$$

对于办公室 B 的设定温度调节行为，采用随机模拟的方法确定每次空调开启后的设定温度，从而生成人员在室并且空调处于开启状态的设定温度时间表。由于室内温度是人员开关空调动作的驱动因素，并且影响空调能耗，相比遥控器面板上的设定温度更能反映室内人员对于冷热的真实需求，因此采用室内温度的实测数据作为设定温度的确定依据。

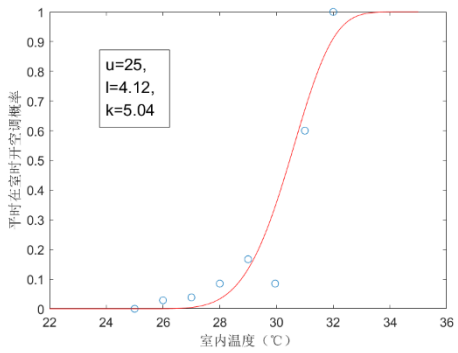
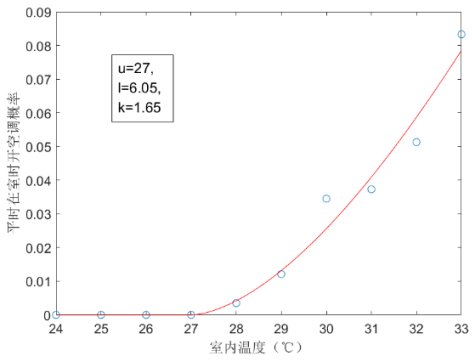
根据上节对室内温度分布的统计结果，假设室温的概率分布满足正态分布，均值 u=28.76℃，标准差 σ=1.09℃，样本值落在(u-2σ, u+2σ)，即（26.58℃，30.94℃）范围内的概率为 95.44%。由于模拟时设定温度只能取整的特点，只考虑 26-30℃的温度范围，则各个设定温度对应的概率为：

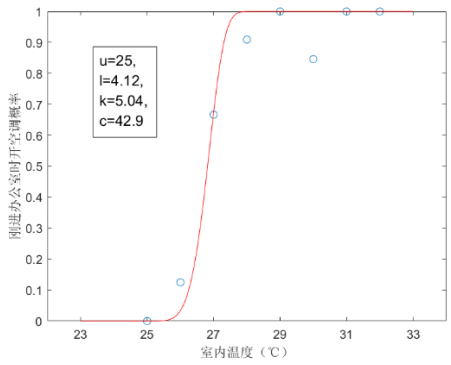
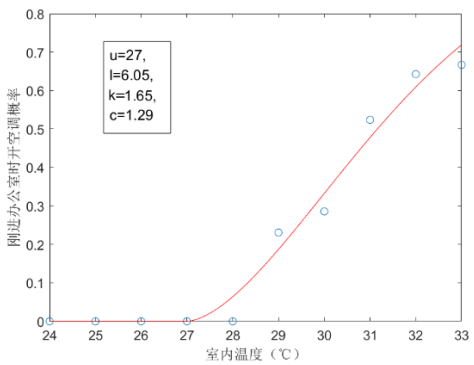
$$f(x)=\begin{cases}0.07, & x=26\\ 0.24, & x=27\\ 0.37, & x=28\\ 0.24, & x=29\\ 0.07, & x=30\end{cases} \qquad \text{（式 3.14）}$$

采用随机抽样中的直接抽样方法，从已知的概率分布出发，利用均匀分布 U (0, 1)的随机数，产生随机变量（即室内温度）的样本值，使得样本具有独立同分布，从而确定空调开启时刻的设定温度。进行模拟时，对于房间内有人的时间段，若判断出某个时刻的空调状态由关闭变为开启，则采用随机抽样方法生成当前时刻的设定温度值，维持该设定温度不变直至空调变为关闭状态。下一个空调开启时刻的设定温度采用同样的方法重新随机生成。

由两间办公室的空调行为模型表达式可知，办公室 A 与办公室 B 的空调使用行为模式相同，因此模型函数形式大体上相同，只存在特征参数上的差异。可将两者由实测数据统计拟合得到的模型参数和概率曲线形状进行比较，观察不同人员空调使用行为的差别，以及参数改变对动作概率曲线形状带来的影响。办公室 A 与办公室 B 的概率曲线形状与模型参数对比如表 3- 2 所示。

表 3- 2 动作概率曲线与模型参数对比

行为模式	办公室 A	办公室 B
平时在室热时开空调		

刚进办公室热时开空调		

由概率曲线对比可知，办公室 A 使用者开空调的阈值温度低于办公室 B，平时在室和进门时刻，在同等温度条件下开空调的概率更高，并且受温度升高影响而发生开空调动作的概率增大也更为显著。结合式 3.2 中“热时开空调”模式的函数形式分析模型参数的影响，办公室 A 模型参数 k 的值大于办公室 B，动作概率随温度升高而增大的幅度更明显，概率曲线形状更为陡峭；而模型参数 l 的值小于办公室 B，概率曲线达到最大值 1.0 所经历的温度区间更窄。

由此，条件概率模型中的参数 k 可理解为人员对温度变化的敏感程度，例如室内温度升高 1℃引起的热感觉变化幅度；参数 l 可理解为人员的温度容忍范围，对于开空调动作，描述人员从“开始觉得热”到“热得受不了”的温度区间。基于此，可以将不同人员的空调行为特点分为敏感型、一般型和迟钝型。

敏感型：l 小 k 大，这类人怕热、开空调次数多、时间长；

迟钝型：l 大 k 小，这类人耐热、开空调次数少；

一般型：介于两者之间。

3.4.3 基于个体的行为模型建立

上述行为模型是基于整间办公室的测试统计结果而建立的，相当于对多个人员的行为进行平均化处理从而提取的群体行为特征。而本文重点关注不同人员行为模式的差异和交互关系对空调行为的影响，需要基于单个个体动作的空调行为模型作为研究基础。由于测试条件的限制，难以对房间中的每个人进行跟踪测试，因此，本文将考虑不同人员对温度的热感觉差异，结合问卷调研，将上述平均化的空调行为模型拓展至若干种个体行为模型，以表示不同人员的行为模式。

对于由温度驱动的开空调行为，开空调概率随着室内温度的升高而增大，对于多人房间，开空调概率为 0.5 时可理解为房间内想要开空调和不想开空调的人数各占一半，由此可将多个人员对温度的敏感程度进行区分。假设房间中不同人员开空调的阈值温度服从正态分布$X \sim N(\mu, \sigma)$，其中，均值μ等于平均化

行为模型中开空调概率为 0.5 时所对应的温度，表示高于此温度时房间内超过半数的人想要开空调；标准差 σ 取离散程度适中的 σ=1。根据拉依达准则，在正态分布中，数值落在$(\mu-\sigma,\mu+\sigma)$、$(\mu-2\sigma,\mu+2\sigma)$和$(\mu-3\sigma,\mu+3\sigma)$范围内的概率分别为 68.26%、95.44%和 99.74%。根据该正态分布曲线，以 5 人房间为例，分别取均值、68%和 95%置信区间的上、下限值，即 μ、μ−σ、μ+σ、μ−2σ、μ+2σ，为房间中各人在开空调概率为 0.5 时所对应的室内温度。假设每个人对温度的敏感程度相同，即个体动作曲线的参数 l、k 与平均化曲线相同，由此可计算出每个人开空调的阈值温度 u，从而将平均化动作概率曲线拓展成五条不同的个体动作概率曲线。

为了保证行为模型能够反映实际情况，本文通过问卷调研的方法确定办公室中人员的空调行为模式。办公室 A 中共有 4 人，其中 2 人表示开空调行为受到温度的驱动。根据图 3-18 的动作概率曲线，办公室 A 平时在室开空调概率为 0.5 时所对应的室内温度为 31.3℃，则构造正态分布$X\sim N(31.3,1)$，通过上述方法确定 2 人的动作概率曲线。在正态分布中，取 68.2%置信区间的上、下限值 μ±σ 为这 2 人开空调概率 0.5 所对应的温度（30.3℃和 32.3℃），参数 l、k 与图 3-18 中的拟合结果相等，计算得到 2 人开空调的阈值温度 u 分别是 24℃和 26℃，其动作概率曲线如图 3- 20 所示。类似地，可得到办公室 A 中 2 人进门时刻热时开空调的动作概率曲线（图 3- 11）。

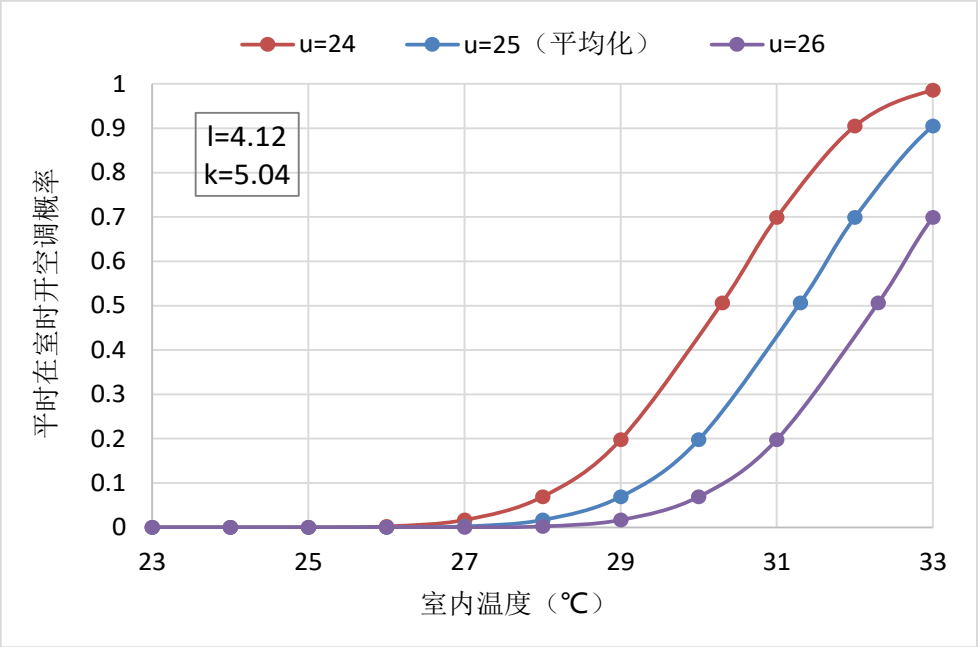


图 3- 20 办公室 A 平时在室热时开空调的个体动作概率曲线

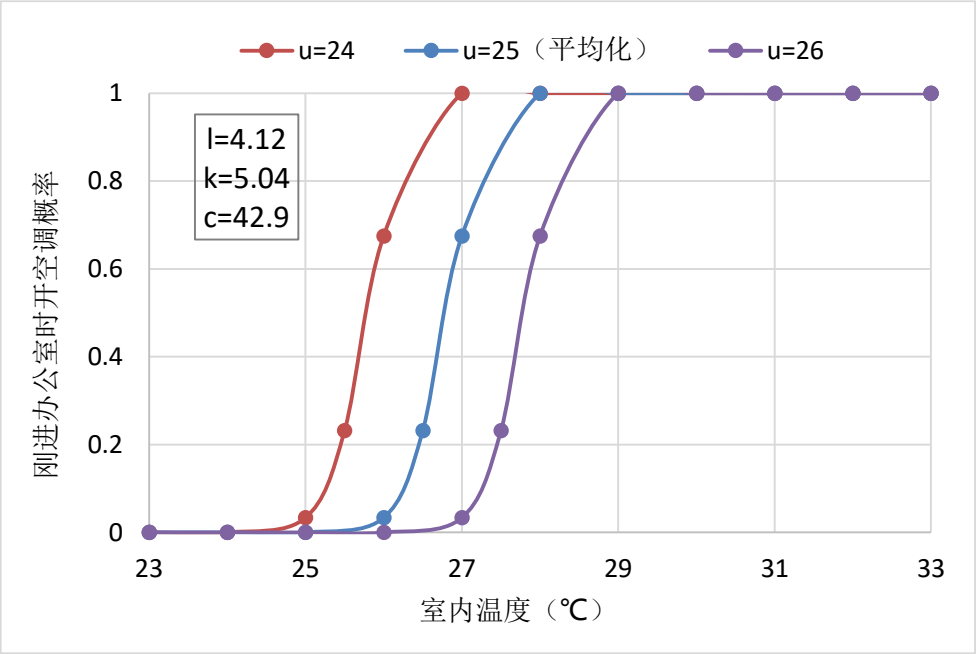


图 3- 11 办公室 A 进门热时开空调的个体动作概率曲线

采用同样的方法建立办公室 B 的个体行为模型，该办公室中共有 5 人，问卷调研显示其中 3 人感觉热时开空调。构造正态分布$X \sim N(49,1)$，取均值 μ 和 68.2%置信区间的上下限值 μ±σ 为这 3 人开空调概率为 0.5 时所对应的温度，参数 l、k 与图 3-20 中的拟合结果相等，计算得到 3 人开空调阈值温度 u 分别是 26℃、27℃和 28℃。图 3- 12 和图 3- 13 分别为该房间平时在室时和进门时刻热时开空调的个体动作概率曲线。

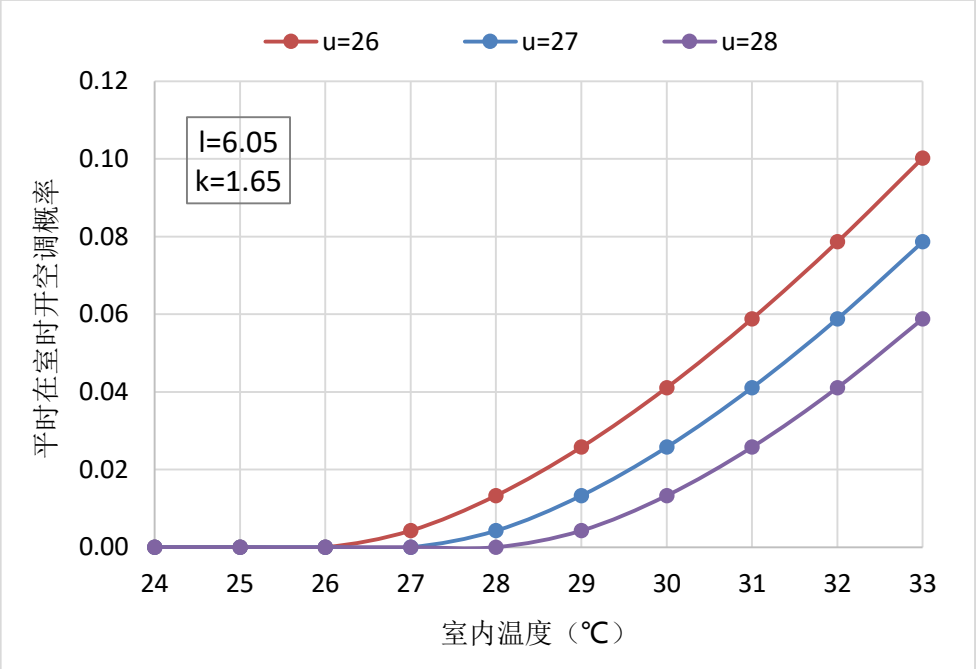


图 3- 12 办公室 B 平时在室热时开空调的个体动作概率曲线

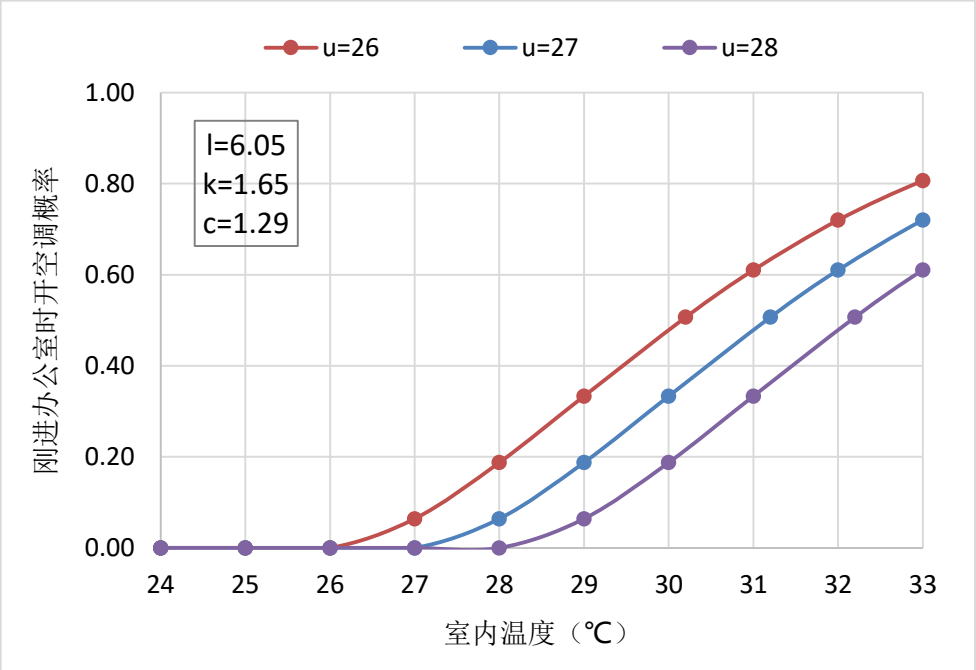


图 3- 13 办公室 B 进门热时开空调的个体动作概率曲线

上述个体行为模型的建立方法基于一定的假设，即房间内多个人员的开空调阈值温度服从正态分布，并且对温度的敏感程度和容忍度保持一致，是对实际情况的一种简化，后续研究将通过案例模拟对该方法的合理性进行检验。

3.5 本章小结

本章对办公建筑空调使用行为的案例测试方法及仪器进行介绍，选取了上海市某办公楼中两间人员构成不同的办公室作为案例测试对象，通过对其室内环境、人员在室状态和空调使用行为的测试数据进行分析，研究空调动作发生概率与环境、事件因素之间的关系，以及人员对于空调设定温度的选择分布。以基于条件触发的动作概率模型为框架，根据行政办公室 A 和研究生办公室 B 各自的空调行为模式特点，分别给出由室内温度和离开事件驱动的动作模型函数形式，并在 Matlab 中利用测试数据的概率统计结果对函数进行拟合，获得模型中的特征参数。同时，考虑不同人员对温度的敏感性差异，将上述行为模型拓展至针对个体行为的动作模型，从而对不同人员的空调使用行为进行定量描述。对于空调设定温度，本文根据测试数据中室内温度的概率分布，采用随机模拟方法确定空调开启时刻的设定温度，每当空调从关闭变为开启状态，则随机生成一次设定温度。

第 4 章 多人空调使用行为模型的建立

对于人员空调行为模拟，目前的研究多着重于单人动作的刻画，很少考虑房间内存在多个人员对使用行为产生的干预和互相影响。对于设定温度的研究，也较少考虑人员的温度调节行为，通常采用固定的空调设定温度进行模拟。因此，本章基于前文的单人空调行为模型，考虑人员之间的交互作用和社会关系对空调使用行为的影响和人员对设定温度的调节偏好，建立办公空间空调使用行为的多人模型，从而获得空调开关状态与运行情况。

4.1 多人空调行为模型方法

多人办公空间中，空调使用行为不仅与环境刺激和个人习惯有关，还受到不同角色人员之间的交互影响。这种人与人之间的交互影响对不同人来说，其影响方式和程度也有所不同，有些人会通过集体商议来决定是否对空调进行调节，有些则服从管理者或上级的意见，有些会照顾不舒适者或听从第一个提出意见的人，还有些人则是在不告知他人的情况下进行调节。

在多人模型中，每个成员对于环境的感知不同，对于空调使用的习惯和偏好也各不相同，对处于社会关系中的群体而言，动作发生之前的群体决策过程必然存在。因此，本文引入基于直觉模糊偏好关系的群体决策理论，对多人动作的决策过程进行描述。对于空调使用行为，多人模型的基本建模思路如图 4- 1 所示。

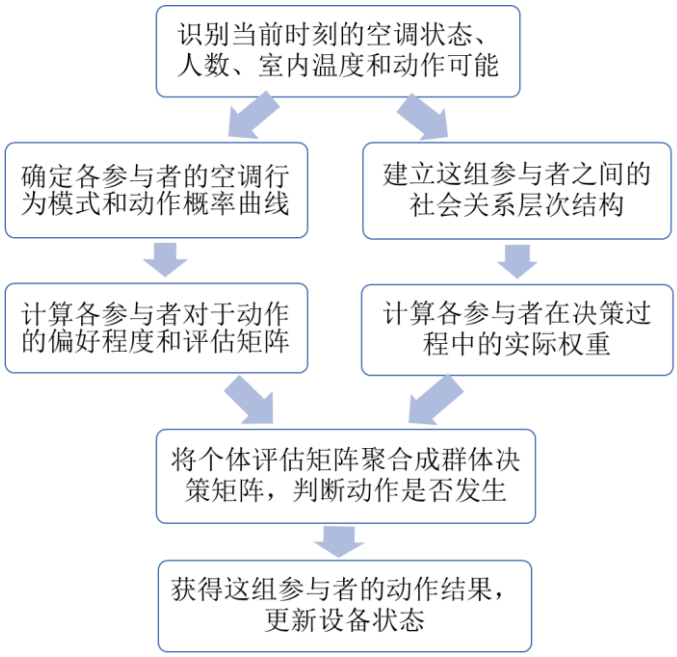


图 4- 1 多人模型的建模思路

对于多人行为的模拟，首先识别当前时刻的空调状态、室内人数、温度和可能发生的调节动作。对于每个参与者，通过条件概率模型计算得到各自空调行为的特征参数和概率曲线，用于描述个体在决策之前的动作意愿和偏好。同时，分析这组参与者之间的社会关系，建立用于描述群体关系的层次结构，从而确定每个参与者在决策过程中的权重（重要性）。之后进行群体决策过程，依据权重将每个参与者的动作意愿集成在一起，判断空调调节动作是否发生，最后获得这组参与者共同决定的动作结果，并更新空调设备的开关状态。

由此，引出多人模型中需要解决的三个关键问题：

1. 基于各参与者的动作概率曲线，如何描述个体的动作意愿和偏好程度；
2. 如何量化描述参与者之间的社会关系，确定空调行为决策中的个体权重；
3. 群体决策过程中，如何将个体的动作意愿集合成为群体意愿，以获得群体商议后的动作结果。

4.1.1 描述个体行为意愿的直觉模糊偏好关系

不确定性和随机性是建筑中人员空调使用行为的一大特征。在同样的情形和环境条件下，人们可能采取不同的动作。例如，大多数人会在觉得热时开启空调，而对于同样的室内温度条件，是否开空调和开空调的时刻都是不确定的。这种不确定性会直接反映到房间空调的运行时间表中，使其启停时刻和运行时长呈现出较强的随机性和波动性。

对于多人办公空间，不同人员的空调行为还具有多样性和差异性的特点。同样对于热时开空调的行为模式，有些人在室温 26℃时觉得热，有些人则是在 28℃时才开启空调。在讨论对空调的调节时，人们可能会说“今天有点儿热”或者“把温度调高一些吧”，而不会使用精确的数值来描述自己的热感觉，但是人们通常都能理解这些抽象的词汇中包含的信息。

为了定量地刻画这些不确定的信息，Zadeh[79]提出了以隶属度为特征的模糊集（Fuzzy Sets）理论，用取值在[0,1]范围的隶属度函数来表示某个元素x在集合 F 中的隶属程度。然而，模糊集理论只能表征正面信息，例如人员“想要开空调”的意愿程度，而不能体现“不想要开空调”和“不确定”的情形。为了更好地描述人们对事物认知的不确定性，Atanassov[80]提出了直觉模糊集（Intuitional Fuzzy Sets）的概念，以隶属度、非隶属度和犹豫度来表征不确定性。

定义 1（IFS）[80] 设 X 是一个非空集合，则称

$$\mathrm{A} = \{\langle x, \mu_A(x), v_A(x)\rangle | x \in X\}$$

为直觉模糊集，其中，$\mu_A(x)$和$v_A(x)$分别表示 X 中元素x属于 X 的子集 A 的隶属度和非隶属度，且满足

$$0 \le \mu_A(x) \le 1,\quad 0 \le v_A(x) \le 1,\quad 0 \le \mu_A(x) + v_A(x) \le 1$$

其中，

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x)$$

式中$\pi_A(x)$表示元素x属于子集 A 的犹豫度。

引入不确定指标是直觉模糊集最重要的特征，用于描述实际问题中，由于信息的不充分、不可量化等因素，人们表达的观点可能带有不确定性信息。为方便起见，Xu[81]称$\alpha = (\mu_\alpha, v_\alpha)$为直觉模糊数，且满足条件$\mu_\alpha, v_\alpha \in [0,1]$，$\mu_\alpha + v_\alpha \le 1$。；例如，在空调使用行为中，可以利用直觉模糊数$\alpha_1 = (0.74, 0.22)$和$\alpha_2 = (0.66, 0.15)$，分别表示房间中的两个成员对于开空调的意愿程度。

在比较两个直觉模糊数的大小时，Xu[81]和 Zhang[82]分别提出精确函数$H(\alpha)$和相似性函数$L(\alpha)$的定义，如式 4.1 和式 4.2 所示：

$$H(\alpha) = \mu_\alpha + v_\alpha \qquad \text{（式 4.1）}$$

$$L(\alpha) = \frac{1 - v_\alpha}{1 + \pi_\alpha} \qquad \text{（式 4.2）}$$

对于直觉模糊数$\alpha_1 = (\mu_{\alpha_1}, v_{\alpha_1})$和$\alpha_2 = (\mu_{\alpha_2}, v_{\alpha_2})$，其大小比较的全序方案为：

若$L(\alpha_1) < L(\alpha_2)$，则$\alpha_1 < \alpha_2$。

若$L(\alpha_1) = L(\alpha_2)$，则有如下两种情况：

若 $H(\alpha_1) < H(\alpha_2)$，则$\alpha_1 < \alpha_2$；

若 $H(\alpha_1) = H(\alpha_2)$，则$\alpha_1 = \alpha_2$。

多人模型中，在明确当前空调状态和环境条件之后，房间中各成员基于自身的热舒适需求和行为习惯，对于是否产生调节行为给出意见。在表达对事物的偏好和看法时，对可选择的方案进行两两比较从而建立偏好关系矩阵，是一种简便易行并被广泛采用的方法[83]。偏好关系是通过对备择方案的两两比较而构建的矩阵结构，其每一个元素都表示了一个方案相对于另一个方案的偏好程度[84]。

为了比较两个方案之间的相对重要性，Saaty[84]提出了基本标度的概念，用于表示在某个判断准则下方案 A_1 相对于 A_2 的偏好程度。Tanino[85]进一步提出模糊偏好关系的概念，采用 0.1-0.9 标度来表示方案间的偏好程度，如表 4- 1 所示。0.1-0.9 标度中，值 0.5 表示对两个方案同等偏好，大于 0.5 表示方案 A_1 优于方案 A_2，标度越接近 1 则表示越倾向于方案 A_1。

表 4- 1 0.1-0.9 标度及对应含义

0.1-0.9 标度	含义
0.1	极端不偏好
0.2	非常强烈不偏好
0.3	强烈不偏好

0.4	适中不偏好
0.5	同等偏好
0.6	适中偏好
0.7	强烈偏好
0.8	非常强烈偏好
0.9	极端偏好
0 和 1 之间的其他值	表示折中的一些中间值

结合直觉模糊数，决策参与者在根据已知信息对比两个方案时，可以从“优于”“不优于”和“不确定”三个方面来表达自己的偏好信息。直觉模糊偏好关系的标准数学定义如下[86]：

定义 2（IFS 偏好关系）[86] 方案集$\mathrm{A}=\{A_1,A_2,\cdots,A_m\}$上的直觉模糊偏好关系 R 为一个矩阵$\mathrm{R}=(r_{ij})_{m\times m}$，其中$r_{ij}=(\mu_{ij},v_{ij})(i,j=1,2,\cdots,m)$，其中，$\mu_{ij}$表示方案$A_i$相对于方案$A_j$的偏好程度；$v_{ij}$表示方案$A_j$相对于方案$A_i$的偏好程度。$\pi_{ij}=1-\mu_{ij}-v_{ij}$，表示犹豫度或不确定程度。这三类元素均满足：

$$\mu_{ij},v_{ij}\in[0,1]，\mu_{ij}+v_{ij}\leq 1，\mu_{ij}=v_{ji}，\mu_{ii}=v_{ii}=0.5，i,j=1,2,\cdots,m$$

引入直觉模糊偏好关系后，可以利用直觉模糊数来描述人员对于各动作的偏好程度，根据动作概率曲线确定决策发生之前各参与者的评估矩阵。以开空调动作为例，条件概率模型给出了在某个时刻或者环境条件下人员开空调的概率值，可理解为人员对于“开空调”这个方案的隶属度。结合直觉模糊偏好关系的标度理论，将人员对动作的偏好程度划分为[0,1]之间的 5 个离散区间值（表 4- 2），在对应的区间内随机取值，即得到人员对“开空调”动作的直觉模糊偏好值r_{ij}，从而将各参与者的动作概率曲线转化为个体评估矩阵。

表 4- 2 人员对动作的偏好程度划分

区间值	偏好程度
0~0.2	非常不偏好
0.2~0.4	较不偏好
0.4~0.6	同等偏好
0.6~0.8	较偏好
0.8~1.0	非常偏好

对于开关空调的群体决策问题，假设在室温 28℃且空调为关闭的状态下，可能发生的动作包括开空调、不开空调两种，则有备择方案集$\mathrm{A}=\{A_1,A_2\}$。由条件概率模型计算得到室内某个人员的开空调概率为 0.7，则认为他对于方案A_1的偏好程度为“较偏好”，在表 4-2 对应的区间 0.6~0.8 中随机取值得到$\mu_{12}=0.74$，表示该人员对开空调动作的偏好程度；而v_{12}表示 μ_{12}的对立面，即该人员对于不

开空调的意愿程度，在“较不偏好”的对应区间 0.2~0.4 中随机取值得到v_{12}=0.22，并且保证$\mu_{ij}+v_{ij}\leq 1$，由此可得人员对方案A_1“开空调”动作的直觉模糊偏好值r_{12}。用同样的方法确定人员对方案A_2的偏好值r_{21}，则可得到该人员在方案集 A 上的偏好关系$\mathrm{r}_{12}=(\mu_{12},v_{12})=(0.74,0.22)$，$\mathrm{r}_{21}=(\mu_{21},v_{21})=(0.31\ 0.67)$。其中，$\mu_{12}$表示方案$A_1$相对于$A_2$的偏好程度，$\mu_{21}$表示方案$A_2$相对于$A_1$的偏好程度。

值得注意的是，在开关空调的决策问题中，只有开和不开两种可选的方案，v_{12}与μ_{21}的含义相同，而采用直觉模糊数的描述方法，使得这两个变量的取值不完全相等，表示个体在“赞成开空调”和“反对不开空调”两种情况之间存在不确定性和可以商量的余地，体现出个体偏好可能会受到他人影响而导致决策结果发生改变的情况。同时，采用在区间范围内随机取值的方法，使得同一个人在相同条件下开空调的概率存在小范围波动，反映了个体在空调使用行为中的随机性和不确定性。

4.1.2 个体权重确定方法

层次分析法（Analytic Hierarchy Process）是广泛应用于多目标决策问题中的分析方法，用于处理由多个方案、多个评价准则、或多个参与者所构成的复杂多属性决策问题[87]。由于人员的空调使用行为受到环境、事件等多因素影响，群体决策过程涉及多人、多属性的决策问题，可构造层次结构将该问题分解为不同层次，并且建立偏好关系来反映同一层次上的元素关于上一层次元素的相对重要性。多人办公空间中，空调使用行为的决策问题可分为总体目标层、参与者层、准则层及方案层，其层次结构如图 4- 2 所示。

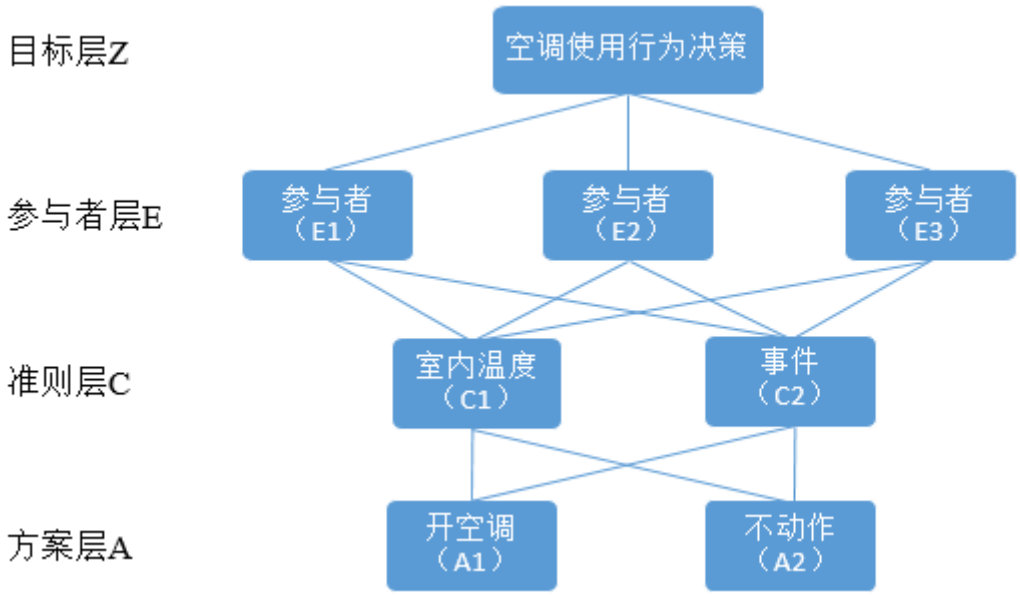


图 4- 2 空调行为决策问题的层次结构

层次分解、两两比较、优先权重计算、优先权融合是层次分析法的核心内容[88]。层次结构建立的目的在于确定相邻两层元素之间的隶属关系。通过两两比较每层元素之间的相对重要性，建立判断矩阵，例如方案A_1与方案A_2在准则C_1下的相对重要性。而方案A_1与方案A_2在准则C_1下的优先权重向量，则通过求解判断矩阵特征向量的方法进行计算。为了获得每一层的各个元素相对决策总目标的优先权重，计算备择方案的最终排序，需要由上而下逐层对元素的优先权进行融合。

假设第$\mathrm{k}-1$层元素对于总目标的优先权向量$a^{k-1}=(a_1^{k-1},a_2^{k-1},\cdots,a_m^{k-1})^T$已经给出，第 k 层在$\mathrm{k}-1$层的第 j 个元素下的优先权向量为$b_j^k=(b_{1j}^k,b_{2j}^k,\cdots,b_{mj}^k)^T$。令$B^k=(b_1^k,\cdots,b_m^k)$，则对于总目标而言第 k 层 n 个元素的最终优先权向量为：

$$a^k=B^k a^{k-1} \tag{式 4.3}$$

更一般地，有最终优先权公式：

$$a^k=B^k\cdots B^3 a^2 \tag{式 4.4}$$

式中a^2为第二层元素的优先权向量，$3\le \mathrm{k}\le \mathrm{h}$，h 为层次数。

由此可得最低层元素（即备择方案）对决策总目标的最终优先权重，则决策问题计算得到的最优方案即为最终权重最大者。

在图 4- 2 所示的多人模型层次结构中，为了采用 AHP 方法获得最终的空调动作方案，首先需要确定第二层元素的优先权重向量，即分配给各个参与者的权重（重要性）。根据参与者的社会地位、经验、判断力等，可以客观或主观地确定他们在决策中的权重。而对于空调使用行为，人们对空调遥控器的话语权与社会地位不是简单的正比关系，还与人员的环境敏感程度、离风口距离远近等因素有关，难以通过客观评价方法确定各成员的权重。

借鉴偏好关系理论，空调行为决策问题中，人与人之间也可以通过两两比较的方法获得相对重要性，采用特征向量法计算各参与者的实际权重[89]。对于包含三个参与者$\mathrm{E}=\{E_1,E_2,E_3\}$的决策问题，其社会关系的层次结构如图 4- 3。该问题中，由于需要各个参与者对每个人的重要性进行评价或排序，因此方案层也由各参与者组成。

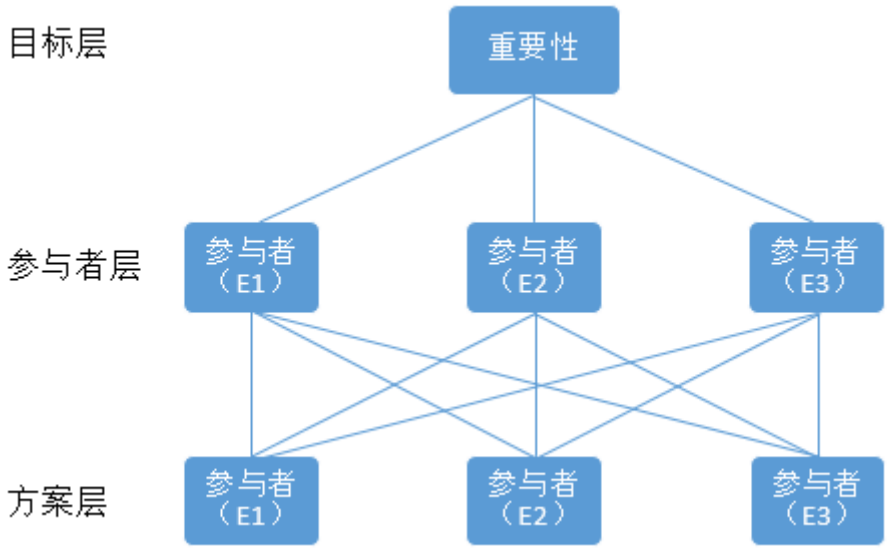


图 4- 3 参与者权重计算的层次结构

假设$W=(w_1,\ w_2,\ \cdots,w_h)^T$是每个参与者在决策问题中的实际权重，通常难以直接获得，但是可以通过调研参与者之间的关系来进行评估。假设各个成员都可以如实地表达他们的观点，则请每个人对房间中的所有人（包括自己）在空调使用行为中的重要性（话语权）进行评价。本文同样将人员的相对重要性划分为 5 个等级（表 4- 3），根据每个参与者对他人和自己的重要性评级，在对应的区间内随机取值，从而获得参与者主观权重矩阵$S=(S_{lk})_{h\times h}\ (l,k=1,2,\cdots,m)$。其中，$S_{lk}$表示参与者$E_l$相对于参与者$E_k$的重要性，则矩阵 S 的第$k$列向量表示从参与者$E_k$的主观角度出发，房间中其他人以及他自己在空调使用行为中的重要性。

表 4- 3 人员的相对重要性等级

区间值	重要性等级
0~0.2	非常不重要
0.2~0.4	不重要
0.4~0.6	同等重要
0.6~0.8	较重要
0.8~1.0	非常重要

根据 AHP 方法的层次结构，各参与者最终的权重可由下式进行计算：

$$A^3=S*A^2 \qquad （式 4.5）$$

式中 S 表示结构中第二层对第三层元素的主观权重矩阵，A^3是第三层元素对于目标层的优先权重列向量；A^2是第二层元素对于目标层的优先权重列向量。由于A^2、A^3这两个列向量均表示参与者在决策中的实际权重，故有$A^2=A^3=W$。则式 4.5 可以表示为：

$$W = S * W \quad \text{（式 4.6）}$$

可见，W 是矩阵 S 的特征向量，并且，与 W 相对应的矩阵 S 的特征值应该为单位特征值。对于任意正列随机矩阵，单位特征值始终存在[90]。因此，求出主观权重矩阵 S 的特征向量，即可得到这组参与者的实际权重 W。

例如，当房间中有固定的五位成员$E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$，对每个成员进行编号，采用以下问题调研每个人对其他人权重的主观评价，并让每个成员独立作答。

您在调节空调时会征求谁的意见？请您对房间中所有人的重要性进行评分（1 非常不重要—5 非常重要）。

假设成员 E_2 认为自己“较重要”，则在表 4-3 对应的区间 0.6~0.8 中随机取值得到$S_{22} = 0.62$，表示 E_2 对于自己在房间中空调话语权的主观评价；同时，E_2 认为其余的人均“不重要”，则在 0.2~0.4 区间中随机取值生成 E_2 对其他人的主观评价，进而得到E_2对所有人的主观权重评价$S_{2k} = (S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25})^T = (0.27, 0.62, 0.24, 0.31, 0.39)^T$。同样地，根据其他成员的调研结果生成各自的主观评价列向量，从而得到该房间的主观权重矩阵$S = (S_{lk})_{5\times5}$ $(l, k = 1,2,\cdots,5)$。

由式 4.6 可知，求解矩阵 S 的特征向量，则可得到这组参与者的实际权重 W。矩阵特征向量的求解方法有多种，本文利用 MATLAB 中的函数来求解矩阵的特征向量，并进行归一化处理，具体实现方法如下。

```
>> [x,y]=eig(S)                    //求矩阵 S 的特征向量 x 和特征值 y
>> y_lamda = x(:, 1)               //取特征值最大时对应的特征向量
>> w=y_lamda/sum(y_lamda)          //将特征向量归一化，得到实际权重 w
```

4.1.3 基于直觉模糊层次分析法的群体决策方法

获得各参与者在空调行为中的权重之后，结合直觉模糊理论和层次分析法，可以将房间中多个参与者的动作意愿集成在一起，判断空调调节动作是否发生。在该方法中，利用直觉模糊数来表示各参与者的空调动作偏好信息，进而用直觉模糊偏好关系来表征方案层元素之间的相对重要性。引入直觉模糊数之后，方案层最终权重的计算方法与传统 AHP 方法略有不同。在集成群体的偏好信息时，将每个参与者看作单独的个体，分别计算每个参与者提供的偏好关系所对应的个体优先权重向量，再用直觉模糊加权算术平均（intuitionistic fuzzy weighted averaging，IFWA）算子集成群体的整体优先权，从而对备择方案进行排序。

由此，采用直觉模糊层次分析法来求解空调行为的群体决策过程，具体算法如下[83]：

1. 识别群体决策问题的目标、参与者、准则和备择方案，构建层次结构。假设有 h 个参与者$E = \{E_1, E_2, \cdots, E_h\}$，根据 n 个判断准则$C = \{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$对 m 个

备择方案$\mathrm{A}=\{A_1,A_2,\cdots,A_m\}$进行评价。各参与者的实际权重为$\mathrm{W}=(w_1,\ w_2,\cdots,w_h)^T$，其中，$w_l>1\ (l=1,2,\cdots,h)$且$\sum_{l=1}^{h}w_l=1$。

2. 每个参与者对方案进行两两比较，用直觉模糊数给出自己在各准则下对每个备择方案的评估值，建立个体直觉模糊评估矩阵$\mathrm{R}^{(l)}=(r_{ij}^{(l)})_{m\times n}$，其中$r_{ij}^{(l)}=(r_{ij}^{(l)\mu},r_{ij}^{(l)\nu})(i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n)$。

3. 利用增强的 IFWA 算子，将参与者E_l在不同准则C_j下对方案A_i的评估值$r_{ij}^{(l)}$集成为总评估值$p_i^{(l)}$，如式 4.7 所示，其中ω_j为准则的权重。

$$\mathrm{p_i^{(l)}}=\mathrm{EIFWA_\omega}\left(r_{\mathrm{i1}}^{(l)},\ldots,\mathrm{r_{in}^{(l)}}\right)=\left(1-\prod_{j=1}^{n}\left(1-\omega_j^{\mu}\cdot r_{ij}^{(l)\mu}\right),\ \prod_{j=1}^{n}\left(\omega_j^{\nu}+r_{ij}^{(l)\nu}-\omega_j^{\nu}\cdot r_{ij}^{(l)\nu}\right)\right),$$
$$i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n \qquad \text{（式 4.7）}$$

4. 利用IFWA算子将所有参与者对某个方案的评估值$p_i^{(l)}(l=1,2,\cdots,h)$合成为整体直觉模糊数$p_i$，如式 4.8 所示，其中$w_l$为参与者的权重。

$$p_i=\mathrm{IFWA_w}\left(\mathrm{p_i^{(l)}},\ldots,\mathrm{p_h^{(l)}}\right)=\left(1-\prod_{l=1}^{h}\left(1-\mathrm{p_i^{(l)\mu}}\right)^{w_l},\ \prod_{l=1}^{h}(\mathrm{p_i^{(l)\nu}})^{w_l}\right) \qquad \text{（式 4.8）}$$

5. 利用式 4.1 和式 4.2 对整体直觉模糊数$p_i(i=1,2,\cdots,m)$进行排序，排序后值最大的方案即为最优方案A_{i^*}，如下式所示。

$$i^*=\arg\max\{p_i\} \qquad \text{（式 4.9）}$$

6. 算法结束。

需要说明的是，本文基于条件概率模型生成参与者对各方案的直觉模糊评估矩阵，条件概率模型中已经考虑了室内温度和事件因素在单独作用、和共同作用时对空调行为的影响，从而计算得到综合多个影响因素下的动作概率值。因此，图 4- 2 决策问题中的准则层可以被简化为一个总体准则 C，直接给出每个参与者对各方案的评估矩阵，则参与者E_l的总体评估值$p_i^{(l)}$与个体评估矩阵$\mathrm{R}^{(l)}$相等，步骤 3 可以省略。

4.2 多人模型的模拟方法

基于上述多人模型方法，本文建立多人办公空间中空调使用行为的模拟计算方法，从而获得房间的空调开关情况及运行状态作息。

4.2.1 计算过程及简单算例

多人模型计算过程中所需要的模型变量如表 4- 4 所示（以空调关着的状态为例）。其中，参与者权重向量可通过调研不同人员构成的办公室类型从而确定。

本文在进行空调行为的案例测试时，同时在测试的办公楼中选取部分办公室进行调研，房间中的人员构成类型包括老师+老师、学生+学生、老师+学生几种。调研时以房间为单位，得到主观权重矩阵，通过 4.1.2 节中的方法计算得到各个办公室的实际权重。根据办公室中的群体关系特征和权重调研结果，本文将群体关系分为同级关系、上下级关系、存在环境敏感者三种，并给出对应的权重取值，在多人行为模拟时可作为推荐值使用。而表中的分类方法能否反映大多数办公室的群体关系，以及同时存在多种关系时个体权重应如何取值，有待未来研究进行补充和完善。

模型变量中，个体评估矩阵表示各参与者在不同影响因素下的空调行为概率，可结合测试数据对不同行为模式的参与者建立条件概率模型，也可自定义设置不同强度的概率曲线作为模型输入参数。例如，根据前文对概率曲线特征参数 *ulk* 不同取值和含义的讨论，可将人员的行为特征按照温度敏感程度划分为敏感型、迟钝型和一般型。

表 4- 4 空调行为多人模型变量表

模型变量	表达式	物理含义	举例
备择方案	$\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$	空调动作	{不动作，开}
评价准则	$\{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$	动作的影响因素	{室温，事件}
参与者	$\{E_1, E_2, \cdots, E_h\}$		{赵，钱，孙，李，…}
参与者权重向量	$(w_1, w_2, \cdots, w_h)^T$	w_l为个体实际权重	同级关系：(0.20,0.17,0.23,0.21,0.19) 上下级关系：(0.72,0.08,0.1,0.05,0.05) 环境敏感者：(0.37,0.16,0.14,0.16,0.17)
个体评估矩阵	$R^{(l)} = (r_{ij}^{(l)})_{m\times n}$	$r_{ij}^{(l)}$表示个体根据因素C_j选择动作A_i的概率	敏感型、一般型、迟钝型

为了反映人员空调使用行为的多样性和不同角色人员之间的交互影响，本文利用直觉模糊数来描述各参与者对于不同动作的偏好程度，采用层次分析法确定每个参与者在决策过程中的实际权重（重要性），最后将个体评估矩阵聚合成群体决策矩阵，获得这组参与者的动作结果。综合 4.1 节所述的模型方法，本文通过一个办公空间空调行为的简单例子，对多人模型的计算过程进行展示。

假设在供冷季中，某办公室中有五位参与者$\mathrm{E} = \{E_1, E_2, \cdots, E_5\}$，在评价准则$\mathrm{C} = \{$平时在室且室内温度 $= 30°\mathrm{C}\}$的条件下，对两个空调动作$\mathrm{A} = \{A_1, A_2\} = \{$开空调, 不动作$\}$进行决策。计算过程如下：

1. 根据表 4-3 中的重要性等级，通过调研建立房间内各参与者的主观权重矩阵$\mathrm{S} = (S_{lk})_{h\times h}$，有

- E_2 认为自己“较重要”，剩下的人“不重要”；

- 其他人均认为 E_2“非常重要”，自己“一般”，剩下的人“不重要”

表 4- 5 各参与者的主观权重矩阵

主观权重S_{lk}	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.55	0.27	0.25	0.37	0.38
E2	0.99	0.62	0.93	0.87	0.82
E3	0.30	0.24	0.56	0.26	0.30
E4	0.39	0.31	0.22	0.44	0.33
E5	0.33	0.39	0.25	0.23	0.54

2. 由式 4.6 计算这组参与者的实际权重向量 W，得到

$$W = (0.16, 0.37, 0.14, 0.16, 0.17)^T$$

3. 根据各参与者的空调行为模式，建立条件概率模型，获得准则 C 下对应的动作概率值，有

$$p_{on,1} = 0.63, p_{on,2} = 0.63, p_{on,3} = 0.24, p_{on,4} = 0.24, p_{on,5} = 0.24$$

4. 根据表 4-2 中的偏好关系标度，利用直觉模糊数将各参与者的动作概率转化为个体评估矩阵$R^{(l)}$，得到

表 4- 6 各参与者的个体评估矩阵

个体评估矩阵$\boldsymbol{R}^{(l)}$		C
$\boldsymbol{R}^{(1)}$	A1	(0.76, 0.19)
	A2	(0.29, 0.69)
$\boldsymbol{R}^{(2)}$	A1	(0.66, 0.14)
	A2	(0.31, 0.62)
$\boldsymbol{R}^{(3)}$	A1	(0.25, 0.64)
	A2	(0.71, 0.26)
$\boldsymbol{R}^{(4)}$	A1	(0.29,0.70)
	A2	(0.63, 0.20)
$\boldsymbol{R}^{(5)}$	A1	(0.38, 0.61)
	A2	(0.69, 0.29)

5. 利用 IFWA 算子（式 4.8）将个体评估矩阵$R^{\{l\}}$聚合成群体决策矩阵p_i，有

$$p_1 = (0.553, 0.299), p_2 = (0.515, 0.411)$$

6. 根据式 4.1 和 4.2 比较群体决策矩阵p_i值的大小，得到最优方案，有

$$L(p_1) = 0.611, L(p_2) = 0.548$$

因此有$p_1 \succ p_2$，其中“$\succ$”表示“优于”，故该决策问题的结果是将空调开启。

由该例子可以看出，多人模型的动作结果不仅与个体的空调行为模式有关，还受到房间中各成员在空调使用中的权重所影响，当群体中优先权大的成员意见发生改变时，群体决策的结果也将随之变化，这反映了人与人之间的交互关系对空调使用行为的影响。

4.2.2 多人模型的模拟流程

为了将上述多人模型方法应用于人行为的模拟中，本文选取建筑性能仿真软件 DeST 作为模拟平台。DeST 软件本身包含能够模拟人员位移和动作的模拟模块，其中人员动作模拟采用的是条件概率模型。因此，本文在 DeST 现有人行为模块的基础上，增加对多人交互关系和行为特征的描述方法，实现对多人房间中空调使用行为的模拟计算。

大体上，空调动作模拟所需的输入参数包括：1）建筑模型；2）人员行为模式：包括由温度和事件触发的行为等；3）人员位移模拟结果：各时刻人员在建筑各房间中的分布情况；4）模拟时间步长：应采用小时间步长（<1h）来确保模拟的准确程度。输出结果则包括：逐时室内环境参数、各人员的动作、空调运行状态等信息。

空调行为模拟时，人员动作与温度之间是耦合计算的关系，动作概率取决于室内温度，而动作结果又会导致室内温度变化。因此，空调行为模拟实际就是对室内环境、人员动作、空调状态三个序列实施交替计算。空调行为多人模型的模拟流程如图 4- 4 所示，主要分为以下几个步骤：

0. 初始化室内环境与设备状态。读取输入参数和配置参数，包括室内人数、空调行为模式、群体关系等。

对于每个时刻，

1. 对室内人数进行判断，当房间内人数大于 1 时，执行多人模型计算流程。

2. 根据上一时刻的空调状态，判断执行“开空调”或者“关空调”的动作概率计算过程。

3. 根据配置参数确定房间中人员的行为模式和群体关系，计算各人的权重。

4. 根据空调行为模式，由条件概率模型计算得到各人员的空调行为概率。

5. 根据群体决策过程计算多人的空调行为概率，判断空调状态是否改变。

6. 根据多人动作结果，更新空调设备的运行状态。

7. 若执行“开空调”动作，则依据温度偏好分布，通过随机抽样确定空调开启时刻的设定温度；若执行“关空调”动作，则设定温度取夏季 40℃，冬季-10℃。

8. 更新空调运行状态、设定温度和人员状态，输出给 DeST 进行能耗计算，并从 DeST 中读取下一时刻的室内温度。

9. 进入下一时刻的计算。

重复以上步骤，就能得到房间各个时刻的空调运行状态、室内环境参数、建筑负荷及能耗，从而定量刻画多人交互的空调使用行为，分析和评估人行为对建筑性能的影响。

以上是多人空调行为模拟的流程框架。在实际情况中，根据人员行为特点、

事件发生时刻的不同，可对模拟流程进行调整优化。具体而言，1）对于自由调节空调的个体（即不需要征求他人意见），采用 DeST 中单人模型的方法计算其动作概率，由条件概率模型计算空调行为概率，产生随机数概率与之进行比较，判断动作是否发生；2）对于不讨论的情形（例如上班时间人员依次进入办公室、下班依次离开），对可能产生动作的个体采用单人模型判断动作是否发生。

多人模型计算过程的具体代码见附录 A。

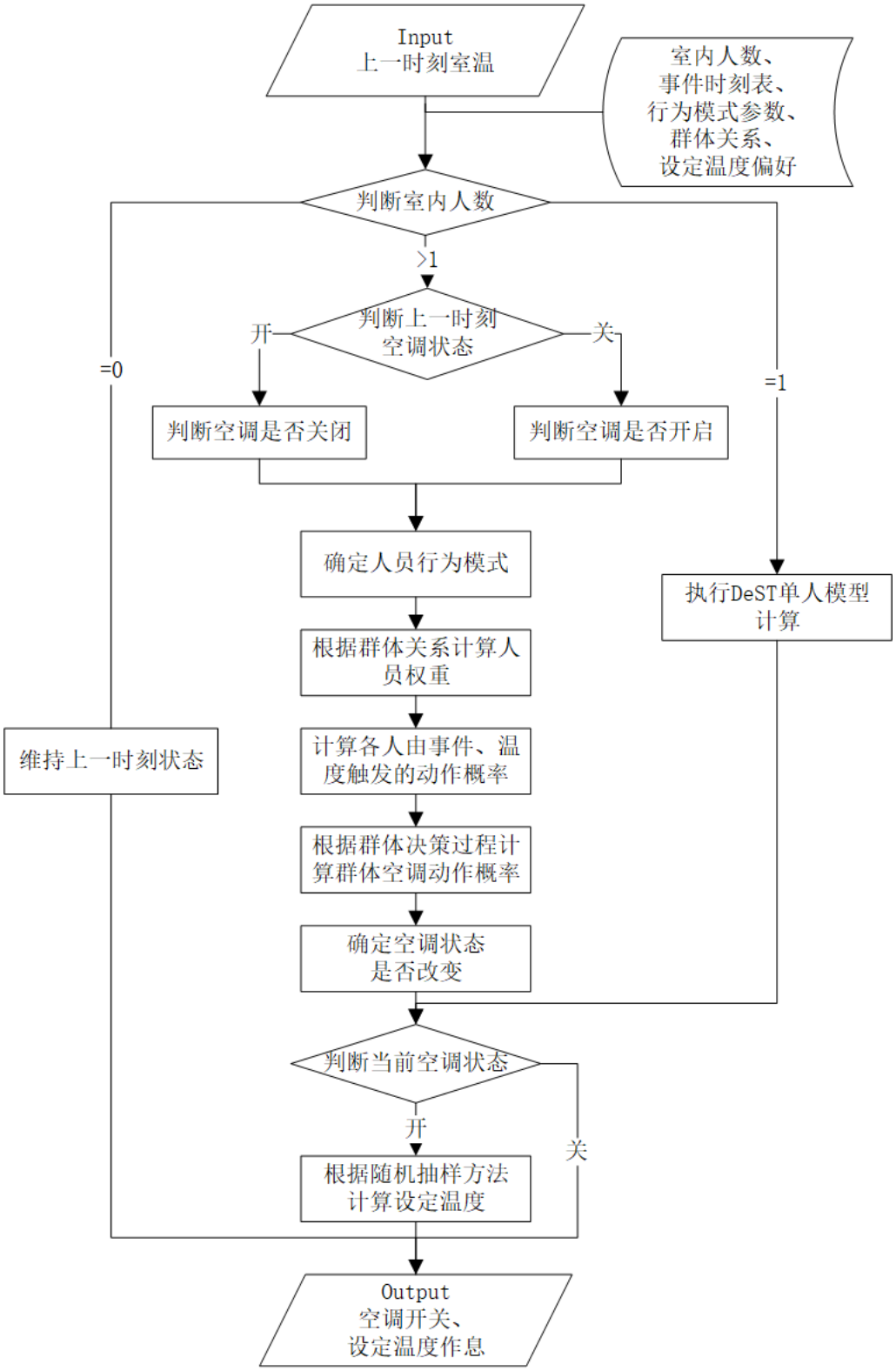


图 4- 4 空调行为多人模型的模拟流程

在进行多人空调行为与建筑能耗的耦合计算时，本文采用 obFMU (occupant behavior functional mock-up unit)将多人模型与 DeST 软件进行联合模拟，通过 FMI (functional mock-up interface)接口实现与 DeST 软件交换输入和输出数据。obFMU

是用于与建筑能耗模拟软件进行协同仿真的建模工具[91]，它需要基于 obXML (occupant behavior eXtensible Markup Language)框架[92]生成 XML 模型描述文件，并使用 DeST 软件进行配置。obFMU 模块包含四个主要组件：协同仿真接口、XML 格式的接口描述文件，数据模型和求解器[91]。

空调行为多人模型与 DeST 软件的联合模拟流程如图 4- 5。从 DeST 传入上一时刻的室内温度参数，基于当前时刻的人员和事件信息，obFMU 空调行为模块计算得到空调运行状态和设定温度，并输出给 DeST；DeST 进行当前时刻的建筑负荷及能耗计算，得到各个房间的室内温度；温度参数返回给 obFMU 后执行下一时刻的空调行为模拟计算。以此循环进行联合模拟，从而得到多人房间的空调开关状态和运行时间表。

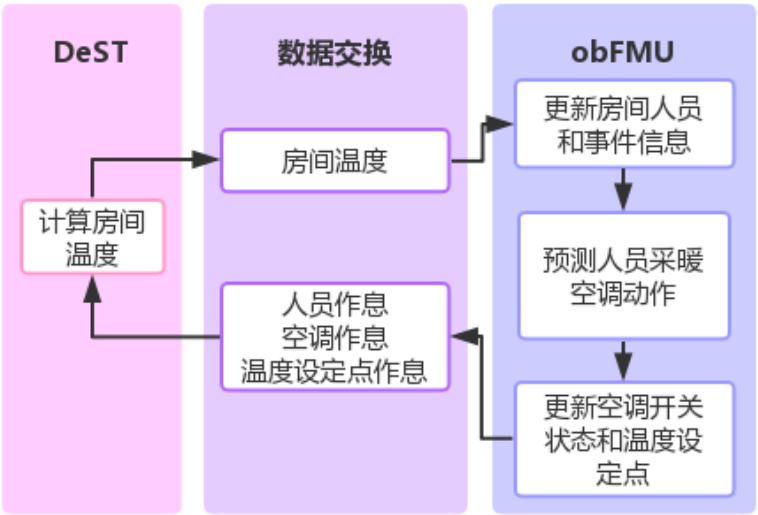


图 4- 5 多人模型与 DeST 联合模拟流程

4.3 本章小结

本章考虑了人行为的多样性和不同角色人员之间的交互作用对空调使用行为的影响，建立办公空间的空调行为多人模型。基于人员的行为模式和群体关系，本文引入直觉模糊偏好关系来描述个体的行为意愿，采用层次分析法确定个体在空调行为中的实际权重，并结合群体决策方法获得多人员的动作结果。在此基础上，本章实现了对空调使用行为多人模型的模拟计算，通过简单的算例阐述了多人模型的计算过程，并采用 obFMU 模块将多人模型集成到现有能耗模拟软件 DeST 之中，从而获得多人房间的空调开关状态和运行时间表。

第 5 章 多人办公空间空调使用行为模拟案例

本章将结合前文的空调使用行为测试和多人模型的建立，对两个多人办公室案例的空调使用行为进行模拟。在模型中体现出人员空调行为模式多样性和随机性的特点，同时考虑社会关系对群体空调行为的影响，并采用随机过程的检验方法，以检验多人模型的模拟结果是否具有有效性和准确性。

5.1 案例设置

本文使用 DeST 建立了位于上海市的四层办公建筑模型，用于模拟多人办公空间的空调使用行为。针对第三章行为测试中的行政办公室 A 和研究生办公室 B，分别建立相应的模拟案例，两间办公室的平面图分别见图 3-1 和图 3-3。案例中的空调系统均设置为分体式空调系统，对供冷季（6-8 月）的空调行为进行模拟。模型中的室内热扰及围护结构输入参数依据《公共建筑节能设计标准》进行选取。

对于行政办公室 A，房间中共有 4 位职级平等的老师。通过对各人在空调使用行为中的重要性进行调研，判断该办公室人员的群体关系为同级关系，得到房间中人员的主观权重矩阵以及实际权重计算结果，如表 5- 1。

表 5- 1 办公室 A 的个体权重

主观权重S_{lk}	E1	E2	E3	E4
E1	0.50	0.76	0.61	0.63
E2	0.70	0.58	0.73	0.68
E3	0.62	0.68	0.55	0.75
E4	0.72	0.77	0.67	0.44
实际权重 W	w1	w2	w3	w4
	0.24	0.26	0.25	0.25

办公室 A 的工作时间为基本固定的每天八小时制，周末与节假日（6 月 18 日端午节放假）均无人上班。人员的工作日时刻表和与空调行为相关的事件发生时刻均由测试数据统计得到，如表 5- 2 所示。

表 5- 2 办公室 A 的事件时刻表

工作日 Schedule	事件	时间	平均时刻
Working hour: 8:00-17:00	上班	7:50-8:40	8:10
	下班	16:00-17:10	16:40
	吃午饭	11:30-12:30	12:00

本文通过问卷调研的方法确定办公室 A 中人员的空调行为模式，结果表明，2 名人员的空调行为模式为“进门开+下班关”，其余 2 人为“热时开+吃饭关+下班关”。办公室 A 人员的行为模式与本文提取出的空调典型行为模式略有不同，典型模式中未出现由于吃饭等暂时离开办公室而关空调的行为，但是在封闭式多人办公室中，房间内人员全部离开而将空调关闭的行为很常见，由此加入“吃饭关空调”的描述对办公室 A 人员的行为模式进行补充。该办公室的空调模型及参数见表 5- 3。

表 5- 3 办公室 A 的空调行为模式及模型参数

人员	行为模式	动作模型	特征参数
E1、E2	进门开空调	$P_{on}=\begin{cases}p_{entering}, & 刚进办公室时\\ 0, & 其他\end{cases}$	P=0.77
	下班关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{leaving}, & 下班离开时\\ 0, & 其他\end{cases}$	p=0.87
E3、E4	热时开空调	$P_{on}=\begin{cases}1-e^{-\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}\Delta\tau}, & 平时在室且\ t>u\\ 1-e^{-c_{enter}\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}}, & 进办公室且 t>u\\ 0, & 其他\end{cases}$	u=24/26，l= 4.12，k= 5.04，c=42.9
	吃饭关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{lunch}, & 午饭离开办公室时\\ 0, & 其他\end{cases}$	p=0.16
	下班关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{leaving}, & 下班离开时\\ 0, & 其他\end{cases}$	p=0.87

对于研究生办公室 B，房间中共有 5 名研究生。通过对各人在空调使用行为中的重要性进行调研，得知该办公室中有一位学生由于离空调风口较近，对温度变化比较敏感，调节动作的频率也较高，因此该办公室的群体关系为敏感者关系，人员的权重计算结果如表 5- 1 所示。

表 5- 4 办公室 B 的个体权重

主观权重S_{lk}	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.65	0.87	0.96	0.73	0.77
E2	0.55	0.24	0.48	0.88	0.63
E3	0.50	0.45	0.36	0.57	0.35
E4	0.50	0.66	0.78	0.46	0.58
E5	0.56	0.72	0.68	0.32	0.42
实际权重 W	w1	w2	w3	w4	w5
	0.27	0.19	0.16	0.20	0.18

办公室 B 工作时间的随机性和多样性很大，周末与节假日均有人员在室的可能，人员到达和离开办公室的时间各不统一。该办公室事件发生时刻的统计结果见表 5- 2。

表 5- 5 办公室 B 的事件时刻表

工作日 Schedule	事件	时间	平均时刻
Working hour: 9:20-22:45	上班	8:00-10:40	9:20
	下班	21:30-24:00	22:45
	吃午饭	11:30-12:30	12:00
	吃完午饭	12:00-13:30	12:45
	吃晚饭	16:40-17:40	17:20
	吃完晚饭	17:40-18:20	18:00

同样采用问卷调研的方法确定办公室 B 中人员的空调行为模式。结果表明，房间中 3 名人员的空调行为模式为“热时开+下班关”，其中包括环境敏感者 E_1，其余 2 人为“进门开+吃饭关+下班关”。办公室 B 人员的空调行为模式及模型参数如表 5- 6 所示。

表 5- 6 办公室 B 的空调行为模式及模型参数

人员	行为模式	动作模型	特征参数
E1、E2、E3	热时开空调	$P_{on}=\begin{cases}1-e^{-\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}\Delta\tau} & ,平时在室且\ t>u\\ 1-e^{-c_{enter}\left(\frac{t-u}{l}\right)^{k}} & ,进办公室时且 t>u\\ 0 & ,其他\end{cases}$	u=26/27/28，l= 6.05，k= 1.65，c=1.29
	下班关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{leaving} & ,下班离开时\\ 0 & ,其他\end{cases}$	p=0.61
E4、E5	进门开空调	$P_{on}=\begin{cases}p_{entering} & ,刚进办公室时\\ 0 & ,\ 其他\end{cases}$	P=0.49
	吃饭关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{lunch} & ,午饭离开办公室时\\ 0 & ,\ 其他\end{cases}$	p=0.47
	下班关空调	$P_{off}=\begin{cases}p_{leaving} & ,下班离开时\\ 0 & ,其他\end{cases}$	p=0.61

以上为模拟案例的设置情况和输入参数信息。将上述群体关系、事件时刻表和行为模型信息作为模拟输入参数，模拟步长设置为与案例测试采样间隔相等的时间步长（办公室 A 为 10min，办公室 B 为 5min），对供冷季 6-8 月的多人办公空间的空调使用行为进行模拟。

5.2 模拟结果评价方法

本文所采用的空调动作模型是一种随机性模型，每一次模拟计算实际上是依据模型的概率规律而产生的一次随机过程。由于实际过程中的人行为也具有随机性，在完全一样的客观条件下行为的发生与否是不确定的，因此，要求任意一次的模拟结果能够完全准确地反映实际过程中的每一个动作显然是不合理的。本节

从拟合优度、统计性指标、模拟结果的概率分布三个方面，对随机模型的模拟结果进行评价，以此检验本文提出的多人模型是否能够有效并且准确地描述多人房间的空调使用行为。

（1）拟合优度

本文首先利用空调行为测试数据的概率统计值，对条件概率模型的函数形式进行拟合，建立不同行为模式下的空调动作模型。为了评价该模型的有效性，选用拟合优度 R^2 来评价模型的函数形式对测试数据变异规律的表达能力。函数拟合优度 R^2 衡量了回归方程对于数据点的拟合程度，其定义是回归平方和占总平方和的比例。拟合优度的值越接近于 1，则表示相应函数形式对实测结果的概率值变化趋势的表达越有效。函数拟合优度 R^2 的计算公式如下：

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \overline{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2} \qquad \text{（式 5.1）}$$

需要注意的是，函数的拟合优度与数据量的多少密切相关，在测试获得的数据量不足的情况下，利用拟合优度来评估模拟结果的可参考性较低。

（2）统计性指标

为了评价模型在实际工程中的应用水平，则需要考察该模型对实际案例的模拟结果与测试数据在一些工程中常用的特征参数上是否能够保持一致。由于模型具有随机性的特征，单次模拟结果通常难以与实际测试结果相匹配，一般进行重复多次模拟计算（建议 100 次）[23]，取模拟结果的平均值作为统计性指标，以此判断模拟结果是否能够满足模型在工程应用上的要求。

在能耗分析中，模型对于空调设备运行时长的模拟是否准确直接影响建筑能耗的计算结果，而空调的开启次数则反映了模型对于人员动作刻画的准确性。因此，模拟结果中的累计空调开启时长、累计空调开启次数、单次开/关空调时长的平均值是非常重要的统计性指标，反映了模型在预测人员行为和建筑能耗方面的准确性。

空调设备的开启次数可由模拟结果直接输出得到，空调在一段时间内的累计开启时长（t）可由下式进行计算：

$$\mathrm{t} = \frac{\tau \times n_{on}}{60} \qquad \text{（式 5.2）}$$

式中t为累计空调开启时长（h）；τ为模拟的时间步长（min）；n_{on}为空调开启的总时间步长数。

一般而言，将模拟结果统计得到的累计空调开启时长、累计开启次数与实测结果进行对比，二者的误差不大于 10%，可认为模拟结果的准确性良好。模拟与测试结果的统计值误差采用式 5.3 计算：

$$err_t = \frac{\phi_{m,t} - \phi_{s,t}}{\phi_{m,t}} \times 100\% \qquad （式 5.3）$$

式中$\phi_{m,t}$为 t 时间段内的实测结果统计指标；$\phi_{s,t}$为 t 时间段内的模拟结果统计指标。

（3）模拟结果的概率分布

经过重复多次模拟，可获得空调开启时长、开启次数所有可能结果值的概率分布情况。模拟结果的分布表达了选取到某个特定值的概率，可以通过假设检验的方法，来判断实测结果是否处于模拟结果的置信区间内，从而考察模拟和实测结果之间的偏离程度。如果实测值落在模拟值的大概率区间内，那么可认为该模型是有效的。

如果将模拟结果视为服从某种分布的总体，则单次模拟结果可认为是服从总体分布的独立同分布随机变量。令 X 表示模拟结果的随机变量，例如空调累计开启时长，那么它是服从总体分布概率密度函数$f(x)$的一个随机变量$X \sim f(x)$。将 100 次模拟结果计算出累积频率分布，采用拟合优度检验的方法对函数$f(x)$的形式进行估计，检验该分布是否服从正态分布$X \sim N(\mu, \sigma^2)$。其中，μ 由样本均值估计、σ^2 由样本方差估计。得到了$f(x)$的具体形式后，就可以将实测结果x_0与总体分布$f(x)$进行比较。如果x_0被$f(x)$的大概率区间覆盖，则认为模拟结果 X 与实测结果x_0接近。

5.3 空调使用行为模拟结果

本文对两个办公空间案例的空调使用行为进行模拟，考虑到模型本身的随机性，对同一个案例进行 100 次重复模拟计算，结合以上模型评价方法，对多人模型的模拟结果与测试结果进行对比分析。

5.3.1 办公室 A 的模拟结果

对供冷季（6-8 月）的空调开关状态进行统计，图 5- 1 和图 5- 2 分别给出办公室 A 空调运行情况的实测结果和模拟结果图。其中，图 5- 2 是 100 次模拟计算中的任意一次计算结果。可以看到，尽管模拟结果的空调开启情况与实测结果不是完全一模一样，但总体上是非常相似的。办公室 A 的空调运行时间体现了行政办公建筑类型的典型作息规律。

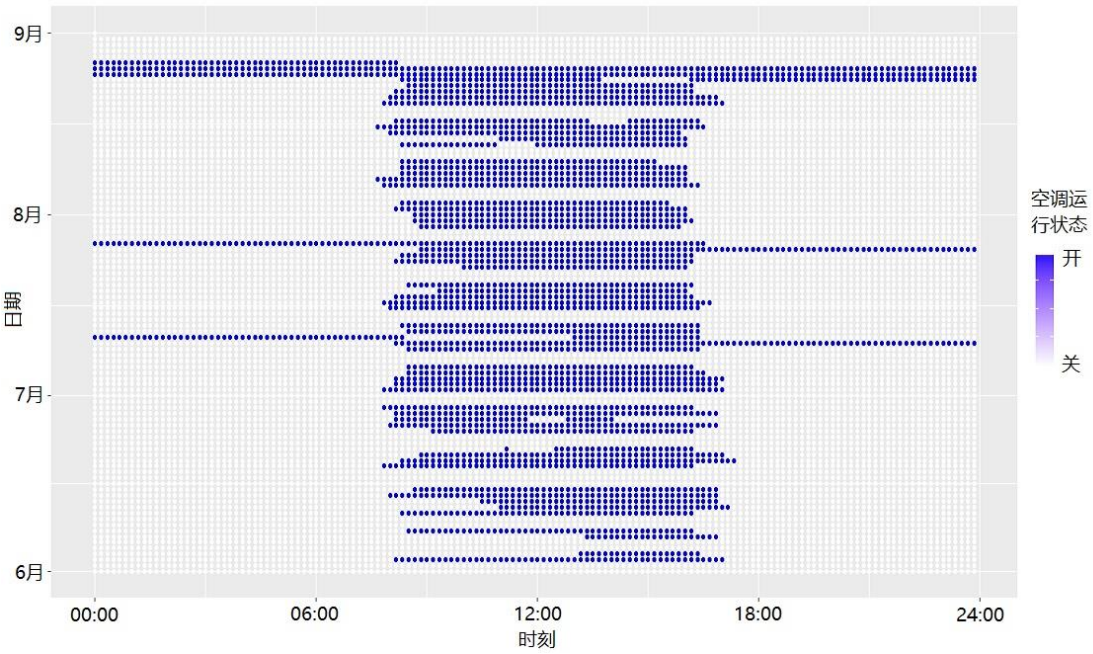


图 5- 1 办公室 A 的实际空调运行情况

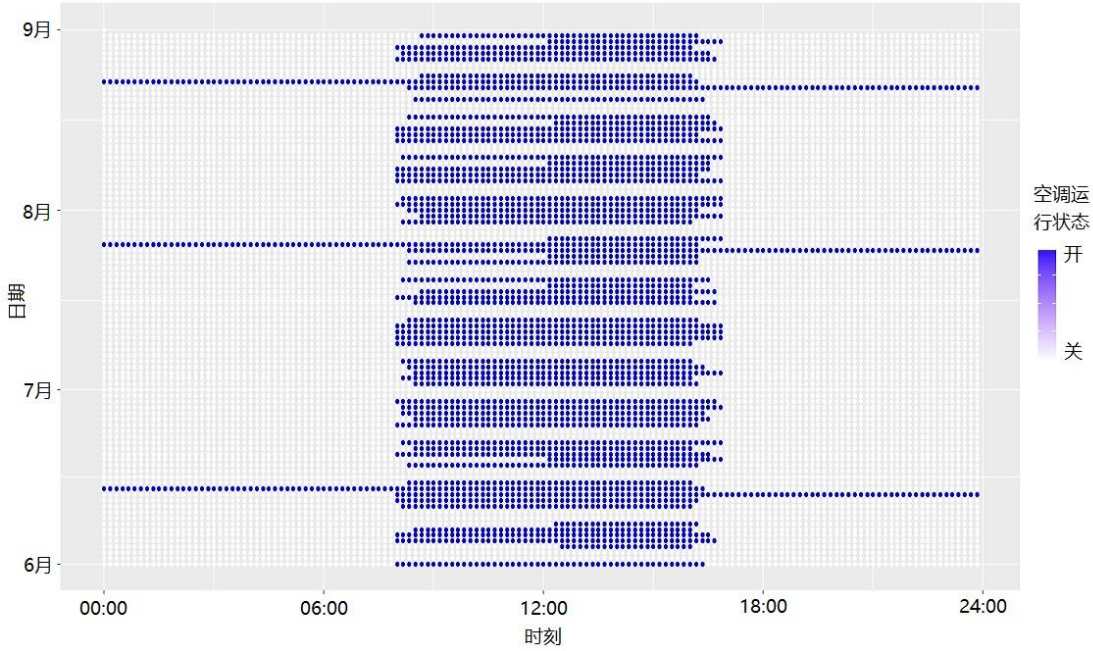


图 5- 2 办公室 A 的模拟空调运行情况

考察模拟与实测空调设备运行情况的统计性指标之间的差异，表 5- 7 给出相关统计指标的对比结果。其中，累计空调开启时长、开启次数为模拟（测试）时间段内空调开启的总时长和总次数，这是空调设备运行模拟中最重要的指标。对 100 次模拟结果取平均值后，空调累计开启时长和开启次数与实测结果之间的误差绝对值分别为 2.01%和 0.16%，这一误差范围在能耗模拟中是可以被接受的。

图 5- 3 和图 5- 4 分别给出了进行 100 次随机模拟后，各次模拟结果的累计

空调开启时长、开启次数的分布情况。图中，蓝点表示统计指标的单次模拟值，红线表示该统计指标的实测值。可以看到，100 次随机模拟结果的分布范围可以覆盖实测值，并且，累计开启次数和开启时长的各次模拟结果较为均匀且集中地分布于实测值两侧。

表 5- 7 办公室 A 模拟与实测结果的统计指标对比

统计指标	实测结果	模拟结果	误差
累计开启时长（h）	538	542.82	0.90%
累计开启次数	64	65	1.47%

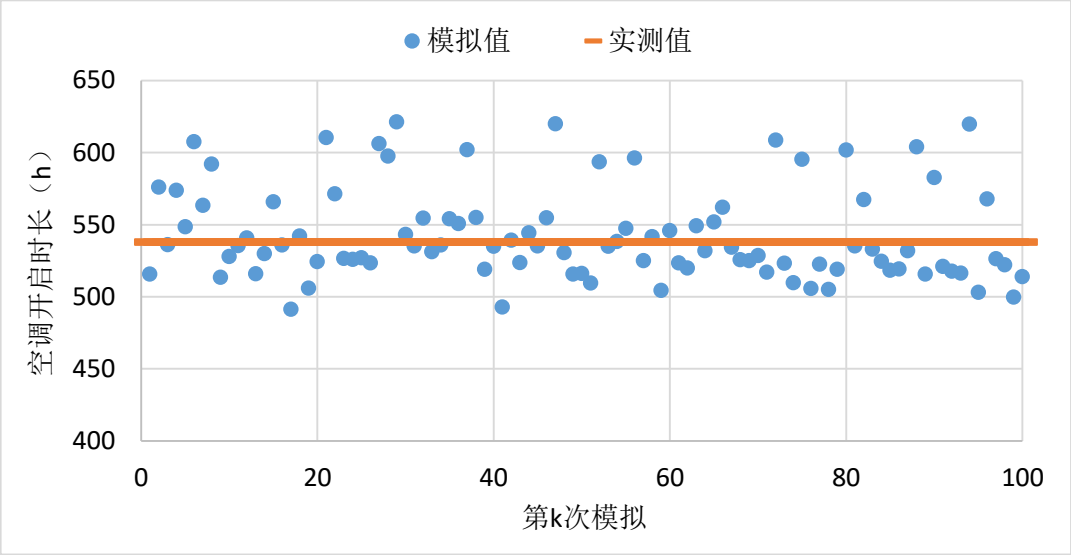


图 5- 3 办公室 A 累计空调开启时长的模拟值与实测值对比

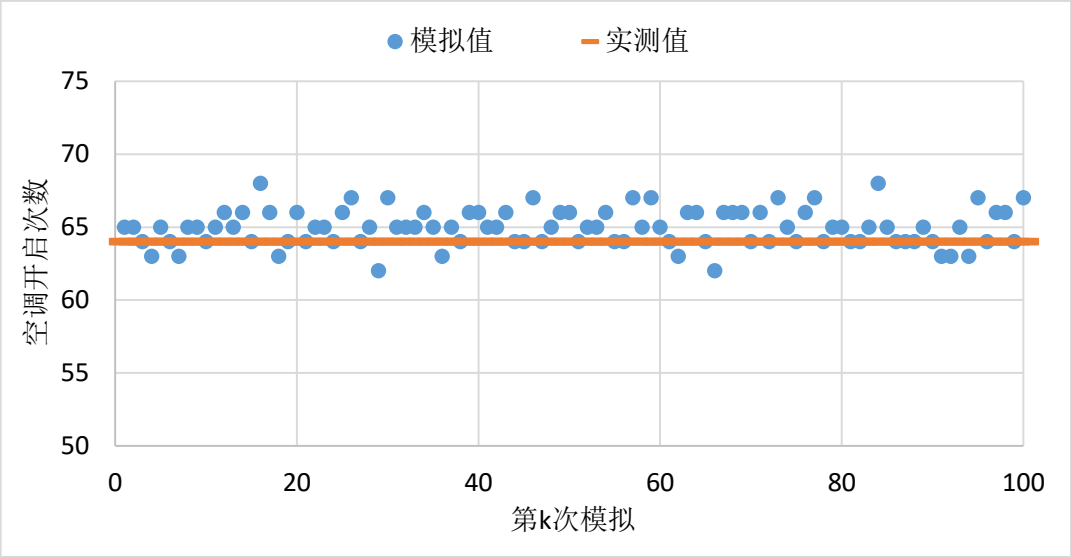


图 5- 4 办公室 A 累计空调开启次数的模拟值与实测值对比

考察多次模拟结果的概率分布特征，图 5- 5 和图 5- 6 分别给出了办公室 A 累计空调开启时长、开启次数的模拟结果概率分布图。图中，蓝色柱子表示各统计指标的模拟值出现的频率，橘色曲线表示模拟值的正态分布概率密度值，黄线表示该统计指标的实测值在分布中出现的位置。结果表明，这些随机模型的模拟结果均可认为服从正态分布$X \sim N(\mu, \sigma^2)$，其中 μ 由样本均值估计，σ^2 由样本方差估计。

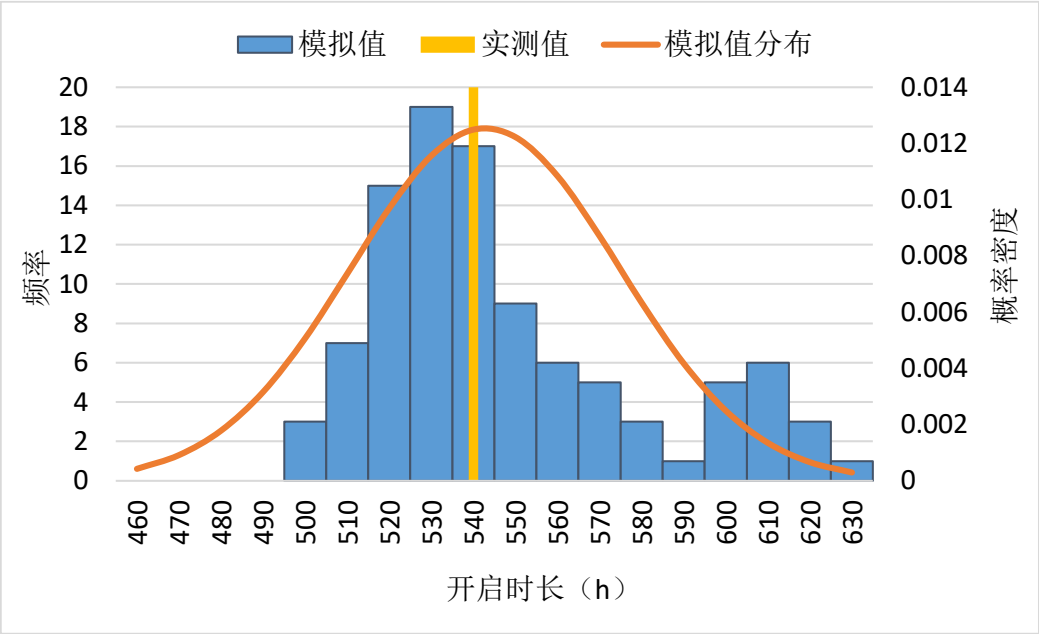


图 5- 5 办公室 A 空调开启时长模拟结果的概率分布

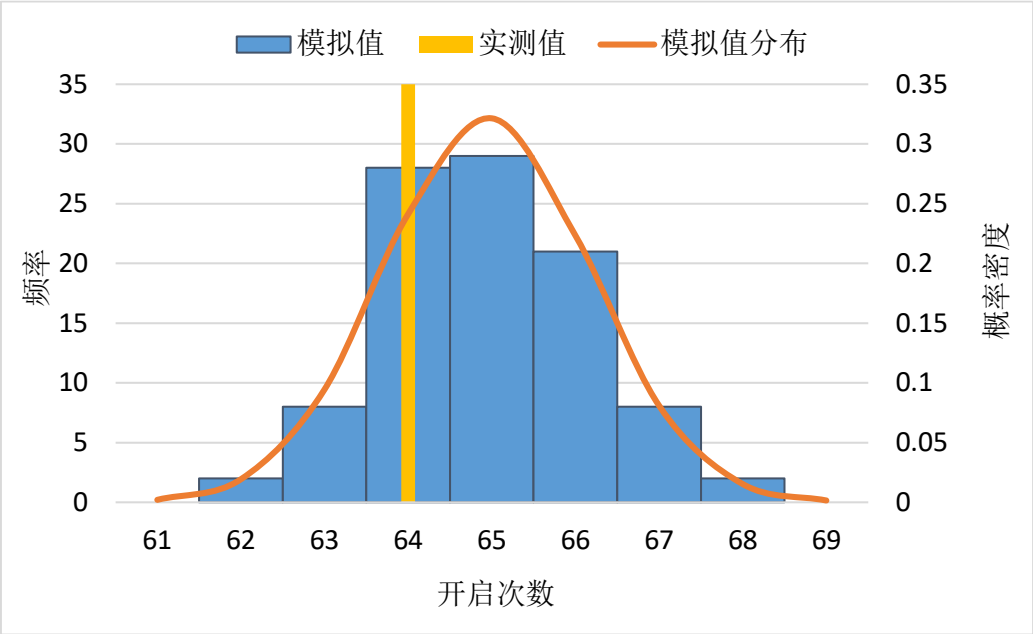


图 5- 6 办公室 A 空调开启次数模拟结果的概率分布

由于模拟结果的累计空调开启时长、开启次数近似服从正态分布，还可以估计出它们的置信区间。根据 100 次随机模拟的结果，计算它们的均值 μ 和标准差 σ，其 95%置信区间为[μ–1.96σ, μ+1.96σ]。计算可得，累计空调开启时长的均值 u=542.8h，标准差 σ =31.8h，其 95%置信区间为[480.5, 605.2]；累计开启次数的均值 u=64.9 次，标准差 σ=1.2 次，其 95%置信区间为[62.5, 67.4]。而上述两个统计指标的实测值分别是 538h 和 64 次，均落在模拟结果分布的 95%置信区间内（如图中黄线所示）。因此可认为，该办公室的模拟结果与实测结果具有十分相近的统计指标。

5.3.2 办公室 B 的模拟结果

对于办公室 B 的模拟结果，图 5- 7 和图 5- 8 分别给出该办公室在供冷季（6-8 月）空调运行状况的实测结果和模拟结果图。同样地，图 5- 8 是 100 次计算中的任意一次模拟结果。可以看到，模拟结果对于室内人员在下班时关空调和进办公室时开空调行为的表达较为准确，而午饭时间关空调行为发生的次数略高于实际情况。

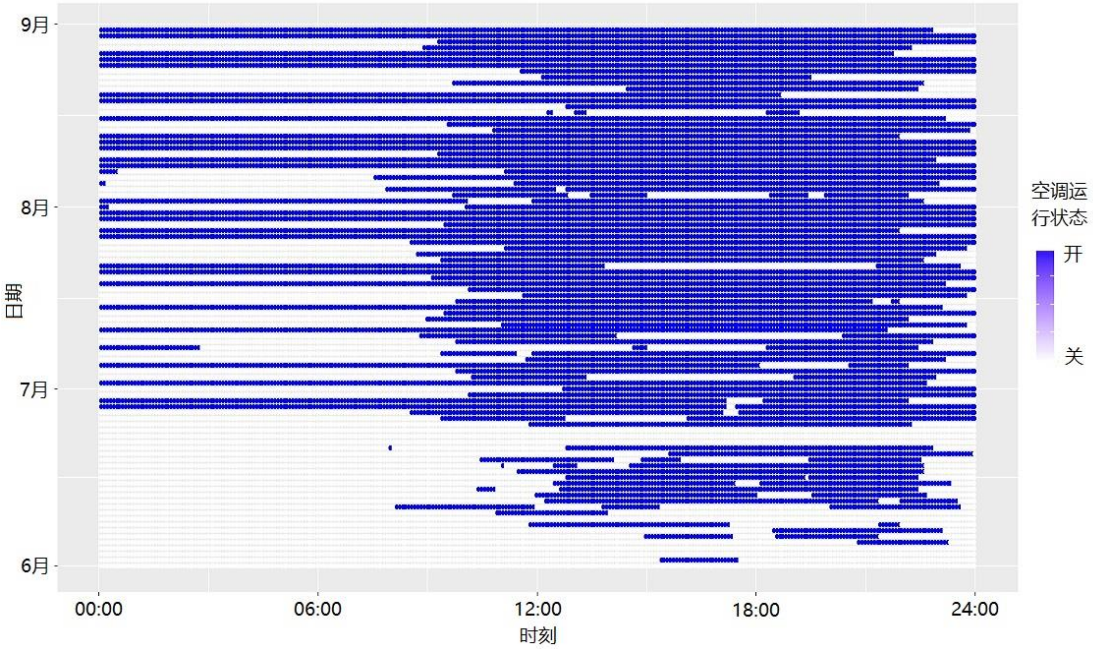


图 5- 7 办公室 B 的实际空调运行情况

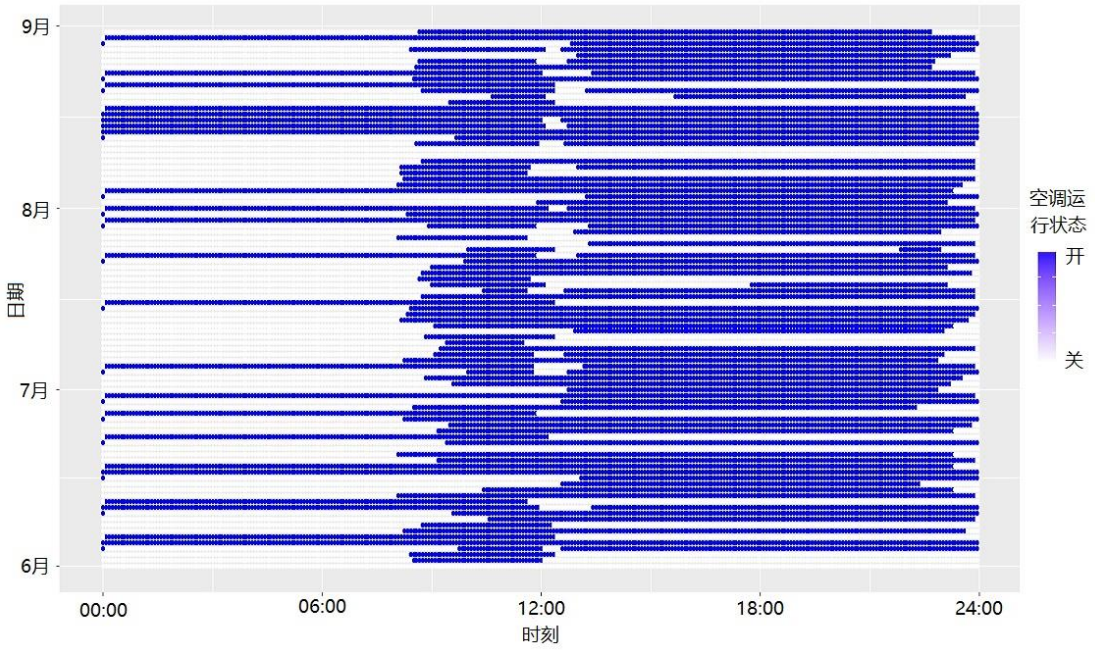


图 5- 8 办公室 B 的模拟空调运行情况

表 5- 8 给出了模拟与实测的空调运行相关统计性指标的对比结果。可以看到，对 100 次模拟结果取平均值后，空调累计开启时长和开启次数与实测结果之间的误差绝对值均在 5%以内，这一误差范围在能耗模拟中是可以被接受的。图 5- 9 和图 5- 10 分别给出了各次模拟结果的累计空调开启时长、开启次数的分布情况。可以看到，100 次随机模拟结果的分布范围可以覆盖实测值，其中，累计开启次数（图 5- 10）的各次模拟结果较均匀地分布于实测值两侧，而开启时长（图 5- 9）的模拟值大于实测值的情况较多。

表 5- 8 办公室 B 模拟与实测结果的统计指标对比

统计指标	实测结果	模拟结果	误差
累计开启时长（h）	1245.83	1279.55	2.71%
累计开启次数	86	84	-2.02%

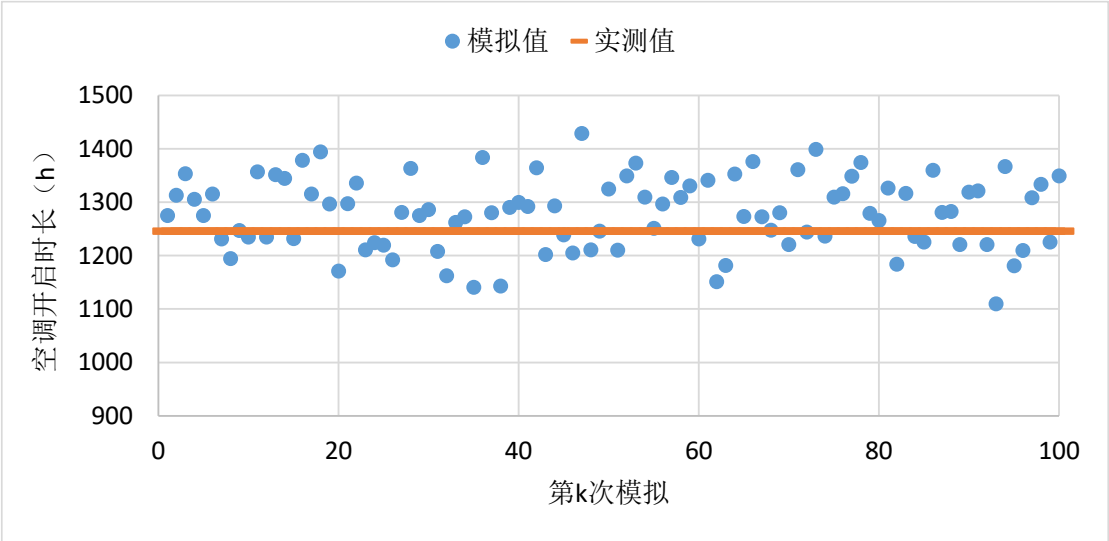


图 5- 9 办公室 B 累计空调开启时长的模拟值与实测值对比

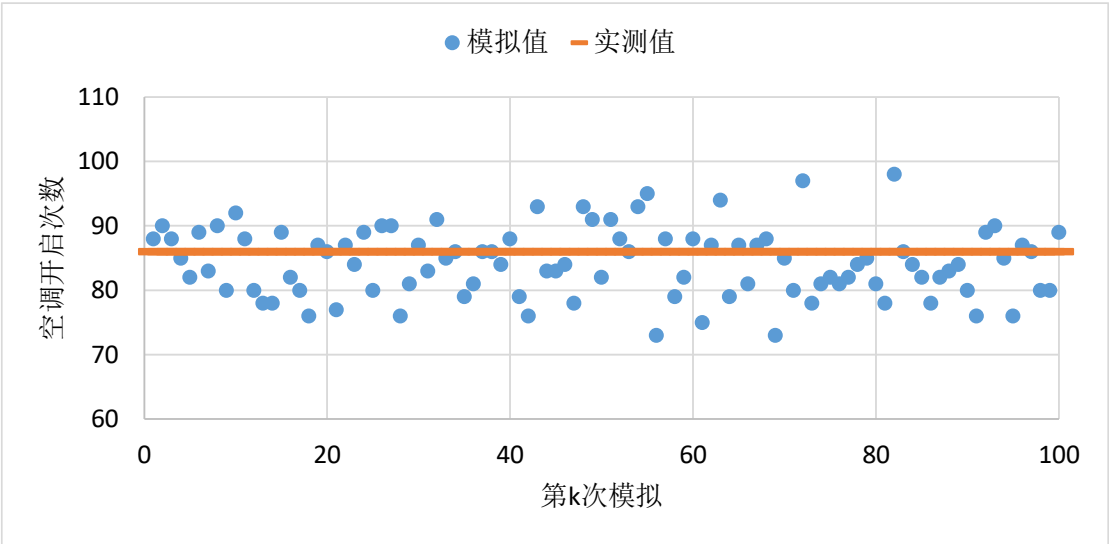


图 5- 10 办公室 B 累计空调开启次数的模拟值与实测值对比

考察多次模拟结果的概率分布特征，图 5- 11 和图 5- 12 分别给出了办公室 A 累计空调开启时长、开启次数的模拟结果概率分布图。可见，办公室 B 的模拟结果同样可认为服从正态分布$X \sim N(\mu, \sigma^2)$。由 100 次模拟结果计算得到，空调开启时长的均值 u=1279.6h，标准差 σ =66.5h，其 95%置信区间为[1149.2, 1409.9]；开启次数的均值 u=84.3 次，标准差 σ =5.3 次，其 95%置信区间为[73.9, 94.6]。而上述两个统计指标的实测值分别是 1245.8h 和 86 次，也都落在模拟结果分布的大概率区间内。由此可见，模拟值与实测值的统计指标十分接近，因此模型可认为是有效的。

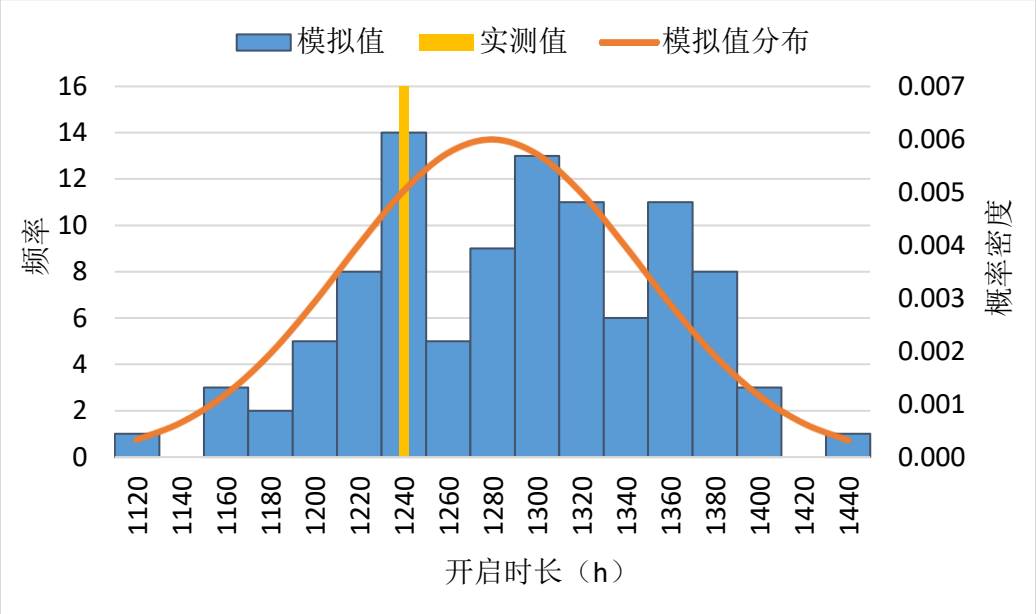


图 5- 11 办公室 B 空调开启时长模拟结果的概率分布

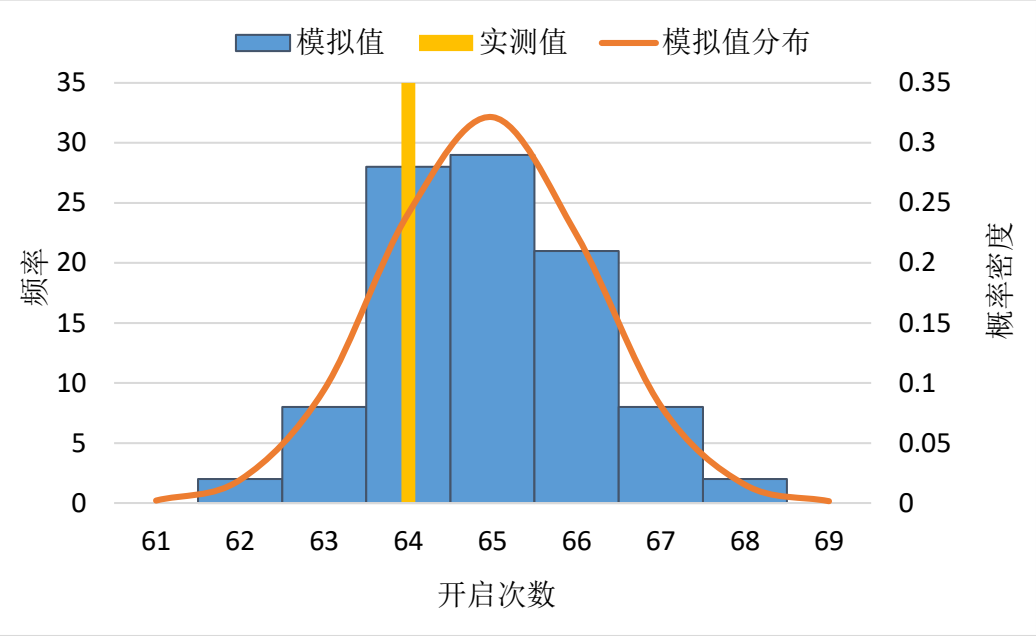


图 5- 12 办公室 B 空调开启次数模拟结果的概率分布

由以上各项模型评价指标的比较可见，模拟的空调运行情况与实测结果确实具有很高的相似度，能够充分反映实际空调运行状态的动态变化特征。这表明，多人模型对于空调使用行为的模拟方法是有效和可靠的。考虑不同角色人员之间的群体关系后，人员之间的相互干涉对空调运行情况的影响，实际上体现在多种行为模式之间相互制约而导致动作结果的变化。

对于同级关系的行政办公室 A，其多次随机模拟结果体现出均匀分布的特性，可以理解为同级人员之间行为模式的差异反映到空调运行情况上，最终会体现出

平均化和统一化的特征。而存在环境敏感者的研究生办公室 B，其模拟结果是否准确很大程度上取决于对敏感者行为模式的刻画是否准确，如果房间中存在上级或管理者角色，那么空调使用行为基本上只需考虑该人员的行为模式。

对两间群体关系不同、行为模式多样的办公案例进行模拟，通过对空调运行状态统计性指标和模拟结果概率分布特征的检验，可以看到多人模型在上述实际案例中取得了较好的应用效果，验证了模型方法、表达形式和模拟方法的合理性和准确性。

上述案例研究验证了模型方法的可行性，通过详细调研和测试获得模拟输入参数，在已知房间人员信息的情况下，多人模型能够实现对空调运行状态的准确模拟，但是，将多人模型应用于同类型办公建筑时的可靠性和准确性还需进一步验证。实际工程应用中，能耗模拟技术广泛应用于建筑设计和负荷预测阶段，此时我们无法获取详细的建筑和人员特征信息。为了使多人模型便于推广应用，应提供行为模式、概率曲线和群体关系权重的推荐值或默认值，以便研究者在模拟计算时进行选择。本文通过问卷调研获得夏热冬冷地区的典型空调行为模式，并结合案例测试给出几种群体关系权重的推荐值，未来可以选取未经详细调研的同类型办公建筑，采用推荐值进行多人行为的模拟计算，以进一步检验多人模型的准确性和可推广性。

5.4 多人模型与 DeST 现有模型对比

采用 DeST 软件中现有模型对办公室 A 的空调行为进行模拟，模型输入参数与 5.1 节所述的完全一致，将模拟结果与多人模型的结果进行比较，考察二者在模拟多人行为和空调运行状态方面的性能。

结合随机过程的评价方法，利用 DeST 现有模型对办公室 A 进行 100 次模拟计算，图 5- 13 给出了其中任意一次模拟的供冷季（6-8 月）空调运行情况结果。与实际情况（图 5-1）对比可以看出，DeST 模型的模拟结果在空调开关状态上体现出较为明显的统一性和确定性，不同日期同一时刻空调开启的概率几乎相等，表现为固定的空调作息。

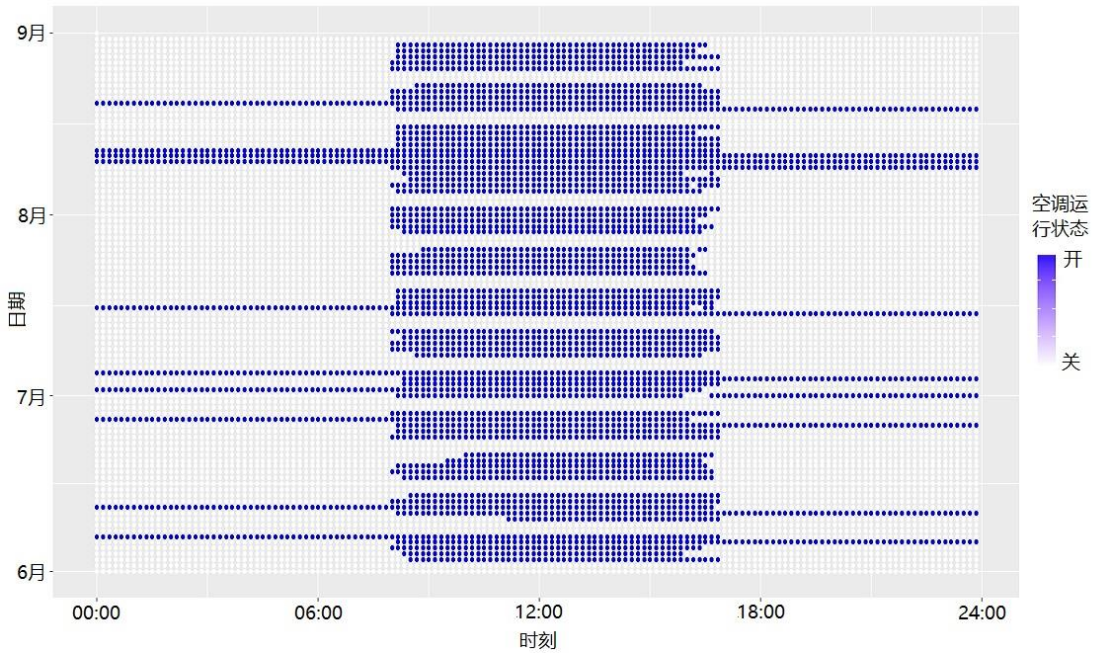


图 5- 13 DeST 现有模型的模拟空调运行情况

表 5- 9 给出了两种模型模拟与实测结果的统计指标对比情况。以实测值作为基准，DeST 现有模型的模拟结果均偏大，其中累计空调开启时长的模拟误差高达 45%，这意味着受开启时长影响的建筑能耗模拟结果也将显著偏大，造成对能耗的过高估计。图 5- 14 和图 5- 15 分别给出了各模型 100 次模拟得到的空调开启时长、开启次数的分布情况。可以看到，DeST 模型的各次空调开启时长模拟结果均大于实测值，其分布范围未能覆盖实测值，开启次数的模拟结果较为分散地分布于实测值两侧。而多人模型在开启时长和开启次数上模拟结果的准确性和集中程度都优于 DeST 现有模型。

表 5- 9 各模型与实测结果的统计指标对比

统计指标	实测结果	DeST 现有模型	多人模型
累计开启时长（h）	538	783.77	542.82
累计开启时长误差	-	45.68%	0.90%
累计开启次数	64	66	65
累计开启次数误差	-	3.02%	1.47%

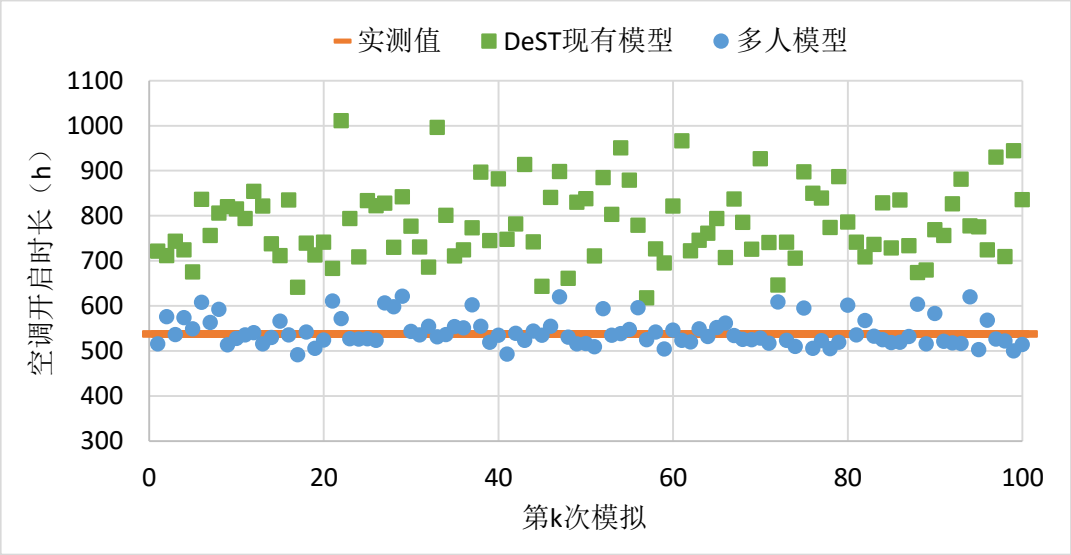


图 5- 14 各模型的累计空调开启时长模拟结果

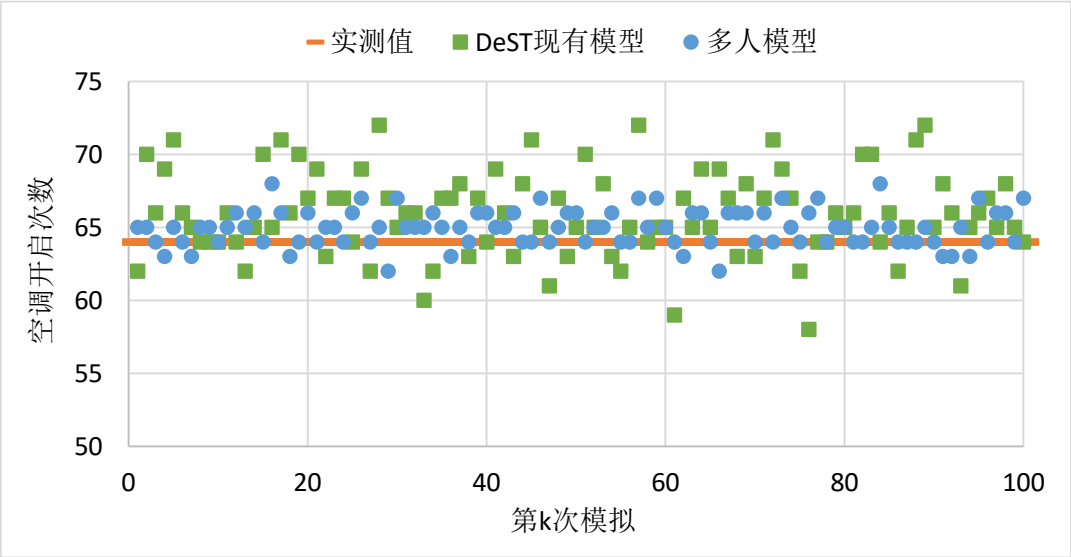


图 5- 15 各模型的累计空调开启次数模拟结果

图 5- 16 和图 5- 17 分别给出了各模型空调开启时长和次数模拟结果的概率密度曲线。两条正态曲线分别为 DeST 现有模型和多人模型下累计开启时长和次数的概率分布，黄色竖线表示统计指标的实测值。从图中可见，DeST 模型模拟得到的空调开启时长大概率区间未能覆盖该指标的实测值，可认为模拟值偏离实测结果。而多人模型在开启时长和开启次数方面均获得了接近实测值的模拟结果分布。

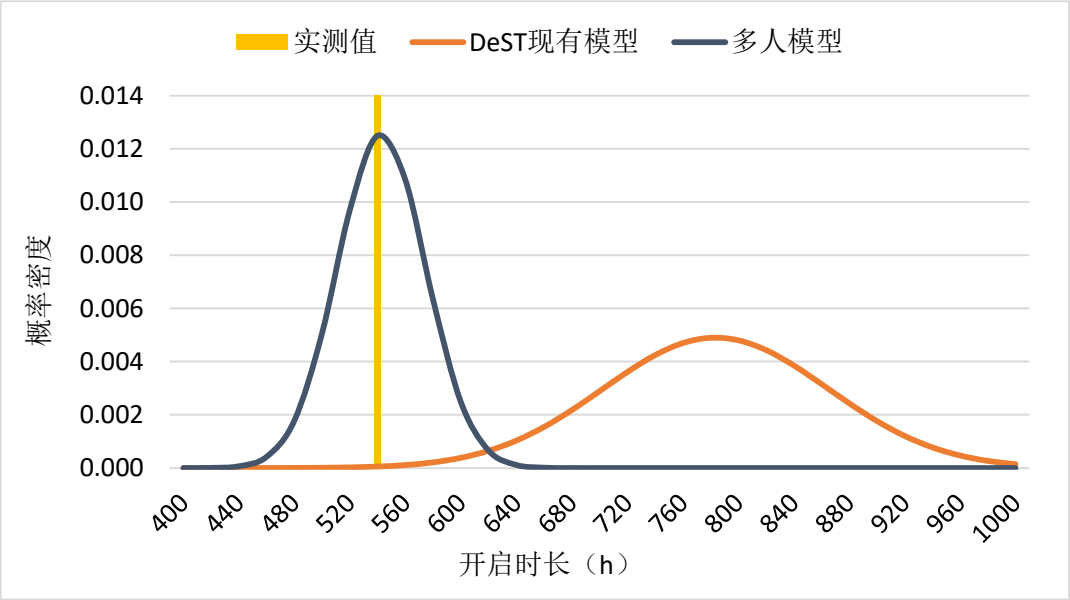


图 5- 16 各模型的空调开启时长概率分布对比

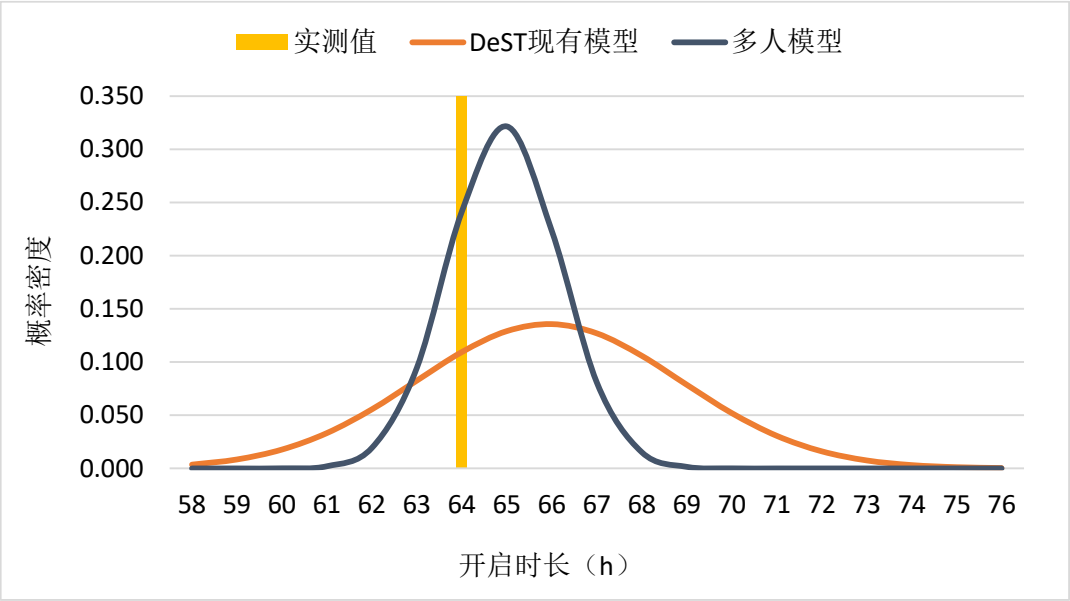


图 5- 17 各模型的空调开启次数概率分布对比

比较两种模型对多人情形的模拟方法，二者在判断空调是否开启的逻辑上有很大不同。对于房间中的多个参与者，DeST 现有模型逐一判断各参与者是否发生动作，由条件概率模型计算当前时刻的空调行为概率p_i，产生随机数概率与之进行比较，判断动作是否发生，若房间中有超过半数的人发生了动作，则空调状态随之改变。也就是说，DeST 模型将每个人视作自由调节的独立个体，相当于对 N 个单人模型进行计算，并根据半数规则判断动作是否发生。而本文提出的多人模型则是将多个参与者的意见集成在一起，进行加权表决后将开空调概率p_1与不开空调概率p_2进行比较，得到一个统一的动作结果，这种算法对于通过集体

商议和服从他人意见方式做决策的群体而言更为合理。

由于空调状态变化的判断逻辑不同，DeST 现有模型在大多数模拟时刻都考虑房间中最为敏感的人员或者开空调概率最大者，从而导致空调开启时长和开启次数的模拟结果均偏大。同时，由于忽略多人之间互相干涉和决策的过程，多人情形下空调行为的多样性和随机性被抹平，而表现出趋同的确定性作息。与 DeST 软件中现有模型相比，本文提出的多人模型能够实现对多人房间中空调运行作息更加准确的模拟，并体现出不同个体行为的差异性和随机性。

对两间办公案例的模拟计算以及现有模型对比的结果表明，多人模型可有效适用于办公空间中多人员群体关系及行为模式的描述与空调运行状态的模拟。对于其他多人情况下的用能行为，例如开窗、照明、遮阳调节行为等，以及住宅中的多人行为模拟，还需未来更进一步的研究与验证。

5.5 本章小结

本章基于前文的多人空调使用行为模拟方法，结合调研和测试获得的空调行为数据和群体关系特征，对两个多人办公室案例进行模拟。采用针对随机过程的检验方法，对模拟结果的有效性和准确性进行评价。两个实际案例的模拟结果显示，多次模拟计算的平均值与实测值之间的误差均在能耗模拟可接受的范围内，实测获得的空调累计开启时长和开启次数也均落在模拟结果的置信区间内。这一结果初步验证了多人模型在方法、表达形式和模拟方法的合理性和准确性，可以用于多人办公空间中空调使用行为的描述与空调运行状态的模拟。与 DeST 中现有模型相比，多人模型能够实现对多人房间中空调运行作息更加准确的预测。未来可以针对不同的办公建筑类型和人员关系类型进行调研、测试和分析，获得各类办公建筑中的群体关系特点和行为模式特征，用于建筑中人行为的模拟与分析。

第 6 章 结论与展望

6.1 主要成果

多样化的人行为导致不同建筑的能耗水平存在巨大差异，尤其是与建筑用能直接相关的空调使用行为，科学评估人行为对建筑用能和系统运行的影响，对于解决人行为模拟在工程中的应用壁垒具有重要意义。目前的研究多着重于单人行为的刻画，而对于多人办公空间，现有的人行为模型难以定量描述多人之间交互的行为特征。本文着眼于典型行为模式研究和多人空调行为的定量刻画，开展广泛问卷调研和案例测试，获得典型行为模式及其相应的空调动作概率曲线，建立空调使用行为的多人模型，并在 DeST 软件中实现对多人动作的模拟，从而模拟计算空调系统的开关情况和运行状态。本研究的主要成果如下：

1. 本文结合社会科学领域的问卷调查方法，基于以事件和环境为触发条件的动作模型框架，提出一套针对人行为调研的问卷设计、实施和检验方法，并针对行为模式的分类变量特征，采用 k-means 算法与 VDM 距离相结合的聚类方法从调研结果中提取典型行为模式。通过上述方法，本文在全国范围内的办公建筑中开展空调使用行为问卷调研，聚类得到 6 种典型的空调使用行为模式及其在人群中的分布，可作为办公空间中多个人员的行为模拟输入参数。
2. 针对上海两间人员构成不同的办公室开展案例测试，分析空调动作发生概率与环境、事件因素之间的关系，以及人员对于空调设定温度的选择分布。根据两间办公室各自的空调行为模式特点，分别建立由温度和事件驱动的动作概率模型，并利用测试数据对模型的函数形式进行拟合，获得模型中的特征参数，从而对办公室内人员的空调使用行为进行定量描述。
3. 基于空调使用行为中的个体差异性和群体协商的特征，本文提出多人空调行为的模型方法，通过主观评价方法构建反映多人社会关系及重要性的层次结构，并结合基于直觉模糊偏好关系的群体决策理论对多人协商过程进行描述，从而建立空调使用行为的多人模型。同时，实现对多人模型的模拟计算，通过 obFMU 接口形式将多人模型与 DeST 软件进行联合模拟，从而对多人办公空间的空调运行状态进行模拟计算。
4. 结合多人模型方法对两间办公案例的空调行为进行模拟，采用针对随机过程的检验方法对模拟结果进行评价，并与现有模型对多人情形的模拟结果进行对比。由模拟结果可见，案例实际的空调运行状态统计指标均落在多次模拟结果的置信区间内，多人模型可有效适用于多人办公空间中群体关系及行为

模式的描述与空调运行状态的模拟。与 DeST 软件中现有模型相比，本文提出的多人模型能够实现对多人房间中空调运行作息更加准确的模拟。

6.2 进一步研究方向

本文对多人模型的建立进行了探索性研究，虽然在模型研究方面取得了初步成果，尚存在许多有待进一步深入进行的研究工作，这里择其要者讨论如下：

1. 将多人模型应用于能耗模拟时，应提供行为模式、概率曲线和群体关系权重的推荐值或默认值，便于研究者选择。由于样本量的限制，本文的典型行为模式研究仅在夏热冬冷地区的高校办公建筑中开展，未来可以通过可靠的调研和测试方法，获得各气候区不同类型办公建筑的典型行为模式和群体关系。
2. 本文研究初步验证了多人模型方法的可行性，在已知房间人员行为特征和群体关系的情况下，模型能够达到一定的准确度，而多人模型的可推广性和准确性还需深入探讨。对于缺少详细人员信息的办公建筑，采用典型行为模式作为输入，能否保证模拟误差在一定范围内，仍需进一步检验。
3. 与以往的单人模型相比，多人模型的特点是增加了描述人与人之间关系的权重向量，本文尚未对不同权重取值对最终决策的影响进行敏感性分析，为了识别对群体决策结果起主导作用的影响因素，未来可以对权重、人数、行为模式变化对模拟结果的影响进行敏感性分析。
4. 本文提出的多人模型对于 4~5 人办公室的空调使用行为能够较为准确地模拟，而对于人数更多的开敞型办公空间、住宅中的多人关系和交互情况、以及其他用能行为的描述（如开窗、照明、遮阳调节行为等），多人模型的适用性和准确性还需结合案例调研测试进行进一步研究与验证。

致谢

三载光阴，转瞬即逝。硕士研究生阶段，我在父母、导师和课题组的陪伴下收获了满满的爱与力量，深感自己的幸运。在论文结稿之际，向这段时间中给予我支持与帮助的人表达感谢。

由衷感谢我的导师潘毅群教授，您既是良师也是益友。本科课程上接受了您春风化雨般的教导，就被您的聪慧渊博与睿智豁达深深吸引。感谢您在硕士三年学习中对我的悉心指导与栽培，和生活中给予我的温暖与帮助。您对待科研工作严谨与细致的态度，使我在学术研究中一直以高标准要求自己，同时，您的耐心指导与鼓励关怀激励着我不断突破自身的可能性。我很庆幸能在您的指导下走过人生中最重要的征途，您自信自强与积极豁达的人生态度是我不断努力的方向。

非常感谢我的第二导师黄治钟老师，您严谨的治学态度与独到的思维方式充分磨炼了我的科研能力。感谢您在我研究遇到瓶颈时总能一针见血地指出问题，同时也在我迷茫和懈怠时引导我拨开迷雾，找到方向。您勤于思考的优秀习惯和批判性的思维方式使我获益匪浅，感谢您的智慧与耐心，带领我不断探索学习和生命中的未知与乐趣，同时也传授于我积极向上的生活态度与人生智慧。

感谢温暖有爱的潘门，在硕士生活中给予我莫大的支持与欢乐。感谢朱明亚师姐在我研究遇到困惑时对我无私的指导与鼓励；感谢王秋涧师兄在课题上给予我的意见和帮助；感谢刘海静师姐对我无微不至的关怀与照顾；感谢聪明能干的吕岩、杨一昆、谢建彤对我课题的极大支持；感谢活泼可爱的师妹李诗尧、佘昭、吴泽君和师弟贾文琦、丁志梁带给我欢乐与陪伴，让我收获珍贵时光与一生挚友。

感谢研究生阶段的朋友和同学，谢谢你们的陪伴与关怀。感谢我的闺蜜杨光、罗为、顾洁帆、臧皓对我的无限包容和支持，让我积极面对科研和生活。

我还要由衷感谢我的父母，感谢你们不计回报的爱与奉献，在我成长过程中给予我无限的支持与信任，赋予我温厚善良的品格和责任与担当。

最后，感谢国家重点研发计划项目“建筑全性能仿真平台内核开发”（项目编号：2017YFC0702200）对本研究提供的支持。

2019 年 3 月

参考文献

[1] International Energy Agency IEA. World: Balances for 2012[Z]. 2017.
[2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2017.
[3] Guerra Santin O, Itard L, Visscher H, The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock[J]. Energy Build, 2009, 41: 1223–1232.
[4] Masoso O T , Grobler L J, The dark side of occupants' behaviour on building energy use[J]. Energy Build, 2010, 42: 173–177.
[5] Zhou X, Yan D, Hong T, Ren X, Data analysis and stochastic modeling of lighting energy use in large office buildings in China[J]. Energy Build, 2015, 86: 275–287.
[6] 王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
[7] Ouyang J, Hokao K, Energy-saving potential by improving occupants' behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China[J]. Energy Build, 2009, 41: 711–720.
[8] Turner C , Frankel M, Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings[J]. New Buildings Institute Green Buildings Council, 2008.
[9] 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.
[10] 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.
[11] Lee B, Trcka M, Hensen J L, Building energy simulation and optimization: A case study of industrial halls with varying process loads and occupancy patterns[J]. Building Simulation: Springer, 2014, 229 -36.
[12] Fabi V, Andersen RV, Corgnati SP, Olesen BW, A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings[J]. Building Simulation: Springer, 2013, 415 -27.
[13] Reinhart CF, Voss K. Monitoring manual control of electric lighting and blinds[J]. Lighting Research & Technology, 2003, 35:243-60.
[14] Al-Mumin A, Khattab O, Sridhar G, Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences[J]. Energy and Buildings, 2003, 35:549-59.
[15] Yu Z, Fung B, Haghighat F, et al. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 1409–1417.
[16] Ren X, Yan D, Hong T, Data Mining of Space Heating System Performance in Affordable Housing[J]. Journal of Building and Environment, 2015, 89: 1-13.
[17] Carmo C M R, Christensen T H, Cluster analysis of residential heat load profiles and the role of technical and household characteristics[J]. Energy and Buildings, 2016, 125: 171–180.
[18] 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.
[19] Page J, Robinson D, Morel N, et al. A generalized stochastic model for the simulation of occupant presence[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(2): 83-98.

[20] Andersen R V, Toftum J, Andersen K K, et al. Survey of occupant behavior and control of indoor environment in Danish dwellings. Energy and Buildings[J], 2009, 41(1):11-16.

[21] Santin O G, Behavioral Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(10): 2662-2672.

[22] Diao L, Sun Y, Chen Z, Chen J, Modeling energy consumption in residential buildings: A bottom-up analysis based on occupant behavior pattern clustering and stochastic simulation[J]. Energy and Buildings, 2017, 147: 47–66.

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

[24] Feng X, Yan D, Hong T, Simulation of occupancy in buildings[J]. Energy and Buildings, 2015, 87: 348–359.

[25] Moon J W, Han S H, Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2):338–346.

[26] 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.

[27] 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 and Environment, 2009, 44(10):2137–2149.

[28] 徐蕾，潘毅群，黄治钟. 结合人员行为的分散式空调系统能耗模拟[J]. 建筑科学, 2018,10 (34):40-50.

[29] Yasue R, Habara H, Nakamichi A, et al. Modeling the occupant behavior relating to window and air-conditioner operation based on survey results. Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambery, France, August 26-28, 2013.

[30] Haldi F, Robinson D, On the behaviour and adaptation of office occupants[J]. Building and Environment, 2008, 43: 2163–2177.

[31] Tanimoto J, Hagishima A, State transition probability for the Markov Model dealing with on/off cooling schedule in dwellings[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(3):181–187.

[32] Yun G Y, Steemers K, Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer[J]. Building and Environment, 2008, 43: 1471–1482.

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

[34] 任晓欣. 建筑中人行为动作模型研究与分析[D]. 北京: 清华大学, 2015.

[35] Zhou H, Qiao L, Jiang Y, et al. Recognition of air-conditioner operation from indoor air temperature and relative humidity by a data mining approach[J]. Energy and Buildings, 2016, 111: 233–241.

[36] Magalh ães S M C , Leal V M S, Horta I M, Modelling the relationship between heating energy use and indoor temperatures in residential buildings through Artificial Neural Networks considering occupant behavior[J]. Energy and Buildings, 2017, 151:332-343.

[37] D'Oca S, Hong T, A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices[J]. Building and Environment, 2014, 82: 726-739.

[38] Haldi F, Robinson D, Interactions with window openings by office occupants[J]. Building and Environment, 2009, 44: 2378–2395.

[39] Feng X, Yan D, Wang C, et al. A preliminary research on the derivation of typical occupant behavior based on large-scale questionnaire surveys[J]. Energy and Buildings, 2016, 117: 332–340.

[40] 王闯，燕达，孙红三等. 室内环境控制相关的人员动作描述方法[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 203-211.

[41] Yan D, O’Brien W, Hong T, Occupant behavior modeling for building performance simulation:

Current state and future challenges[J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 264–278.
[42] Zhang T, Siebers P O, Aickelin U, Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 2882–2892.
[43] Lee Y S, Malkawi A M, Simulating multiple occupant behaviors in buildings: An agent-based modeling approach[J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 407–416.
[44] Azar E, Menassa C. Agent-based modeling of occupants and their impact on energy use in commercial buildings[J]. J Comput Civ Eng, 2012, 26(4): 506-518.
[45] Langevin J, Wen J, Gurian P L, Simulating the human-building interaction: Development and validation of an agent-based model of office occupant behaviors[J]. Building and Environment, 2015, 88:27-45.
[46] Russell S, Norvig P, Artificial Intelligence—A Modern Approach, second ed., Pearson Education International, New Jersey, 2003.
[47] Macal C M, North M J, Tutorial on agent-based modelling and simulation[J]. Journal of Simulation, 2010, 4: 151–162.
[48] Goldstein R, Tessier A, Khan A, Customizing the behavior of interacting occupants using personas, in: Proceedings of the National IBPSA-USA Conference, New York, USA, 2010.
[49] Goldstein R, Tessier A, Khan A, Schedule-calibrated occupant behavior simulation, in: Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference, Society for Computer Simulation International, 2010, p. 180.
[50] Chapman J, Siebers P O, Robinson D, Multi-Agent Stochastic Simulation of Occupants for Building Simulation, in: Proceedings of Building Simulation 2017, San Francisco, USA, 2017.
[51] Wasserman S, Faust K, Social Network Analysis: Methods and Applications. Cambridge University Press, 2009.
[52] Peschiera G, Taylor J E, The impact of peer network position on electricity consumption in building occupant networks utilizing energy feedback systems[J]. Energy and Buildings, 2012, 49: 584–590.
[53] Chen J, Taylor J E, Wei H H, Modeling building occupant network energy consumption decision-making: The interplay between network structure and conservation[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 515-524.
[54] Wu J, Chiclana F, Fujita H, A visual interaction consensus model for social network group decision making with trust propagation[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 122: 39–50.
[55] Holopainen R, Tuomaala P, Hernandez P, et al. Comfort assessment in the context of sustainable buildings: comparison of simplified and detailed human thermal sensation methods[J]. Build Environ, 2014, 71: 60-70.
[56] Steemers K, Manchanda S, Energy efficient design and occupant well-being: case studies in the UK and India[J]. Build Environ, 2010, 45: 270-278.
[57] Hong T, Yan D, D"Oca S, et al. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture[J]. Building and Environment, 2017, 114:518-530.
[58] 万崇华，许传志．调查研究方法与分析[M]．北京：中国统计出版社, 2016.
[59] Hong T, Sun H, Chen Y, et al. An occupant behavior modeling tool for co-simulation[J]. Energy & Buildings, 2016, 117: 272-281.
[60] 孙红三，洪天真，王闯等．建筑人行为描述的扩展标识语言架构[C]// 全国建筑院系建筑数字技术教学研讨会. 2015.
[61] Dillman D A, Phelps G, Tortora R, et al. Response rate and measurement differences in mixed-

mode surveys using mail, telephone, interactive voice response (IVR) and the Internet[J]. Social Science Research, 2009, 38(1): 1-18.
[62] Steg L, Promoting household energy conservation[J]. Energy Policy, 2008, 36: 4449-4453.
[63] Arlene Fink, et al. 调查研究实操指导:细节与示例[M]. 重庆：重庆大学出版社, 2016.
[64] 冯士雍，倪加勋，邹国华. 抽样调查理论与方法[M]. 北京：中国统计出版社, 2012.
[65] Golafshani N, Understanding reliability and validity in qualitative research. The qualitative report, 2003, 8(4):597-606.
[66] 顾海根. 应用心理测量学[M]. 北京：北京大学出版社, 2010.
[67] Hu Q , Fang X , Li F , et al. An approach to assess the responsive residential demand to financial incentives[C]// Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015.
[68] 王保进. 英文视窗版 SPSS 与行为科学研究[M]. 北京：北京大学出版社, 2007.
[69] 吴明隆. 问卷统计分析实务:SPSS 操作与应用[M]. 重庆：重庆大学出版社, 2010.
[70] Gorsuch R L. Factor Analysis. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1983.
[71] Comrey A L. Factor analytic methods of scale development in personality and clinical psychology[J]. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 1988, 56: 754-761.
[72] Tabachnick B G, Fidell L S. Using multivariate statistics (5th Ed.). Needham Heights, MA: Allyn and Bacon, 2007.
[73] 曹付元. 面向分类数据的聚类算法研究[D]. 山西：山西大学, 2010.
[74] 周志华. 机器学习[M]. 北京：清华大学出版社, 2016, 199-202.
[75] 赵恒. 数据挖掘中聚类若干问题研究[D]. 西安：西安电子科技大学, 2005.
[76] Stanfill C, and Waltz D. Toward memory-based reasoning, Communications of the ACM. 1986, 29(12):1213-1228.
[77] 李超群. 名词性属性距离度量问题及其应用研究[D]. 湖北：中国地质大学, 2012.
[78] Wang S, Jin X, CO2-based occupancy detection for on -line outdoor air flow control. Indoor and Built Environment[J]. 1998, 7:165 -81.
[79] Zadeh L A, Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8:338-353.
[80] Atanassov K T, Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20:87-96.
[81] Xu Z S, Intuitionistic fuzzy aggregation operators[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15: 1179-1187.
[82] Zhang X M, Xu Z S, A new method for ranking intuitionistic fuzzy values and its application in multi-attribute decision making[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2012, 12: 135-146.
[83] 廖虎昌. 直觉模糊偏好决策理论与方法[M]. 北京：科学出版社, 2017.
[84] Saaty T L, Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1986, 32: 841-845.
[85] Tanino T, Fuzzy preference orderings in group decision making[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1984: 12: 117-131.
[86] Xu Z S, Intuitionistic preference relations and their application in group decision making[J]. Information Sciences, 2007, 177: 2363-2379.
[87] 廖虎昌. 复杂模糊多属性决策理论与方法[M]. 北京：科学出版社, 2016.
[88] 许树柏. 实用决策方法:层次分析法原理[M]. 天津：天津大学出版社, 1988.
[89] Ramanathan R and Ganesh L S, Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 79: 249-265.
[90] Pease M C, Methods of Matrix Algebra, Academic Press, New York, 1965.

[91] Hong T, Sun H, Chen Y, et al. An occupant behavior modeling tool for co-simulation[J]. Energy & Buildings, 2016, 117:272-281.

[92] Hong T, D'Oca S, Taylor-Lange S C, Turner W J N, Chen Y, Corgnati S P, An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part II: implementation of the DNAs Framework using an XML schema[J]. Build and Environ, 2015, 94: 196–205.

附录 A 多人模型模拟代码

空调行为模拟过程主要包括多人动作概率计算和与DeST软件交换输入输出参数两部分，以下给出的代码主要涉及多人模型的计算过程，不包括与DeST交换数据的接口设计部分。首先对环境、事件、人员信息、行为模式等变量进行定义与赋值，接下来分别计算由事件和环境触发的群体动作概率，判断空调状态是否改变，并将计算结果输出给DeST。具体执行代码如下：

```
bool OccupantBehavior::PerformInteraction(double dInput, double nInput, int randocc[100], int
OccNum, vector<int> einput, int nNumberofTimeStep, SystemType systemType, InteractionType
interactionType, double& dOnOff, string& error, string& ss1, string& ss2, string& ss3, string&
ss4, double& fprob, double& randprob)
{
    dOnOff = 0;
    ss1 = " "; ss2 = " "; ss3 = " "; ss4 = " ";
    std::uniform_real_distribution<double> dist(0.0, 1.0), dist3(0.0, 0.2), dist4(0.8, 1.0),
dist5(0.2, 0.4), dist6(0.6, 0.8), dist7(0.4, 0.6), dist8(0.6, 1);
    std::mt19937 rng;
    rng.seed(std::random_device{}());

    if (nNumberofTimeStep < 0)
    {
        error += "The number of time step (";
        error += nNumberofTimeStep;
        error += ") is out of scope.";
        return false;
    }
#
    double xu_l;
    double dDt = 0.167;          //时间步长min
    double fProb = 0;   //动作概率
    double aProb[10000] = { 0.0,0.0 };
    double bProb[10000] = { 0.0,0.0 };
    double cProb[10000] = { 0.0,0.0 };
    double dProb[10000] = { 0.0,0.0 };   //4个偏好值
    double aprobmulti = 1.0;
    double bprobmulti = 1.0;
    double cprobmulti = 1.0;
    double dprobmulti = 1.0;//IFWA算子
    double aProbfinal = 0.0;
    double bProbfinal = 0.0;;
```

```
double cProbfinal = 0.0;;
double dProbfinal = 0.0;;
double LP1 = 0.0;
double LP2 = 0.0;
int ninput = int(nInput);//人数

if (!flag1)
{
    for (int i = 0; i < 100; i++)//初始化行为模型参数
    {
        dOnMode[i] = 100;
        dOnCoefU[i] = 27;
        dOnCoefL[i] = 4.28;
        dOnCoefK[i] = 1.85;
        dOffMode[i] = 100;
        dOffCoefU[i] = 28;
        dOffCoefL[i] = 1.2;
        dOffCoefK[i] = 4.56;
        dWeight[i] = 0;
    }
    flag1 = true;
}
int iSpaceSystemControlType = -1;

bool ok1 = 1;
switch (systemType)
{
case System_HVAC:
{
    iSpaceSystemControlType = (int)HVAC_ZoneOnOff;
    for (int i = 0; i < ninput; i++)
    {
        dOnMode[i] = m_ACParaOn[randocc[i]].nMode[3];
        dOnCoefU[i] = m_ACParaOn[randocc[i]].fU[3];
        dOnCoefL[i] = m_ACParaOn[randocc[i]].fL[3];
        dOnCoefK[i] = m_ACParaOn[randocc[i]].fK[3];
        dOffMode[i] = m_ACParaOff[randocc[i]].nMode[3];
        dOffCoefU[i] = m_ACParaOff[randocc[i]].fU[3];
        dOffCoefL[i] = m_ACParaOff[randocc[i]].fL[3];
        dOffCoefK[i] = m_ACParaOff[randocc[i]].fK[3];
        char str[10];
        sprintf(str, "%01d", randocc[i]);
        ss1 += " ";
        ss1 += str;
```

```
            }
            ss1 += '\0';
        }
        break;
        case System_Lights:
            break;
        case System_Windows:
            break;
        }

        // 动作概率计算
        switch (interactionType) {
        case Interaction_TurnOff: //空调关着，则计算开概率
        {
            int i, j, k;
            k = 0;
            int flag;
            int array[100] = { 0,0 };
            int OutOcc[100] = { 0,0 };
            int CalNum;
            CalNum = 0;
            double sum = 0;
            vector <int> eventOcc;
            //根据事件，读取事件触发动作参数  einput=1,GoForLunch; einput=3,GoToOffice;
einput=5, BackFromLunch; einput=6, LeaveFromWork
            for (int n = 0; n < einput.size(); n++)
            {
                if (einput[n] == 1)
                {
                    if (e_ACParaOff[randocc[n]].eMode[2] == 2)
                    {
                        aProb[CalNum] = e_ACParaOff[randocc[n]].epro[2];
                        dWeight[CalNum] = weight[randocc[n]];
                        CalNum++;
                        sum += weight[randocc[n]];
                        eventOcc.push_back(n);
                    }
                }
                if (einput[n] == 6)
                {
                    if (e_ACParaOff[randocc[n]].eMode[4] == 4)
                    {
                        aProb[CalNum] = e_ACParaOff[randocc[n]].epro[4];
                        dWeight[CalNum] = weight[randocc[n]];
```

```
                CalNum++;
                sum += weight[randocc[n]];
                eventOcc.push_back(n);
            }
        }
    }
    //根据环境触发的动作概率
    if (CalNum == 0)
    {
        for (i = 0; i < ninput; i++)
        {
            flag = 0;
            for (j = 0; j < eventOcc.size(); j++)
            {
                if (i == eventOcc[j])
                    flag = 1;
            }
            if (flag)
            {
                continue;
            }
            else
            {
                if (e_ACParaOff[randocc[i]].eMode[1] == 1)
                {
                    aProb[CalNum] = 1.0;
                    dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                    CalNum++;
                    sum += weight[randocc[i]];
                }
                else if (e_ACParaOff[randocc[i]].eMode[0] == 0)
                {
                    aProb[CalNum] = 0.0;
                    dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                    CalNum++;
                    sum += weight[randocc[i]];
                }
                else if (dOffMode[i] == 3)
                {
                    xu_l = (dOffCoefU[i] - dInput) / dOffCoefL[i];
                    if (xu_l <= 0)
                        aProb[CalNum] = 0;
                    else
                        aProb[CalNum] = 1 - exp(-pow(xu_l, dOffCoefK[i])*dDt);
```

```
                    dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                    CalNum++;
                    sum += weight[randocc[i]];
                    char str5[10], str6[10], str7[10];

                    sprintf(str5, "%.2f", dOffCoefU[i]);
                    sprintf(str6, "%.2f", dOffCoefL[i]);
                    sprintf(str7, "%.2f", dOffCoefK[i]);

                    ss3 += str5; ss3 += " ";
                    ss3 += str6; ss3 += " ";
                    ss3 += str7; ss3 += ";";
                }
            }
        }
    }
    if (CalNum == 1)
    {
        fProb = aProb[0];
    }
    else
    {
        for (i = 0; i < CalNum; i++)
        {
            dWeight[i] = dWeight[i] / sum;
            char str[10] = "";
            sprintf(str, "%.2f", dWeight[i]);
            ss2 += " ";
            ss2 += str;

            if (aProb[i] > 0.8)
            {
                bProb[i] = dist3(rng);
                cProb[i] = dist3(rng);
                dProb[i] = dist4(rng);
            }
            else if (aProb[i] > 0.6)
            {
                bProb[i] = dist5(rng);
                cProb[i] = dist5(rng);
                dProb[i] = dist6(rng);
            }
            else if (aProb[i] > 0.4)
            {
```

```
            bProb[i] = dist7(rng);
            cProb[i] = dist7(rng);
            dProb[i] = dist7(rng);
        }
        else if (aProb[i] > 0.2)
        {
            bProb[i] = dist6(rng);
            cProb[i] = dist6(rng);
            dProb[i] = dist5(rng);
        }
        else
        {
            bProb[i] = dist4(rng);
            cProb[i] = dist4(rng);
            dProb[i] = dist3(rng);
        }
        if ((bProb[i] + aProb[i]) > 1)
            bProb[i] = 1 - aProb[i];
        if ((cProb[i] + dProb[i]) > 1)
            dProb[i] = 1 - cProb[i];

        char str1[10], str2[10], str3[10], str4[10];

        sprintf(str1, "%.5f", aProb[i]);
        sprintf(str2, "%.5f", bProb[i]);
        sprintf(str3, "%.5f", cProb[i]);
        sprintf(str4, "%.5f", dProb[i]);

        ss3 += str1; ss3 += " ";
        ss3 += str2; ss3 += " ";
        ss3 += str3; ss3 += " ";
        ss3 += str4; ss3 += ";";

        aprobmulti *= pow((1 - aProb[i]), dWeight[i]);
        bprobmulti *= pow((1 - bProb[i]), dWeight[i]);
        cprobmulti *= pow((1 - cProb[i]), dWeight[i]);
        dprobmulti *= pow((1 - dProb[i]), dWeight[i]);
    }

    ss2 += '\0';
    ss3.pop_back();
    ss3 += '\0';
    aProbfinal = 1 - aprobmulti;
    bProbfinal = 1 - bprobmulti;
```

```
                cProbfinal = 1 - cprobmulti;
                dProbfinal = 1 - dprobmulti;

                char str1[10], str2[10], str3[10], str4[10];
                sprintf(str1, "%.5f", aProbfinal);
                sprintf(str2, "%.5f", bProbfinal);
                sprintf(str3, "%.5f", cProbfinal);
                sprintf(str4, "%.5f", dProbfinal);
                ss4 += str1; ss4 += " ";
                ss4 += str2; ss4 += " ";
                ss4 += str3; ss4 += " ";
                ss4 += str4; ss4 += '\0';

                LP1 = (1 - bProbfinal) / (1 + 1 - (aProbfinal + bProbfinal));
                LP2 = (1 - dProbfinal) / (1 + 1 - (cProbfinal + dProbfinal));
                if (LP1 > LP2)
                    fProb = 1.0;
                else
                    fProb = 0;
            }
        }
        break;

        case Interaction_TurnOn: //空调开着，则计算关概率
        {
            int CalNum, flag;
            CalNum = 0;
            double sum = 0.0;
            vector <int> eventOcc;
            //根据事件，读取事件触发动作参数  einput=1,GoForLunch; einput=3,GoToOffice;
einput=5, BackFromLunch; einput=6, LeaveFromWork
            for (int n = 0; n < einput.size(); n++)
            {
                if (einput[n] == 3 || einput[n] == 5)
                {
                    if (e_ACParaOn[randocc[n]].eMode[2] == 2)
                    {
                        aProb[CalNum] = e_ACParaOn[randocc[n]].epro[2];
                        dWeight[CalNum] = weight[randocc[n]];
                        CalNum++;
                        sum += weight[randocc[n]];
                        eventOcc.push_back(n);
                    }
                    //进门开模型参数
```

```
                    else if ((m_ACParaOn[randocc[n]].nMode[3] == 3) &&
(m_ACParaOn[randocc[n]].fC[3] != 1) && (m_ACParaOn[randocc[n]].fC[3] != 0))
                    {
                        xu_l = (dInput - m_ACParaOn[randocc[n]].fU[3]) /
m_ACParaOn[randocc[n]].fL[3];
                        if (xu_l <= 0)
                            aProb[CalNum] = 0;
                        else
                            aProb[CalNum] = 1 - exp(-pow(xu_l,
m_ACParaOn[randocc[n]].fK[3])*m_ACParaOn[randocc[n]].fC[3]);
                        dWeight[CalNum] = weight[randocc[n]];
                        CalNum++;
                        sum += weight[randocc[n]];
                        eventOcc.push_back(n);
                    }
                }
            }
            int i, j;
            if (CalNum == 0)
            {
                for (i = 0; i < ninput; i++)
                {
                    flag = 1;
                    for (j = 0; j < eventOcc.size(); j++)
                    {
                        if (i == eventOcc[j])
                            flag = 0;
                    }
                    if (!flag)
                    {
                        continue;
                    }
                    else
                    {
                        if (e_ACParaOn[randocc[i]].eMode[1] == 1)
                        {
                            aProb[CalNum] = 1.0;
                            dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                            CalNum++;
                            sum += weight[randocc[i]];
                        }
                        else if (e_ACParaOn[randocc[i]].eMode[0] == 0)
                        {
                            aProb[CalNum] = 0.0;
```

```
                    dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                    CalNum++;
                    sum += weight[randocc[i]];
                }
                else if (dOnMode[i] == 3)
                {
                    xu_l = (dOnCoefU[i] - dInput) / dOnCoefL[i];
                    if (xu_l >= 0)
                        aProb[CalNum] = 0;
                    else
                        aProb[CalNum] = 1 - exp(-pow(-xu_l, dOnCoefK[i])*dDt);
                    dWeight[CalNum] = weight[randocc[i]];
                    CalNum++;
                    sum += weight[randocc[i]];

                    char str5[10], str6[10], str7[10];

                    sprintf(str5, "%.2f", dOnCoefU[i]);
                    sprintf(str6, "%.2f", dOnCoefL[i]);
                    sprintf(str7, "%.2f", dOnCoefK[i]);

                    ss3 += str5; ss3 += " ";
                    ss3 += str6; ss3 += " ";
                    ss3 += str7; ss3 += ";";
                }
            }
        }
    }
    if (CalNum == 1)
    {
        fProb = aProb[0];
    }
    else
    {
        for (i = 0; i < CalNum; i++)
        {
            dWeight[i] = dWeight[i] / sum;
            char str[10] = "";
            sprintf(str, "%.2f", dWeight[i]);
            ss2 += " ";
            ss2 += str;

            if (aProb[i] > 0.8)
            {
```

```
        bProb[i] = dist3(rng);
        cProb[i] = dist3(rng);
        dProb[i] = dist4(rng);
    }
    else if (aProb[i] > 0.6)
    {
        bProb[i] = dist5(rng);
        cProb[i] = dist5(rng);
        dProb[i] = dist6(rng);
    }
    else if (aProb[i] > 0.4)
    {
        bProb[i] = dist7(rng);
        cProb[i] = dist7(rng);
        dProb[i] = dist7(rng);
    }
    else if (aProb[i] > 0.2)
    {
        bProb[i] = dist6(rng);
        cProb[i] = dist6(rng);
        dProb[i] = dist5(rng);
    }
    else
    {
        bProb[i] = dist4(rng);
        cProb[i] = dist4(rng);
        dProb[i] = dist3(rng);
    }
    if ((bProb[i] + aProb[i]) > 1)
        bProb[i] = 1 - aProb[i];
    if ((cProb[i] + dProb[i]) > 1)
        dProb[i] = 1 - cProb[i];

    char str1[10], str2[10], str3[10], str4[10];

    sprintf(str1, "%.5f", aProb[i]);
    sprintf(str2, "%.5f", bProb[i]);
    sprintf(str3, "%.5f", cProb[i]);
    sprintf(str4, "%.5f", dProb[i]);

    ss3 += str1; ss3 += " ";
    ss3 += str2; ss3 += " ";
    ss3 += str3; ss3 += " ";
    ss3 += str4; ss3 += ";";
```

```
                aprobmulti *= pow((1 - aProb[i]), dWeight[i]);
                bprobmulti *= pow((1 - bProb[i]), dWeight[i]);
                cprobmulti *= pow((1 - cProb[i]), dWeight[i]);
                dprobmulti *= pow((1 - dProb[i]), dWeight[i]);
            }
            ss2 += "\0";
            ss3.pop_back();
            ss3 += '\0';

            aProbfinal = 1 - aprobmulti;
            bProbfinal = 1 - bprobmulti;
            cProbfinal = 1 - cprobmulti;
            dProbfinal = 1 - dprobmulti;

            char str1[10], str2[10], str3[10], str4[10];
            sprintf(str1, "%.5f", aProbfinal);
            sprintf(str2, "%.5f", bProbfinal);
            sprintf(str3, "%.5f", cProbfinal);
            sprintf(str4, "%.5f", dProbfinal);
            ss4 += str1; ss4 += " ";
            ss4 += str2; ss4 += " ";
            ss4 += str3; ss4 += " ";
            ss4 += str4; ss4 += '\0';

            LP1 = (1 - bProbfinal) / (1 + 1 - (aProbfinal + bProbfinal));
            LP2 = (1 - dProbfinal) / (1 + 1 - (cProbfinal + dProbfinal));
            if (LP1 > LP2)
                fProb = 1.0;
            else
                fProb = 0;
        }
    }
    break;
    }

    //判断空调状态是否改变
    long double random_variable = dist(rng);

    writeToLogFile(",throw dice,random value,");
    writeToLogFile(std::to_string(random_variable));
    writeToLogFile(",probability value,");
    writeToLogFile(std::to_string(fProb));

    if (random_variable <= fProb)
```

```
    {
        dOnOff = 1;
        writeToLogFile(",Win\n");
    }
    else
    {
        writeToLogFile(",Lost\n");
        dOnOff = 0;
    }
    fprob = fProb;
    randprob = random_variable;

    return true;
}
```

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历：

潘媛，女，1992 年 12 月生。

2016 年 6 月毕业于同济大学 建筑环境与设备工程专业，获学士学位。

2016 年 9 月入同济大学，攻读硕士研究生学位。

已发表论文：

[1] Pan Y, Pan Y, Yang Y, et al. A Parametric Study on the Community Form and Its Influences on Energy Consumption of Office Buildings in Shanghai[J]. Procedia Engineering, 2017, 205:548-555.

[2] Pan Y, Pan Y, Xie J, Huang Z. Typical Heating and Cooling Occupant Behavior Patterns of Office Buildings Based on Large Scale Survey. *4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association* - ASim2018, Hong Kong.

待发表论文：

无