

分类号 **TU**
U D C **624**

学校代码 **10590**
密 级 **公开**

深圳大学硕士学位论文

夏热冬暖地区高校宿舍冬季室内 热舒适研究—以深圳大学为例

学位申请人姓名	曹丹纶
专 业 名 称	管理科学与工程(工学)
学院（系、所）	土木与交通工程学院
指 导 教 师	李昇翰

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文夏热冬暖地区高校宿舍冬季室内热舒适研究—以深圳大学为例是本人在导师的指导下，独立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，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律后果由本人承担。

论文作者签名：曹丹纶

日期：2019 年 5 月 19 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解深圳大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属深圳大学。学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其他机构送交论文的电子版和纸质版，允许论文被查阅和借阅。本人授权深圳大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（涉密学位论文在解密后适用本授权书）

论文作者签名：曹丹纶

日期：2019 年 5 月 19 日

导师签名：李玲

日期：2019 年 5 月 20 日

摘要

近年来,随着经济实力和科技水平的增强,我国高等教育事业发展迅速,各地高校不断进行校区扩建以应对逐年增长的学生人数。宿舍作为一种重要的教育建筑,其室内环境直接关系到学生的学习效率和身心健康。就目前而言,由于人民生活水平的提高,宿舍室内热环境往往不能满足学生的居住需求。因此,高校宿舍室内热环境的研究与热舒适的改善成为亟待解决的问题。

我国地域辽阔,气候类型多样。文章以深圳大学为例,率先对夏热冬暖地区冬季室内热舒适进行研究。文章首先全面地介绍了国内外热舒适研究的发展过程与现状,接着从热舒适模型、人体热舒适的影响因素、热舒适评价指标和标准几个方面阐述了热舒适的理论基础。然后选取代表宿舍进行现场研究。其中客观研究为现场测量室内温度、湿度、风速等物理环境指标;主观研究为问卷调查,问卷按照 ASHRAE 七级标度、三级标度设立问题,收集了受试者对各环境参数的感觉和期望。通过对比主客观结果,对宿舍冬季室内热舒适进行评价。在详细介绍了软件相关理论和操作过程后,文章运用 Airpak 对实测单体宿舍室内热环境进行模拟,通过对比实测值和模拟运算出的温度场、风速场验证模型可靠。最后,文章创新性地在模型基础上对开门、开窗等适应性行为进行量化,探究其对环境参数和热舒适评价指标 PMV、PPD 的影响。

通过上述研究步骤,文章得出结论:深圳大学冬季宿舍室内温度在 17.5°C – 23°C 之间,室内风速集中在 0m/s – 0.1m/s 之间,相对湿度为 75%–85%。受试者对冬季宿舍室内热环境的总体感觉为“有点不满意”,虽然感受到了一定的不舒适,但他们在主观上能接受其所处的热环境。宿舍内人员一般采用两种方式进行增暖:一是通过控制门窗等设施来调节室内热环境;二是通过改变活动状态、增加衣物来调节自身对环境的感知。其中,减小阳台门开口可以改善室内白天和夜间的热舒适。但同侧和对流通风措施只能增加室内通风,对人体热舒适没有改善。当宿舍内人员不能通过设施调节改变室内热环境时,增加衣物或增加活动强度是帮助人体达到热舒适状态的最佳选择。由于设施调节行为对白天状况下的热舒适影响更大,个体调节行为对夜晚状况下的热舒适影响更大,宿舍内人员应根据具体需求和所处时间段选择适合的热适应行为。

关键词：室内热舒适；夏热冬暖地区；高校宿舍；计算机模拟；适应性行为

Abstract

In recent years, with the enhancement of economic strength and scientific and technological level, China's higher education has developed rapidly. Universities around the country continue to expand the campus to cope with the increasing number of students. Dormitory is an important kind of educational building, its built environment is directly related to students' learning efficiency and physical, mental health. At present, due to the improvement of people's living standards, indoor thermal environment of dormitory often cannot meet the living needs of students. Thus, the research on indoor thermal environment and the improvement of thermal comfort in college dormitory has become an urgent problem to be solved.

There are many different regions in our country as well as many different types of climate. Taking Shenzhen University as an example, the study has pioneered in studying the indoor thermal comfort in hot summer and warm winter zone. Firstly, the study introduces the development process and current situation of research on thermal comfort at home and abroad, and then introduces the theoretical basis of thermal comfort from the aspects of thermal comfort model, influencing factors of human thermal comfort, thermal comfort evaluation index and standard. Then it selects representative dormitories for field study. The objective study is to measure the physical environmental parameters such as indoor temperature, humidity and wind speed of the spot; subjective study is a questionnaire survey, the questionnaire collects the subjects' perception and expectation of each environmental parameter according to ASHRAE Seven-level scale and Three-level scale. By comparing the subjective and objective results, the indoor thermal comfort of the dormitory was evaluated. After introducing the theory and operation process of the software in detail, the study uses Airpak to simulate the indoor thermal environment of one measured dormitory. The model is verified by comparing the measured and the simulated values in temperature field and wind velocity field. Finally, based on the model, the study innovatively quantifies the adaptive behaviors such as opening doors and windows,

as well as exploring its influence on environmental parameters and thermal comfort evaluation indicators PMV and PPD.

Through the above research steps, the study draws the conclusion that in winter, the indoor temperature of dormitory in Shenzhen University is between 17.5 °C and 23 °C, the indoor wind speed is concentrated between 0m/s and 0.1m/s, and the relative humidity is 75%-85%. The overall thermal sensation of the subjects in winter was “a little dissatisfied”. Although they felt a little uncomfortable, they were subjectively able to accept the thermal environment in which they were located. People in the dormitory generally adopts two ways to warm up: one is to adjust the indoor thermal environment by controlling doors, windows or other facilities; the other is to adjust the perception of the thermal environment by changing activity state and adding clothing. Among them, reducing the opening of balcony doors can improve the indoor thermal environment both in the daytime and at night. However, the other two ventilation measures can only increase indoor ventilation, and the thermal comfort of human body has not been improved. If people in the dormitory cannot change the indoor thermal environment through adjusting facilities, adding clothing or increasing activity intensity will be the best choice to help the body achieve thermal comfort. Since the facility adjustment behavior has a greater impact on thermal comfort in daytime, the individual adjustment behavior has a greater impact on thermal comfort at night, people in the dormitory should choose suitable thermal adaptive behavior according to their specific needs and time periods

Key word: indoor thermal comfort; hot summer and warm winter zone; college dormitories; computer simulation; adaptive behavior

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 热舒适的理论研究.....	2
1.2.2 热舒适的研究方法.....	3
1.2.2.1 实验室研究.....	3
1.2.2.2 现场研究.....	4
1.2.2.3 模拟研究.....	5
1.2.3 热舒适研究的应用.....	5
1.3 存在的不足.....	7
1.4 本文研究.....	8
1.4.1 研究目的与意义.....	8
1.4.2 研究内容.....	8
1.4.3 研究方法.....	9
1.4.4 创新点.....	10
1.4.5 研究框架.....	11
第 2 章 热舒适研究的理论基础.....	12
2.1 热舒适模型.....	12
2.1.1 PMV 模型.....	12
2.1.2 适应性模型.....	12
2.2 人体热舒适的影响因素.....	13
2.2.1 环境因素.....	13
2.2.1.1 空气温度.....	13
2.2.1.2 平均辐射温度.....	13

2.2.1.3 相对湿度.....	14
2.2.1.4 气流速度.....	14
2.2.2 个人因素	15
2.2.2.1 新陈代谢率.....	15
2.2.2.2 衣物热阻.....	15
2.2.3 其他因素	16
2.3 热舒适的主要评价指标	17
2.3.1 PMV-PPD	17
2.3.2 操作温度 t_o	18
2.3.3 有效温度 ET、新有效温度 ET*、标准有效温度 SET.....	18
2.4 热舒适评价标准	19
2.4.1 ASHRAE-55	19
2.4.2 ISO7730	19
2.5 本章小结	20
第3章 宿舍冬季室内热舒适研究.....	21
3.1 夏热冬暖地区宿舍概况	21
3.1.1 气候概况	21
3.1.2 建筑概况	21
3.2 宿舍热舒适现场研究	22
3.2.1 现场测量	22
3.2.1.1 仪器选择.....	22
3.2.1.2 测量方案.....	23
3.2.2 问卷调查	24
3.2.2.1 调查问卷设计.....	24
3.2.2.2 数据检验.....	25
3.2.2.3 基本信息统计.....	26
3.3 宿舍受试者热舒适分析	27
3.3.1 热感觉与热期望	27
3.3.2 吹风感与气流期望	32
3.3.3 湿感觉	34

3.3.4 空气质量与开窗习惯	36
3.3.5 衣物与行为活动	38
3.3.6 总体热舒适	40
3.4 本章小结	41
第4章 宿舍室内热环境模拟	42
4.1 AIRPAK 软件的介绍	42
4.1.1 概述	42
4.1.2 湍流方程介绍	42
4.1.3 辐射模型介绍	43
4.1.4 技术路线	44
4.2 软件模拟过程	45
4.2.1 物理模型	45
4.2.2 参数及边界条件的设置	46
4.2.2.1 基础设置	46
4.2.2.2 边界设定	46
4.2.2.3 其他参数的设置	48
4.2.3 网格的划分	48
4.2.4 运算求解	51
4.3 模型的验证	52
4.3.1 温度场的验证	52
4.3.2 速度场的验证	55
4.4 本章小结	56
第5章 适应性行为对热舒适的影响	57
5.1 适应性行为的定义	57
5.2 模拟概况	57
5.3 设施调节行为	59
5.3.1 减小通风口面积	59
5.3.2 同侧通风措施	61
5.3.3 对流通风措施	62
5.4 个体调节行为	64

5.4.1 改变衣物热阻	64
5.4.2 改变新陈代谢	66
5.5 本章小节	67
结论与展望	68
参 考 文 献	70
附 录 1	75
附 录 2	76
附 录 3	77
致 谢	79
攻读硕士学位期间取得的研究成果附录	80

第1章 绪论

1.1 研究背景

自 1978 年恢复高考以来,我国高等教育招生数除少数年份外一直呈增长趋势。据教育部公布的《全国教育事业统计公报》,截止到 2017 年,全国高等教育在学总人数达到 3779 万,毛入学率高达 45.7%。其中,普通高等教育本专科在校生 2753.59 万人,成人高等教育本专科在校生 584.39 万人,在学硕博研究生 263.96 万人。日益增长的在校生人数促使全国高校不断扩大建筑及相关配套设施的建设规模,学生宿舍作为校园建筑的重要组成部分,其规模已经到了不可忽视的地位。与此同时,在校人数的增加使得粗放式、低标准的校舍与越来越高的居住要求的冲突日益显著。

吕留根、王雅丽等人曾调查了 87 位学生的作息模式,结果显示学生一天中有 80.4% 的时间在室内度过,其中 50.4% 的时间在宿舍中度过^[1]。因此,宿舍室内环境将直接影响学生的学习和生活。目前,我国已有许多关于普通住宅、办公写字楼以及其他大型公共建筑室内环境的研究。与住宅等其他民用建筑相比,高校宿舍由于占用时间、环境要求、居住者活动和服装等诸多因素差异,室内热环境和热舒适需要单独加以研究。

近年来,由于全球气候变化,夏热冬暖地区冬季气温偏低的情况越来越频繁,部分地区甚至出现了风、雪、霜冻等极端气候现象。以深圳为例,2018 年年初寒冷天气持续时长为 2008 年以来之最,日最低气温连续 11 天低于 10℃。按照当地建筑规范,建筑围护结构无需设置保温层。冬季来临时,学生由于长时间生活在温暖的气候条件下,生理和心理上均无法适应寒冷气候。深圳市高校数量虽然不多,但学生密度非常高。以深圳大学为例,自 1983 年办学至今,学生人数从 4000 人快速发展到 3.6 万余人。庞大的人数规模使得该地学生的热舒适问题不容忽视。因此,探究夏热冬暖地区冬季宿舍室内热舒适显得尤为必要。

1.2 国内外研究现状

随着人民生活水平的不断改善,室内环境是否舒适成了人们评判建筑的重要标准。社会各界对室内环境相关课题的关注度不断升温,各地学者就人体热舒适问题展开了大量研究。根据本文研究内容,国内外研究现状将分为三个部分进行阐述:热舒适基础理论研究、热舒适研究方法和热舒适研究的应用。

1.2.1 热舒适的理论研究

1910 年左右,为了提高军用舰艇和飞行器内士兵的工作环境,政府部门开始研究热环境问题。第二次世界大战后,社会生产力获得巨大发展,人们开始追求更高的生活水平。热舒适研究对象得以转向生产和生活领域。1919 年,美国采暖通风工程师协会(ASHRAE)在匹茨堡建立了首个标准微气候实验室,热舒适研究从此迈向了科学化进程^[5]。

1923 年, Houghton 和 Yaglou 研究气候实验室中半裸体男士对室内温度和湿度变化的等舒适线,提出了有效温度(Effective Temperature, ET)的概念,首次将湿度考虑进人体热舒适评判标准中^[2]。1962 年, Macpherson 将影响热舒适的因素定义为环境因素和人体因素。其中,环境因素包括空气温度、气流速度、湿度和平均辐射温度;人体因素包括新陈代谢率和衣物热阻^[3]。到了 60 年代末,美国堪萨斯州立大学和丹麦哥本哈根工业大学分别建立了用于人体热感觉研究的气候实验室。随后, Fanger 对美国气候实验室的数据进行处理,提出了著名的人体热平衡方程^[4]。1970 年, Fanger 又通过对 1396 名美国、丹麦受试者的人体产热、散热及热环境投票值进行调查,提出了度量热感觉的尺度指标——平均预测投票值(Predicted Mean Vote, PMV)^[5]。为了反应环境中大多数人的热感觉,他创立了预测不满意率百分数(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)。1971 年, Gagge 等人首次引入皮肤湿润度的概念,在有效温度 ET 上进行修正,得出等效的干球温度即新有效温度 ET^* ^[6]。该指标综合考虑室内空气温度、气体流速、相对湿度对人体热感觉的影响,标志着热舒适评价指标逐渐走向了成熟。

1974 年,美国采暖,制冷与空调工程师协会 ASHRAE 制定了第一套热舒适标准 ASHRAE Standard-55。1984 年,国际标准化组织 ISO 也制定了一套国际通用标准 ISO7730^[7]。之后,这两套标准的内容不断完善,至今仍是国际上使用最为广泛的热舒适标准。1986 年, Gagge 认为应该考虑服装热阻和新陈代谢率对人体热舒适的影响^[8]。因此,他在新有效温度 ET^* 的基础上提出了标准有效温度(Standard Effective Temperature, SET)。2002 年, Fanger 教授经过广泛的调查研究,提出 PMV 的修正模型—PMVe,该模型按照各个国家的地理位置和气候条件,确定 0.5~1.0 的期望因子,将原有 PMV 指标与期望因子相乘,得到修正后的 PMV 指标。在中国,期望因子的值为 0.7^[9]。

我国由于受经济发展的制约,针对建筑热环境与人体热舒适的研究起步较晚。80 年代初,同济大学魏润柏教授最先开始人体热舒适基础理论研究^[10]。1990 年,重庆大学李

百战教授最早提出动态热环境与动态热舒适的概念。他认为外界环境与人体生理、心理处于动态调节关系,人体对室内动态热环境和热舒适的需求应当是热舒适研究领域的重点^[11]。1998年,清华大学赵荣义教授等人分别开展了动态热环境和稳态热环境下人体热舒适的研究,提出了两种条件下人体热感觉模糊综合评价方法。在这之后,赵荣义教授还就热舒适与热感觉做了极具代表性的讨论^[12,13]。2000年,Li和Chan对香港气候和建筑环境进行调研,发现气体流动会对热舒适造成影响。因此,他们利用风速对ET指标进行修正,提出了净有效温度(Net Effective Temperature, NET)^[14]。该指标现已并被香港气象观测中心所采用。

随着热舒适评价指标的不断完善以及研究方法的成熟,学者们开始意识到人体对周围热环境的感知过程非常复杂。以上热舒适性基础理论的建立大多是在人工气候实验室的标准条件下。因为地理位置、气候条件、文化背景、社会发展等诸多因素,这些基础理论对一些地区并不适用。因此,世界各国学者开始采用其他方式,对特定的地区和建筑类型展开研究。

1.2.2 热舒适的研究方法

热舒适相关研究的基本思想是获取物理环境参数和人体生理参数,通过分析两类参数的联系来探究人体对周围环境的生理和心理反应。回顾过去的研究工作,人体热舒适的研究方法可分为实验室研究、现场研究和近来兴起的模拟研究。

1.2.2.1 实验室研究

实验室研究中,研究人员按照实验需求将温度、湿度、风速等环境参数调节至恒定,以创造一种稳态环境。受试者在室内身着规定的服装进行一定水平的活动。实验室研究能够很好地控制对热感觉造成影响的其他变量参数,还能够通过高精度的测量准确分析出热环境参数、服装热阻、活动强度与人体热舒适的关系。因此在很长一段时期内,实验室研究是热舒适研究的核心。现有的热舒适模型、评价指标和标准大部分都是通过实验室研究得出的。但是实验室研究也有自身的局限性,它简化了环境和人体的动态调节关系,忽略了受试者对环境适应性等因素对人体热感觉的影响。

1.2.2.2 现场研究

由于受试者在研究进行中可以进行正常的工作、学习活动，现场研究相比于实验室研究能够更真实、准确地反映建筑环境中人的生理、心理变化和行为表现。现场研究分为两个部分：客观研究和主观研究。

客观研究的主要内容是对建筑室内、外物理环境参数的测定。1962 年 Macpherson 提出了影响热舒适的 6 个因素：空气温度、平均辐射温度、空气流速、相对湿度、新陈代谢率和衣物热阻^[15]。在现场，研究人员选择不同位置、不同高度的测点，分别对空间中干球温度、相对湿度、空气流速和黑球温度进行测量。测量时长少至几天，多至长达一年。使用的仪器包括风速仪、黑球温度计、热球风速仪、干湿球温度计以及配置多种测量探头的热舒适度仪。而对于两个影响人体热舒适的客观因素的调查，就需要在现场测量的同时开展主观研究。

主观研究是现场研究的主要部分，具体形式为问卷调查。其主要目的是收集受试者的背景信息，了解受试者对温度、湿度、风速等环境参数的感觉和主观评价。问卷采用的是描述法，即多项选择法。选项按人体对不同环境参数的反应和期望程度划分，不同的等级对应不同的分值，如 ASHRAE7 级标度、3 级标度。受试者选出最能代表自己感觉和期望的选项。研究人员通过计算得分值对各种抽象的反应进行数学上的分析，最终将研究中主观的感知性结论转化为客观的科学性结论。随着热舒适研究的推进，问卷中问题的设置有了一些改变：早期问卷内容只包括热感觉和对温度偏好的问题，现在还加入了人员对室内空气湿度、空气流通甚至人员密度的感受和期望等相关问题^[16]。如 Mishra 和 Ramgopal 所述，主观研究的灵活性非常大，对于调查对象、问卷数量或调查的持续时间均无特别规定。

关于现场研究所得数据的处理，研究人员通常会计算出平均热感觉投票值 PMV、有效温度 ET 和操作温度 T_o 等指标，一些研究者还会使用线性回归等统计学方法分析主观感受与客观环境参数之间的关系^[17]。最后根据 ISO7730 或 ASHRAE-55 标准，对环境热舒适情况进行评价。在研究现场，包括温度在内的所有环境参数都会随着时间发生改变，研究人员无法准确确定室内环境参数。同时，现场的受试者来自不同的背景，他们的衣物热阻和新陈代谢率无法使用标准值代替，他们的行为、心理也会随着环境的变化而变化。因此，现场研究的结论往往会受到热经历、受教育程度等间接因素影响。

1.2.2.3 模拟研究

随着计算机科学的不断发展,采用新的辅助工具对环境进行模拟较传统方式在准确度、效率、可视度、经济性方面显现出了突出优势。常用的环境模拟工具主要包括三类:建筑全能耗分析工具,用来模拟建筑及系统运行状况的软件如 Energy Plus、DeST 等;能耗与环境影响分析工具,主要用于分析节能措施对环境和经济的影响如 Ecotect 等;室内环境的模拟和预测工具,如计算流体力学(CFD)软件 Phoenics、Fluent、Airpak^[18]。

陈柳枝运用 IES 软件模拟广州某图书馆的运行能耗,同时通过软件预先验证建筑节能改造方案的合理性^[19]。林进鹏运用 Energy Plus 对广州某大学学生宿舍的全年逐时冷负荷、累计冷负荷进行模拟,计算出平均月供冷成本。作者提出在空调高峰使用月份应采用按时间段收取供冷费用,通过增强学生的节能意识减少空调能耗^[20]。近年来,建筑业从强调节能转而注重舒适与健康。除了传统的能耗模拟,大量研究开始运用计算机软件对建筑进行热、湿、风环境等多方面的模拟,在模型基础上进行室内环境和舒适度的评估及优化。

Pradeep Kinia 等人先在最热月(5月)和最冷月(8月)对印度一幢办公楼的一层进行现场测量,后用 Design builder 建立模型,探究不同的建筑围护结构和自然通风措施对该层热环境的影响^[21]。日本 Marahami 则利用 CFD 软件模拟计算了人体在与环境传热、传湿过程中周围环境物理参数的变化,结果表明模拟所得人体周围温度、湿度和气流速度分布与实测真人和暖体假人所得的结果相近。作者因此得出结论:软件模拟结果可靠,可以适用于各类室内环境中人体热感觉的预测^[22]。

1.2.3 热舒适研究的应用

1969年,Auliciem 第一次对校园建筑进行热舒适研究。随后,世界各地学者展开了大量相关研究。英国和加拿大的调查显示学校普遍存在建筑室内热环境参数不达标的问题。在所调查的校园建筑中,室内环境较差的主要原因是缺乏隔热设施,围护结构隔热性能差以及热力系统控制不足^[23]。Buratti 等人选取意大利三个城市,对校园建筑春、秋、冬三季的热环境进行调查。调查发现这三座城市的受试者的实际热感觉投票值(TSV)和预测平均投票值(PMV)的相关程度有很大差别^[24]。这说明热舒适具有特殊性,需要对特定研究对象进行实地研究。

针对夏热冬暖地区, Ruey-Lung Hwang 在对台湾教室的研究中发现: 除空气温度、风速外, 性别也是影响学生热感觉的重要因素。但是相对湿度和室内空气质量对人体热舒适没有太大影响。通过综合新加坡和夏威夷等地的研究结论, 作者提出热感觉处于中性并不意味着受试者的热期望也处在该水平^[25]。在现场研究中, 热期望温度和热中性温度往往存在差异。针对寒冷地区, 王昭俊比较了哈尔滨某高校教室和办公室在不同供暖阶段的热环境和人员的反馈。在各个阶段, 由于供暖温度过高, 室内平均温度都要高于受试者的热中性温度。作者认为如果将室内暖气温度降至热中性温度, 教室和宿舍分别可以节约 10.1%、3.8% 的能源^[26]。

何梅测试了西安 10 所高校的食堂室内环境, 结果显示食堂内湿度和二氧化碳指标均达标, 但室内温度指标在标准范围之外。在主观反馈调查中, 受试者对室内湿度状况较为满意, 但对温度和空气质量并不满意, 其中温度是不满意反馈最多的因素^[27]。张玲玲等人对北京高校食堂进行调查, 针对现场测量中存在的热环境问题, 结合相关标准规范提出有益于提高当地食堂建筑舒适性的设计策略^[28]。李建颖则分析了 12 所不同建造年代、不同使用功能的高校中、小型体育馆的使用特点。结果发现不同着装、不同活动水平的使用者对环境的热舒适要求是不同的^[29]。

事实上, 学生在宿舍内待的时间远远超过在图书馆、教室等公共场所的时间。宿舍室内热环境不仅影响着他们的学习效率, 更是决定了他们的舒适和健康。在很长一段时间内, 学生宿舍的相关研究非常匮乏。是因为近年来接受高等教育的人数逐年增长, 各大高校对宿舍区进行扩建导致宿舍楼的数量增加, 才使得高校学生宿舍的室内热舒适逐渐受到关注。

目前, 学生宿舍的室内环境普遍不能满足学生日益提高的居住需求, 但杨薇、张国强的调查显示受试者可接受的作用温度范围比 ASHRAE 标准规定的舒适区温度范围要宽得多, 这证明了学生对热环境具有适应性^[30]。同济大学的夏博从主观和客观两方面入手, 先探究西安地区高校学生宿舍冬夏两季的热环境状况, 后提出可以通过改善室外微气候、采用被动式的建筑设计和改进管理方法来提升学生的热舒适^[31]。而司凌燕对西安高校宿舍进行的现场调查显示: 学生的热适应性行为与室外气候有明显关系。与改变活动强度、衣物等个人调节手段相比, 他们更喜欢使用门窗、窗帘等设施来调节自身热舒适情况^[32]。

王琳以重庆地区高校学生宿舍为例,运用 DEST-h 模拟出不同宿舍全年逐时自然室温,提出了室内有效实感温度 AT 值的计算式。同时,她还在模型基础上分析了围护结构热工性能、外窗遮阳及室内空气流通对室内热环境的影响^[33]。张启宁以合肥地区某高校宿舍为研究对象,对该校宿舍热环境存在的问题进行分析。他认为宿舍室内热环境较差的原因是:夏季围护结构隔热性能不足、无室外遮阳设施、室内空气流通不好;在冬季,外门窗的气密性不好,冷空气渗入宿舍,学生在室内有吹风感。作者还使用 PKPM 软件对宿舍进行节能改造,模拟计算的结果表明:改造后的宿舍全年能耗量可以满足《安徽省居住建筑节能设计标准》的要求^[34]。

1.3 存在的不足

通过回顾国内外相关研究,本文发现现有的室内热舒适研究存在以下不足:

首先,国内学者大多关注住宅建筑、办公建筑等商业建筑的节能与环境舒适,忽略了公共建筑等其他建筑类型,如校园建筑。从发表的文献数量来看,研究商业建筑的文献大大超过了公共建筑的文献。

其次,开展人体热舒适和室内热环境方面研究的地区有很多,但对特殊气候区如温和地区、夏热冬暖地区的相关研究还不充分。就深圳而言,该地区未划分在集中供暖区域内,冬季气候一直以温暖著称。因此外界一直认为该地区冬季没有热舒适问题,针对冬季的热环境和人体舒适性的研究也就寥寥无几。

最后,计算机数值模拟在热舒适研究领域的应用还不够普及。建筑的建设属于不可逆的过程,而计算机数值模拟具有精准控制、分阶段模拟、预先处理等特点。研究人员可以运用辅助工具模拟既有建筑的物理环境及人体生理、心理反馈,提出优化设计方案。通过对比不同方案下的建筑环境,构建出特定条件下相对舒适的室内热环境,从而高效地对既有建筑进行改进。

综上所述,夏热冬暖地区热舒适研究的空白还有很多。未来可以针对冬季热舒适现场研究、人们的适应性行为、心理期望、适用于该地区的人体热舒适改进方案等进行更进一步的探索。

1.4 本文研究

1.4.1 研究目的与意义

宿舍作为学生生活、学习的主要场所，是高校建设过程中一种重要的建筑类型。近年来，社会不断发展，人们生活水平不断提高。学生和家长对高校学生宿舍室内环境也有了更高的要求。由于生理条件、心理状态、成长环境以及日常生活习惯的差异，不同学生在同一个环境条件下也可能有不同的热感觉。因此，开展宿舍室内热环境的研究具有现实意义。

基于对现有研究的分析，本文选取深圳大学宿舍为例，从现场测量、主观问卷调查、计算机模拟三个方面探究该地学生冬季热舒适。目的是了解学生对冬季宿舍室内热环境状况满意度，同时分析实际测量到的和人体实际感受到的热环境之间的关系。通过验证室内人员增暖手段的调节效果，探究如何在不改变建筑本身结构的情况下，为夏热冬暖地区的学生们提供舒适的室内环境。

在解决了上述问题的基础上，本文不仅客观地评价了夏热冬暖地区冬季宿舍室内的热环境，还运用计算机软件模拟普遍的适应性行为，分析这些行为对热舒适的实际影响效果。最终为营造及调控舒适的室内热环境，制定适应当地宿舍类建筑的热舒适标准提供建议。

1.4.2 研究内容

（1）热舒适研究的现实意义

通过对现有研究进行总结，得出研究夏热冬暖地区冬季室内热环境及人体热舒适的必要性，并进一步确定研究目标和研究方式；

（2）室内热环境

选取有代表性的宿舍进行现场测量，对比不同楼层、不同测点高度下的物理环境参数，从而对夏热冬暖地区冬季宿舍室内热环境进行评价；

（3）人体热感觉

通过对问卷调查得到的信息进行处理，分析受试者对冬季宿舍室内温度、湿度、风速、室内空气质量等参数的满意程度以及期望。并且分析受试者满意程度与期望的相关性；

(4) 适应性行为

收集受试者针对冬季宿舍内热环境的适应性行为，如穿着衣物情况、采用的采暖设备、增暖措施和在宿舍内的活动情况等；

(5) 热舒适的影响因素

运用 Airpak 建立宿舍模型，通过改变模型参数设置对日常适应性行为进行量化，对比环境参数及热舒适评价指标的变化，为当地学生提高室内热舒适提出合理建议。

1.4.3 研究方法

(1) 查找并归纳相关文献

通过查阅国内外会议、期刊、相关课题、学位论文、书籍、规范等大量资料，本文以相关的理论知识和研究成果为基础，总结热舒适的国内外发展状况，确保选题的合理性、可行性及研究成果的指导意义。

(2) 实地调研

收集深圳地区往年气候数据和近日逐时气象数据，调查深圳大学宿舍楼建筑状况。对校内部分宿舍楼进行走访，选取有代表性的宿舍作为研究对象。

(3) 现场研究

对被研究宿舍进行现场测量和主观问卷调查。使用 JT-IAQ-50 对室内的空气温度、相对湿度、风速、黑球温度进行测量，同时向宿舍内人员发放问卷，收集他们对热环境的感受与期望。通过对主、客观结果进行对比，总结室内热环境存在的问题及其原因。

(4) 统计分析

运用统计学对问卷调查结果进行处理。先对单独变量做出初步统计，再按照假设对各个变量之间的关系进行分析。最后将问卷结果与实测结果情况进行对比，得出室内热环境参数和人体热舒适的关联。

(5) 计算机模拟

选取现场的一间标准宿舍，用 Airpak 建立房间模型，初步模拟测量时段的热舒适情况。将模拟所得数据与实际测量数据进行对比，差值满足要求方可验证模型可行。根据现场研究所得结果，在原有模型基础上改变设计因素或模拟开窗、开门等人体适应性行为，通过对比参数改变前后模型的输出结果，分析各项因素对热舒适的影响。

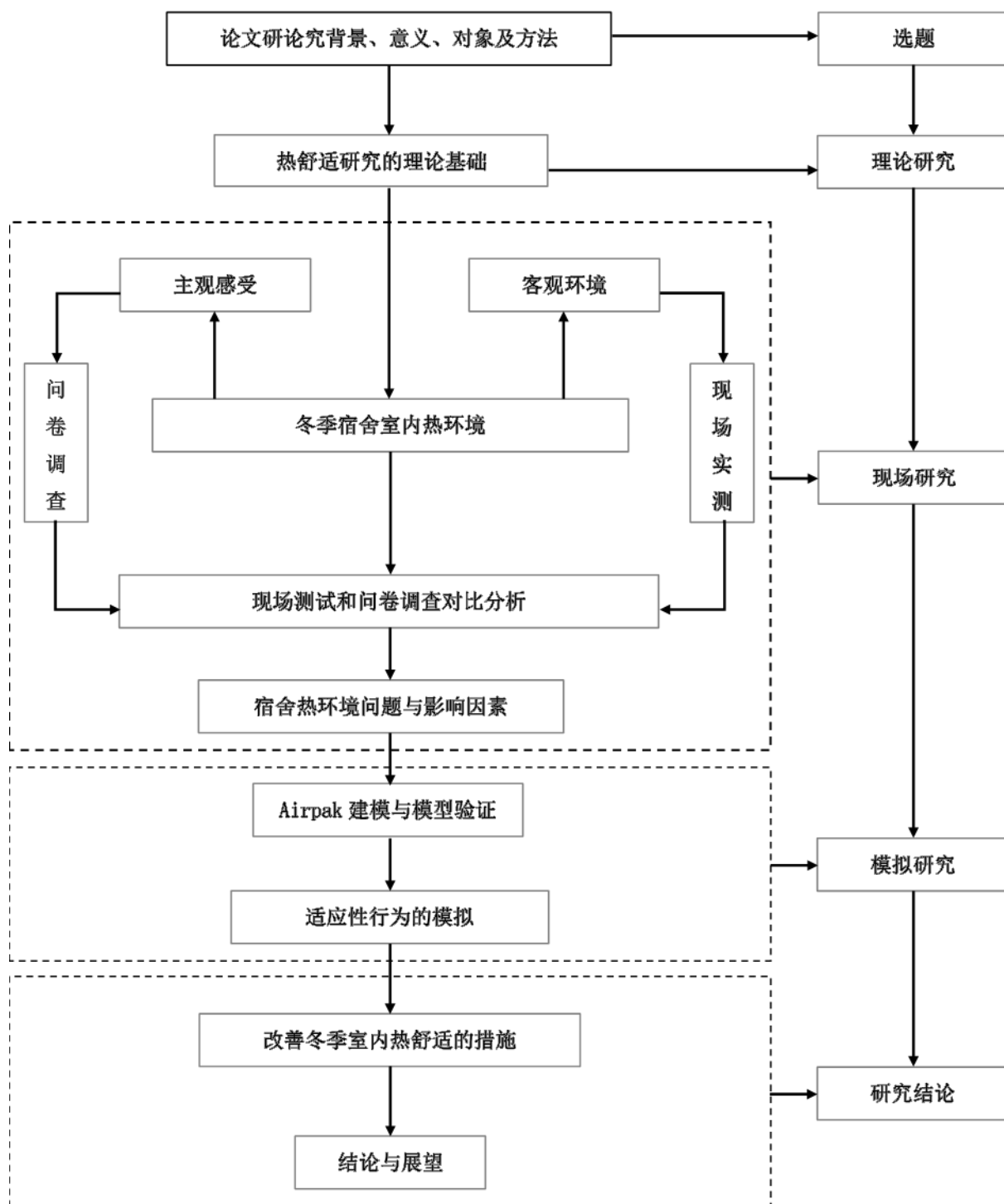
1.4.4 创新点

（1）研究内容创新：率先对夏热冬暖地区冬季室内热环境进行调查，总结出该地冬季宿舍内引起热不舒适的因素。通过对比宿舍内人员实际反馈和现场测量值，本文为客观评价宿舍冬季室内热环境提供了指导。

（2）研究方法创新：率先使用 Airpak 对深圳地区宿舍室内热环境进行模拟，在模型基础上对开门、开窗等适应性行为进行量化，探究其对环境参数和热舒适的影响。

本文为今后夏热冬暖地区宿舍内人员采取的增暖措施提供了一定的建议，具有一定的创新性。

1.4.5 研究框架



第2章 热舒适研究的理论基础

2.1 热舒适模型

热舒适的概念最早是由英国医生 Blagden 在 1774 年提出的^[35]。ASHRAE55-92 将热舒适定义为“人们对热环境表示满意的意识状态”^[36]。为了弄清楚如何为居住者提供舒适的环境，研究人员一直致力于开发可以根据给定条件或因素来表示人体热感受的经验模型。目前，热舒适评价主要以两种模型为基础：一种是基于实验室研究的热平衡模型，一种是基于现场研究的适应性模型。这两种模型都得到了大量学者和相关研究的支持。

2.1.1 PMV 模型

PMV 模型基于 Fanger 教授在进行大量实验室研究后建立的热平衡方程。该方程的核心是人体产生热量，在与环境进行热量交换的过程中通过排出体液失去热量。人体的热舒适取决于从人体流出和流向人体的热量取得平衡。模型将人体热舒适视为一种生理和心理的现象，而人体热感觉作为人体与外界环境交换的结果，由六个变量共同决定：新陈代谢率，衣物热阻，空气温度，平均辐射温度，空气流速和相对湿度。PMV 模型仅考虑衣物热阻和人体代谢，省略了性别、年龄和体重等其他个体因素，因此更适用于稳态环境^[37]。这种模型是 ISO7730 和 ASHRAE-55 的理论基础，也是现有研究中是使用最广泛的模型。本文使用 PMV 模型对宿舍内热环境进行评价

2.1.2 适应性模型

1998 年，De Dear 和 Brager 提出了 PMV 模型^[38]。模型假设人们有意识或无意识地对他们所处的热环境做出反应。人们通过改变他们的衣物、姿势和活动来适应他们周围的环境，或者通过调节窗户和控制空调制冷、制热等操作使热环境满足当前的需求。通过这些适应性调节方式，人们与周围环境处于动态平衡状态^[39]。模型中唯一的自变量是室外气温，这意味着该环境变量是决定人体热舒适的主要因素。研究者通常试图找出舒适的室内温度和基于现场研究得出的室外温度之间的线性关系^[40]。最近，有学者运用适应性理论从适应性方法的角度解释了居住者在不同环境特别是自然通风建筑物中的热舒适。现在，有两种适应性模型评价标准：由 De Dear、Brager 一起提出 ASHRAE-55 适应性模型和 Nicol、Humphrey 提出的 EN15251 适应性模型^[41]。

2.2 人体热舒适的影响因素

2.2.1 环境因素

2.2.1.1 空气温度

在热舒适研究中,空气温度指的是无阳光照射下周围空气的温度,通常用室内干球温度表示。它通过直接影响人体的对流和辐射热交换,给人以冷、热的感觉,是最重要的热环境评价指标。相关组织推荐室内最适宜的温度在 $20^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ 。如果室内环境过冷,人体的四肢灵活性会降低,末端如手指、耳朵会出现疼痛感;如果室内环境过热,人体内酶的活性下降,活动会受到影响。在空调环境下,冬季温度应设置为 $16^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$,夏季温度应设置为 $24^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$,这样可以用比较小的能耗达到热舒适。

同时,温度的水平和垂直分布对热环境有很重要的影响。由于冷空气密度大,大多数空间内的上部温度比下部温度要高。按照头部距地 1.1m、腹部距地 0.6m、脚踝距地 0.1m 来算,头部与脚踝周围温度不同即为垂直温差。垂直温差越大,人体就越容易感到不舒适。而水平温差会造成“吹风感”,此部分将在后文进行介绍。按规定,房间内各个区域的水平温差应小于 10°C ,垂直温差应小于 3°C 。

2.2.1.2 平均辐射温度

在实际情况下,天花板、四周墙面、门窗、桌椅等物体表面都有温度。因此,除了考虑人体和周围空气的对流热交换,还需要考虑这些物体表面温度对人体的辐射散热。平均辐射温度是指与人体和周围环境产生相同热量交换的假想等温围合面的表面温度值,相当于室内各物体表面温度的平均值。自然状态下,室内空间的表面对人体的辐射散热并不均匀。例如在有阳光照射的房间里,由于窗额保温性能较差,坐在窗边的人会明显感受到来自窗的热辐射;夏季空调房间里,空调附近的人能感受到空调输送的凉意。室内不对称辐射过大会让室内人员有热不舒适感。在现场研究中,平均辐射温度代表人体的体感温度。因此,平均热辐射温度是影响人体热舒适的一个很重要的因素。

当空气温度 T_a 与平均辐射温度 T_r 差距不大时,研究人员会使用黑球温度计测得黑球温度,并对其进行换算。黑球温度 (T_g) 是将温度计放置在直径 15cm 的黑色空心球中测得的温度。换算公式如下:

$$\bar{T}_r = T_g + 2.4v^{0.5}(T_g - T_a) \quad (1)$$

2.2.1.3 相对湿度

相对湿度 RH 是空气中实际水蒸气压力与已知温度下空气所含的最大水蒸气压力之比。对于室内空间，空气相对湿度取决于空气温度和空气中水蒸气的含量，这些水蒸气来源于外界各种水面、植物以及其他载水体的蒸发。空气湿度的增加不改变人体的实际散热量，因此在代谢率一定的时候不会提高人体核心温度和出汗量。但由于体表与外界湿度差变小，单位表面积的蒸发换热量降低导致蒸发换热表面积增大，皮肤“黏着性”增大。通俗来讲，人们会感觉身上“黏黏的”。这也是南方湿热地区夏季产生热不舒适的重要原因。在许多研究中，相对湿度还被认为会影响内空气质量、居住者的健康和能量消耗^[42]。在高温环境或瞬态环境下，若人体的新陈代谢率也处在高水平，相对湿度还会对人体的热平衡有很大影响^[43]。

对于一般的房间而言，室内湿度的分布比较均匀，测量时只需要选择房间内一个测点，其结果就能代表室内整体相对湿度水平。人体感到舒适的相对湿度范围为 30-60%。湿度过低，会导致人体皮肤和粘膜干燥，呼吸不顺畅；而湿度过高则会容易滋生细菌，引起皮疹等疾病。已有研究证明室内相对湿度高于 70% 会引起人体的热不舒适^[44]。

2.2.1.4 气流速度

气流速度是空气经过单位距离的速率。空气流动本身包括了气流速度、角度、频率等诸多因素。因为气流速度会直接影响人体皮肤表面与周围环境的热量交换和水分蒸发，研究人员将其列入热舒适的评价指标中。

空气流动引起的最常见的室内环境问题是吹风感。吹风感是“人体所不希望的局部降温”。当人处于热中性状态，吹风感可以带来愉悦的感觉；当人处于过热状态是，吹风还可以帮助人体散热，有助于改善热舒适。但过大的气流速度也会使人有压力感和烦扰感。尤其是当人体处于偏冷环境时，吹风会使人“冷颤”。

随着温度的变化令人感到舒适的风速也会变化。有研究显示，人体在高气流速度、高温环境下的舒适程度与在低气流速度、低温的环境下一样。因此，合理增加室内气流速度可以在一定程度上提高环境舒适温度的上限。一般情况下，室内空气流速应该小于 0.3m/s，相当于周围空气处于自然对流，最大不应大于 1m/s。当室内最大风速控制在

0.7m/s 内时,人最容易感到舒适。总体而言,良好的气流组织不仅可以帮助人们达到热舒适的状态,还可以帮助更新室内空气,提高空气质量。

2.2.2 个人因素

2.2.2.1 新陈代谢率

生物进行生命活动的基本特征是进行新陈代谢,活动强度的高低即为新陈代谢率。新陈代谢率是在给定的时间段内人体的净热量产出,也称体内有氧和无氧活动的化学能、机械功的转化率。代谢率单位是 met, $1\text{met}=58.2\text{W/m}^2$ 。人体活动水平越高,新陈代谢率越高。理论上,人体新陈代谢率还会随外界温度的变化而变化,外界温度越高代谢率越高。在一般情况下,一定温度范围内人体代谢率的波动幅度不大。

Goto 等人认为“人体新陈代谢水平可能是所有影响室内热感觉、舒适度和温度偏好的参数中最不被充分描述的参数”^[44]。在稳定状态下,代谢热量可由氧气消耗量推算,即计算通风空气的速率和吸入空气与呼出气体之间的浓度差异。由于在现场研究中代谢率的测算比较复杂,热舒适研究中常常根据受试者活动以固定值代替。

2.2.2.2 衣物热阻

外界环境的温度变化幅度大,但人体对自身体温的调节范围有限。衣服在人体与外界热交换时可以起到保温和阻碍湿扩散的作用,是人的“第二层皮肤”。衣物热阻或服装水平是服装本身的显热热阻,单位为 $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ 或 clo。两个单位的转换式为: $1\text{clo} = 0.155\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ 。

衣物热阻由衣服材料、厚度、件数、式样、合适体型情况等决定。1clo 是人体在空气温度为 21°C 、气流速度小于 0.05m/s 、相对湿度小于 50%的环境中静坐着感到舒适时所穿着的衣物的热阻^[45]。ASHRAE-55 推荐冬季衣物热阻为 0.9clo 、夏季衣物热阻为 0.5clo 。由于现场受试者衣物各不相同,单独测量他们的衣服热阻是一个耗时且复杂的过程。研究人员通常使用专门实验室测得的标准衣物热阻值表格对单件衣物进行估算。总体衣物热阻值按照 Olsen 求和公式计算:

$$I_{cl} = \sum_i I_{clu,i} \quad (2)$$

其中 I_{cl} 是整体服装热阻, $I_{clu,i}$ 是单件有效保暖衣物 i 的服装热阻。

2.2.3 其他因素

热舒适除了受到上述的因素影响，还受到心理、年龄、性别、地区等其他因素影响。

(1) 心理因素

人并不是简单的热环境的受体，人们会凭借过往的热经历对环境的冷热程度进行预估。中性温度是理论上人感到不冷不热的温度，由现场测量数据推算而来。期望温度是人们认为感到最舒适的温度，一般由客观研究所得。在热舒适研究中，热中性温度往往与期望温度存在差异，即热感觉中性不等于热舒适。G.E Sciller 所做的一项调查显示：冬季中性温度低于夏季中性温度，两者分别为 22°C 、 22.6°C 。1955 年在香港，研究人员测得夏季中性温度为 23.5°C ，期望温度低于中性温度 1°C ；冬季中性温度为 21.5°C ，期望温度低于中性温度 1.7°C 。这符合一些研究提出的结论：已经对环境做好心理准备的人对该环境的期望会变低，因此也更容易达到热舒适状态，这也说明了人的心理对于热舒适的影响不容忽视。

(2) 年龄、性别

Fanger 在验证老年人是否适用于热舒适模型时得出：尽管老年人的活动水平和基础代谢率较低，但年轻人和老年人对热环境的感知没有差异^[46]。在稳定和瞬态的温度条件下，Schellen 等人发现老年人（67-73 岁）的末端血管收缩比年轻人（20-25 岁）更多^[47]。这也就解释了为什么老年人更倾向于较为温暖的环境而年轻人更喜欢较为凉爽的环境。

考虑到热感觉在性别之间的差异，Katafygiotou 和 Serghides 在不同季节对中学的教室和实验室进行了调查。他们发现在冬季，女孩对低温更加敏感，因此会更频繁地使用采暖设备。在夏季，男孩对高温更敏感，体感温度高于女生^[48]。一些对成年男性、女性的研究也证实了此结论^[49]。总体而言，在同一环境下，女士对热环境的满意程度低于男性，对热和冷不舒适的敏感程度高于男士。研究人员将这种性别差异归因于他们新陈代谢的特征和皮肤表面散热的不同。

一项在自然通风的住宅建筑中进行的研究表明：与环境变量的影响相比，性别和年龄对热舒适的影响可以忽略不计^[50]。

(3) 地区

很多学者在不同地区开展了热舒适研究，印证了热舒适与各个国家、气候区人们的生活习性相关。湿热地区的气候温润，温度很少低于 17°C 。居住在那里的人已经习惯了当地的温度，他们感到满意的温度通常要比寒冷地区的人更高一些。对于长时间在严寒

或寒冷地区的人们，冬季室外温度过低，国家会对室内进行统一供暖。而夏热冬冷地区由于室外温度没那么低，室内无供暖。他们冬季对寒冷的抵抗能力反而要比寒冷地区的人们要强。再如，城市居民习惯使用空调、暖气来调节室内环境，他们的耐寒、耐热能力就会弱于相邻的农村地区。1991 年，Tao peter 对美国州立大学的当地学生和中国留学生进行了热环境生理反应对比实验。他发现中国受试者对冷环境的抵抗能力不如美国受试者，普遍穿的衣服更多。但中国受试者的皮肤温度相对更低，出汗少，因此对较热环境有更强的承受能力^[51]。

2.3 热舒适的主要评价指标

2.3.1 PMV-PPD

PMV 指标将身体视为一个整体，综合考虑了四个物理参数和两个个人参数，利用 Fanger 热平衡方程对环境热舒适度进行计算^[52]。它可以用来预测空间中绝大多数人的平均热感觉，是适用于稳态环境的最权威、最具代表性的热舒适预测指标。PMV 计算指标的公式为：

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - P_a] - \\ & 0.42(M - W - 58.2) - 0.0173M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} \\ & + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_{cl}(t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 M——人体能量代谢率，决定人体的活动量大小，W/m²；

W——人体所做的机械功，W/m²；

P_a——水蒸气分压力，KPa；

f_{cl}——服装面积系数，%；

h_{cl}——对流换热系数，W/(m²·KPa)；

t_{cl}——服装外表面温度，℃；

t_a——人体周围空气温度，℃；

t_r——环境的平均辐射温度，℃^[53]；

PMV 指标同样采用了七级分度，见表：

表 1 PMV 热感觉标尺

热感觉	很热	热	有点热	中性	有点冷	冷	很冷
PMV 值	3	2	1	0	-1	-2	-3

PMV 的理论依据是当人体处于稳态的热环境下, 人体的热负荷越大, 人体偏离热舒适的状态就越远。即人体热负荷正值越大, 人就觉得越热, 负值越大, 人就觉得越冷。但是由于心理、生理状态的不同, 每个人即使在同一热环境下也可能有截然不同的感受。预测不满意百分比 PPD 则是 Fanger 在 PMV 的基础上提出的代表所有人对热环境满意程度指标, 该指标定义为人群中对热环境不满意的百分数。PMV 与 PPD 之间的定量关系如下:

$$PPD = 100 - 95\exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (4)$$

当 PMV=0 时, PPD=5%, 这意味着仍有 5% 的人对处在最佳状态的室内热环境感到不满。国际热舒适标准 ISO7730 对 PMV-PPD 指标的推荐值为-0.5~+0.5, 在此区间内人群中对环境感到不满意的人数为 10%^[53]。

2.3.2 操作温度 t_o

操作温度 (Operative Temperature, t_o) 综合衡量了人体与周围空气和房间内壁面的热量交换对人体热感觉的影响。它是空气温度 t_a 和平均辐射温度 t_r 对各自换热系数的加权平均值。操作温度计算简单, 当样本数量一定时更具统计意义^[54]。De dear 和 Brager 推荐全球热舒适数据库采用操作温度作为热舒适评价指标。但由于它忽略了空气流速和相对湿度对人体热舒适的影响, 更适用于相对湿度不高且空气流速较低的环境。在非高温情况下, 默认空气温度等于操作温度。因此, 研究中常用空气温度代替操作温度进行热舒适评价。

2.3.3 有效温度 ET、新有效温度 ET*、标准有效温度 SET

有效温度 ET 的定义是 “干球温度、相对湿度、空气流速对人体热感或冷感影响的合数值”。其在数值上等效于产生相同热感觉的静止饱和空气的温度^[55]。由于 ET 高估了湿度在低温环境下对热舒适的影响, 近几年研究都用新有效温度 ET*代替。ET*在 ET 的基础上包含了皮肤湿润度的概念, 这个概念是 Gagge 等对处在流速 0.15m/s 空气中身着标准着装的静坐的人进行热舒适实验得到的。同样着装和活动的人, 在环境中的冷热感与在相对湿度为 50% 的空气环境中的冷热感相同, 则后者所处环境的空气干球温度就是前者的 ET*。该指标能更真实地反应人们的实际热感觉, 但只适用于对低风速的环境下着装轻薄、活动量小的人体的热舒适评价。

此后不久,由于需要考虑活动水平和衣物热阻,新有效温度 ET^* 在原有基础上加入了皮肤温度和皮肤湿润度,形成标准有效温度 SET。标准有效温度虽然被称为最合理的评价指标。但是,由于指标中皮肤湿润度和皮肤温度的计算复杂,其应用远不如新有效温度 ET^* 来得广泛。

2.4 热舒适评价标准

随着热舒适领域的不断发展,全球许多国家都开展了当地热舒适的研究,一些国际组织也制定了相应的广泛适用的热舒适评价标准。如美国采暖通风空调工程师协会 (ASHRAE) 制定的 ASHRAE-55、中国建筑科学研究院制定的 GB/T50785、英国皇家特许建筑设备工程师协会 (CIBSE) 制定的 CIBSE Guide 以及国际标准组织 ISO 制定的 ISO7730^[56]。目前,国际公认的用于预测和评价室内热环境和舒适程度的标准是 ASHRAE-55 和 ISO7730^[58]。

2.4.1 ASHRAE-55

ASHRAE-55 标准规定当室内温度一定时,室内 80% 的人对当前温度下的热环境感到满意,则该室内温度就是人体感到舒适的温度。标准适用条件是人员处于坐姿,从事轻体力活动即新陈代谢率 $M \leq 1.2$ 。人员的衣物热阻为夏季 0.5clo,冬季 0.9clo。标准使用新有效温度 ET^* 来表示热舒适温度范围:冬季舒适区温度范围为 23~26℃ 之间;夏季 ET^* 在 23~26℃ 之间,平均风速 $v=0.25\text{m/s}$ 。由于人体颈部和脚踝度对温度的敏感度较高,垂直温差过大可能会引起人体对热环境的不舒适感。因此,ASHRAE-55 额外规定头颈部 (高度 1.1m 处) 和脚踝部 (高度 0.1m 处) 的垂直温度差在 3℃ 以内。同时,水平方向不对称辐射温差应在 10℃ 以内,地板表面温度应控制在 18~29℃ 范围内^[18]。

2.4.2 ISO7730

ISO7730 标准与 ASHRAE 标准类似,适用于坐姿且从事轻体力活动的人的热舒适评价。ISO7730 用操作温度 t_o 来表示舒适温度的范围。标准规定冬季服装热阻为 0.9clo 时,室内舒适温度范围为 t_o 在 20~24℃ 之间,平均风速小于 0.15m/s。同时,水平方向不对称辐射温差不大于 10℃,垂直方向不对称辐射温差不大于 5℃。夏季服装热阻为 0.5clo

时,室内舒适温度范围为 t_o 在 23~26℃,平均风速小于 0.25m/s。针对冬夏两季,室内相对湿度应在 30%~70%之间,垂直温差在 3℃之内^[57]。

2.5 本章小结

本章首先介绍了支持热舒适研究的两类模型。然后从环境因素、个人因素和其他因素三个方面入手,详细描述了影响室内热舒适的因素。接着总结了几种主要的热舒适评价指标,包括它们综合考虑了几种影响因素、适用条件及计算方式。最后,总结了国际上常用的热舒适评价标准。对预测和评价室内热环境方法作了比较全面的归纳。

第3章 宿舍冬季室内热舒适研究

3.1 夏热冬暖地区宿舍概况

3.1.1 气候概况

深圳位于北回归线以南,坐标为东经 $113^{\circ} 46'$ 至 $114^{\circ} 37'$, 北纬 $22^{\circ} 27'$ 至 $22^{\circ} 52'$, 多面环海: 东与大亚湾和大鹏湾相邻; 西与珠江口和伶仃洋相接; 辽阔海域连接南海及太平洋。深圳属于亚热带季风气候, 气候温和。气候特点为长夏短冬, 夏季长达 6 个多月 (夏季平均长达 196 天); 常年温度较高, 年平均气温 23.0°C ; 相对湿度较大, 日照充沛, 雨量充足, 年平均日照时数为 1837.6h, 年平均降水量为 1935.8mm。

我国幅员辽阔, 各地气候差异悬殊, 不同的地理位置对建筑的设计有不同的要求。从建筑热工设计的角度, 我国按照各地气候特点将全国划分为五个主气候区: 严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区。《建筑气候区划标准》在此基础上细化了热工分区, 以热惰性值将主气候区再分为若干个二级区域, 对应不同的设计指标。按照气候区划分, 深圳属于夏热冬暖 B 区即 4B 地区。该地区设计指标强调自然通风、遮阳设计, 围护结构需满足隔热要求, 可不考虑保温设计。根据《深圳市气候公报》, 深圳 2018 年中 7 月平均气温最高, 平均为 28.9°C , 1 月平均气温最低, 平均为 15.4°C 。冬季雨水稀少, 部分年份会出现秋冬连旱, 寒潮、低温霜冻。按深圳气象四季划分标准, 平均 1 月 13 日入冬。本文着眼于冬季热舒适, 考虑到诸多因素, 研究时间选择在一月上旬。

3.1.2 建筑概况

深圳大学建校时间为 1983 年, 是一个年轻、快速发展的学校。截止目前, 深圳大学主校区共有 48 幢宿舍, 分布在西南、南区和斋区三个片区, 其中斋区 11 栋, 南区 4 栋, 西南区 33 栋。其中有部分老式宿舍楼建于 80~90 年代, 层数多为 6~8 层, 其容量已经不能与急剧增长的学生数量相匹配。学校为了给同学们提供宽敞、舒适的生活环境, 现已拆除多幢老式建筑, 在原地建立高层宿舍住宅楼。可见, 随着国内高校大规模招生浪潮的出现, 高层宿舍楼已经成为一个必然的趋势。

高层宿舍楼高度差异大, 处在不同楼层的宿舍可能有不同的热环境。只有对首层、中间层、顶层分别进行调查, 才能全面地评估宿舍楼的热环境。为了消除学生学历、专

业、性别等其他因素对宿舍室内热舒适的影响，本文在西南区、南区、斋区各选取一栋高层学生宿舍进行调查。其中西南区乔梧阁是女生宿舍，居住者为本科生；南区秋瑟是男生宿舍，居住者为本科生；斋区 2#楼是混住宿舍（5 层为男生，5 层为女生），居住者为硕士生。每栋楼从首层、中间层、顶层各选取一间宿舍进行现场测量。所选宿舍具体情况如下：

表 2 被测宿舍情况统计

宿舍编号	楼名	所处楼层	朝向	设计使用人数	投入使用时间	天气	气温(℃)	室外湿度(%)
1	乔梧阁	首层	东	5	2014	阴	15~18	70-90
2		中间层	北					
3		顶层	北					
4	秋瑟	首层	西	4	2011	阴	15-20	65-95
5		中间层	北					
6		顶层	南					
7	2#楼	首层	北	5	2018	阴	17-21	70-90
8		中间层	南					
9		顶层	北					

3.2 宿舍热舒适现场研究

3.2.1 现场测量

3.2.1.1 仪器选择

测量仪器选择建通公司的 JT-IAQ-50 室内热舒适度与空气质量测试仪（如图）。这台仪器质量轻、操作方便、续航久、运行稳定，有对外接口，且能够一次性测量多个用于评估热舒适度的参数，非常适用于建筑中各类场合环境参数的长期监测。仪器图及仪器精度如下：

表 3 仪器精度

测量参数	测量范围	测量精度
湿球温度	5~60℃	±0.5℃
黑球温度	-20~120℃	±0.6℃
空气温度	-20~120℃	±0.5℃
微 风 速	0.05~2m/s	±(0.03m/s+2%读数)
相对湿度	0-100%	±1.5%RH
CO2	0-5000ppm	±30ppm

本研究使用测量仪来测量空气温度、黑球温度、相对湿度、空气流速和 CO_2 浓度。测试人员根据被调查宿舍内人员的衣着和活动情况输入衣物热阻和新陈代谢率参数，仪器会自动算出不满意百分比（PPD）和热感觉预测平均值（PMV）。



(a)



(b)

图 1 仪器图

3.2.1.2 测量方案

测量时间选在一月初期，深圳地区刚进入冬季，学校也正值寒假前夕。因为期末考试密集，同学们大多在宿舍复习，宿舍人员集中率高，正是调查冬季热舒适最适宜的时候。

测量持续时长为一周，共分为两个阶段：第一阶段为间断式测量，从早晨 8 点 30 分开始到晚上 10 点 30 分 3 个时段进行测量，分别是早上 9:00-11:30，下午 15:00-17:30，晚上 19:30-22:00，每个宿舍时间总测量时间为 30 分钟。由于仪器有一定噪声，为防止实验的进行打扰同学们的正常休息，故在同学们午间和晚上睡觉时不进行测量。第二阶

段为连续监测，每栋楼选取中间层宿舍进行 15 小时连续测量，持续时间从早上 8:00 到晚上 11:00。

因为所测宿舍均为长方形，测点设置在宿舍的正中央。为考虑室内不同水平高度对环境参数的影响，间断式测量分别在该测点位置高度 0.1m、0.6m 和 1.1m 处进行，相当于人体坐立时脚踝、腹部、头颈部的高度。每一高度持续 10 分钟。连续测量测点同前，测量高度选取 1.1m。同一栋宿舍测量顺序为顶层-中间层-首层。

现场调查小组共由 5 人组成，每次测量由两人完成，其中一个人负责测量室内的热环境参数包括改变仪器高度、控制测量时间等，另一个人负责分发、收集问卷调查并指导受试者填写。



图 2 测量现场

3.2.2 问卷调查

由于场地以及实验条件有限，本文采用问卷调查的方式，围绕人体热舒适设置问题，调查人体对影响热舒适的各个参数的主观感受，以直观地得到受试者对于室内热舒适的评价^[41,45]。

3.2.2.1 调查问卷设计

问卷调查的主要对象为居住在乔梧阁、秋瑟、2#楼的学生，问卷调查地点为楼内各个宿舍。由于互联网的发展，线上问卷的出现使得数据的收集和处理变得更为便捷。本文的问卷调查采用了线上和线下相结合的方式，现场测量的宿舍使用纸质问卷，其余宿舍使用电子问卷。本次研究共收集问卷 269 份，回收率 87%，其中有效问卷 231 份。为

为了避免其他因素对受试者的主观感觉造成影响，选择的受试者在填写问卷时和填写前 30min 未就餐、未进行剧烈运动。问卷内容主要包括背景信息、对热环境的评价和行为活动三个部分^[58]：

（1）背景信息

所调查信息包括性别、学历、宿舍楼、家乡所在地（省/自治区/直辖市）、在深圳的居住年限、在宿舍所处位置等。在衣着部分，问卷设置了多种冬季常穿衣物选项，由受访者按照在宿舍里的实际穿着情况进行勾选。

（2）对热环境的评价

问卷设置了热感觉、热期望、吹风感、吹风期望、湿感觉、空气质量满意度、总体满意程度共 8 个问题来收集受试者的主观评价。室内热感觉、室内湿感觉、室内吹风感和总体热可接受度均使用 ASHRAE 7 级指标(-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3)表示，热期望、湿期望、吹风期望采用 3 级指标(-1, 0, +1)表示。

（3）行为活动

该部分包括人员在宿舍的日常活动情况和热环境相关的适应性行为如开窗情况、采暖设施使用情况以及增暖措施。

3.2.2.2 数据检验

本文使用概率统计方法来分析处理问卷数据。为了保证数据可有效用于研究，需要对调查问卷得到的数据进行预先处理。数据预先处理包括编码、录入、编辑和检验。首先将所有问卷集合在一起，对每份问卷进行独立编码，在此期间排除明显无效问卷。随后将有效问卷录入到线上。接着对线上所有数据进一步分析，进行二次筛选。这一步骤的目的是保证数据具有完整性、准确性和可靠性^[59]：

（1）完整性

完整性即数据的完整性。在发纸质问卷时，受试者最容易出现漏填宿舍楼名和房号现象。研究人员需要对受试者进行指导，检查调查表中的每一题是否填写正确，在数据统计时剔除信息不全的问卷。

（2）准确性

准确性即数据是否可用于研究调查，数据计算过程是否正确，得出结果是否符合客观实际。本研究在正式开展调查问卷之前，先预发放了 30 份问卷，根据这 30 位受试者

的反馈对问卷的题目设置进行调整，并对一些专业名词进行注释。而后研究人员对这些预先发放的问卷进行统计，看结果是否基本符合预期。

(3) 可靠性

本研究通过对比正式发放的问卷和预先发放的问卷取得的结果是否基本一致完成可靠性检验。在后期数据分析时，观察数据趋势、分析变量之间的相关性，如观察热期望是否随热感觉的变化而变化，是变大还是变小。因为这是在间隔不长的时间段内进行的两次完全相同的调查，如果通过了重复试验以及统计检验，即可鉴定数据是可靠的。

3.2.2.3 基本信息统计

本次参与问卷调查的同学的基本信息统计如下：

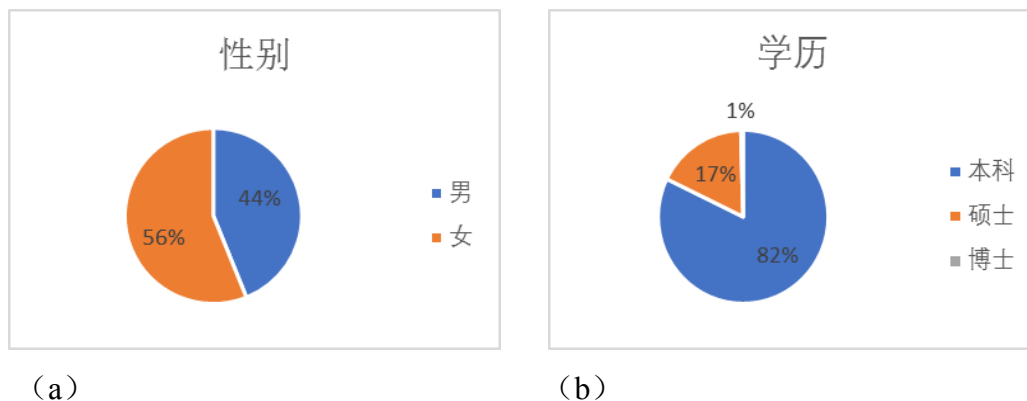


图 3 受试者的性别与学历

本次问卷调查研究对象都是深圳大学的在校学生，年龄 18 至 25 岁。从图中可以看出，样本分布基本符合深圳大学全体学生分布情况：男女比例接近 1:1，女生略多于男生；本科生和研究生人数接近 5:1。

图 4 显示来自南方受试者占比高达 79%。深圳市是一个移民城市，本地居民中有相当一部分人是从外地移民过来。本研究充分考虑了这种情况，加设在深圳生活多少年的问题。20%的受试者为在深生活超过 4 年，说明这类受试者在来深大求学前已有多年在深圳生活的经历，能够适应当地的气候，研究他们的热舒适时应该考虑到这点。

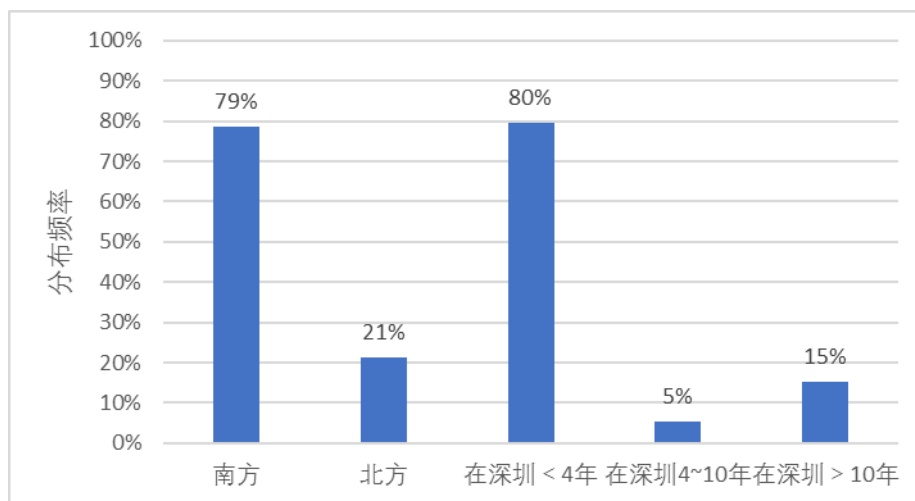
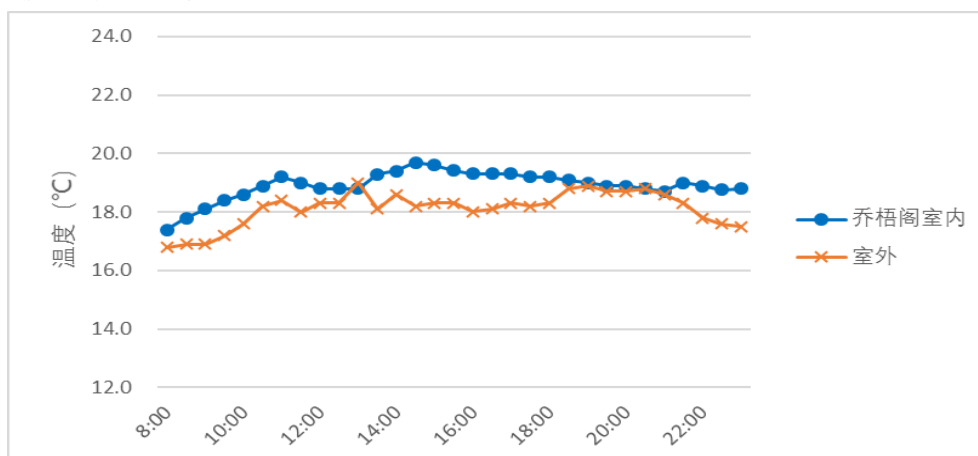


图 4 受试者家乡

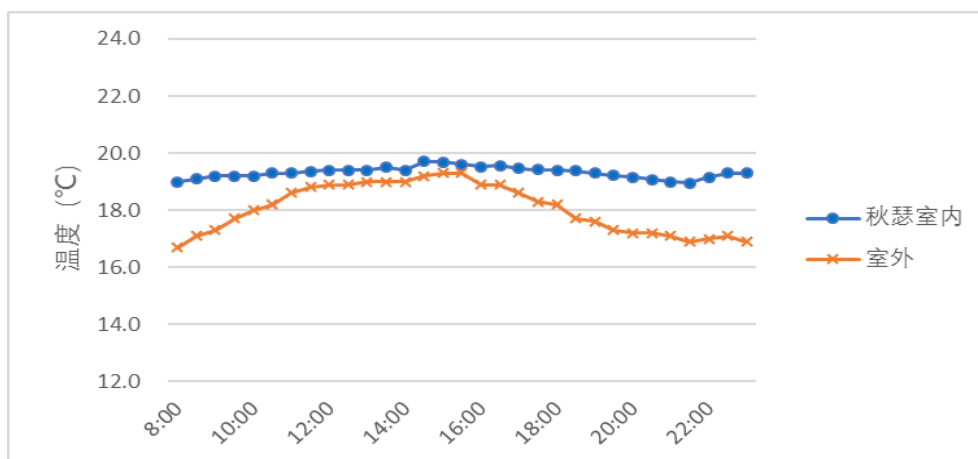
3.3 宿舍受试者热舒适分析

3.3.1 热感觉与热期望

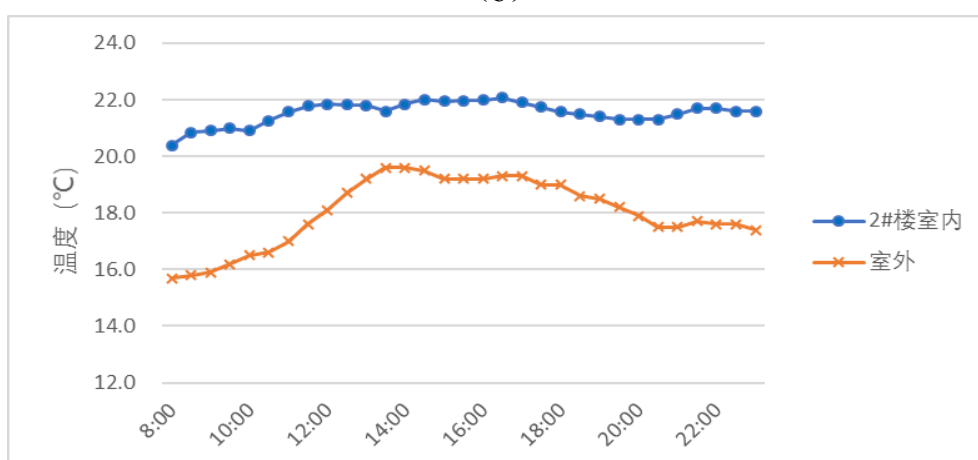
连续测量阶段共持续三天，每天对一栋宿舍中的中间层宿舍进行测量。由于深圳冬季气候反复无常，室外状况多有变化，现单独将每栋楼的日室内温度与当日室外气温比较，后湿度连续测量值同理。



(a)



(b)



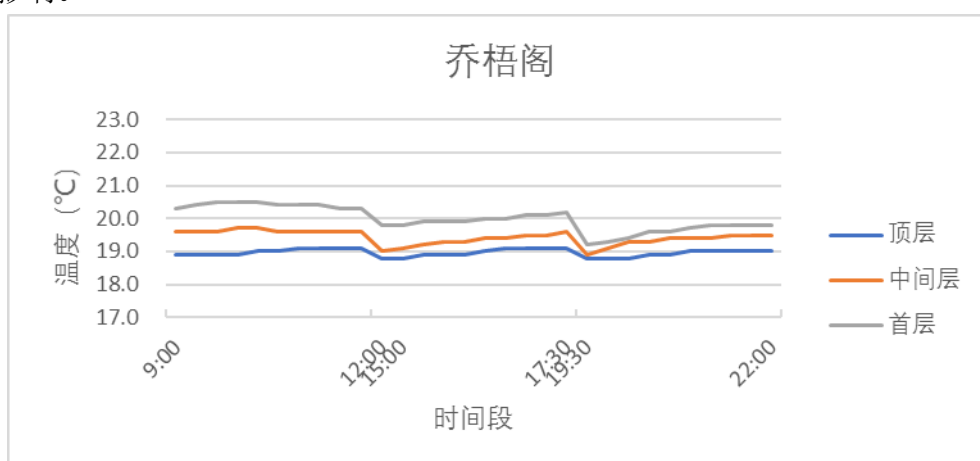
(c)

图 5 连续测量各宿舍楼室内、外温度

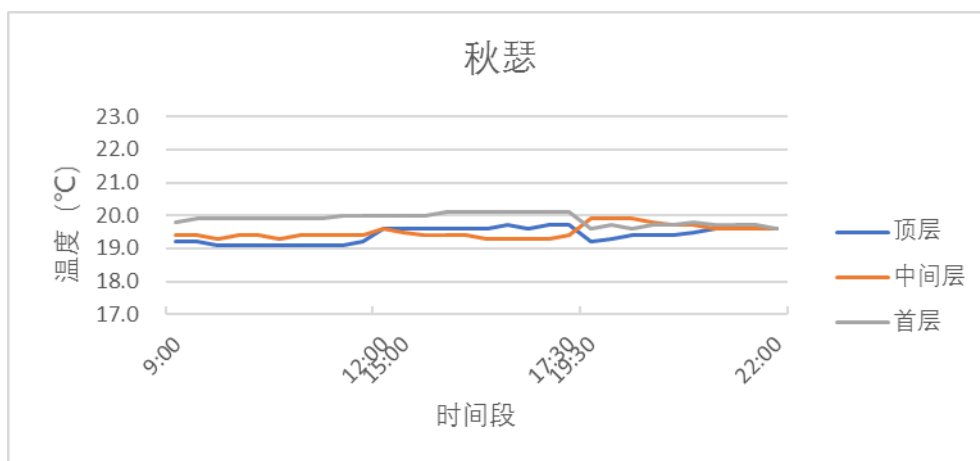
由图 5 可以看出,在测量时段,该地区冬季室外温度在 16°C - 20°C 之间,中午时段温度最高,早晨时段温度略低于晚上。一天内温度变化呈现以下规律:从早上八点开始温度持续上升,在午后达到一个峰值。下午随着太阳光照减弱,气温开始下降,在下午的四点至五点的时候小幅度提升。傍晚开始,温度随着光照的进一步减弱逐渐下降,且速率加快,至 23 点降至晚间最低值。个别天数如测量乔梧阁时的室外温度变化频率高,但总体较为稳定,变化幅度在 4°C 以内。

由于围护结构的保温隔热作用阻隔了室内向室外散出热量,三栋楼中间层宿舍的室内温度均高于室外气温。保温效果最好的是 2#楼,室内温度平均高于室外 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$,最差的是乔梧阁,平均高于室外 0.5°C ,个别时段室内、外温度相等。三间宿舍的室内温度均随室外温度而变化,但波动幅度小于室外。其中最为稳定的是秋瑟楼,一天之内温度变化约 1°C ,乔梧阁和 2#楼浮动也在 2°C 之内。

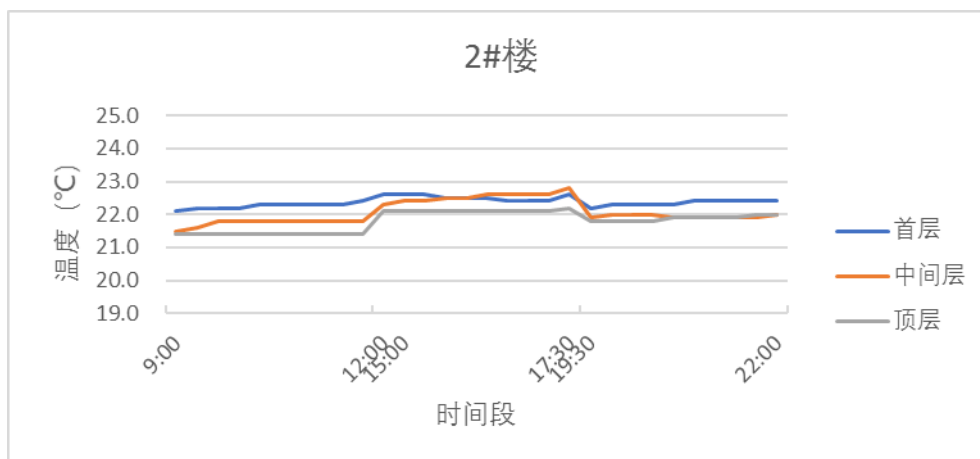
据现场调查,这三个宿舍白天阳台门大开,宿舍内人员均静坐学习;晚间宿舍阳台门关闭,人员的活动状态由静坐变为轻微活动状态。门关闭以后室内与室外的热交换减少,人体呼吸排出的热量在宿舍内不断蓄积,因此在晚上 9:00 的时候,三个宿舍都出现了温度回升。待同学们静坐或躺下休息时,人体新陈代谢减弱,室内积蓄的热量开始消散,室内温度开始随着室外气温的下降而下降。总体来说,冬季宿舍室内温度值略低于冬季人体舒适温度,室内温度波动与室外基本保持一致,但变化更为缓和,具体受到人员活动影响。



(a)



(b)



(c)

图 6 间断测量各宿舍楼室内温度

间断测量阶段，室外天气总体为阴天，中午时段有较强太阳辐射。乔梧阁和秋瑟楼室内温度区间为 18.5~21℃，2#楼室内温度区间为 21℃~23℃。9 间被测宿舍室内温度的整体趋势与前述室外气温变化大致相同，但因为测量时间缩短，温度变化趋势不明显，最高值和最低值差距变小。受到宿舍内人员行为的影响，个别宿舍显示出不同的趋势。

如图 6 (c)，按照室外温度趋势，15:00-17:30 这一时段 2#楼的顶层和中间层的室内温度应该下降。但是由于顶层和中间层被测宿舍内人员在测量前午休，整个下午时段门窗均处于关闭状态。宿舍内人员持续活动使得热量蓄积，最终造成室内气温上升。首层因为阳台门一直处于开启状态，宿舍内温度走势和室外一致。分别测试同一测点 1.1m、0.6m、0.1m 高度处的温度，结果显示头颈部（高度 1.1m 处）和脚踝部（高度 0.1m 处）的垂直温度差为 1℃，符合 ISO7730 标准规定的 3℃之内。因为文章篇幅有限，在此不赘述。

纵观图 6 (a)、(b)、(c) 三幅图，可以看出三栋宿舍楼首层的室内温度高于中间层，中间层又高于顶层。且首层、中间层和顶层之间的温度差值也有所不同，乔梧阁为 20 层楼，其温度差值最大；2#楼为 10 层楼，温度差值最小；秋瑟为 16 层楼，差值处于中间。同时，一天中的温度稳定性是首层大于中间层大于顶层。这是由于三栋楼都有架空层，首层在不与地面直接接触的同时垂直高度低于中间层，故温度条件最好；而顶层宿舍的围护结构与室外直接接触，室内温度最低、热稳定性最差。总体来说，宿舍所处层数越高，冬季室内温度越低，室内温度变化幅度越大。

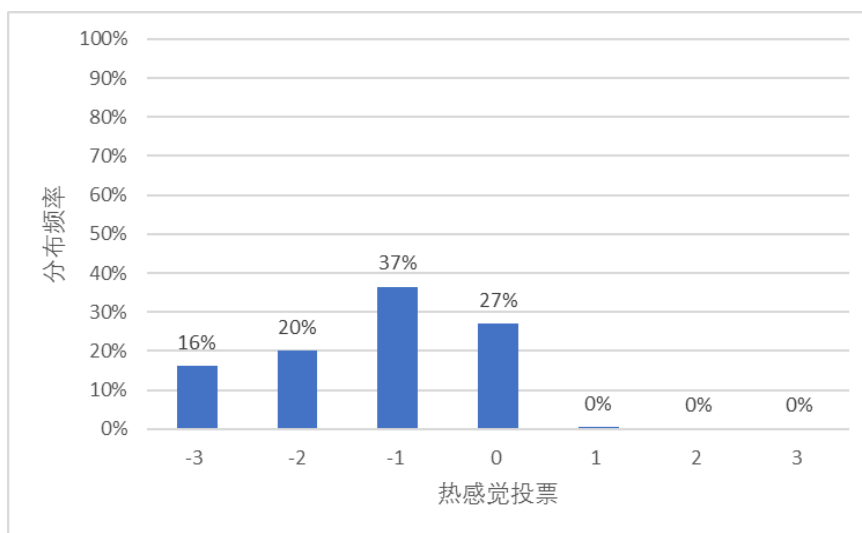


图 7 受试者热感觉投票值分布

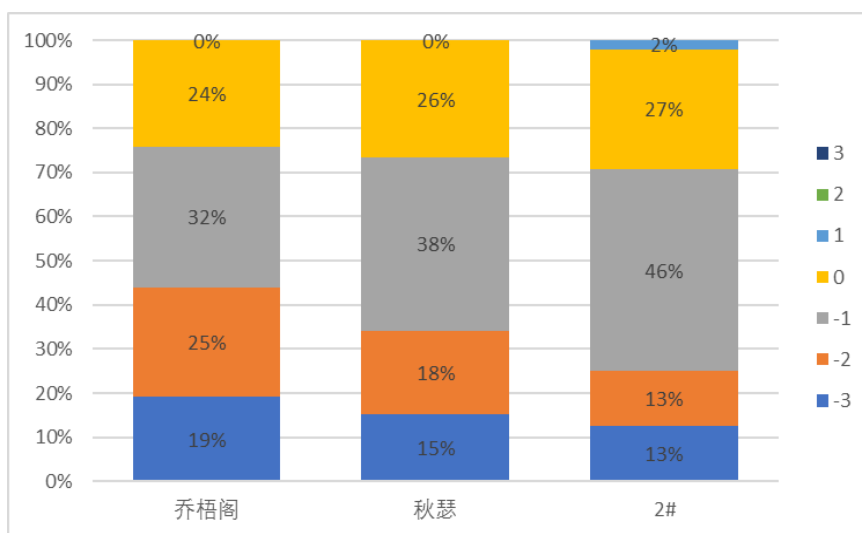


图 8 各宿舍楼受试者热感觉投票值分布

图 7 是冬季宿舍室内温度满意度调查，从图中可知，有 37% 的人觉得室内温度“有点冷”，20% 的人觉得宿舍“冷”，16% 的人觉得宿舍“非常冷”，仅仅只有 27% 的同学觉得宿舍的室内温度“适中”。由此可见，尽管身处夏热冬暖地区，但大多数受试者觉得宿舍内偏冷。图 8 单独统计了每栋楼宿舍内人员热感觉，结果显示他们的热感觉分布情况基本跟随室内温度情况。现场测量中乔梧阁宿舍楼内温度值最低，所以该楼被测宿舍中处于热中性状态的人数比例最小，热感觉投票值为负值的人数比例最高；因为 2# 楼室内温度相对较高，约一半受试者的热感觉投票值为 -1，27% 的受试者投票值为 0，甚至 2% 的人觉得室内“有点热”。这说明室内温度越高，热感觉投票值越高。

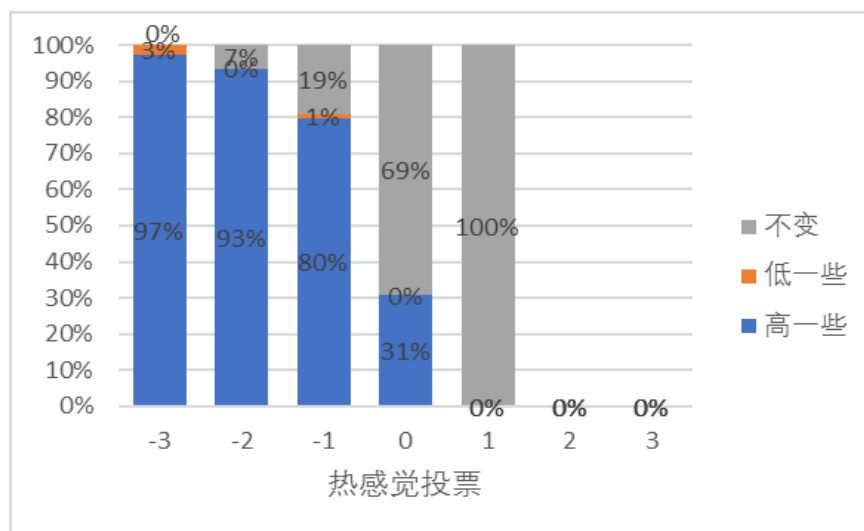


图 9 受试者热期望分布

图 9 进一步分析了受试者热感觉与热期望的联系。图中显示，冬季宿舍内几乎所有受试者都希望室内温度不变或升高。选择“很冷”的受试者中 97.3% 希望温度变高，而在选择“有点冷”的受试者中，这个值为 79.76%。当热感觉投票值为负值时，不到 30% 的受试者期望温度不变，说明他们不太能够接受所处的热环境在“有点冷”和“冷”这个范围内。在热感觉处于中性的受试者中，仍有 30.65% 选择希望温度“高一些”，100% 热感觉投票值为 1 的受试者期望温度不变。现场研究期间正值深圳刚刚入冬，气温处于全年低谷。受试者由于长期处在温暖的环境中，还不能适应低温环境，所以从心理上期望温度更高一些。总体来说，热感觉投票值越低，希望温度变高的人就越多。即热环境偏离热中性状态越远，改变环境的期望越大。

3.3.2 吹风感与气流期望

根据深圳市气象局数据，测量乔梧阁时室外最小风速为 0.1m/s，在早晨 6:17 分出现，最大风速为 4.9m/s，在晚上 21:57 分出现；测量秋瑟时室外最小风速为 0.2m/s，凌晨 02:50 分出现，最大风速为 5.0m/s，在下午 16:17 分出现；这两日的风速走势均是风速从早晨开始持续上升，晚上达到最高值。测量 2#楼时室外最小风速为 0.2m/s，晚上 19:20 分出现，最大风速为 5.0m/s，在上午 10:45 分出现，当日风速早晨小，中午升至最高，晚上逐渐下降。

测试是在自然状态下进行的，测量时多数宿舍阳台门大开，全部宿舍入口处门以及阳台门上窗关闭。因为实测结果显示室内三个高度处风速大小的差别可以忽略，故采用这三个高度风速的平均值对结果进行统计：

表 4 宿舍室内风速情况

测量	乔梧阁				秋瑟				2#楼			
对象	连续	首层	中间	顶层	连续	首层	中间	顶层	连续	首层	中间	顶层
	测量	层			测量	层			测量	层		
最大值	0.60	0.32	0.40	0.26	0.33	0.50	0.52	0.52	0.48	0.41	0.28	0.24
最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均值	0.02	0.05	0.08	0.03	0.01	0.07	0.05	0.04	0.02	0.07	0.06	0.03

根据 9 间宿舍的室内风速测量结果, 冬季宿舍室内风速最大值为 0.6m/s, 最小值为 0m/s。室内风速大部风时间集中于 0~0.1m/s, 其中约一半时间为 0m/s。其次集中于 0.15m/s~0.25m/s, 很少有 0.4m/s 以上。首层、中间层、顶层的室内风速差别不大, 不随所处高度不同而不同。

在冬季, 夏热冬暖地区学生宿舍均属于自然通风建筑。由于建筑构造原因, 无论室外风速如何变化, 大部分时间室内微风速度为 0m/s。虽然宿舍内人员有一定开窗通风的意识, 但由于室外风未在室内形成回路, 空气无法流通, 室内平均风速远低于标准推荐的室内风速值。且实测值显示, 风速值相对较大的时段持续时间很短, 可以认为是人员活动造成。

图 10 和图 11 分别为受试者吹风感投票频率分布以及对应的气流期望分布。

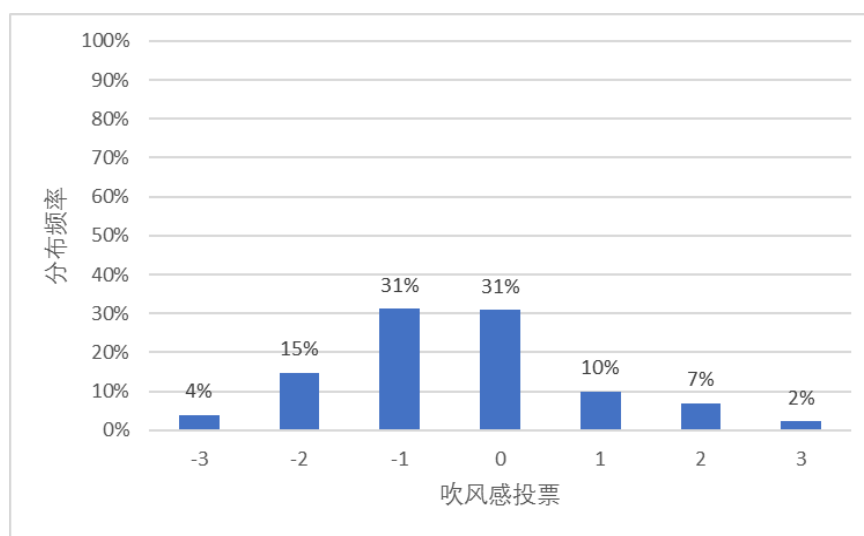


图 10 受试者吹风感投票

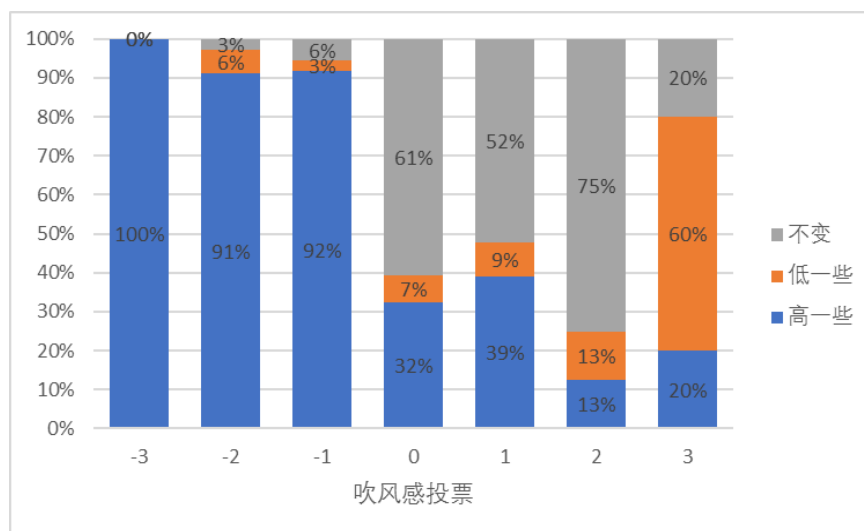


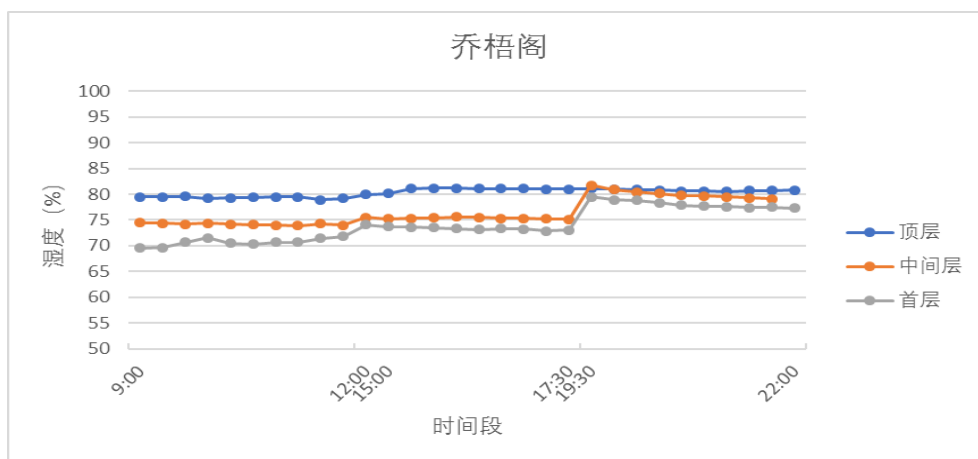
图 11 受试者气流期望

虽然实测结果表明冬季宿舍室内空气流通不好，但受试者对室内空气流通情况接受度较高。分别有 31.3%和 30.9%的人选择了“有点闷”（投票值为-1）和“适中”（投票值为 0），只有 3.9%的人选择了“非常闷”（投票值为-3）。对受试者的气流期望调查结果显示：61%的受试者希望室内空气流速“高一些”，32%的人希望空气流速“不变”，而只有 7%的人希望“低一些”。这意味着大多数人认为室内空气流通情况有待改善。

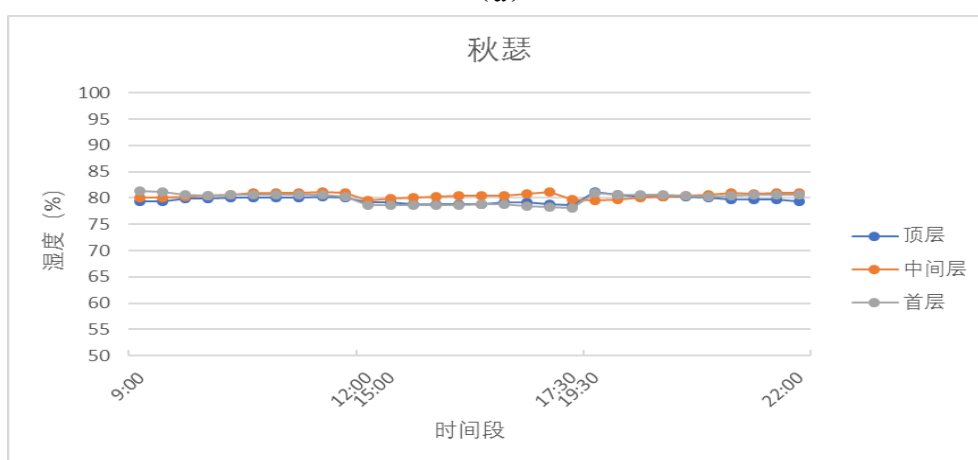
如图 11，90%以上投票值为负值的受试者希望空气流速增加。在投票值为 1 的受试者中，39%的人希望气流速度增加。而 75%投票值为 2 的受试者希望风速不变，说明“有吹风感”是受试者认为的理想状态。在投票值为 3 的受试者中，希望空气流速“低一些”的人增加到 60%。这也印证了观点：即环境偏离中性状态越远，改变环境的期望越大。

3.3.3 湿感觉

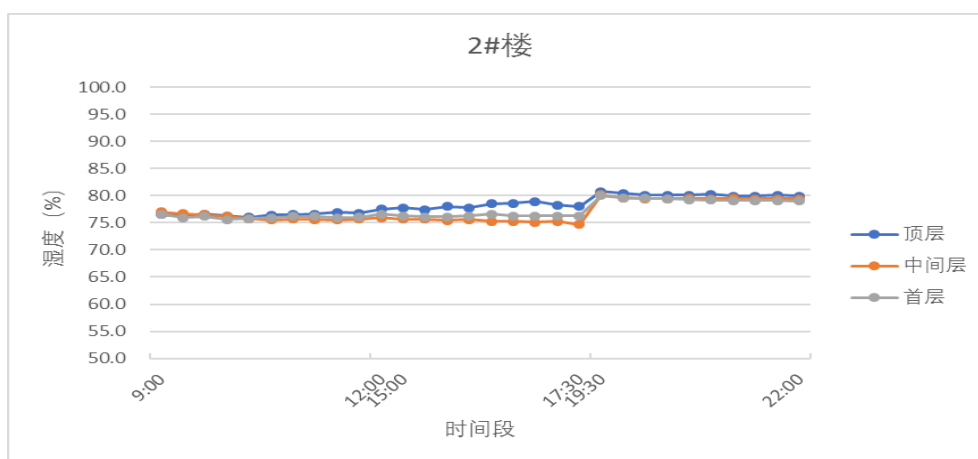
根据深圳市气象局数据，深圳常年空气相对潮湿，去年平均相对湿度为 76%。测量乔梧阁当日室外湿度为 85%~95%，平均相对湿度为 88.6%；宿舍室内平均湿度为 87.3%，最高值 88.3%出现在 15:30，最低值 86.2%出现在 8:00。测量秋瑟当日室外湿度为 70%~84%，平均日相对湿度为 74%；宿舍室内平均湿度为 79.9%，最高值为 84.7%，出现在 10:30，最低值 75.2%出现在 21:30。测量 2#楼当日室外湿度为 70%~85%，平均日相对湿度为 77%；室内平均湿度为 72.4%，最高值 74.1%出现在 23:00，最低值 70.9%出现在 11:00。总体而言，室内相对湿度的变化趋势与室外基本一致，二者的平均值相差不大。室内相对湿度的平均值和最小值都大于 70%，超出了标准中室内湿度应当在 50%~70%的规定。



(a)



(b)



(c)

图 12 间断测量各宿舍楼室内相对湿度

由图可知,顶层、中间层、首层的湿度没有太大差别,湿度变化大致遵循以下规律:早上和下午时段逐渐上升,在傍晚时达到峰值,晚上时段逐渐下降。一天内室内湿度变化值在 10%以内,趋势平缓基本无波动。一些细微差别和被测宿舍的人员行为有关:乔

梧桐顶层的室内湿度在早晨、下午时段明显大于中间层和首层。测试当天的早晨，顶层被测宿舍内全员都在。当时阳台门和门帘都处于关闭状态，室内外空气完全隔绝，多人呼出大量水蒸气在室内蓄积。在下午测量的时间段内，宿舍人员均在宿舍静坐学习，阳台门和门帘仍未打开，所以宿舍内的湿度维持在稳定水平且不随室外相对湿度变化而变化。等到晚上时段，宿舍内有人员开始洗漱等日常活动，阳台门开启，故此时段内顶层宿舍室内相对湿度和中间层、首层无异。

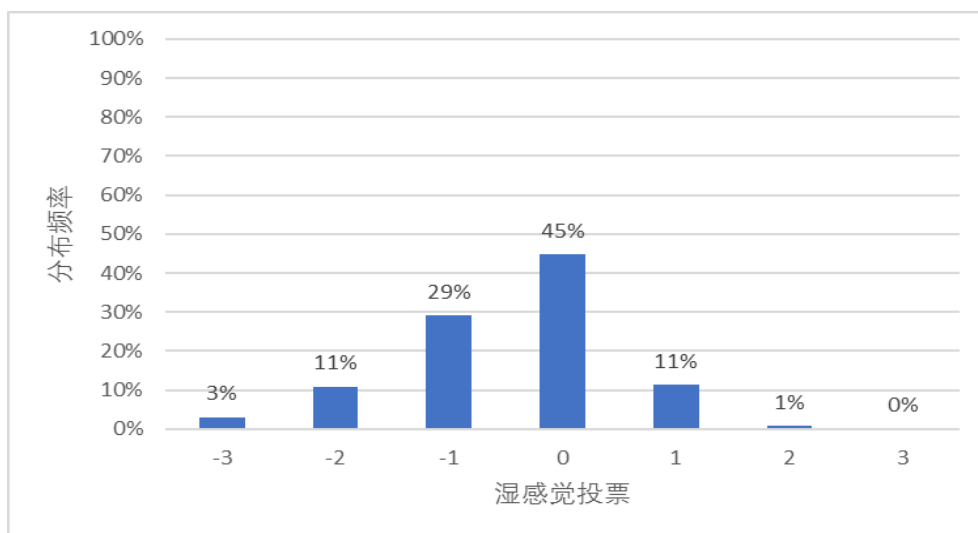


图 13 宿舍受试者湿感觉投票

图 13 是冬季宿舍受试者湿感觉投票，由图可知，全体受试者中有 36.5%的人觉得室内“有点潮湿”，20%的人觉得宿舍“潮湿”，16.1%的人觉得宿舍“非常潮湿冷”，即约一半的同学认为冬季宿舍室内是相对潮湿的。同时，仍有 44.8%的同学觉得宿舍的室内相对湿度“适中”，甚至有 11.3%的同学认为宿舍室内“有点干燥”。在湿感觉投票值大于 0 的受试者中，70.8%的人家乡在广东省内，37.5%的人在深圳生活超过十年。这些受试者因为已经完全适应了夏热冬暖地区潮湿的环境，因此能够按照自己的喜好有与实测值不同的湿度期望。

3.3.4 空气质量与开窗习惯

现场测量发现，9 个宿舍的室内二氧化碳浓度平均在 700ppm 左右，其中 2 个宿舍平均二氧化碳浓度超出 1000ppm，最高时段达到 1500ppm。因此，本文调查了受试者关于室内空气质量的满意程度和开窗习惯。

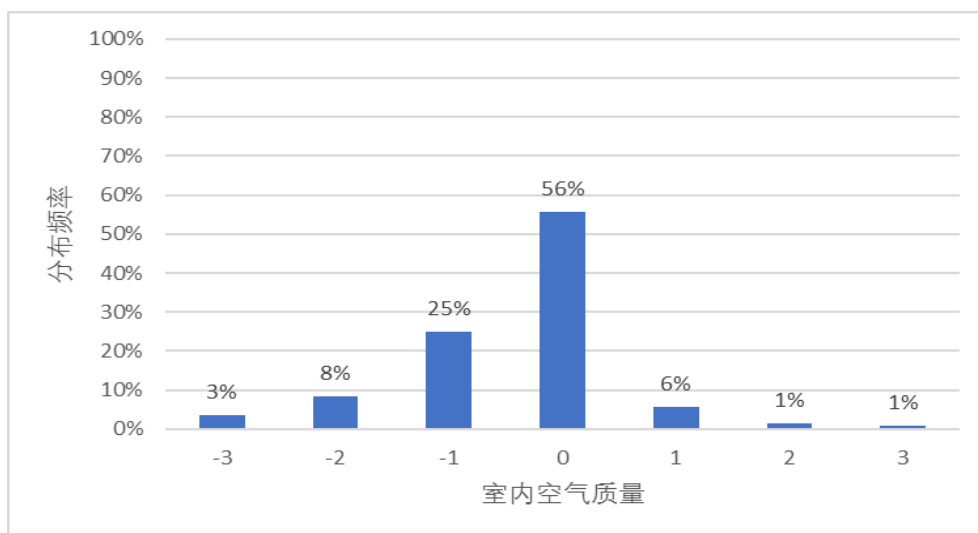


图 14 受试者室内空气质量满意度投票

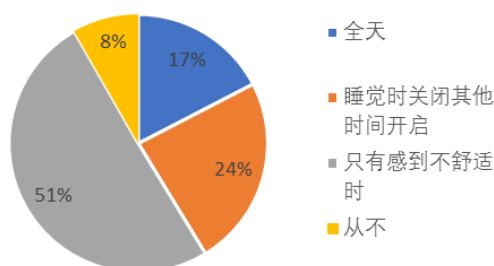


图 15 受试者冬季每日开门（窗）时间

由图可知，56%的人认为室内空气质量“可以接受”，25%的人对室内空气质量“不太满意”，感到“很不满意”的人占3%，而感到“非常满意”的人只占1%。总体来说，投票值为负值的人数多于投票值为正值，更多人对室内空气质量不够满意。但图15显示51%的受试者只会在感到不舒适时开门（窗），8%的人从不打开。且在打开阳台门的受试者中，大多数人只会开一半甚至只留一小缝。人在呼吸的时候会呼出大量的二氧化碳，如不及时开窗通风，会导致室内二氧化碳浓度过高，当室内二氧化碳浓度在1000-2000ppm时候：室内人员会感觉空气浑浊，并开始觉得昏昏欲睡。虽然大多数受试者认为室内空气流通情况有待改善，但他们还未意识到室内空气流速可以通过适应性行为进行调整，如定时打开门窗、增大门窗开口等。

3.3.5 衣物与行为活动

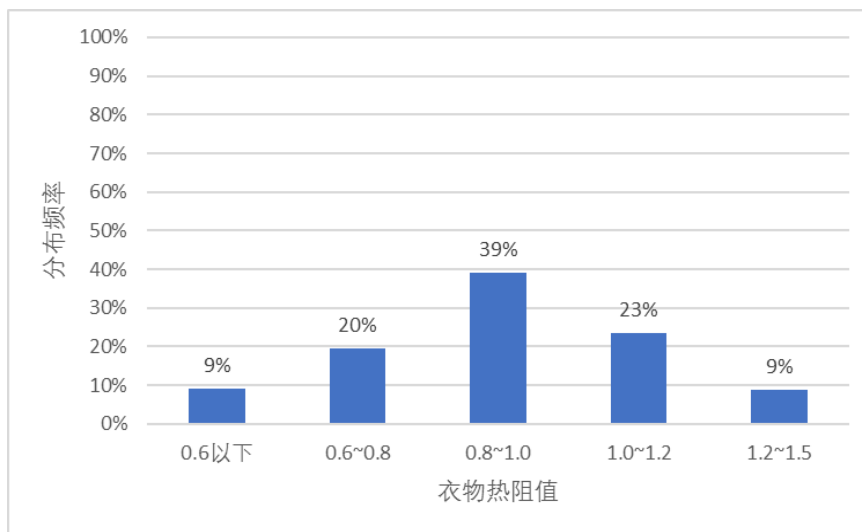


图 16 受试者冬季在宿舍内的穿着

由图 16 可以看出，大多数人的衣物热阻集中在 0.8~1.2clo 之间，其中 39.1%的人衣物热阻在 0.8~1.0clo 之间。值得注意的是有 9.1%的受试者的衣物热阻值在 0.6clo 以下，他们绝大多数是男生，而 8.7%衣物在 1.2~1.5clo 的受试者都为女生。由于男性的新陈代谢率要高于女性，所以男生的衣物热阻要小于女生。

通过问卷中的反馈和对测量现场中人员衣着的观察，本文得出该地区冬日的一般穿着：上衣：加厚外套+长袖衬衣/秋衣；下装：运动裤/牛仔裤+凉拖鞋+薄短袜。此外，男女同学的内衣裤的热阻值取 0.04，宿舍椅子的热阻取 0.03，则总体衣物热阻值是 $0.4+0.2+0.2+0.02+0.02+0.04+0.05=0.91$ 。这与一般冬季标准着装的热阻值 1.0 是有差异的，如前所述，深圳属于夏热冬暖地区，室内环境相对温暖，所以人员在宿舍的着装相对更薄。

由第二章可知，新陈代谢也是影响人体热舒适的重要因素。为全面了解学生在宿舍里的活动状态和采暖措施，本文调查了受试者在宿舍通过哪些活动来进行增暖以及使用何种采暖设备，结果如图 17、18。

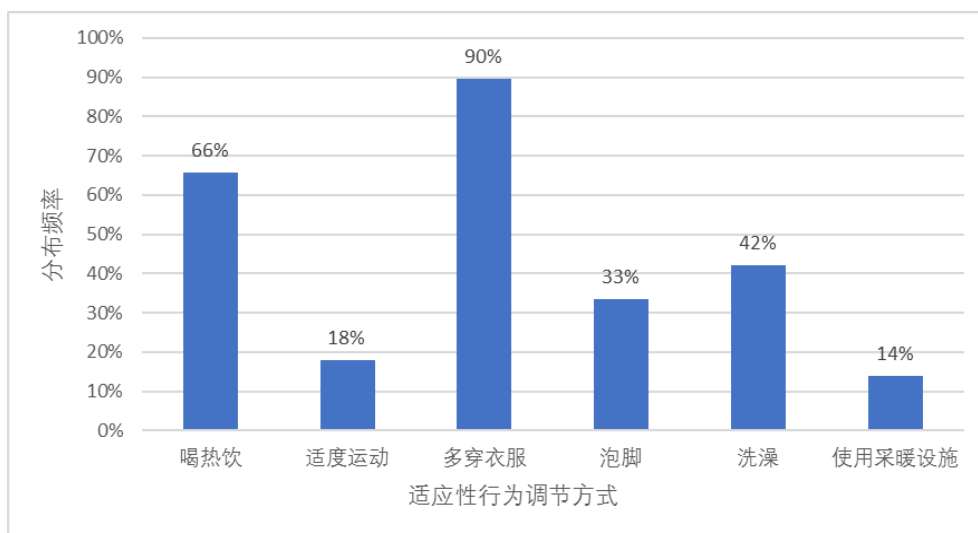


图 17 受试者采用的增暖措施（多选）

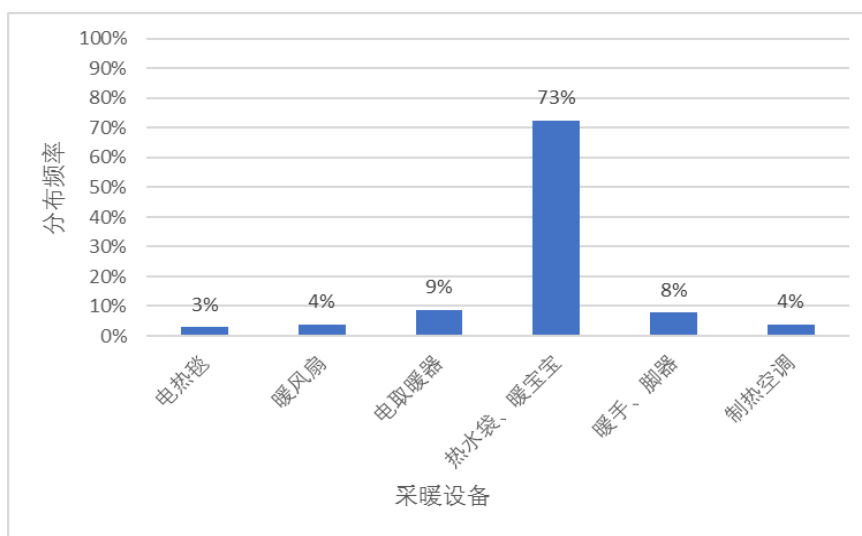


图 18 受试者使用的采暖设备（多选）

图 18 显示多穿衣服和喝热饮是同学们最为常用的增暖措施，其次是洗澡、泡脚，因为这些行为容易实施且增暖效果好。选择使用采暖设施的受试者最少，只占 13.9%。在那些使用采暖设施的受试者中，使用暖手袋、暖宝宝的占 72.55%，使用其他采暖设备的比例非常低，不超过 10%。根据调查，深圳大学给每一个宿舍配备了空调，但由于地处夏热冬暖地区，冬季时间短，空调只具备制冷功能，无制热功能。除此之外，学校也未给同学们提供其他采暖设备，包括暖气、暖风扇、电取暖器等。因此，调查中受试者使用的采暖设施均为自备。受试者不考虑使用采暖设备一方面是因为宿舍对私用电器有限制，另一方面是因为深圳地区冬日温度相对较高，采暖设备的使用不够广泛。对于夏热冬暖地区的同学们来说，增加衣物、活动量等适应性行为才是冬季较为可行的增暖措施。

3.3.6 总体热舒适

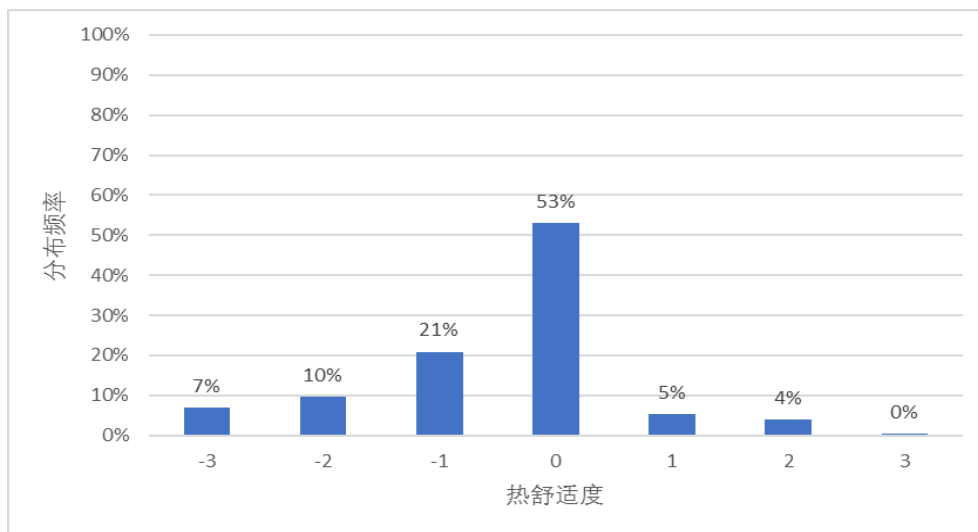


图 19 受试者室内热环境总体满意程度

由图 19 可知，宿舍受试者热感觉投票（TSV）主要集中在-1~0 之间，约 50%的受试者觉得室内环境“适中”。同时，投票值为-3~-1 的人数多于投票值为 1~3 的人数，即更多人对环境是不满意的。受试者对冬季宿舍室内热环境的总体感觉为“有点不满意”。

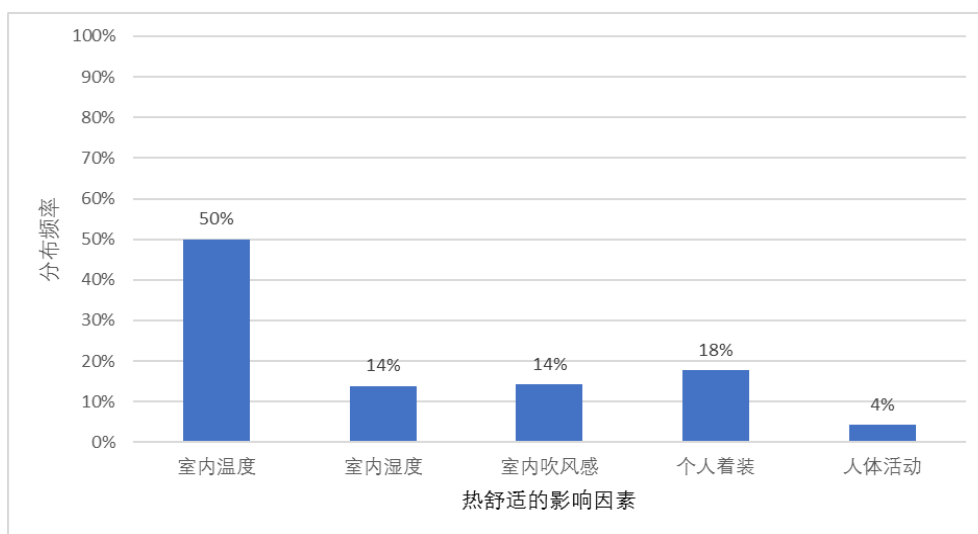


图 20 受试者认为最影响热舒适的因素

图 20 反应了受试者对热舒适对各影响热舒适的因素的看法。如本文第二章所述，影响热舒适的因素共有 6 个，分别是空气温度、平均辐射温度、相对湿度、风速、衣物热阻和新陈代谢率。在问卷调查中，两类温度被统称为“室内温度”。63%受试者认为室内温度是影响室内热环境的主要因素，这源于人们常识中认为热感觉就是对温度的感觉，

热环境即是温度的高低。虽然现场测量结果显示室内气流速度和湿度都不符合 ISO700 的规定,但仅有 14%的受试者认为这两个因素是影响热舒适的最重要因素。

由此可见,虽然同学们都希望宿舍内的环境是适宜的,但他们对评价建筑环境的重要指标—热舒适并不了解,也不清楚各环境因素会对热舒适造成何种影响。由于室内人员的一举一动都会影响自身热舒适,下一步应该对宿舍内人员采取的行为及其对热舒适的影响程度进行研究。得出的结论可以帮助同学们了解他们所处的环境,从而通过正确的自我调节达到热舒适的状态。

3.4 本章小结

本章从主观和客观两方面入手,首先介绍了在深圳大学学生宿舍进行的现场研究过程。然后对比分析热感觉和热期望、吹风感与气流期望、湿感觉、衣物与行为活动等主客观结果,对深圳地区宿舍冬季室内热环境做出评价。结果显示冬季宿舍内存在以下问题:室内温度偏低,相对湿度过大;室内气流速度过小,空气流通差导致宿舍内二氧化碳浓度过高。受试者对相对湿度和气流速度的接受程度高,对温度条件最为不满。

总体而言,虽然室内物理环境参数不符合标准,并且受试者也感觉到了一定的不舒适性,但是他们主观上还是能接受其所处的热环境,并且有一半的受试者处于热中性状态。

第4章 宿舍室内热环境模拟

4.1 Airpak 软件的介绍

4.1.1 概述

计算流体动力学 (CFD) 方法可以对室内空气流动、热传导等物理现象进行数学模拟^[61]。其总体思路为: 利用计算机求解质量、动量、能量、气体组份质量守恒方程和粒子运动方程, 计算物理量的场如速度场、压力场变量的近似值, 获得室内各个位置的参数值并进行图像显示。1974 年, 丹麦的 P.V Nielsen 首次将 CFD 技术应用于空调工程, 模拟了室内空气流动情况^[60]。由于该方法能够预先进行, 计算耗时短、费用低, 近十年来发展十分迅速。目前市面上已有多款 CFD 软件, 应用较多的软件包括 PHOENICS、STAR-CD, FLUENT 等。其中 Airpak 是属于 FLUENT 软件下面向暖通领域的专业软件。它可用于分析室内空气质量 (IAQ)、热舒适、空调和污染源分布等环境指标, 是通风行业的设计人员和工程师一种必不可少的设计工具。

Airpak 使用 FLUENT 的 CFD 求解器引擎进行热量和流体流动计算。FLUENT 快速、准确且经过充分验证的非结构化求解器引擎能够提供完整的灵活性网格, 从而快速创建并自动对通风系统问题进行筛选, 同时, 求解器多重网格和分离的算法则提供了强大而快速的计算, 使用者可使用非结构化网格解决复杂的几何模型的计算^[62]。

Airpak 功能强大, 本身即可进行全部数据分析。由于简化了先进气流建模技术在设计和分析通风系统中的应用过程, 软件的运算效率相比于同类软件更高, 耗时更短。软件还拥有先进的后处理功能, 可以得到一系列可视化结果如温度场、风速场、空气龄、相对湿度、PMV、PPD 等各类评价热舒适参数的云图。模拟结束后, 可提供强大的数值报告。同时, 软件界面友好、操作简单, 一些没有相关经验的使用者也可以迅速熟悉和操作。与其他气流建模软件工具相比, Airpak 可在最短的时间内提供最准确的解决方案, 使得室内环境的相关研究更为容易。因此, 本研究选择 Airpak 3.0.16 进行冬季宿舍室内热舒适的模拟和分析。

4.1.2 湍流方程介绍

流动分为湍流和层流两种形式。层流是当 Reynolds 数小于某一临界值时, 相邻的流体层彼此有序地作平滑流动。湍流是当 Reynolds 数大于临界值时, 流动特性因为发

生了一系列本质变化,最终呈现一种混乱无序的状态^[63]。因此,湍流中的气体作一种非常复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动,流动工程中温度、压力等参数均会随时间、空间的变化而发生随机变化。自然界的流动和一般室内的气流流动大都是湍流流动,因此工程技术领域在处理相关问题是默认气流作湍流流动,并作如下假设:常温、低速、不可压缩流体的流动,属于稳态流动且各项特性符合 Boussinesq 假设^[64]。

湍流的流动符合质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。目前,研究湍流流动的方法包括统计理论和半经验理论。虽然湍流作为一种混沌现象看似无规律,但是仍然可以用统计理论对其加以分析。由这些定律出发,建立表达守恒定律的偏微分方程如质量守恒、动量守恒和能量守恒控制方程是进行计算机模拟的理论基础和出发点。其中,动量方程包含三个表达式、质量守恒和能量守恒各包含一个表达式。由于未知量的数目远远超过方程数目,这些方程总是不封闭的。这就使得统计理论不能用于各向同性湍流以外的研究。要使方程封闭,就必须在不引入新的未知量的情况下找出确定多余未知量的关系式。而半经验理论法是基于湍流流动偏微分方程组的不封闭性,根据一定条件下实验得到的半经验公式。通过引入湍流模型,使方程组封闭求得唯一解^[65]。

湍流模型是一些将湍流的湍流应力同湍流时均参数联系起来的特定关系式,其关键在于确定湍流粘性系数。根据确定湍流粘性系数的微分方程的数目多少,湍流模型分为零方程模型、一方程模型和两方程模型等^[66]。Airpak 共给出了四种湍流模型:室内零方程模型、S-A 模型、标准 k-ε 模型、重整化 k-ε 模型。其中标准 k-ε 模型是最经典的湍流模型,计算结果准确,使用也最为广泛。因此,本文选用标准 k-ε 模型进行模拟计算。

标准 k-ε 模型的核心是求解两个附加方程:湍流脉动动能 K 方程和湍流耗散率 ε 方程,方程表达式如下:

湍流动能 K 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \epsilon \quad (5)$$

耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\epsilon}^*}{k} G_k + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

4.1.3 辐射模型介绍

任何有温度的物体都会对其他物体产生热辐射,且温度越高,辐射能量越大。热辐射不需要任何介质,通过可见光和红外线就可进行传播,且光谱的波长范围从 0 到 ∞。

一直以来,辐射换热问题都是科研难题。因此在工程中对物体之间的热辐射作简化处理,形成一些简化模型。

Airpak 提供三种辐射模型:地面辐射(S2S)模型,离散纵坐标(DO)辐射模型和太阳负荷模型。太阳负荷模型用于模拟通过不同介质进入房间的太阳光线的辐射效应。S2S 辐射模型是软件默认的热辐射模型。它将所有的壁面视为灰体漫反射表面,两个表面之间的能量交换仅取决于两个表面的尺寸、距离和朝向而不考虑空气对辐射热量的吸收、发射和反射,更适合求解没有介质的封闭空间的辐射问题。因此,本文选择 DO 模型来模拟宿舍室内辐射传热过程。

DO 模型根据计算空间的结构特点以一定的立体角将辐射传热离散成许多个方向,适合所有光学区间的辐射研究。因为其计算简单、结果准确,得到了工程技术人员的广泛使用^[68]。

4.1.4 技术路线

本文利用 Airpak3.0 软件进行运算的步骤如下:

①确定运算目标

通过对深圳大学宿舍进行调研与测量,选择合理的研究对象及其范围作为物理环境的区域。然后定义工作,确定软件运算时的模型精度。

②建立物理模型

为了方便计算,模型需要在实际建筑的基础上进行简化。本文在 Airpak 里面建立模型,完成时间变化性、室内空气流动、辐射模型、室内外环境等边界条件和参数设置。然后生成网格并进行调整,最后检查模型是否符合要求。

③模拟求解

根据对计算结果的需求设定相关的公式、算法及参数,最后运用 FLUENT 进行模拟计算,待方程收敛后进行结果分析。

④计算结果输出

运用软件可视化功能,检查模型的温度场、速度场,通过设置相应参数得到室内热环境的 PMV、PPD 值^[69]。

4.2 软件模拟过程

4.2.1 物理模型

根据调查,深圳大学的宿舍楼大多为长廊式样,室内布局为长方形,外设有阳台,在结构上具有一定的普遍性。本研究从9间已进行现场实测的宿舍中选取一间典型房间——乔梧阁中间层单体宿舍进行模拟。房间尺寸为 $6.3\text{m} \times 3.5\text{m} \times 3.3\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。宿舍朝北,外墙(北面墙)为200厚钢筋混凝土,其余墙为普通砌块墙。北墙上有1扇玻璃门连窗,尺寸为 $1.2\text{m} \times 2.6\text{m}$ (宽 $\times$ 高,后同),可打开门尺寸 $1\text{m} \times 2\text{m}$,上部为可开启门上窗,尺寸为 $1.2\text{m} \times 0.6\text{m}$ 。南墙上有一扇门,尺寸为 $1.2\text{m} \times 2.0\text{m}$,习惯开启部分尺寸为 $1.0\text{m} \times 2\text{m}$ 。模型将z轴负方向设置为重力方向,X轴正方向为北方。建立模型如图:

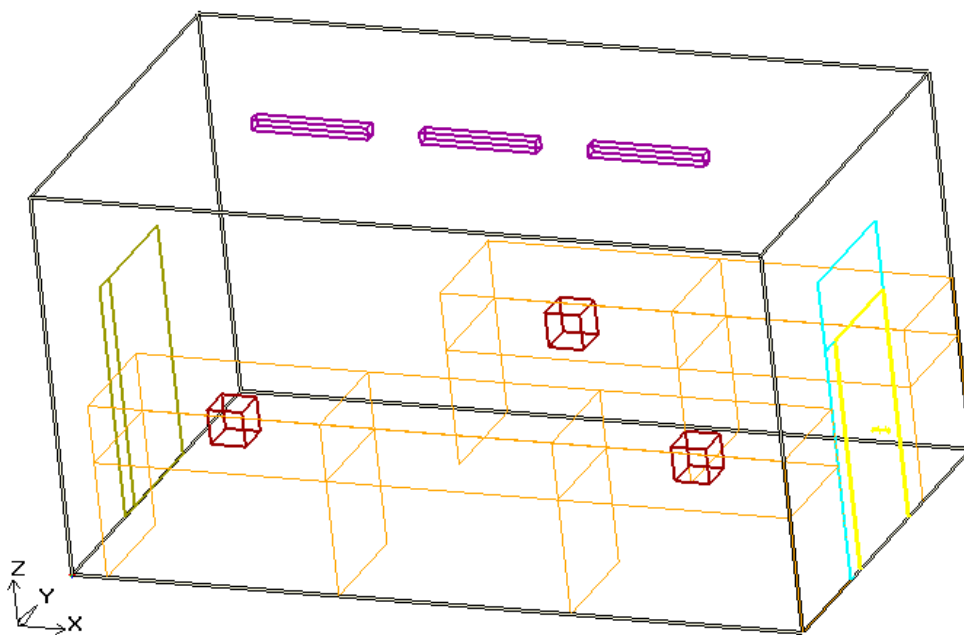


图 21 单体宿舍模型

由于模块的数量和布置会影响网格的划分,从而影响计算机的运算时间。本文在建模过程中对宿舍构造进行了一定的简化。将宿舍内上床下桌柜子的组合窗设为二层结构的 partition,将人和电脑设为一个 block,位置与电脑位置重合,人的散热散湿负荷均加在此模块上。根据实际测量情况,人和电脑模块数量为3。

表 5 宿舍内部物件

编号	项目	图示	尺寸/m (X×Y×Z)	数量	能量/W
1	宿舍	room	6.3×3.5×3.3	1	0
2	组合床	partition	2.0×0.95×1.6	5	0
3	灯具	block	1×0.1×0.1	3	40
4	电脑	block	0.4×0.3×0.5	3	250

4.2.2 参数及边界条件的设置

4.2.2.1 基础设置

由于本文研究室内热舒适,勾选 IAQ 选项。考虑到冬季室外温度相对较低,外墙可能会对房间内有冷源热辐射,勾选 Radiation 选项,并选择热辐射模型为 DO 模型。

室外气候条件为稳态,数值按照 1 月 6 日现场测量结果设置。室外湿度取当日平均室外湿度 85%,室外温度取早上 8 点至晚 23 点的平均室外温度,为 17.5℃。太阳辐射在外窗和墙的壁面温度计算中考虑。根据深圳市气象局的数据,1 月 6 日室外平均瞬时风速为 2.5m/s。基站一般高度为 10 米,乔梧阁位于 20 层、10 层和首层宿舍的据地高度分别为 63.6、30.6、4.2 米。由于风速在近地层随高度有较大变化,因此需要按实际情况根据高度计算外窗侧风速,计算见式:

$$V_w = \left(V_{10} \frac{H}{10} \right)^\alpha \quad (7)$$

V_w ——高度为 H 处的风速, m/s;

H——某点的高度, m;

V_{10} ——标准高度(10m)处的平均风速, m/s;

α ——地面粗糙系数

本研所在地属于建筑物密集的大城市,因此 $\alpha=0.2$ 。各宿舍具体风向因受到阳台墙壁影响,按照阳台朝向确定。

4.2.2.2 边界设定

按照天气和人体散热量以及围护结构的热工性能对各构件的边界条件设置如下:

①北墙

因为不知道墙面内外表面温度，也无法确定墙面单位面积的热流，本文使用墙面设置中的第三种情况 External conditions。这种方式使用能量方程来计算外部环境向具有一定厚度的墙壁的热传递，必须指定墙的导热率和壁厚。本文模拟的宿舍外墙是 200 厚混凝土砌块墙，只考虑来自太阳对围护结构的短波辐射，不考虑外表面与天空和周围物体之间的长波辐射，室外综合空气温度的表达式为：

$$t_z = t_{air} \frac{aI}{\alpha_{out}} \quad (8)$$

t_z ——室外综合温度，℃；

t_{air} ——室外空气温度，℃；

a ——围护结构外表面换热系数， $W/m^2.K$ ；

I ——太阳辐射照度， W/m^2 ；

α_{out} ——围护结构外表面对太阳辐射的吸收率^[70]。

外墙面的吸收系数 α_{out} 取 0.73，外表面换热系数 a 取 $23 W/m^2.K$ ，围护结构日间接受太阳辐射强度取一月平均值 $700W/m^2$ 。

②门

南面门是乙级防火门，可以两侧同时开启，在关闭时按照绝热处理；北方阳台门是双玻铝塑窗，外窗的吸收系数 α_{out} 取 0.78，厚度 6mm，空气层 12.7mm，一层 low-e 玻璃，关闭时的温度边界像北墙一样设置；打开时设置为 opening，风速按高度计算或者设置为静态压力通风，温度为室外温度。

③阳台门上窗

门上窗关闭时候按照 Wall 处理，温度边界设置同北墙；开启时由于该处风向不确定，因此定义为压力边界条件，为默认值 $101325N/M^2$ 。

④南墙

乔梧阁是单排外廊式宿舍，南墙外面为走廊。但由于走廊被本栋楼南面宿舍遮挡，没有直接太阳辐射。因此本研究忽略太阳辐射传热，设置为室外温度。

⑤其他墙面与地面

分别邻接隔壁和下层宿舍，本文不考虑这些墙壁的热量交换，因此按照绝热面处理。

⑥电脑模块

将电脑和人体散热共记为 200W。人体呼出的气体的相对湿度为 95%。受试者在宿舍内的主要活动为坐姿轻微活动，热边界条件按照新陈代谢率 1.2met 确定，结果后处理中衣物热阻设为 0.9。

⑦组合床

按照绝热边界处理。

4.2.2.3 其他参数的设置

本次计算中，迭代步数设置为 1000，流动收敛准则为 0.001，能量收敛准则为 1×10^{-6} 。其他 CFD 相关参数设置见表 6：

表 6 CFD 相关设置

CFD 相关设置 1					
	压力	动量	温度	K	ϵ
松弛因子	0.7	0.3	1	0.5	0.5
离散格式	质量力加权法	二阶迎风格式	二阶迎风格式	一阶迎风格式	一阶迎风格式
CFD 相关设置 2					
求解格式	压力 AMG 求解格式	动量 AMG 求解格式	温度 AMG 求解格式	K AMG 求解格式	ϵ AMG 求解格式
求解格式	式	式	式	式	式
循环类型	V	Flex	Flex	Flex	Flex

一般情况下，低通风流量环境的运算需要将压力和动量的松弛因子分别设为 0.7 和 0.3。因为文中模拟环境属于低流速，所以按要求对软件默认设置进行更改。

4.2.3 网格的划分

建立模型后，生成网格是运算过程的基础。网格由遍布计算域的离散单元组成。在每个单元内，Airpak 运算出控制房间内流动和传热的方程式。良好的计算网格决定了能否得到快速、准确的运算结果。因此，网格的生成需要遵循以下要求：

在温度和速度梯度大的物体附近网格必须细密，例如散热的模块、组件，与物体相邻的房间墙面；在温度和速度梯度较小的区域，网格分布应该更稀疏。因为运算的成本和网格单元的数量成正比，所以需要将网格单元集中在需要重点分析的位置，同时减少其他地方的单元数量。网格单元的长边与短边最好为 1:1，如立方体或等边四面体网格。若模型形状较为复杂，应该尽量选择规则形状网格，并且保证单个网格单元的长边与短边比例不至于过大。这样可以减少细长网格和形状扭曲网格的数量，这两者都会降低运

算结果的精度和准确性。在多数情况下，一个网格到另一个网格的增长率应该保持在 2 到 5 之间。在特定区域，还可以建立非共性化网格以减少网格数量、改善网格质量。

Airpak 支持自动化生成网格，也支持自定义网格参数。使用者可以设置整体网格中单元的最小值，还可以指定各个对象的网格生成顺序和生成数量。这种灵活性为使用者提供了一个有效的网格生成过程，方便使用者达到优化网格和优化计算成本、解决方案精度之间的平衡。Airpak 支持建立三种网络，分别是：结构化网络、非结构化网络、笛卡尔网络。用户可根据所建立模型的复杂程度选择相应的网格。网格的划分对求解结果有很大影响，如果整个网格太粗糙，得到的运算结果可能不准确；如果整体网格太密，则运算时间过长，会影响最终结果的收敛。建立疏密得当的网格可以在保证精度的前提下减少迭代次数，节省运算时间。网格的建立没有绝对的规律可以遵循，只能依据经验，结合模拟过程中的运算结果进行适当调整。

本模型的模拟物体均为规则方正体，复杂程度不高，故选择六面体网格。网络的生成过程如下：

1.生成稀疏的网格

稀疏的网格是能够足够代表模型几何和满足网格生成准则的最少数目的网格。在继续优化网格并计算出更准确的结果之前，可以利用稀疏的网格快速地计算出近似解。它可以帮助检查计算是否正常运行，结果看起来是否合理。使用人员可根据初步运算结果随时调整网格，减少无用功。下图为模型生成的稀疏网格：

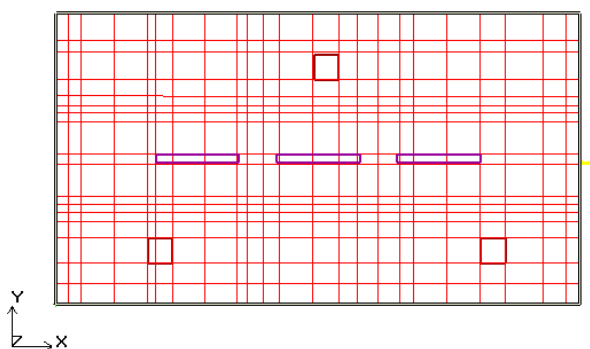


图 22 稀疏的网格

2.生成细密的网格

按照宿舍长 6.3m、宽 3.5m、高 3.3m 的基本情况，将 X/Y/Z 方向最大网格尺寸设置为 0.15m。将阳台门窗、顶灯、电脑与人模块设置为优先进行网格划分，并对周围网格进行加密。最终生成网格单元数为 99402，节点数为 106541。生成的网格如图：

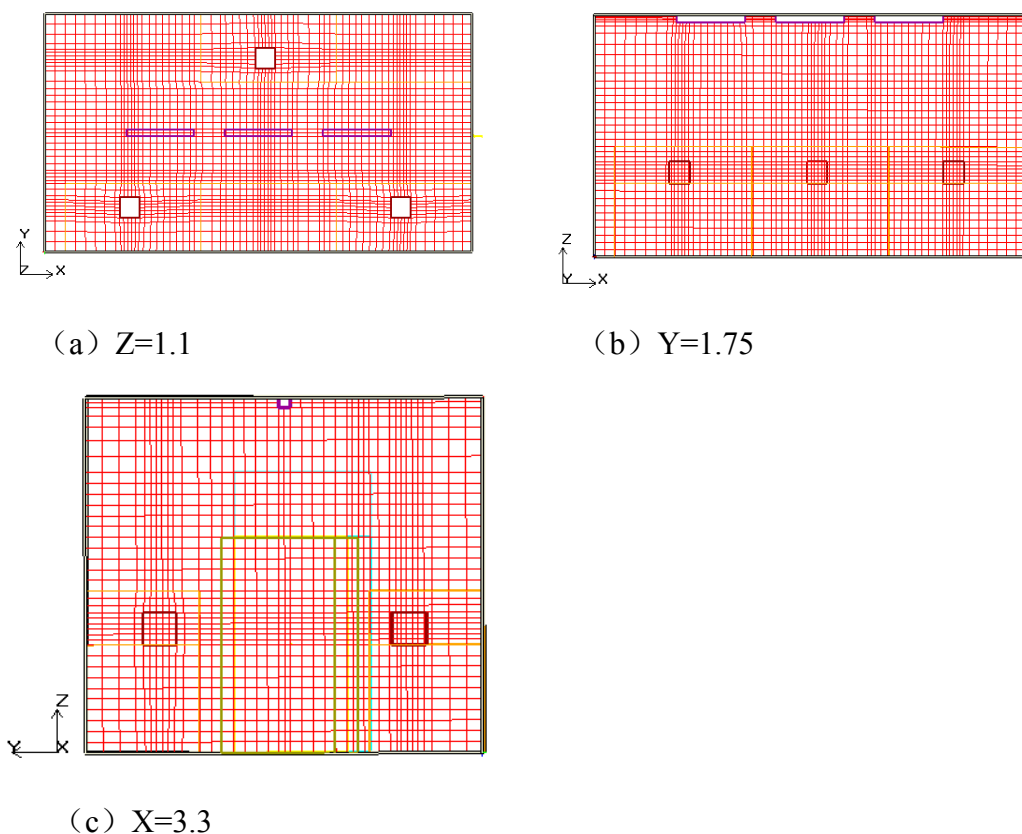


图 23 细密的网格

3. 检查网格质量

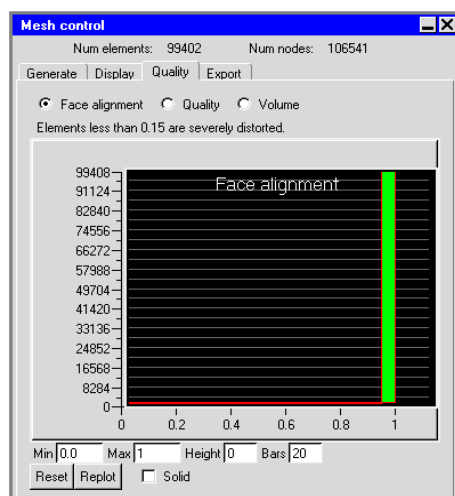
良好的网格对于能否准确运算至关重要。因此在生成网格后应对网格进行质量、平滑度、单元体积的检验。

①质量：对于六面体网格单元，质量被定义为 **Jacobian** 矩阵的行列式，是对单元扭曲度的衡量。一个好的网格单元质量应该为 1，若质量低于 0.15，则说明网格单元高度扭曲。

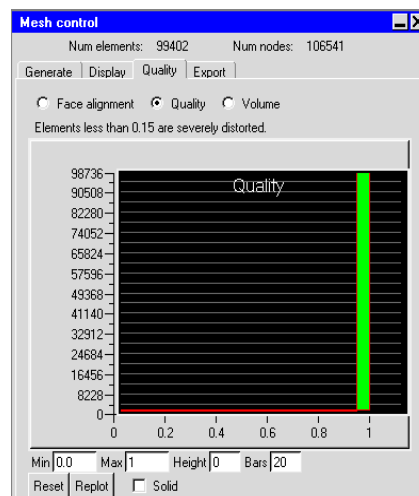
②平滑度：若相邻的网格面未对齐，缝隙间会生成小而窄的网格单元，影响求解结果。平滑度为 1 表示网格完美对齐，小于 0.15 意味着网格单元高度扭曲。

③网格单元体积：网格不能过于稀疏，也不能过于密集。极小的网格单元（体积小于 10^{-12} ）可能会导致求解器出现问题。因此，需要检查网格中的最小单元量。

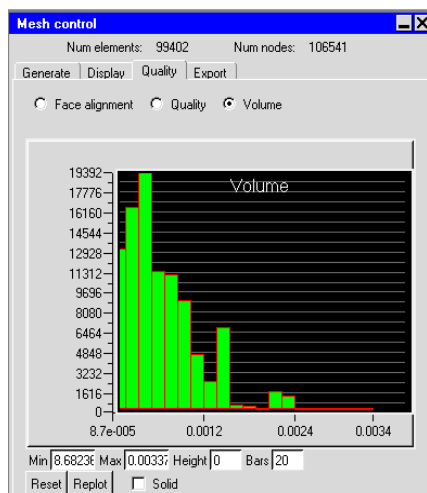
经过优化后，网格单元的分布更为合理，平滑度和质量均有所改善，网格的收敛性能得到提高。按照前文所述标准，该模型网格划分满足要求。图 24 是网格检查结果：



(a) 网格平滑度检测图



(b) 网格扭曲度检测图



(c) 网格最小容积检测图

图 24 网格质量检测图

4.2.4 运算求解

在进行正式运算求解前，需要点击“Check model”对模型进行检查，防止如物体距离太近导致无法正常生成网络等此类问题的出现。此时，Airpak 信息窗口应报告有 0 个错误。然后点击视图菜单栏，选择 Summary 选项，检查弹出网页中列出的所有建模对象的设定值。最后设置相关参数即可进行求解运算。本文模型的模拟求解运行图如下：

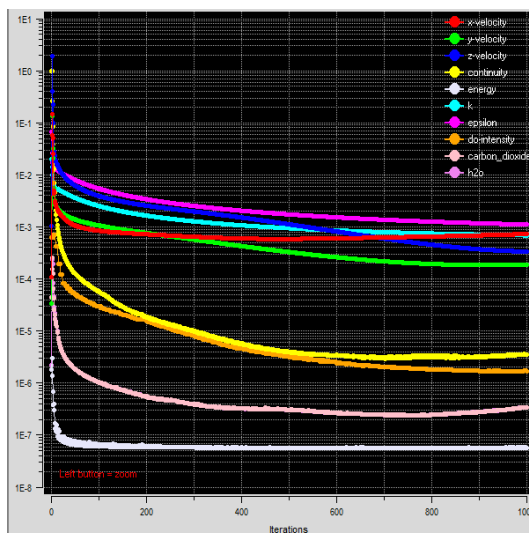


图 25 模拟求解运行图

通过运行求解，各方程都达到收敛标准，说明计算收敛的很好。

4.3 模型的验证

我们按照测量当天的气候和被测宿舍的概况对模型边界条件进行设置，运行求解得到模拟的数值结果。现将模拟结果与实验数据进行对比，验证模型的可靠性。

4.3.1 温度场的验证

我们选取了乔梧阁中间层宿舍一天的数据，根据实际测量状态设定了两种状况进行模拟对比：

状况一：

1. 白天，考虑太阳辐射；
2. 阳台窗户全开，入口处门和阳台门上窗紧闭；
3. 宿舍人员为三人，三人均处于静坐状态；
4. 三盏顶灯全开，三人的电脑全开。

为了与假设状况对应，选择白天 11:00 时现场实测结果。由于测量时测量了宿舍 1.1m、0.6m、0.1m 处的空气温度，现以这三个高度中间测点的平均值 T_1 作为比较标准，各高度处数据取测量 10 分钟后的稳定数值。模型设定为当时的室外温度 17.5℃，无风。模拟结果取三个高度中间点的温度平均值 T_2 。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (9)$$

t_i ——某高度处中间测点仪器的显示数值

模拟结果如下图：

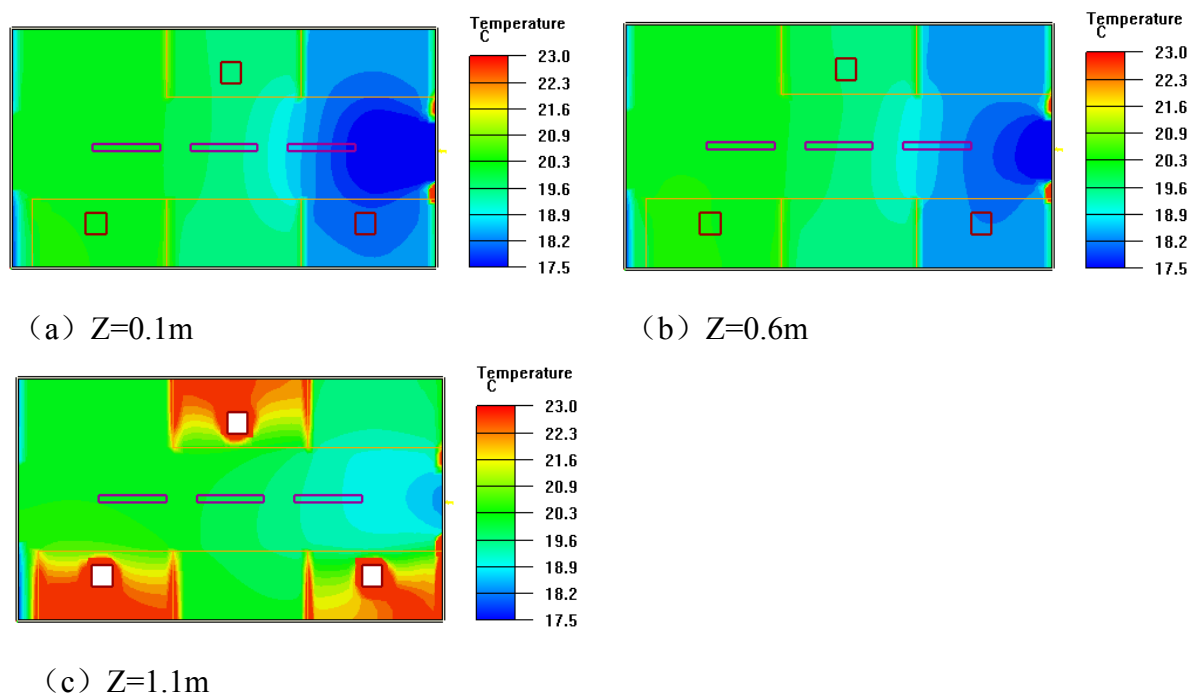


图 26 状况一模拟温度场

以下是信息栏显示的 3 个测点的温度模拟值：

At (3.25, 1.75, 0.1), Temperature =19.5964 °C

At (3.25, 1.75, 0.6), Temperature =19.7249 °C

At (3.25, 1.75, 1.1), Temperature =19.9543 °C

平均值 $T_2 = (19.6 + 19.7 + 20.0) / 3 = 19.8^\circ\text{C}$

根据实测数据，得到 $T_1 = (19.7 + 19.6 + 19.5) / 3 = 19.6$

模拟和实测误差 $d = (T_2 - T_1) / T_1 = (19.8 - 19.6) / 19.6 = 1\% < 5\%$

状况二：

1. 夜晚，不考虑太阳辐射；
2. 阳台窗户全开，入口处门和阳台门上窗紧闭；
3. 宿舍人员为三人，仍然处于静坐状态
4. 三盏顶灯全开，三人的电脑全开；

为了与假设状况对应，选择晚上 21:00 时现场实测结果。同样以 1.1m、0.6m、0.1m 这三个高度中间测点的温度平均值 T_1 作为比较标准，各高度数据取测量 10 分钟后的稳

定数值。模型设定为当时的室外温度 16.3°C ，无风。模拟数值结果取模型中间点三个高度下温度的平均值 T_2 。

模拟结果如下图：

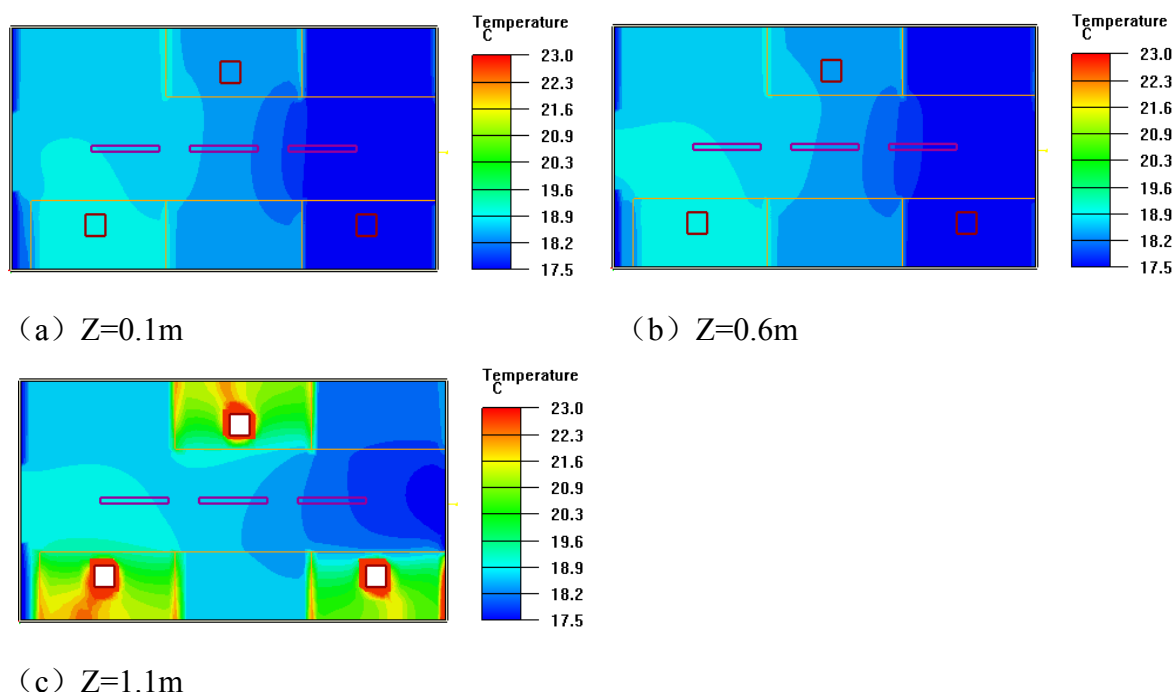


图 27 状况二模拟温度场

以下是信息栏显示的这 3 点的温度模拟值：

At (3.25, 1.75, 0.1), Temperature = 18.529°C

At (3.25, 1.75, 0.6), Temperature = 18.642°C

At (3.25, 1.75, 1.1), Temperature = 18.813°C

模拟所得室内空气温度平均值 $T_2 = (18.5 + 18.6 + 18.8) / 3 = 18.6^{\circ}\text{C}$

根据实测数据，得到 $T_1 = (19.0 + 18.9 + 18.9) / 3 = 18.9^{\circ}\text{C}$

模拟和实测误差 $d = (T_2 - T_1) / T_1 = (18.9 - 18.6) / 18.9 = 1.6\% < 5\%$

通过以上对比可得，白天模拟值高于实测值、夜晚模拟值低于实测值，造成误差的原因可能是模型的简化，低估了实际建筑围护结构的保温隔热功效。并且由于室外温度条件多变、仪器误差等因素，模型对室外温度的敏感度高于实际。但总体模拟和实测误差比较小，未超过 5%。

4.3.2 速度场的验证

对于速度场的验证，我们选取了首层宿舍晚上 21:30 的实测数据。根据实际情况设立了一种状况。

状况三：

1. 宿舍位于首层边缘，阳台门朝北侧，宿舍四周无遮挡；
2. 夜晚，不考虑太阳辐射；
3. 阳台窗户全开，入口处门和阳台门上窗关闭；
4. 宿舍人员为四人，三人均处于静坐状态，一人处于轻微运动状态；
5. 三盏顶灯全开，三人的电脑打开；

测量时，室外瞬时风速为 1.1m/s，方向为西北。因为首层高度未超过 10m，因此当阳台门为 opening 时，风速边界可直接使用室外风速。

模拟结果如下图：

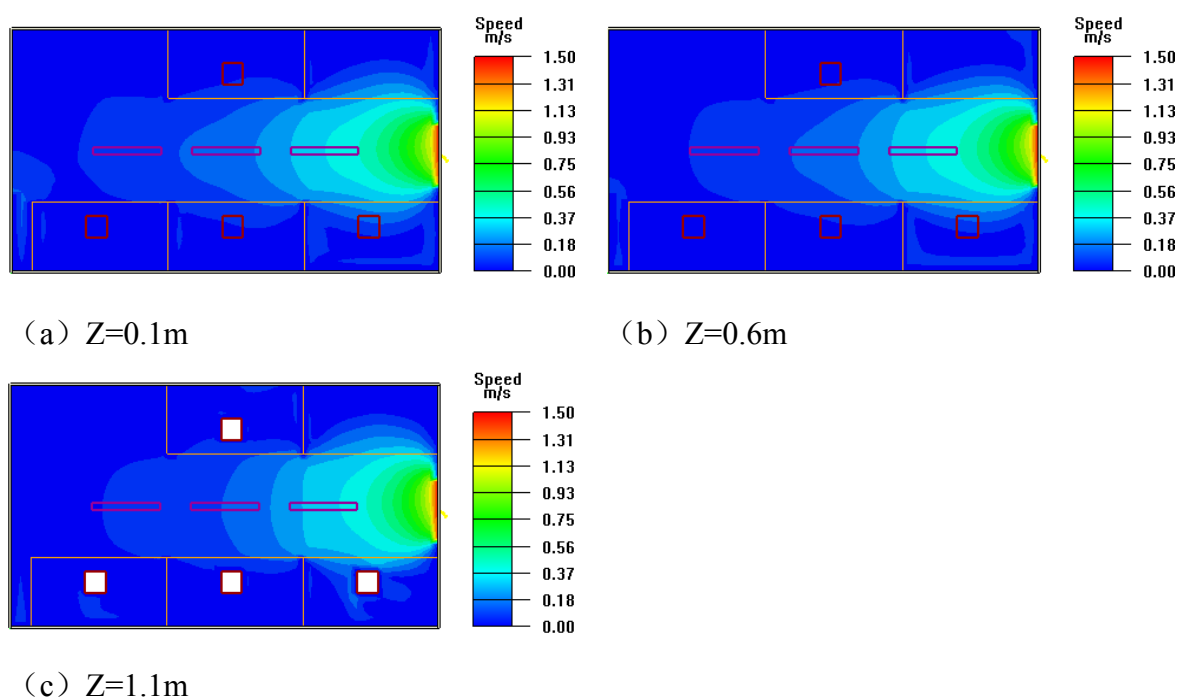


图 28 状况三模拟风速场

以下是信息栏显示的这 3 点的温度模拟值：

At (3.25, 1.75, 0.1), Speed = 0.202865 m/s

At (3.25, 1.75, 0.6), Speed = 0.194986 m/s

At (3.25, 1.75, 1.1), Speed = 0.171205 m/s

模拟所得室内风速平均值 $V_2 = (0.2 + 0.19 + 0.17) / 3 = 0.18 \text{ m/s}$

按照实测数据，1.1m、0.6m、0.1m 处的平均风速分别为：0.15 m/s、0.21 m/s、0.25 m/s。平均值 $V_1 = (0.15 + 0.21 + 0.247) / 3 = 0.20 \text{ m/s}$ 。

模拟和实测误差 $d = (V_2 - V_1) / V_1 = (0.20 - 0.18) / 0.20 = 10\%$

可以看出实验和模拟的误差 d 数值较大。考虑到房间气体流速本身很小，细微的差别也会造成较大误差数值，且实测和模拟风速均在标准推荐的在小于 0.2m/s 范围内，故仍然认为模型的速度场合理。误差产生的原因可能是测量现场人员的活动以及实际室外风速的大小、方向的变化。

4.4 本章小结

本章以 CED 软件理论为基础，对 Airpak 软件参数设置、网格生成、模拟运算等模拟步骤进行了详细介绍。而后，按照现场实际状况设置边界条件，建立了夏热冬暖地区冬季单体宿舍的模型。多次改变模型的模拟状况，利用软件的可视化功能导出宿舍室内各热舒适相关参数的模拟运算结果。通过将结果中的温度场、速度场与现场实测值进行对比，得出误差均小于 10%，最终验证模型是可靠的。

第5章 适应性行为对热舒适的影响

5.1 适应性行为的定义

第二章详细介绍了热舒适的六个影响因素，理论上通过对任意一个影响因素进行调节，人体都有可能达到热舒适的状态。适应性行为指的是人们为了主动创造一个令自身感觉舒适的热环境而产生的一系列行为，它包括人体在有意识或无意识的情况下为适应周围环境所作的调整，这些调整反过来又使主导人体热平衡的热质流动发生改变。适应性行为可以分为个体调节行为（如增加或减少衣物、喝冷饮等）、设施调节行为（如开关门、开启或关闭空调等）和文化习惯（如在炎热的夏天通过午睡降低人体新陈代谢率等）。这些行为的核心是通过改变六个影响因素中的某几个因素来改变热舒适。本研究探究的是适应性行为中的个体调节行为和设施调节行为。

在实际中，当外界环境条件一定的情况下，人们能改变的影响因素很有限，相应措施也不多。冬季深圳大学宿舍多数未配备采暖设备，室内人员一般采用两种方式进行增暖：一是通过控制门窗的开闭来调节室内热环境；二是通过改变活动状态、增加衣物来调节自身对环境的感知。本章以标准的宿舍房间为研究对象，通过施加日常的适应性行为，探究其对热环境及热舒适的影响。

5.2 模拟概况

第四章已经对模型进行了验证，本章将继续使用此模型，选取白天和晚上两种状况作为模型基础值，模拟条件如下：

状况一：

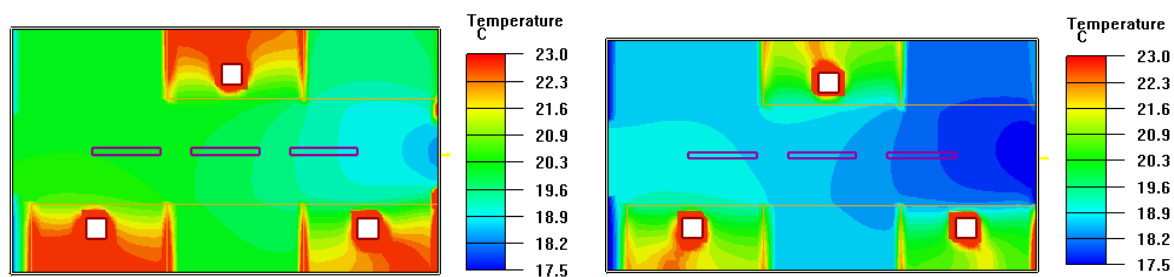
1. 白天，室外温度为 17.5℃，考虑太阳辐射；
2. 阳台门全开，门上窗关闭，入口处门关闭；
3. 宿舍人员为三人，三人均处于静坐状态
4. 三盏顶灯全开，三人的电脑全开；

状况二：

1. 夜晚，室外温度为 16.5℃，无太阳辐射
2. 阳台门全开，门上窗关闭，入口处门关闭；
3. 宿舍人员为三人，三人均处于静坐状态

4. 三盏顶灯全开，三人的电脑全开；

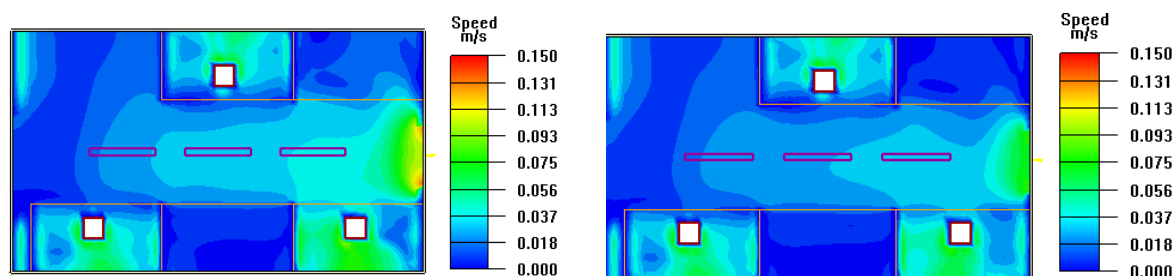
取两类状况在高度 1.1m 处的模拟值，导出云图结果如下：



(a) 白天

(b) 夜晚

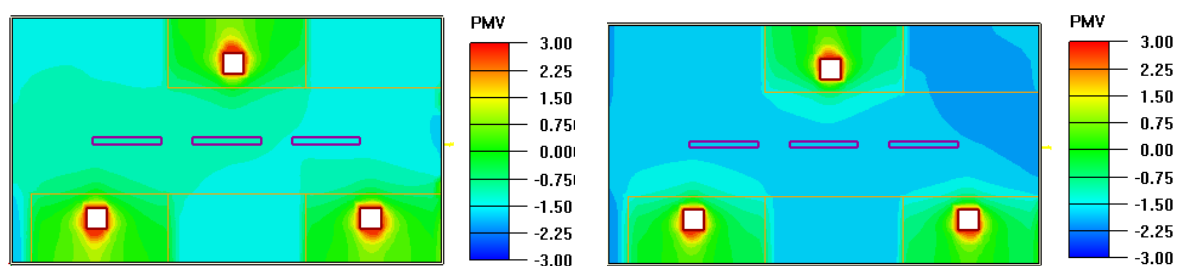
图 29 基础模型模拟温度场



(a) 白天

(b) 夜晚

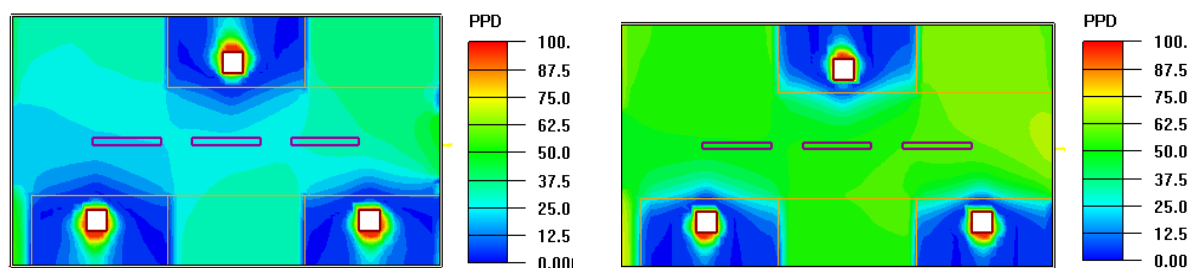
图 30 基础模型模拟风速场



(a) 白天

(b) 夜晚

图 31 基础模型模拟 PMV 场



(a) 白天

(b) 夜晚

图 32 基础模型模拟 PPD 场

5.3 设施调节行为

5.3.1 减小通风口面积

在基础模型中,阳台门按照实际情况由 M1 和 M2 构成,其中辅门 M1 宽 0.2m,不可开启;主门 M2 宽度 1m,两门高度均为 2m。在实测过程中,宿舍阳台门开启状态为全开。但由于冬日室外气温偏低,过大的通风口可能导致人体吹风感过强。因此本小节探讨开门大小对热舒适的影响。

将模型中 M2 设置为半开状态, M1 保持关闭,即形成宽 0.5m,高 2 米的通风口,开口位置位于门洞中央。由于室外风速条件复杂,本文只考虑静态压力通风,下同。模拟结果如下:

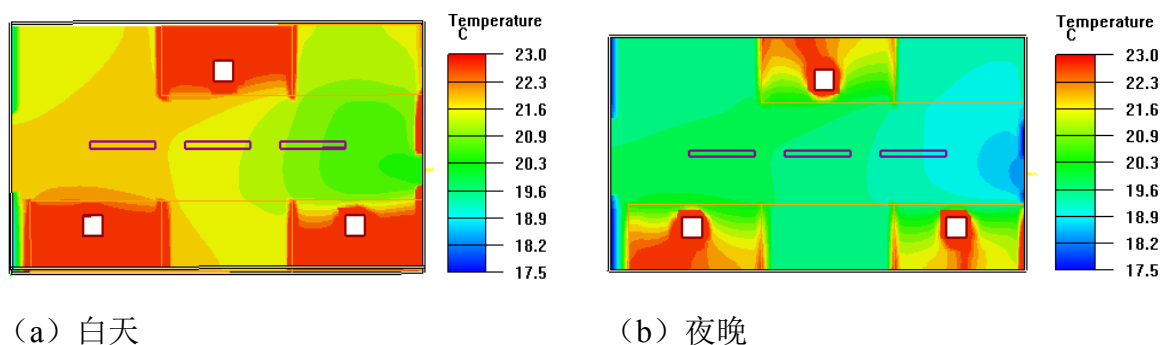


图 33 减小阳台门开口模拟温度场

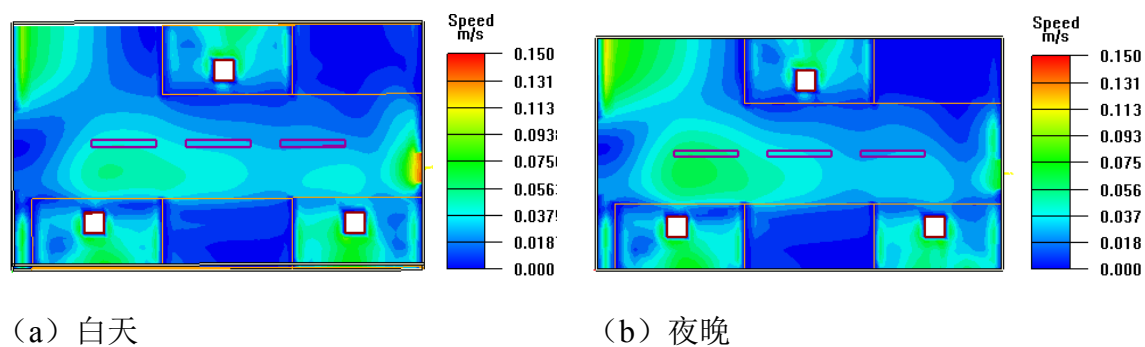


图 34 减小阳台门开口模拟风速场

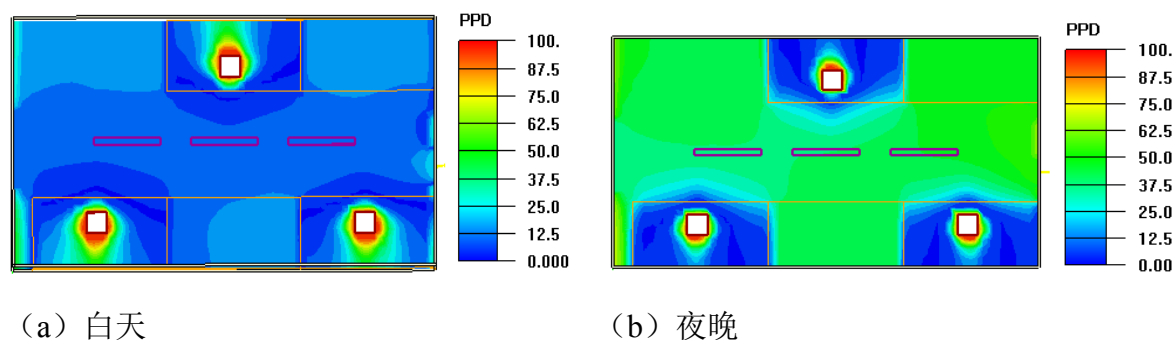


图 35 减小阳台门开口模拟 PPD 场

当减小通风口面积后,改变最明显的因素是温度。白天,温度平均上升 0.7°C ,最大上升了 0.8°C ;夜晚,温度平均上升了 1°C ,最大上升了 1.1°C 。白天室外温度高且有太阳辐射,室内能够通过辐射得热。减小阳台开门大小一方面减少了室内、外空气的热交换;另一方面也由于阳台门的热阻值减少了太阳辐射引起的温升。而夜晚没有太阳辐射,室外温差相对更大。当减小门开口后,室内外空气热量交换过程受阻,有助于室内热量的积蓄,因此夜晚的室内温度的变化值大于白天。

同时,两种状况下的室内空气流速均有所下降,其中高度 0.1m 处风速降低了 0.03m/s 。气体流速情况由基础模型中的低处流速大于高处变为高处流速大于低处。对比改变前后的风速场,减小阳台门开口改变了室内空气流动方式:靠入口处、西南墙角处局部风速明显增加,室外空气可以贯穿整条中间通道,通风更加良好。

表 7 减小通风口面积模拟结果

设置条件	时间	温度 ($^{\circ}\text{C}$)			风速 (m/s)			PMV	PPD (%)
		0.1m	0.6m	1.1m	0.1m	0.6m	1.1m		
基础模型	白天	19.6	19.7	20.0	0.05	0.04	0.04	-0.9	29
	夜晚	18.5	18.6	18.7	0.04	0.03	0.03	-1.5	54
减小阳台门开口	白天	21.4	21.5	21.7	0.02	0.02	0.04	-0.5	15
	夜晚	19.6	19.6	19.7	0.01	0.03	0.04	-1.3	43

表 7 显示,当门开口变小时,白天和夜晚的热舒适均有所增加,但增加程度各有不同。白天状况下 PMV 值上升 0.4,变为-0.5,这意味着人体对此状态下热环境基本感到满意。夜晚状况下 PMV 值上升 0.2,变为-1.3。两种状况下的 PPD 值分别上升了 14%和 11%。PPD 场显示:白天通道处的热环境有所提高;夜晚热环境的分布更均匀,尤其在西北墙角处,PPD 场的色块颜色由明显浅于其他区域变为与其他区域一致。但是夜晚状况下人群中对热环境感到满意的人数比例仍然很低,这说明关门这一行为在夜晚对热舒适的影响程度有限。

总体而言,阳台门由全开状态变为半开状态可以提高室内空气温度,虽然室内空气流速降低,但由于室内温度和气流分布更为均匀,室内人员的热舒适仍有提高。

5.3.2 同侧通风措施

为增加室内通风,阳台门上设计有一扇 $1.2\text{m} \times 0.6\text{m}$ (宽 $\times$ 高) 的玻璃窗。在实际测量过程中,所有被测宿舍的门上窗均未打开。为了验证开启门上窗对室内热舒适的影响,将模型中的窗设置为打开状态。由于门上窗为上推式,开启面积约为窗面积的一半,故在模型中形成 1.2×0.6 (宽 $\times$ 高) 的通风口。阳台门保持全开状态,开口宽度为 1m 。模拟结果如下:

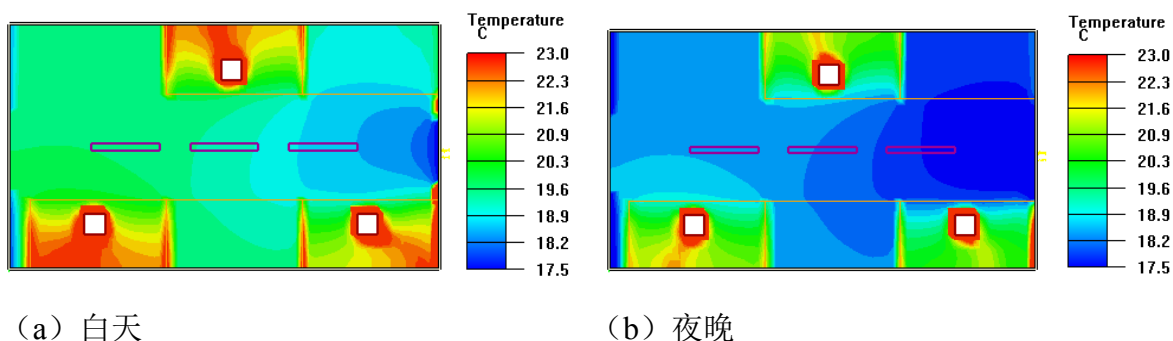


图 36 打开阳台门上窗模拟温度场

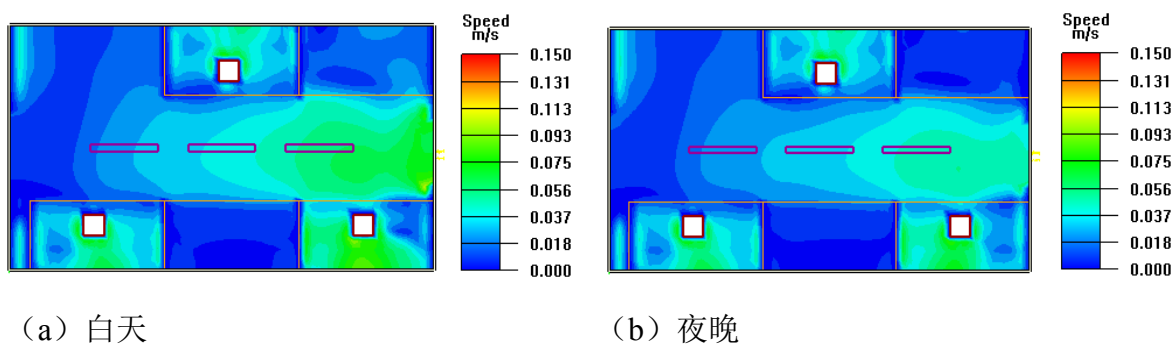


图 37 打开阳台门上窗模拟风速场

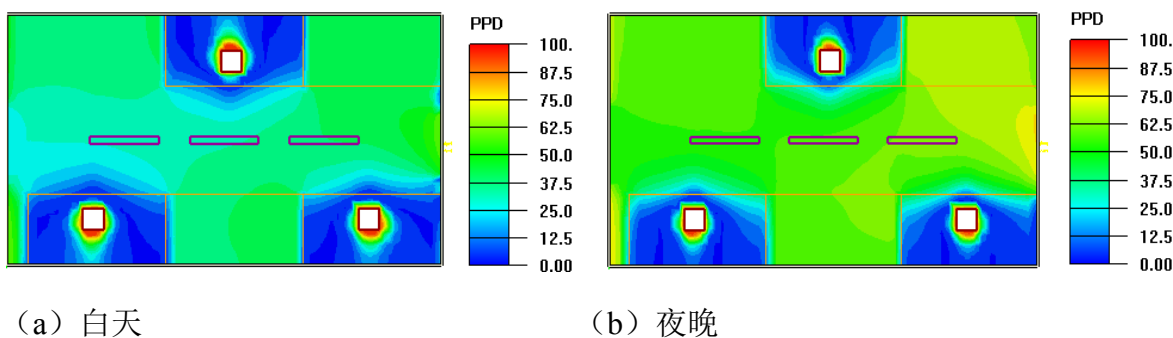


图 38 打开阳台门上窗模拟 PPD 场

由图 36-38 可知, 打开阳台门上窗后, 阳台门及西北墙角处局部温度过低, 在温度场中形成了很大一块蓝色区域。组合床处有绝热隔板, 温度基本不受影响。由于开窗增加了通风口面积, 室内空气流速一定程度上有所增加, 但室内气流分布较基础模型没有太大变化: 越靠近风口的地方气流速度越大, 在未设置热源的组合床隔板中间和远离阳台门窗处风速依旧较小。门上窗和阳台门在一侧属同侧通风, 即使增加了开口面积, 但由于空气循环范围有限, 室外气体依旧不容易到达距离风口较远的地方。在 PPD 场中, 白天和夜晚两种状况下整个室内范围内色块变浅, 说明对室内热环境感到不舒适人数比例增加。

表 8 模拟打开阳台门上窗结果

设置条件	时间	温度 (°C)			风速 (m/s)			PMV	PPD (%)
		0.1m	0.6m	1.1m	0.1m	0.6m	1.1m		
基础模型	白天	19.6	19.7	20.0	0.05	0.04	0.04	-0.9	29
	夜晚	18.5	18.6	18.7	0.04	0.03	0.03	-1.5	54
打开阳台门上窗	白天	19.1	19.2	19.4	0.06	0.05	0.04	-1.1	36
	夜晚	18.1	18.2	18.3	0.05	0.04	0.04	-1.6	58

表 8 显示, 白天状况下室内温度平均下降 0.5°C , 其中高度 1.1m 处下降了 0.6°C , PPD 升高了 7%, 而 PMV 降低到了 -1.1。夜晚状况下室内温度平均下降 0.4°C , PPD 升高到了 4%, PMV 降低到了 -1.6, 相比之下打开阳台门上窗对夜晚热舒适的影响程度小。

由上结果可知, 打开阳台门上窗对整个宿舍范围内的通风帮助不大, 还容易加剧室内热环境分布不均, 引起局部温度过低或者风速过小。同时, 室内、外空气热量交换的增加还会导致室内温度的降低, 这两者都会造成室内人员热舒适的降低。因此, 打开阳台门上窗在冬季不适宜作为增暖措施。但考虑到该行为可以增加室内风速, 对夜间热舒适影响较小, 如果想要增加室内空气流通而又不方便开其他通风设备的情况下, 可以作为夜间通风方式。

5.3.3 对流通风措施

入口处门也由 $0.2\text{m}\times 2\text{m}$ (宽 $\times$ 高) 的辅门和 $1\text{m}\times 2\text{m}$ 的主门构成。根据对宿舍通风方式的调查, 一些宿舍为了增加室内通风, 会将入口处门和阳台门同时打开, 以形成空气对流。按照习惯, 将模型中入口处主门设为打开状态, 辅门关闭, 通风口大小为 $1\text{m}\times 2\text{m}$ 。阳台门保持全开。模拟结果如下:

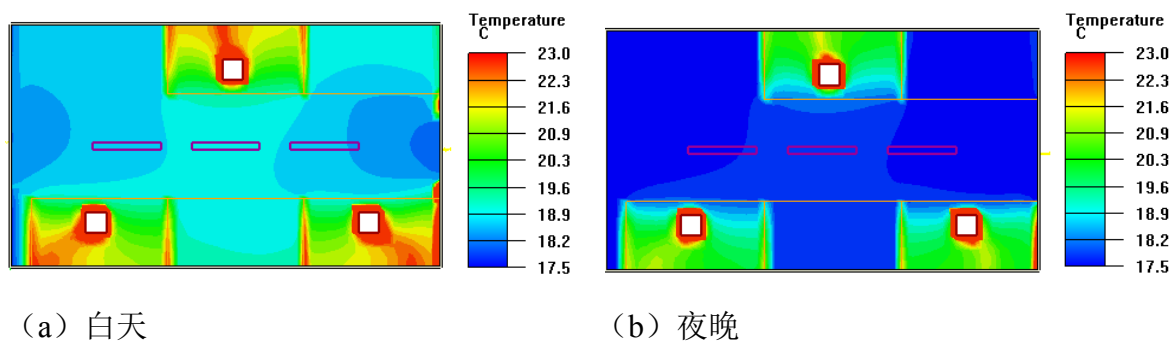


图 39 打开入口处门模拟温度场

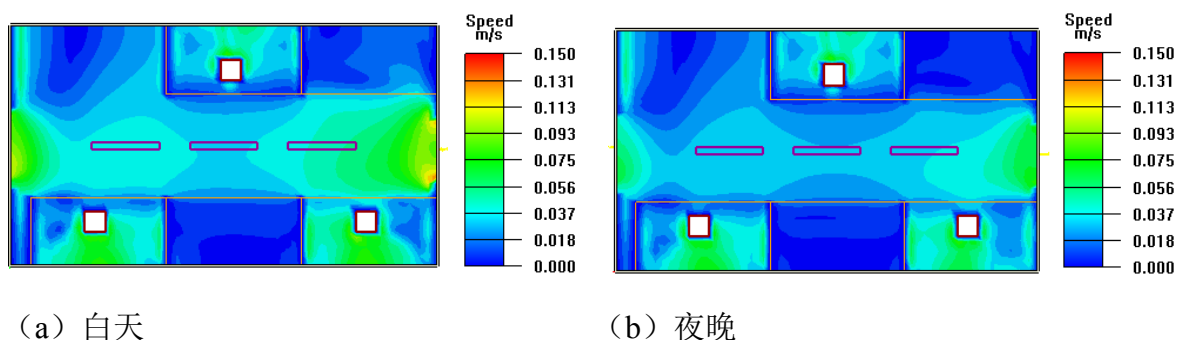


图 40 打开入口处门模拟风速场

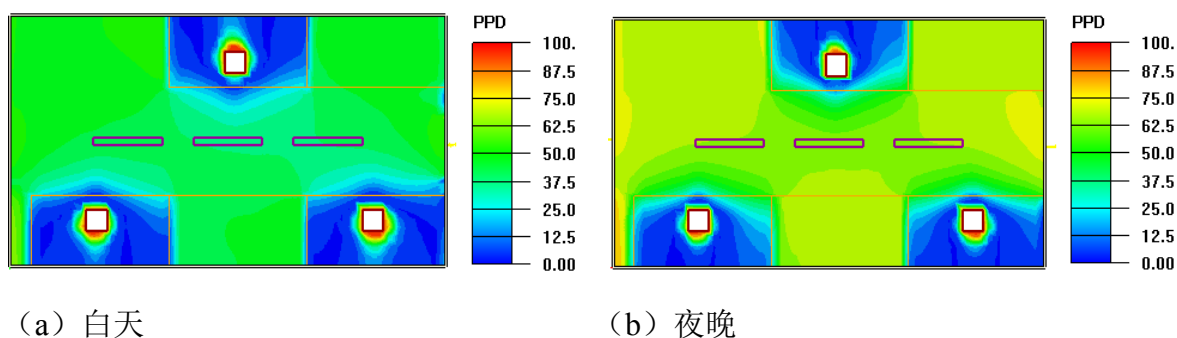


图 41 打开入口处门模拟 PPD 场

打开入口出门和阳台门后,整个室内范围内温度下降,在白天时段平均下降 0.7°C ,夜晚时段平均下降 0.8°C 。如夜晚的温度场所示,除组合床外夜晚状况下室内整体温度过低。组合床处和其他地方的温度差值变大,约为 2.5°C 。

将入口处门为开启状态后,白天和夜晚的室内气流分布变得很相似,相较基础模型变化较大。室内整体气流分布为:靠两边门处风速较大,到中间处风速逐渐减小,整条过道风速值较为平均。这说明室外风可以贯穿整条过道,室内通风较好。但是表 9 显示两种情况下的室内风速值略有下降。风速平均下降 0.02m/s ,其中 0.1m 处下降 0.04m/s 。这是因为房间两侧形成对流,室外空气从通道贯穿而出,带走了室内的热量。降低了室内外温差,导致空气流速减小。

表 9 打开入口处门模拟结果

设置条件	时间	温度 (°C)			风速 (m/s)			PMV	PPD (%)
		0.1m	0.6m	1.1m	0.1m	0.6m	1.1m		
基础模型	白天	19.6	19.7	20.0	0.05	0.04	0.04	-0.9	29
	夜晚	18.5	18.6	18.7	0.04	0.03	0.03	-1.5	54
打开入口处门	白天	18.9	18.9	19.0	0.01	0.03	0.04	-1.2	41
	夜晚	17.8	17.8	17.9	0.01	0.02	0.03	-1.7	65

如表 9 所示,同时打开阳台门和入口处门对热舒适有较大的负面影响。白天状况下 PMV 值降低了 0.6, PPD 更是由 29%变为了 54%;夜晚状况下 PMV 降低了 0.2, PPD 降低了 11%。这说明此种适应性行为对白天的热舒适会造成较大影响。由此可见,虽然两扇门对开时室内热环境更为均匀,室内的通风效果好,可用于宿舍整体通风。但为防止穿堂风带走大量室内热量,冬季应避免此类通风方式。

5.4 个体调节行为

第三章对受试者采取的增暖措施进行了统计,结果显示 90%的人选择增添衣物,66%的受试者选择喝热饮。除此之外,还有部分人通过适度运动、泡脚等方式让身体“暖起来”。这些行为对应的是热舒适影响因素中的衣物热阻和新陈代谢率。本节将通过改变模型设置中人体的衣物热阻和新陈代谢率,分别探究这些行为对热舒适的影响。

5.4.1 改变衣物热阻

1.衣物热阻 $\text{clo}=1.0$ 时:

白天状况下模型输出结果为:

$\text{CLO} = 1.0, \text{MET} = 1.0,$

$\text{PMV: min} = -2.15147, \text{max} = 3, \text{mean} = -0.749908,$

$\text{PPD: min} = 5, \text{max} = 99.1159, \text{mean} = 21.9735,$

夜晚状况下模型输出结果为:

$\text{CLO} = 1.0, \text{MET} = 1.0,$

$\text{PPD: min} = 5, \text{max} = 99.1159, \text{mean} = 42.2941,$

$\text{PMV: min} = -2.40998, \text{max} = 3, \text{mean} = -1.2488,$

2.衣物热阻 $\text{clo}=1.2$ 时,

白天状况下模型输出结果为:

CLO = 1.2, MET = 1.0,

PMV: min = -1.64342, max = 3, mean = -0.431702,

PPD: min = 5, max = 99.1159, mean = 12.9982,

夜晚状况下模型输出结果为:

CLO = 1.2, MET = 1.0,

PMV: min = -1.88479, max = 3, mean = -0.879682,

PPD: min = 5, max = 99.1159, mean = 25.5217,

改变衣物热阻对 PMV、PPD 影响总结如下:

表 10 增添衣物模拟结果

设置条件	时间	衣物热阻	新陈代谢率	PMV	PPD
基础模型	白天	0.9	1	-0.9	29
	夜晚	0.9	1	-1.5	54
增添衣物	白天	1	1	-0.7	22
	夜晚	1	1	-1.2	42
	白天	1.2	1	-0.4	13
	夜晚	1.2	1	-0.9	26

根据第三章的统计, 39.1%的受试者衣物热阻在 0.8~1.0 之间, 23.5%的受试者衣物热阻在 1.0 至 1.2 之间。clo=1.0 是一般冬季热舒适研究中衣物热阻的默认值, clo=1.2 代表宿舍内人员衣物热阻普遍分布区间的最大值。在静坐条件下 (met=1.0), 将衣物热阻从 0.9clo 增加至 1.0clo, 衣物热阻值上升 0.1clo, 白天和夜晚 PMV 值分别上升 0.2、0.3, PPD 分别下降 8%、12%; 将衣物热阻从 0.9clo 增加至 1.2clo, 衣物热阻值上升 0.3clo, 白天和夜晚 PMV 上升 0.5、0.6, PPD 下降 16%、18%。对比衣物热阻为 1.0 和衣物热阻为 1.2 两种情况, 衣物热阻上升 0.2clo, PMV 均上升 0.3, 白天 PPD 减少 9%, 夜晚 PPD 减少 16%。

由此可见, 增加衣物热阻对个体热舒适的提升效果明显, 尤其是对夜晚状况。但是其效果随着衣物热阻的增加而减少。所以, 在夜晚状况下, 当衣物热阻值低于或处于标准情况时, 增加衣物是极佳的提升热舒适的方式。

5.4.2 改变新陈代谢

在宿舍中，同学们的活动状态多为静坐，因此新陈代谢率的基础设置为 1.0。适当增加活动水平会提高人体的新陈代谢，现将新陈代谢率设置为 1.2，得到的结果如下：

白天状况下模型输出结果为：

CLO = 0.9, MET = 1.2,

PMV: min = -1.60479, max = 3, mean = -0.38645,

PPD: min = 5, max = 99.1159, mean = 11.9051,

夜晚状况下模型输出结果为：

CLO = 0.9, MET = 1.2,

PMV: min = -1.82269, max = 3, mean = -0.813449,

PPD: min = 5, max = 99.1159, mean = 22.8361,

改变新陈代谢率对 PMV、PPD 影响总结如下：

表 11 改变活动状态模拟结果

设置条件	时间	衣物热阻	新陈代谢率	PMV	PPD (%)
基础模型	白天	0.9	1	-0.9	29
	夜晚	0.9	1	-1.5	54
增加新陈代谢率	白天	0.9	1.2	-0.4	12
	夜晚	0.9	1.2	-0.8	23

表 11 结果显示，增加活动水平对热舒适的提高效果明显。当活动状态由静坐变为站着休息或者坐着进行打字等轻微活动时，新陈代谢率提高 0.2。白天状况下 PMV 值由 -0.9 升至 -0.4，PPD 减少 17%；而在夜晚，PMV 值增加 0.7，PPD 值下降 25%，可见该行为对夜晚的热舒适提升更大。

在现场问卷调查中，有 89.6%的人选择通过“多穿衣物”来增暖，但只有 17.8%的人选择“适度运动”。由上结果可知，新陈代谢率和衣物热阻都会对热舒适造成很大影响，且提高新陈代谢率对热舒适的提升作用优于多穿衣物。在夏热冬暖地区的冬季，当宿舍内人员没有其他手段改变热环境时，增加衣物或增加活动强度就可以帮助人体达到热舒适状态。

5.5 本章小节

本章根据现场调查结果选取冬季宿舍内人员常见的适应性行为：开门、开窗、增加衣物、改变活动状态，通过改变模型参数设置，量化了热适应行为对室内温度、风速的改变，进一步探究了热适应行为对评价人体热舒适的 PMV、PPD 指标的影响。最终得出结论：开门开窗等适应性行为不能有效地提高室内人体热舒适。因为形成同侧、对流通风不能提高室内风速，反而会造成室内温度的下降，且开阳台门上窗还容易加剧室内热环境分布不均。而减少通风口面积如将阳台门由全开改为半开可以通过减少室内外热量交换有效地增加室内热舒适，但最为有效的增暖方式是增加衣物和提高活动水平。由于设施调节行为对白天状况下的热舒适影响更大，个体调节行为对夜晚状况下的热舒适影响更大，人员应根据不同的需求和时间段选择适合的热适应性行为。

结论与展望

本文运用现场测量、问卷调查、软件模拟三种方式,选取深圳大学学生宿舍为研究对象,探究夏热冬暖地区高校宿舍冬季室内热舒适,现得到以下研究结论:

现场测量部分,深圳冬季室外温度在 $16^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间,所测乔梧阁、秋瑟和2#楼宿舍室内温度区间为 $17.5^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$,且所处楼层越高,冬季同时段温度越低。通过对比三栋楼内受试者的热感觉投票值,本文发现由于长期处在温暖的环境中,受试者还不能适应冬季的低温环境,从心理上期望室内温度更高一些。由于深圳地区空气湿润,室内相对湿度长期处在70%-85%之间。受试者已经基本适应了夏热冬暖地区潮湿的环境,对湿度条件有较高的容忍度。同时,虽然宿舍室内风速普遍过小,室内空气流通不好还导致了室内二氧化碳浓度偏高。但受试者对室内空气流通情况接受度较高。不过绝大多数受试者仍期望室内风速增加,这是因为室内风环境为“有吹风感”(投票值为1)是受试者心中的理想状态。通过问卷调查和对现场人员的观察,本文还总结出该地区冬日的一般穿着:上衣为加厚外套+长袖衬衣/秋衣;下装为运动裤/牛仔裤+凉拖鞋+薄短袜。计算上内衣和座椅的热阻值,总体衣物热阻值为0.91。

模拟研究部分,当阳台门由全开状态变为半开状态时,室内温度和气流分布更为均匀,室内人员的总体热舒适有所提高。当阳台门上窗与阳台门同为打开状态时,室内形成同侧通风。该种通风虽能增加室内风速,但对整个宿舍范围内的通风帮助不大,还容易加剧室内热环境分布不均,最终造成室内人员的热不舒适。当入口处门与阳台门同为打开状态时,室内形成对流通风,室外风贯穿整条过道使得过道区域风速分布均匀,但整个室内范围内温度和风速均有下降。因此,减小阳台门开口可作为冬季增暖措施;打开阳台门上窗在冬季可以作为夜间通风方式,但不适宜用作增暖;打开入口处门两者均不适宜。个体调节行为模拟显示,增加衣物对个体热舒适的提升效果明显,但是其效果随着衣物热阻的增加而减少。提高活动水平对热舒适的提升作用优于增加衣物。二者对夜晚状况下的热舒适影响更大。综上所有适应性行为,冬季最为有效的增暖方式是增加衣物和提高活动水平。

总体而言,受试者对冬季宿舍室内热环境的总体感觉为“有点不满意”。虽然室内物理环境参数不符合标准,受试者也感觉到了一定的不舒适性,但是他们主观上还是能接受其所处的热环境。并且环境参数值偏离中性状态越远,受试者改变环境的期望越大。在夏热冬暖地区的冬季,绝大多数受试者通过行为对室内热环境进行调节。其中同侧和

对流通风措施可以增加室内通风,推荐作为夜间通风方式,减小阳台门开口可作为增暖措施。当宿舍内人员不能通过调节设施改变室内热环境时,增加衣物或增加活动强度可以通过改变人体对热环境的感知而帮助人体达到热舒适状态。由于设施调节行为对白天状况下的热舒适影响更大,个体调节行为对夜晚状况下的热舒适影响更大,同学们应根据不同时间段和自身需求选择适合的热适应性行为。

结合本研究存在的不足,笔者认为未来可以从以下几个方面入手对宿舍室内热舒适作进一步探究:

(1) 本研究由于客观条件限制,研究对象仅限于深圳大学,测试的宿舍数量较少、样本量不足。未来可以对夏热冬暖地区多个城市、多所高校进行研究,使实验数据更具指导意义。

(2) 本研究从温度、湿度、风速等传统的因素入手,通过宿舍室内物理环境参数对人体热舒适进行评价,没有考虑这些因素对人的心理和感知造成的影响。接下来可以关注人员对热环境的期望、自身热经历、态度等心理因素对热舒适的影响。

(3) 在运用 Airpak 软件时,本研究只模拟了人员对门窗进行开关等基础操作对冬季室内热舒适影响,未来可以增加模拟不同的操作方式如细分门窗开启大小、开启时间段、开启时长。还可以模拟使用除湿、采暖设备等其他适应性行为对冬季室内热舒适的影响。

参 考 文 献

- [1] 吕留根,王雅丽,张培,等.洛阳某高校宿舍热环境调查与评价[J].建筑节能,2010(10):15-17.
- [2] Partridge R C, MacLean D L. Determination of the Comfort Zone for School Children[J]. Journal of Industrial Hygiene, 1935, 17: 66-71.
- [3] Jendritzky G. The assessment of the thermal environment[J]. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg, 2008, 17: 153-164.
- [4] 刘念雄, 秦佑国. 建筑热环境[M]第一版.北京: 清华大学出版社, 2005: 87-96
- [5] Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. Thermal comfort: A review paper[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(9): 2626-2640.
- [6] Gagge A P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. Ashrae Trans., 1971, 77: 247-262.
- [7] Fanger P O. Moderate Thermal Environments Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort[J]. ISO 7730, 1984.
- [8] Hamdi M, Lachiver G, Michaud F. A new predictive thermal sensation index of human response[J]. Energy and Buildings, 1999, 29(2): 167-178.
- [9] Humphreys M A, Nicol J F. Outdoor temperature and indoor thermal comfort: Raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies/Discussion[J]. Ashrae Transactions, 2000, 106: 485.
- [10] 纪秀玲, 李国忠, 戴自祝. 室内热环境舒适性的影响因素及预测评价研究进展[J]. 卫生研究, 2003, 32(3):295-299.
- [11] 李百战.空调动态负荷计算机方法的研究[J].重庆建筑工程学院学报,1986(02):74-80.
- [12] 文学军,赵荣义.稳态热环境人体热感觉的模糊综合评判[J].清华大学学报(自然科学版),1998(07):95-98.
- [13] 文学军, 赵荣义. 动态热环境人体热感觉的模糊综合评判[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998(5):5-6.
- [14] Li P W, Chan S T. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong[J]. Meteorological Applications, 2000, 7(4): 369-375.

- [15] 牛萌萌, 宣永梅, 毛灿. 高校建筑夏季室内热环境研究现状与应用[J]. 绿色科技, 2016(2):97-101.
- [16] 乔慧, 庞菲菲. 西安某高校学生公寓冬季室内热环境实测分析[J]. 山西建筑, 2007, 33(36):198-200.
- [17] 万勇, 唐中华, 晏旺. 四川盆地地区高校学生宿舍冬季室内热环境研究[J]. 绿色建筑, 2015(4):50-53.
- [18] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007:18-27.
- [19] Liuzhi Chen, Xiaoning Xu, Hanwei Liu. The Energy Efficiency Reconstruction and Energy Consumption Assessments about a Library in Guangzhou[J]. Advanced Material Research, 2012, (374-377): 672-676.
- [20] 林进鹏, 方赵嵩. 广州地区学生公寓建筑能耗模拟分析[J]. 建筑节能, 2015(8):68-71.
- [21] Kini P, Garg N K, Kamath K. Exploring Energy Conservation in Office Buildings with Thermal Comfort Criterion towards Sustainable New Developments in Warm and Humid Climate[J]. Energy Procedia, 2017, 111: 277-286.
- [22] Chen Q, Srebric J. Application of CFD tools for indoor and outdoor environment design[J]. International Journal on Architectural Science, 2000, 1(1): 14-29.
- [23] Clements-Croome D J, Awbi H B, Bakó-Biró Z, et al. Ventilation rates in schools[J]. Building and Environment, 2008, 43(3): 362-367.
- [24] Buratti C, Ricciardi P. Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models[J]. Building and Environment, 2009, 44(4): 674-687.
- [25] Hwang R L, Lin T P, Kuo N J. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(1): 53-62.
- [26] Wang Z, Li A, Ren J, et al. Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin[J]. Energy and Buildings, 2014, 77: 192-196.
- [27] 何梅, 张进. 高校餐饮建筑夏季室内热环境调研[J]. 建筑节能, 2015, 43(4): 107-110.
- [28] 张玲玲. 高校食堂餐厅物理环境现状及设计策略研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015:1-108.
- [29] 李建颖. 西安市高校体育馆夏季室内热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014:1-90.
- [30] 杨薇, 张国强. 湖南某大学校园建筑环境热舒适调查研究[J]. 暖通空调, 2006, 36-37.

- [31] 夏博. 高校学生公寓室内热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.1-81.
- [32] 司凌燕. 西安地区大学宿舍人体热舒适与热适应行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017:1-68.
- [33] 王琳. 重庆市高校学生宿舍热环境研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.40-53.
- [34] 张启宁. 合肥地区高校宿舍室内热环境研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012:1-57.
- [35] Blagden C. XLVII. Further experiments and observations in an heated room[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1775 (65): 484-494.
- [36] American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers, et al. Thermal environmental conditions for human occupancy[M]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004.
- [37] Kim J, Schiavon S, Brager G. Personal comfort models—A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control[J]. Building and Environment, 2018, 132: 114-124.
- [38] De Dear R, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. 1998.
- [39] Humphreys M A, Rijal H B, Nicol J F. Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database[J]. Building and environment, 2013, 63: 40-55.
- [40] Gauthier S, Shipworth D. Behavioural responses to cold thermal discomfort[J]. Building Research & Information, 2015, 43(3): 355-370.
- [41] 晏旺. 绵阳现有高校学生宿舍室内热舒适研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015:6-15.
- [42] Fang L, Clausen G, Fanger P O. Impact of temperature and humidity on perception of indoor air quality during immediate and longer whole - body exposures[J]. Indoor Air, 1998, 8(4): 276-284.
- [43] Parsons K. Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance[M]. CRC press, 2014.
- [44] Goto T, Toftum J, de Dear R, et al. Thermal sensation and thermo-physiological responses to metabolic step-changes[J]. International journal of Biometeorology, 2006, 50(5): 323-332.
- [45] 马倩. 夏热冬暖地区校园建筑的热舒适研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011:7-13.
- [46] Zomorodian Z S, Tahsildoost M, Hafezi M. Thermal comfort in educational buildings: A review article[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 59: 895-906.

- [47] Schellen L, van Marken Lichtenbelt W D, Loomans M, et al. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady - state condition[J]. *Indoor air*, 2010, 20(4): 273-283.
- [48] Katafygiotou M C, Serghides D K. Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2014, 13: 303-312.
- [49] Karjalainen S. Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments[J]. *Building and environment*, 2007, 42(4): 1594-1603.
- [50] Peng C. Survey of thermal comfort in residential buildings under natural conditions in hot humid and cold wet seasons in Nanjing[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2010, 4(4): 503-511.
- [51] Tao P. The thermal sensation difference between Chinese and American people[J]. *Indoor air*, 1991, 4: 699-703.
- [52] 陈城. 夏热冬暖地区综合商场功能区冬季热舒适性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016:41-53.
- [53] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 第4版.北京: 中国建筑工业出版社, 2016:134-135.
- [54] 杨茜. 寒冷地区室内热舒适研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010:17-30.
- [55] 阴壮琴, 尚春静, 李小冬, 等. 我国湿热地区自然通风学生公寓冬季热舒适研究——以海口为例[J]. *暖通空调*, 2015(10):104-109.
- [56] 刘晶. 夏热冬冷地区自然通风建筑室内热环境与人体热舒适的研究[D]. 重庆大学, 2007:35-39.
- [57] Nicol F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics[J]. *Energy and buildings*, 2004, 36(7): 628-637.
- [58] 曹彬. 气候与建筑环境对人体热适应性的影响研究[D].北京: 清华大学,2012:1-127.
- [59] 杨冬兰. 温和地区居住建筑冬季室内热环境及人体热舒适研究[D].昆明理工大学,2018:18-19.
- [60] Nielsen P V, Restivo A, Whitelaw J H. The velocity characteristics of ventilated rooms[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1978, 100(3): 291-298.
- [61] 师奇威,贾代勇,杜雁霞.CFD 技术及其应用[J].*制冷与空调*,2005(06):14-17.
- [62] 林晨. 自然通风条件下传统民居室内外风环境研究[D]. 西安建筑科技大学, 2006:11-20.

- [63] 王福军.计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.9.
- [64] 樊振国. 室内自然通风模拟分析及评价[D].天津:天津大学, 2007:23-47.
- [65] 何志霞 王谦 袁建平. 热流体数值计算方法与应用[M].北京:机械工业出版社, 2014.240-255.
- [66] 李志强. 燃烧过程辐射换热离散坐标模型的应用[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2):320-325.
- [67] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M].第 2 版.北京:建筑工业出版社,1993.46-55.

附录 1

附表 1 常见活动的人体新陈代谢率

活动类型	W/m ²	Met
睡眠	40	0.7
躺着	46	0.8
静坐	58.2	1
站着休息	70	1.2
做简单家务	154.6	2.66
静坐阅读	55	1
打字	65	1.1
站着, 偶尔走动	123	2.1
跳操/训练	174~235	3.0~4.0
步行, 0.9m/s	115	2
步行, 1.2m/s	150	2.6
步行, 1.8m/s	220	3.8
跑步, 2.4m/s	366	6.29
下楼	233	4
上楼	707	12.1

附录 2

附表 2 常见衣物热阻值

衣物		热阻
上装	内穿	内衣裤
		背心
		T 恤
		秋衣
		保暖内衣
	上衣	毛背心
		线衫
		薄毛衣
		厚毛衣
		夹克
	外套	休闲外套
		风衣
		棉服
		羽绒服
		秋裤
		牛仔裤
下装	裙、裤	运动裤
		加绒长裤
		棉裤
		半身裙
		冬连衣裙
	袜子	短款薄袜
		长款薄袜子
		短款厚袜子
		长款厚袜子
	鞋子	凉拖鞋
		棉拖鞋
		运动鞋
		皮鞋
		靴子

附录3

深圳大学宿舍室内热舒适调查

你好，我是土木工程学院管理科学专业研三的学生，正在进行深圳大学学生宿舍的热舒适情况调查。问卷获得的所有信息均用于我的毕业论文，不涉及隐私和除学术外的用途，请放心按照实际情况填写。

非常感谢你的支持！

一、基本信息

- 1.时间：____月____日____☐AM / ☐PM
- 2.性别：☐男 ☐女 学历：☐本科 ☐硕士 ☐博士
- 3.家乡：____省____市；在深圳____年
- 4.宿舍楼：____（楼名+楼号）；
- 5.冬季你在宿舍的全部衣着：（多选）

上装	☐ 背心 ☐ T恤 ☐ 秋衣 ☐ 保暖内衣 ☐ 毛背心 ☐ 线衫 ☐ 薄毛衣 ☐ 厚毛衣 ☐ 薄外套 ☐ 加厚外套 ☐ 棉服 ☐ 羽绒服
下装	☐ 秋裤 ☐ 薄长裤 ☐ 加绒长裤 ☐ 棉裤 ☐ 半身裙* ☐ 冬连衣裙*
鞋袜	☐ 薄袜子 ☐ 厚袜子 ☐ 凉拖鞋 ☐ 棉拖鞋 ☐ 棉鞋 ☐ 靴子
其他	☐ 帽子 ☐ 手套 ☐ 围巾

二、宿舍冬季室内热环境调查

1.你觉得宿舍室内温度

很冷	冷	有点冷	适中	有点热	热	很热
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

2.你希望宿舍内温度如何变化？

☐高一些 ☐低一些 ☐不变

3.你觉得宿舍室内空气流动感觉

很闷	闷	稍微有点闷	适中	微微有吹风感	有吹风感	吹风感很强
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

4.你希望宿舍内空气流动如何变化？

☐高一些 ☐低一些 ☐不变

5.你觉得宿舍室内空气湿度

很潮湿	潮湿	有点潮湿	适中	有点干燥	干燥	很干燥

6. 你觉得宿舍室内空气质量

很不满意	不满意	不太满意	可接受	比较满意	满意	非常满意

7. 你对宿舍冬季室内热环境的总体满意程度

很不满意	不满意	不太满意	可接受	比较满意	满意	非常满意

三、冬季适应性行为调查

1. 在宿舍里的主要活动情况:

☐躺着 ☐坐着休息 ☐坐着活动 ☐站着休息 ☐站着活动

2. 个人是否有以下采暖设施: (可多选)

☐电热毯 ☐暖风扇 ☐电取暖器 ☐热水袋、暖宝宝
☐暖手、脚器 ☐制热空调 ☐无

3. 冬季每日开窗(阳台门)时间:

☐全天 ☐睡觉时关闭其他时间开启 ☐只有感到不舒适时 ☐从不

4. 开门窗(阳台门)程度:

☐全开 ☐开一部分 ☐留一小缝 ☐间歇开启 ☐全关

5. 你采用何种保暖措施: (可多选)

☐喝热饮 ☐适度运动 ☐多穿衣服 ☐泡脚 ☐洗澡 ☐开采暖设备

6. 在下列影响宿舍冬季室内热舒适度的因素里, 你认为最重要的是

☐室内温度 ☐室内湿度 ☐室内吹风感 ☐个人着装 ☐人体活动

9. 你觉得为了提升冬季热舒适, 应该做何改进? _____

致 谢

首先，感谢我的导师李昇翰。在撰写毕业论文期间，论文的选题、准备、写作、修改等各个阶段，他都给予我悉心的指导和竭诚的帮助；在我迷茫、灰心、沮丧的时候，他不断鼓励我，给予我极大的支持。李老师在研究生阶段的三年里对我孜孜不倦地教诲，他的严谨、平等、宽厚让我在治学与为人处世等方面受益匪浅。在此再次向李老师致以诚挚地感谢！

感谢课题组贾俊韬师兄、吴松师兄对我研究生期间给予的指导和照顾；感谢我的同窗好友姜梦婷、代单、刘寒、王贝和我一起经历，一起成长；感谢我的同门刘磊、郑宏业、吴宇琳、邓丽君和温振雄等对我论文的帮助。因为你们，我的研究生生涯过得格外地充实和快乐。

特别感谢我的父母，谢谢你们无怨无悔的付出和默默支持。你们无私的爱，是我在人生的道路上披荆斩棘、奋勇前行的最大动力。在此，祝愿你们身体健康、平安幸福。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。研究生生活即将结束，人生之路才刚刚展开。愿走出半生，归来仍是少年；愿心之所向，我们能坚定前行！

最后，衷心感谢在百忙之中抽出时间评阅本论文和参加答辩的各位专家、教授！

攻读硕士学位期间取得的研究成果附录

- [1] 李昇翰, 曹丹纶, 吴松. 基于生命周期评价理论的施工碳排放研究——以深圳大学新建学生宿舍为例. 广东建材, 2018, 34(08): 45-48.
- [2] 李昇翰, 曹丹纶. 国内高校建筑热环境现场研究的现状与展望. 建筑热能通风空调, 2019. (已录用)