

室内空气环境评价与控制

SHINEIKONGQIHUANJINGPINGJIA YUKONGZHI

“十二五”国家重点图书出版规划项目



环境科学与技术系列图书

王昭俊 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
环境科学与技术系列图书

室内空气环境评价与控制

王昭俊 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

室内热环境和室内空气品质不仅影响人体的热舒适性,还影响人体的健康与工作效率。本书融入了作者的科研成果,涉及室内空气环境评价与控制方向的研究热点和前沿问题,重点介绍室内空气环境的研究方法、基本理论、评价方法、评价标准及控制技术等内容。本书共分6章,包括绪论、热舒适研究与评价、室内空气品质研究与评价、区域模型和网络模型用于室内空气环境模拟、室内空气环境 CFD 模拟和基于 HVAC 系统的室内空气环境控制技术。各章内容均相对独立,并给出了相关的应用案例以加深读者对理论内容的理解。

本书可作为供热、供燃气、通风及空调工程专业的研究生教材,还可作为相关专业的研究人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

室内空气环境评价与控制/王昭俊编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2016.4

ISBN 978-7-5603-5929-8

I. ①室… II. ①王… III. ①室内空气-空气污染控制 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 071088 号

策划编辑 王桂芝 贾学斌

责任编辑 郭 然

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省艺德印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.5 字数 448 千字

版 次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5929-8

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

室内空气环境是一门涉及建筑物理学、生理学、心理学、人类工效学、信息科学等多学科交叉的边缘科学。室内环境包括室内空气环境、室内光环境和声环境等内容。室内空气环境又包括室内热湿环境和室内空气品质。本书主要阐述与供热、供燃气、通风及空调工程学科紧密相关的室内热湿环境和室内空气品质两方面内容。

本书是作者结合多年室内空气环境研究的理论和工程实践撰写而成的。本书较其他相关领域的参考书增加了现场研究、实验室研究、仿真研究和控制技术的内容,重在研究方法和设计理念的介绍,以启发研究生的研究思路,培养研究生的创新思维能力。

本书主要包括室内空气环境的研究方法、基本理论、评价方法、评价标准以及控制技术等内容,共分6章,内容简介如下:

第1章为绪论,主要介绍人与室内环境的关系,室内空气环境研究概况,以及本书的主要研究内容。

第2章为热舒适研究与评价,主要阐述热舒适理论和热适应理论,稳态均匀热环境和自由运行建筑热环境评价及极端环境热暴露评价,热舒适标准和热湿环境参数检测方法;重点介绍了实验研究中涉及的实验工况设计,热工学、生理学和心理学研究方法,以及现场研究中涉及的样本选择、调查表设计、数据处理及应用案例等内容。

第3章为室内空气品质研究与评价,主要介绍室内污染物对人体健康的影响,室内空气品质的定义及阈值,实验室研究和现场研究的方法及应用案例,室内空气品质的客观评价、主观评价和综合评价方法,室内空气污染的人员暴露评价,室内污染物的散发及传播机理,室内空气品质标准和室内空气污染的控制方法。

第4章为区域模型和网络模型用于室内空气环境模拟,主要介绍区域模型和网络模型的模拟计算原理和方法,以及应用案例。

第5章为室内空气环境 CFD 模拟,主要介绍 CFD 模拟计算方法的基本原理和方法,以及应用案例。

第6章为基于 HVAC 系统的室内空气环境控制技术,结合应用案例,重点介绍了几种室内空气环境控制技术的设计理念、工作原理、影响因素和设计计算方法等,其中包括直接控制室内空气参数的技术(如毛细管自然对流散热器和铜管铝翅片强制对流散热

器)、控制室内固体表面温度的技术(如地板供暖技术和毛细管供暖辐射板技术)、室外新风的利用技术(如新型新风换气机和双向通风窗)等。

本书由哈尔滨工业大学王昭俊、赵加宁、刘京、王砚玲共同撰写,具体分工如下:第1~3章由王昭俊撰写,第4章由王砚玲撰写,第5章由刘京撰写,第6章由赵加宁撰写。全书由王昭俊统稿。作者指导的博士研究生吉玉辰和宁浩然参加了相关资料的搜集、整理等辅助性工作,在此一并表示感谢。在撰写过程中,引用了一些参考文献的图、表、数据等,在此向相关作者表示感谢。

本书被列为哈尔滨工业大学研究生“十二五”规划教材和“十二五”国家重点图书出版规划项目,并入选黑龙江省2015年度精品图书出版工程。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏或不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年3月于哈尔滨

目 录

第1章 绪论	1
1.1 人与室内环境的关系	1
1.2 室内空气环境研究概况	3
1.3 室内空气环境的主要研究内容及方法	7
参考文献	8
第2章 热舒适研究与评价	9
2.1 热感觉与热舒适	9
2.2 人工环境室实验研究	14
2.3 实际建筑现场调查研究	27
2.4 热舒适理论及稳态均匀热环境评价	41
2.5 热适应理论及自由运行建筑热环境评价	52
2.6 极端环境热暴露评价	62
2.7 热湿环境对工作效率的影响	69
2.8 热舒适标准	79
2.9 热湿环境参数检测方法	95
参考文献	102
第3章 室内空气品质研究与评价	105
3.1 空气污染物对人体健康的影响	105
3.2 室内空气品质的定义及阈值	113
3.3 室内空气品质的研究方法	115
3.4 室内空气品质评价	118
3.5 室内空气污染的人员暴露评价	129
3.6 室内污染物的散发及传播机理	135
3.7 室内空气品质对人体健康和工作效率的影响	142

3.8 室内空气品质标准	147
3.9 室内空气污染的控制方法	172
参考文献	178
第4章 区域模型和网络模型用于室内空气环境模拟	180
4.1 区域模型	180
4.2 网络模型	188
4.3 CONTAM 中气体流动分析	196
4.4 CONTAM 中污染物浓度计算	199
4.5 区域模型的模拟应用案例	203
4.6 网络模型的模拟应用案例	205
参考文献	208
第5章 室内空气环境 CFD 模拟	210
5.1 概述	210
5.2 CFD 计算原理基础	211
5.3 气流与热、污染物耦合模拟及应用案例	231
参考文献	244
第6章 基于 HVAC 系统的室内空气环境控制技术	246
6.1 直接控制室内空气参数的技术	246
6.2 控制室内固体表面温度的技术	262
6.3 室外新风的利用	276
6.4 置换通风	292
参考文献	300
名词索引	301

第1章 绪 论

1973年,国际石油危机引发的全球能源危机受到了全世界的关注,近年来随着全球温室气体排放量增加、气候变暖加剧,节能减排已成为全世界所共同面临的问题。“气候怀疑论者”认为,建筑行业是全球大气二氧化碳排放量最大者之一。美国能源信息署(EIA)发布的统计资料显示,发达国家(美国、加拿大、日本等)的建筑能耗(包括公共建筑和居住建筑)占其社会总能耗的比例约为30%~40%,中国的建筑能耗在社会总能耗中约占25%。在美国,建筑能耗占一次能源使用量的38.9%,其中的34.8%用于供暖空调系统以改善热舒适条件。在中国,供暖空调系统的能耗已占建筑能耗的50%以上。在中国北方地区,供暖能耗占建筑总能耗的65%以上,有的地区甚至高达90%。可见,供暖空调系统节能是建筑领域节能减排的关键。而在供暖空调系统的设计和使用过程中,基于人体热舒适和卫生健康要求确定适宜的室内空气环境参数对建筑节能又起着决定性的作用。

国际石油危机爆发后,人们为了建筑节能,提高了建筑物的密闭性,减少了新风量,进而导致了病态建筑综合征,由此引发了人们对室内空气品质与人体健康问题的广泛重视。如何在保证健康、舒适的室内热环境同时降低建筑能耗,是目前全世界的热点研究问题。

人类从露宿、穴居到建造空调建筑,经历了漫长的岁月。在人类社会发展漫长的岁月中,人们的生活环境都与大自然直接接触。即便在建筑产生之后,人们也是尽可能采用各种被动式手段来营造舒适的室内热环境。近年来,人们开始对室内热舒适和空气品质的研究有了新的理解,并由原来的空调建筑中采用主动式建筑技术逐渐转向自然通风等被动式设计方法的研究。与人类社会的发展过程相适应,人们对建筑的需求也经历了掩蔽所、舒适建筑、健康建筑、绿色建筑(生态建筑)这样4个阶段。第1阶段是低能耗甚至无能耗阶段,第2阶段和第3阶段是高能耗阶段,第4阶段则是大量利用可再生能源和未利用能源、亲近自然和保护环境阶段。

1.1 人与室内环境的关系

人类是地球物质发展的产物,人与环境是不可分割的对立统一的整体。环境是一个很大的范畴,它包括了一切客观存在与人类生存有关的自然的以及社会的条件。世界卫生组织公共卫生专家委员会给“环境”的定义是:在特定时刻由物理、化学、生物及社会的各种因素构成的整体状态,这些因素可能对生命机体或人类活动直接地或间接地产生现实的或远期的作用。中华人民共和国环境保护行业标准给“室内环境”的定义是:人工工

作、生活、社交及其他活动所处的相对封闭的空间,包括住宅、办公室、学校、教室、医院、候车(机)室、交通工具及体育、娱乐等室内活动场所。即室内环境是人类为生活和生产的需要而建造的建筑内微环境。人类的健康水平和生活质量与其生存的环境质量有着密切的关系,由于现代人通常有 80% 以上的时间是在室内度过的,故人类的健康与室内环境的关系更为直接和密切。

室内的一系列污染源造成的总的挥发性有机化合物(Total of Volatile Organic Compounds, TVOC)浓度常常高于室外,这些主要是由室内装修造成的。据调查,中国目前使用的大部分装修材料都不同程度地含有有毒的有机溶剂和甲醛、苯、二甲苯、氯化烃等有机物,其中甲醛、苯、三氯乙烯等都是已知的致癌物质。这些装修材料在室内会不断地释放有害气体,其释放时间可达一年之久。

室内人员对室内空气品质有着长期的影响。首先,人体本身的新陈代谢活动是吸入氧气(O_2)、呼出二氧化碳(CO_2)和产生其他分泌物的过程,在此过程中人体会不断散发出异味;其次,室内人员的日常行为活动引起室内扬尘浓度的升高;第三,室内人员吸烟等行为对室内空气品质有影响,普遍认为吸烟会增加肺癌和其他呼吸道疾病的发生率。实际上,吸烟会大大降低室内空气品质,即室内烟雾浓度增加,负离子浓度减少。

室内现代化办公设备和家用电器的广泛使用也导致了许多环境问题:噪声污染、电磁波及静电干扰、紫外线辐射等,给人们的健康带来了一些不可忽视的影响。

随着中国经济的不断发展和人民生活水平的不断提高,应用供暖空调系统的建筑越来越多。但一些空调建筑夏季室温过低,不仅浪费了大量电能,而且导致人们患上空调病,影响人体健康。我国北方地区冬季室内需要供暖,近年来的现场调查结果显示,室温正逐年升高。冬季室温过高,人们不得不开窗降温,既不舒适又浪费能源。因此,供暖空调系统设计和运行过程中采用适宜的室内温度既有利于建筑节能减排,又有利于人体舒适健康。

室内外环境是相互联系的,建筑的室内环境会受到室外环境的影响。近年来我国很多地方出现雾霾,雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统,是近地面层空气中水汽凝结(或凝华)的产物。霾也称灰霾(烟霞),空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子也能使大气混浊,视野模糊并导致能见度恶化,如果水平能见度小于 10 km 时,将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾或灰霾。如冬季供暖、汽车排放尾气、燃放烟花爆竹等都可产生雾霾。现场测试结果表明,出现雾霾时,室内外颗粒物浓度都明显超标。

室内环境对人的影响分为直接影响和间接影响。直接影响指环境的直接因素对人体健康与舒适的直接作用,如室内良好的照明,特别是利用自然光可以促进人们的健康;人们喜欢的室内布局和色彩可以缓解工作时的紧张情绪;室内适宜的温湿度和清新的空气能提高人们的工作效率等。间接影响指间接因素促使室内环境对人员产生的积极或消极作用,如情绪稳定时适宜的环境使人精神振奋,萎靡不振时不适宜的环境使人更加烦躁不安,从而降低工作效率等。

工作效率的提高有赖于环境因素、组织因素、社会因素以及个人因素等 4 个主要因

素。保证适宜的室内空气温度及相对湿度、增加通风率、提高室内环境品质可以增加工作人员的舒适度,避免病态建筑综合征,有益于室内人员的健康,并间接改善其他3个因素,从心理和生理两方面提高室内人员对环境的满意率,降低在保障和补偿室内人员健康方面的投资,提高工作效率。

1.2 室内空气环境研究概况

人的一生有80%以上的时间是在室内度过的,室内环境品质(Indoor Environment Quality, IEQ)包括声环境、光环境、热环境及室内空气品质对人的身心健康、舒适感及工作效率都会产生直接的影响。在上述诸多影响因素中,热环境和室内空气品质对人的影响尤为显著。因此,本书将主要介绍室内热环境和室内空气品质的研究方法、基本理论、评价方法、评价标准以及控制技术。

1.2.1 室内热环境与热舒适

室内热环境研究是与19世纪医学及测温学同时开展的。此时,人们认识到控制湿度的重要性,认为空气过于干燥或过度潮湿都是不可取的。

1914年,Hill发明了卡他温度计。卡他温度计综合了平均辐射温度、空气温度和空气流速的影响。20世纪30年代进行的大量实验经常采用卡他温度计。

1919年,在美国的匹兹堡由美国供暖通风工程师学会(American Society of Heating and Ventilating Engineers, ASHVE)建造了一个人工环境实验室,主要目的就是研究空气温度、空气湿度和空气流速等对人体热感觉和热舒适的影响。1923年,Houghten和Yaglou创立了对热环境研究具有深远影响的有效温度(Effective Temperature, ET)指标。该指标综合了空气温度、空气湿度和空气流速对人体热感觉的影响。1967年以前,该指标一直被广泛地用于工业以及美国和英国的军队中。1924—1925年,Houghten和Yaglou等又研究了空气流速和衣着对人体热感觉的影响。1932年,Vernon和Warner使用黑球温度代替干球温度对热辐射进行了修正,提出了修正有效温度(Corrected Effective Temperature, CET)指标。第二次世界大战期间,该指标曾被英国皇家海军舰队所采用。1950年,Yaglou等对热辐射进行了修正,提出了当量有效温度的概念^[1,2]。

1963年,美国供暖、制冷和空调工程师学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)将匹兹堡的人工环境实验室搬到了堪萨斯州立大学。在该实验室中,学者们进行了大量的人体热感觉与热舒适的实验研究,获得了许多有价值的热舒适数据,并成为制定热舒适标准的基础数据^[1,2]。

1971年,美国耶鲁大学Pierce研究所的Gagge提出了新有效温度(New Effective Temperature, ET*)指标,该指标综合了温度、湿度对人体热舒适的影响。随后,Gagge又综合考虑了不同的活动水平和服装热阻的影响,提出了标准有效温度(Standard Effective Temperature, SET)指标^[1,2]。

基于前期实验室的研究成果,1966年美国的ASHRAE发布了第一个热舒适标准

ASHRAE Standard 55—1966。随后在 1974 年、1981 年、1992 年、2004 年、2010 年和 2013 年又经过多次修订,发展为目前最新的版本 ASHRAE Standard 55—2013。

与此同时,丹麦技术大学的 Fanger 在人体热舒适研究领域也取得了令人瞩目的成果。Fanger 在堪萨斯州立大学的实验数据基础上,提出了舒适的皮肤温度、所期望的排汗率和新陈代谢率之间的关系,并于 1967 年发表了著名的热舒适方程^[3]。

1970 年,Fanger 以热舒适方程及 ASHRAE 7 级标度为出发点,并对堪萨斯州立大学的热感觉数据进行分析,得到了至今被世界各国广泛使用的评价室内热环境热舒适的指标——预测平均投票数(Predicted Mean Vote, PMV)和预测不满意百分数(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)^[3]。该指标综合了空气温度、空气湿度、空气流速、平均辐射温度、活动强度和服装热阻 6 个影响人体热舒适的因素,是迄今为止最全面的评价室内热环境的指标。国际标准化组织(International Standard Organization, ISO)根据 Fanger 的研究成果于 1984 年制定了国际标准《适中的热环境——PMV 与 PPD 指标的测定及热舒适条件》。ISO Standard 7730 推荐取 $PPD \leq 10\%$,即允许有 10% 的人感到不满意,此时对应的 PMV 在 -0.5 至 $+0.5$ 之间^[4]。2004 年发布的 ASHRAE Standard 55 热舒适标准中采用操作温度作为评价室内热环境的指标,也推荐使用 PMV-PPD 值预测空调环境的热舒适性^[5]。

20 世纪 70 年代中期,为应对石油危机兴起了建筑环境人体热适应研究。气候变化和建造低碳建筑的迫切形式促使人们更加关注人体对地域气候的适应性,以营造节能舒适的建筑环境。近 20 年来,热舒适的研究中心逐渐从 Fanger 的热舒适物理模型转移至适应性热舒适模型。适应性热舒适模型逐渐被广泛认可并成为热舒适领域的研究主流^[6]。在 2004 年以后颁布的 ASHRAE Standard 55 热舒适标准中,增加了热适应性模型(Adaptive Model)以预测和评价自然通风环境中 80% 或 90% 的人们可接受的温度范围。

此外,人们还对远离热舒适范围的过热和过冷环境进行了大量的研究并建立了一系列指标,如预测 4 h 排汗量(Predicted Four Hour Sweat Rate, P4SR)、热应力指数(Heat Stress Index, HSI)、热应力指标(Index of Thermal Stress, ITS)、湿球黑球温度计指数(Wet-bulb Globe Thermometer Index, WBGT)等。

我国室内热环境研究始于 20 世纪 80 年代,清华大学、哈尔滨工业大学、重庆大学、同济大学、天津大学、上海交通大学、西安建筑科技大学、华南理工大学、大连理工大学等的一些学者对适于中国人的热舒适评价指标、动态热环境评价等进行了研究,并取得了丰硕的成果。

综上所述,热舒适研究主要经历了 3 个阶段:①以丹麦技术大学的 Fanger 为代表,研究稳态热环境下的热舒适,建立了热舒适方程,提出了人体热感觉预测的 PMV 和 PPD 计算模型;②以澳大利亚悉尼大学的 de Dear 为代表,研究适应性热舒适以扩大稳态环境下的热舒适范围、降低建筑运行能耗,提出了适应性热舒适模型;③以清华大学赵荣义和朱颖心为代表,综合考虑了人的健康、舒适性以及节能等因素,研究动态和个体控制对热舒适的影响。

1.2.2 室内空气品质

早在14世纪,伦敦就发布了烟草法律以减少室外空气污染。随着工业革命和城市的增加,空气污染日趋严重,并导致一些灾难性事件频繁发生,如1932年的马斯河谷烟雾事件中,有数千人上呼吸道感染;1952年的伦敦烟雾事件中,在一周内几千人死亡,尤其是一些婴幼儿和老人。伦敦烟雾事件使人们认识到室外空气污染对人体健康的危害,揭开了空气污染研究的新纪元,推动了流行病学和室外空气污染对公共健康危害的研究^[7]。

室内空气污染的研究历史与发展是与室外空气污染的调查紧密相关的。20世纪60年代,人们认识到室内空气品质(Indoor Air Quality, IAQ)对人体健康的潜在影响,开始集中研究室内空气污染对人体健康的危害,并首次对室内空气品质进行了现场测试。

早期的研究重点是室内吸烟对人体呼吸系统的影响,如Cameron等研究了室内吸烟者和不吸烟者的呼吸系统健康问题。还有学者指出母亲吸烟对婴幼儿的呼吸系统健康有害,被动吸烟更易患呼吸系统疾病等。据统计,在吸烟家庭中儿童患呼吸道疾病的人数比不吸烟家庭中的儿童多10%~20%。同时人们对甲醛与哮喘病之间的关系进行了大量的调查研究,认为甲醛是引发哮喘病的主要原因。20世纪50年代,人们意识到氡是室内空气中普遍存在的污染物。20世纪80年代,随着美国地下矿工肺癌患病率的增加,人们认识到氡是造成肺癌的元凶^[8]。

1973年国际石油危机爆发后,各国开始重视建筑节能工作。一方面,为了减少空调建筑的能耗,提高了建筑物的密闭性,相应减少了空调新风量,使得空调建筑的CO₂、灰尘、细菌等浓度增加。另一方面,有机合成材料在室内装饰及设备用具方面的广泛应用,致使挥发性有机化合物大量散发。由于室内各种污染物不能及时排出室外,而室外的新鲜空气也不能进入室内,严重恶化了室内空气品质,再加上一些其他因素的影响,长期生活和工作在现代建筑物中的人们常表现出一些越来越严重的病态反应,德国的星期一综合征便是其中著名的一例。

1976年,在美国费城召开了退伍军人会议。不久,221人相继出现了类似流感的症状,如头疼、发烧、腹泻及昏迷,其中34人死亡。因为其病因是宾馆的空调系统传播了LP杆菌,故命名为军团病。此后,人们更加重视室内空气品质的研究。

1979年,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)召开了首次室内空气品质与健康国际会议。1983年,世界卫生组织提出了病态建筑综合征(Sick Building Syndrom, SBS)的概念,其定义为:因建筑物使用而产生的一些不适症状,包括黏膜有刺激感(眼红、流泪、咽干等)、困倦、头痛、恶心、头晕、皮肤瘙痒、易感冒、患哮喘或其他呼吸道疾病等。目前世界上有近30%的建筑是病态建筑,有20%~30%的办公人员常被病态建筑综合征所困扰^[9]。根据美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)统计,美国每年因室内空气品质低劣所造成的经济损失高达400多亿美元,全球每年因室内空气品质问题造成的病态建筑综合征使生产率下降了2.8%~11%^[9]。大量调查分析表明,病态建筑综合征与不良的室内空气品质有关。病态建筑综合征严重影响了人们的身体健康和工作效率,由此引发的病休、医疗费用等社会问题也受到了广泛的关注。

2003年,严重急性呼吸综合征(Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS)在世界不少国家尤其是中国肆虐,对人们的生命安全构成了严重威胁。2004年中国爆发的禽流感 and 2009年很多国家爆发的H1N1病毒感染,这些危及人类健康、生命安全的疾病频繁大规模爆发,使得人们更加关注室内空气环境的安全性,也更加重视室内空气污染控制技术。

研究表明,在发展中国家每年有160万人死于室内空气污染。在中国,近年来新建建筑大量增加,装修热潮使得室内空气品质问题尤为突出。农村生活燃烧秸秆等也会释放大量污染物,而中国逐年增加的汽车保有量致使汽车尾气排放量大量增加。吸烟也是最严重的污染源之一。

鉴于以上种种原因,人们已经认识到解决室内空气品质问题的重要性与迫切性,室内空气品质问题已成为当前建筑环境领域内的一个研究热点。

为了改善室内空气品质,人们很早就研究适宜的通风量问题。1824年,Tredgold就提出最小通风量为每人4 cfm,即 $6.72 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ 。1893年,Billings推荐通风量为每人30 cfm,即 $50.4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ 。1915年,美国21个州通过了有关通风量的法律,一般采用每人30 cfm。

1973年国际能源危机爆发之前,ASHRAE发布了自然和机械通风标准ASHRAE Standard 62—1973,规定最小通风量为10 cfm,即 $16.8 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ 。能源危机后,为了节能,将原通风标准进行了修改,将新建筑的最小通风量减少到每人5 cfm,即 $8.4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ 。并于1981年发布了控制室内空气品质的通风标准ASHRAE Standard 62—1981,规定最小通风量可由每人所需的通风量或单位建筑面积所需的通风量来确定,非吸烟区最小通风量为每人5 cfm,吸烟区最小通风量为每人60 cfm。

近年来,人们才逐渐认识到通风与室内空气品质的关系。1989年,ASHRAE发布了新的通风标准——可接受的室内空气品质的通风标准ASHRAE Standard 62—1989^[10]。标准中考虑了室内空气品质和病态建筑问题,将建筑的通风量增加到每人15 cfm,并不再区分吸烟区与非吸烟区。1996年,ASHRAE对原标准进行了修订,发布了通风标准ASHRAE Standard 62—1989R。该修订版中将室内污染分为人员污染和建筑污染,并同时考虑。随后在1999年、2004年和2007年又经过多次修订,发展是目前最新的版本ASHRAE Standard 62.1—2007。

其他发达国家如德国、加拿大、芬兰等也制定了室内环境质量的相关标准。

上述标准中大多已将建筑本身的污染考虑在内,有的标准将人员污染和建筑污染各自所需的新风量相加(如ASHRAE Standard 62—1989R),有的标准则取两者中的较大值(DIN1946)作为最小新风量指标。

与此同时,人们还对室内空气品质的评价方法进行了研究。1936年,Yaglou采用实验方法研究了气味与通风量的关系,确定了可接受的室内空气品质所需的最小通风量。1988年,Fanger提出了新的污染源的污染量指标单位,以对室内空气污染进行量化。一些学者指出,室内空气环境评价方法应包括主观评价方法、客观评价方法和室内环境品质综合评价方法。

1.3 室内空气环境的主要研究内容及方法

室内环境包括室内空气环境、光环境和声环境等内容。室内空气环境包括室内热湿环境和室内空气品质。本书主要研究与供热、供燃气、通风及空调工程学科紧密相关的室内热湿环境和室内空气品质两方面内容。由于人们对室内空气环境的感受既有生理的因素也有心理的因素,故室内空气环境是一门涉及建筑物理学、生理学、心理学、人类工效学、信息科学等多学科交叉的边缘科学。

本书介绍环境因素与人体健康的关系、室内空气环境的研究方法、国内外最新的相关评价标准和评价方法、室内空气环境的控制技术,以创造舒适和健康的室内空气环境。

本书重点介绍室内空气环境的研究方法,如实验室研究、现场研究和数值模拟方法的具体特点,介绍针对不同研究目的的实验设计方法和研究案例,以启发研究生的研究思路,培养研究生的创新思维能力。

室内热舒适标准和室内空气品质标准是研究室内空气环境的基础,是指导人们对室内空气环境进行评价的依据。了解并掌握热舒适标准和室内空气品质标准及其发展动态是进行室内热舒适和室内空气品质研究必备的条件。

随着人们对室内环境控制需求的不断发展变化,室内环境控制技术也在不断发展。室内环境控制即为采用工程学的方法使得室内环境满足各项标准的要求。人类创造了室内环境,现在人类比以往任何时候都更有能力创造人工环境。然而,过多地依赖机器的控制而脱离自然,对于室内环境来说,既没有必要,同时也是弊大于利。室内空气环境控制新技术正是以人体健康为出发点,在人与自然和谐统一的前提下对室内空气环境进行控制。

室内空气环境的研究可采用以下几种方法:理论研究、实验室研究、现场研究和计算机模拟研究。

理论研究主要是通过建立室内热源与环境传热的数学模型并对模型进行求解。Fanger提出的热舒适理论及热舒适方程是对热环境研究的重要贡献,获得了国际的公认。理论模型是通过机理研究而建立起来的模型,它能够预测和评价室内空气温度、湿度、污染物浓度等,结果的精确程度往往由于模型对实际的简化而受到影响。

实验室研究是最为可靠的一种研究方法,国内外许多关于人体热舒适和室内污染物散发机理的研究都是通过实验进行的,同时它也是最昂贵、研究周期最长的方法。目前,室内环境的实验室研究除了要得到研究内容的直接信息外,为理论模型和计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型提供边界条件并对模型进行检验也是其主要的功能。

现场研究是对实际的室内环境进行测试与调查,测试得到的是室内环境的客观状态,调查则可得到使用者对室内环境的主观感受。现场研究能够给出运行建筑室内环境最直接、最明了的状况,也是室内环境控制手段优劣的最终评判。对于工程研究来说,是采用较多的研究方法。

随着计算机技术的飞速发展,计算机模拟已成为对室内空气环境进行研究的重要工具。数值模拟方法与实验研究方法相比,具有节约人力、物力、财力等特点,不但可以大大缩短研究周期,而且可以多方面、全方位地研究各种因素对室内环境的影响。目前一些国家已开发出了应用于室内环境研究的软件。

参考文献

- [1] 王昭俊. 严寒地区居室热环境与居民热舒适研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2002.
- [2] 王昭俊,王刚,廉乐明. 室内热环境研究历史与现状[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000,33(6):97-101.
- [3] FANGER P O. Thermal comfort[M]. Copenhagen:Danish Technical Press,1970.
- [4] ISO Standard 7730. Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria[S]. Geneva:International Standard Organization,2005.
- [5] ANSI/ASHRAE Standard 55—2004. Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta:American Society of Heating, Refrigerating, and Air – Conditioning Engineers, Inc. ,2004.
- [6] DE DEAR R J, AKIMOTO T, ARENS E A, et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years[J]. Indoor Air,2013,23(6):442-461.
- [7] SPENGLER J D, SAMET J M, MCCARTHY J F. Indoor air quality handbook[M]. New York:McGraw-Hill Companies, Inc. ,2001.
- [8] 王昭俊,赵加宁,刘京. 室内空气环境[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [9] 张泉,王怡,谢更新,等. 室内空气品质[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 62—1989. Ventilation for acceptable indoor air quality[S]. Atlanta:American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, Inc. ,1989.

第2章 热舒适研究与评价

改革开放以后,随着经济的发展和人民生活水平的提高,我国各类建筑的室内热环境都获得了较大的改善。人们对建筑室内热环境的要求也越来越高,如人们对居住建筑的要求已不仅限于能居住,而且要宽敞明亮、温湿度适宜、室内空气清新,使居住者感到温馨舒适;对办公建筑的要求也不仅限于能工作,而且要求办公环境有益于人体健康、有利于提高工作效率。即人们更加关注影响人体热舒适与人体健康的室内热环境指标。

改善室内热环境就是要创造一个温馨舒适、健康卫生、有利于提高工作效率、节能的室内环境。而采用何种环境参数组合才能实现这一目的、如何对室内热环境进行合理的评价与控制就显得尤为重要。

2.1 热感觉与热舒适

2.1.1 热感觉

感觉不能用任何直接的方法来测量。对感觉和刺激之间关系的研究学科称为心理物理学(Psychophysics),是心理学最早的分支之一。

ASHRAE Standard 55—2013^[1]中对热感觉的定义为:人对热环境“冷”或“热”有意识的主观描述。通常用7级标度描述,即冷、凉、稍凉、中性、稍暖、暖和热。尽管人们经常评价热环境的“冷”和“暖”,但人只能感觉到位于其皮肤表面下的神经末梢的温度,而无法直接感觉到周围环境的温度。

在29℃的气温中,人裸身安静时的代谢率最低;如适当着衣,则在气温为18~25℃的情况下代谢率低而平稳。此时,人体用于体温调节所消耗的能量最少,人感到既不冷也不热,这种热感觉称之为“中性”(Neutral)状态。

热感觉与冷热刺激的存在及刺激的延续时间、人体原有的热状态都有关。人体的冷、热感受器均对环境有显著的适应性。当皮肤局部已经适应某一温度后,如果温度的变化率和变化量在一定范围内,皮肤温度的变化不会引起皮肤热感觉的变化。

图2.1^[2]为温度变化率对暖阈和冷阈的作用(Kenshalo, 1970),说明皮肤对温度的快速变化更敏感。如果皮肤温度变化率低,适应过程会跟上温度的变化,从而完全感受不到这种变化,直到皮肤温度落到中性区以外。

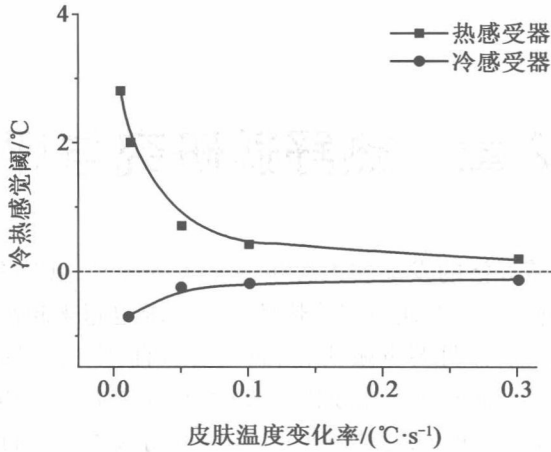


图 2.1 温度变化率对暖阈和冷阈的作用^[2]

除皮肤温度以外,人体的核心温度对热感觉也有影响。热感觉最初取决于皮肤温度,而后取决于核心温度。当环境温度迅速变化时,热感觉的变化比体温的变化要快得多。Gagge 等(1967)通过突变温度环境的实验发现,人体处于突变的环境空气温度时,尽管皮肤温度和核心体温的变化需要好几分钟,但热感觉却会随空气温度的变化立刻发生变化。当受试者由中性环境突然进入冷或热环境中,人体热感觉滞后;而当受试者由冷或热环境突然进入中性环境中,人体热感觉超前,如图 2.2 所示。因此在瞬变状况下,用空气温度比用皮肤温度和核心温度预测热感觉可能更准确。

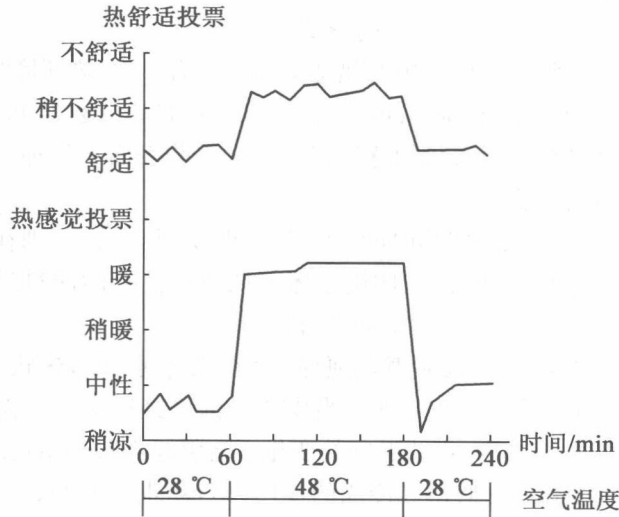


图 2.2 突变温度环境人体热感觉与热舒适^[3]

由于无法测量人体热感觉,因此只能通过受试者填写的问卷调查表来了解其对环境的热感觉,即要求受试者按照某种等级标度来描述其热感觉。心理学的研究结果表明,一般人可以不混淆地区分感觉的量级不超过 7 个,因此对热感觉的评价指标常采用 7 级