

面向21世纪土建类高等工程教育改革试用教材

人与建筑环境

贾 衡 主编 冯 义 副主编



北京工业大学出版社

面向 21 世纪土建类高等工程教育改革试用教材

人与建筑环境

贾 衡 主 编
冯 义 副主编

北京工业大学出版社

内 容 提 要

本书比较全面地介绍了近年来国内外建筑环境方面的科学研究和工程实践的成果,形成了建筑环境与设备工程专业学科的专业基础内容。主要内容包括:影响建筑环境健康标准的因素与建筑内、外环境的关系;人与室内热舒适环境;人与室内空气环境;人与室内视觉环境;人与室内听觉环境。

本书是高等院校建筑环境与设备工程专业及其他有关专业用的“建筑环境学”课程的试用教材,内容丰富,有图 135 幅,表 85 个,多是近年来本学科的新课题,并以简明的形式编写,每章后安排有习题和参考文献,以便于自学和实践。

本书可作为高等工科院校建筑环境与设备工程专业本科生的学科基础试用教材,也可作为研究生的选修教材,同时也是从事工程设计、科学研究、施工管理和运行管理人员、土木工程及其他专业人员知识更新、解决新课题的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

人与建筑环境 / 贾衡主编. —北京: 北京工业大学出版社 2001.8
ISBN 7-5639-0983-4

I. 人... II. 贾 III. 建筑—关系—人—环境理论 IV TU-023

中国版本图书馆CIP数据核字 (2001) 第062474号

人 与 建 筑 环 境

贾 衡 主 编

冯 义 副 主 编

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

787 mm×1 092 mm 16 开本 16.5 印张 406 千字

ISBN 7-5639-0983-4/T·180

印数: 1~3 000 册

定价: 21.00 元

序 言

经济发展改善了人们的生存环境, GPD 指标达到 1 000 美元后, 人们开始更关心自己的生活质量, “用钱买健康”成了人们的共识。中国北京的 GPD 指标近年已经迈过 1 000 美元, 人们开始有经济能力为身体健康作更多的投资。近代社会人们 80% 的时间工作、生活在建筑内, 室内环境应安全, 功能应合乎使用要求并使居住者感到舒适。适宜的室内环境有助于人们的健康和提高工作效率, 但恶劣的室内环境带给居住者的是相反的效果, 存在使人们精力分散、烦恼生厌以至于患病的因素。

西方发达国家在 20 年前以克服“空调建筑病”开始研究人们的室内生存环境, 获得了很多科学研究和工程实践的成果, 形成了本书的基础内容。我国近年来, 也开始对建筑内部环境中以前涉足较少的“室内空气品质”展开了研究与实践。

1998 年教育部设立的新学科专业——建筑环境与设备工程专业, 是在拓宽原供热、通风与空调工程和城市燃气工程专业, 并进行建筑、电控学科交叉而形成的, 并与国际接轨。学科专业基础课也由原来的热力学、流体力学, 增加了建筑环境学, 成为三门。北京工业大学建筑工程学院近年来进行了面向 21 世纪土建类高等工程教育改革工作, 本书——“人与建筑环境”即是教改工作的一部分。“人与建筑环境”是建筑环境学课程的试用教材, 是在近年编写的讲义的基础上, 经充实、加工和整理而成的。全书内容丰富, 有图 135 幅、表 85 个, 多是近年来本学科的新成果。本书以简明的形式编写, 每章后面安排有习题和参考文献, 并编有示范例题以便于自学和实践。

本书由贾衡主编, 冯义副主编。全书由 5 部分组成, 即影响建筑环境健康标准的因素与建筑内、外环境的关系; 人与室内热舒适环境; 人与室内空气环境; 人与室内视觉环境; 人与室内听觉环境。其中第一章由冯义、贾衡编写, 第二章和第三章的第四节由李炎锋编写, 第三章由吕琳、李俊梅编写, 第四章由李俊梅、赵志强编写, 第五章由贾衡、龚健平编写。参加材料收集和整理工作的还有周良、杨妮妮和刘扬等。全书由贾衡、冯义审定。

本书中的内容特别是人与室内空气环境章节的材料多为国内外近年来的研究材料, 由于编者水平所限, 缺点错误在所难免, 欢迎读者赐教。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 影响建筑环境健康标准的因素	1
第二节 建筑内外环境关系	4
习题	6
第二章 人与室内热舒适环境	7
第一节 绪论	7
第二节 人体热平衡和舒适感	9
第三节 温度	19
第四节 湿度	24
第五节 气流速度	30
第六节 壁面辐射温度	37
第七节 新陈代谢与工作环境	44
第八节 服装	53
第九节 热舒适问题的实验室和现场的研究	60
习题	68
参考文献	69
第三章 人与室内空气环境	70
第一节 室内空气污染物与污染源	71
第二节 室内空气污染物对人体的危害	75
第三节 室内空气环境的监测与标准	104
第四节 室内空气环境的数值预测	114
第五节 减少室内空气污染物对人体的危害	122
习题	133
参考文献	133
第四章 人与室内视觉环境	135
第一节 光与颜色的基本概念	135
第二节 视觉与光环境	154
第三节 天然光照明	165
第四节 人工照明	175
第五节 光环境的测量	190
习题	200

参考文献	200
第五章 人与室内听觉环境	202
第一节 声环境的基本概念	202
第二节 室内声学简述	211
第三节 材料和结构的声学特性	218
第四节 环境噪声的控制	229
第五节 建筑声学环境的设计简述	245
习题	254
参考文献	255

绪 论

第一节 影响建筑环境健康标准的因素

在过去的 20 年中, 长期生活和工作在现代建筑物内的人们表现出越来越严重的病态反应, 这一问题引起了专家学者们的广泛重视, 并很快提出了病态建筑 (sick building) 和病态建筑综合征 (SBS, sick building syndrome) 的概念。根据世界卫生组织 (WHO) 1983 年的定义, 病态建筑综合征是因建筑物使用而产生的病状, 包括眼睛发红、流鼻涕、嗓子疼、困倦、头痛、恶心、头晕、皮肤瘙痒等。据报道: 90% 以上由空气污染造成的死亡发生在发展中国家, 其中 80% 是因室内污染造成的。许多人无法获得清洁燃料, 因此做饭或取暖时只能烧煤和木柴。近年来, 有些专家学者建议将人们对室内气味产生的不满也纳入到病态建筑综合征中。人们对于某种外界条件适应是一个综合的过程, 对共同作用的外界因素反映非常复杂。人们把“健康”定义成在身体上、精神上、社会上完全处于良好的状态, 而并不是单纯地指疾病或病弱。

大量调查分析表明, 现代社会的人们全天有超过 80% 的时间活动在室内, 在这种情况下, SBS 的问题主要是由于室内热微气候、室内空气品质 (Indoor Air Quality, IAQ) 和室内声环境和光环境不佳而引起的, 它不能用一个综合指标来评价。从技术的观点来看, 研究那些影响健康中可以控制的因素具有非常重要的意义。在当今很多现有建筑中, 室内环境都不很理想, 尽管符合现有标准, 但抱怨还是越来越多。随着寻求优异室内环境而不是像现在这样将力气花在限制和减少不满意和抱怨上, 预见将出现一个范式转变*。下面简要给出几种与人体健康有关的因素。

1. 热舒适 (thermal comfort)

美国采暖、制冷和空气调节工程师学会 (ASHRAE) 在 55—56 标准中给出热舒适环境的定义为: 人在心理状态上感到满意的热环境。热舒适环境取决于 6 个主要因素, 其中与环境有关的 4 个因素是: 空气温度及其在空间的分布以及随时间的变化; 空气中水蒸气的分压力 (相对湿度); 气流速度; 围护结构的平均辐射温度。另外, 热舒适与个人有关的两个因素是: 人体的温度、散热、体温调节 (新陈代谢) 以及衣服的保温性能。

2. 室内空气品质 (indoor air quality)

由于室内空气品质的原因, 人们的身心健康和工作效率受到很大影响, 一些现代化密闭写字楼的工作人员受到的影响尤其明显。与此同时, 由室内空气品质间接引起的社会工作效率降低和病休、医疗费用等社会问题也受到了广泛的关注。另一方面, 为了改善室内空气品

* 范式转变是一哲学用语, 它表示某一学科在概念体系或思维方式上的转折, 这种转折常会导致学科的革命性进步。

质，很可能需要增加建筑和空调系统的初投资及维护费用，这给业主和工程维护人员也提出了新的课题。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，IAQ问题已成为当前建筑环境领域内的一个研究热点。从20世纪70年代末开始，国内外的专家学者在这方面做了大量的研究工作，但目前尚缺乏对室内空气品质问题系统全面的认识。

3. 声环境 (acoustic environment)

《中华人民共和国城市区域噪声标准》中明确规定了城市五类区域的环境噪声的最高限值：疗养区、高级别墅区、高级宾馆区，昼间 50 dB、夜间 40 dB；以居住、文教机关为主的区域，昼间 55 dB、夜间 45 dB；居住、商业、工业混杂区，昼间 60 dB、夜间 50 dB；工业区，昼间 65 dB、夜间 55 dB；城市中的交通干线道路、内河航道、铁路主次干线两侧区域，昼间 70 dB、夜间 55 dB（夜间指 22 点到次日晨 6 点）。按照国家标准规定，住宅区的噪声，白天不能超过 50 dB，夜间应低于 45 dB；若超过这个标准，便会对人体造成危害。

室内噪声对人们的身心健康危害极大。强的噪声可以引起耳部的不适，如耳鸣、耳痛、听力损伤。据测定，超过 115 dB 的噪声还会造成耳聋，尤其对儿童造成聋哑机会更大。噪声会降低工作效率。研究表明，噪声超过 85 dB，人们会感到心烦意乱，无法专心工作。噪声会损害心血管，加速心脏衰老，增加心肌梗塞发病率。医学专家经大量人体和动物实验表明，长期接触噪声可以使体内肾上腺分泌增加，从而导致血压上升。另外，噪声还可能引起神经系统功能紊乱。在高噪声的环境中，人们容易出现头晕、头痛、失眠、多梦、记忆力减退以及恐惧、自卑甚至精神错乱。噪声对妇女和儿童的危害更大。噪声还会损害视力。实验表明：当噪声强度达到 90 dB 时，人们的视觉细胞的敏感性下降，识别弱光反应的时间延长；噪声达到 95 dB 时，40% 的人会出现瞳孔放大，视觉模糊；而噪声达到 115 dB，多数人的眼球对光的亮度的适应都有不同程度的减弱。所以长时间处于噪声环境中的人很容易发生眼疲劳、眼痛、眼花等眼损伤现象，同时，噪声使人对红、蓝、白三色视野缩小 80%。

4. 光环境 (luminous environment)

光辐射引起人的视觉，人才能看清他周围的环境，人从外界得的信息约有 80% 来自光和视觉，所以无论是白天还是夜间，舒适的光环境对任何人都是至关重要的。

光环境的内涵很广，它指的是由光（照度水平和分布，照明和颜色）与颜色（色调，色饱和度，室内颜色分布，颜色显现）在室内建立的同房间形状有关的生理和心理环境。

人们对光环境的需求与他从事的活动有密切关系。在进行生产、工作和学习的场所，优良的照明能振奋人的精神，提高工作效率和产品质量，保障人身安全与视力健康，因此，充分发挥人的视觉效能是营建这类光环境的主要目标，而在休息、娱乐和公共活动的场合，光环境的首要作用则在于创造舒适优雅、生动活泼，或庄重严肃的特定环境气氛。光对人的精神状态、心理感受产生极大的影响。

光与色彩还是显示建筑空间，表现造型艺术，美化室内外环境的重要手段，建筑师巧妙运用光和色彩能获得意境不凡的艺术效果。

光环境设计是现代建筑创作的一个有机组成部分。为了建立人们对光环境的主观评价和客观物理指标的对应关系，世界各个国家的科学工作者都进行了大量的研究工作，许多成果已经列入各国照明规范、照明标准或照明设计指南，成为公共环境设计和评价的依据和准

则。国际照明委员会（CIE）对世界各国在视觉功效方面的研究成果进行了总结，并建立了描述照明参数对视觉功效影响的分析模型。在我国有《工业企业照明设计标准》。优良的环境应该包括：

- (a) 适度的照度（即受照平面上接受光通量的面密度）水平；
- (b) 舒适的亮度比；
- (c) 宜人的光色和良好的显色性；
- (d) 避免眩光干扰等。

光环境的设计既是科学，又是艺术，同时也要受经济和能源的制约。当今的世界在照明上一年要花掉1 000亿美元，消费10%左右的电力，所以必须推行合理的设计标准，使用节能的照明设备，采取科学与艺术融为一体的先进设计办法。

5. 电磁环境 (electromagnetism environment)

随着社会的发展，电气、电子技术的广泛应用，无线电广播、电视以及微波技术等事业的迅速发展和普及，射频设备的功率成倍提高，地面上的电磁辐射大幅度增加，目前已达到可以直接威胁人体健康的程度。电磁污染给人类和社会带来的影响已经引起世界各国的重视，被列为环境保护项目之一。

电磁污染的主要来源是各种射频设备，它所形成的强大电磁辐射，已经成为电磁污染的主要成分。微波加热设备、短波和超短波理疗设备以及手机等都是室内电磁污染的主要来源。

强大的电磁辐射作用于人体，被组织吸收一定能量后会产生热效应。这种热作用是由于人体组织的分子反复起极向和非极向的运动摩擦而生热，引起体内温度升高，从而会导致过热甚至烧伤。一般以微波辐射最为有害。此外，长期在非致热强度电磁辐射下工作的人会出现乏力、记忆力衰退等神经衰弱以及心悸、心前区疼痛、胸闷易激动、脱发、月经紊乱等病症。

电磁污染的环境容许强度各国尚未一致，前苏联规定微波职业接触强度为 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，环境标准为 $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。美国国家标准学会规定照射时间平均在0.1 h以上者，接触强度为 $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

家庭中计算机、电视机、收音机、微波炉、电磁炉、电冰箱、空调机、电热水器、电热毯、家庭影院、手机、电话、电吹风等数不清的家用电器，大大方便了人们的生活，形成现代生活方式，但同时造成家庭电磁环境恶化。随着各种家用电器进入千家万户，人们接触极低频磁场的机会和时间增多。美国环境保护委员会经过两年多的研究发现，长期生活在极低频磁场中，可导致人们某些癌症的发生。世界卫生组织认为电磁辐射随时可能对胎儿产生有害影响，医学家则特别提醒妇女妊娠初期尽量不要使用电热毯。由于北京城区迅速发展扩大，无线广播的大功率电磁发射台、卫星通讯地面站和设在高层建筑上的移动通讯基站被新建居民区包围，电磁辐射成为城市环境污染的新问题，对人们生活已产生一定的影响。北京市环境保护部门已对电磁辐射污染制定了审批、考察和验收的对策。

考虑上述的各种影响因素，目前“健康住宅”比较通用的定义就是能使居住者“在身体上、精神上、社会上完全处于良好状态的住宅”，具体来说，“健康住宅”的最低要求有以下几点：

- (a) 会引起过敏症的化学物质的浓度很低。也就是说，尽可能不使用容易散发出化学物

质的胶合板、墙体装修材料等,要保证室内 CO_2 体积分数低于 0.1%, CO 的质量浓度低于 5 mg/m^3 , 甲醛的质量浓度低于 0.08 mg/m^3 , NO_2 的质量浓度低于 0.10 mg/m^3 , SO_2 的质量浓度低于 0.15 mg/m^3 , 氡浓度年平均值不超过 100 Bq/m^3 。

(b) 设有性能良好的换气设备,能将室内污染物质排至室外,特别是对高气密性、高隔热性的建筑来说,必须采用具有风管的中央换气系统,进行定时换气。在厨房灶具或吸烟处,要设局部排风设备。

(c) 起居室、卧室、厨房、厕所、走廊、浴室等要全年保持在 $17 \sim 27^\circ\text{C}$ 之间。墙壁内表面温度与室内空气温度差最好在 1°C 左右。室内的湿度全年保持在 $40\% \sim 70\%$ 之间。

(d) 室内长时间掠过人体的空气流速不宜过高,夏天在 0.5 m/s 左右,冬天在 0.2 m/s 左右。悬浮粉尘的质量浓度要低于 0.15 mg/m^3 , 细菌菌落数要低于 1000 cfu/m^3 , 噪声级要小于 50 dB 。

(e) 一天的日照要确保在 3 h 以上,室内要设有足够亮度的照明设备。

(f) 合理恰当分散地使用家用电器,减少室内电磁污染的影响。

(g) 住宅具有足够的抗自然灾害能力,具有足够的人均建筑面积,并确保私人隐秘性。

(h) 住宅要便于护理老龄者和残疾人。

另外,因为建筑材料中含有害挥发性有机物质,所以在住宅竣工后,要隔一段时间(至少两个星期)才能入住,在此期间要进行通风换气。

第二节 建筑内外环境关系

室内环境除了受房间内部因素影响外,还与室外环境条件有很大程度的相关性。

在与热舒适环境有关的主要因素中,其中有 4 个因素与环境有关,即空气干球温度、空气湿度、空气速度和房间壁面的辐射温度。房间采暖与空气调节的目的是在室内造成一定的热湿环境和空气条件,如空气的温度、湿度、清洁度、流速与压力,以及围护结构的内表面温度等。影响建筑物内热湿状况和空气环境的因素有室外气象条件、室内发热和产湿量,以及采暖和空调系统的运行方式。如果不考虑运行方式(即连续运行还是间歇运行),房间热力系统的扰量可归纳为外扰和内扰两大类。

1. 外扰

外扰系指室外空气的温度、湿度、太阳辐射强度、风速和风向,以及邻室的空气温湿度。它们可以通过两种形式影响房间的热湿状态。

(a) 通过热交换,即周围空气温度以及太阳辐射,都会通过不透明的板壁围护结构和半透明的门窗玻璃等,向房间进行的传热量交换,以及太阳辐射透过半透明玻璃向房间射入的辐射热等均属此种热交换。

(b) 通过空气交换,即通过门窗缝隙,室内外空气有一定数量的交换,即所谓空气渗透,以及通过空调通风系统也会人为的向房间送入或从房间排出一定数量的空气,它们均属于空气交换。伴随室内外的空气交换,外界的热量或湿量将直接影响房间空气的热湿状况。

2. 内扰

内扰系指照明装置、设备和人体的散热、散湿。它们也都将以对流和辐射两种形式向房间进行热湿交换。

污染室内环境的污染物主要来自：

(a) 取暖做饭所用燃料燃烧及吸烟产生的烟尘；
(b) 人们呼吸过程中排出的气体，人体皮肤、器官及不洁的衣服、器具散发出来的不良气味；

(c) 由室外带入和室内产生的各种空气微生物；

(d) 室内装饰材料和化学用品释放出来的有害气体。就室内空气质量 (IAQ) 而言，过去，人们往往认为室内环境保护人们免遭室外环境的污染空气的侵害。诚然，环境保护当局常告诫市民在“报警”或“紧急”阶段应留在室内。这对于处于特殊情况的人，如患呼吸道及心血管疾病的人尤为如此。

最近调查发现，许多空气污染物在室内并无明显的污染源，但浓度却很高。尤其当夏季门窗开放时，这种现象更为突出，其来源显然是室外大气。室外污染源大致可分为两类污染源：一类是来自工业、交通运输所排放的污染物以及二次污染物；另一类则为植物。近代城市规划有严格的功能分区，居民区本来不应受工业、交通运输污染的影响，但是一些城市是在旧城镇的基础上逐步发展繁荣起来的，工厂建在居民区内，一些公寓式的住宅临街建造，汽车废气、噪声影响很大，尤其是夏季开窗，室外一些污染物 SO_2 、TSP、CO 等以及大气中二次污染物 O_3 ，均可进入室内。由于目前各国均很重视城市绿化，用花草树木美化环境、调节空气，对保护居民健康起到良好作用。最近国内外一些报道表明：当春暖花开的季节，居民在室内休息常发生一些不明原因的过敏反应。许多科学家研究结果表明，是由于花粉或某些植物的花、叶在一定条件下释放出某种化学物质，进入室内，造成过敏反应。我国云南一带盛产夜丁香，浓郁的香气会使某些人过敏头痛。目前，我国有些植物学家、化学家及药学家正在从事植物花香的成分分析及毒理、药理作用的研究，将会给美化城市提供无毒花卉，使居民在优良的环境中，愉快生活。

就某种程度而言，室内环境并不能保护人们免受外界污染空气之害，如 SO_2 这种活性气体，室内环境 SO_2 的排放量相对地较小。由于建筑物的保护，当室外浓度较高时， SO_2 的室内外浓度比为 0.3~0.5；而当室外浓度较低时， SO_2 的室内外浓度比为 0.7~0.9。 NO_2 也是一种比较活泼的气体，在没有室内污染源时室内外的浓度比通常少于 1.0，例如在用电炉的居室内，室内外的浓度比为 0.38；但是当使用煤气炊具和煤油加热器且室内又不通风时，室内的 NO_2 浓度值往往高于其室外值。在有室内污染源时 NO_2 量往往超过室外 2 倍或 2 倍以上。CO 是一种比较不活泼的气体，在没有室内污染源时，CO 的室内外浓度基本相同；而当室内空气受到污染时，室内环境并不能减少 CO 的污染。另有报告表明，悬浮颗粒物的室内外浓度比的域值较宽（如 0.3~3.5）。悬浮颗粒物的室内外浓度比与吸烟、烹饪等室内活动有关，也与室内是否有煤气炊具、无外排的燃烧型加热器、除尘系统、空调等装置有关。吸烟最容易增加肺部吸入的尘粒。特别应引起注意的是，室内的可吸入尘粒浓度（没有人吸烟）往往较高。例如，为了室内的洁净使用手提式吸尘器，但使用它时 60% 的尘粒又循环地进入室内空气，所以室内空气中的尘粒浓度往往较高。

室内空气中氡主要来自污浊的气体、井水和各种石料。通常是由地下室裂缝、天棚、地板、各种孔洞中进入室内的污浊空气携带的。地下室的浓度通常为居室的 2~3 倍，但是氡的室外浓度相当低。室内环境中氡的含量要比室外含量高 1~4 个阶数。

甲醛是室外及室内环境中普遍发现的空气污染物。汽车车辆排气管直接排除甲醛及大气

中的二次化学反应致使甲醛浓度增高。有烟雾时, 甲醛峰值时的体积分数其可达到 0.1×10^{-6} , 可是城市里甲醛的体积分数很少超过 0.05×10^{-6} , 其域值往往小于 $(0.01 \sim 0.03) \times 10^{-6}$ 。因此, 对甲醛的接受量主要来自室内。

室内噪声的主要来源有:

(a) 交通运输噪声。随着城乡车辆的增加, 公路和机动车辆的噪声已成为交通噪声的元凶;

(b) 工业机械噪声。由于动力工作机构做功时产生的撞击、摩擦、喷射和振动可以产生 70 dB 以上的声响, 虽然做了一定程度的降噪处理, 但难以从根本上消除机器本身所产生的噪声;

(c) 城市建筑噪声。建筑施工现场噪声一般都在 90 dB 以上;

(d) 社会生活和公共场所的噪声;

(e) 家用电器直接造成室内噪声污染。

随着人们生活现代化的发展, 家庭中家用电器的噪声对人们的危害越来越大。据检测, 家庭中电视机、收录机所产生的噪声可以达到 60~80 dB, 洗衣机为 42~70 dB。另外家庭卡拉 OK 机的使用也会加剧噪声的污染程度。我国制定的《中华人民共和国环境噪声污染防治法》中把超过国家规定的环境噪声排放标准并干扰他人正常生活、工作学习的现象称为环境噪声污染。按照国家标准规定, 住宅区的噪声, 白天不能超过 50 dB, 夜间应低于 45 dB。而室内环境的噪声标准依据国家颁布《城市区域环境噪声测量办法》的规定, 在室内进行噪声测量时, 室内噪声声限值低于所在区域标准值 10 dB。

在建筑光环境的设计中, 将适当的昼光引进室内照明, 并且让人能透过窗子看见室外的景物, 是保证人的工作效率、身心舒适满意的重要条件。近年来的许多研究表明, 太阳的全光谱辐射, 是人们在心理上和生理上长期感到舒适满意的关键因素。建筑物充分利用昼光照明的意义, 不仅在于获得较高的视觉功效, 节约能源和费用, 而且很可能还是一项长远的保护人体健康的措施。另外, 多变的天然光又是表现建筑艺术造型、材料质感, 渲染室内环境气氛的重要手段。所以, 无论从环境的实用性还是美观的角度, 都要求建筑师对昼光的利用做认真的规划, 掌握天然光环境的知识和技巧。

因此可以看出, 室内环境中与人体健康有关的各种因素与室外环境都有很密切的联系。只有很好地将室内外的各种因素结合起来整体考虑, 才有可能创造出一个健康舒适的室内环境, 从而提高现代人们的生活质量。可见, 加强城市规划、城市管理、保护环境, 是刻不容缓的大事。

习 题

- 1-1 请从国际互联网上查阅国内外关于建筑环境的最新研究成果。
- 1-2 请通过科技文献检索建筑环境的最新研究动态。
- 1-3 请选择你所感兴趣的关于建筑环境的题目编写一篇综述。

人与室内热舒适环境

第一节 绪 论

一、热舒适研究发展简史

在日常生活中,常遇到“舒适”的概念,但不一定能清楚说明它的涵义。人的舒适状态由很多因素决定,当谈到不舒适时,也难以说清楚它的原因。

Бедфорд 提出舒适概念的最普通的定义:“舒适状态是在综合作用影响下人们所产生的主观感觉。”显然,能够使某人达到舒适的外部因素对另外的一个人可能并不感到愉快,这反映了人们的个性。专家们认为,凡是外部因素使 80% 的人感到满意的条件就算达到舒适状态。

在第五届国际制冷大会上提出影响人的舒适的因素有:声学因素,嗅觉与呼吸,机械的感觉,视觉、色调的影响,温度、湿度、气流,安全、卫生因素,集体的活动方式,意外危险的因素,经济因素等。人们对于某种外界条件适应是一个综合的过程,对共同作用的外界因素反映非常复杂,因此从技术观点来看,研究那些可以控制的因素具有非常重要的意义。

热舒适环境中,人体的新陈代谢和衣服的保温性能与人体适应能力有关,从人体热平衡的观点来分析,上述两个因素起着特殊作用,人体靠食物的化学能来补偿机体活动所消耗的热量,并将多余的能量以热量的方式排至体外,保持产热量与散热量相等,从而维持体温恒定(36.5°C)。从技术观点来看,人体产热量是不可控制的,人体散热量很大程度上取决于衣服。当然,热舒适还与其他一些次要因素有关,如大气压力、人的肥胖程度、性别、人的汗腺功能等。本书的讨论中,不考虑这些次要因素。

对于热舒适问题,人类很早就已经开始探索研究。早在 1733 年,阿巴斯诺特就指出空气流动具有驱散身体周围热湿空气的降温效应。特雷德戈尔德在 1824 年指出关于人体的热辐射问题,即当人置于辐射热源中,需要较低的空气温度才能使人体的舒适程度保持不变。1913 年,希尔提出头宜凉、脚宜热,辐射热与气流有关,相对湿度要适中的人体舒适度标准的建议。

1919 年,美国采暖通风工程师学会(ASHVE)的匹森堡实验室以室内气候对人体舒适的影响研究作为开端,经过一系列广泛的调查研究,得到人们熟知的等效温度,同时在英国,贝德福继续了工业疲劳研究所的工作,对工厂的热舒适性做了广泛的调查得出了当量温度标度。

20 世纪 60 年代,美国采暖、制冷和空气调节工程师学会(ASHRAE)在堪萨斯州立大学环境实验室进行了大量的研究和试验工作,提出了有关舒适度条件的数据,并产生了 ASHRAE 55—74 标准。丹麦工业大学 Fanger 教授以这些数据为基础并与人体产热、散热的

物理方程相结合,提出了一个综合性的舒适方程。该方程将环境的物理变量与人体新陈代谢及服装隔热等个人变量联系在一起,提出了预测平均投票率 PMV (predicted mean vote) 和 不满意该环境人数的预测百分比 PPD (predicted percentage of dissatisfied) 等标准尺度,经测试验证了其正确性,为以后的研究工作提供了坚实的理论依据。国际标准化组织 (ISO) 根据 Fanger 教授的研究成果于 1984 年制定了 ISO—7730 标准。70 年代,研究的领域从环境的热感觉问题扩散到设计整体的热刺激领域,认为人们的姿势和活动量也像热参数一样,会对人体的热舒适感产生影响。德国慕尼黑大学生物气候及实用气象研究所的 Hoppe 博士认为 Fanger 教授的舒适性方程存在不足,因为后者评价舒适性的条件是:

(a) 人体在没有蓄热状态下达达到热平衡;

(b) 皮肤温度低于 33℃;

(c) 没有用出汗来散热。实际上,严格定义不出汗和无感觉的微量出汗是很难区分的。因此, Hoppe 博士认为应该附加另外一个条件,即皮肤湿润度小于 25%。

在 Fanger 教授模型的基础上,发展了“慕尼黑单体能量平衡模型”(MEMI)。该模型以人体传统的人体能量平衡方程式为基础,并补充人体核心到皮肤表面的热流方程以及从皮肤到衣着表面的热流方程,构成一个封闭模型。这个模型能够对气候与人之间的一切可能的参数进行组合,定量计算出人体的一切热流、出汗率、皮肤润湿度、生理当量温度等。由于性别不同而引起的出汗率和产生内热不同,模型分为男、女两个类型。当在 MEMI 静态计算模型中的人体能量平衡式中增加蓄热项,就称为动态模型 IMEM;当知道人体热容量以及人体总容量中体内和体表不同部位的函数时,IMEM 就能够按照 1 s 的时间间隔,给出各种所要计算参数的动态变化值。

二、热舒适研究的主要结论

有关室内热环境(空气温度、湿度和气流速度)对人体舒适度影响的重要研究结论有:空气温度直接影响人体与外界的热交换和人体的自身平衡,它是影响热舒适的一项主要指标;空气湿度可以直接或间接地从各方面影响人体的舒适感。Nevins 推荐夏季相对湿度小于 60%,主要考虑相对湿度太大,会导致霉菌生长过快,从而恶化空气品质,降低人体的舒适度。

有些研究结果表明,工艺所需的热环境和舒适条件并不完全一致,甚至与条件范围广泛的热舒适条件部分有关,或者无关。这是因为工艺性空调房间的室内参数是按照工艺过程的特殊要求提出的。

研究人体舒适度和工作效率的关系发现工作效率区与人体舒适区并不完全重合。Harold 在 1994 年研究结果证明,高温和低温环境下,工作中容易发生事故;在人员感觉热舒适时,工作效率并不最高,而在高的工作效率情况下,多数人感觉到冷。但是准确确定两者的关系非常困难,因为影响工作效率的因素很多,并且这些因素之间相互关系非常密切,环境的舒适度只是其中之一,并不起决定作用。

三、热舒适研究的意义和趋势

人们 80% 以上的生活是在房间度过的,人的健康及工作能力很大程度上决定于房间内的热舒适状况。热舒适问题对选择房间的围护结构、供暖系统、通风和空气调节的选择具有决定作用。热舒适问题是建筑学科领域最早研究的课题之一,仍是目前建筑科学的重要研究

方向,并且正在发展成为热工学、建筑物理学和生理学的边缘科学。热舒适方向的研究任务是,确定室内气候参数组合的最佳范围和允许范围;根据人的热感觉评价新的建筑和建筑设计方案;查明室内气候调节的最佳状况;确定在室内环境气候影响下提高脑力劳动和体力劳动能力的可能性。

热舒适问题的研究摆在研究人员面前的主要问题是研究人体的产热量、劳动方式以及着装,以便确定使多数人有愉快感觉的技术参数。另外,为了分析人体的热平衡,必须了解人体温度的调节途径,必须掌握生理学和心理学的某些知识。

20世纪50年代以前,室内热环境是利用供暖系统来维持的,许多情况下同时采用了通风来满足室内环境要求,对空气条件要求高的房间,则安装空气调节系统。供暖系统的容量选择是根据房间空气的保证温度来进行。通风和空调系统则是保证人们活动范围内所必须的气流速度。对空气温度和气流速度的要求,是在实验室研究的基础上,对生理学深入研究的基础上提出的。随着轻型结构在建筑上的应用以及窗户面积的增大,出现了人们的热感觉与对房间内热环境要求不相适应的情况,因此引起了人们对热感觉的广泛研究。该问题的复杂性要求应该由生理学家、卫生学家、心理学家、微气候领域调节专家、建筑工作者和建筑学家等共同参与;另一方面,随着科学技术的进步和建筑行业的飞速发展,建筑能耗、建筑设备能耗占建筑总能耗的比例日益增大。一般来说,要让室内设计参数尽可能满足人的舒适感,会导致建筑能耗上升;另一方面,随着能源紧张问题的日益突出,迫使人们去寻求热舒适的佳经济方案,许多情况下对房间热环境要求并不是硬性的。在允许的条件下,虽然与热舒适和生理学理论要求有所偏离,但却能得到较好的经济效益。这样,在建筑决策中,两者必须力求统一,才能设计和建造出满足人们热舒适要求并且最经济的建筑物。

第二节 人体热平衡和舒适感

一、人体热平衡

在一般建筑中,通常用两组指标来规定室内空气状态参数,即温度、湿度基数和空调精度。由此产生了两类空调,即工艺性空调和舒适性空调。工艺性空调的室内参数是按工艺过程的特殊要求(更多表现在空调精度上)提出,同时也考虑到人体卫生要求,即人体热平衡和舒适感的要求。对于民用建筑空调和公共建筑空调即舒适性空调,则主要从人体舒适感出发,确定室内空气的基本参数。总之,在设计空调房间时,必须考虑如何保持人体的热平衡。

人体靠摄取食物(糖、蛋白质等碳水化合物)获得能量维持生命。食物在人体新陈代谢过程中被分解氧化,同时释放能量。其中一部分能量直接以热能形式维持体温恒定并散发到体外,其他为机体所利用的能量,最终也都转化为热能散发到体外。人体为维持正常的体温,必须使产热量和散热量保持平衡。人体的基本热平衡方程式为

$$S = M - (\pm W) + (\pm R) + (\pm C) + (\pm E) + (\pm K) \quad (2-2-1)$$

式中, S 为人体内热量贮存量, W ; M 为新陈代谢量, W ; W 为人体对外做功, W ; R 为辐射热交换量, W ; C 为对流热交换量, W ; E 为汗液蒸发和呼出水蒸气的散热量, W ; K 为导热热交换量, W 。

如果(2-2-1)式右半部的数值是正的,则体温升高,也就是人感觉热,体温即使比

正常体温高 1℃ (或少于 1℃), 也会损害身体健康。当体温升到 40℃ 时, 出汗停止, 如不采取措施, 体温将迅速上升; 当体温升到 43.5℃ 时, 人就死亡。如果 (2-2-1) 式右半部值是负的, 则体温降低, 人感觉到寒冷, 在自然冷却的情况下, 先是发生颤抖 (肌肉收缩与知觉无关, 它增加了新陈代谢的强度)。当体温为 34~35℃ 时, 不再打颤 (肌体适应了), 在此之后体温迅速下降; 当体内温度为 25~28℃ 时, 呼吸停止, 人就死亡。当 $S=0$ 时, 身体达到热平衡, 这时, 人的热感觉良好。式中 R 、 C 、 K 的正负号确定手段为: 当周围环境温度 (空气温度及围护结构表面) 低于人体表面平均温度时, 则各种散热量为正。人体的内部发热等于新陈代谢率 M 和人体对外做功之差; 当人静止或活动轻微时, W 可以忽略不计。

表 2-2-1 人体单位皮肤表面积上新陈代谢率

活 动 强 度		新 陈 代 谢 产 热 率	
		W/m ²	met
躺着		46	0.8
坐着休息		58	1.0
站着休息		70	1.2
坐着活动 (在办公室、学校、实验室等)		70	1.2
站着活动 (买东西、实验室内轻劳动)		93	1.6
站着活动 (商店营业员、家务劳动)		116	2.0
中等活动 (重机械加工、修理汽车)		185	2.8
在平坦的道路上步行 /km·h ⁻¹			
3.2		116	2.0
4.8		152	2.6
5.6		186	3.2
6.4		222	3.8
沿斜坡向上步行			
坡度 /%	速度 /km·h ⁻¹		
5	1.6	140	2.4
5	3.2	175	3.0
5	6.4	305	5.3
15	1.6	169	2.9
15	3.2	268	5.2
25	1.6	210	3.6
25	3.2	392	6.8
工作: 钟表匠		64	1.1
教师		93	1.6
皮鞋匠		116	2.0
体育运动: 体操		175~232	3.0~4.0
跳舞		140~266	2.4~4.6
网球		268	4.6
击剑		410	7.1
羽毛球		420	7.2
篮球		440	7.6
摔跤		510	8.8

1. 热贮存

人体内热量贮存量为

$$S = 1.15mc_p(t_1 - t_2)/\tau \tag{2-2-2}$$

式中, S 为热贮存, 得热为 (+), 失热为 (-), W ; m 为身体质量, kg ; c_p 为人体比热, $3.475 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; t_1 为起始身体平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 为始末身体平均温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s 。

经过许多研究表明, 身体的平均温度等于 0.33 倍的皮肤温度加上 0.67 倍的核心温度 (即直肠温度)。

2. 新陈代谢率 (metabolic rate)

从表 2-2-1 查阅有关资料得到数据, 容易确定新陈代谢率, 例如坐着休息为 $58 \text{ W}/\text{m}^2$ 或 1.0 met , 轻强度工作为 $92.858 \text{ W}/\text{m}^2$ 或 1.6 met 。其新陈代谢量 M 为新陈代谢率乘以人体表面积。要降低新陈代谢率, 有两种途径: 一是采用机械化; 二是缓慢地工作。实际中尽量采用第一种。

3. 功

如果人体对外界做功, 这部分能量应该从新陈代谢中扣出, 以得到人体内的净热。

4. 辐射

辐射传热量为

$$R = \epsilon \sigma A_{Du} f_{\text{eff}} f_{\text{clr}} F_{\text{clr}} (T_r^4 - T_{\text{skin}}^4) \quad (2-2-3)$$

式中, R 为辐射传热量, 得热为 (+), 失热为 (-), W ; σ 为常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A_{Du}^* 为皮肤表面积, m^2 , 且

$$A_{Du} = 0.208 + 0.006789 \times l^{0.725} \times G^{0.425}$$

其中 l 为身高, cm ; G 为人体质重, kg ; f_{eff} 为有效皮肤辐射面积因素, 站立为 0.725, 坐着为 0.696; f_{clr} 表示由于服装的原因, 使人体辐射表面积增加, 且

$$f_{\text{clr}} = 1 + 0.155 I_{\text{clo}}$$

I_{clo} 为服装热阻值, clo^{**} ; F_{clr} 为服装对辐射传热系数的影响, 且

$$F_{\text{clr}} = 1/[1 + 0.155 \times 5.2 I_{\text{clo}}]$$

ϵ 为发射率, 其中皮肤为 0.99, 衣服为 0.7; T_{skin} 为皮肤温度, K ; T_r 为平均环境辐射温度, K 。

在热的环境中, 一般人的皮肤温度保持在 35°C 。人应尽量在阴凉处工作, 以减小太阳辐射。衣服是人获得辐射热的第一道屏障, 尤其是戴上帽子和穿上长袖衣服。在人与热源之间使用固定屏障, 也是一种有效的隔热方法。

5. 对流

对流传热量为

$$C = h_c A_{Du} f_{\text{clo}} (t_{\text{air}} - t_{\text{skin}}) \quad (2-2-4)$$

式中, C 为对流传热量, 得热 (+) 或失热 (-), W 。 h_c 为对流换热系数, $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 与空气流速 v 有关。对站立的成人, 当风速为 $0.05 \sim 2 \text{ m/s}$ 时, $h_c = 4.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 对坐着的成人, $h_c = 8.3 v^{0.6}$, 其中 v 为空气流速, m/s ; A_{Du} 为皮肤表面积, m^2 ; f_{clo} 为由于服装的原因, 对对流换热系数 h_c 进行修正。就一般情况而言,

$$f_{\text{clo}} = 1/[1 + 0.155 \times 2.9 I_{\text{clo}}]$$

其中, I_{clo} 为服装热阻值, clo ; t_{air} 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{skin} 为皮肤温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

* A_{Du} 为人体的杜波伊面积, 与人体身高和体重有关, 我国成年人一般为 $1.5 \sim 1.8 \text{ m}^2$ 。

** clo 是国际上人体热舒适研究领域通用的服装热阻单位。