

THEORY AND APPLICATION OF PARTIAL TIME AND PARTIAL
SPACE THERMAL ENVIRONMENT REGULATION

分时分区热环境调节 理论与应用

王登甲 宋 聪 王丽娟 蒋 婧◎著

中国建筑工业出版社

分时分区 热环境调节理论与应用

王登甲 宋 聪 王丽娟 蒋 婧 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

分时分区热环境调节理论与应用/王登甲等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 6
ISBN 978-7-112-23413-4

I. ①分… II. ①王… III. ①建筑热工-研究 IV. ①TU111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 041464 号

本书是由笔者在差异化热舒适、分时分区热环境调节领域的研究成果积累而成。内容包括两大部分, 第一部分阐述了差异化热舒适需求机理、分时分区热环境调节技术背景和撰写思路, 主要讲述了人体差异化热舒适的基础理论、人体动态热调节系统生理模型与非均匀非稳态环境人体散热机理、人体睡眠差异化热舒适模型和睡眠热环境评价方法等。第二部分主要阐述了基于大量调研测试而形成的分时分区热环境设计参数, 建筑围护结构差异化保温、被动太阳能利用等建筑本体分时分区调节技术, 并论述了强化对流架空地板、昼夜两用型暖床、移动相变取暖器等主动式热环境灵活调控装置及其效果。

本书可作为高等院校暖通空调、建筑技术和建筑设计等专业研究生教学参考用书, 也可供建筑设备、土木工程、建筑设计等领域科学研究、工程技术人员参考。

责任编辑: 张文胜

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖

分时分区热环境调节理论与应用

王登甲 宋 聪 王丽娟 蒋 婧 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12½ 字数: 309 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-23413-4

(33711)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国供暖热源主要依赖化石燃料燃烧,传统供暖模式正面临能耗高、污染严重等巨大挑战。随着新型城镇化建设、建筑工业化进程的逐步加快,北方各地供暖期大面积雾霾频发,传统供暖热源和模式频受质疑。对日趋严重的能源危机和环境污染问题,建筑设备工程师应始终致力于以最少的能源消耗来满足建筑热环境需求。近些年,随着国家清洁供暖、节能减排等重大能源战略推进,寻求利用可再生能源替代常规能源、开发高效供暖系统形式和按需精准散热的灵活末端技术是解决此类问题的主要途径。

目前,依据室内单值热环境设计参数、稳态建筑传热过程的无差别持续供热是我国冬季建筑供暖的主要特征。室内热环境调控性差,甚至会出现部分时段“室温过高、开窗散热”的现象,供暖能源浪费严重。据统计,由于供暖末端调节控制不灵活而造成的额外能耗约占到供暖总能耗的30%以上。而实际上,住宅、办公、教学、医院等不同类型建筑的不同功能空间和使用时段,人员对室内温度期望程度存在差异。因而,依据人员实际活动轨迹、室内差异化热需求特征,开展分时分区热环境调节是能源高效利用、降低建筑能耗的途径之一,也是建筑能源从粗放型能源消耗到精细化能源管理的重要体现。

本书基于笔者在多节点人体动态热舒适模型、睡眠差异化热舒适模型、分时分区热环境设计参数、建筑本体热环境调节、主动式分时分区调节技术等方面研究成果。旨在理清人体差异化热舒适的本质,形成合理的分时分区热环境调节参数,提出适宜的被动和主动式分时分区热环境调节技术,为科学研究和工程应用提供参考。

本书涉及的理论分析、数值计算和实验研究大多是在刘艳峰教授的指导下完成,感谢刘老师的辛苦指导和付出。笔者所在课题组指导的历届研究生们前期付出了辛勤的研究工作,在书稿整理过程中,李勇博士和陈耀文、周勇、李涛、董宇等博士生花费了大量时间和精力,在此对他们表示衷心感谢。本书在笔者及课题组承担的“十三五”国家重点研发计划“藏区、西北及高原地区利用地区可再生能源采暖空调新技术(2016YFC0700400)”,国家自然科学基金项目“低负荷时段间歇运行中小学采暖建筑热过程及负荷特性研究(51678468)”,“分布式太阳能集中供暖多源多汇动态耦合分析及设计优化研究(51878532)”等项目成果的基础上撰写而成。

最后,特别感谢“西部绿色建筑国家重点实验室”为本书写作过程中的诸多研究工作提供了完善的实验平台和仪器设备条件。

限于著者的学识和水平,本书难免有不妥之处,恳请读者批评指正!

目 录

第1章 绪论	1
1.1 建筑热环境演变历程	1
1.2 室内热环境与人体热舒适	2
1.3 人体热舒适评价模型的发展	2
1.4 建筑热环境分时分区调节的意义和必要性	3
1.5 章节安排及撰写思路	4
本章参考文献	5
第2章 人体差异化热舒适理论基础	6
2.1 人体热平衡	6
2.1.1 热平衡方程	6
2.1.2 人体的产热、做功与蓄热	7
2.1.3 人体与周围环境热交换	8
2.2 人体热感觉与热舒适	11
2.2.1 人体的温度感受系统	11
2.2.2 人体热感觉	12
2.2.3 人体热舒适	13
2.3 稳态热舒适理论	13
2.3.1 稳态热舒适理论的发展	13
2.3.2 PMV-PPD模型	14
2.4 人体动态热舒适	15
2.4.1 动态环境下的人体热舒适	15
2.4.2 自然通风下的人体热适应	16
2.5 差异化人体热舒适	18
2.5.1 人体热舒适的时间差异化	18
2.5.2 人体热舒适的空间差异化	19
2.5.3 特殊人群差异化热需求	19
本章参考文献	20
第3章 人体多节点动态热调节模型	22
3.1 人体动态热调节系统生理模型	22
3.1.1 受控系统模型	22

3.1.2 控制系统模型 25

3.1.3 服装模型 27

3.1.4 模型验证 31

3.2 稳态环境人体散热机理 42

3.2.1 均匀稳态温度环境 42

3.2.2 非均匀稳态温度环境 45

3.2.3 稳态风速环境 48

3.2.4 稳态环境人体散热量与散热比例分析 51

3.3 非稳态环境人体散热机理 52

3.3.1 均匀非稳态环境 52

3.3.2 非均匀非稳态环境 59

3.3.3 非稳态环境人体散热量与散热比例分析 63

3.4 不同散热方式分析 64

3.4.1 人体各种散热量 64

3.4.2 人体各种散热比例 65

3.5 人体舒适散热配比及热环境评价 66

3.5.1 人体散热方式简化 66

3.5.2 人体散热比例与 PMV 的关系 66

3.5.3 舒适散热比例范围 67

本章参考文献 68

第 4 章 睡眠差异化热舒适模型 70

4.1 人体局部与整体热反应 70

4.1.1 头部—覆体皮肤温度 71

4.1.2 头部与覆体热需求差异 72

4.1.3 被褥微气候取暖时头与覆体热反应 73

4.2 人体两段式传热模型 75

4.2.1 睡眠人体与环境的热交换分析 75

4.2.2 人体头部与环境的热交换 75

4.2.3 被覆躯体与环境的热交换 77

4.2.4 睡眠状态下人体的散热量 78

4.3 睡眠人体热舒适 PTS-WPD 模型及热环境评价 82

4.3.1 睡眠人体热感觉预测 PTS 模型 83

4.3.2 睡眠热环境满意率预测 WPD 模型 84

4.3.3 PTS-WPD 评价方法 87

4.4 睡眠热舒适环境参数匹配设计 88

4.4.1 室内空气温度与被褥温度	89
4.4.2 室内空气温度与辐射温度	90
4.4.3 室内空气温度与相对湿度	93
本章参考文献	95
第5章 分时分区环境热需求及参数设计	97
5.1 分时分区热需求理论	97
5.1.1 热需求层次递进理论	97
5.1.2 热需求空间递进理论	98
5.1.3 分时分区热需求概念和分类	98
5.2 西北地区村镇建筑分时分区热需求现场调查	98
5.2.1 调研概况	99
5.2.2 调研内容	99
5.2.3 调研结果分析	100
5.3 西北地区村镇建筑分时分区热需求	104
5.3.1 分时供暖需求	104
5.3.2 分区供暖需求	104
5.3.3 分时分区热环境设计参数	106
本章参考文献	107
第6章 建筑本体分时分区热环境调节技术	109
6.1 透明围护结构夜间强化保温技术	109
6.1.1 内置窗帘物理模型	109
6.1.2 窗帘附加热阻计算方法	111
6.1.3 空气层最佳热阻	114
6.1.4 窗帘附加热阻计算	117
6.1.5 实验验证	119
6.2 非透明围护结构朝向差异保温技术	120
6.2.1 建筑非均匀室温特征	120
6.2.2 室内非均匀温度分布特征	122
6.2.3 非透明围护结构朝向差异保温	126
6.2.4 非透明围护结构朝向修正率	128
6.3 被动式太阳能热调节技术与应用	130
6.3.1 典型被动式太阳房热环境调节效果	130
6.3.2 被动式太阳能技术匹配及适宜性分区	134
6.4 围护结构保温技术体系优化	136
6.4.1 全生命周期经济评价模型	136

6.4.2 单项围护结构节能优化	138
6.4.3 围护结构体系保温优化	139
6.4.4 实例分析	144
本章参考文献	148
第7章 主动式分时分区热环境调节技术	149
7.1 地板辐射末端间歇供暖技术	149
7.1.1 地板辐射供暖末端数理模型	149
7.1.2 辐射地板间歇运行蓄放热规律	152
7.1.3 辐射地板间歇运行室内温度特征	155
7.2 强化对流式架空辐射供暖地板	157
7.2.1 强化对流式架空辐射供暖地板热工理论	157
7.2.2 强化对流式架空辐射供暖地板蓄放热特性	161
7.2.3 强化对流式架空地板辐射供暖房间室内热环境	163
7.3 昼夜两用型低温热水盘管暖床	166
7.3.1 低温热水盘管暖床模型	167
7.3.2 昼夜暖床散热特性	170
7.3.3 暖床房间热环境特征	173
7.4 强化对流型供暖墙	177
7.4.1 强化对流型供暖墙物理模型	177
7.4.2 强化对流型供暖墙热平衡分析	178
7.4.3 强化对流型辐射墙体热特性	179
7.5 移动式相变热风取暖器	183
7.5.1 移动式相变热风取暖器传热数学模型	183
7.5.2 移动式相变热风取暖器蓄放热过程	185
7.5.3 蓄放热过程影响因素分析	187
本章参考文献	191

第 1 章 绪 论

1.1 建筑热环境演变历程

人类早期在热带雨林、热带草原等湿热地区主要栖息在树上，可避免台风、暴雨、猛兽等外界的侵害，是人类祖先南方古猿生活方式的延续。随着人类向温带迁移，人类住所过渡到了冬暖夏凉的岩洞，逐渐适应了年温差和日温差都较大的气候条件。随着生产力和科技的发展进步，人们希望建筑物能够满足的要求从最初的安全性、功能性，逐步提升到美观和舒适性。从中国近现代建筑发展史可见，人们结合长期的传统建筑营造经验，逐渐开发出适宜于不同气候区、不同地域文化的传统民居建筑形式，如黄土高原的窑洞、云贵地区的干栏建筑、北方内蒙古地区的毡房、北京四合院建筑等，充分体现了人们通过自然的建筑技术手段营造良好热舒适环境的优秀经验技能。近些年，随着能源危机和环境污染成为当今世界的两大难题，建筑物建造和运行过程中的能源消耗和环境保护又被高度重视，且建筑应满足的要求也多了绿色、生态和环保属性，进而演变为在营造舒适环境、节能环保之间寻找平衡点。

20 世纪以来，工业革命的发展给人们带来了供暖空调产品设备，使人们获得了 unlimited 改变建筑环境的能力，居住、办公、医院、宾馆等各类建筑冬夏季室内热环境得到了明显的提升。拥有供暖空调设备之后，人们对居住建筑传统优秀经验的继承便逐渐减少，对地域气候特征、建筑文化的关注也在降低，造成了建筑趋同化的消极影响，为了降低建筑能耗而降低室外新风量的引入，更是容易造成气闷、头疼、嗜睡等病态建筑综合症，这些都是建筑热环境发展过程应注意和避免的问题。

随着生活水平的不断提高，人们对于建筑热舒适的诉求也悄然发生着变化。20 世纪 80 年代以来，依照我国建筑热工区划，北方地区大多划归为“严寒或寒冷地区”，属于集中供暖区域，民用建筑冬季有强烈的供暖需求，而夏季空调需求较少；长江中下游地区，划归为“夏热冬冷地区”，按照我国供暖区域划分，属于非集中供暖区，大多仅考虑夏季空调降温问题，而事实上，长江中下游大多地区居民有强烈的冬季取暖诉求，北方地区夏季大多时段也存在空调降温的意愿。而我国广大的西北地区，虽属于供暖区，但受经济技术条件的限制，村镇居住建筑供暖措施仍不完善，室内热舒适性差，近些年，在新型城镇化进程不断加快的过程中，改善冬季室内热环境已成为当地居民最为关心的问题之一。

已有研究表明，建筑热环境应从完全稳态的热环境向更有利于人体生理活动和身体机能调节的动态热环境发展。总之，建筑热环境需求和发展水平不断变化，在兼顾营造热舒适环境的同时，降低常规能源消耗、减少环境污染是建筑设备工程师的共同愿望。因此，充分利用可再生能源，以最少的能源消耗满足不断变化的建筑室内热环境营造需求是暖通空调、建筑技术等学科发展的目标。

1.2 室内热环境与人体热舒适

室内热环境是指由室内空气温度、相对湿度、气流速度、周围物体表面温度等物理因素组成的微气候环境，是室外气候环境与内部热源通过建筑围护结构进行热交换的结果。人们的生活和工作大部分时间都在室内进行，室内热环境直接影响室内人员的冷热感、身体健康和工作学习效率。

人体的冷热感觉是室内的温湿度、风力大小、热辐射情况、衣着和个人心理及身体素质等因素综合作用的结果。建筑热环境的设计目标是舒适、健康、高效，即以最少的能源消耗提供舒适、健康的工作和居住环境，提高生活质量。高效节能的建筑室内热环境的创造要依靠城乡规划、建筑设计、建筑技术、暖通空调等各学科学者的共同努力与协作，是一个长期摸索与探究的过程。

所谓人体热舒适，是指人体对冷热环境感到满意的主客观评价。人体热平衡是人感到舒适的必备条件，人体热平衡即人体新陈代谢产生的热量与自身蒸发、导热、对流和辐射的失热量的代数和相平衡。对人体而言，与周围环境的导热、对流及辐射换热是得热或失热的三种显热热交换方式，此外还包括汗液蒸发、呼吸散热、皮肤湿扩散等潜热热交换方式。良好的建筑室内热环境对人体的健康舒适和工作效率都会产生积极有利的影响。

影响人体热舒适感觉的因素有空气温度、空气相对湿度、空气流速、平均辐射温度、人的新陈代谢率和衣服热阻，前4个因素为室内热物理环境因素，后2个因素为个人因素。当某一要素达不到预期的要求时，可以在一定范围内通过调节其他要素来弥补所造成的不利影响。

研究显示，室内适宜的温度是20~24℃。在人工空调环境下，冬季温度控制在16~22℃，夏季控制在26~28℃时，能耗经济，同时又较为舒适。在热舒适区内（干球温度16~25℃），相对湿度在30%~70%范围内变化对人体的热感觉影响不大，一般认为最舒适的相对湿度应为50%~60%。室内空气的流动为室内环境的通风换气提供了简捷有效的途径，合理的空气流动速度范围为良好的室内空气品质提供了保障。一般情况下，令人体舒适的气流速度应小于0.3m/s。而在热湿地区，夏季室内风速在0.3~1m/s时多数人感到愉快。平均辐射温度是一个复杂的概念，与人在室内所处的位置、着装及姿态有关，是室内热辐射指标，主要取决于空间周围表面温度。热辐射具有方向性，因而在单向辐射下，只有朝向辐射的一侧才能感到冷或热的定向变化。通过改善围护结构热工性能来提高辐射热舒适水平是行之有效的手段之一。

1.3 人体热舒适评价模型的发展

热舒适模型是建立热环境评价方法和制定标准的基础，主要包括空调环境下的稳态热舒适模型和自然调节环境下的热适应性模型等。

在热舒适理论模型中，最为经典的是1970年丹麦技术大学P. O. Fanger教授提出的PMV模型。在人体热平衡的基础上，结合实验数据和舒适状态的生理条件，提出了稳态条件下的热舒适方程，继而建立了预测热感觉的理论模型。该模型认为，人在热环境中处

于稳定状态且感到舒适有三个基本条件：一是人体与环境必须达到热平衡；二是人体的皮肤平均温度应保持在较小的范围内；三是为了舒适人体应该有一定的排汗量。热感觉预测模型（PMV）将空气温度、平均辐射温度、相对湿度、风速、衣着量和活动强度 6 个因素，组合带入热舒适方程式，换算为人体热感觉，并与七级热感觉标尺进行参照对比，实现了热舒适主观问题的客观化评价。

PMV 模型给出了一定环境下人群的热感觉平均投票值，反映的是绝大多数人的感觉。但是人与人之间有一定的生理差异，该模型并不能代表所有人的热感觉，为了能够预测该模型的不满意率，P. O. Fanger 教授又提出了预测不满意百分比 PPD 模型。通过实验及理论分析，创建了 PMV-PPD 的热舒适关系模型，该关系模型一直沿用至今，是目前国内外热舒适研究理论中最经典的模型，已成为评价人体热舒适的国际通用指标。

随后，越来越多的现场调查研究发现，非空调环境下的热舒适调查与 PMV 预测模型有较大的偏差，即存在“剪刀差”现象。基于此，学者引入了期望因子的概念，提出了 PMV 的修正模型。此外，PMV-PPD 模型是在实验室研究中根据人体热平衡得到的，受到 4 个环境物理参数和 2 个人体参数的影响，但是并没有考虑文化背景、气候条件和社会状况等实际因素的影响，这些不一致性和差异性使得适应性热舒适理论逐渐产生。

针对非空调环境下人体热舒适与稳态热环境条件的差异，美国 ASHRAE 展开了 RP-884 研究项目，在世界范围内调查研究、量化建筑室内环境对人体热反应的影响，形成了 RP-884 数据库。该数据库包含了来自亚洲、欧洲、北美洲和大洋洲四大洲国家的 160 栋建筑、22346 份问卷的数据。后来，Richard de Dear 总结前人的成果，结合 ASHRAE 开展的 RP-884 研究项目中采集到的数据，提出了“适应性热舒适模型”，成为 ASHRAE 55-2004/2013 适应性舒适标准制定的基础理论。

根据现场调查发现，室内舒适温度与室外月平均温度之间有很好的回归关系，Yao 等人利用“黑箱”控制理论加以描述，令输入信号为物理刺激量，输出信号为人体热感觉，黑箱中包含建筑、人体、环境等相互作用的影响变量，得到适应性预测平均热感觉 aPMV 模型。该模型也被收录于我国标准《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785—2012。

目前，PMV 稳态模型和热适应性模型都被广泛用来评价不同热环境下的人体热舒适状况。

1.4 建筑热环境分时分区调节的意义和必要性

目前，依据室内单值热环境设计参数、稳态建筑传热过程的无差别持续供热是我国冬季建筑供暖的主要特征。室内热环境调控性差，甚至会出现部分时段“室温过高、开窗散热”的现象，供暖能源浪费严重。据统计，由于供暖末端调节控制不灵活而造成的额外能耗约占到供暖总能耗的 30% 以上。

已有研究表明：居民冬季在客厅、卧室等各功能房间所停留时间具有显著的轨迹可寻性，而且对于各功能房间在不同时段的室内温度期望程度也存在差异。依据人员实际活动轨迹、室内差异化热需求特征，开展分时分区热环境调节是能源高效利用、降低建筑能耗的重要途径之一。按需精确输配也是我国近些年建筑能源从粗放型能源消耗到精细化能源

管理的重要体现。因此,室内热环境进行分时分区精确调节,既可保障人体热舒适,也可节约大量建筑能源消耗。

1. 人员活动轨迹与作息规律

根据人员实际作息规律,各房间的人员在室率随时间发生变化,这一现象在居住建筑中体现为在客厅、卧室、厨房等主要活动空间不同时段占用比例不同,例如夜间主要在卧室、昼间主要在客厅等,受活动强度等因素影响,人员对各功能房间热环境的期望程度也存在差异。在办公楼、学校建筑中更是体现为昼间使用、夜间停用的使用特征,而且还应考虑学习效率、工作效率等对室内热环境的特殊需求。人员昼夜活动轨迹迁移、不同功能空间的热需求差异为建筑热环境分时分区设计提供了现实依据。

2. 人体差异化热舒适基础

分时分区供暖应以人体差异化热舒适需求理论为依据。人体昼间活动、夜间睡眠新陈代谢程度不同、散热机理各异,对室内热环境的需求也存在巨大差别。此外,头部、躯干等人体不同部位对其所处微环境要求也不相同。人体时空差异化热舒适需求应建立在人体精准散热计算分析的基础上。人体散热预测的难点是确定精确人体热调节系统模型。目前的人体热调节模型复杂且侧重于几何模型的近似、控制系统的描述、热感觉和服装自身的热质传递,从人体—服装—环境整体系统研究较少。

3. 人员对热环境的行为调节

行为调节反映了人体与所处热环境的交互作用,是人体对外部环境施以主观调控的客观体现。人体对热环境的行为调节主要包括三个方面:供暖方式及调控策略选择、体周热阻调整和活动强度改变。体周热阻和代谢水平作为影响人体热舒适的个体因素,是人体对热环境产生行为调节的重要方面。对于活动状态下的人体,体周热阻主要指着装热阻;对于睡眠状态下的人体,体周热阻指由睡衣、被褥和床体组成的寝具系统热阻。受气候条件、地域特征、社会文化等因素影响,体周热阻和活动强度的适度调整通常在行为调节方式中发挥先驱作用。掌握人员对着装条件和活动强度的调节使用规律是分析建筑供暖设计参数及人体分时分区热需求的基础。

4. 热环境分时分区调节必要性

人体的热舒适状态主要由其周围微环境决定,而在不同行为模式和活动状态下,人体所暴露的热环境空间发生变化。如前所述,在活动轨迹和行为调节的现实条件下,人体对建筑的热需求存在分时间、分空间现象。据此,笔者提出由建筑全空间向房间全空间—工位空间—人体周围微空间三级依次递进的热环境调控范围;在居住建筑中具体体现为各主要功能房间在部分时段、部分空间的供暖模式,即建筑热环境分时分区调节理论。

从时间和空间双维度对建筑环境进行分时分区供暖,不仅契合了人体在气候地域适应条件和昼夜生理节律波动下的差异化热舒适需求,同时为建筑热环境调控和供暖系统设计提供了巨大的节能潜力,有助于推动并实现热环境保障及建筑节能技术的高水平发展。

1.5 章节安排及撰写思路

本书针对分时分区热环境营造,从人体差异化热舒适理论和分时分区热环境调节技术两大方面进行撰写,章节安排如下:

第一部分：人体差异化热舒适理论

第1章描述差异化热舒适需求、分时分区热环境调节技术及应用的意义和必要性；第2章阐述热舒适基础理论、人体差异化热舒适理论基础；第3章讲述人体动态热调节系统生理模型、非均匀非稳态环境人体散热机理和热舒适状态人体散热配比模式；第4章阐述人体时空差异化热需求机理、睡眠差异化热舒适模型、睡眠热环境评价方法与参数体系等。

第二部分：分时分区热环境调节技术

第5章描述了分时分区热环境的大量调研测试结果，以及形成的分时分区热环境设计参数；第6章从建筑围护结构差异化保温、被动太阳能利用等方面阐述了建筑本体分时分区调节技术；第7章阐述了昼夜两用型暖床、强化对流架空地板、移动相变取暖器等主动式热环境灵活调控装置及其效果。

综上所述，本书旨在理清差异化人体热舒适、时间和空间热需求基础，提出适宜于分时分区热环境调节控制的室内热环境设计参数体系，充分运用被动式建筑本体热调节功能，并配备研发出的分时分区高效灵活调节末端技术，全面实现基于热体差异化热需求的分时分区热环境调节技术体系，为建筑灵活高效运行奠定坚实的理论依据。

本章参考文献

- [1] 朱颖心. 建筑环境学(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 王丽娟. 人体散热方式与室内热环境参数关系研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [3] 宋聪. 冬季人体睡眠差异化热需求及热环境设计参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [4] 蒋婧. 热舒适与学习效率综合作用的西北乡域教室冬季热环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.

第 2 章 人体差异化热舒适理论基础

人们对建筑室内舒适环境的需求随着社会发展、生活水平的提高而日益增长。借助先进的暖通空调技术措施，可以创造出舒适的室内环境。然而，人体热舒适除了受建筑热环境参数影响之外，还与人员活动强度、服装热阻等因素密切相关，并且随着人群类型、活动状态等因素变化在时间和空间维度呈现出差异化状态。为了对现有建筑能源系统进行合理的设计、控制和管理，同时为了创造满足不同热需求下的理想室内气候条件，首先必须对人体差异化热舒适的理论基础进行全面剖析。本章主要围绕人体对热湿环境反应的生理学基础，介绍了差异化热舒适领域的相关基础理论。

2.1 人体热平衡

人体器官、循环系统及呼吸系统等人体生理机制均在一定的温度范围内精准地运行调控。人体热调节系统通过复杂的生理机制和调节系统保持体温基本恒定，在较为宽泛的环境参数范围内构建人体动态热平衡。体温是指身体深部组织的核心温度，人体处于静息状态下的正常范围为 $36\sim37.5^{\circ}\text{C}$ 。实际上，深部组织由于不同器官组织的代谢率不同，温度也各不相同。例如人体肝脏部分温度最高，人体静息状态下可达 38°C ，由于全身血液在不断流动循环，进行热量交换，所以人体各部分器官温度不会相差很大。但是由于受到周围热环境或者是人体活动量等因素的影响，人体体温通常在 $30\sim40^{\circ}\text{C}$ 之间波动变化。如从事重体力活动可使体温短时间内快速达到 39.5°C ，但如果体温超过 40°C ，人体的热调节及其他系统或器官可能会遭到破坏，体温一旦超过 42°C ，人体内生物化学反应将停止，各系统

将形成恶性循环而致人死亡。可见，维持人体热平衡是最根本的生存条件。

人体为了维持体温的基本恒定，体内需要不断产生热量以维持与环境的热交换以及自身活动的需要。人体新陈代谢产生的能量，一部分用于满足人体生理活动的需要，一部分用于人体对外做功，此外，还与环境进行热交换。热交换的进行程度影响了人体对环境的冷热感觉，乃至热舒适感觉。人体与环境的热交换理论是研究人体热舒适的基础，如图 2-1 所示。

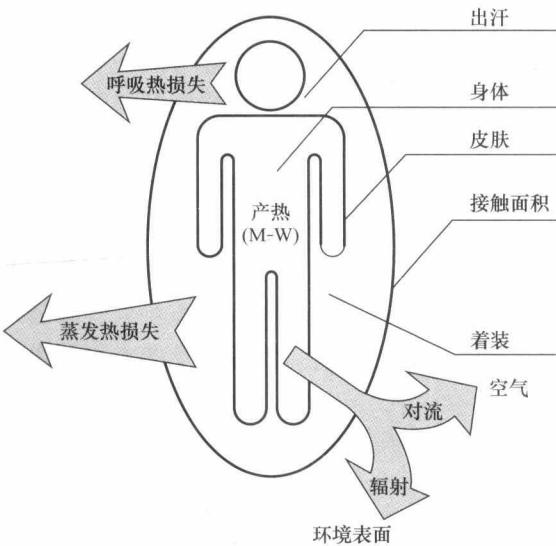


图 2-1 人体与环境的热交换

2.1.1 热平衡方程

根据热力学第一定律，为了维持人的

体温调节系统正常运转，必须使产热和散热保持平衡，即人体应该满足基本热平衡方程式：

$$M - W = R + C + E + S \tag{2-1}$$

式中 M ——人体能量代谢率， W/m^2 ；
 W ——人所完成的机械功， W/m^2 ；
 R ——人体与环境的辐射热交换， W/m^2 ；
 C ——人体与环境的对流热交换， W/m^2 ；
 E ——人体由于呼吸、皮肤水分蒸发、出汗造成与环境的热交换， W/m^2 ；
 S ——人体的蓄热率， W/m^2 。

2.1.2 人体的产热、做功与蓄热

人体的主动产热与能量代谢率有关，其在热平衡方程中用 M 来表示。能量代谢率 M 是人体通过新陈代谢作用将食物转化为能量的速率，与人体的新陈代谢过程有关，需要通过生理学手段进行研究。人体的代谢率在一定温度范围内是比较稳定的，当环境温度升高或降低时，代谢率都会增加。实验发现裸身男子静卧于温度 $22.5\sim 35^{\circ}C$ 范围内的气候室内，人体的产热量基本不变。但在 $22.5^{\circ}C$ 温度下停留 $1\sim 2h$ 后，身体会出现冷颤，同时产热量开始增加。环境温度升高时，细胞内的化学反应速度增加，发汗、呼吸以及循环机能加强也会导致代谢率增加。人体的基础代谢率（ BMR ）随年龄的增长而逐渐下降，少年较高，老年稍低。女性的基础代谢率比男性约低 $6\%\sim 10\%$ 。 BMR 正常变动范围为 $10\%\sim 15\%$ ，如果变动超过 20% ，则是病理状态。肌肉活动强度对新陈代谢率的影响极为显著，新陈代谢率最佳确定方式是测量出活动人体的耗氧量和二氧化碳的排出量，进而通过式（2-2）进行计算：

$$M = 352(0.23RQ + 0.77)V_{O_2}/A_D \tag{2-2}$$

式中 RQ ——呼吸商，无量纲，定义为单位时间内呼出二氧化碳和吸入氧气的摩尔数比；
 V_{O_2} ——单位时间消耗的氧气在 $0^{\circ}C$ 、 $101.325kPa$ 条件下的体积， L/min 。

根据不同的强度的活动，成年男子在连续活动下的新陈代谢率如表 2-1 所示。

成年男子在不同活动强度下保持连续活动的代谢率 表 2-1

活动类型	W/m^2	met	活动类型	W/m^2	met
睡眠	40	0.7	提重物，打包	120	2.1
躺着	46	0.8	驾驶载重车	185	3.2
静坐	58.2	1.0	跳交谊舞	140~255	2.4~4.4
站着休息	70	1.2	体操/训练	175~235	3.0~4.0
炊事	95~115	1.6~2.0	打网球	210~270	3.6~4.0
用缝纫机缝衣	105	1.8	步行，0.9m/s	115	2.0
修理灯具，家务	154.6	2.66	步行，1.2m/s	150	2.6
在办公室静坐阅读	55	1.0	步行，1.8m/s	220	3.8
在办公室打字	65	1.1	跑步，2.37m/s	366	6.29
站着整理文档	80	1.4	下楼	233	4.0
站着，偶尔走动	123	2.1	上楼	707	12.1

人体所做的机械功用 W 表示。为了便于计算，通常利用人体机械效率的形式表达，而人体对外输出的机械功是代谢率 M 的函数。则人体对外做功的机械效率 η 表示为：

$$\eta = W/M \quad (2-3)$$

人体在不同活动强度下机械效率值比较低,一般为5%~10%。对于大多数的活动来说,人体的机械效率 η 几乎为0,很少能超过20%。因此在空调负荷计算时往往把人体的机械效率 η 看作0,其原因为:

- (1) 大部分的办公室劳动和室外轻劳动的机械效率近似0;
- (2) 人体代谢率的估算本身带有误差;
- (3) 忽略人体对外所作的机械功对于空调系统设计来说是偏于安全的。

人体的蓄热率用 S 表示。人体产热经过与环境交换消耗和对外做功部分之后,若仍为正值,说明人体系统的得热量大于失热量,人体内将蓄热,蓄热率 S 为正;反之,人体不断损失热量,蓄热率 S 为负。如果人体得热正好等于失热,则蓄热率 S 为零,即人体处于热平衡状态。如果人体处于热不平衡状态,例如得热量大于散热量,多余的热量将在体内积蓄,只要蓄热率在一定范围内,人体通过自身调节机能例如体温上升、出汗等增加与环境的换热量,使得蓄热率达到新的热平衡状态。若超出人体的体温调节范围,只有通过增减衣物以及采用供暖空调等手段来维持人体的热平衡。

由于人体本身具有较大的热容量,加上人体体温调节系统的调节功能(如控制血流量、出汗量等),可以保证人体在热不平衡状态下只有很小的体温变化。在短时期内,人体蓄热率 S 与人体温度之间的关系可用下式表示:

$$S = \frac{C_b \omega}{A_D} \frac{dt_b}{dt} (m^2) \quad (2-4)$$

式中 C_b ——人体组织的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

t_b ——人体平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

t ——体温变化时间, s ;

$\frac{dt_b}{dt}$ ——体温变化率, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

2.1.3 人体与周围环境热交换

人体对环境的辐射、对流和蒸发等换热形式分别由 R 、 C 、 E 表示。

1. 人体与环境的辐射换热

若人体表面温度与其所处的环境壁面温度不相等,则人体与环境壁面之间就会发生辐射热交换。一般情况下,人体表面温度高于环境壁面温度,人体发生的是辐射散热。在外界温度较低和机体处于安静状态时,辐射散热量占到人体总散热量的60%左右。如果人体处在高温壁面环境下(如辐射供暖板等),则人体获得辐射热。人体的表面温度大约为300K,辐射能波长为 $4.3 \sim 41 \mu\text{m}$,峰值约为 $9.5 \mu\text{m}$,属长波辐射范围。人体与环境的辐射热交换遵循辐射换热的基本原理和计算公式,辐射换热量如下所示:

$$R = A_{\text{eff}} \epsilon \sigma (T_{\text{cl}}^4 - T_{\text{mrt}}^4) / A_D \quad (2-5)$$

式中 A_{eff} ——着装人体的有效辐射面积, m^2 ;

ϵ ——着装人体外表平均黑度,亦称辐射系数;

T_{cl} ——着装人体外表平均温度, K ;

T_{mrt} ——环境的平均辐射温度, K 。

其中，平均辐射温度是一个描述环境特性的参数，与人在室内所处的位置、着装及姿态有关。平均辐射温度是假想的黑色包围体中具有均匀表面温度，人在该包围体中的辐射换热量与在实际非均匀空间的换热量相同，那么该黑体表面的温度就是真实环境的平均辐射温度。人体有效辐射面积反映了人体与环境辐射的真实外表面积。其经验公式如下：

A_eff = f_eff * f_cl * A_D (2-6)

式中 f_eff——有效辐射面积系数，即着装人体的有效辐射面积与总外表面积之比，%，f_eff通常通过实验测定获得；

f_cl——服装面积系数，着装人体表面积与裸体人体表面积之比，%。

实验结果表明，f_eff与人的性别、体重、身高、体形关系不大，对于坐态的人体约为0.696，而对于站态的人体约为0.725。如果用于估算，无论是坐态还是站态，可取其平均值0.71。服装面积系数也是由实验确定的，部分服装的有关资料如表 2-2 所示。

某些服装的热阻值及服装面积系数 表 2-2

服装种类及组合形式	I _{cl} (clo) *	f _{cl}
开领短袖衬衫，薄西长裤	0.5	1.1
轻型工作服：	0.6	1.1
短裤，袜，工作衣裤（上衣下摆）		
男式勤杂服：	0.7	1.1
内衣裤，长袖上衣及长裤，袜子及军用鞋		
战斗服：	0.8	1.1
内衣裤，长袖上衣及长裤，袜子军用鞋，但外衣裤带有内衬		
普通职员套装：	1.0	1.15
普通职员套装再加外套大衣		
轻型室外活动服：	1.5	1.15
T恤，短裤，衬衫，长裤，羊夹克，袜，鞋		
厚型传统西服套装：	0.9	1.15
长内裤，衬衫，毛裤，皮鞋，西装		
冬季标准服装：	1.5	1.15~1.2
毛内衣，长裤，带衬里的毛或法兰绒土装，防水裤，带衬里的野战大衣	1.5~2.0	1.3~1.4
极地羽绒服	3.0~4.0	1.3~1.5

* clo：衣服热阻系数单位，1clo=0.155m²·℃/W。

2. 人体与环境的对流换热

人体与环境之间也存在着对流换热，这是人体向周围空气散热的一种常见方式。人体与环境的对流热交换适用牛顿换热公式，计算式如下：

C = f_cl * h_c * (t_cl - t_a) (2-7)

式中 C——人体与外界对流换热量，W/m²；

t_cl——人体外表平均温度，℃；

t_a——人体周围空气温度，℃。

求解人体对流换热问题是比较困难的。主要是因为人体外表面形状相当复杂，并且随着不同的姿态和不同的着装而发生变化。人体外表的空气边界层内的流态、温度场、速度场都很难，甚至不可能被真实、详尽地描述。有诸多学者提出许多近似的计算方法，例如