

人体生理热反应与 建筑热环境

王丽娟 编著



中国建筑工业出版社

人体生理热反应与建筑热环境

王丽娟 编 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

人体生理热反应与建筑热环境/王丽娟编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2018.8
ISBN 978-7-112-22164-6

I. ①人… II. ①王… III. ①体温-人体生理学-关系-建筑-热环境-研究 IV. ①R339.6②TU111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 090403 号

人体生理热反应与建筑热环境

王丽娟 编 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

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 7½ 字数: 207 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-22164-6

(32053)

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)

人体生理热调节是机体适应环境的基本调节功能，它与建筑热环境密切相关，也是创造舒适、健康和节能环境的依据之一。全书分为 6 章，在介绍生理热调节和建筑热环境的同时，还介绍了不同环境条件下人体生理热反应、不同体质的生理热反应，并提出一个心理上可以接受而生理上又能适当发挥人体热调节机能的环境参数设计区域——生理调节可接受区域及其评价指标。该书的特色在于系统介绍人体在各种环境条件下的生理热反应，及其在建筑热环境中的应用。

本书可供建筑学、建筑环境与能源应用工程专业技术人员参考，也可供高等院校、研究所、供暖空调设备制造公司以及从事相关领域的科研工作者参考。

责任编辑：张文胜

责任设计：李志立

责任校对：焦 乐

前 言

人体热反应是指在温度、湿度、风速、运动量或食物等因素刺激下，人体所表现出的生理和心理反差。建筑空调、生理学、航空、航天和航海等技术领域的发展，大大推动了各类环境中人体热反应，特别是生理热反应的研究。人体生理热调节是热感觉和热舒适的客观现象，它将热舒适研究推进到更深层次。

本书主要从人体基础的生理现象出发，介绍建筑热环境特点，以及各种建筑环境条件下人体生理热反应，以及不同体质人群的生理热反应；并采用这些客观规律，去解释生活中出现的一些现象，进而利用这些规律为工程设计提出建议。其中，人体生理热反应的相关分析与结论，主要以实验数据为依据；建筑热环境相关参数的热作用，主要以理论计算为主；生理调节可接受区评价指标的推导，同时采用了理论计算和实验测试。具体方法和结论详见各章内容。

笔者长期从事建筑环境和人体热舒适研究。博士论文《人体散热方式与室内热环境参数关系研究》，主持的国家级项目“基于人体生理可调的建筑热环境参数研究”，以及国家重点实验室项目“建筑环境中人体生理热适应敏感参数及形成规律研究”，将人体热舒适从主观反应发展到机体散热、生理调节以及生理适应等机理的研究，有望在建筑环境中充分利用人体自身的生理热调节功能，来减少建筑冷负荷和热负荷，从而达到建筑节能的目的。将近几年积累的成果撰写成书，希望与该领域的专家、学者们分享，对今后的研究能尽微薄之力。

本书得到“西安工程大学供热、供燃气、通风及空调工程学科建设经费”（10709-081404）资助。全书共分6章：第1章人体在热环境中的生理学基础；第2章建筑热环境；第3章不同热环境下人体生理热反应；第4章不同体质生理热反应；第

5 章 生理调节可接受区；第 6 章 生理调节可接受区评价指标。全书由王丽娟编写。在编写过程中，田国华、王渝东、陈玟州、陈泽峰和种鼎等研究生参与了资料收集工作。

在第 2 章“2.1.2 建筑围护结构的衰减延迟”、第 3 章中“3.2 皮肤温度”和“3.4 人体各种散热方式及其散热量”编写过程中，用到王丽娟博士论文中部分数据和结论，在此感谢西安建筑科技大学刘艳峰教授对这部分内容的指导。此外，本书还参考、引用了众多专家学者的研究成果，使得内容得以完整和充实。在此，对这些作者致以深深的谢意。

由于作者水平有限，书中不当之处敬请读者批评指正。

目 录

绪论	1
第 1 章 人体在热环境中的生理学基础	4
1.1 人体生理热调节	4
1.1.1 体温	4
1.1.2 能量代谢	7
1.1.3 产热和散热	14
1.1.4 体温调节	22
1.2 热感觉与生理状态	24
1.2.1 人体对均匀温度刺激的生理响应	24
1.2.2 人体对局部冷热刺激的生理响应	25
1.2.3 人体对食物刺激的生理响应	26
1.2.4 热感觉	26
1.2.5 热感觉研究中常用生理参数	28
1.3 生理热调节失调	30
1.3.1 过热失调	30
1.3.2 过冷失调	31
第 2 章 建筑热环境	36
2.1 室内热环境影响因素	36
2.1.1 太阳辐射的热作用	36
2.1.2 建筑围护结构的衰减延迟	48
2.1.3 内扰的影响	61
2.2 室内热环境参数	63
2.2.1 辐射温度	64
2.2.2 空气温度	72
2.2.3 空气湿度	75

2.2.4	空气流速	78
2.3	热环境评价指标	81
2.3.1	热舒适指标	81
2.3.2	热应力指标	85
2.3.3	生理热调节理论模型	88
2.3.4	各指标之间的区别与联系	94
第3章	不同热环境下人体生理热反应	101
3.1	敏感生理参数研究	101
3.1.1	实验方案	101
3.1.2	结果与分析	106
3.2	皮肤温度	116
3.2.1	辐射温度对皮肤温度的影响	116
3.2.2	辐射和空气温度之差对皮肤温度的影响	124
3.2.3	服装对皮肤温度的影响	126
3.3	皮肤导热热流	132
3.3.1	温度对皮肤导热热流的影响	132
3.3.2	风速对皮肤导热热流的影响	135
3.4	人体各种散热方式及其散热量	137
3.4.1	稳态温度对人体各散热量的影响	137
3.4.2	非稳态温度对人体各散热量的影响	141
3.4.3	风速对人体各散热量的影响	149
3.5	皮肤层热阻计算方法	151
第4章	不同体质生理热反应	156
4.1	耐寒与非耐寒人体生理热反应	156
4.1.1	耐寒与非耐寒样本选择	156
4.1.2	稳态环境下耐寒与非耐寒体质比较	159
4.1.3	非稳态环境下耐寒与非耐寒体质比较	166
4.2	耐热与非耐热人体生理热反应	171
4.2.1	耐热与非耐热样本选择	171

4.2.2	稳态环境下耐热与非耐热体质比较	173
4.2.3	非稳态环境下耐热与非耐热体质比较	180
第5章	生理调节可接受区	185
5.1	基本概念	185
5.1.1	定义	185
5.1.2	指标	186
5.2	冬季生理调节可接受区	187
5.2.1	实验方案	187
5.2.2	心理参数范围	189
5.2.3	生理参数范围	192
5.2.4	环境参数范围	194
5.3	夏季生理调节可接受区	196
5.3.1	实验方案	196
5.3.2	心理参数范围	198
5.3.3	生理参数范围	201
5.3.4	环境参数范围	203
5.4	结论	204
第6章	生理调节可接受区评价指标	206
6.1	人体热负荷	206
6.1.1	热平衡方程	206
6.1.2	代谢产热量	206
6.1.3	对流散热量	207
6.1.4	辐射散热量	208
6.1.5	人体蒸发散热量	209
6.1.6	热负荷	210
6.2	主观评价指标及其标度	211
6.3	主客观相结合的评价指标	212
6.3.1	实验方法	212
6.3.2	实验结果	214

6.3.3 预测满意度评价指标 (PSV)	219
6.4 PSV 在非供暖空调建筑环境中的有效性验证	220
6.4.1 夏季非空调建筑环境验证	220
6.4.2 冬季非供暖建筑环境验证	221
6.5 评价指标 PSV 与 PMV 的关系	222
附录 1 国内外主要热环境评价指标体系	224
附录 2 耐寒性调查问卷	225
附录 3 耐热性调查问卷	227

绪 论

适应热环境是所有生物生存的关键，高温和低温环境使得它们产生生理、心理和行为方面的适应。灵长类动物一般适应于温暖气候。早期猿人曾在非洲热带气候区被发现，进化产生许多反常的症状，如站立、排汗、体毛脱落等，可能是适应非洲稀树草原干热气候的结果^[1]。在温暖的间冰期，古人类开始向热带以外的地方活动。经过几百万年，他们进化了一系列应对冷环境的行为适应能力，主要策略有控制火源、建造住所和制造衣服。这种行为适应能力成就了当今多元化、多功能、舒适健康的建筑环境。

建筑环境是人类创造的与外界分隔的活动场所。它同时受到内扰和外扰的影响，其中外扰包括：室外空气温度、湿度、太阳辐射强度、风速、风向、噪声、大气空气质量以及临近物体（其他建筑物、树木、下垫面）等；内扰包括：室内设备和人员散热散湿、照明、设备振动和人员噪声、建筑材料释放的气体等。根据不同的影响因素，建筑环境分为：热舒适环境（热湿环境，简称“热环境”）、空气质量环境、光环境、和声环境。本书主要涉及建筑热环境。

在建筑热环境中，与热舒适相关的环境参数有空气温度、湿度、风速和辐射温度。为了满足绝大多数人的热舒适要求，这些参数被限定在一个较小的范围内，其主要依据是供暖空调建筑室内热环境参数设计标准。美国 ASHRAE55 标准^[2]分别给出服装热阻为 0.5clo 和 1.0clo 的舒适区及其对应的室内环境参数范围。该热舒适区 PMV （预测平均投票）推荐值为： $-0.5 < PMV < 0.5$ ， PPD （不满意百分比）推荐值为： $PPD < 10\%$ 。国际标准化组织 ISO 7730^[3]采用相同的 PMV - PPD 推荐值。我国供暖空调室内设计参数也按照热舒适指标 PMV 和 PPD 执行。I 级

舒适度, $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$, $PPD \leq 10\%$; II级舒适度, $-1 \leq PMV < -0.5$, $0.5 < PMV \leq 1$, $PPD \leq 27\%$ ^[4]。按照 I 级舒适度, 供热工况温度为 $22 \sim 24^\circ\text{C}$, 供冷工况温度为 $24 \sim 26^\circ\text{C}$; 按照 II 级舒适度, 供热工况温度为 $18 \sim 22^\circ\text{C}$, 供冷工况温度为 $26 \sim 28^\circ\text{C}$ ^[5]。 PMV 改变 ± 0.5 , 供热工况室内设计温度平均降低 3°C , 供冷工况温度平均升高 2°C , 这意味着适当降低对建筑环境的热期望水平, 可以减小冷热负荷, 减少建筑能耗。

生活水平的提高使得越来越多的人追求环境的舒适性, 制冷制冷技术的成熟促使供暖空调设备走进寻常百姓家。基于此, 暖通空调学科及相关领域的国内外学者逐渐侧重于建筑环境的热舒适、热中性研究。然而, 人们聚焦于热舒适的同时, 似乎忽略了自身生理调节机能对环境的积极作用。

人体是一个能控制自身温度的主动调节系统。在冷环境刺激下, 人体会通过血管收缩减少散热, 以及寒颤增加产热量; 在热环境刺激下, 则会通过血管扩张和排汗等方式增加散热量。食物的代谢产热是人体能够持续释放热量的能源。这些热量会通过辐射、对流、导热和蒸发等方式从外界环境中耗散或补充。为了保证体温的相对稳定, 以及各项生理机能的正常运行, 要求这些产热量和散热量处于动态平衡。该平衡与非生物体存在根本区别: 人体能量释放的多少和方式不是固定的, 而是受主观和客观环境因素的影响, 并反作用于主观和客观因素。

既然人体自带体温调节功能, 具有适应环境的能力, 那么如何认识并有效利用将这种能力, 是本书的主要目的, 具体内容从以下几方面展开。首先, 介绍人体生理热调节基础知识, 以及热感觉与生理状态, 让读者对生理热调节的目的、方式、影响因素及其与环境的关系、与心理反应的关系有初步认识。其次, 介绍建筑热环境的基础知识和评价方法, 让读者了解建筑热环境的外扰作用机理和内扰影响因素, 环境参数(辐射温度、空气温度、空气湿度和空气流速)的本质含义、测量方法和对人体的影响, 以及热环境评价指标的种类及其特点。然后,

介绍不同热环境条件下人体生理热反应，有针对性地筛选并验证敏感生理参数，重点介绍环境条件对皮肤温度、皮肤导热热流和各种散热方式的影响，让读者认识建筑热环境如何影响人体生理热反应。紧接着介绍不同体质人群（耐寒与非耐寒，耐热与非耐热）在相同热环境条件下的差异，给出体质强弱的主要生理差异，让读者更全面、深入地认识生理热反应。最后，介绍生理调节可接受区及其评价方法，该区域是一个心理上可以接受、而生理上又能适当发挥热调节机能的区域。它分为冬夏两个区域，按照冬季生理调节可接受区的下部区域和夏季生理调节可接受区的上部区域设计环境参数，在一定程度上能减少建筑能耗。关于建筑环境中生理热调节能力的应用问题仍在探索，新的发现和应用将在后续版本中得以补充。

本章参考文献

- [1] Ruxton, G. D., & Wilkinson, D. M. Avoidance of overheating and selection for both hair loss and bipedality in hominins [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108: 20965-20969.
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2017.
- [3] ISO 7730-2005. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal [S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
- [4] GB/T 18049. 中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [5] GB 50736. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

第 1 章 人体在热环境中 的生理学基础

1.1 人体生理热调节

人体生理调节主要有神经调节、体液调节和自身调节。神经调节是通过神经系统而实现的调节，其调节形式是生物电，调节基础是反射，结构基础是反射弧。神经调节的特点：信息以动作电位的形式在神经纤维上传导，经神经元之间或神经元与效应器之间的突触，将信息传到靶细胞，作用迅速、准确，作用部位局限，作用时间较短，表现自动化，适宜调节快速的生理活动。体液调节：指机体依赖某些化学信息物质（如激素）通过体液运输，对靶器官、靶组织或靶细胞的功能进行调节的方式；主要参与对机体新陈代谢、生长发育、生殖等功能活动的调节。体液调节的特点：反应发生速度缓慢，作用部位广泛，持续时间较长。自身调节不依赖于神经和体液调节，是由机体器官、组织和细胞自身对刺激产生的适应性反应。自身调节特点：调节幅度和范围较小，起协助维持生理稳态的作用。

生理热调节是指通过血管扩张或收缩、代谢产热、泌汗等活动，维持产热与散热平衡和体温稳定的一系列相关生理调节方式。生理热调节的强弱可以作为解释人体冷热感觉的客观依据。

1.1.1 体温

维持正常的体温是生理热调节的主要目的之一，也是保证新陈代谢和生命活动正常进行的必要条件。体温是物质代谢转化为热能的产物。机体通过大脑和丘脑下部的体温调节中枢，由于神经调节和体液调节的作用，使产热和散热保持动态平衡。

1. 正常体温

人体各部分温度并不相同。身体表层的温度称为表层温度或皮肤温度,身体深部组织的温度称为核心温度。身体表面的温度比深部组织的温度低,而且容易随环境温度的变化而变化,但是深部组织的温度比较稳定。人们通常所说的体温是指机体深部的平均温度,因此,可以采用核心温度来判别健康状况所涉及的体温。由于深部温度不易直接测量,在医学和研究中通常采用腋窝、口腔和直肠等部位的温度来间接反映体温。测量直肠温度时,如果测温探头插入直肠 6cm 以上,所测的值基本接近深部温度^[1]。我国成年人静止状态下,正常腋温范围 36.0~37.4℃,平均值 36.8℃;正常口温范围 36.7~37.7℃,平均值 37.2℃;正常肛温范围 36.9~37.9℃,平均值 37.5℃^[2]。

静息状态下,由于各内脏器官代谢水平不同,它们的温度略有差异:肝脏代谢率较高,温度约 38℃;脑产热量较多,温度也接近 38℃。在机体深部,血液循环是热量传递的重要途径,使得各个器官的温度趋于一致。因此,机体深部血液的温度可以代表内脏器官的平均温度。然而,深部血液的温度并不容易测试。

与体温不同的是,人体皮肤温度随外界温度的变化而变化;相同的是各部位之间存在差别。环境温度为 23℃时,额头皮肤温度为 33~34℃,躯干为 32℃左右,手部为 30℃左右,足部为 27℃左右;当环境温度达 32℃以上时,各部位皮肤温差变小^[1]。四肢末梢温度最低,越接近躯干和头部越高。在寒冷环境中,随着气温下降,手和足皮肤温度降低最为明显,所以,在冬天手脚皮肤容易发生冻伤。关于皮肤温度随环境参数的变化详见本书第 3.2 节。

2. 体温波动

人体最大生理体温变动范围为 35~40℃。在非感染性病理发热条件下,体温上升至 38.3℃以上则为轻症中暑;升至 40℃称作体温过高,此时出汗停止,出现重症中暑;升至 42℃以上,

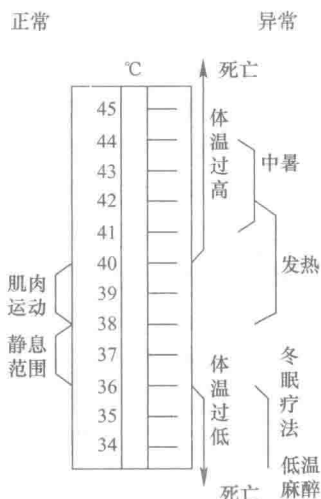


图 1-1 人类体温范围变化示意图^[2]

身体组织开始受到损伤；最高致死体温一般为 45℃。在冷环境中，核心体温下降的最初症状是呼吸和心率加快，出现头痛等不适反应。核心体温下降至 34℃ 以下时，产生健忘、纳吃和定向障碍；下降至 30℃ 时，全身剧痛，意识模糊；下降至 28℃ 以下，瞳孔反射、随意运动丧失、深部腱反射和皮肤反射全部消失、濒临死亡；下降至 20℃ 时，通常不能复苏。人体体温变化及相关症状详见图 1-1。

此外，在正常生理情况下，体温也会随昼夜、年龄、性别和劳动强度等因素变化，但变化幅度一般

不超过 1℃。

(1) 昼夜变化

人体体温在昼夜之间有周期性波动：清晨 2：00～5：00 最低，下午 2：00～5：00 最高，波动值一般为 0.5～0.7℃。这种昼夜周期性波动称为昼夜节律或日节律。研究表明，这种日节律与肌肉活动状态和耗氧量没有因果关系，而是由一种内在的生物节律所决定。

(2) 年龄

新生儿由于中枢神经系统和体温调节机制还不完善，皮肤汗腺发育又不完全，体温调节功能较差，因而体温容易受到环境因素的影响而波动。儿童代谢率高，体温略高于成人。老年人由于代谢率低，体温偏低。

(3) 性别

成年女子体温平均比男子高 0.3℃，而且其体温随月经周期而发生变化。早晨醒后起床前测得的体温称为基础体温。女子

的基础体温在月经期和月经结束后的几天内较低,排卵前日最低,排卵日升高 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。排卵后体温升高,可能是孕激素作用的结果。

(4) 劳动强度

人体劳动强度会改变代谢率,代谢率越高,人体核心温度越高。一个人经过 4.8km 长途跑步后,体温可高达 $40\sim 41^{\circ}\text{C}$ 。运动时骨骼肌收缩,肌肉活动可以明显增加产热量,导致体温上升。

(5) 影响体温波动的其他因素

情绪和恶劣的环境等因素,均可影响体温水平。精神紧张、情绪激动时交感神经兴奋,可使体温上升。个别机体甚至可升高 2°C 左右。

1.1.2 能量代谢

能量代谢是生物体与环境之间进行物质交换和能量交换,实现自我更新的最基本的生命活动过程。人体生理活动所需的各种能量,如维持体温的热能、肌肉收缩的机械能、神经兴奋传导的电能等,都是通过机体内物质代谢而获得。可见,能量代谢为生理热调节提供动力能源。

1. 能量的来源和利用

(1) 能量的来源

虽然机体所需的能量来源于食物,但机体的细胞并不能直接利用食物来进行各种生理活动。机体所需能量的直接来源主要是三磷酸腺苷(ATP)。ATP 是广泛存在于人体细胞内的一种高能化合物,它的分子中蕴藏大量的能量。每摩尔 ATP 在生理条件下可释放 51.6kJ 能量。ATP 既是体内重要的储能物质,又是直接的供能物质。人在生命活动过程中所消耗的 ATP 由营养物质在体内氧化分解所释放的能量,不断使二磷酸腺苷(ADP)重新氧化磷酸而得到补充。

体内含有高能磷酸键的分子还有肌酸磷酸(CP)。CP 主要