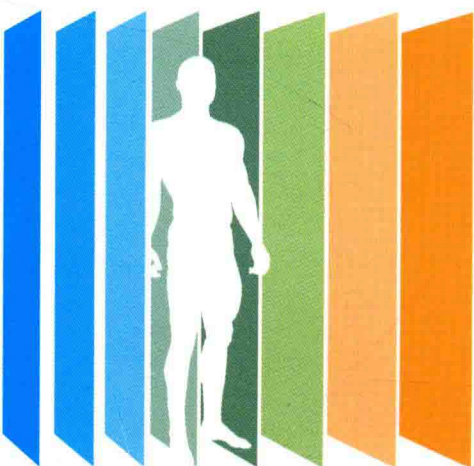




人体热舒适的 气候适应基础

杨 柳 闫海燕 著
茅 艳 杨 茜



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助

人体热力学基础

杨 柳 闫海燕 著
茅 艳 杨 茜

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共分为五章,系统介绍了人体热舒适与热适应的关系以及人体热适应的调节机理,阐述了热适应现场调查及数据分析方法;通过大量实测与问卷调查研究,建立了我国典型地域气候作用下的热适应模型,以及不同建筑调节模式下的气候适应规律。

本书可为建筑学、建筑技术科学、暖通空调领域的科学研究及工程设计人员,以及高等院校相关专业的师生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

人体热舒适的气候适应基础/杨柳等著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052658-8

I. ①人… II. ①杨… III. ①气候影响-建筑设计-研究-中国
IV. ①TU119

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 094327 号

责任编辑: 童安齐 王杰琼 / 责任校对: 刘玉靖

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 260 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

人类营造建筑的首要目的是创造舒适的室内环境，因此，协调处理好建筑与气候、建筑与人的关系是建筑设计的永恒话题。然而，现代建筑获得舒适的室内热环境往往需要消耗大量的采暖空调能耗。近年来，随着人类社会可持续发展的需要以及全球气候变化的影响，研究如何在消费最少能源与资源的前提下，创造舒适、健康的室内热环境成为建筑环境学科前沿的热点问题。

地域气候不仅是影响建筑室内热环境与建筑能耗的重要因素，同时也对人体的热舒适感产生影响。大量的实验测试结果表明：人体的实测热感觉并非呈现统一且稳定的舒适标准，而是与人们长期居住地的年平均温度，也就是一个地区的主导气候特征呈现明显的正相关性。导致这种结果的直接原因是因为人对变化的环境具有主观能动的适应能力。

人体的热适应性是指通过行为、生理和心理的调节来逐渐减弱由于热环境改变给以人体自身的刺激。其中，行为适应是指所有有意识或无意识地采取改变自身热量平衡的行为，如个人调节（穿衣、减衣）、技术调节（开、关空调等）及生活习惯（如午睡以降低新陈代谢率）；生理适应是指通过人的遗传适应（两代之间的）或环境适应（个体生命周期内的）等生理改变使人体逐渐适应热环境的改变；心理适应是根据过去的热经验或期望而导致感官反应的改变，从而导致个人的最佳舒适温度和相应的温度设定值存在很大差异。因此，人体的热舒适度是一个边界不清楚的模糊集合，要对某一适当的热环境和人体的热舒适感觉做出准确评价，不仅需要了解该环境中人的年龄、性别、衣着、饮食及休息习惯、行为方式与服饰爱好等文化和社会背景，还要了解人们在室内及室外所习惯了的热体验及个人的适应能力与变化能力。

我国地域辽阔，气候多样，各地区居民的生活习惯、地区之间的经济发展水平和经济承受能力均有不同，导致人们对变化的热环境的行为反应、生理反应的适应性和心理期望值有很大差异。巧妙地运用人体的

适应能力创造动态变化的热环境设计，不仅能提高居住者的热舒适感，还有利于降低建筑能耗，减少建筑成本。因此，低能耗建筑设计不仅需要考虑建筑对气候的适应能力，同时也需要考虑人的适应能力。而且，这种同时考虑建筑的调节性能和人的主动适应能力的建筑设计理念，改变了传统的基于机械调节的恒温环境设计思维，为建筑热环境和建筑空调系统设计带来革命性的变革，有利于促进建筑的可持续发展。

由此，以绿色建筑可持续发展为背景，以提高人体热舒适度、节约建筑能耗为目标，杨柳教授及其研究团队在 Humphrey 和 de Dear 等国际学者所提出的适应性热舒适理论的基础上，在国家杰出青年科学基金等项目及国家科学技术学术著作出版基金的支持下，以中国气候环境和中国人群为研究背景，对中国 20 多个主要大中城市，进行了长达 10 余年的现场基础实验调查，细致研究了不同气候区人群的服装热阻分布频率，人体热感觉、热满意度、热的可接受度，以及热中性温度分布规律，并建立了中国人群的适应性热舒适模型。

祝贺《人体热舒适的气候适应基础》的出版。该书不仅对我国热环境设计中室内舒适标准的确定奠定了重要的科学基础，同时也有力支撑了国际热舒适标准数据库的建设工作。

是为序。



2017 年初春

于古城西安

前 言

热舒适标准深刻影响着建筑的性能质量和能耗总量,特别是在我国经济和民用建设的高速发展时期,建筑室内环境舒适与否以及用多大代价获得怎样的舒适水平,更是影响建筑能耗总量和人民生活水平的基础,因而也是关系国计民生和国家用能安全的重要基础研究领域。

室内热环境由建成建筑的室内空气温湿度、气流速度以及建筑内表面温度等热物理环境参数综合体现,是由建筑师和暖通空调工程师协作设计的建筑热工性能决定的,是一种客观存在;室内热环境舒适与否,则是由使用人员来判断的,是人们对所处热环境是否满意的一种意识状态,是一种主观评价。因此,热舒适研究的难点是如何建立客观物理环境和人体主观评价之间的科学联系。而且,由于人们对热舒适的感知受到物理环境、生理和心理状态,甚至社会习俗和文化背景等多种复杂因素的影响,因而提出准确的热舒适预测评价模型一直是困扰国际热舒适研究领域的难题和研究前沿。

目前,国际上对热舒适的评价一直采用两种方法。一是基于热平衡方程的预计平均热感觉指标(PMV)物理模型,一是基于大量现场实验结果的统计模型。从使用结果看,前者更适用于暖通空调设备系统控制下的热环境评价,后者则可对自然通风房间给予较为准确的描述。

针对 PMV 模型在评价自然通风建筑热环境的不足,国内外学者自 20 世纪 70 年代就开始展开了系统研究,并提出了运用热适应理论来解释两者之间的差异。在自然调节环境中,人们可以借助生理、行为和心理等调节方式主动地与周围环境进行交互作用从而达到热舒适(即适应

性热舒适)。相对于实验室的稳态热舒适研究方法,这种基于现场调研的方法又被称为适应性热舒适研究方法。适应性观点认为,人在热环境中的感受不仅受其自身与环境间的热平衡制约,还与建筑所处的气候条件有关。在同样的气候条件下,相比于全年集中空调的建筑,居于自然通风建筑的使用者有更高或更低的中性温度,能接受更大的温度变化范围。因此,适应性热舒适通过人对气候的适应,扩大了人们感觉舒适的区间,从而减少采暖或制冷设备的运行时间或运行峰值负荷,降低了建筑能耗和温室气体排放。由于气候变暖的驱动及节约能源的持续需求,热适应研究也成为热舒适研究领域关注的热点。

与发达国家采用全天候空调的建筑运行模式不同,我国地域辽阔,气候多样。建筑室内热环境设计既有着北方地区的冬季集中采暖模式,也有着南方地区的夏季空调模式,还有着长江流域冬季既不供暖、夏季也不空调的自然运行模式。但无论怎样的设计模式,在实际使用过程中,都是基于需要时段,即当室内热环境超出了人体感知的热舒适区时,会启动相应的采暖和降温手段,也就是说我国的大部分建筑都是自然通风与采暖空调间歇运行的热环境控制模式,因而如何提出基于中国气候背景和热环境现状的热舒适的预测评价模型和热舒适评价标准是我国热环境研究领域面临的关键科学问题。

我国气候自南向北,跨越热带、亚热带、温带和寒带四个气候带,每个气候带太阳辐射、温度、湿度、风速风向、降水、气压等存在显著差异,且每一地区的气候与辐射条件又呈现季节性的年变化和周期性的日变化。地区气候的差异性造成了我国不同地区人们的适应能力、热舒适需求及室内热环境保障设计的差异要求。因此,对于建筑室内热湿环境的舒适度评价标准,应根据地域特征、气候特点以及人们的生活习惯做综合考虑。而目前我国现有的热舒适评价标准和规范中,主要以温度作为衡量室内热舒适的指标,不能反映我国多样化的气候特征,没有充分考虑多种气候及热环境因素对室内热舒适的影响。出现以上问题的主要原因是因为温度、湿度、太阳辐射等气候各因素耦合作用下人体生理

和心理适应的调节机理尚不明确,热舒适的气候适应理论框架和预测模型尚不完善。因此,从节能和舒适出发,探讨我国典型气候特征对人体热适应的作用机理,重视人体对气候的适应性反应,考虑人体顺应气候变化所需室内热环境的要求,对于降低建筑能耗,营造低碳、健康、舒适的室内热环境具有重要意义。

自 2003 年起,本书作者及其研究团队就人体热舒适的气候适应机理开展了持续的研究工作,并得到了国家杰出青年科学基金项目“建筑热环境”(项目编号:51325803)、青年基金项目“建筑气候分析方法与应用”(项目编号:50408014)、国家科技支撑计划项目“可再生能源应用与建筑节能设计基础数据库研发”(项目编号:2014BAJ01B01)的资助。项目内容涉及建筑学、建筑气候学、建筑环境工程等学科交叉领域。全书内容共分为五章:第一章是绪论部分,介绍热适应的产生与发展背景;第二章阐述适应性热舒适的理论基础,包括热适应机理、影响因素等;第三章介绍热适应现场调查及数据分析方法;第四章建立我国典型地域气候条件下人体热舒适的气候适应模型;第五章阐述我国不同环境调节模式下人体的热适应规律。

本书由杨柳担任总策划,确定各章内容架构和主要内容,并对全书内容进行审定,西安建筑科技大学的博士研究生闫海燕(现任职河南理工大学)参与全书的撰写工作;博士研究生茅艳(现任职河南理工大学)、硕士研究生杨茜(现任职中铁一局集团有限公司)分别参与第三章和第五章的撰写工作。

由衷感谢科学出版社的支持,使本书得以顺利出版。衷心感谢国家自然科学基金委、科技部、省部共建西部绿色建筑国家重点实验室(培育基地)和国家科学技术学术著作出版基金的立项资助。

特别感谢西安建筑科技大学绿色建筑研究中心的翟永超、林宇凡、郑武幸博士以及任艺梅、司凌燕、庞春美、高斯如等硕士研究生为本书图表的绘制和校对付出的辛勤工作。在本书的撰写过程中还参考了大量国内外学者的研究资料和文献,在此对原作者一并表示真挚

的感谢!

由于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不足,恳请读者和同行批评指正。

杨 柳

2017 年春节

于西安建筑科技大学工科楼

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 人体热舒适研究	1
1.1.1 人体热舒适与室内热环境	2
1.1.2 人体热舒适影响因素	3
1.1.3 其他因素的影响	5
1.1.4 人体热舒适的评价	7
1.1.5 人体热舒适的标准	11
1.2 热感觉、热舒适与热适应	15
1.2.1 热感觉	15
1.2.2 热舒适	16
1.2.3 热适应	18
1.3 热舒适气候适应的产生与发展	19
1.3.1 热舒适气候适应的产生背景	19
1.3.2 热舒适气候适应的发展历程	22
1.4 室内微气候与人体热舒适	24
1.4.1 热舒适的气候适应基础研究	24
1.4.2 我国不同地域气候下人体热舒适的气候适应规律	25
1.4.3 不同环境调节模式下人群的热舒适规律	25
参考文献	25
第二章 适应性热舒适基础	28
2.1 热适应概述	28
2.1.1 热适应的定义	28
2.1.2 热适应的方式	28
2.2 热适应的起因	30
2.2.1 热应激与热适应	30
2.2.2 热适应的起因	31

2.3	热适应机理	32
2.3.1	生理调节	32
2.3.2	行为调节	33
2.3.3	感知调节	34
2.3.4	环境刺激与人体热适应	37
2.3.5	气候与人体热适应	38
2.3.6	热适应的调节机理	42
2.4	热适应的影响因素	43
2.4.1	气候	43
2.4.2	室内微气候	45
2.4.3	适应时间	46
2.4.4	其他因素	47
2.5	热适应的研究思路	48
2.5.1	PMV 修正模型	48
2.5.2	热适应模型	50
2.5.3	关于以上两种研究思路的讨论	55
2.6	热适应在标准中的应用	56
2.6.1	ASHRAE 适应性热舒适标准	56
2.6.2	欧盟适应性热舒适算法	56
2.6.3	荷兰的适应性温度标准	58
2.6.4	中国适应性热舒适标准	59
	参考文献	62
第三章	热适应现场调查及数据分析方法	67
3.1	热适应的研究方法	67
3.1.1	人工气候室实验研究	68
3.1.2	实际建筑现场调查研究	68
3.2	现场调查方法	69
3.2.1	样本选择	70
3.2.2	调查方法	70
3.2.3	测试仪器	71
3.3	数据分析方法	73
3.3.1	数据的汇总及统计方法	73
3.3.2	服装热阻的估算方法	73
3.3.3	新陈代谢率的估算	75
3.3.4	相关分析和整合分析	76

3.3.5 中性温度的计算	78
3.3.6 期望温度的计算	81
3.3.7 可接受温度范围的计算	81
3.4 热适应模型的建立	83
3.4.1 现有热舒适模型	83
3.4.2 热适应模型的建立	84
3.5 适应性热舒适评价指标	85
3.5.1 室内热环境评价指标	86
3.5.2 室外热环境指标	87
参考文献	88
第四章 不同地域气候作用下的人体热适应模型	90
4.1 气候特征	90
4.1.1 季风气候特征	90
4.1.2 东西部气候差异	91
4.2 考虑建筑设计的气候分区	92
4.2.1 建筑气候分区	92
4.2.2 我国不同气候区的建筑特征	95
4.2.3 采暖通风空调设计中室外空气参数的选用	96
4.3 基于气候的热舒适数据库的建立	96
4.3.1 调查方法	96
4.3.2 热舒适现场数据库	97
4.3.3 被调查地区气候特征	100
4.3.4 建筑围护结构构造情况	103
4.3.5 受试者基本信息	104
4.4 人体适应性统计分析	106
4.4.1 行为适应	106
4.4.2 心理适应	124
4.4.3 生理适应	137
4.5 人体热舒适气候适应性模型	138
4.5.1 考虑室外温度的人体热舒适气候适应模型	139
4.5.2 适应性热舒适和典型气候特征	140
4.5.3 不同气候要素作用下中性温度和室外温度的关系	143
4.5.4 考虑双因素影响的气候适应模型	150
4.6 人体热舒适气候适应模型的综合评价	161
4.6.1 与 PMV 模型的比较	161

4.6.2	节能计算	162
4.6.3	被动式气候设计策略分析	164
	参考文献	168
第五章	不同环境调节模式下人体热适应研究——城市和农村	169
5.1	城市和农村数据库的建立	169
5.1.1	样本选择	169
5.1.2	调查内容	170
5.1.3	数据处理方法	170
5.2	寒冷地区城市和农村的差异	170
5.2.1	采暖制冷模式的差异	170
5.2.2	城乡收入的差异	172
5.2.3	建筑空间形式的差异	173
5.2.4	服装热阻的差异	175
5.2.5	生活习惯及活动量水平的差异	177
5.2.6	心理期望的差异	177
5.3	城市和农村室内热环境的对比	177
5.3.1	冬季室内热环境对比	178
5.3.2	夏季室内热环境对比	179
5.3.3	室内温度和室外温度对比	181
5.4	城市和农村热感觉和热舒适的对比	181
5.4.1	冬季	181
5.4.2	夏季	187
5.4.3	热舒适的对比分析	193
5.5	城市和农村适应性热舒适的对比	195
5.5.1	实测热感觉投票与预测热感觉投票	195
5.5.2	实测热感觉投票与实测不满意率	198
5.5.3	平均热感觉与着衣量	200
5.5.4	平均热感觉与室内温度	201
5.5.5	服装热阻与室内温度	202
5.5.6	热中性温度与服装热阻	204
5.5.7	热中性温度与室内温度	204
5.6	热适应模型对比分析	205
5.6.1	城市居民的热适应模型	205
5.6.2	农村居民的热适应模型	206
	参考文献	207

第一章 绪 论

1.1 人体热舒适研究

热舒适问题是建筑科学领域中最早研究的课题之一。早在 1733 年, Arbutnot 便指出空气的流动具有驱散身体周围热湿空气的降温效应。关于辐射效应问题, Treadgold 在 1824 年提出: 当人置身于辐射源中时, 为使人体的舒适程度保持不变, 则需要较低的空气温度。19 世纪初, 人们认识到空气过于干燥或过度潮湿都是不可取的。1913 年, Hill 提出头宜凉、脚宜热、辐射热与气流应有变化、相对湿度要适中的人体舒适标准的建议。

因空调工业的迅速发展急需有关舒适标准的资料, 特别是空气温度和湿度的相互作用对人体热感觉影响的资料, 1919 年, 美国采暖通风工程师协会 (American society of heating and ventilating engineers, ASHVE) 的匹兹堡实验室以室内气候对人体热舒适的影响研究作为开端, 通过实验研究确定了以空气温、湿度为函数的静止空气状态下半裸体男子的等舒适曲线, 并提出有效温度 ET。为了考虑辐射热的影响, Vernor 和 Warner (1932) 用黑球温度代替空气温度, 从而产生修正有效温度指标 CET (corrected effective temperature)。同时在英国, Bedford 继续了由工业疲劳研究会所开创的研究工作, 他通过对工厂的热环境所做的广泛调查得出了当量温度标度。在第二次世界大战期间, 研究工作大部分集中于军队中热病 (heat illness) 防治方面, 战后一段时期所提出的大部分热应力指标至今仍被普遍采用, 在这期间也引进了心理学的研究方法。

从 20 世纪 60 年代开始, 热舒适的研究从关注单一环境参数对人体的影响, 发展到分析综合参数的影响, 大量热舒适模型被提出, 其中应用最广的是 Gagge 的二节点基础传热模型^[1]和丹麦 Fanger 的 PMV (predicted mean vote) 稳态模型^[2]。Gagge 在二节点基础传热模型基础上, 首先分析了温度、湿度对穿标准服装和坐着工作的人群热舒适的影响, 得到新有效温度 ET* (new effective temperature), 该指标被美国采暖、制冷与空调工程师协会 (American society of heating refrigerating and airconditioning engineers, ASHRAE) 采用来定义热舒适区的边界^[3]。随后 Gagge 又综合考虑了不同的活动量水平和服装热阻的影响, 提出了标准有效温度 SET (standard effective temperature)^[4]。丹麦技术大学的 Fanger 教授根据 ASHRAE 堪萨斯州立大学环境试验室研究得到的数据, 建立了人体热舒适方程和 PMV 稳态模型, 综合考虑了空气的温度、湿度、空气流速和平均辐射温度、人体活动量和服装热阻 6 个因素, 并以主观热感觉等级为出发点兼顾了人生理和心理的影响,

该模型被国际标准化组织 (ISO) 采用, 成为制定 ISO 7730 热舒适标准的依据。

实验室研究可以在保证其他变量不变的前提下, 研究一两个变量的变化对受试者的影响, 因而备受青睐。然而将实验成果推广到外部真实的环境时问题重重, 例如, PMV 方程对于空调用房中坐着工作和标准着装的人体热感觉预测结果较好, 但对非空调用房中其他衣着和活动量情况预测不太准确。不同的学者对此有不同的解释, 其中以 Fanger 为代表的学者认为这主要是非空调环境下人们对环境的期望值低造成的, 并提出了修正 PMV 的方法^[5], 而以 Humphreys 和 Nicol^[6], Brager 和 de Dear 为代表的学者则提出了适应性热舒适模型^[7]。建立在现场研究数据库基础上的热适应模型后来成了美国 ASHRAE 55—2004, 2010, 2013^[8-10]和欧盟 (European norm) EN 15251—2007 自然通风 (或自由运行) 建筑的热舒适标准^[11]。

1.1.1 人体热舒适与室内热环境

室内环境的舒适与否很大程度上取决于房间的冷热状态。房间的冷热状态受室外气候影响, 并通过建筑的围护结构 (门、窗、墙壁及屋顶、地面的总称) 进入室内, 使得室内的温湿度等物理环境发生变化, 进而对人体热感觉产生影响。建筑可以看作是环境的过滤器, 通过适当的设计, 建筑能通过调节室外热环境来提供良好的室内热环境, 满足不同的使用要求。当然, 这种影响也因为建筑设计的好坏而产生很大的差异, 因而室内热环境由室外气候和建筑的热性能决定 (图 1.1)。

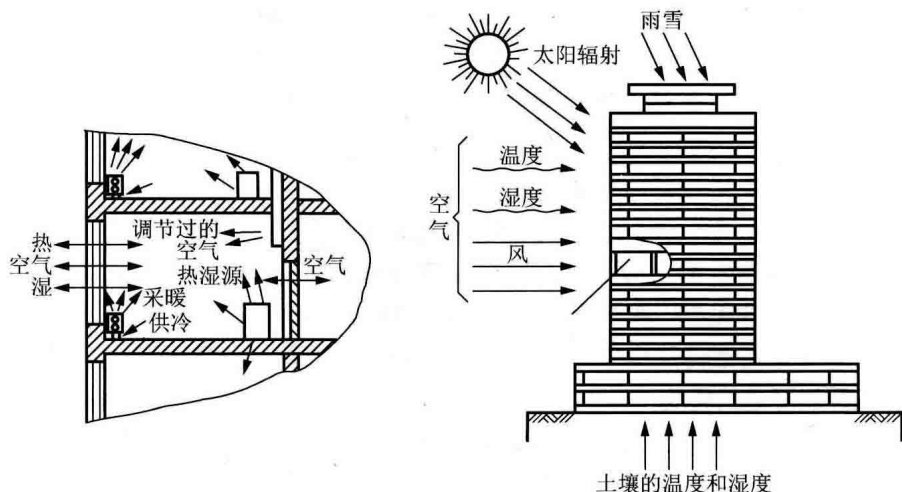


图 1.1 影响室内热环境的因素

人体冷热感是人体与周围环境进行热交换的结果, 人体的新陈代谢产热与周围环境放热之间的平衡决定式为

$$\Delta q = q_m \pm q_c \pm q_r - q_e - q_w \quad (1.1)$$

式中: Δq 为人体感热量 (J), 即人体得失热量 (J); q_m 为人体新陈代谢过程的产热量 (J); q_c 为人体与周围空气的对流换热量 (J); q_r 为人体与周围壁面的辐射换热量 (J); q_e 为人体蒸发散热量 (J); q_w 为人体做功消耗的热量 (J)。

由公式 (1.1) 可以看出, 人体与周围物理环境的换热量主要取决于三个方面: ①人体与周围空气的对流换热量; ②人体与周围壁面的辐射换热量; ③人体的蒸发散热量。因而, 可以看出决定人体热舒适感的室内物理因素有: 室内空气温度、风速、周围壁面的辐射温度以及空气的相对湿度。人的热平衡即人体新陈代谢产生的热量必须与蒸发、辐射、导热和对流的失热量代数和相平衡, 对人体而言, 与周围环境的辐射、对流以及导热是得热或失热过程, 而蒸发则完全是失热过程。

另外, 除这些物理环境因素之外, 人体热感觉与自身的活动量和衣着习惯也有关系。

1.1.2 人体热舒适影响因素

在 ASHRAE 55 标准中, 人的热舒适被解释为“在此环境中人们表示满意的一种心理状态”。在生理学上认为人处于舒适状态时, 人体的热调节机能处于最低活动状态。人体热舒适是一个复杂的不确定因子, 它受到许多不可测量和随机因素的影响, 但主要的影响因素有物理因素 (空气温度、平均辐射温度、空气流速和空气的相对湿度)、个人因素 (人的活动量及服装热阻), 除此之外还有一些其他的影响因素, 如瞬时热的影响、非热因素的影响等。

1.1.2.1 物理因素

1. 空气温度

房间内空气温度是由房间内的得热和失热、围护结构内表面的温度及通风等因素构成的热平衡所决定的, 它也直接决定人体与周围环境的热平衡。空气温度和平均辐射温度通过对流和辐射的热交换影响着人体。在水蒸气压力及气流速度恒定不变的条件下, 人体对环境温度升高的反应主要表现为皮肤温度的升高与排汗率的增加。周围温度的变化改变着主观的温热感 (热感觉)。而对于工程设计者来说, 主要任务在于使实际温度达到室内计算温度, 因此, 室内空气温度是关乎舒适与节能的重要指标。

空气温度几乎可用任何一个温度计来测得, 但是要得到一个精确的读数却需要采取一定的措施。因为这些仪器实际上测出来的温度并不是室内空气温度, 而是介于空气温度与平均辐射温度之间的一个值。为了减少辐射所造成的误差, 把传感器做得尽可能的小, 或者提高空气的相对流速, 使对流换热系数增大; 或者把传感器屏蔽在低发射率金属制成的防辐射罩内, 以减小辐射换热的影响。

2. 平均辐射温度

温度在绝对零度以上的一切物体都发出热辐射。人处于室内，室内各物体表面跟人体之间存在辐射热交换，平均辐射温度即室内与人体辐射换热有影响的各表面温度的平均值，可用黑球温度计测量并换算求得。Houghten 等进行的研究发现，平均辐射温度每改变一摄氏度，平均相当于有效温度改变 0.5°C ，或相当于气温变化 0.75°C [12]。

自然对流时平均辐射温度 t_{mrt} 的计算为

$$t_{mrt} = [(t_g + 273)^4 + 0.4 \times 10^8 (t_g - t_a)^{5/4}]^{1/4} - 273 \quad (1.2)$$

强迫对流时平均辐射温度 t_{mrt} 的计算为

$$t_{mrt} = [(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V^{0.6} (t_g - t_a)]^{1/4} - 273 \quad (1.3)$$

式中： t_g 为室内黑球温度 ($^{\circ}\text{C}$)； t_a 为空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)； V 为空气流速 (m/s)。

由上式可以看出，平均辐射温度不仅与空气温度和黑球温度有关，还与空气流速有关。

3. 相对湿度

相对湿度是指在一定的温度和大气压力下，湿空气的绝对湿度（单位体积空气中所含水蒸气的重量），与同温同压下的饱和水蒸气量之比。在建筑工程中常用空气的实际水蒸气分压力与同温同压下的饱和水蒸气分压力之比，以百分数表示。空气的湿度对施加于人体的热负荷并无直接影响，但它决定着空气的蒸发力因而也决定着排汗的散热效率，从而直接或间接地影响人体舒适度。在极端条件下，湿度水平限制着总蒸发力从而决定着机体耐受界限。相对湿度过高或过低都会引起人体的不良反应，对于人体冷热感来说，相对湿度的升高就意味着增加了人体的热感觉。通常认为应该避免湿度极高或极低的环境条件，但从热舒适的观点来说，并无证据证明这一点，不过极端条件能引起其他一些不希望出现的副作用，如在高湿度时产生的“潮湿感”及低湿度时出现的黏膜干燥现象。

通常在一个房间内各点的水蒸气分压力都是一样的，所以我们在房间内测量空气的相对湿度时只需在房间内选取一点测量即可。

4. 空气流速

空气流速从两个不同的方面对人体产生影响。首先，它决定着人体的对流换热；其次，它影响着空气的蒸发力从而影响着排汗的散热效率。当空气温度高于皮肤温度时，增加气流速度会由于对流传热系数的增大而增加人从环境的得热量。因此，在高气温时，气流速度有一个最佳流速值，低于此值，由于排汗率的降低导致热量增加而产生不舒适；高于此值，对流得热量又会抵消蒸发散热量，甚至增加热量。在寒冷环境中，增加气流速度会增加人体向环境的散热量。此结论不