

绿色建筑系列

国家自然科学基金项目
国家“十一五”科技支撑计划重大项目

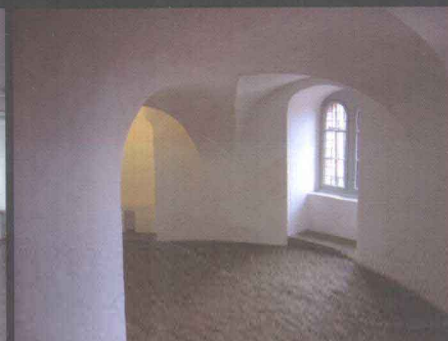
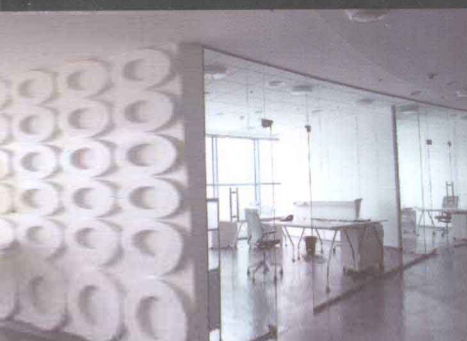
资助出版项目

室内热环境 与人体热舒适

李百战 郑洁 姚润明 景胜蓝 编著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>



绿色建筑系列

国家自然科学基金项目
国家“十一五”科技支撑计划重大项目

资助出版项目

室内热环境 与人体热舒适

李百战 郑洁 姚润明 景胜蓝 编著

常州大学图书馆
藏书章

重庆大学出版社



内容提要

室内热环境与人体健康、舒适和工作密切相关,一直是本行业热门研究课题,具有重要学术价值。全书分为六章,系统阐述了室内热湿环境与热舒适的基本概念、理论方法、国内外研究成果、热舒适理论的应用及热舒适标准等内容,并重点介绍了结合生理学、心理学研究室内热环境的成果,涉及热环境对皮肤温度、出汗、神经传导速度等的研究。

本书可供建筑、城市规划、建筑环境与设备工程等相关专业技术人员参考,也可供高等院校、中等专业学校师生以及从事建筑及相关领域的广大科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

室内热环境与人体热舒适/李百战编著. —重庆:

重庆大学出版社, 2012. 2

(绿色建筑系列)

ISBN 978-7-5624-5948-4

I. ①室… II. ①李… III. ①建筑热工—室内设计:
环境设计 IV. ①TU111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 015447 号

室内热环境与人体热舒适

Shinei Rehuanjing yu Renti Reshushi

编 著:李百战 郑 洁 姚润明 景胜蓝

出 版 者:重庆大学出版社

地 址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

网 址:<http://www.cqup.com.cn>

邮 编:401331

电 话:(023) 88617183 88617185(中小学) 传 真:(023) 88617186 88617166

出 版 人:邓晓益

责任编辑:贾兴文 张 婷

版式设计:贾兴文

责任校对:秦巴达

责任印制:赵 晟

印 刷 者:重庆升光电力印务有限公司

发 行 者:全国新华书店经销

开 本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:362 千

版 次:2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5624-5948-4

印 数:1—2 000

定 价:40.00 元

前 言

随着人类社会的不断发展,人们的工作、生活,甚至交通都越来越多地在室内度过,有调查表明,人们一天中 80% ~ 90% 的时间位于室内。因此,室内环境与人的健康、舒适乃至工作效率密切相关。室内环境可分为物理环境和室内空气质量,物理环境包括热湿环境(本书中简称为室内热环境)、声环境、光环境、电磁环境等,其中室内热环境包括室内空气温度、湿度、流速以及周围环境的表面辐射温度等,是影响人的热感觉、健康、舒适的最重要的环境因素。

人的热感觉对室内热环境最为敏感,人们对室内热环境的首要需求是避免高温、高湿或者低温等危害人体生理健康的恶劣环境,在炎热的夏季凉爽,在寒冷的冬季温暖,春季和秋季过渡季节室内、外热环境和谐宜人。因此,无论中国古老的风水学,还是今天的建筑环境科学,人们关注的焦点总是获取使人感觉舒适、更利于人的健康和提高工作效率的室内热环境。

营造适宜的室内热环境需要能源,并会深刻影响室外环境。进入 21 世纪以来,能源和环境危机日益严峻,可持续发展、低碳生活成为人类社会发展的必然选择,用尽可能小的能源代价营造舒适的热环境已经变得越来越迫切。国务院 2008 年颁布的《民用建筑节能条例》中明确指出,“民用建筑节能是在保证民用建筑使用功能和室内热环境质量的前提下,降低其使用过程中能源消耗的活动”,但是,什么样的室内热环境可以满足人的基本需要,这是需要通过深入研究的科学问题。

“室内热环境与人体热舒适”的核心可归纳为“人”和“客观的室内物理环境”。两者之间有三个方面的作用:室内热环境与人的交互作用,即人与环境的热交换;热交换影响人的生理状态,进而影响人体的生理活动;热交换以及生理活动

产生人的心理活动,形成热感觉。这三个方面相互作用,最终影响人体的热舒适。这个过程涉及多个学科,如物理学、传热学、生理学、医学、心理学、社会学、气象学等。因此,室内热环境与人体热舒适是一个多学科交叉的科学问题,随着相关学科的深入发展,人们对人的因素和物理因素的研究愈发深入,这个交叉的科学问题也会不断深入发展。

近年来,本书作者连续获得国家自然科学基金委员会和科技部多个项目的支持,运用生理学、心理学的研究方法和手段,进行了长期、系统的“室内热环境与人体热舒适”的研究,从而积累了较为丰富的研究经验和心得,在此基础上,通过本书进行阶段性的总结。全书共分为六章,系统阐述了室内热环境与人体热舒适的基本概念、理论方法、国内外较成熟的研究成果、成果应用以及最新研究热点及展望。作者希望通过本书与该研究领域的专家、同行们进行交流和分享。

本书由重庆大学李百战、郑洁、姚润明、景胜蓝编写。在编写过程中,庄春龙、易博、张瑜、詹武刚、高杨等博士生及硕士生参加了资料收集整理工作。

本书得到了国家自然科学基金重点项目“建筑热环境动态调节与控制的理论与方法”(50838009)、国家自然科学基金项目“夏热冬冷地区室内热湿环境下人体生理和生理响应机理的研究”(50678179)和国家“十一五”科技支撑计划重大项目“城镇人居环境改善与保障关键技术研究”(2006BAJ02A09)的资助。

本书承蒙田胜元教授仔细审阅和多方面指正,孙纯武副教授、黄忠讲师对本书修改提出了许多宝贵意见,在此对他们表示衷心感谢。

在编写过程中参考引用了众多专家学者的研究成果,使本书内容得以充实、提高,在此,对这些作者表示深深的谢意。在编写过程中,得到重庆大学相关专家、同事的关心、帮助和支持,也得到了相关设计、研究单位专家的热情指导;在编撰、出版过程中,重庆大学出版社给予了大力支持和帮助,特别是编辑贾兴文在整个编写和出版过程中给予了热情的帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平所限,难免有错误和不妥之处,恳请批评指正!

编 者

2010年6月

目 录

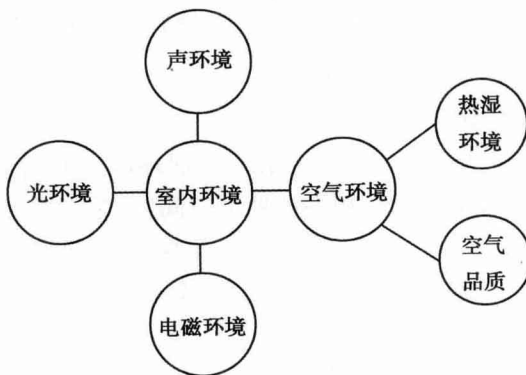
1	概 论	1
1.1	室内热环境	1
1.2	室内热环境与人	3
1.3	室内热环境与热舒适研究	11
	参考文献	18
2	人体与环境的热交换	21
2.1	人体与环境的热交换	21
2.2	人体与环境的辐射换热	23
2.3	人体与环境的对流换热	44
2.4	人体与环境的蒸发换热	53
2.5	换热计算相关参数的确定	58
	参考文献	68
3	人体对热环境的生理响应	69
3.1	能量代谢与产热	69
3.2	人体热调节	73
3.3	不同热湿环境下人体生理参数研究	81
	参考文献	110
4	热舒适与热感觉	112
4.1	热感觉	112
4.2	热舒适	125
	参考文献	141
5	热舒适模型	142
5.1	人体热调节模型	142
5.2	PMV-PPD 模型	149
5.3	适应性模型	166
5.4	适应性预测平均热感觉模型	174

5.5 动态热舒适模型	185
参考文献	185
6 热环境评价方法和标准	188
6.1 概述	188
6.2 极端热环境评价	189
6.3 热环境舒适性评价	193
6.4 热环境评价标准	209
参考文献	226

1 概 论

1.1 室内热环境

室内环境是伴随着人类文明的发展,为满足人们生活、工作需求,抵御自然环境恶劣的气候,满足人类生存安全而产生并不断发展的一种环境。室内环境包括常见的建筑室内环境,如居室、办公室、教室、商场、医院等,也包括交通工具内部等场所。室内环境包括声环境、光环境、电磁环境、空气环境,其中空气环境由热湿环境(本书中简称“热环境”)、空气品质等构成,见图 1.1。舒适的室内热环境从古至今一直是人类不断追求和改善的目标,也是建筑环境营造手段不断进步的动力。



- (1) 室内声环境,反映建筑室内声音特点和情况。
- (2) 室内光环境,主要反映室内光环境的特性和规律。
- (3) 建筑室内电磁环境,反映室内磁场状况。
- (4) 室内空气环境,反映室内空气的质量状况包括室内热湿环境和室内空气品质等。

(5) 室内热湿环境(本书中简称为室内热环境),主要反映室内环境热物理参数,例如空气温度、空气湿度、平均辐射温度、空气流速等对人体的热感觉和舒适影响。空气温度、空气湿度、气流速度和平均辐射温度以及人体的活动和服装直接影响人体与环境的热交换情况,进而影响人体的热感觉,是影响人体的直接和微观的因素。室内空气品质,反映室内空气污染物状况。

1.1.1 室内热环境营造和调控手段

室内热环境的优劣与稳定受着室内和室外两种干扰源的综合影响。内扰主要包括室内设备、照明、人员等室内热湿源。外扰主要包括室外气候参数如室外空气温度、湿度、太阳辐

射、风速、风向的变化,以及邻室的空气温度、湿度的变化。这些均可通过围护结构的传热、传湿、空气渗透作用对室内热湿环境产生影响。

室内热湿环境营造和调控主要包括两类技术手段:

(1)利用建筑本身的隔热、保温、通风等性能来维持室内热环境。即所谓主动式环境保障,就是利用建筑自身和天然能源来保障室内环境品质。用主动式措施控制室内热湿环境,主要是做好太阳辐射和自然通风这两项工作。基本思路是使日光、热、空气仅在有益时进入建筑,其目的是使这些能量和质量适时、有效地加以利用,以及合理地储存和分配热空气和冷空气,以备环境调控的需要。例如在春、秋过渡季节由于建筑物围护结构可以消除或减弱外扰的作用,室内干扰源作用不强的情况下,室内热环境便可以满足人体热舒适或可接受要求。

(2)当围护结构自身的热工性能无法消除室外热环境的影响,或者室外热环境的影响虽然不大,但是室内干扰源影响比较大时,此时热环境已经令人不能接受甚至让人感到不舒适,需要通过空调、采暖等方式,即所谓的被动式环境保障,营造一种扬自然环境之长、避自然环境之短的室内环境。当今的建筑由于其规模和内部使用情况的复杂性,在多数气候区不可能完全靠主动式方法保持良好的室内环境品质。因此,要采用借助机械和电气的手段主动式技术,在节能和提高能效的前提下,按“以人为本”的原则满足热舒适要求,改善室内热环境。

1.1.2 室内热环境和人居环境

室内环境是自然环境当中的一部分,热环境营造和调控手段又与室外气候、地域以及经济的发展、生活习惯、文化等社会因素有关,可以用人居环境这个概念来概括。人居环境是人类聚居生活的地方,是与人类生存密切相关的地表空间,它是人类在大自然中赖以生存的基地。人居环境的核心是“人”,人居环境是以满足“人类居住”需要为目的。大自然是人居环境的基础,人的生产生活及具体的人居环境建设活动都离不开广阔的自然背景。人居环境包括五大系统(见图1.2)。

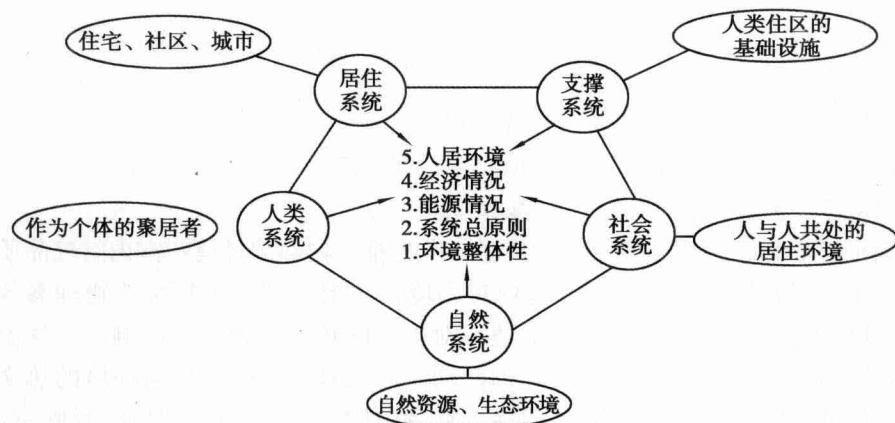


图 1.2 人居环境系统模型^[1]

室内热环境是人类支撑系统及居住系统当中的的一个重要部分,直接影响人在其中的工作、生活质量,直接或间接与其他系统互相作用,影响经济、环境、能源状况等,也受自然系统、

人类系统、社会系统等其他的影响。例如,不同地区由于地理位置的差异、气候的不同,直接影响室外热环境的长期变化和当地人的衣着规律,同时也会影响人们热经历和热期望。所以,地理和气候的差异造就了该区域特色鲜明的建筑形式。以我国的气候分区为例,严寒地区和寒冷地区的建筑主要区别为满足冬季保温要求;夏热冬暖地区的建筑主要满足夏季隔热要求,同时要尽量避免夏季的太阳辐射、充分利用自然通风降温;而夏热冬冷地区的建筑既要满足夏季隔热通风的要求,又要满足冬季保温的要求。因此,室内热环境的需求与人居系统特点密切相关,在营造和改善室内热环境的同时需要宏观考虑对人居环境的影响,实现人居环境系统的环境友好性和可持续发展。

1.2 室内热环境与人

现代社会中,人的一生有超过 80% 的时间是在室内度过,保持一个舒适的室内环境可以使人精神愉快、精力充沛,使人更富创造力,提高工作效率。随着社会生产力的飞速发展和人民生活水平的提高,人们对室内热环境的要求也越来越高,具备安全、舒适、卫生的室内热环境才是人们的理想追求。

1.2.1 室内热环境与人体健康

由于工业现代化的快速发展,越来越多的工作人们在室内完成即可。现代人在室内度过的时间远多于室外,室内热环境质量的优劣直接影响到每个人的健康。

1.2.1.1 空气温度与人体健康

室内空气温度是室内热环境因素当中对人体热感觉最重要的影响因素。由于新陈代谢,人体要不断地与周围环境进行热量交换,而空气温度直接影响人体的热交换。对于空气温度的变化,人体只能在生理条件下借助神经系统,通过复杂的体温调节机制来增减产热量和散热量,达到体温的稳定和恒定。当外界温度变化时,机体可以借助生理热调节机制来获得平衡,但是这种调节是有一定限度的。当外界温度剧烈变化或者在异常高温或低温环境下工作时,可能引起体温调节紧张或调节障碍。在过热或过冷的环境中,人体的生理和心理将发生变化。最为直接的是,在过热环境中,人的心跳加快,皮肤血管内的血流量激烈增加(可达 7 倍之多);而在过冷环境中,人的情绪将会受到影响,人的动作的灵活性也会受到影响。此外,随着环境温度的降低,手指、耳朵和脚都会产生疼痛感。长期处于极端条件下,人的调节系统将出现各种功能紊乱状态和应激状态,威胁人体的健康。因此,恶劣的自然环境中,例如严冬或者酷暑环境下,室内热环境当中建筑消减自然环境的作用,并且通过取暖、通风、空调等手段避免极端温度对人体健康的危害显得尤其重要。

1.2.1.2 空气湿度与人体健康

一般情况,室内空气湿度对于人体的影响低于温度的影响,但在温度恒定或较稳定时,空气湿度对人体湿热感觉的调节具有重要作用。

在高温条件下,高湿对人体的作用就更为明显。高温高湿对机体的热平衡有非常不利的影响,因为在高温时,机体主要依靠蒸发散热来维持热平衡,此时相对湿度的增高,将妨碍汗液的蒸发,使汗液大滴落下,结果导致热平衡的破坏。随着空气中湿度的增高,人的体温和脉

搏也增高。在低温情况下,空气湿度增高可以加速机体散热,此时身体的热辐射被空气中的水蒸气所吸收,同时衣服在潮湿的环境中吸收水分后其导热性增高,使人体更感寒冷。由于寒冷而引起毛细血管收缩、皮肤苍白、代谢减低,甚至组织内血液循环和细胞代谢发生障碍,引起组织营养失调,发生冻伤。因此,高温高湿和低温高湿对人体都是不利的。

国际标准 ISO 7730—2005 标准和美国标准 ASHRAE55—2004 认为,在温度适中时,相对湿度的影响不甚显著。空气湿度除了直接影响人体热平衡,还对人体健康产生间接影响。湿度的不同会影响室内微生物的生长,从而间接对人体健康产生影响。例如霉菌多喜欢在室温 20℃ 以上、湿度 60% 以上的环境生长,容易引发各种过敏症,对身体抵抗力弱的人还会造成真菌感染症。如果空气过于干燥,室内环境中容易飞扬尘土,也会影响人们的健康状况。

1.2.1.3 空气流速对人体健康的影响

空气流速影响人体与环境之间的换热,当环境温度低于人体表面温度时,提高空气流速,人体向环境的对流换热量增大。反之,当环境温度高于人体表面温度时,提高空气流速,环境向人体的对流换热量增大。空气流速还会影响人体出汗以及蒸发散热,从而影响人体的潜热换热。风速大时,汗液容易蒸发,使体热易于发散,出汗速度减慢;风速小时,汗液不易蒸发,体热不易发散,出汗速度增大。

空气流速除影响人体与环境的显热和潜热换热量外,还影响人体的触觉感受。在较凉的环境中,空气流动会使人产生冷的感觉,破坏人体的热量平衡,人们把这种由于空气流动造成不舒适的感觉称为“冷吹风感(Draft)”;而在较热的环境下,空气流速的适当提高则会容易使人感到舒适,也就是我们俗称的“穿堂风”。但空气流速过高或者吹风时间过久也会引起人体产生不良的后果,如皮肤紧绷、眼睛干涩、呼吸受阻甚至头晕等症状。

室内空气流速还会影响室内的空气品质,对人体的健康也会产生影响。如当室内空气流动性较低时,室内环境得不到有效的换气,会导致室内各种有害化学物质不能及时排出室外,污染物大量聚集于室内;室内生活中所排出的各种微生物可相对聚集于空气中,或在某个角落大量增殖,使室内空气质量恶化。化学性污染物和有害微生物共同作用于机体,导致人体健康受到损害,特别会使室内生活的婴幼儿和老年人等弱势人群的各类疾病的发病率明显增高。

1.2.1.4 热辐射对人体健康的影响

环境热辐射对人体的热舒适以及热健康也有非常重要的影响。当物体温度高于人体皮肤温度时,热量从物体向人体辐射,使人体受热。当强烈的热辐射持续作用于皮肤表面时,由于对皮肤下面的深部组织和血液起加热作用,使体温升高,体温调节发生障碍时,就要造成中暑。当物体温度比人体皮肤温度低时,热量从人体向物体辐射,使人体散热,在寒冷季节会因大量散热而受凉,产生感冒等症状。

根据实践经验,在冬季的采暖室内空气温度虽然达到标准,但有大量单层玻璃窗或保温不足的屋顶和外墙的房间中,人们仍然会感到寒冷;而在室内空气温度虽然不高,但有地板或墙面辐射采暖的房间中,人们仍然会感到温暖舒适。在夏季自然通风的房屋中,人们常常关注室内空气温度的高低,而忽视通过窗户进入室内的太阳辐射热,以及屋顶和西墙隔热性

能差所引起外墙内表面温度过高对人体冷热感产生的影响。在顶层房间和有西墙的房间中,在自然通风条件下,室内空气温度与其他房间相比,通常是稍高或接近,但由于屋顶和西墙隔热性能差,内表面温度过高,人们仍然会感到炎热。这时如果室内空气湿度高,空气流速又小,则更会感到炎热难忍,甚至会影响人体的健康。

1.2.2 室内热环境与工作效率

热环境不仅与人体的健康、舒适有关,而且,影响人在室内工作和学习的效率。国外研究人员比较早就开始了相关研究,英国工业疲劳委员会在 20 世纪 20 年代就已经发表了一系列关于高温环境下工业部门生产效率的现场调研报告^[6]。大量的现场调研结果发现,热环境状况对人的劳动效率有重要影响,其影响程度与劳动类型、紧张程度等因素有关。由于现场调研结果受到其他因素如噪声、工作压力、颜色等的影响,为了分析热环境的独立影响,研究者们也进行了大量的实验室研究工作。

1.2.2.1 激发与工作效率^[3]

工作效率不是一个简单的概念,相同的热环境可能会提高某些工作的效能,但可能会使另一些工作的效能降低。利用激发的概念可以用来解释环境应力对工作效率的影响。某种工作的最高效率可以出现在中等激发水平上,因为在较低激发水平上,人尚未清醒到足以正常工作,而在较高激发水平上,由于过度激动,人不能全神贯注于手头的工作;效率和激发呈一个倒 U 字关系,见图 1.5(a),其中最佳激发水平 A_1 与工作的复杂程度有关。一项困难而复杂的工作本身会激起人的热情,因此在几乎没有外界刺激的情况下能把工作做得更好;如果来自外部原因的激发太强,外界刺激则会把身体总激发的水平移到偏离最佳激发水平 A_1 点,致使劳动效率下降。而枯燥简单的工作无法激起人们的热情,因此往往需要有附加外部刺激的情况下工作效率才能得到提高。因此,全神贯注的学习最好能在安静的环境中进行,而重复的不需要特殊技能的工作则在配有音乐的环境中效率更高。

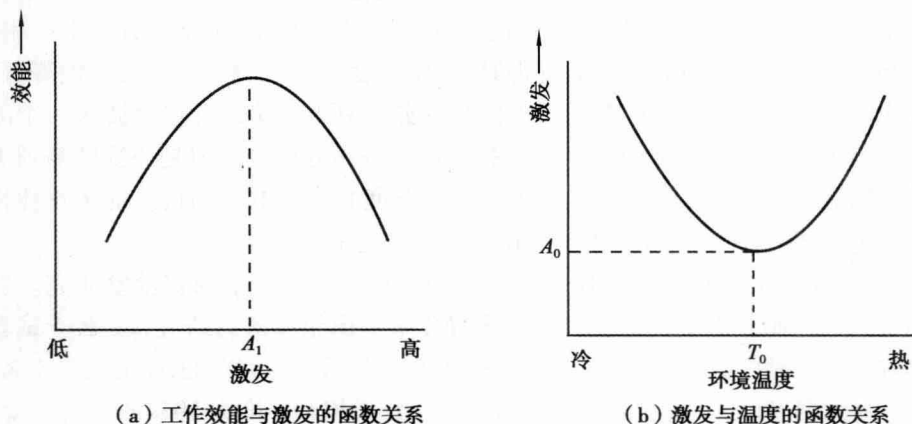


图 1.3 激发与效率以及热刺激的关系^[3]

热环境与噪声对工作效率作用的区别在于其具有双向性,即其能在冷、热两个方向给予刺激。如图 1.3(b) 给出了热刺激与激发的关系,适中温度与最小的激发相对应,然而研究发

现温暖也会减少激发,即稍微的温暖常使人有懒洋洋或浑身无力的感觉。所以图 1.3(b) 中的最小激发温度 T_0 对应的是热中性或略高于热中性的温度。无论温度在任何一个方向上偏离 T_0 变化都会增加激发。

对于简单工作和复杂工作,图 1.4 给出了的环境温度与工作效率之间的函数关系,该图是将图 1.3 中(a)、(b)两条曲线叠加在一起得到的。对于简单枯燥的工作,环境温度适当偏离最小激发温度反而能够获得更高的劳动效率。但是,对于复杂困难的工作,最佳工作效率只可能发生在最小激发强度时,由此也可以看出复杂工作获得最佳的工作效率是相当的困难。

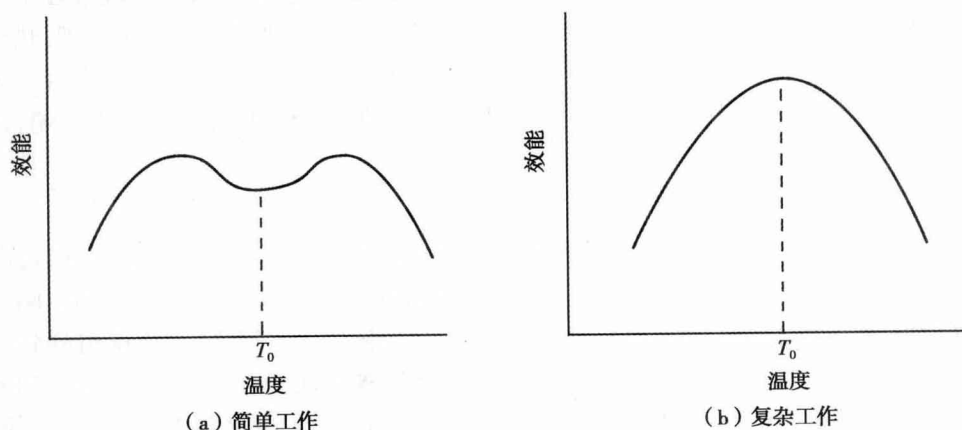


图 1.4 简单工作和复杂工作条件下的环境温度与劳动效率之间的关系^[3]

1.2.2.2 热环境对体力劳动工作效率的影响^[3]

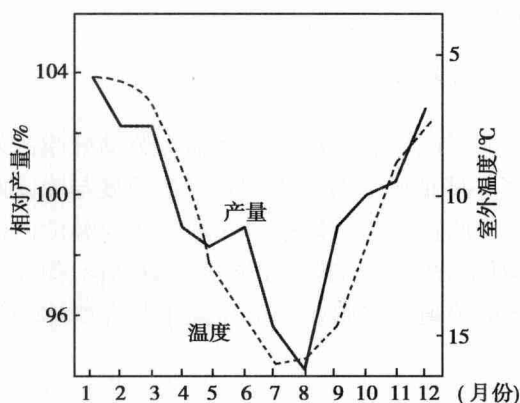
(1) 寒冷环境 人体处于非常寒冷的环境中,体力工作效率也会降低。低温对人的工作效率的影响最敏感的是手指的精细操作。当手部皮肤温度降到 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,手部的操作灵活性会急剧下降,手的肌力和肌动感觉能力都会明显变差,从而导致劳动生产率的下降。当手被冷却到 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,关节处润滑液变得黏稠,手会变得僵硬、麻木,其灵活性降低,从而使手工操作能力进一步下降。查克(Chark)曾在实验中要求受试者将手插入一个冰盒内打一连串结。当手的皮肤温度降到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,打结的效率不受影响。但是当温度降到 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,打结的效率随着时间明显降低。一般当手的皮肤温度为 $13\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,手的敏感性将明显变差。而对手进行辐射加热,可以使手工工作的效能接近正常水平。

(2) 炎热环境 炎热环境对工作效率的影响已也进行过大量的实验室研究。麦克沃斯(Mackworth)在新加坡曾对 11 名莫尔斯电码操作员的出错率进行研究,11 名受试者均为经过训练的有经验的操作员,A 组包括 3 名最好的,B 组包括 5 名其次的,C 组包括 3 名最差的。发现当标准有效温度(定义为当受试者着标准服装处于相对湿度为 50% 的空气环境中,与其处于空气温度等于平均辐射温度、相对湿度为 50%、空气静止不动的假想环境中人具有相同的皮肤湿润度和皮肤温度时,与环境的换热量相同)超过 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,莫尔斯电码操作员的工作效率就开始下降,同一组中技术较差的操作员在高温下的出错率明显偏高。这个现象说明:技术不熟练者比有经验者更容易受到环境应力的影响,因此其工作效率降低得更快。也有人

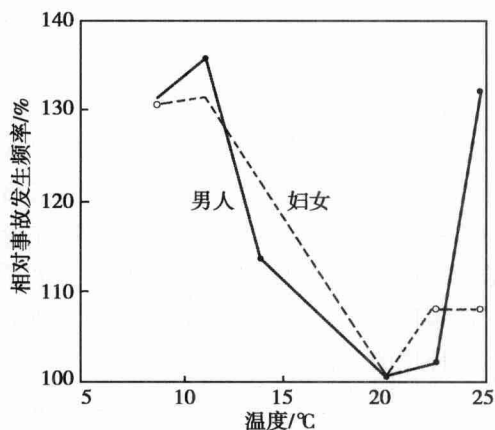
认为热应力可以提高工作效率,因为温度升高会加快体内的化学反应速率,从而激发对环境的反应速率和提高警戒性,因此有利于提高工作效率和降低事故发生率。

一些实验研究结果进一步证实当标准有效温度超过 33°C 时脑力工作和重体力劳动的效率开始下降。国外通过对煤矿的调查表明,在偏离热舒适区域的环境温度下从事体力劳动,小事故和缺勤的发生几率增加,产量下降。当环境温度超过有效温度 27°C 时,需要运用神经操作,警戒性和决断技能工作的效率会明显降低。非熟练操作工的效率损失比熟练操作工的损失更大。

图 1.5(a) 给出了湿度对劳动生产率和事故发生率的影响。从图 1.5(a) 可以看到,在夏季高温条件下重体力劳动的效率会明显下降。图 1.5(b) 表明温度偏离舒适区将导致事故发生率的增加。但是对于另外一些工作环境,却有不同的结果。一般研究认为高温高湿环境有利于棉麻纺织的生产,因为在此环境纤维性能好且不容易断纱。当相对湿度为 80%,而空气温度超过 24°C 时,棉麻纺织的总产量却降低了(Wyatt, 1926)。同样,当湿球温度超过 23°C 时,棉麻产量就会降低(Weston, 1922)。因此,许多实验都表明,在高温下会降低重体力劳动的效率。当温度偏离最佳值时还会发生生产事故。对煤矿的现场调查也表明,事故发生率随着温度的上升而增加。



(a) 马口铁工厂相对产量的季节性变化



(b) 军火工厂相对事故发生率与环境温度的关系

图 1.5 温度对劳动生产率和事故发生率的影响^[3]

1.2.2.3 热环境对脑力劳动的影响^[3]

寒冷环境会降低复杂脑力工作的效率。当冷气侵入人的肌体内部后,会使肌肉的收缩力度降低;当神经温度降到约低于 9°C 时,沿着神经通路所输送的神经就要减少。这些作用可以被认为物理作用。此外,由于过冷环境给人体造成的不舒适感和冷应力强烈地刺激神经系统,使人变得过度激发,也会使工作效率降低。

为了对同一温度下实验组 and 对照组的受试者的学习效率进行比较,Mayo 于 1955 年做过一项研究,他从美国海军中选择了两组学习标准电子学课程的学员,其中一组在 24°C 的空调房间中授课,另一组在仅有排风扇降温、中午空气温度为 33.6°C 的室内授课,结果发现两组人员的测验成绩并无差别,尽管其中 79% 的人认为温度过高对他们的学习成绩有不利的影

响。但多数研究结果说明温度控制有利于提高工作效率。一般认为人们在空气温度为 $22 \sim 23^{\circ}\text{C}$ 的环境中的工作效率要高于其在 26°C 以上的环境。

1967 年, Holmberg 和 Wyon 等在瑞典也进行了实验研究。实验室中的条件尽量与正规学校中的学习条件相同(分别在 20°C 、 27°C 、 30°C 时进行测试), 而且不让学生知道正在进行实验。图 1.6 给出了理解力和阅读速度测验成绩随温度的变化, 由图发现在 27°C 、 30°C 时的成绩都比 20°C 时差, 而且在 27°C 时最差。

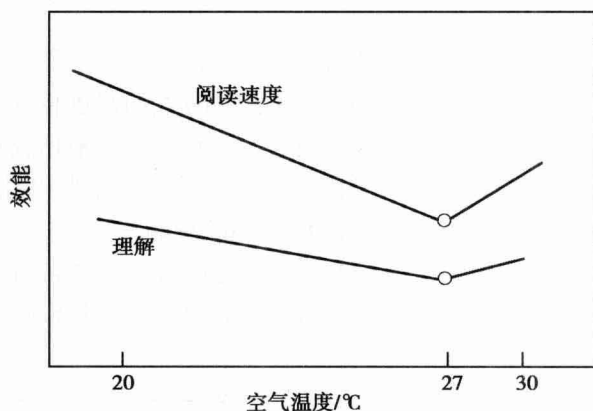


图 1.6 小学生的阅读和理解能力测验成绩随温度的变化^[3]

1965 年, Wyon 在研究热对脑力劳动工作效率的影响中总结出了降低脑力劳动效率的暴露时间, 并将其表示为温度的函数。图 1.7 给出了不降低脑力劳动工作效率的温度与暴露时间的关系曲线。表 1.1 给出的是不同研究者关于降低脑力劳动效率的暴露时间与温度的研究结果。虽然这些曲线都是在实验室条件下根据明显的变化趋势做出来的一般结论, 但在实际工作条件下, 这些结论也得到了证实, 图 1.7 已被美国国家职业安全与健康研究所作为评价炎热环境的最佳指数。

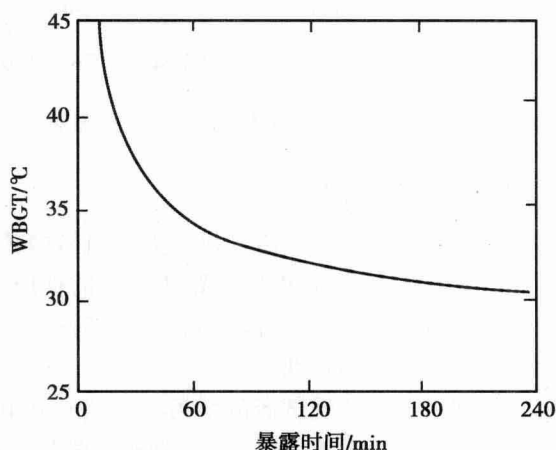


图 1.7 不降低脑力劳动效率的温度(WBGT)与暴露时间的关系^[3]

表 1.1 降低脑力劳动效率的暴露时间与温度的研究结果^{[3][7]}

工作类别	时间/min	温度/℃		研究者
		标准有效 温度指标 (SET)	有效温 度指标 (ET)	
心算	6.5	—	45.5	Blockley 和 Lyman(1950)
心算	18.5	—	42.8	Blockley 和 Lyman(1950)
心算	46	—	33.1	Blockley 和 Lyman(1950)
心算	240	34	30.6	Viteles 和 Smith(1945)
记单词	60	—	35	Wing 和 Touchstone(1965)
解题	120	—	31.7	Carpenter(1945)
莫尔斯电码	180	33.3	30.8	Mackworth(1972)

1.2.3 室内热环境与建筑可持续发展

室内热环境对于人们满足工作、生活的舒适要求是建筑的基本目的,为此人们不断开发新的建筑技术、室内环境调控设备和方法用于营造和改善室内热环境,并且随着城市化的不断加快,建筑不断增加,建筑能耗,尤其是用于调控室内热环境的建筑能耗在不断增加,对于环境和能源的压力不断增大,已经成为实现节能减排一个迫切需要面对和解决的问题。

据我国相关部门的最新统计表明,到 2009 年,我国的城镇人口按统计口径算,已经达到了 6.22 亿人,城镇化率提高到 46.6%。2008 年是 45.7%,2009 年比 2008 年提高了近 1 个百分点。我国的城镇化率已经逐步接近中等收入国家的平均水平,见图 1.8。到 2008 年底,全国设市城市已经达到 655 个,其中,市区总人口达到 100 万人以上的特大城市,包括超大城市,一共是 122 个;50 万到 100 万人口的大城市达到了 118 个;20 万到 50 万人口的中等城市达到 151 个;20 万以下人口的小城市是 264 个^[4]。

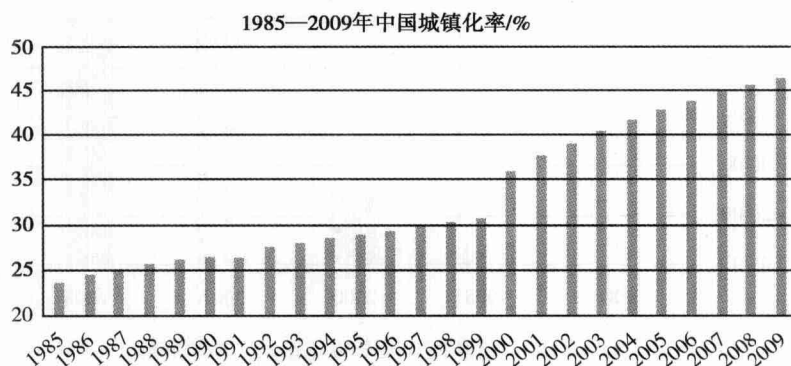


图 1.8 中国城镇化率

图注:数据来源于国家统计年鉴 2009^[5]

随着我国城镇化率的不断提高以及我国经济的快速发展,居民对生活条件要求的不断提高,一方面必然导致我国建筑面积也在不断增加。图 1.9 中可见,每年仅城镇新增住宅面积 2008 年超过了 7.5 亿平方米,而 1997 年以前还不足 4 亿平方米每年。



图 1.9 1978—2008 年中国城镇新建住宅面积

图注:数据来源于国家统计局年鉴 2009^[5]

另一方面,随着建筑面积的增加我国冬季采暖面积必然随之增加;我国城镇居民家庭空调拥有量也迅猛增加。由图 1.10 中可以看出,2000 年时的每百户空调拥有量不到 40 台,2008 年猛增到 100 台,也反映出我国居民在室内热环境调控方面的能源消耗量大幅增加。

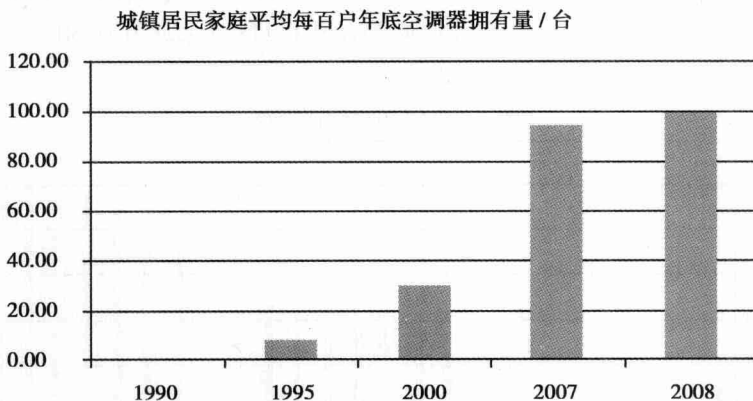


图 1.10 中国城镇居民家庭平均每百户空调拥有量

图注:数据来源于国家统计局年鉴 2009^[5]

两方面的原因导致了我国建筑能耗的大幅增加,根据 2009 年中国建筑节能发展报告中对我国建筑商品能源能耗从 1996 年的 2.43 亿 tce* 增加到了 2006 年的 5.63 亿 tce,其中很

* 1tce(吨标准煤) = 293 亿 J