



建筑环境热适应文献综述*

加州大学伯克利分校 Gail S. Brager[☆]

悉尼大学 Richard J. de Dear(著)

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 陈慧梅 张宇峰[△]

翟永超(译)

摘要 给出了以建筑环境热适应为题的详尽文献综述成果。热舒适研究的适应观点认为,人们在真实环境中的热感觉受其以往热经历和文化与技术行为的综合影响。适应模型的一个重要前提是,人不再是给定热环境的被动接受者,而是通过多重反馈循环与人-环境系统交互作用的主动参与者。热适应可分为三种不同的过程——行为调节、生理习服和心理适应或期望。气候室和现场的证据均表明,较慢的习服过程与较为适中的建筑环境中发生的热适应关系不大,而行为调节和期望的影响则大得多。现场证据调查中的一个最重要的发现是空调建筑和自然通风建筑中热舒适反应存在差别,这可能是由人们以往在建筑中的热经历和不同的感知控制度共同导致的。

关键词 适应 自然通风 个人控制

Thermal adaptation in the built environment: A literature review

Original by Gail S. Brager[★] and Richard J. de Dear

Translated by Chen Huimei, Zhang Yufeng and Zhai Yongchao

Abstract Presents the results of an extensive literature review on the topic of thermal adaptation in the built environment. The adaptive approach to modeling thermal comfort acknowledges that thermal perception in “real world” settings is influenced by the complexities of past thermal history and cultural and technical practices. An important premise of the adaptive model is that the person is no longer a passive recipient of the given thermal environment, but instead is an active agent interacting with the person-environment system via multiple feedback loops. Thermal adaptation can be attributed to three different processes—behavioral adjustment, physiological acclimatization and psychological habituation or expectation. Both climate chamber and field evidence indicates that the slower process of acclimatization is not so relevant to thermal adaptation in the relatively moderate conditions found in buildings, whereas behavioral adjustment and expectation have a much greater influence. One of the most important findings from our review of field evidence was the distinction between thermal comfort responses in air-conditioned vs. naturally ventilated buildings, most likely resulting from a combination of past thermal history in the buildings and differences in levels of perceived control.

Keywords adaptation, natural ventilation, individual control

★ Center for Environment Design Research, University of California, Berkeley, USA

①

0 引言

什么是舒适的热环境?这个问题看似简单,

其答案却对建筑设计与运行、建筑供热与供冷能

本文译自《Thermal adaptation in the built environment: a literature review》,翻译方式为全译,原文刊载于 *Energy and Buildings*, 1998, 27(2): 83-96;译稿经本刊编辑校核。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50708038,50838003),华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助课题(编号:2008ZC18)

①☆ Gail S. Brager,女,博士,教授

△ 510640 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室建筑节能研究中心

(020) 87110164

E-mail: zhangyuf@scut.edu.cn

收稿日期:2010-09-26

修回日期:2011-04-08

耗,以及相应的对自然环境和建筑环境质量造成的影响有着深远的意义。例如,热带地区传统的生活方式产生了一种独特的气候响应式建筑——自然通风建筑,这种建筑不仅能耗低,而且还能给使用者以舒适、愉悦和与气候、文化相交融的感觉^[1]。然而,这种建筑却正逐步被密封的玻璃高楼所取代,增强了对机械制冷的依赖性,这反过来又改变着建筑使用者对空调的期望、要求和行为模式^[2-6]。本文提出的一个关键问题是:在不同类型的建筑中,人们对舒适的定义是否相同。

描述理想热舒适条件的现行标准建立在人体热平衡模型和大量气候室实验的基础上,这些实验主要是针对中纬度气候区的大学生进行的^[7-8]。虽然这些标准最初是针对集中空调建筑而建立的,但却经常被认为普遍适用于所有类型的建筑、气候和人群^[9-10]。实际上,对于自然通风建筑或使用者可用其他个体调节手段控制热环境的建筑,这些标准能提供的设计和运行指导十分有限。因此,我们和其他的一些研究者对这一标准的普遍适用性观点表示了怀疑,认为严格依赖于实验室基础的舒适标准忽略了背景的重要作用,而这些作用可以减弱人们对给定热环境的反应。这场争论最为关键的焦点可能是现行标准在完全没有空调的建筑中的适用性问题。《能源和建筑》(《Energy and Buildings》)用了一整期的版面来探讨空调带来的社会与文化影响,其中包括人们对空调的要求和期望值的变化^[11]。尽管舒适区可能是集中空调控制系统的合理设定目标,但它是否适用于富有更多内在变化的自然通风建筑还存有疑问^[12-13]。这一观点得到了 Givoni 的认同,他考虑到生活在无空调建筑中的人会逐渐适应并接受高温高湿的环境,以此修正了他所作的著名的建筑生物气候图^[14]。然而,如果想系统地完成此项工作,还需要从根本上改变我们看待人与热环境关系的方式。

另一种传统热舒适理论的观点认为,人们通过与环境的交互,或是调整行为,或是逐渐改变期望值以适应热环境,在其自身热偏好的形成中起着积极的作用。对这种热舒适适应理论的关注和研究始于 20 世纪 70 年代中期以应对石油危机,近期,随着对全球气候环境影响的日益关注,它们又重获

生机。给人们提供更多的室内环境控制条件,使室内温度更紧密地跟随室外气候模式变化,对提高舒适度和降低能耗^[15],以及改变建筑设计和运行策略有重大而积极的作用。

本文介绍建筑环境热适应的详尽文献成果,重点集中在空调建筑和自然通风建筑的对比上;简单讨论传统热平衡模型,提出一个热适应概念模型,给出大范围的建筑使用者热适应的气候室和现场证据,并从预测模型、建筑设计、控制算法和标准等方面探讨热舒适适应理论的潜在应用。

1 定义适应过程

1.1 热平衡模型

在当今的热舒适研究中,热平衡模型和适应模型之间似乎出现了不可调和的矛盾。热平衡模型,也称静态或稳态模型,是 Gagge 等人^[16-17]和 Fanger^[18]早期开创性工作的基础,并被现行标准采纳,用于描述热舒适的可接受条件^[7-8]。热平衡模型将人视为热刺激的被动接受者,认为一个给定的热环境仅受人体与环境间热质交换的物理过程影响。为维持体温恒定,人体出现与热不平衡成比例的生理反应,通常假定热感觉(热—暖—凉—冷)与这些反应的大小(由平均皮肤温度和潜热损失或因出汗引起的皮肤湿润度^[19]来衡量)成正比。支撑热平衡模型的决定性逻辑是:物理→生理→主观不适。

热平衡模型基于大量严格的实验室实验而建立,在许多气候室中也得到了较为一致的可再现的结果。然而,研究者们越来越怀疑,这些在实验室中得到的模型所包含的简单因果关系,是否能够不加修正地用于描述真实世界中的热感觉^[20-24]。作为一个设计工具,热平衡模型的一个已知局限是用户需要预测尚未建成建筑中使用者的平均服装热阻(clo)和新陈代谢率(met)。然而,即使是对关键输入参数(新陈代谢率和服装热阻)可现场观测的已投入使用的建筑,应用热平衡模型仍无法准确描述或预测使用者的热舒适^[25-40]。经常会发现平均热感觉的观测值与预测值之间存在显著差别,其潜在原因可归类如下。

1.1.1 模型输入

1.1.1.1 估计单件或整套服装的热阻

Brager 等人^[37]证实,常用表格和算法的来源不同,计算得出的整套服装热阻值的差别可达

20%^[7-8,41]。另外,受瞬变热环境下姿势、抽吸效应^①、不同的材料纤维、蒸汽渗透性和纤维热动力等因素影响,使用无生命暖体假人在实验室条件下测得的服装热阻可能会与实际情况有所不同^[42-45]。

1.1.1.2 考虑座椅热阻

在许多现场研究中出现了 PMV 模型高估热中性的倾向,这可能是由于忽略了座椅对使用者的热作用^[33,46]。McCullough 和 Olesen^[47]考察了带软垫的办公家具对暖体假人总服装热阻的影响,指出典型办公座椅的作用相当于在单件服装热阻值简单求和基础上增加约 0.15 clo 的热阻^[7-8]。

1.1.1.3 估计活动类型及相应的新陈代谢水平

已有的现场调研方法使用标准表格评定人们的活动类型,然后将其转换为新陈代谢率,这可能是一种最落后的热舒适研究方法。可能影响新陈代谢率估算的因素包括与给定任务相关的精神压力、之前活动的短暂影响和从事给定活动所投入的精力^[48]。

1.1.1.4 物理测量的不均衡性

现场研究通常只对周围热环境参数作定点观测。测点如果在空间和(或)时间上与受试者的位置稍有偏离,便不能代表受试者实际感受到的室内微气候^[44]。这对热环境瞬变或空间分布不均的房间尤为重要,如被动式建筑、自然通风建筑或人们拥有较高环境控制水平的场所。

1.1.2 模型的假设——稳态与瞬变

稳态热平衡模型是基于实验室稳态条件下的实验而建立的,然而,就热环境和使用者的活动而言,建筑状态可能更活跃(这两种动态变化在人类生态学中分别称作生态价和生态潜力^[5])。尽管该领域还有许多工作要做,但初步的研究已表明,服装可显著影响人在湿度瞬变时的感觉,相对于等幅度的热突变,冷突变引起的主观反应更为强烈^[50]。

1.1.3 非热因素

人在实际建筑环境中的反应可能会受到热平衡模型未考虑的一系列复杂因素的影响,这些因素包括:人口统计特征(性别、年龄、文化程度、经济状况)、背景(建筑设计、建筑功能、季节、气候、语义学)、环境交互作用(照明、声音、室内空气品质)和认知(态度、偏好和期望)^[38,44,51-53]。尽管这些因素已被反复考察并证实与受试者在人工气候室环境中的舒适反应无关^[54-55],但很多研究者和实践者

仍然怀疑非热因素的作用能否如此轻易地排除。例如,已发现的一个特别重要的影响是感知控制——心理学者们业已证实,当受试者感觉刺激可控时,他们对不利或有害刺激的反应会减弱^[56-62]。这种适应和其他形式的适应将会贯穿本文加以考察。

1.2 一个热适应概念模型

环境学和行为学的研究指出,人对某个场所的经历是一个多变现象,是该场所改变人的目标和期望值的反映^[63-64]。热舒适研究中的适应观点认为,热感觉受人体热平衡物理过程以外的背景影响,如气候条件、社会状况、经济条件和其他背景因素。适应假设认为,人对室内环境表示满意,是因为此时此地实际热环境的主要方面与他对室内环境的热期望相匹配,这些至关重要的期望值是人们当时与以往的热经历和文化及技术行为的综合产物^[21-22,65]。适应模型揭示了环境与使用者“给予与获得”的关系,它的一个重要前提是:人不再是给定热环境的被动接受者(这种决定性观点更适合于气候室实验的受试者),而是通过多重反馈循环与人-环境系统交互作用并逐渐适应的主动参与者^[58-59]。

通用术语“适应”,泛指机体在反复的环境刺激下反应逐渐减弱,它涵盖了建筑使用者为促进室内环境与个人或集体的需要相匹配所经历的所有过程。基于上述广义定义,文献^[66-67]给出了三种适应方式:1) 行为调节(个人的、环境的、技术或文化的),2) 生理适应(遗传性适应或习服),3) 心理适应(习惯或期望)。

1.2.1 行为反馈——调节

行为调节包括人有意或无意作出的所有调整,这些调整反过来影响着主导人体热平衡的热质流动^[71]。我们将行为调节分为三类:1) 个人调节,改变个人参数以适应周围环境,如调整服装、活动量和姿势,吃(喝)热(冷)的食物或饮料或移动到不同地方;2) 技术或环境调节,当条件具备时调整周围环境,如开(关)窗户或遮阳设施、打开风扇或取暖设备、关闭空调散流器或运行其他集中空调控制设备等;3) 文化调节,包括调整工作和午休时间、

① 抽吸效应是指人体行走时皮肤与服装之间夹层的空气流动产生的作用。——译者注。

调整衣着标准等。

人体热平衡的行为调节可能给人们提供了最大的机会,以在维持自身的舒适中扮演主动角色。Chatonnet 和 Cabanac 指出,“人类的行为性体温调节已得到充分发展,渐成优势,并有取代其他形式体温调节的倾向”^[72]。

热平衡模型部分考虑了行为调节,但它是一种线性的方式,即仅通过输入受个人和环境调节影响的参数(如服装、新陈代谢率、空气流动等)来体现的。然而,从热舒适的适应观点看,行为调节代表了即时的和有意的反馈循环,其中,不适感或不满意感不仅是结果,同时也是触发适应反应的起因。简言之,一个人感到或预计到的不舒适就是他采取纠正行为的信号。

行为适应在若干时间尺度上进行。皮肤温度感受器能够对热环境的突然变化,比如在室内外穿梭时,提供几乎是瞬时的神经信息,在人体热平衡发生明显变化之前促使人们进行服装调节和其他行为调节。除了 Humphreys 在季节和天气的时间尺度上对服装调节的研究^[73]外,很少有关于适应时间的研究报道。Humphreys 将任意一天的服装热阻值与之前几天和当天的指数加权移动平均室外温度建立统计关联,并指出在英国白天服装调节的半衰期在 20 h 的数量级上。

建筑给予使用者适应性调节的程度由适应机会^[53]和适应约束^[23,74]来描述,分类如下:

1) 气候。与恶劣或极端气候条件下的建筑相比,温和气候条件下的建筑倾向于为其使用者提供更多的适应机会,而前者则提供更为专一的保护屏障。

2) 经济。用于热环境控制的初投资和运行费,在发达国家也许能被客户接受,但在发展中国家常常会超出业主的承受能力。

3) 建筑设计。适应机会和适应约束与建筑围护结构(窗户的位置和尺寸,能否开启,是否有遮阳设备)、内部布局(使用者距窗户多远,是独立办公单元还是开放式的办公布局)或环境控制系统(空调系统是否是集中式的,工位空调是每个工位可控还是小范围区域可控)的特性相关。

4) 团体和社会习惯。指建筑内的主要情况(着装标准严格还是随意,雇员是否整天待在单一的工作地点)或外部限制要求(限制了行为性体温

调节自由度的政府能源政策、温室气体排放配额或目标)。

适应机会的概念有助于区分按照热环境与人体反应的决定性关系运行的建筑和任由适应反馈循环充分发展和发挥作用的建筑。可以将适应机会想像为一个连续体:一端是气候室,在其内,受试者被指示穿什么和做什么活动,而外部作用者,即研究者,决定受试者在实验期间要经历的温度、湿度和空气流动模式;另一端可为单人房间,在其内,服装和活动方式是随意的,环境控制手段覆盖了从开窗到工位-环境空调的所有可能。任何一种适应控制的效用最终可理想地采用可用控制、操作控制和感知控制来加以评估^[60-61]。不管是心理作用还是果真如此,个人和环境控制对热舒适和可接受度有重要影响的观点似乎很少被质疑。

1.2.2 生理反馈——习服

生理适应最全面的定义涵盖了因暴露于热环境而产生的、致使暴露引起的应激反应逐渐减弱的所有生理反应变化。生理适应至少可分为两类:1) 遗传性适应——在超过一个人一生的时间尺度上形成,已成为个人或人群部分遗传特征的变化;2) 顺应或习服(此处可互换)——暴露于单一或组合的热环境应激源,在几天或几周内发生的生理体温调节系统的变化。

生理习服受自律神经系统支配,并直接影响生理体温调节的设定点。热平衡模型不承认这种适应,而假定设定点保持不变。在体温调节方面对习服作详尽文献综述已超出本文的范畴,这里仅指出对冷应激的习服主要与维持较暖的皮肤温度和增加产热量有关,尽管在未发生战栗时新陈代谢率会增加多少还不清楚^[75]。其他方面的冷适应主要是行为性的^[70]。对于热暴露,特别是高温环境和(或)进行热作业的对象,文献^[68-69,76-79]提供了更为详尽的生理习服证据。在干热气候区,热作业引发的热应激所产生的生理反应主要表现为由新陈代谢或环境引起的给定热负荷下出汗量的增加。与体温调节导致出汗相关的其他变化包括触发出汗的体温阈值的下降和汗液在皮肤上更好的分布。心血管反应的变化,如降低心率和增加血容量及外周血流量,也在热习服者与未习服对照者的对比中得到了证实^[79-82]。热湿气候下的情形却大不相同^[83-84],特别是提高出汗能力对湿度似乎

不那么重要。尽管触发湿热习服者出汗的体核温度比未习服者低,但在潮湿环境下人体散热的不足似乎可由增加外周血流量和提高皮肤温度所导致的显热散热增加来弥补。

对日常热作业和过热着装的实验表明,如果热暴露的强度大到可提升体核温度,则热习服从暴露的第一天就开始发生,在第三或第四天迅速达到完全发展^[78,80]。对于冷习服,或每天以坐姿活动被动经历的热暴露,习服则需要更长的时间^[76]。例如,Wundham 报道说在南非,对季节的正常变化过程的被动暴露产生了明确的至少是部分习服的信号,据此,对于办公人员,习服的时间尺度可能在周到月的数量级上^[82]。

1.2.3 心理反馈——习惯与期望

心理适应包含认知和文化变量的作用,它用来刻画习惯与期望对人的感觉信息和反应的影响程度,有时也称为感知适应^[20],在心理物理学中被描述为重复的或长期的环境应激暴露造成的感觉强度的减弱^[75,85]。静态热平衡模型无法考虑这种作用,而是假设生理应激、热感觉和相应的不适感之间存在固定的关系。反之,适应模型承认反馈循环的潜在作用,即一个人以往和当前的室内外环境的热经历直接影响到他的热反应和可接受度评价。

习惯与期望的概念在适应水平理论中得到了最为清晰的阐述。该理论引入了最佳刺激水平或适应水平的概念。最佳适应水平建立在以往暴露的基础上,是环境评价的基准或准则^[71,86-88]。当然,详尽综述知觉的普遍本质及其与环境刺激、记忆、认知和背景因素关系的研究远超出本文的范畴,但大量的环境心理学文献仍提供了真实建筑中的热感受信息^[56,62-65,89-90]。

McIntyre 在其早期工作中提到了期望在热舒适研究中的作用,他说,“人对非最佳温度的反应在很大程度上取决于他的期望、个性和当时他在做什么”^[91]。心理适应是三种适应机制中研究得最少的,但实际上,它可能在解释热感觉和可接受度实测值与预测值的差别时起到最为重要的作用,特别是针对不同的环境背景,如实验室、住宅和办公室作对比,或将空调建筑与自然通风建筑中的反应作对比^[27,31,34-35,39-40]。

遗憾的是,本文未能找到研究心理适应反应时间尺度的文献,简单的原因可能是没有研究者试图

将心理适应从其他热适应过程中分离出来。仅有趣闻说,建筑使用者需要几周到几个月的时间来适应建筑中的主要热水平,这些尺度可转换为在室外大气环境下运行的气候和季节尺度。

2 适应环境的气候室证据

虽然气候室缺少实际建筑的真实性,不适用于纵向研究^①,但因其高度的可控性和可复现性,气候室研究仍然是热舒适研究的有效手段。为全面考察人体的热适应,应同时考虑来自现场和实验室的证据。许多研究者采用一种气候室实验的研究方法——偏好温度法来研究适应假设所提出的问题。该方法在理论上适用于适应反馈的研究,因为该方法中气候室的环境温度直接受控于它的单一使用者,即受试者。下面概述一些相关研究的结果。

Fanger 利用气候室比较了三组丹麦受试者——普通大学生^[92]、冬泳者^[93]和冷藏仓库的肉类包装工人^[93]的温度偏好,由此考察了不同的冷环境经历及其相应的适应状态对热舒适反应的影响。采用了相同的实验条件(0.6 clo 标准着装,网状座椅,2.5 h 暴露),结果发现三组受试者的偏好温度相同,约为 25.5 °C。

为考察在中等热应激范围内习服的影响,Fanger 招募了 16 位刚刚到达哥本哈根的热带地区常驻居民,沿用上述的实验步骤进行实验,结果发现他们的偏好温度与 25.5 °C 没有显著差异^[94]。de Dear 等人意识到热习服生理作用有限的“保质期”,在新加坡国立大学(北纬 1°)的 32 名大学生中重复了 Fanger 的热带实验,结果再一次表明,偏好温度与作为基准的 Fanger 对丹麦受试者的研究结果没有显著差异^[95]。

Chung 和 Tong 进行了另外一项证实习服无影响的实验室研究。利用香港的气候室,受试者为 134 名年轻中国人,服装热阻为 0.6 clo,在 3 h 的暴露中保持静坐状态。虽然这项研究采用的方法与之前的研究略有不同(进行一系列恒温而非偏好温度测试),但结果没有显著差异,平均中性温度为 24.9 °C^[96]。

Gonzalez 在康涅狄格州纽黑文的 5 天酷暑期研究了短期自然热习服的影响。研究期间的日最

① 纵向研究(longitudinal study)指对同一研究对象在长时间内的重复观测。——译者注。

高温在 $32 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,相对湿度为 $88\% \sim 90\%$ 。年轻男性受试者在轻量运动(116 W/m^2)下的偏好温度(用量表获得)在酷暑期后有明显提高,而静坐受试者的热舒适和可接受度反应酷暑期前后在统计性上没有显著差异^[97]。

有趣的是,唯一一个与以上诸多气候室研究结果有明显偏离的是一篇未发表的伦敦大学博士论文^①。作为该论文研究的一部分,马来西亚籍受试者在马来西亚和伦敦的气候室分别受试。Humphreys 转述了其研究结果,马来半岛的热湿气候背景是造成其偏好温度($28.7 \text{ }^\circ\text{C}$)比伦敦气候室实验结果($25.7 \text{ }^\circ\text{C}$)偏高 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的原因^[23]。此结果令人困惑,因为有着完全相同热历史和热经历的同种族受试者曾出现在前述的 de Dear 等人^[95]的新加坡(处于马来半岛的底端,与马来西亚在气候学上无差别)气候室研究中。如前所述,新加坡气候室研究得到的偏好温度与引述的其他研究一致,甚至与伦敦气候室的研究结果相近。在获取进一步的实验信息之前,我们无法为这些来自马来西亚气候室的未发表的异常发现作出解释。

综上所述,基于至今已发表的实验证据可知,在最为常见的住宅和办公建筑的环境中,静坐或轻微活动者的主观不适和热可接受度不受生理习服过程影响。

3 适应的现场证据

尽管气候室研究具有环境严格受控的优点,但现场研究才是研究行为和心理适应潜在影响的最佳手段,因为这些影响出现在真实的环境中。本文通过总结和对比已发表的在不同气候条件下开展的现场研究结果来考察这些影响。文献^[98-99]对其中许多研究积累的原始数据作了新的分析。

现场研究能够在多大程度上准确确定发生了怎样的适应机制,取决于主观问卷和物理测量的详细程度,而后者尤为重要。根据仪器的规格和室内环境的测量步骤,热舒适的现场调研可大致分为三类。

第三类:在地面以上某一高度简单测量室内温度(可能还有相对湿度)的现场研究,物理测量(温度)和心理测量(问卷)可能是不同步和非连续的。Humphreys^[101-102]和 Auliciems^[65]用于建立早期适应模型的现场研究大多属于此类。虽然此类研究得出的数据质量不足以进行解释性分析,但如果研

究所关心的问题只需用到简单的统计方法,那么该类研究将能在最大范围内提供数据。

第 II 类:观测计算热平衡指标 SET^* 和 PMV/PPD 所需的所有物理环境变量^②(空气温度 t_a , 辐射温度 t_r , 气流速度 v , 相对湿度, 服装热阻, 新陈代谢率)的现场实验与问卷调查同时同地进行,测量高度很有可能只取一个。湿度测量采用通风型干湿球温度计或吸收式湿度传感器。空气流速测量采用测量阈值在 0.1 m/s 以上和(或)带方向感应元件和(或)时间常数超过测量湍流强度所需最小值的热线探头。由于第 II 类研究测量了影响舒适的主要物理参数,其数据能够用于评价行为调节和控制对主观反应的影响。

第 I 类:所有的传感器和测量步骤都完全按 ASHRAE Standard 55^[7] 和 ISO 7730^[8] 标准进行的现场实验,取与 ASHRAE 和 ISO 标准规定相同的地板以上三个高度($0.1, 0.6, 1.2 \text{ m}$ ^③)进行测量。所有测量采用实验室级别的仪表,包括可用于测量湍流强度的快速响应万向型风速计。受 ASHRAE TC 2.1^④ 资助,在旧金山海湾地区^[32,103]、汤斯维尔^[104-106] 和蒙特利尔^[107] 开展的三个现场实验属于第 I 类研究。此类研究得出的数据能够用于细致地考察环境的不均匀性影响,以及对比不同建筑中具有相同高质量数据的研究结果。

3.1 第三类数据的适应证据

热舒适典型的横向研究^⑤由针对建筑使用者的问卷调查和同时进行的室内环境变量测试组成,其中环境变量以空气温度最为重要。采用热感觉标尺时,取标尺中心区域(“中性的”或“舒适的”)对应的投票值为热舒适^[108],经统计分析确定的与大部分投票对应的环境温度称为样本的中性温度,并记为 t_n 。近年发表了大量此类研究的结果,它们已成为一系列被广泛引用的适应模型的基础。

Humphreys 综述了世界上不同国家的 36 个

① Abdulshukor. Human thermal comfort in the tropical climate. Unpublished Ph D thesis, University of London, London, 1993

② clo 和 met 不属于物理变量,此处应为环境变量,为原文笔误。——译者注。

③ 此处应为 $0.1, 0.6, 1.1 \text{ m}$, 为原文笔误。——译者注。

④ 全称为 ASHRAE Technical Committee 2.1, 为 ASHRAE 设立的在生理和人体环境方面的专业委员会。——译者注。

⑤ 横向研究(cross-sectional study),指对所有研究对象的全面观测。与纵向研究关注样本的长时间变化不同,横向研究关注群体在某时的反应。——译者注。

第Ⅲ类研究,揭示了热中性温度(t_n)与建筑室内空气温度或黑球温度平均值(t_i)的强统计相关性^[100]:

$$t_n = 2.56 + 0.83t_i \quad (r = +0.96) \quad (1)$$

研究指出,建筑使用者能够在跨度超过 13 °C 的室内温度范围内感到舒适,Humphreys^[100]将此归因为适应过程,并推断说,“……最好将近期的经历范围视为暴露环境可接受度的影响因素之一”。

接下来基于 Auliciems 的论点,即室内温度和使用者的热期望在不同程度上依赖于室外温度^[109],开展了人们对室外气候的适应研究。Humphreys 将室外气候用简单的月平均温度(t_m)表示,分别分析了有集中空调的气候受控建筑和既无集中供热也无集中供冷的自由运行建筑(即自然通风建筑)的数据,结果见图 1,拟合公式如下^[102]:

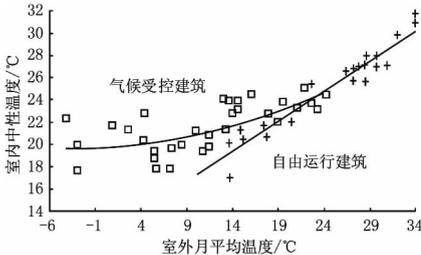


图 1 室内热中性温度与气候的统计相关性

自由运行建筑

$$t_n = 11.9 + 0.534t_m \quad (r = 0.97) \quad (2)$$

气候受控建筑

$$t_n = 23.9 + 0.295(t_m - 22) \cdot$$

$$\exp\left[-\left(\frac{t_m - 22}{24 \times 2^{\frac{1}{2}}}\right)^2\right] \quad (r = 0.72) \quad (3)$$

在自由运行建筑中,室外气候对室内中性温度的影响更为明显,斜率更大的回归曲线考虑到了 94% 的中性温度变化。相比之下,气候受控建筑的中性温度与室外月平均温度的相关性较不明显,但也显著相关。

Auliciems 对早期的第Ⅲ类研究作了另外的分析^[65]。他首先删除了 Humphreys 数据库中不相容的现场研究,比如那些基于非对称标尺或以儿童为受试者的研究,然后增加了之后发表的许多新研究。这一修改使得数据库包含的研究扩展到包括澳洲、亚洲、美洲和欧洲多个气候区在内的 53 个独立的第Ⅲ类现场研究。Auliciems 将自由运行建筑和气候受控建筑的样本汇总到一起,得到线性回归

公式对所有建筑:

$$t_n = 0.48t_i + 0.14t_m + 9.22 \quad (r = 0.95) \quad (4)$$

虽然式(4)中两个自变量存在内部关联性,回归系数可能不稳定,但它给出了一个关于人类热感受适应假设的被广泛引用的统计表达式。

虽然图 1 显示的中性温度与室外气候主要参数的统计关系很有说服力,但这些早期的黑箱适应模型并未揭示其中真实的因果机制。在较热气候的研究中(图 1 的右边部分),行为调节,如减少衣服、降低新陈代谢率和提高空气流速(通过开启风扇或开窗实现),很可能使热中性温度升高。但这只是在缺少更多精确数据情况下的一种推测,行为调节也只是适应类型中的一种。近期更多的现场研究和实验让我们能够开始量化那些驱动热适应的特定因果机制。

3.2 行为适应的直接证据——调节

一个早期的行为适应研究由 Macfarlane 针对出生于澳大利亚潮湿热带地区的受试者进行^[110]。他指出,对于来自寒冷气候区的移民感觉十分不适的温湿度环境,当地居民能够利用行为调节,如穿轻薄衣服和控制活动量,达到可接受的舒适度。Fishman 和 Pimbert 在英国的一个办公建筑中对 26 名受试者每周的服装类型密切观察了一年,估算出服装热阻与室外天气和季节呈强线性关系(特别对于女性受试者),室外周平均温度每升高 1 °C,服装热阻减少 0.02 clo^[27]。这些结果支持了如下假说,即室内中性温度与室外气候的统计相关性部分源自于直接影响热平衡的行为调节。

作为针对巴基斯坦西北部自然通风建筑办公人员研究的一部分,Humphreys^[111]和 Nicol 等人^[112]直接考察了服装调节对中性温度的影响。他们发现,办公人员在一个很宽的季节性温度变化范围内感到舒适,中性温度在冬季的 15.7 °C 和夏季的 26.4 °C 之间变化。他们还推断说,舒适温度的一些(1/2~2/3)但非所有的季节性变化可归因于巴基斯坦传统服装的灵活性。这在支持人们可通过调节服装来适应较大温度范围的假说的同时,还暗示人们对环境的适应可能有另外的非行为方式。

Nicol 和 Raja 关注于行为调节的短期模式,发现与即时室外温度、室外日平均温度和即时室内温度相比,服装的变化与测量前的一系列室外气温有更强的相关性^[113]。Baker 和 Standeven 发现了相

似的模式,即服装并非特别用于逐时地提高舒适度,而是更多地取决于早晨人们对当天外部热环境的预期^[13]。Nicol 和 Raja 的研究还发现了温度与一种适应行为——姿势的显著关系,环境变暖时,姿势的变化倾向于减小服装的有效热阻,同时增加有效出汗的身体表面积^[113]。

除了使自身适应环境外,人们还可以直接控制环境。Baker 和 Standeven 使用每小时一次的问卷,调查受试者是否对服装、设备、门、窗、遮阳物、风扇或建筑的其他任何部分作调节以改善舒适度。结果表明使用者有大量的交互作用,对于 7 栋建筑的 23 名受试者,在 864 h 内共有 273 次对控制或其他环境方面的调节和 62 次服装调节^[13,53]。Benton 和 Brager 开展了一项针对个人和环境行为适应的可用性、应用情况及效果的热舒适现场研究^[114]。虽然诸如可开启窗户、百叶和加热器的环境调节不常出现,但当它们出现时总能获得较好的效果。个人行为调节如“稍作休息”或“喝热饮或冷饮”出现的次数最多,但它们仅能轻微改善热舒适。当特别地问及受试者在填写问卷前的最后一小时内是否有过调整时,Benton 和 Brager 发现,只有 12% 的人调整过他们的服装,而这种调整会达到相对较好的效果^[114]。

3.3 心理适应的直接证据——期望

心理适应是指由热经历和热期望引起的热环境感知或反应的改变。个人控制常被视为该适应机制的一个主要影响因素。Paciuk 直接分析了可用控制(适应机会)、操作控制(行为调节)和感知控制(期望)的区别,发现感知控制对舒适度和满意度都有显著的影响,是热舒适最好的预测指标之一^[61]。这一发现也得到了 Williams 在英格兰西北部办公建筑中所做研究工作的支持,该研究中的受试者在感知到自身对环境有更多控制时表达了较高的满意度^[115]。对控制的感知受围护结构、机械系统和人员密度类型等多种建筑特征影响。Leaman 和 Bordass 针对英国数以千计的办公人员进行了问卷调查,使用 7 点双极标尺让受访者评价他们对环境控制的感知度,研究结果表明感知控制与共享同一空间的人数呈强烈的反比关系^[116]。

在自然通风建筑和集中空调建筑的对比中,个人控制对热期望和热反应的作用有重要意义。由适应假设可知,集中空调建筑的使用者普遍经历了

相对恒定和均匀的环境,很少有个人控制的机会,他们当然期望建筑能自动为他们提供理想的舒适环境,当建筑不能满足这些期望时,与能够控制环境的情形相比,集中空调建筑的使用者可能会对建筑作出更为苛刻的评价。Paciuk 提供了这方面的证据,他发现,在空调建筑中个人或环境调节实际上对满意度有轻微的负面作用^[60-61]。在设定值只能微调几℃的北美空调办公建筑中,Gagge 和 Nevins^[25],Elder 和 Tihbott^[117]都发现在使用者中存在非常普遍的热不适。在一项由 Black 和 Milroy 在伦敦开展的空调和自然通风办公建筑的研究中,集中空调建筑的使用者对较小的温度波动表达了更多的不满,而自然通风建筑的使用者却能承受更大的温度波动^[118]。在一项针对英国混合模式办公建筑进行的为期一年的研究中,Fishman 和 Pimbert 发现,当温度高于 24℃ 时,工作在集中空调区域的人员对热感觉的投票值就开始比工作在自然通风区域的同事们高,这表明他们对较高温度的耐受力偏低,对热环境标准的期望偏高^[27]。Rowe 等人着眼于空调建筑和带或不带辅助响应式供冷、供热设备的自然通风建筑的研究^[40]。他们在带有额外辅助控制设备的自然通风建筑中发现了显著偏高的满意度,并推断说,当人们可以对热环境施加一些控制时,他们对室内热环境的变化有更高的耐受力。

对比住宅和办公建筑的热舒适现场研究可发现相似的现象,即包括感知控制在内的大量背景因素可能影响热期望和热反应。Hunt 和 Gidman 在英国的全国性调查中发现住宅平均温度非常低(15.8℃),他们指出,居民为减少供热费用,积极利用适应机制以便在较低的温度中维持舒适^[119]。Cena 等人研究了独自生活的健康老年受试者在家中的热舒适,发现他们的中性温度比 PMV 预测值低得多;进一步分析表明,这是因为受试者在心理上作出了调整,以使他们适应家中偏凉的环境^[120]。Oseland 采用多种方法在英国的住宅和办公室中开展了大量的现场研究,发现住宅中的热中性温度和偏好温度显著低于办公室,且这些差别不能由服装、活动或空气流速的变化加以解释^[38-39]。Pimbert 和 Fishman 报告了类似的发现,英国住宅中的偏好温度比办公室低了多达 2℃^[121]。所有这些研究支持了以下观点,即人们会逐渐接受他们

习惯了的热环境^[121],并且接受度可能受个人控制、能耗费用、环境担忧和节能相关的社会压力等因素影响^[120]。

3.4 用第Ⅰ类和第Ⅱ类数据分析中性温度

如前所述,Humphreys 和 Auliciems 对第Ⅲ类现场研究的分析具有着眼于多种气候条件下多个现场研究累积数据的优点,但他们在确定外在适应现象背后的因果机制上有很大局限。虽然 3.2 和 3.3 节所述的现场研究可用于考察行为调节和感知控制的特定机制,但其中的单项研究均在有限的气候条件和建筑背景下展开。下一步热适应现场证据的考察将使用大量第Ⅰ和第Ⅱ类现场研究的结果,这些研究测量了所有作为传统热平衡模型输入的环境和个人变量。通过对比热反应的实测值和预测值,可将热平衡模型考虑的行为适应机制(服装、空气流速等)和未考虑的心理适应机制的影

响区分开来。

表 1 总结了 7 个研究团队在不同气候和季节下针对空调建筑和自然通风建筑开展的 18 个第Ⅰ和第Ⅱ类现场研究的结果(按时间顺序列出)^[30,32,34-35,105,107,123]。选择这些特定的研究时,考虑了它们在仪器、问卷、步骤和分析方法上的一致性,这就使得气候和背景的影响可以从诸多方法的人为效应中剥离出来,而在早期的研究中它们是混杂在一起的。中性温度按实测值和 PMV 模型的预测值^[18]分别给出,二者的差别也同时列出,正值表示 PMV 模型高估了中性温度。值得注意的是,PMV 模型的预测值可能与原始文献给出的不同,这是因为本文计算中都增加了 0.15 clo 的平均服装热阻以考虑典型办公座椅的影响^[47],这在多数情况下会使 PMV 模型的预测值比原始文献值低 1℃以上。

表 1 热舒适现场实验:中性温度实测值和预测值与室外气候

| 地点与季节 | 参考文献 | 控制策略 | 室外平均温度/℃ | 中性温度/℃ | | 差值/℃ |
|---------|-------|------|----------|--------|-----------|------|
| | | | | 实测值 | PMV 模型预测值 | |
| 墨尔本,夏季 | [30] | 自然通风 | 19.8 | 21.8 | 23.9 | +2.1 |
| 墨尔本,夏季 | [30] | 空调 | 20.3 | 22.7 | 23.5 | +0.8 |
| 布里斯班,夏季 | [30] | 自然通风 | 24.9 | 25.6 | 25.0 | -0.6 |
| 布里斯班,夏季 | [30] | 空调 | 24.4 | 23.9 | 24.1 | +0.2 |
| 达尔文,干燥 | [30] | 空调 | 25.2 | 24.2 | 23.6 | -0.6 |
| 达尔文,潮湿 | [30] | 空调 | 28.9 | 23.9 | 24.2 | +0.3 |
| 旧金山,冬季 | [32] | 空调 | 12.8 | 22.1 | 22.7 | +0.6 |
| 旧金山,夏季 | [32] | 空调 | 18.7 | 22.6 | 23.4 | +0.8 |
| 汤斯维尔,干燥 | [105] | 空调 | 19.4 | 24.2 | 23.0 | -1.2 |
| 汤斯维尔,潮湿 | [105] | 空调 | 27.0 | 24.6 | 23.6 | -1.0 |
| 蒙特利尔,夏季 | [107] | 空调 | 18.1 | 24.0 | 23.4 | -0.6 |
| 蒙特利尔,冬季 | [107] | 空调 | -6.0 | 23.1 | 22.0 | -1.1 |
| 香港,夏季 | [123] | 空调 | 27.7 | 23.5 | 23.1 | -0.4 |
| 香港,冬季 | [123] | 空调 | 16.6 | 21.2 | 21.7 | +0.5 |
| 曼谷 | [34] | 自然通风 | 28.6 | 28.5 | 25.1 | -3.4 |
| 曼谷 | [34] | 空调 | 30.5 | 24.5 | 23.7 | -0.8 |
| 新加坡 | [35] | 自然通风 | 27.1 | 28.5 | 25.7 | -2.8 |
| 新加坡 | [35] | 空调 | 27.4 | 24.2 | 24.4 | +0.2 |

注:差值=预测值-实测值。

查阅原始文献可获知每项研究的具体细节。本文给出的一个直接观察结果是,除布里斯班外,中性温度的 PMV 模型预测值与实测值的最大差别出现在自然通风建筑中。PMV 模型在自然通风建筑中的预测能力较弱,这意味着必定发生了行为调节(热平衡模型已考虑)之外的适应过程。并且由于习服已被气候室实验完全排除,期望便成为最有可能的解释。与集中空调办公建筑的用户相比,自然通风建筑的使用者能感知到更程度的个

人环境控制。根据适应假设,他们期望建筑提供可变的室内温度,由此自然通风建筑将比集中空调建筑较少受到苛刻的评价。

4 讨论

4.1 热舒适预测模型

在我们看来,研究热舒适的适应方法和热平衡方法是互补的而非对立的。在某种程度上,静态热平衡模型因考虑了使用者对服装和室内环境参数的调节,可视为行为意义上的部分适应。事实上,

热平衡模型确实预测到舒适温度会随主要的室外气候而发生变化,如因服装模式的季节性差别而形成的冬夏舒适区的偏移^[7]。但其局限是,输入变量服装水平是温度偏移唯一的潜在基础或原因,热平衡模型无法考虑启动这种或其他行为的反馈,也无法考虑与背景相关的期望。另一方面,尽管早期的适应模型给出了中性温度与室内外环境的经验关系,却无法揭示其内在的因果关系。我们相信,只有将以上两种方法的特性综合,才能同时顾及到影响实际建筑使用者反应的热因素和非热因素。

假定热平衡模型在某种程度上考虑了行为调节的影响,此时面临的挑战有两个。其一,当用此模型评价既有热环境时,必须在现场精确测量使用者当时当地的热环境,并仔细评估活动、服装水平和座椅的影响;其二,当用此模型预测设计方案的热环境时,需要仔细估计预期的服装和活动水平,以及局部环境控制对室内热环境的影响。后一个挑战可能更难应对,这也正是适应模型能够作出重要贡献的方面。适应模型可以考虑不适感与有意的行为体温调节间的反馈循环,这将使得在许多情况下不需去猜测未来使用者的服装模式。

4.2 自然通风建筑与空调建筑的对比

对热适应现场证据的综述揭示了自然通风建筑与空调建筑在使用者反应上的明显差别。数据还显示,该差别不能由服装和活动调节完全解释。这些差别最有可能的解释是热经历及其对期望作用的背景影响——以往在建筑中的热经历形成了对未来热性能的期望基准。在自然通风建筑中,室内温度与室外温度的日变化和季节变化更为紧密地联系在一起。人们认识到这一点,降低期望或个人的舒适标准,不仅变得更能够容忍多变、动态和不均匀的室内环境,还常常希望与天气和季节的变化有更紧密的联系。舒适在根本上取决于环境与期望相匹配的程度,研究结果一致表明,是否感到环境受控对舒适有强烈的影响^[61,124-127]。

对空调建筑的使用者来说,期望也发挥着作用,但是以不同的方式。始终由冷的、稳定而均匀的环境组成的热经历,会使使用者产生更为严格的舒适标准,同时将他们的期望转向固定的空调设定值,而非逐日或季节波动。空调建筑的使用者基于对空调环境的预期(恒定不变),而非实际的环境给出评价。实际上,环境控制系统和建筑设施日益增

长的复杂性正是源于不断满足使用者日益严格的期望^[124]。

4.3 建筑控制

开发基于热舒适适应模型的环境控制算法的优点有:1) 可作为较低成本的改造策略用于新建和既有建筑;2) 设定温度随室外天气和气候变化能节能,特别在较为适中的春秋季节;3) 建立与使用者的相关背景和可变偏好更为直接的联系,由此改善他们的舒适度;4) 使用更完整的方法设计建筑,使得建筑可以在主、被动运行模式间灵活调整^[128]。理想情况下,适应性的建筑控制将会打破系统侧的完全自动控制与用户侧的手动控制间的平衡^[129]。

当前的控制策略通常采用以建筑为中心、通过消耗能源来创造稳定而均匀的中性环境,但这种环境可能会让许多人感到单调或感觉迟钝^[130]。相反地,以人为中心的方法将有意识地提供,或者至少是允许热环境在时间和空间上的变化。在空间上,可以设计有热差异的区域,以满足个体的热需求^[130-131];在时间上,可以让室内温度随室外气候逐渐偏移,以促使和鼓励诸如服装调整和开窗的适应行为发生^[132-133]。

Auliciems 基于式(4)的适应模型首次提出这样一种适应算法——算法中的输入温度为前两周逐时观测值的平均值^[132]。近期,Humphreys 和 Nicol 针对英国的办公室温度提出了相似的适应算法,其中的室外温度指标定义为将当前室外温度与之前一周的室外日平均温度的指数加权运行平均值以 3:7 的比例组合。然后根据该室外温度指标(t_{oi})按以下关系式确定室内目标温度(t_i)^[133]:

$$t_i = 0.534t_{oi} + 12.9 \quad (5)$$

Nicol 和 Roaf 采用前一个月计算得到的简单室外温度(t_m),提出了一个适用于巴基斯坦地区的适应算法^[134],算法中:

$$t_i = 0.38t_m + 17.0 \quad (6)$$

式(5)和(6)需关注的一个问题是,从自然通风建筑中获得的回归公式在空调建筑中的应用。考虑到在两种完全不同的建筑环境中使用者有不同的适应机会和热期望水平,式(5)和(6)作为控制算法的适用性还是不确定的。

4.4 热舒适标准

随着越来越多的证据证实热感觉受到近期热

经历的影响,期望一个适用于所有的人、建筑和气候的通用标准似乎变得越发地不合理^[21]。现行热舒适标准不鼓励甚或阻碍自然通风建筑的设计,这是由于它们未考虑人的期望和较高的感知控制度对热满意度的影响,由此将自然通风建筑中较为多变的环境预测为不舒适。对于那些想用热特性来体现设计特点的建筑师来说,这些标准对他们也有限制。由于以“中性”为单一目标,忽略背景或设计问题的本质,这些标准忽视了室内环境更动态和富于感受的品质,而这正可作为设计的合理目标^[135]。

现行标准需要借助适应模型加以修正,以便更好地考虑背景的影响。可变温度的标准将室内温度与建筑的气候背景关联起来,以此来考虑建筑使用者的以往热经历和热期望。ASHRAE最近资助了这方面的工作,他们通过收集和分析世界范围内现有的第Ⅰ和第Ⅱ类现场实验数据,提出了一个可变温度标准的预案。这项工作的独特之处在于,所提出的标准中对集中空调建筑和自然通风建筑采用了两种不同的形式^[99]。

5 结论

热舒适研究的适应观点承认真实环境中人的热感觉受以往热经历、非热因素和热期望的综合影响。建筑环境中的热适应可分为三种不同的过程——行为调节、生理习服和心理适应或期望。本文引述的证据表明,较慢的生理习服过程与较为适中的建筑环境发生的热适应关系较小,而行为调节和期望的影响则大得多,它们应作为该领域未来研究和发展的重点。

在综述现场证据时的一个最重要的发现是空调建筑和自然通风建筑中热舒适反应的差别。分析表明,包含在传统热平衡模型中的行为适应只能部分地解释这些差别,而舒适感还显著地受到人们对热环境期望的影响。自然通风建筑的使用者有着更为宽松的期望,更能容忍温度的波动,偏好温度随室外气候趋势而变化。相反地,严格受控的空调建筑的使用者对凉而均匀的热环境有更苛刻的期望,对偏离这些固定设定值的环境更为敏感。这些背景差异很可能是人们以往在建筑中的热经历和他们在感知控制度上差异的综合结果。由此可知,应使用与目标建筑背景一致的回归公式作为其舒适性控制的适应算法,基于自然通风建筑得出的

回归公式可能并不适合作为适应机会被严重制约的空调建筑的控制算法。

更好地认识建筑环境中的热适应对热舒适的影响有诸多裨益,比如改进预测模型和标准、获得更精细和快速响应的环境控制算法、为用户提供更高水平的热舒适和可接受度、降低能耗以及推动气候响应式建筑的设计。这些裨益最好通过适应方法和热平衡方法支持者之间持续而公开的对话与合作来实现,希望本文能为此提供一个基础。

6 致谢

感谢美国加州大学伯克利分校建筑环境中心张慧研究员和《暖通空调》编辑部于松波编辑对本文翻译工作的热心帮助和悉心指导。

参考文献:

- [1] Fisher T. Well-tempered tropics [J]. *Progressive Architecture*, 1984, 65 (4): 98-103
- [2] Lovins A B. Air conditioning comfort: Behavioral and cultural issues [M]. Boulder: E Source, Inc, 1992
- [3] Prins G. On condis and coolth [J]. *Energy and Buildings*, 1992, 18(3/4): 251-258
- [4] Duffy F. Designing comfortable working environments based on user and client priorities [G]// Oseland N A, Humphreys M A. *Thermal comfort: Past, present and future*. Garston: BRE, 1993
- [5] Mahdavi A, Kumar S. Implications of indoor climate control for comfort, energy and environment [J]. *Energy and Buildings*, 1996, 24(3): 167-177
- [6] Fountain M E, Brager G S, de Dear R J. Expectations of indoor climate control [J]. *Energy and Buildings*, 1996, 24(3): 179-182
- [7] ASHRAE. ASHRAE Standard 55 - 1992 Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 1992
- [8] ISO. International Standard 7730 Moderate thermal environments—Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort [S]. Geneva: ISO, 1994
- [9] Parsons K. Thermal comfort standards: Past, present and future and open discussion that follows [G]// Oseland N A, Humphreys M A. *Thermal Comfort: Past, Present and Future*. Garston: BRE, 1993: 184-197
- [10] ASHRAE Technical Committee 2. 1. Thermal

- environmental conditions for human occupancy[R].
Discussions during bi-annual meeting
- [11] Energy and Buildings [J]. 1992,18(3/4)-
- [12] Forwood G. What is thermal comfort in a naturally ventilated building? [G]// Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. Standards for thermal comfort. London; E and FN Spon, 1995; 122-131
- [13] Baker N, Standeven M. Thermal comfort for free-running buildings [J]. Energy and Buildings, 1996, 24(3): 175-182
- [14] Givoni B. Comfort, climate analysis and building design guidelines [J]. Energy and Buildings, 1992, 18(1): 11-23
- [15] Milne G R. The energy implications of a climate-based indoor air temperature standard [G]// Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. Standards for thermal comfort. London; E and FN Spon, 1995; 182-189
- [16] Gagge A P, Stolwijk J A J, Hardy J D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures [J]. Environmental Research, 1967, 1: 1-20
- [17] Gagge A P, Fobelets A, Berglund L G. A standard predictive index of human response to the thermal environment [G]// ASHRAE Trans, 1986, 92(2B): 709-731
- [18] Fanger P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen; Danish Technical Press, 1970
- [19] Benzinger T H. The physiological basis for thermal comfort [G]// Fanger P O, Valhjorn O. Indoor climate: Effects on human comfort, performance and health in residential, commercial and light-industry buildings. Hørsholm; Danish Building Research Institute, 1979
- [20] Sundstrom E, Sundstrom M G. Workplaces: The psychology of the physical environment in offices and factories [M]. Copenhagen; Cambridge University Press, 1986
- [21] Aulicims A. Thermal comfort [G]// Ruck N C. Building design and human performance. New York; Van Nostrand Reinhold, 1989; 71-88
- [22] Nicol J F. Thermal comfort—A handbook for field studies toward an adaptive model [M]. London; University of East London, 1993
- [23] Humphreys M A. Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research [G] // Oseland N A, Humphreys M A. Thermal comfort: Past, present and future. Garston; BRE, 1993
- [24] Humphreys M A. Thermal comfort temperatures and the habits of Hobbits [G]// Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. Standards for thermal comfort. London; E and FN Spon, 1995
- [25] Gagge A P, Nevins R G. Effect of energy conservation guidelines on comfort, acceptability and health [R]. London; Pierce Lab, 1976
- [26] Fishman D S, Pimbert S L. Survey of subjective responses to the thermal environment in offices [C] // Proceedings of the International Indoor Climate Symposium, Copenhagen, Denmark, 1978
- [27] Fishman D S, Pimbert S L. The thermal environment in offices [J]. Energy and Buildings, 1982, 5(2): 109-116
- [28] Howell W C, Kennedy P A. Field validation of the Fanger thermal comfort model [J]. Human Factors, 1979, 21(2): 229-239
- [29] Howell W C, Stramler C S. Contribution of psychological variables to the prediction of thermal comfort judgments in real world settings [G] // ASHRAE Trans, 1981, 87(1): 609-621
- [30] de Dear R J, Aulicims A. Validation of the predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field surveys [G]// ASHRAE Trans, 1985, 91(2): 452-468
- [31] Heijs W, Stringer P J. Research on residential thermal comfort: Some contributions from environmental psychology [J]. Journal of Environmental Psychology, 1988, 8(3): 235-247
- [32] Schiller G, Arens E, Bauman F, et al. A field study of thermal environments and comfort in office buildings [G]// ASHRAE Trans, 1988, 94(2): 280-306
- [33] Schiller G E. A comparison of measured and predicted comfort in office buildings [G]// ASHRAE Trans, 1990, 96(1): 609-622
- [34] Busch J F. Thermal responses to the Thai office environment [G]// ASHRAE Trans, 1990, 96(1): 859-872
- [35] de Dear R J, Leow K G, Foo S C. Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore [J]. International Journal of

- Biometeorology, 1991, 34(4): 259-265
- [36] Williamsons T J, Coldicutt S, Penny R E C. Aspects of thermal preferences in housing in a hot humid climate, with particular reference to Darwin, Australia [J]. International Journal of Biometeorology, 1991, 34(4): 251-258
- [37] Brager G S, Fountain M, Bentom C C, et al. A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field [G]//Oseland N A, Humphreys M A. Thermal comfort: Past, present and future. Garston: BRE, 1993
- [38] Oseland N A. A comparison of the predicted and reported thermal sensation vote in homes during winter and summer [J]. Energy and Buildings, 1994, 21(1): 45-54
- [39] Oseland N A. Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes [J]. Energy and Buildings, 1995, 23(2): 105-115
- [40] Rowe D M, Lambert W G, Wilke S E. Pale green, simple and user friendly: Occupant perceptions of thermal comfort in office buildings [G]//Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. Standards for thermal comfort. London: E and FN Spon, 1995: 59-69
- [41] ASHRAE. ASHRAE Standard 55 - 1981 Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 1981
- [42] Nielson R, Olesen B W, Fanger P O. Effect of physical activity and air velocity on thermal insulation of clothing [J]. Ergonomics, 1985, 28(12): 1617-1631
- [43] Berger X. The pumping effect of clothing [J]. International Journal of Ambient Energy, 1988, 9(1): 37-46
- [44] Baker N V. Thermal comfort evaluation for passive cooling—A pascool task [C]//Proceedings of the Conference on Solar Energy in Architecture and Planning. Florence, Italy, 1993
- [45] McCullough E A, Hong S. A database for determining the decrease in clothing insulation due to body motion [G]//ASHRAE Trans, 1994, 100(1): 765-775
- [46] Fanger P O, Wyon D. Discussion section at the end of Schiller's paper [G]//ASHRAE Trans, 1990, 96(1): 621-622
- [47] McCullough E, Olesen B W. Thermal insulation provided by chairs [G]//ASHRAE Trans, 1994, 100(1): 795-802
- [48] Cena K M. Thermal and non-thermal aspects of comfort surveys in homes and offices [G]//Oseland N A, Humphreys M A. Thermal comfort: Past, present and future. Garston: BRE, 1993
- [49] de Dear R J, Knudsen H N, Fanger P O. Impact of air humidity on thermal comfort during step changes [G]//ASHRAE Trans, 1989, 95(2): 336-350
- [50] Ring J W, de Dear R J. Temperature transients: A model for heat diffusion through the skin, thermoreceptor response and thermal sensation [J]. Indoor Air, 1991, 1(4): 448-456
- [51] McIntyre D A. Chamber studies—Reductio ad absurdum? [J]. Energy and Buildings, 1982, 5(2): 89-96
- [52] Griffiths I D, Huber J W, Baillie A P. The scope for energy conserving action: A comparison of the attitudinal and thermal comfort approaches [G]//Canter D, Jesuino J C, Soczka L, et al. Environmental social psychology, NATO ASI series, Series D, No. 45. Dordrecht: Kluwer Academic Publ, 1988: 46-56
- [53] Baker N, Standeven M. Comfort criteria for passively cooled buildings a pascool task [J]. Renewable Energy, 1994, 5(5/6/7/8): 977-984
- [54] Fanger P O. Improvement of human comfort and resulting effects on working capacity [J]. Biometeorology, 1972, 5(2): 31-41
- [55] de Dear R J, Leow K G, Ameen A. Indoor climate and thermal comfort in the humid tropics—Part I: Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore [G]//ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 874-879
- [56] Kaplan S, Kaplan R. Cognition and environment: functioning in an uncertain world [M]. New York: Praeger, 1982
- [57] Wineman J D. Office design and evaluation—An overview [J]. Environment and Behavior, 1982, 14(3): 271-298
- [58] Franck K A. Exorcising the ghost of physical determinism [J]. Environment and Behavior, 1984, 16(4): 411-435
- [59] Vischer J C. The adaptation and control model of user needs: A new direction for housing research [J]. Journal of Environmental Psychology, 1985, 5(3): 287-298

- [60] Paciuk M. The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace [D]. Milwaukee; University of Wisconsin, 1989
- [61] Paciuk M. The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace [C]// Coming of Age, 21th Annual Conference of the Environmental Design Research Association. Champaign-Urbana, 1990
- [62] Veitch R, Arkkelin D. Environmental psychology—An interdisciplinary perspective [M]. Englewood Cliffs; Prentice Hall, 1995
- [63] Ittelson W H. Environment perception and contemporary perception theory [G]// Ittelson W H. Environment and cognition. New York; Seminar Press, 1973; 1-19
- [64] Canter D. The purposive evaluation of places—A facet approach [J]. Environment and Behavior, 1983, 15(6): 659-698
- [65] Auliciems A. Towards a psycho-physiological model of thermal perception [J]. International Journal of Biometeorology, 1981, 25(2): 109-122
- [66] Prosser C L. Physiological adaptation [M]. Washington; American Physiological Society, 1958
- [67] Goldsmith R. Acclimatisation to cold in man—Fact or fiction? Heat loss from animals and man; Assessment and control [C]// Proceeding of the 20th Easter School in Agricultural Science, University of Nottingham. London, 1974
- [68] Folk G E. Adaptation and heat loss: The past thirty years. Heat loss from animals and man; Assessment and control [C]// Proceeding of the 20th Easter School in Agricultural Science, University of Nottingham. London, 1974
- [69] Folk G E. Climatic change and acclimatization [G]// Cena K, Clark J A. Bioengineering, thermal physiology and comfort. Amsterdam; Elsevier, 1981; 157-168
- [70] Clark R P, Edholm O G. Man and his thermal environment [M]. London; Edward Arnold, 1985
- [71] Wohlwill J F. Behavioral response and adaptation to environmental stimulation [G] // Damon A. Physiological anthropology. Cambridge; Harvard University Press, 1975; 295-334
- [72] Chatonnet J, Cabanac M. The perception of thermal comfort [J]. International Journal of Biometeorology, 1965, 9(2): 183-193
- [73] Humphreys M A. The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour [G] // Fanger P O, Valbjorn O. Indoor climate: Effects on human comfort, performance and health in residential, commercial and light-industry buildings. Hørsholm; Danish Building Research Institute, 1979
- [74] Nicol J F, Humphreys M A. Thermal comfort as part of a self regulating system [C]// Proceeding of CIB Commission W45 Symposium—Thermal Comfort and Moderate Heat Stress. London, 1972; 263-274
- [75] Frisancho A R. Human adaptation [M]. Ann Arbor; University of Michigan Press, 1981
- [76] Bruce W. Man and his thermal environment; Physiological adjustments to conditions and assessment of comfort in buildings [R]. Division of Building Research, National Research Council of Canada, 1960
- [77] Berglund L, McNall P E. Human sweat film area and composition during prolonged sweating [J]. Journal of Applied Physiology, 1973, 35(5): 714-718
- [78] Givoni B, Goldman R F. Predicting effects of heat acclimatization on heart rate and rectal temperature [J]. Journal of Applied Physiology, 1973, 35(6): 875-879
- [79] Fox G E. Heat acclimatisation and the sweating response [C]// Proceeding of the 20th Easter School in Agricultural Science. Butterworths, 1974
- [80] Bean W B, Eichna L W. Performance in relation to environmental temperature [C] // Proceeding of Federation of American Societies for Experimental Biology, 1943; 144-158
- [81] Hardy J D. Physiology of temperature regulation [J]. Physiological Reviews, 1961, 41(3): 521-606
- [82] Wyndham C H. Adaptation to heat and cold [G]// Lee D H K, Minard D. Physiology, environment and man. New York; Academic Press, 1970; 177-204
- [83] Goldman R F, Green R B, Jampietro P F. Tolerance of hot, wet environments by resting men [J]. Journal of Applied Physiology, 1965, 20(2): 271-277
- [84] Gonzalez R R, Pandolf K B, Gagge A P. Heat acclimation and decline in sweating during humidity transients [J]. Journal of Applied Physiology, 1974, 36(4): 419-425

- [85] Glaser E. The physiological basis of habituation [M]. London:Oxford University Press,1966
- [86] Helson H. Adaptation-level theory [M]. New York: Harper and Row,1964
- [87] Helson H. Adaptation-level theory: 1970 and after [G]// Appley M H. Adaptation-level theory. New York:Academic Press,1971:5-17
- [88] Wohlwill J F. Human adaptation to levels of environmental stimulation [J]. Human Ecology, 1974,2(2):127-147
- [89] Canter D. The psychology of place [M]. London: Architectural Press,1977
- [90] Russell J A,Ward L M. Environmental psychology [J]. Annual Review of Psychology,1982,33:651-688
- [91] McIntyre D A. Design requirements for a comfortable environment [G] // Cena K, Clark J A. Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort. Amsterdam;Elsevier,1980:157-168
- [92] Fanger P O,Langkilde G. Interindividual differences in ambient temperatures preferred by seated persons [G]//ASHRAE Trans,1975,81(2):140-147
- [93] Fanger, P O, Højbjerre J H, Thomsen J O B. Can winter swimming cause people to prefer lower room temperatures? [J]. International Journal of Biometeorology,1977,21(1):44-50
- [94] Fanger P O. Near-future prospects of the meteorological environment in developing countries in deserts and tropical areas. Improvement of comfort and resulting effects on working capacity [G] // Tromp S W, Weihe W H, Boima J. Amsterdam: Biometeorology,1972:31-41
- [95] de Dear R J,Leow K G,Ameen A. Indoor climate and thermal comfort in the humid tropics—Part II: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore [G]//ASHRAE Trans,1991,97(1): 880-886
- [96] Chung T M, Tong W C. Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong [J]. Building and Environment,1990,25(4):317-328
- [97] Gonzalez R R. Role of natural acclimatization (cold and heat) and temperature: Effect on health and acceptability in the built environment [G]//Fanger P O, Valhjorn O. Indoor climate: Effects on human comfort, performance and health in residential, commercial and light-industry buildings. Hørsholm; Danish Building Research Institute,1979:737-751
- [98] de Dear R J, Brager G S, Cooper D. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [R]. Final Report of ASHRAE RP-884. Macquarie Research,Macquarie University,Sydney,1997
- [99] de Dear R J, Brager G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [G] // ASHRAE Trans,1998,104(1):145-167
- [100] Humphreys M A. Field studies of thermal comfort compared and applied [R]. UK Department of Environmental Building Research Establishment,1975
- [101] Humphreys M A. Field studies of thermal comfort compared and applied [J]. Building Services Engineer,1976,44:5-27
- [102] Humphreys M A. Outdoor temperatures and comfort indoors [J]. Building Research and Practice,1978,6(2):92-105
- [103] Schiller G E, Arens E, Bauman F, et al. A field study of thermal environments and comfort in office buildings [R]. Final Report of ASHRAE RP-462. UC Berkeley,Berkeley,1988
- [104] de Dear R J,Fountain M E,Popovic S,et al. A field study of occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate [R]. Final Report of ASHRAE RP-702. Macquarie University,Sydney,1993
- [105] de Dear R J,Fountain M E. Field experiments on occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate [G]//ASHRAE Trans,1994, 100(2):457-475
- [106] de Dear R J,Fountain M E. Thermal comfort in air-conditioned office buildings in the tropics [J]. Journal of the Australian Institute of Refrigerating, Air-Conditioning and Heating,1994,48(9):14-30
- [107] Donnini G, Molina J, Martello C, et al. Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate [R]. Final Report of ASHRAE RP-821. Montreal,Quebec,Canada,1996
- [108] McIntyre D A. Seven point scales of warmth [J]. Building Services Engineer,1978,45(12):215-226
- [109] Auliciems A. Effects of weather on indoor thermal comfort [J]. International Journal of Biometeorology,1969,13(2):147-162
- [110] Macfarlane W V. Thermal comfort studies since 1958 [J]. Architectural Science Review,1978,21

- (4):86-92
- [111] Humphreys M A. An adaptive approach to the thermal comfort of office workers in North West Pakistan [J]. *Renewable Energy*, 1994, 5 (5/6/7/8):985-992
- [112] Nicol J F, Jamy G N, Sykes O, et al. A survey of comfort temperatures in Pakistan; Towards new indoor temperature standards [M]. England; School of Architecture, Oxford Brookes University, 1994
- [113] Nicol J F, Raja I A. Thermal comfort, time and posture; Exploratory studies in the nature of adaptive thermal comfort [M]. England; School of Architecture, Oxford Brookes University, 1996
- [114] Benton C C, Brager G S. Sunset building: A study of occupant thermal comfort in support of PG&E's advanced customer technology test (ACT2) for maximum energy efficiency [R]. Final Report of CEDR-06-94. UC Berkeley, Berkeley, 1994
- [115] Williams R N. Field investigation of thermal comfort, environmental satisfaction and perceived control levels in UK office buildings [C] // *Proceeding of Healthy Buildings*. Milan, Italy, 1995
- [116] Leaman A, Bordass B. Building design, complexity and manageability [J]. *Facilities*, 1993, 11 (9):16-27
- [117] Elder J, Tihbott R L. User acceptance of an energy efficient office building—A case study of the norris cotton federal office building [R]. NBS Bldg. Ser. No. 130. National Bureau of Standards. Washington, DC, 1981
- [118] Black F A, Milroy E A. Experience of air conditioning in offices [J]. *Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers*, 1966, 34(9): 188-196
- [119] Hunt D G R, Gidman M I. A national field survey of house temperatures [J]. *Building and Environment*, 1982, 17(2):107-124
- [120] Cena K M, Spotila J R, Avery H W. Thermal comfort of the elderly is affected by clothing, activity and psychological adjustment [G] // *ASHRAE Trans*, 1986, 92(2):329-342
- [121] Pimbert S L, Fishman D S. Some recent research into home heating [J]. *Journal of Consumer Studies & Home Economics*, 1981, 5:1-12
- [122] Humphreys M A. The dependence of comfortable temperatures upon indoor air and outdoor climates [G] // Cena K, Clark J A. *Bioengineering, thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam; Elsevier, 1981:229-250
- [123] Chan D W T, Ng S C H, de Dear R J, et al. An assessment of thermal comfort in office premises in Hong Kong [R]. Hong Kong Polytechnic University. Hong Kong, 1996
- [124] de Dear R J, Auliciems A. Air conditioning in Australia II; User attitudes [J]. *Architectural Science Review*, 1986, 31:19-27
- [125] Cooper I. Comfort and energy conservation; A need for reconciliation [J]. *Energy and Buildings*, 1982, 5 (2):83-87
- [126] Hawkes D. The theoretical basis of comfort in the 'selective' control of environments [J]. *Energy and Buildings*, 1982, 5(2):127-134
- [127] Baird G, Brander W D S, Pool F, et al. Building energy use and the design-user interface [C] // *Proceedings of Australian and New Zealand Arch Sci Assoc Conference*. Canberra, 1981:19-26
- [128] Willis S, Perera E. Keeping control of comfort [C] // *Building Services*, 1995
- [129] Bordass W T, Leaman A J. Control strategies for building services [C] // *Proceedings of the Conference on Advanced Systems of Passive and Active Climatisation*. Barcelona, 1993
- [130] Gerlach K A. Environmental design to counter thermal boredom [J]. *J Arch Res*, 1974, 3:15-19
- [131] Webb C G. An analysis of some observations of thermal comfort in an equatorial climate [J]. *British Journal of Industrial Medicine*, 1959, 16:297-310
- [132] Auliciems A. Air conditioning in Australia III; Thermobile controls [J]. *Architectural Science Review*, 1986, 33:43-48
- [133] Humphreys M A, Nicol J F. An adaptive guideline for UK office temperatures [G] // Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. *Standards for thermal comfort*. London; E and FN Spon, 1995
- [134] Nicol J F, Roaf S. Pioneering new indoor temperature standards; The Pakistan project [J]. *Energy and Buildings*, 1996, 23(3):169-174
- [135] Williamson T J, Coldicutt S, Riordan P. Comfort, preferences or design data? [G] // Nicol J F, Humphreys M A, Sykes O, et al. *Standards for thermal comfort*. London; E and FN Spon, 1995:50-58



铁路客站室内环境现状及节能设计调研

铁道部经济规划研究院 刘燕[☆]
清华大学 彭琛 燕达

摘要 针对铁路客站的建筑形式和功能,在调研和实测的基础上,总结和归纳了客站客流、室内环境、自然采光及照明、通风及用能的现状及特点,为客站的节能设计提供了数据基础和技术支撑。

关键词 铁路客站 室内环境 现场调研 节能设计

Indoor environment status and energy saving design investigation of railway stations

By Liu Yan[★], Peng Chen and Yan Da

Abstract Aiming at the building feature and function of railway stations, sums up the status and the characteristics of passenger flow, indoor environment, natural lighting, artificial lighting, ventilation and energy utilization of railway stations on the basis of investigation and field test. Provides data and technical support for energy saving design for railway stations.

Keywords railway station, indoor environment, site investigation, energy saving design

★ Economic and Planning Research Institute of Ministry of Railways, Beijing, China

①

1 研究背景

近年来我国铁路建设取得了令世人瞩目的成就,截止到2009年底,铁路营业里程已达8.6万km,高居亚洲首位。根据2008年国家中长期铁路网规划的部署,配合铁路建设,即将开工建设的铁路新客站为1066座。客站建设正处在一个数量大、速度快、标准高的阶段,如何切实做好新建客站的建筑节能工作,是当前一个亟待解决的重要课题。

客站需要保障旅客在候车时有舒适的环境,并能方便快捷乘车。客站建筑形式、服务特点与常规建筑有明显差异:客站服务人群庞大,某些大型客站日发送旅客量逾10万人,大量旅客通过或滞留,为客站室内环境的营造带来困难;为方便旅客候车和乘车,客站建筑一般面积大,楼层少,与室外贯通良好。因此,普通建筑节能方法和技术措施在客站建筑中的适用性尚需要大量的实际调研和专题研究。

2 文献研究

客站的节能工作需要结合其功能特点。客站有大量旅客候车、乘车,良好的室内环境营造非常重要。

集散大厅、候车厅客流量大,旅客聚集密度大,密集的人流导致室内热环境及空气质量恶化,引入自然通风及空调系统,对改变铁路客站室内热环境是非常必要的。盛晖等人认为在客站聚集人数变化的情况下,自动调节室内温度,保证室温稳定在满足人体舒适度的范围之内,对于客站的使用与管理都能起到积极的促进作用^[1]。钟承霞认为客站室内环境设计的重点放在功能性、地方性、时代感、舒适性和耐久性等方面^[2],对于舒适性的考虑,更多侧重于视觉感受。

郭旭辉指出客站空调通风系统与普通公共建筑存在差异^[3]。由于客站人员密度大,如果参照空调设计手册^[4],客站人员新风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,候车室内 CO_2 浓度不能满足卫生标准要求;为了满足卫生标准要求,又尽可能降低空调系统能耗,建议人均新风量取 $17 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

①[☆] 刘燕,女,1971年5月生,硕士,高级工程师,处长
100039 北京市海淀区北蜂窝路乙29号铁道部经济规划研究院311室
(010) 51876447
E-mail: liuyan1@crecc.com.cn
收稿日期:2011-06-01