



基于生理指标评价人体热舒适、工作效率和长期健康的研究路线探讨^{*}

东华大学 清华大学 余娟[☆]
清华大学 朱颖心[△] 欧阳沁
东华大学 沈恒根
同济大学 周翔

摘要 分析了人体在热环境中的生理响应机制,综述了国内外基于生理指标的人体热舒适、工作效率和长期健康的研究现状,指出生理指标在评价工作效率和人体健康方面具有重要价值,但对于热舒适研究只能作为一个辅助评价指标,并提出了生理指标在评价热舒适、工作效率和人体健康方面的研究路线。

关键词 生理指标 热舒适 工作效率 长期健康 评价

Discussion on research routes of using physiological index to evaluate human thermal comfort, work efficiency and long-term health

By Yu Juan[★], Zhu Yingxin, Ouyang Qin, Shen Henggen and Zhou Xiang

Abstract Analyses the physiological response mechanism of human body to thermal environment. Reviews the research status of using physiological index to evaluate human thermal comfort, work efficiency and long-term health. Points out that the physiological index has great effects on evaluating human work efficiency and long-term health but is merely a secondary means in thermal comfort evaluation. Puts forward three research routes.

Keywords physiological index, thermal comfort, work efficiency, long-term health, evaluation

① ★ Donghua University, Shanghai, China

0 引言

20 世纪空调技术的发展,很大程度上提高了人们的生活质量。然而多年的实践和研究发现,稳态的热中性空调环境削弱了人体的热适应力,越来越多的人对目前的空调环境产生不满和抱怨。首先表现为一部分人由于长期处于空调环境下而产生了空调适应不全症(即空调系统维持的相对低温环境使皮肤汗腺和皮脂腺收缩,腺口闭塞,导致血流不畅,发生神经功能紊乱等症候群)^[1];其次,单调的稳态环境使人产生了乏味、厌倦的心理,无法

完全满足人的热舒适以及亲近自然的要求;同时,亚健康 and 亚舒适的室内环境在一定程度上也影响了人们的工作效率。

由于室内热环境对人的身心健康、舒适度以及工作效率都会产生影响,因此,要营造一个健康、舒适、高效的室内环境,就要从人的生理和心理出发,研究其在环境因素综合作用下的响应机理。近几

^{*} 国家自然科学基金重点项目(编号:50838003),国家“十一五”科技支撑计划项目(编号:2006BAJ02A06),上海市重点学科建设项目(编号:B604)

①[☆] 余娟,女,1985 年 4 月生,在读博士研究生
[△] 100084 北京清华大学建筑技术科学系
(010) 62782746

E-mail: zhuyx@tsinghua. edu. cn

收稿日期:2009-08-24

一次修回:2009-11-12

二次修回:2010-01-21

年,国内外学者在热舒适、工作效率、人体健康的实验研究上引进了客观生理参数的测试,试图寻找一些规律,也得到了一些有价值的结论。但是,生理指标在评价热舒适、工作效率和人体健康方面发挥的作用是不同的,研究的手段自然就存在差别,究竟该如何利用生理测试来更客观、更准确地评价人体热舒适、工作效率和人体健康呢?为此,笔者分析了人体在热环境中的生理调节机能,综述了国内外学者的研究成果,并提出了在评价热舒适、工作效率、人体健康等的研究中运用生理指标的技术路线的不同之处。

1 人体在热环境中的生理调节机能

人体在环境温度发生变化的情况下能够保持体温相对恒定,是因为机体内存在体温的自动调节机构,即人体在体温调节中枢(下丘脑)的控制下,通过改变皮肤血流量、血管收缩、出汗率、内环境缓冲物质含量等生理调节反应,来调节机体的产热和散热过程^[2]。

下丘脑由几个分区组成,其中两个分区控制着温度调节,称为下丘脑前部和后部。下丘脑前部的主要作用是促进散热,而后部的主要作用是促进产热。当人体处于偏热环境或进行大运动量的活动时,只要下丘脑前部的温度稍高于设定值,皮肤表层的血管就会扩张,皮肤温度升高,从而增大体表向环境的散热量。如果这样仍不能抑制身体内部的温度上升,体温调节系统就会命令皮肤出汗,通过蒸发带走身体的热量。当人体处于偏冷环境时,下丘脑后部从冷感受器接受温度信号,然后指示皮下血管收缩来减少身体表层的血流量,从而降低皮肤温度以减少人体辐射和对流热损失,如果人体内部温度仍不能维持恒定,体温调节系统就会自动通过冷颤等方式增加产热量(如图 1 所示)^[3]。

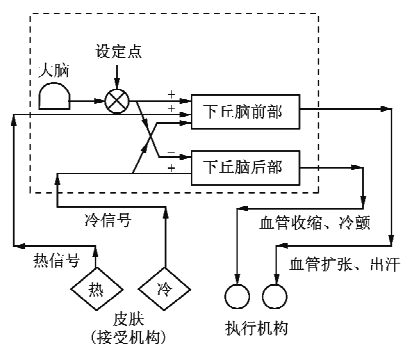


图 1 人体体温调节系统工作过程简图^[3]

此外,热环境还会引起水盐代谢、心血管系统及神经系统等方面的变化。如在高温环境下,人体通过汗液的蒸发维持机体热平衡。心率的变化也能在一定程度上反映环境温度和劳动强度对机体所造成的热负荷大小以及心血管系统紧张程度。相关研究表明,环境温度越高,劳动强度越大,心率越快^[2]。

2 基于生理指标的人体热舒适、工作效率和健康的研究

传统的基于稳态热舒适的研究已有近一个世纪的历史,其主要特征是依靠主观投票和环境参数测试,力图将热环境的四个主要要素(空气温度、相对湿度、流速及周围表面平均辐射温度)与人的热感觉联系起来。直到上世纪 60 年代末,研究者开始把生理参数引入热舒适实验中,试图寻求生理参数与热感觉之间的关系^[4]。而后,在热环境对人们工作效率、健康的影响研究上,生理参数的测试也日益受到研究者的重视。

2.1 人体热舒适研究

人体能够感受外界的温度变化是因为在人体皮肤表层中存在温度感受器,当它们受到冷、热刺激时就会向大脑发出信号,从而产生对应的冷感觉和热感觉。迄今为止,人们已通过二节点模型获得了中性皮肤温度、中性皮肤润湿度和中性出汗率等参数^[5-6],但缺乏偏离中性环境时生理参数与人体舒适性的定量关联结果。目前,虽然有热感觉指标^[7]利用人体平均温度(皮肤温度和核心温度的加权值)来评价人体的热感觉,但是人体平均温度必须依靠二节点模型进行预测,而且在偏热环境下,由于人体出汗,仅靠皮肤温度和核心温度不能准确预测人体热感觉,还必须考虑皮肤润湿度的影响。因此,热感觉指标和标准有效温度 SET^* (standard effective temperature) 一样,二者都以生理参数为中间变量,最终还要通过环境参数建立生理参数与人体舒适性之间的关系,在应用上就不如直接通过环境参数来预测人体热感觉的 PMV 指标广泛。随着研究的深入,Gagge 等人发现环境温度发生阶跃变化时,皮肤温度与热感觉存在分离现象^[4]。因此,在瞬变状况下,皮肤温度是很难作为客观指标来定量反映热感觉的。

近几年,研究者把更多的生理参数引入稳态热舒适实验中,也得到了一些定性的结论。Kazuyuki Kanosue 等人利用多功能磁共振图像研究了人们

在冷暴露条件下(8℃)大脑皮层区域的活动,指出人们越觉得不舒服,大脑双侧扁桃体的血氧依赖性水平就越高^[8]。我国一些研究者对脑电、心电、体感诱发电位、心率变异性等与热刺激信号之间的关系进行了研究,试图建立人体生理反应参数和人体主观感受的联系,从而建立用生理参数来评价人体舒适性的客观评价体系。徐小林等人研究了热舒适范围内出汗率、皮肤温度、运动神经传导速度(motion conduction velocity, MCV)、感觉神经传导速度(sensation conduction velocity, SCV)、血压、脑电图、心电图等生理指标和人体主观感受的关系^[9-11]。姚晔等人研究发现,随着热不舒适度和冷不舒适度的增加,心率变异性(heart rate variability, HRV)和脑电波较舒适状态下均有显著性差异,并指出 HRV 和脑电波可能可以用来评价人体的热舒适^[12-13]。

但是,这些研究成果都没有揭示生理参数与人体热舒适性之间的定量关系,还无法通过生理参数测试判定居住者在某一热环境下的舒适程度。

2.2 人体工作效率研究

研究者指出,一些生理学指标有可能也反映了受试者此时的工作效率。Naoe Nishihara 等人指出,使用近红外光谱仪测量脑血流量可以反映人脑的活跃程度和脑力劳动程度,脑血流量可以用来评价人们对于工作的心理需求^[14]。此外,Hitomi Tsutsumi 等人研究发现受试者的眼睛泪膜破裂时间(break up time)越短,受试者的工作效率越低^[15]。Hansen 等人研究得出,在工作记忆力测试和连续的能力测试中,HRV 指标高的人群比 HRV 指标较低的人群有更高的正确率和更快的反应速度^[16]。

目前这些成果给出了生理指标与工作效率的定性关系,可以通过工作过程的生理参数前后对比来判断受试者的工作效率是否下降。

2.3 人体健康研究

热环境与人体健康的研究主要是探索热环境条件下机体的生理、生化表现,揭示热环境对机体的健康影响,认识热应激过程中机体自我调节规律,以指导人们科学地安排各项生产和生活活动,采取相应的保护措施,避免热环境对机体的负面影响^[17]。

吕志忠通过环境热强度与人体热紧张指标(肛温、心率与出汗率)的关系,得出了不同热强度与不

同劳动强度下军人安全的劳动时限^[18]。虞学军等人模拟了飞行员在座舱内的呼吸功能、循环功能和脑电波来判定人体的功能水平是否达到耐受上限^[19]。另一方面,研究者还调查了人们在空调环境下的健康状况。2000 年及 2001 年夏季,中国疾病预防控制中心分别对江苏省及上海市进行了“使用空调对健康影响”的流行病学调查。结果发现:使用空调人群中各种不适应症状(包括神经和精神类不适感、消化系统类不适感、呼吸系统类不适感和皮肤黏膜类不适感等)的发生率均高于不使用空调人群,且特别明显地表现在暑期“伤风/咳嗽/流鼻涕”症状的发生率上,使用空调的人群对热的耐受力较不使用空调人群差;缺乏热适应经历的人群在注意力、反应速度、视觉记忆和抽象思维方面均表现较差^[20-21]。

此外,在热环境对人体健康影响的研究上,热应激蛋白(heating stress proteins, HSP)受到了广泛的关注。热应激蛋白是一种保护机体的蛋白,当机体受到热刺激后会发生热应激反应,此反应的主要特点是选择性合成一组多肽——热应激蛋白^[22]。因此,研究者指出 HSP 可能与热耐力有关。张国高等人用纯化的热应激蛋白 70(HSP70, 即分子质量约为 66~78 ku 的热应激蛋白,其在热应激中水平升高最显著,作用也最大)作为抗原检测人群的 HSP70 抗体水平,在 22 名高温作业工人中有 4 名检测结果为血清强阳性,而 22 名非高温作业的志愿者中,仅有 1 例显示为弱阳性^[23]。王自正等人通过对照组实验,探讨了 HSP70 在高温中暑发生的病理过程中的水平变化,结果表明 HSP70 水平量的下降对中暑发生发挥了重要作用^[24]。

3 讨论与分析

3.1 关于用生理指标来评价人体热舒适

尽管根据现有的文献调研,人们在舒适度不同的情况下,有些生理指标是有差异的,但有学者提出通过生理指标测试来建立热舒适的客观评价模型,以代替现有的依靠主观投票建立热舒适评价模型,这种方法有待商榷。值得肯定的是,在热舒适实验中引入生理参数测试,为热舒适和热感觉的机理研究提供了途径。热舒适研究的最终目标是建立“热环境参数-热舒适”之间的关系,从而指导人们创造舒适健康的热环境。但如果探索生理参数

的目标是以生理参数为中间变量,通过建立“热环境-生理参数”关系以及“生理参数-热舒适”关系,最终建立“热环境-热舒适”评价模型,则比直接建立“热环境-热舒适”的评价模型更为复杂和困难,牵涉的中间不确定性因素更多,引入更多误差,其结果更会遭到质疑。因为:

1) 尽管现在生理测试技术比较发达,但是用生理测试手段替代主观问卷,其操作上更为繁杂,成本也高了很多,再加上生理测试需要在受试者的身上布置测点或探头,必然会对受试者的心理产生一定的影响,从而影响其真实的舒适性;此外,有的生理参数如脑电波对非热环境参数的响应更加敏感和强烈,因此难以保证其结果的参考价值。

2) 由于个体存在差异性,个体的生理参数必然存在差异性,生理测试结果也存在一定的离散度,因此在研究过程中生理测试同主观问卷调查一样需要大样本量,且获得的难度更大。更困难的是生理指标的变化远不如主观投票敏感,即当 PMV 从 1.5 变到 -1.5 时,人的热感觉变化已经非常明显,但由于人体存在自我调节能力,生理指标的变化却并不显著,甚至会在仪表的测量误差范围之内。因此这种客观研究人体热舒适的方法并不一定比主观问卷调查更为优越。

3) 从以生理参数为中间变量建立热舒适客观评价模型的研究路线来看,整个模型的建立过程还是离不开主观问卷调查(“生理参数-热舒适”),那为何不直接沿用传统的热舒适主观调查法,在现有的评价模型(如 PMV 模型,它在预测中性温度范围内的人体热感觉时还是比较准确的,只是在偏离舒适区外有一定的偏差)上进行修正呢?

4) 如果已有“热环境-生理参数-热舒适”客观评价模型,应用该模型于某一热环境时,若根据生理参数判定居住者在此环境下是舒适的,但他表述的真实感受却是不舒适,那我们究竟应该坚持生理模型的判定结果,还是认可居住者的主观热感觉呢?这与医学诊断中常出现的不确定性问题是一致的。

在应用通过调查问卷统计得出的“热环境-热舒适”评价模型时,只需要掌握热环境参数,知道在这套参数下,有多大比例的人感到舒适和不舒适,就达到应用的目的了。相比之下,“热环境-生理参数-热舒适”客观评价模型除了增加获得参数的复杂性以外,其优势又何在呢?

综上所述,由于热舒适研究的目标是要掌握“热环境-热感觉”的关系,因此生理参数只是一个中间变量。从研究的方法论来说,探索生理指标变化的目的并非在于通过生理参数来确定人体是否舒适,而在于揭示人体对热环境的反应机理及其生理调节规律,以合理解释主观问卷统计得出的关联规律,使其更加可信。因此,更可靠的热舒适研究方法还是应该以主观问卷投票为主,用投票统计确定定量关系,用生理测试作定性分析。

3.2 关于用生理指标来评价工作效率

在以往的工作效率研究中,研究者主要是通过打字、心算等模拟办公任务或某项特定任务来探讨热环境与人体工作效率的关系。由于个人精神状态的好坏与其工作效率有很大关系,而人的精神状态又可以通过反映人的精神状况的生理指标客观反映。如 Kwok Wai Tham 等人通过研究发现,唾液淀粉酵素能反映神经系统的兴奋程度,从而反映大脑对不同注意力工作的偏好程度^[25]。再者,工作效率的高低往往是难以主观描述的,无法通过主观问卷得到答案。另外由于测试的时间有限,热环境对实际工作效果的影响可能很难从短期测试中明确看出来。例如,受试者已经开始疲劳,但工作效率却暂时还没有下降,这种疲劳现象有可能可以从生理参数中反映出来。Naoe Nishihara 等人的研究就发现了这样的问题^[14]。这就需要一方面考察人们的实际工作效果,另一方面进行生理测试。因此,仅仅通过人们的工作表现来评价热环境对人们工作效率的影响是很困难的,还需要结合生理测试,才能更客观、综合地评价热环境与工作效率的关系。

3.3 关于用生理指标来评价人体长期健康

人体是否处于一种健康状态,仅仅依靠自身主观的描述往往是不准确的,通常需要依靠生理指标测试来给予准确判断。因此要评价热环境下人体长期的健康程度就必须对受试者的生理指标进行定量研究。

随着近几年来稳态空调的不足越来越显著,人们对营造亲近自然的动态室内环境的追求越来越强烈。迄今为止,已有一些学者采用生理学实验的方法针对短期动态热环境下人体的热反应进行研究。中国疾病预防控制中心的探索就说明热适应及其对健康的影响是有可能通过生理参数测试得

到揭示的^[20]。但动态热环境与稳态热环境对人体的生理反应、调节规律的长期影响有什么不同,目前还没有定论;长期处于动态热环境是否有利于保持人体的免疫力或热适应力,是否有利于人体的身心健康,这都需要结合生理参数的测试才能给出可信的答案,这将会为今后是否应该采用动态空调控制手段来替代现有的稳态空调控制研究提供理论基础。

4 结论

综上所述,生理指标在工作效率、人体长期健康的评价上有重要的价值,但在热舒适的评价上,若抛开主观投票来建立基于生理指标的客观评价体系,是很难有真正意义上的突破的。因此,在今后的人体热舒适、工作效率、长期健康评价研究中,可以结合生理参数测试,从以下 3 个技术路线出发:

1) 在人体热舒适的评价研究中,主观投票依然是主要的定量研究方法,生理指标(如皮肤温度、出汗率,HRV 等)测试可作为辅助的定性分析研究方法。

2) 在人体工作效率的评价研究中,生理指标(如脑电波、脑血流量等反映人们精神状况的指标)测试可以作为定量研究方法的一种,与测试人员工作效率的实验并重。

3) 在人体长期健康的评价研究中,生理指标(如 HSP)测试可作为主要的定量研究方法,询问受试者的健康感受一类的问卷调查可作为辅助判断的研究方法。

参考文献:

- [1] 戴自祝. 室内空气质量与通风空调[J]. 中国卫生工程学, 2002, 1(1): 54-56
- [2] 上海第一医学院. 人体生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1976
- [3] 麦金太尔 D A. 室内气候[M]. 龙惟定, 殷平, 夏清, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1988
- [4] Gagge A P, Stolwijk J A J, Hardy J D. Comfort and thermal sensations and associate physiological responses at various ambient temperatures [J]. Environment Research, 1967, 1(1): 1-20
- [5] 张国高. 高温生理与卫生[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- [6] Fanger P O. Thermal comfort [M]. Malabar F L: Robert E Krieger Publishing Company, 1982
- [7] ASHRAE. ASHRAE handbook—fundamentals [M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2001
- [8] Kazuyuki Kanosue, Norihiro Sadato, Tomohisa Okada, et al. Brain activation during whole body cooling in humans studied with functional magnetic resonance imaging [J]. Neuroscience Letters, 2002, 329(2): 157-160
- [9] 徐小林. 重庆夏季室内热环境对人体生理指标及热舒适的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005
- [10] 吴婧. 室内空气流速与人体舒适及生理应激关系研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005
- [11] 罗明智. 室内空气流速对人体生理指标及热舒适性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005
- [12] Yao Ye, Lian Zhiwei, Liu Weiwei, et al. Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures [J]. Physiology & Behavior, 2008, 93(1/2): 310-321
- [13] Liu Weiwei, Lian Zhiwei, Liu Yuanmou. Heart rate variability at different thermal comfort levels [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 103(3): 361-366
- [14] Naoe Nishihara, Shinichi Tanabe. Monitoring cerebral blood flow for objective evaluation of relationship productivity thermal environment [C]// Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007). Sendai, Japan, 2007
- [15] Hitomi Tsutsumi, Yoshitaka Hoda, Shinichi Tanabe, et al. Subjective eye comfort and performance under the different combination of humidity, local air velocity and illuminance [C]// Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007). Sendai, Japan, 2007
- [16] Hansen A L, Johnsen B H, Thayer J F. Vagal influence on working memory and attention [J]. International Journal of Psychophysiology, 2003, 48(3): 263-274
- [17] 李百战, 吴婧, 郑洁. 基于生理-心理学的热舒适和热健康探讨[J]. 制冷与空调, 2005(增刊): 154-157
- [18] 吕志忠. 湿热环境中军人劳动耐受时限的研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2000, 18(6): 336-338
- [19] 虞学军, 贾司光, 陈景山. 复合因素作用下人体功能状态的评价[J]. 航天医学与医学工程, 1991, 4(3): 185-191
- [20] 尚琪, 戴自祝, 贝品联, 等. 夏季空调室内热环境与人群不适综合症状的调查和研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 1-7
- [21] 谭琳琳, 戴自祝, 刘颖. 空调环境对人体热感觉和神经行为功能的影响[J]. 中国卫生工程学, 2003, 2(4): 193-195
- [22] Getting M J, Sambrook J. Protein folding in the cell [J]. Nature, 1992, 355: 33-45
- [23] 张国高, 贺涵贞, 吴扬, 等. 职业卫生中热休克蛋白的研究[J]. 基础医学与临床, 1995, 15(2): 7-10
- [24] 王自正, 茅志成, 王长来, 等. 高温中暑病人血浆中热应激蛋白(HSP70)及其抗体水平的观察研究[J]. 中国急救医学, 1999, 19(8): 465-467
- [25] Kwok Wai Tham, Henry Cahyadi Willem. Room air temperature affects occupants' physiology perceptions and mental alertness [J]. Building and Environment, 2010, 45(1): 40-44