

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-645-11

# 室内气流对人体热舒适影响的研究进展及展望

杨文骁<sup>1</sup> 刘煜<sup>2,3</sup> 兰丽<sup>4</sup> 王芳<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094;

2. 空调设备及系统运行节能国家重点实验室 珠海 517907;

3. 广东省制冷设备节能环保技术企业重点实验室 珠海 517907;

4. 上海交通大学设计学院建筑学系 上海 200240)

**【摘要】** 分析了室内气流对热舒适影响的相关实验研究, 讨论了与热舒适相关的参数, 总结了室内气流对热舒适的影响, 并基于气流对人体生理指标的影响, 探讨了室内气流影响热舒适的机理。国内外大量研究讨论了不同室内气流参数对人员的健康及热舒适的影响, 这些研究表明气流参数对热舒适有显著影响, 且这种影响具有两面性: 合理控制气流参数是保证热舒适的关键。气流参数影响热舒适的机理可从物理、生理及心理三方面总结。生理指标可以有效反映热舒适水平, 未来研究应该增加更多的生理指标, 通过室内气流对人体各项生理指标的影响来探究室内气流对热舒适的影响。现阶段的研究多关注夏季工况, 而冬季气流对热舒适的影响也应是未来的重要方向。可为后续气流与热舒适相关的实验及研究提供参考依据和思路。

**【关键词】** 热舒适; 室内气流; 生理指标

中图分类号 TU-023 文献标识码 A

## Research of the Effects of Indoor Airflow on Thermal Comfort: Progress and Prospect

Yang Wenxiao<sup>1</sup> Liu Yu<sup>2,3</sup> Lan Li<sup>4</sup> Wang Fang<sup>1</sup>

(1.School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094;

2.State Key Laboratory of Air Conditioning Equipment and System Energy Conservation, Zhuhai, 517907;

3.Guangdong Key Laboratory of Refrigeration Equipment and Energy Conservation Technology, Zhuhai, 517907;

4.Department of Architecture, School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)

**【Abstract】** This paper analyzes the experimental research on the effects of indoor air flow on thermal comfort, discusses the parameters related to thermal comfort, summarizes the effects of indoor air flow on thermal comfort, and discusses the mechanism of indoor air flow affecting thermal comfort based on the effects of airflow on physiological indicators of human body. Lots of domestic and foreign studies have discussed the impact of different indoor airflow parameters on the health and thermal comfort. These studies show that airflow parameters have a significant effect on thermal comfort, which has two sides, so reasonable control of air flow parameters is the key to ensure thermal comfort. The mechanism of airflow parameters affecting thermal comfort can be summarized from physical, physiological and psychological aspects. Physiological indicators can effectively reflect the level of thermal comfort. Future research could add more physiological indicators, and explore the effect of indoor airflow on thermal

基金项目: 空调设备及系统运行节能国家重点实验室开放基金 (ACSKL2018KT04); 国家自然科学基金 (51778359)

作者简介: 杨文骁 (1997.01-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1120729858@qq.com

通信作者: 刘煜 (1978.03-), 女, 高级工程师, 硕士, E-mail: sunnyrain\_ly@hotmail.com

收稿日期: 2021-03-11

comfort through the influence of indoor airflow on various physiological indicators of the human body. At present, the research pays more attention to the summer conditions, and the influence of winter airflow on thermal comfort should also be an important direction for future research. This paper could provide reference and ideas for subsequent experiments and research related to airflow and thermal comfort.

**【Keywords】** thermal comfort; indoor airflow; physiological indicators

## 0 引言

热舒适研究具有复杂且多学科交叉的特点。为了对人员的热舒适进行预测及评价，以 Fanger 为代表的众多学者提出了各类热舒适模型。其中 PMV 模型由 Fanger 在 20 世纪 70 年代提出<sup>[1]</sup>，后续在世界各地的暖通空调系统研究中得到了广泛应用。影响热舒适因素多种多样，除了室内环境参数外，热舒适也与人员的生理参数、心理因素和人群喜好<sup>[2]</sup>密切相关。室内气流是影响热舒适的一个重要因素。空调室内气流参数设计不合理不仅会导致人员热舒适性降低，而且还会影响工作效率和身心健康，同时还会导致设备初投资和运行费用的增加<sup>[2]</sup>。反之如果正确利用室内的气流或更好地控制气流参数，便可以为建筑物提供可接受的室内空气质量和热舒适条件，同时合理地降低建筑能耗。不

同的气流参数，如温度、风速、紊流度都对室内环境的热舒适水平有显著影响，在影响的过程中人体生理指标也会随之改变。生理参数的改变客观地反映了人员的热舒适水平，同时各生理参数也是评价热舒适的重要指标<sup>[4]</sup>。因此有必要对室内气流与热舒适相关的研究进行总结从而更好地对相关课题的开展提供参考，为优化室内气流和相关产品的研发提供依据，同时也为今后关于气流对热舒适影响的研究提供思路。本文以室内气流参数（风速、紊流度、吹风角度、风向等）、热舒适（热舒适、热感觉、热偏好等）、生理指标（体温、皮温、脉搏、出汗程度、神经反应等）为关键词对相关文献进行了检索，总结了室内气流对热舒适的影响，并从人体生理指标变化的角度分析其影响的内在机理。思路如图 1 所示。

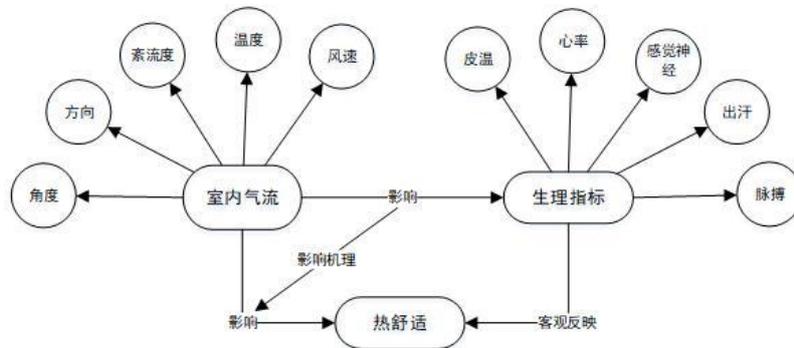


图 1 思路图

Fig.1 The mind map of the paper

## 1 与热舒适相关的室内气流参数、人体生理指标

### 1.1 室内气流相关的参数

风是指由于大气压差引起的大气水平方向的运动。风既有大小，又有方向，因此风向和风速是描述风特征的两个要素。

风速，是指空气相对于地球某一固定地点的运动速率，其定义为单位时间内空气在水平方向上的流动距离，其单位为 m/s 或 km/h。空气流速的大

小对人体对流换热有很大影响，室内造成空气流动的原因一般包括：静坐时人体周围空气的自然对流，空气本身的自然或受迫对流，人体活动时与静止空气发生的相对流动等<sup>[6]</sup>。

紊流度，又称湍流强度，是度量气流速度脉动程度的一种标准。通常以脉动流速的均方根与相应时均流速的比值来反映紊动强弱。紊流度对人体表面的换热系数有影响。

风向，自然界中常用东南西北四个方向代表风

向。而室内环境的研究中风向常选用参考物进行代表。例如对于人体来说, 风向主要有 5 种: 坐着和站立时, 有迎面风、背面风和侧面风, 水平躺着时, 有从头到脚的风和从脚到头的风。

## 1.2 与人体热舒适相关的生理指标

**皮肤温度及皮温变化率。**人体皮肤温度是反映人体冷热应激程度和人体与环境之间热交换状态的一个重要生理参数。人体各部位的温度不同, 头部较高, 足部较低。决定皮肤温度高低的主要因素有局部血流量和肌肉强度、人体表面几何形状及皮肤、服装、环境之间的热交换的速度等等, 此外, 皮肤温度还与皮下脂肪厚度有关。皮肤血管舒张和收缩都会引起皮肤温度的改变。皮肤温度反映了动脉的功能状态, 随着动脉血管的舒张, 皮肤血流增加, 皮肤温度升高; 反之, 则皮肤温度下降。在进入较冷或较热的环境时, 人可以通过皮肤温度与血流速度的变化, 来保持体内的热平衡, 而维持舒适的平均皮肤温度是保证人体热舒适的首要条件。平均皮肤温度是反映人体对冷刺激或热刺激的反应以及人体与热环境之间热交换状态的重要生理参数<sup>[7]</sup>。现有的研究也表明, 人体皮肤温度与热舒适以及热感觉有着密切的联系<sup>[8]</sup>。

**心率及心率变异性。**心率, 顾名思义指人每分钟心跳次数。心电, 即心肌细胞的生物电变化, 是整个心脏的肌细胞从兴奋的产生、传导到恢复过程中生物综合变化的反映。心电图的研究通常关注两个量: 心率(Heart Rate, HR) 和心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)。逐次心跳间期的心率值有一定微小的差异, 这是由于神经体液因素对心血管系统的调节作用, 而在均值附近呈现出周期性的波动即称为心率变异性。其产生的主要原因是心脏窦房结自律活动通过交感和迷走(副交感)神经、神

经中枢、压力反射和呼吸活动等因素的调节作用, 使得心脏每搏间期一般存在几十毫秒的差异。总之, 心率变异性的生理学基础归因于交感、迷走神经系统, 其中迷走神经对心率变异性起着主要的决定作用<sup>[9]</sup>。根据心电图信号可计算出的心率变异性的两个指标: 高频分量(HF), 可反映与副交感神经有关的迷走神经活动; 低频分量和高频分量的比率(LF/HF), 可用于估计交感神经活动。

**人体脉搏。**脉搏即为人体可触摸到的动脉搏动。动脉为富有弹性的结缔组织与肌肉所形成管路。当大量血液进入动脉将使动脉压力变大而使管径扩张, 在体表较浅处动脉即可感受到此扩张, 即为脉搏。脉搏是一种简单而灵敏的指标, 它反映环境温度对机体所造成的热负担大小以及心血管系统紧张的程度。

**出汗程度。**即时人体皮肤表面的出汗量。出汗量不仅包括人体皮肤表面蒸发的汗液, 也包括皮肤表面流淌汗液以及服装内聚集的水分。出汗量也是评价人体在高温环境下生理紧张的一项指标, 从生理及心理角度也会对人体热舒适造成影响。

## 2 有关室内气流参数对热舒适影响的研究

关于室内气流对人体热舒适的影响, 已有大量的研究成果表明不同的气流参数对人体热舒适有不同的影响。温度、风速与紊流度等作为气流的重要参数, 每个参数水平的改变都对人体热舒适有不同影响。本章以温度、风速、紊流度、送风方向、送风角度这些气流参数以及热舒适为关键词选取了有关室内气流对热舒适影响的相关研究, 对其研究成果进行总结的同时也提出对室内气流参数进行控制以及从设计方面进行改进的建议, 选取的研究如表 1 所示。

表 1 气流参数对热舒适的影响

Table 1 The effects of airflow parameters on thermal comfort

研究者	研究参数	结论
Sekhar S C <sup>[10]</sup>	温度	炎热潮湿气候时, 空调建筑中存在过度制冷的问题, 这往往是由于系统设计和运行的缺陷造成
郭玉润等 <sup>[11]</sup>	风速	夜间通风可以明显改善室内热环境, 同时可以减少空调的负荷
Zhang H <sup>[12]</sup>	风速、温度	在中性-偏暖的区间内, 大多数的人员希望有更多的空气运动
Zhang H 等 <sup>[13]</sup>	风速	更多的空气运动, 可以显著改善室内感知空气质量
Arens E 等 <sup>[14]</sup>	风速	在中性及温暖的环境中, 人们想要更多的空气流动, 更合理的气流设计有助于室内空调系统的设计

续表 1 气流参数对热舒适的影响

研究者	研究参数	结论
端木琳等 <sup>[15]</sup>	风速、温度	使用局部送风的形式可以降低工作区的温度,适当提高工作区的风速,可以改善人体热感觉
Yongchao Zhai 等 <sup>[16]</sup>	风速	提高气流可以有效降低运动人员的皮肤表面温湿度,并且比降低室温更快地达到中性热感觉
崔惟霖等 <sup>[17]</sup>	风速、温度	偏暖或者热环境中,一定风速可以抵消温度升高的影响
谈美兰 <sup>[18]</sup>	风速、温度	风速可以有效的降低人体的热感觉,风速的提高同时可使得人的可接受温度上限提高
徐小林 <sup>[19]</sup>	风速、温度	夏季环境下,加大风速可以减少高温带来的不适,室温升高也可以减弱气流加大带来的吹风感
周俊彦 <sup>[20-21]</sup>	风速、温度	风速可以抵消一些温度升高的影响,但超过一定范围后作用减弱甚至起反作用
谈美兰等 <sup>[22]</sup>	风速、温度	增加空气的流动可以改善室内热环境提高舒适度,但风速过大或吹风时间过长会引发不适
Toftum J <sup>[23]</sup>	风速	高温环境下,久坐的室内人员的热感觉为中性或凉爽时,低速的空气运动也有可能造成不可接受的吹风感
陈良 <sup>[24]</sup>	风速、温度	冬季环境下,空气流速会对人体热感觉及气流感觉造成明显影响;夏季吹风给人带来气流感觉的同时也会造成不适感
Palonen J 等 <sup>[25]</sup>	风速、温度	吹风感产生的主要决定因素可能是空气温度,当温度低于 22℃ 时产生吹风感比例更高
Toftum J 等 <sup>[26]</sup>	风速、温度	风速相同时,与热感觉较接近中性的人相比,热感觉为凉爽的人感受到的吹风不适感更多
Toftum J 等 <sup>[27]</sup>	风速	与较低的活动水平相比,在较高的活动水平下进行工作可以减少吹风感
黄志超 <sup>[28]</sup>	温度	适当的温度变化相较于稳态舒适环境有助于提高人员工作效率
朱颖心 <sup>[29]</sup>	温度	人们应该追求适当的可接受的温度变化的环境
Zhu Y <sup>[30]</sup>	温度	稳定的室内热环境不是我们构建建筑环境的最终目标,具有某些自然特征的动态热环境可能更适合人体
朱守林等 <sup>[31]</sup>	模拟自然风	模拟自然风的热舒适评价明显高于机械风和普通模拟风
贾庆贤等 <sup>[32]</sup>	频谱、模拟自然风	接近自然风频谱的机械风能带来更好的舒适度
Zhao R 等 <sup>[33]</sup>	模拟自然风	模拟自然风可以抵消高温空气并稍微改善人们的感知空气质量,同时节省能源
罗茂辉等 <sup>[34]</sup>	紊流度、风速	28℃ 及 30℃ 时均可适当调高气流速度来满足人的热舒适需求;仿自然风的热舒适比机械风更好
王亦然等 <sup>[35]</sup>	紊流度	采用过大的湍流强度会引发人体的不适
夏一哉等 <sup>[36]</sup>	紊流度	冷到中性环境下,紊流度增加会引发吹风感,中性到热环境下,紊流度增加则可以减少吹风感
Griefahn B 等 <sup>[37]</sup>	紊流度、风速	由气流引起的吹风感不适会随着气流速度与紊流度的增大而增加。为保证较少的人产生吹风感,风速和紊流度必须保持在一定水平以下
翟永超 <sup>[38]</sup>	吹风方式	风扇固定吹风改善热舒适的效果略优于摇摆吹风
张继刚 <sup>[39]</sup>	送风角度	导风板的旋转角度和送风速度对于室内温度的降低及升高速度有较大的影响
孙永丽 <sup>[40]</sup>	送风角度	不同送风形式的风口均存在一个合理且有利于热舒适的送风角度
李杨 <sup>[41]</sup>	送风角度	距离空调较近的工位有强烈的吹风感,房间内工位的满意率为 50%。通过将送风角度调至向上 60° 时工位的满意率达到 100%

## 2.1 风速、温度对热舒适的影响

风速和温度是两个重要的室内气流参数,对热舒适都有不同程度的影响。因此控制温度和风速都是使室内人员感到舒适的重要手段。而室内环境的风速水平在建筑设计时都需要遵循标准的限制,这样的设计虽能保证室内人员热舒适的平均水平,但是也会极大地增加空调系统的能耗,造成了相当一部分能源的浪费。

夏季制冷时如果将气流限制在较低水平,则必须通过增加空调设备的制冷负荷的方式来满足人员的需求,而有研究表明位于炎热潮湿气候地区中的空调建筑时常有过冷的情况发生, Sekhar S C 认为这并不是人员的偏好问题,而是由于这样的建筑中的 HVAC 系统在设计和运行的过程中存在缺陷<sup>[10]</sup>。这样的空调系统在设计之初,依照相关标准的要求,需要将室内的平均风速限制在一个较低的水平,这样一来就只能提高空调设备的制冷功率,从而增加了设备的功耗。而在自然环境中气流运动是随处可见的,气流的运动并不可怕,重点应是如何更好地控制它来满足室内人员的需要。郭玉润等人<sup>[11]</sup>基于 Airpak 的研究结果表明在夏季夜间通风可以明显改善室内热环境,同时可以减少空调的负荷,而 Zhang H 等人<sup>[12]</sup>则探究了办公建筑中人员对气流运动的偏好情况,结果表明在中性-偏暖的温度区间,绝大多数人都希望有更多的气流运动,同时他也指出提供更多的空气运动,可以显著改善室内感知空气质量<sup>[13]</sup>。Arens E<sup>[14]</sup>针对温度与风速相关的标准进行了讨论,表明了在中性及温暖的环境中,大多数人想要更多的空气流动。而近年编写的此类室内环境设计标准中也增编了利用气流来补偿温升的部分,这将会有利于空调系统的设计优化。端木琳等人<sup>[15]</sup>使用了正对人体的局部送风设备来降低工作区的温度,并以此达到改善人体热感觉的目的。Yongchao Zhai 等人<sup>[16]</sup>使用了个性化送风来提高在夏季高温环境中运动过后的人员的舒适度,结果表明运动过后人员的皮肤温湿度很高,采用个人控制的气流不但可以有效降低人员皮肤温湿度来达到中性热感觉,同时这种采用气流降温的方式比直接降低室温更高效。这表明室内的气流无论是来源于自然环境还是空调系统亦或是局部送风,其都有提高并加以利用的空间,这样的措施可以满足人员热舒适需求的同时有效降低空调系统的能耗。

在室内温度偏高时,提高风速可以有效降低人的热感觉,从而使人感到更舒适。即使在具有相同热感觉的不同环境温度下,风速一定程度的提高可以抵消温度升高的影响,对改善热舒适是有益的<sup>[17]</sup>,此时提高风速不仅可以有效的降低人体的热感觉,同时还可使人员的可接受温度上限提高<sup>[18]</sup>。在徐小林<sup>[19]</sup>的研究中还表明加大风速可以减少高温带来的不适,同时室温的升高也可以减弱气流加大带来的吹风感,因此在夏季中性-偏暖的温度区间内,使用气流降温可进一步降低空调系统的能耗。因此可以看出提高风速来降低空调系统能耗的方式是有效的,这种方式同时可以保证甚至进一步提高人员的热舒适水平。

显然这种使用气流补偿温差的改进方式并不是无限度的,温度过低时如果采用的气流过大势必会造成人员的不舒适,因此也有许多研究指出了过度提高风速对室内人员的热舒适造成的不利影响。周俊彦等人<sup>[20,21]</sup>研究了满足人员热舒适的环境中风速和温度的最佳组合,结果表明风速可以抵消一些温度升高的影响,但超过一定范围后这种增强气流所达到的效果会减弱甚至起反作用。此时气流运动的大幅度增强会使室内人员产生吹风感,从而引发不适<sup>[22]</sup>。Toftum J 等人<sup>[23]</sup>的研究结果表明与较低的活动水平相比,在较高的活动水平下进行工作可以减少吹风感。而对于久坐的室内人员来说,即使热感觉为中性,低速的空气运动也有可能造成不可接受的吹风感<sup>[24]</sup>。Palonen J 等人<sup>[25]</sup>的研究表示吹风感产生的主要决定因素可能是空气温度,当温度低于 22℃ 时,超过 40% 的受试者抱怨有吹风感,而在温度超过 22℃ 的室内环境中,这一比例降至 11%。也就是说在风速相同的情况下,与热感觉较接近中性的人相比,热感觉为凉爽的人更容易感受到吹风感进而产生不适<sup>[26]</sup>。所以对于夏季来说,造成吹风感的原因可能是温度过低或者人员活动水平过低。在冬季环境下,空气流速对人体热感觉及气流感觉造成的影响则更加明显<sup>[27]</sup>,而在冬季供暖中探究气流对人员舒适的影响相关的研究较少。

总的来说,许多研究都表明了过度提高风速的不利影响,也证实了风速的提的确是有限的。虽然提高风速可以一定程度上降低空调系统能耗并且改善人员热舒适,但是如果在超出此限度后继续提高风速,不仅不会带来更舒适的室内热环境,

同时还会给室内人员造成了吹风感等诸多不适。而这种提高风速的限度与当前室内环境的温度密切相关,也就是说温度与风速二者的匹配十分重要。总体来讲,夏季制冷工况中越低的环境温度也就意味着室内人员所能接受的风速上限越低,同时也更容易因风速的加大而产生吹风感等不适;而冬季环境人对气流的敏感程度更高,更要严格控制气流运动的程度。所以针对不同的室内环境以及人员需求应采取不同的温度、风速,二者的良性配合才能够带来更好的室内环境舒适度。

相较于满足人员的舒适要求,人员的健康需求更为重要。室内空调环境是人为营造出的热环境,其趋近于稳态,而大自然中并不存在各项参数稳定不变的绝对稳态环境,所以室内空调环境与自然环境会有一定的差距。因此在保证了人员舒适度的情况下,室内环境对人体健康是否有利,也是我们应该关注的问题。黄志超等人<sup>[28]</sup>研究了温度渐变的环境对人体热反应及工作效率的影响,结果表明室内环境温度有一定变化更能提高人员的工作效率,其中偏冷环境下人员的工作效率最高,这是由于适当的冷刺激可以提高人员的工作效率。朱颖心<sup>[29]</sup>在对“舒适”与“热中性”环境能否给人体带来真正的舒适进行讨论时,表明过分追求中性及稳定的环境明显对人体健康是不利的,环境适当的变化才可以使人体产生适当的调节。建立稳定的室内热环境不应是我们构建建筑环境的最终目标,具有某些自然特征的动态热环境可能更适合人体<sup>[30]</sup>。对于大多数人来说,接近静态的舒适环境不一定意味着健康,而更健康的室内环境温度应处在具有一定波动的动态舒适区间内。

## 2.2 紊流度、气流频谱等参数对热舒适的影响

由空调设备提供的室内气流与自然风具有一定的区别,这种区别主要体现在紊流度和气流频谱上。因此室内气流的紊流度和频谱不同,势必也会对人体热舒适造成不同的影响。

模拟自然风是一种通过模拟紊流度与频谱的方式来得到的接近自然风的送风形式,此类送风形式的热舒适评价明显高于传统的机械风<sup>[31]</sup>。在贾庆贤等人<sup>[32]</sup>的研究中对比了自然风和机械风在频谱上的区别,以及其对舒适度的影响。研究结果表明在使用机械风模拟自然风时使用接近自然风的风速频谱可以获得较好的舒适度,也证明了风速频谱

是机械风模拟自然风的一项重要参数。Zhao R 等人<sup>[33]</sup>研究了高温环境下模拟自然风的作用,结果表明模拟自然风的空气运动可以抵消空气的高温并改善人们的感知空气质量。同时,通过有效地利用空气的瞬态流动,可以节省大量的空调系统能耗。自然风的舒适度和可接受程度均优于传统空调的机械风。因此我们可以通过模拟自然风的频谱来达到更好的舒适度,同时这种接近自然风的气流组织对人员健康也更有利。

紊流度对于热舒适的影响与风速类似,适当提高是有益的,同时也存在一定限度。罗茂辉等人<sup>[34]</sup>比较了仿自然风与稳态机械风对热舒适的影响,王亦然等人<sup>[35]</sup>研究了3种不同紊流度的模拟自然风对人员热舒适的影响。结果表明模拟自然风虽然相较于机械风可以获得更好的热舒适度,但如采用过大的紊流度会引发人体的不适,其中紊流度适中且变化较为平稳的模拟自然风对人体热舒适的改善效果最为理想。由此可以看出紊流度对人员热舒适的影响也十分显著,并且与风速类似的是,在偏冷至中性环境下,紊流度增加会引发吹风感不适,而中性至偏热环境下,紊流度的增加则可减少吹风感<sup>[36]</sup>,由气流引起的不适感也会随着风速和紊流度的增加而增加。Griefahn B<sup>[37]</sup>的研究结果则给出了具体数据,他指出为保证室内人员产生吹风感的人比例低于10%,平均风速应低于0.2m/s,同时紊流度必须保持在30%以下。以上研究都说明紊流度对于室内人员热舒适的影响也存在着一定限度,适当提高紊流度可以使气流组织更接近自然风从而提供更好的舒适度,但过大的紊流度也会造成人员产生吹风感从而引发不适。

风速和紊流度作为室内气流组织的重要参数,它们的水平都应是人为控制的重点,在调节二者水平的过程中是否会产生一些交互影响,也是未来值得研究的重要方向。总体来说,我们应尽可能地发挥它们对于室内环境舒适度的积极作用,同时应尽量避免其水平过高造成的负面影响,把这样的设计思路应用到室内空调系统的设计中可以更好地改善室内环境热舒适水平,同时能更大程度地降低空调系统能耗。

## 2.3 吹风方式、送风角度等对热舒适的影响

由于室内环境的设计目的和应用需求的不同,空调末端设备也有不同的送风形式,对于某一种送

风形式来说, 送风口采取不同的送风角度, 室内的气流分布也会因此发生改变, 这样的改变会影响到室内人员的舒适度。

翟永超<sup>[38]</sup>研究了不同的吹风方式对人体热舒适的影响, 结果表明固定吹风和摇摆吹风都能有效改善人员热舒适, 其中固定吹风的效果略优于摇摆吹风。张继刚<sup>[39]</sup>的研究表示对于壁挂式空调器而言, 导风板的旋转角度对于室内温度的升高和降低速度都有较大的影响。孙永丽<sup>[40]</sup>则研究了空调送风角度对室内舒适度的影响, 对于不同的送风设备最佳的送风角度均不同。因此可以看出, 合理的调节送风形式和角度也可以改善热舒适。李杨<sup>[41]</sup>的研究结果表明立柜式空调如采用水平角度送风, 距离空调较近的工位会有强烈的吹风感, 房间内工位的满意率仅为 50%。而通过调节此角度的方法, 将送风角度调至向上 60°时, 工位的满意率达到了 100%。

由上述的研究可以看出, 送风角度、送风方式等参数是空调气流环境的一个重要参数, 其对室内环境的热舒适有显著影响。我们应根据各类实际工

程中室内环境不同的布局、不同的使用场景、使用需求对这些参数的设计进行调整, 从而在满足人员热舒适的同时, 达到对气流利用的最大化, 从而最大程度发挥室内气流的节能潜力, 使得设计出的室内空调环境的能耗更低。

### 3 室内气流对人体生理指标的影响

通过监测人的生理指标可以直观地反映人体的变化, 也就间接地反映出所处环境是否健康舒适。现如今测量生理参数的仪器也愈发精准, 越来越多的研究证明使用人体生理参数作为热舒适的评价指标是有效的。例如皮肤温度、体温、心率等, 其都与人体热舒适有着密切联系, 对这些参数进行监测可以有效反映人体的热舒适水平。本章重点选取了上一章探讨的风速、紊流度等气流参数对人体各类生理参数的影响, 说明了气流参数对人体生理指标造成的影响或许是揭示室内气流影响人体热舒适机理的关键。选取的研究如表 2 所示。

表 2 气流参数对人体生理指标的影响

Table 2 The effects of airflow parameters on physiological indicator

研究者	对应气流参数	人体参数	结论
刘蔚巍 <sup>[7]</sup>	无	皮温	皮温可以作为一个合理可靠的评价热舒适的客观指标
吴婧 <sup>[42]</sup>	风速	脉搏、体温	夏季空气流速对人体脉搏影响显著, 冬季无影响; 夏季空气流速对人体体温影响显著, 冬季尚不明显
Guéritée 等 <sup>[43]</sup>	风速	体温	当空气流速增加时, 平均体温会下降。有风时的平均体温也低于无风时
王月梅 <sup>[44]</sup>	温度	皮温	局部皮肤温度随送风温度降低而降低, 原因是其对流换热加大
Wang Y 等 <sup>[45]</sup>	紊流度	皮温	局部皮肤温度随湍流强度的增加而下降
狄育慧等 <sup>[46]</sup>	风速	皮温	皮肤温度随风速增大而降低
谈美兰 <sup>[18]</sup>	风速	汗液	夏季偏热环境下, 风速对人体生理参数的影响与皮肤表面出汗程度有很大关系, 而皮肤出汗程度可以很好地反映人体热感觉状况
谈美兰等 <sup>[22]</sup>	风速	汗液	空气流动适当增加时, 可以提高皮肤表面换热系数, 同时可以加强皮肤表面汗液蒸发
廖桦浚 <sup>[47]</sup>	风速	鼻腔换热	鼻腔换热影响闷感的产生, 而闷感对总体舒适度影响显著
徐小林 <sup>[19]</sup>	风速	人体体温、心率	夏季室内环境下, 空气流速对人体体温与心率有显著性影响
罗明智 <sup>[48]</sup>	风速	体温、脉搏	低温下或高温下, 不同的风速对人体的体温具有非常显著性差异; 风速加大到一定程度, 脉搏明显减慢
陈良 <sup>[24]</sup>	持续吹风时间	MCV、SCV	持续吹风下, 人体的运动神经传导速度 (MCV)、感觉神经传导速度 (SCV) 呈下降趋势
Shan, Gao 等 <sup>[49]</sup>	吹风方向	无	不同吹风方向人体表面对流换热系数不同, 其中水平风大于垂直风, 水平风中正面风大于侧面风
朱颖心 <sup>[50]</sup>	紊流度	无	紊流度影响热舒适的物理、生理及心理机理
Zhou X 等 <sup>[51]</sup>	环境控制能力	心理因素	受试者对自己控制热环境的能力的认识也可以改善他们的舒适度, 这种改进完全是由于心理因素造成的

风速作为气流组织的重要指标,对人体热舒适有显著影响,而不同人对于风速的敏感程度也不同,这也造成了其对人体生理参数有各种各样的影响。例如人体皮温可以作为一个合理可靠的评价热舒适的客观指标<sup>[7]</sup>,体温、皮温都是决定人体热舒适水平的重要指标。有大量研究都表明空气流速对人体温度以及皮肤温度的影响十分显著,这或许就是揭示室内气流影响热舒适内在机理的关键。

夏季环境下空气流速对人体体温的影响十分显著<sup>[42]</sup>,空气流速的增加会造成平均体温的下降,有风的情况下人的平均体温普遍低于无风的情况<sup>[43]</sup>。王月梅<sup>[44]</sup>使用了局部送风探究其对局部皮肤温度影响,结果表明局部皮肤温度会因送风温度的降低而降低,主要原因就是送风温度越低,身体局部与环境之间的对流换热量就越大。皮肤温度也会随着紊流度的增加而下降,同时随着皮肤温度下降,产生吹风感不适的可能越来越大<sup>[45]</sup>,另外狄育慧等人的<sup>[46]</sup>的研究也表明皮肤温度随风速增大而降低。由此可以看出风速、紊流度对人体生理指标有显著影响,气流运动的增强会造成人体温度、皮肤温度的下降,而皮肤温度则是评价热舒适的重要指标,因此这种影响必定也会进一步反映到人体热舒适水平上。

而气流对人体生理参数的影响以及对热舒适的影响不止停留在体温和皮肤温度上,也有人作出了其他解释。谈美兰<sup>[18]</sup>对夏季空气湿度与风速对人体热舒适影响及作用机理进行了探究,在她的实验中通过分析发现了平均皮肤温度与人体热感觉无一致关系,而皮肤出汗程度的投票值与人体热感觉的对应关系较好,可以更好反映人体的热感觉。原因是当人体表面附近的空气流动适当地增加时,可以提高皮肤表面换热系数,从而加强皮肤表面汗液蒸发,降低人体热感觉达到更好的舒适度<sup>[22]</sup>。这说明风速对热舒适的影响,可能是由于其对人体表面的出汗程度产生的影响造成的。廖桦浚<sup>[47]</sup>在他的研究中为了改善传统热暴露实验中气流同时与人体表面及鼻腔换热的干扰,采用了呼吸面罩来隔离这一影响。结果表明吸入鼻腔空气的风速会影响PAQ、气味、闷感从而影响主观空气的评价,进一步影响总体的舒适度,其中闷感对于总体舒适度的影响最大。而闷感是由身体和鼻腔共同感知的,风速增加可以通过这两种渠道共同改善闷感,从而改

善整体舒适度。由此得出,气流参数的变化不仅影响人体皮温和体温,也会影响出汗程度、主观感觉如闷感这些参数指标,而这些指标都与人体热舒适密切相关。还有更多的研究也表明气流对于人体的各类生理指标均有影响。徐小林<sup>[49]</sup>研究了夏季室内热环境对人体生理指标的影响,结果表明夏季室内的空气流速对人体体温及心率均有显著性影响。罗明智<sup>[48]</sup>研究了室内空气流速对人体生理指标的影响,结果表明低温或高温条件下,不同的室内空气流速对人体体温有显著性差异,同时风速加大到一定程度时,人体脉搏明显减慢。而脉搏作为反映人体紧张程度的指标,也会对人体热舒适产生心理上的影响。陈良<sup>[24]</sup>研究了室内热湿环境对人体生理指标的影响,结果表明持续吹风的条件下,人体的运动神经传导速度(MCV)、感觉神经传导速度(SCV)均呈下降趋势,这些人员神经系统的指标就更好地印证了这一点。

由此看来,气流影响的生理指标复杂且多样,气流影响热舒适的机理也就更为复杂,未来在热舒适的相关研究中应建立更完善更丰富的生理评价指标或模型,进一步与医学领域进行交叉研究,以此来全面地揭示室内气流乃至其他变量对人体热舒适的影响机理。

#### 4 室内气流影响热舒适的作用机理

气流参数的变化,在物理角度会对客观参数造成影响,也会对人体生理指标造成影响。同时也有研究表明这些影响不止停留在客观层面,参数的变化也会对人的主观心理造成影响,而热舒适的评价指标不仅包括客观因素也包含大量主观心理因素。现阶段的研究主要将气流影响热舒适的机理分为几个方面:

物理层面上,不同的吹风方向会影响人体表面的对流传热系数。在坐姿与站立情况下,水平方向的对流换热系数均大于垂直方向,而在水平方向中,正面气流的对流换热系数大于侧面气流<sup>[49]</sup>。换热系数的改变直接影响人体表面的换热量,进而使人的热感觉发生了改变。朱颖心<sup>[50]</sup>也指出,从物理层面出发,气流紊流度增加,人体皮肤对流传热系数增加,从而导致了対流换热量的增加。

例如紊流度的增加,会使人们会感到更凉快或产生更强的吹风感。这其中的原因不止存在于物理

客观层面,也存在于生理、心理层面:随着紊流度的增加,导致皮肤温度产生脉动,冷感受器发出报警信号,传输至大脑,进而产生了吹风感。

心理层面上,感受到环境更受控也是一个重要原因。Zhou X 等人<sup>[5]</sup>也研究了受试者在对环境的控制力不同的情况下,受试者热感觉及热舒适的变化,结果表明受试者在已知自己对热环境具有控制能力时,热舒适度更好,这种改进完全是由于心理因素造成的。

以上的研究成果说明室内气流的变化在主、客观上都影响着人体热舒适,所以为进一步揭示气流影响人体热舒适的机理及内在原因,完善各类生理指标对人体热舒适影响的评价机制及模型是未来研究的重要方向,同时我们也应从主、客观两方面同时考虑气流或者其他因素对热舒适的影响。

## 5 讨论

风速、紊流度作为室内气流的重要参数,对人员的热舒适均有显著影响。在环境中性-偏暖空调系统为制冷工况时,适当提高风速或紊流度都可以抵消温度升高的影响,但过高的风速及紊流度都会引起吹风感不适。也就说明风速和紊流度作为气流组织的重要指标,对热舒适的改善效果均存在一定限度,在不超出这种限度的情况下适当提升其水平均可以对人体热舒适造成积极影响,如此一类的改善手段可以节省大量的空调设备能耗。对于人员的健康而言,相较于一成不变的稳态室内环境温度,动态变化的室内环境温度对人员的健康及热舒适更为有益。同时在中性-偏冷的环境中适当的冷刺激可以使人员保持较高的工作效率。由此看来更好地控制气流参数,使其能够保证人员的热舒适,不仅能够降低空调设备的能耗,也能让室内环境温度有一定的调整空间,使其对人员的健康更有益。

现有的有关利用室内气流来改善热舒适的研究,大多集中在夏季或偏热环境的制冷工况下,这种环境下提高气流强度来改善人员热舒适确实还存在一定的空间。而冬季或空调设备处于供暖工况时,室内人员对气流的敏感程度更高,气流对人员热舒适的影响更不容小视,应针对此类工况进行更多研究与测试。风速与紊流度水平的改变难以保证单一变化(当某一定点的风速产生变化时,紊流度可能随之改变),因此各项气流参数对热舒适造成

影响时,其中的交互影响仍有待探究。

室内气流影响人员热舒适的机理可从物理、生理和心理几方面概述。(1)物理角度来看,风速、紊流度的增加,会使人体皮肤表面对流换热系数增加,从而导致了对流换热量增加,影响了人体皮肤温度进而影响人员的热舒适。不同的吹风方向、送风方式也会影响人体表面对流换热系数,进而对人体热感觉、热舒适造成影响。(2)从生理角度来看,风速会对人体生理参数造成影响,进而影响人员的热舒适。风速对人体体温、皮肤温度、闷感、出汗程度、脉搏等生理参数均有显著影响。其中体温与皮温均会随着风速增大而降低;二者均是影响热舒适的重要生理指标;同时汗液的蒸发也随风速增大而加快,而出汗程度与人体热感觉对应关系较好。风速增大还会加强人鼻腔内的换热从而减少人员的闷感,闷感也是影响人员热舒适的重要指标;空气流速会显著影响人体脉搏,进而同时从生理、心理角度影响人员紧张的程度,对人体热舒适造成一定程度的影响。(3)从生理、心理角度结合来看,紊流度的增加,会导致皮肤温度产生脉动,冷感受器发出的报警信号传输至大脑,进而产生了吹风感,这些吹风感也会对人员的心理状态产生影响,使其产生紧张或不适,另外环境是否受控也是一个重要的心理原因。

生理指标作为反映人体热舒适的有效指标,其影响热舒适的内在机理更为复杂,其中涉及了更多的医学知识是建筑环境及热舒适相关领域研究所欠缺的。如能更好地结合二者领域的研究,对评价热舒适相关的生理指标进行丰富及完善,则能使其更好更准确地探究人体热舒适水平,从而制定更完善的评价指标及改善策略。

## 6 结论

(1)气流参数(风速、紊流度等)的变化对热舒适有显著影响,其影响具有两面性:中性-偏热工况下通过提高风速、紊流度水平来加强气流能够有效改善热舒适,但超过一定限度后均会造成不适感。因此合理控制并利用其变化是保证并改善热舒适的有效手段。

(2)室内气流影响热舒适的机理包括物理、生理及心理三方面:

物理角度上气流参数的变化会造成物理参数

的改变(如换热量的变化),直接影响人员的热感觉;

生理角度上气流参数变化会引起人体生理指标的变化,而这些生理指标的变化都会影响人体热舒适,同时一些生理指标也能够有效反映人体热舒适水平;

心理角度上气流的变化会使人员的心理产生变化(紧张程度、适应性等),心理因素也是评价热舒适的重要指标。

(3) 现阶段的研究多数是基于夏季偏热工况的实验得出,在冬季供暖工况下,室内气流对众多人体参数的影响效果不显著或尚不明确。冬季人体对于气流的敏感程度更高,意味着冬季室内气流环境的控制应更为严苛,这也是未来研究的重要方向之一。

(4) 风速、紊流度、室内温度均是影响人体热舒适的重要参数,这些参数共同作用时对室内人员热舒适造成的交互影响仍有待探究。

(5) 各项生理指标对人体热舒适影响的内在机理仍有待研究。热舒适是一个综合且复杂的研究方向,而生理指标是客观反映人体热舒适的有效手段,因此有必要增加更多的生理指标同时也对现已研究的生理指标进行完善,从而进一步揭示各项生理指标与人体热舒适之间的关联,进而更好地通过室内气流对人体各项生理指标的影响来探究室内气流对热舒适的影响。

#### 参考文献:

- [1] Fanger P O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering[J]. thermal comfort analysis & applications in environmental engineering, 1972.
- [2] Amai H, Tanabe S i, Akimoto T, et al. Thermal sensation and comfort with different task conditioning systems[J]. Building and Environment, 2007,42(12): 3955-3964.
- [3] 郁文红,李杨,高艳.空调室内气流组织与建筑节能[J].建筑节能,2017,45(5):7-9,16.
- [4] Heiselberg P, Perino M. Short-term airing by natural ventilation – implication on IAQ and thermal comfort[J]. Indoor Air, 2010,20(2):126-140.
- [5] 储向阳,于航,焦瑜,等.与生理参数相关的热舒适实验研究综述[J].建筑热能通风空调,2018,37(12):25,64-68.
- [6] 黄建华,张慧.人与热环境[M].北京:科学出版社,2011.
- [7] Liu W, Lian Z, Deng Q, et al. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study[J]. Building and Environment, 2011,46(2): 478-488.
- [8] 刘蔚巍.人体热舒适客观评价指标研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [9] 兰丽.室内环境对人员工作效率影响机理与评价研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [10] Sekhar S C. Thermal comfort in air-conditioned buildings in hot and humid climates—why are we not getting it right?[J]. Indoor Air, 2016,26(1):138-152.
- [11] 郭玉润.基于 Airpak 的夏季夜间通风风速对室内热环境和热舒适性影响模拟研究[J].区域供热,2019,(3):53-60.
- [12] Zhang H, Arens E, Fard S A, et al. Air movement preferences observed in office buildings[J]. International journal of Biometeorology, 2007,51(5):349-360.
- [13] Zhang H, Arens E, Kim D, et al. Comfort,perceived air quality,and work performance in a low-power task-ambient conditioning system[J]. Building and Environment, 2010,45(1):29-39.
- [14] Arens E, Turner S, Zhang H, et al. Moving air for comfort[J]. 2009.
- [15] 端木琳,舒海文,王宗山,等.室内环境参数差异条件下人体热感觉实验研究[J].沈阳建筑大学学报,2007,23(1):117-121.
- [16] Yongchao Zhai, Fengyu Miao, Liu Yang, et al. Using personally controlled air movement to improve comfort after simulated summer commute[J]. Building and Environment, 2019.
- [17] 崔惟霖,欧阳沁,余娟,等.相同热感觉条件下不同环境温度与风速组合对人体舒适性及工作效率的影响[J].暖通空调,2013,43(7):68-72.
- [18] 谈美兰.夏季相对湿度和风速对人体热感觉的影响研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [19] 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.
- [20] 周俊彦,魏润柏.环境风速和温度的热舒适组合模型[J].同济大学学报(自然科学版),1998,(6):701-705.
- [21] 周俊彦,魏润柏.热舒适条件下环境风速和温度最佳组合的实验研究[J].人类工效学,1998,(1):17-21,69.
- [22] 谈美兰,李百战,李文杰,等.夏季空气流动对人体热舒

- 适性的影响[J].土木建筑与环境工程,2011,33(2):70-73.
- [23] Toftum J. Air movement--good or bad?[J]. *Indoor Air*, 2004,14:40-45.
- [24] 陈良.室内热湿环境对人体生理及热舒适影响的实验研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [25] Palonen J, Olli Seppänen, Jaakkola J J K. The Effects Of Air Temperature And Relative Humidity On Thermal Comfort In The Office Environment[J]. *Indoor Air*, 1993,3(4):391-397.
- [26] Toftum J, Nielsen R. Draught sensitivity is influenced by general thermal sensation[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1996,18(4):295-305.
- [27] Toftum J, Nielsen R. Impact of metabolic rate on human response to air movements during work in cool environments[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1996,18(4):307-316.
- [28] 黄志超.温度渐变环境下的人体热反应及工作效率[D].重庆:重庆大学,2015.
- [29] 朱颖心.热舒适的“度”,多少算合适?[J].*世界环境*,2016,(5):26-29.
- [30] Dynamic thermal environment and thermal comfort[J]. *Indoor Air*, 2016,26(1):125-137.
- [31] 朱守林,戚春华,李文彬.自然风气流对人体热舒适影响的实验研究[J].*北京林业大学学报*,2007,(4):54-58.
- [32] 贾庆贤,赵荣义.风速频谱对人体热舒适性的影响[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2001,(6):89-91.
- [33] Zhao R, Li J. The effective use of simulated natural air movement in warm environments[J]. 2004,14(Supplement s7):46-50.
- [34] 罗茂辉,余娟,杨月婷,等.等温工况下分体空调送风动态化与人体热舒适实验研究[J].*暖通空调*,2014,44(5):130-134.
- [35] 王亦然,华金晶,欧阳沁,等.不同湍流强度模拟自然风的人体热舒适研究[J].*暖通空调*,2013,43(0):91-96.
- [36] 夏一哉,赵荣义,牛建磊.等温热环境中紊动气流对人体热感觉的影响[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2000,(10):100-103.
- [37] Griefahn B, Künemund C, Gehring U. The significance of air velocity and turbulence intensity for responses to horizontal drafts in a constant air temperature of 23 C[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2000, 26(6):639-649.
- [38] 翟永超.湿热环境下空气流动对人体热舒适影响的实验研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [39] 张继刚.壁挂式空调房间内流场温度场特性与人体热舒适的研究[D].济南:山东大学,2007.
- [40] 孙永丽.空调送风角度对室内舒适度影响的研究[D].济南:山东建筑大学,2019.
- [41] 李杨.办公楼空调系统室内气流组织和热舒适性研究[D].北京:北方工业大学,2017.
- [42] 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.
- [43] Guéritee, Julien, Tipton M J. The relationship between radiant heat, air temperature and thermal comfort at rest and exercise[J]. *Physiology & Behavior*, 2015,139:378-385.
- [44] 王月梅.胸部送风非均匀环境下的人体热舒适研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [45] Wang Y, Lian Z, Lan L. The effect of turbulence intensity on local skin temperature and subjective responses to draft[J]. *energy & buildings*, 2011,43(10):2678-2683.
- [46] 狄育慧,尹慧,王丽娟,等.夏季办公建筑风速对人体热舒适影响的实验研究[J].*暖通空调*,2018,48(6):103-109.
- [47] 廖桦浚.空气湿度与个性送风风速对人体整体舒适感的影响研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [48] 罗明智.室内空气流速对人体生理指标及热舒适性影响的研究[D].重庆:重庆大学,2005.
- [49] ShanGao, RyoZoOoka, WonseokOh. Formulation of human body heat transfer coefficient under various ambient temperature, air speed and direction based on experiments and CFD[J]. *Building and Environment*, 2019,160:106168.
- [50] 朱颖心,欧阳沁,戴威.建筑环境气流紊动特性研究综述[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2004,(12):38-41.
- [51] Zhou X, Ouyang Q, Zhu Y, et al. Experimental study of the influence of anticipated control on human thermal sensation and thermal comfort[J]. *Indoor Air*, 2014, 24(2):171-177.