文章编号:1674-2974(2024)05-0207-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024061

基于局部皮肤温度的床上微环境控制策略

宋鸽[1,2],艾正涛[1,2],张国强[1,2†]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 国家建筑安全与环境国际联合研究中心(湖南大学),湖南 长沙 410082]

摘 要:通风床垫被设计成通过位于脚部附近的通风口抽走床上微环境的污染空气以达到源头控制污染物的目的.实验研究发现通风床垫的使用有造成局部冷不适的风险,同时使用通风床垫和局部加热装置,并根据受试者反馈实时调控,可以解决冷不适问题,并满足不同用户的热微环境需求.为了探究通风床垫耦合局部加热装置基于局部皮肤温度的自动控制潜力,对比了30名受试者在室温下清醒地躺在通风床垫上时前额、右肩胛骨、左上胸、右上臂、左下臂、左手、右大腿前侧、左小腿后侧、右脚背、左脚背10个部位的皮肤温度和总体、面部、额头、颈部、胸部、背部、手臂、手、大腿、小腿、脚的热可接受度.结果显示:女性的局部皮肤温度与男性相比普遍较低,而可接受度较高.高斯回归模型可以计算出每个部位最佳皮肤温度区间,结合各部位的可接受度关联矩阵结果及通风床垫及局部加热的控制潜力,最终选取脚部、手部和背部的皮肤温度以实现床上微环境的个性化自动控制.本研究提供了通风床垫基于局部皮肤温度的自动控制潜力研究的新思路和建议,可以为床上微环境的优化和改善提供一定参考.

关键词:床上微环境;通风床垫;皮肤温度;可接受度;高斯回归
中图分类号:TU831 **文献标志码**:A

Control Strategy of Bed Microenvironment Based on Local Skin Temperature

SONG Ge[1,2], AI Zhengtao[1,2], ZHANG Guoqiang[1,2†]
[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment(Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: Ventilated mattresses are designed to remove polluted air from the bedroom microenvironment by using a ventilation port located near the feet, thereby achieving pollution control at the source. However, experimental research has found a risk of local discomfort due to cold drafts caused by its use. Therefore, this study explores the automatic control potential of the ventilated mattress coupled with a local heating device based on local skin temperature, which can meet different thermal microenvironment needs of users by adjusting the mattress and local heating device in real-time according to users' feedback. A comparison was made between the skin temperature and thermal acceptability of ten body parts of 30 awake subjects lying on the ventilated mattress,

* **收稿日期**:2023-05-08
基金项目:国家留学基金创新型人才国际合作培养资助项目(20190613216), China Scholarship Coumcil(CSC)(20190613216)
作者简介:宋鸽(1992—),女,陕西西安人,湖南大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: gqzhang@hnu.edu.cn

including the forehead, right scapula, upper left chest, upper right arm, lower left arm, left hand, front right thigh, lower left leg, right instep, and left instep. The acceptability of the whole body, face, forehead, neck, chest, back, arm, hand, thigh, leg, and foot were also recorded. The results showed that local female skin temperature was generally lower than male, while their acceptability was higher. The Gaussian regression model can calculate optimal skin temperature range for each part. Combined with the thermal acceptability correlation matrix results of each part and the control potential of the ventilated mattress and local heating device, the skin temperatures of the foot, hand, and back were finally selected to realize personalized automatic control of the bedroom microenvironment. This study provides new ideas and suggestions for exploring the automatic control potential of the ventilated mattress based on local skin temperature and could provide a reference for the optimization and improvement of the bed microenvironment.

Key words: bed microenvironment; ventilation mattress; skin temperature; acceptability; Gaussian regression

热舒适和空气质量在建筑物中扮演着至关重要的角色,对用户的健康、舒适性以及建筑物的节能性能有着重要的影响[1].当前,建筑领域的设计思路通常采用统一设置的暖通空调系统,提供均匀混合的冷热和干净空气.然而,个体之间存在明显的生理和心理反应、衣着、活动水平、空气温度和空气流动偏好等差异,如果为每个个体提供满意的微环境,则可以营造出大多数用户都能接受的室内环境.而均匀混合的室内空气不利于高效控制个体呼出污染物.因此,个性化营造局部微环境是解决这一问题的有效策略,也是暖通空调研究的重要方向.

针对卧室和医院病房,床是人体接触时间最长的区域,人体散发的生物废水废气和呼出的空气是室内污染的主要来源.目前,通常采用全空间通风的方法来改善室内空气质量,但这种方法不仅能耗较大而且对污染物控制能力较差.因此,个性化通风系统应与床上环境结合,从源头解决污染问题,并提供适合个体的最佳床上微环境[2].通风床垫被设计为一种能够清除床上生物废水废气的床垫,在将它们与室内空气混合之前进行过滤.该通风床垫采用酸处理的活性碳纤维填充纺织材料制成,并通过位于脚部床尾附近的开口吸入被污染的空气,使其经过过滤后再排放至室外或者经由床垫中的过滤器进行局部清洁.

先前的研究已经证实,通风床垫可以通过高效节能的方式去除污染物,满足用户的可吸入空气质量要求[3-4].除此之外,床上微环境对于普通人的睡眠质量影响也十分重要[5-10].良好的睡眠可以恢复能量,保护大脑免受损伤,促进年轻人的成长[11-12].通风床垫高性能地去除污染物的作用在卧室、酒店的应用也是十分有必要的.然而,实验结果也表明,通风床垫的使用不可避免地会破坏床上的热微环境,加剧局部的不舒适感[13].用局部加热装置,可以降低这种影响[14-15].但床垫的应用场景通常为卧室、病床或老年人的床铺上,用户很难根据自己的需求进行实时调节,因此需要一个通风床垫系统可以自动识别用户的需求并进行实时调控.过去的五十年关于皮肤温度与热感觉的大量研究,渐渐将皮肤温度作为评判热舒适的重要依据[16-17].利用皮肤温度为依据对热湿环境进行控制是可行且必要的.He 等人研究了室温、湿度和空气流速对睡眠质量和热舒适度的影响,在不同的条件下研究了被试者的皮肤温度和控制室温对其热感觉的影响,结果表明,基于皮肤温度的热感觉控制可以提高睡眠质量和热舒适度[18]. Liu 等人提出,使用皮肤温度控制热湿环境可以减少疲劳和提高工作效率[19].此外,Li 等人研究了在不同的室内条件下,人们的皮肤温度和热舒适感受,发现基于皮肤温度的控制可以提高空调效率和节能[20].因此,利用皮肤温度控制热湿环境是可行且必要的,能够提高热舒适度和节约能源.

本研究将利用高斯回归模型来预测每个部位的最佳皮肤温度区间,并通过研究不同局部皮肤温度和对应的热可接受度,探讨如何实现个性化床上微环境的自动控制.具体而言,以 30 名受试者为研究对象,比较了他们在清醒状态下躺在通风床垫上时各个部位的皮肤温度和热可接受度.然后,运用高斯回归模型来计算每个部位的最佳皮肤温度区间,并根据此区间来控制通风床垫和局部加热装置.通过

实验研究和模拟计算,可以实时调整床垫和局部加热装置,以满足不同用户的热舒适需求,从而提高床上的热舒适度.

本研究重点探讨了个性化床上微环境自动控制的可行性和优势,为研究和改善室内热舒适度提供参考,也为提高睡眠质量和舒适度提供了有益的指导方向.最终为通风床垫和局部加热装置的改进以及个性化床上微环境控制提供了新思路和实现方案.

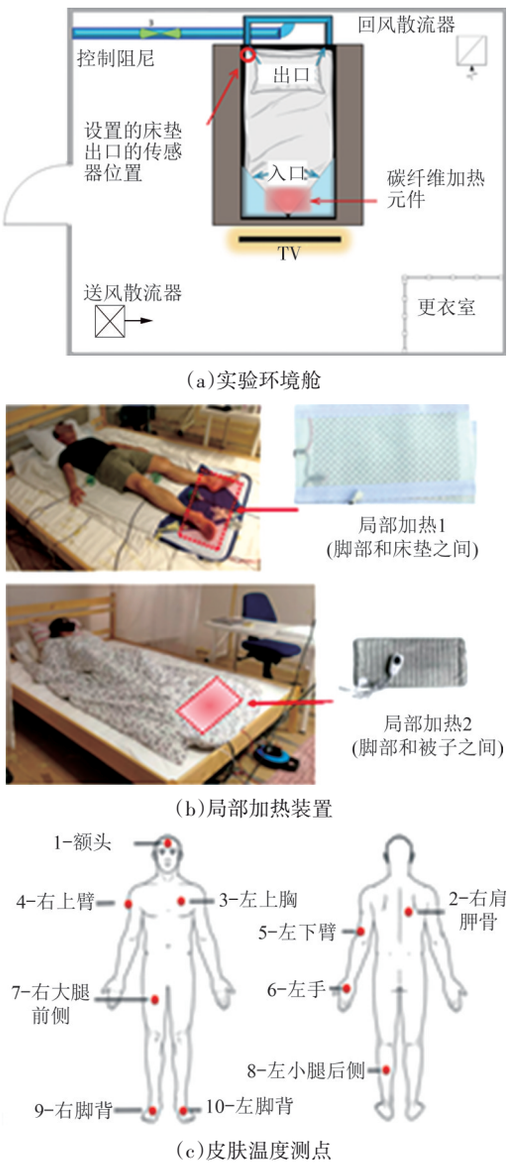
1　研究方法

1.1　实验环境

为了模拟卧室环境,研究使用了一个尺寸为4.7 m×4.7 m×2.6 m(宽×长×高)的气候舱.该气候舱通过天花板上安装的扩散器进行通风,供气和排气的扩散器分别是Lindab 单向PKA160和PCA160.通风率设置为54 L/s,每小时进行三次空气更换,提供干净的空气并排放.这有利于保持实验区域空气速度小于0.1 m/s[21].该气候测试室被布置成卧室的样子,在宽1.6 m、长2 m、厚6 cm的普通床垫上面,放置了通风床垫[图1(a)].空气温度和相对湿度在距离床面0.8 m和1.2 m的地方测量,以保持室内环境的稳定性.局部加热(Local Heating)1(52.5 cm×28 cm)由碳纤维加热垫提供设置在脚下方和床垫上方[22],局部加热2(30 cm×60 cm)放置在被子底端,脚趾上方[图1(b)].本实验测量了10个点的皮肤温度:前额、右肩胛骨、左上胸、右上臂、左下臂、左手、右大腿前侧、左小腿后侧、右脚背和左脚背[图1(c)],测点1~8是根据标准ISO/FDIS 9886中的8点皮肤温度测试选择,左右脚背主要考虑到通风床垫对脚部温度的影响作用而选择[23-24].室内空气温湿度和皮肤温度的测试仪器如表1所示.本研究选择了使用ibutton来测试受试者的皮肤温度,主要基于其成本低、实用性高以及操作简便的优点.虽然ibutton的精度仅为±0.5 ℃,但由于其测量结果的一致性、可比性以及在实践中的广泛应用证明了其可靠性.

1.2　实验过程

每个受试者在三个室温(19 ℃、23 ℃和28 ℃)下参加三个实验.这三个室温分别模拟冬季室内环境(19 ℃),过渡季节室内环境(23 ℃)和夏季室内环境(28 ℃).所选温度依据室内气候标准中卧室和病房推荐温度区间设定[25].整个实验过程中,室内的相对湿度都在35%~50%的范围内.每个实验过程持续2 h.



(a)实验环境舱

(b)局部加热装置

(c)皮肤温度测点

图1　实验示意图

Fig.1　The experiment set up

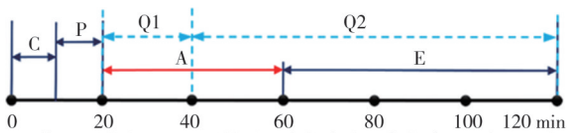
表1　实验仪器参数

Tab.1　Measuring equipment parameters

测量参数	设备	精度
空气温度	Sensirion EK-H4 kit	±0.2 ℃(5~ 60 ℃)
空气湿度	SHT31 sensor	±3%(20 %~80 %RH)
皮肤温度	ibutton DS1922T	±0.5 ℃(20 ~70 ℃)

每个受试者在一天中的同一时间参加了三次不同背景温度的实验,实验具体过程如图2所示.受试者被被子遮盖到脖子.大多数受试者将手臂保持在被子下方.在28 ℃工况时,少数受试者将手臂放在被子上方.受试者在19 ℃时盖上薄羽绒被(2.9 clo),在23 ℃时使用双层棉布(1.2 clo),在28 ℃时使用单

棉布(0.6 clo).如果受试者感到温暖,则增加VM的流速,VM指通风床垫.如果受试者感到寒冷,则打开加热装置或局部加盖薄毛毯以缓解冷不适.VM在19 ℃和23 ℃时的流速在3~6.5 L/s和28 ℃时在3~19.5 L/s之间变化.受试者被要求仅仰卧并被允许在回答问卷时进行简单移动.图2中LH表示局部加热.



C:更换期(脱掉衣服,测量体重,安装皮肤温度传感器,穿上睡衣)
P:准备期(上床躺平,盖上毯子,回答第一份调查问卷)
A:适应期40 min(VM关闭)
E:实验期(VM开启控制,LH开启或关闭控制)
Q1:第一份调查问卷(问1次)
Q2:第二份调查问卷(每10 min问1次,共问9次)

图2 实验过程

Fig.2 Experimental procedure

1.3 受试者

受试者的招募在丹麦技术大学校园内进行,受试者皆为在校大学生且自愿参与实验,经过对受试者健康情况的基本调研,筛除掉具有高血压、哮喘、糖尿病等慢性病史及抽烟酗酒等不良嗜好者,共招募了30名健康的人类受试者,其中15名男性,15名女性.他们被要求至少在丹麦连续生活超过一年以上,具备较好的英文水平,在实验前不要喝酒精和咖啡因饮料,并在实验当天保持良好的休息状态.在主要实验之前的一次会议期间,受试者熟悉了实验程序和使用的问卷.在实验期间,他们被要求穿自己准备的短袖衬衫和短裤睡衣,睡衣热阻大约0.22 clo(短袖上衣0.12 clo+短裤0.06clo+内衣裤0.04 clo).最终选择出的30名受试者身体基本信息如表2所示.

表 2 受试者基本信息

Tab. 2 Subjects information

性别	数量/名	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m^{-2})
		中位数(IQR)	中位数(IQR)	中位数(IQR)	中位数(IQR)
男性	15	25(22~27)	175(172~178)	72(66~75)	22.3(19.9~22.59)
女性	15	25(23~27)	168(165~170)	57(55~65)	21.5(21.5~24.2)
总和	30	25(23~27)	171(168~175)	65(56~72)	22.0(20.31~23.96)

1.4 主观调查问卷

整个实验过程中,受试者会被问及两份主观调查问卷,第一份主要为了收集受试者基本情况,在受试者躺下后适应环境时询问,只问一遍.第二份调查问卷则是对受试者主观热感觉的调查,大约从受试者进入实验舱的半小时后开始询问,每个受试者每隔10 min被询问一次该调查问卷,然后根据受试者的热需求调整试验工况,例如床垫气流速度大小或加热大小.平均每名受试者每次实验过程总共被询问9次,遇到较为敏感的受试者,为了捕捉更为精细的热需求变化,可能会缩短问卷调查时间,问卷次数可能会增加到10次,同理,遇到较为不敏感的受试者,问卷次数可能会减少为8次.热感觉量表的回答包含热感觉及热可接受度量表两项.问卷被显示在悬挂在天花板的显示器上,受试者平躺在床上口述答案,实验记录人员在一旁收集并记录问卷结果.ASHRAE热可接受度量表用来评估身体和局部:面部、额头、颈部、胸部、背部、手臂、手、大腿、小腿和脚的可接受度如图3所示.连续的可接受度等级从“明显不可以接受”(−1)到“只是不可以接受”(−0.01),以及从“只是可以接受”(0.01)到“明显可以接受”(+1).

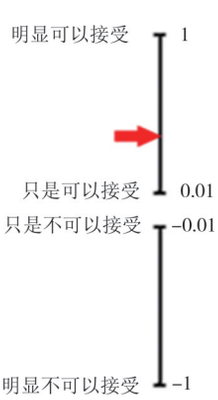


图3 受试者热可接受度

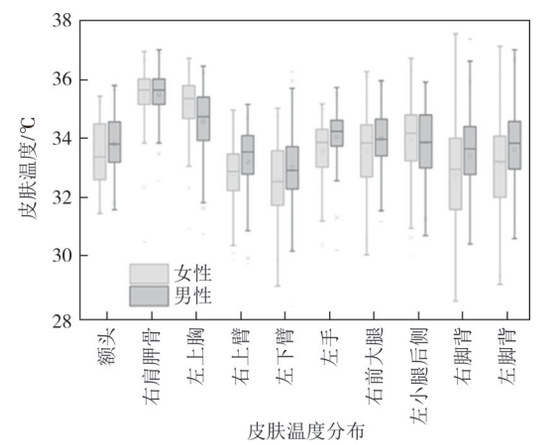
Fig.3 Thermal acceptability

2 结果分析

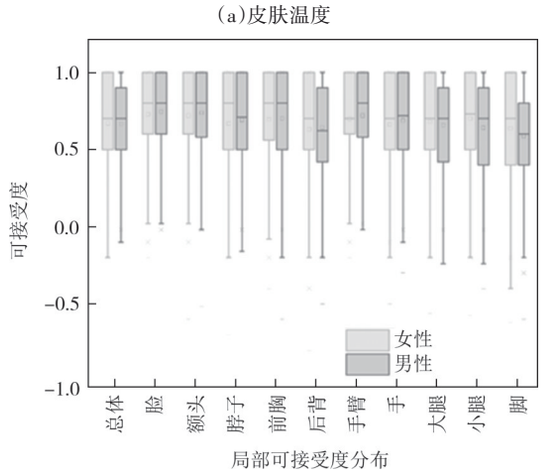
2.1 受试者局部皮肤温度和可接受度分布

受试者局部皮肤温度的分布和可接受度分布如图4所示.浅灰色箱状图表示女性受试者的分布数据,深灰色箱状图表示男性受试者的分布数据.可以看出,男性皮肤温度几乎都高于女性的皮肤温度.男

女受试者右肩胛骨处的皮肤温度相同,左上胸、左小腿的皮肤温度女性略高于男性.整体而言,全身背部和胸部处的皮肤温度最高,温度分布范围最小,手臂的温度最低,脚背的温度范围最大.所有受试者对于床上微环境的可接受度较高,这说明根据受试者的热反馈进行实时调节的方式是有效的,除了手臂的可接受度平均值与男性相比略低外,女性的可接受度几乎都高于男性,这是因为女性对于床上微环境的主观感受更为敏感且更愿意通过调节床垫系统来提高自己的舒适度,而对于男性来说,0.5~0.75的可接受度已经满足需求,不需要再对床上微环境进行调节.



(a)皮肤温度



(b)可接受度

图4　男女受试者皮肤温度和可接受度分布箱状图

Fig.4　Box plots of the distribution of skin temperature and thermal acceptability of male and female subjects

2.2　各部位可接受度关联性分析

为了更清楚地了解各部位可接受度对整体可接受度的影响,计算30名受试者各部位之间皮尔逊关联系数见图5.皮尔逊关联系数值范围从−1到+1,0表示无关,−1表示完全负相关,+1表示完全正相关,相关系数的绝对值越接近1,表明相关性越强[26].结果显示,各部位之间的可接受度均表现出较高的相关性,对于紧贴床垫的部位:背部、手臂、手部、大腿、小腿和脚部,手部是与总体可接受度关联性最低的,背部是与总体可接受度关联性最高的.关联性从高到低的顺序依次为:背部、手臂、大腿、小腿、脚部、手部.由此判断,在控制床上微环境时,要重点观察背部的可接受度.同时,考虑到本研究主要通过通风床垫和局部加热来进行,有造成局部热环境不均匀的风险,在考虑背部可接受度的同时也要考虑到与背部可接受度关联较小的手部和脚部作为本研究中床上微环境控制的依据.

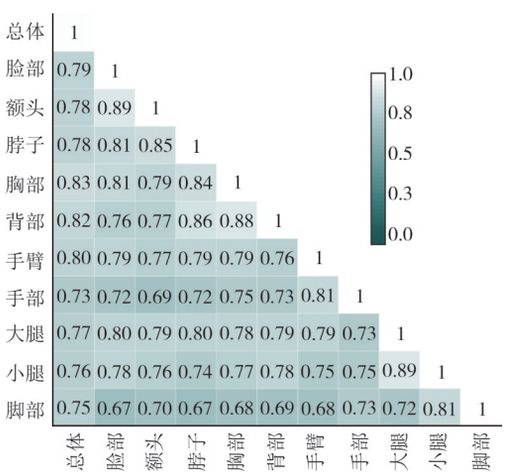


图5　总体和局部热感觉关联矩阵

Fig.5　Overall and local thermal sensation correlation matrix

2.3　所有受试者可接受度皮肤温度区间计算

本研究与其他稳态条件下的受试者热舒适实验有所不同.在通风床垫工作期间,实验每10 min调整一次热微环境,使受试者试图将其热环境导致的皮肤温度调整到舒适范围.为了研究皮肤温度与可接受度之间的关系,我们将每个身体部位的皮肤温度范围划分为20个区间,并计算每个区间整体热感接受度的平均值.采用这种方法,可以保证准确性的同时,样本数为0的区间不会过多.如果只考虑每个区间的平均可接受值,由于分布的样本数量,准确性可能不高.因此,引入了新的变量,每个温度区间内的可接受度总和作为最舒适温度范围的参考.经过分析,分析发现每个区间的可接受度之和分布呈高斯分布.因此,对于各部位的温度样本,采用高斯分布进行回归,得到一维高斯分布的相应概率密度函数.这种方法可以更好地描述温度样本之间的关系,并提高结果的准确性.

作为自变量x,每个区间的接受度之和定义为A

作为因变量,A的计算公式见式(1):

$$A = \sum_{i=1}^{n} a_i \tag{1}$$

式中:a_i为第i个样本的可接受度;n为该皮肤温度区间内的样本个数.

然后对皮肤温度x及可接受度总和A使用高斯回归作为皮肤温度和可接受度的正态分布函数.高斯回归计算公式如式(2)所示:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2}$$

式中:$f(x)$表示可接受度之和A;x表示皮肤温度.

如图6所示,$(\mu-\sigma,\mu+\sigma)$的范围占整个分布的68.26%,$(\mu-2\sigma,\mu+2\sigma)$的范围占整个分布的95.44%,$(\mu-3\sigma,\mu+3\sigma)$的范围占整个分布的99.74%.

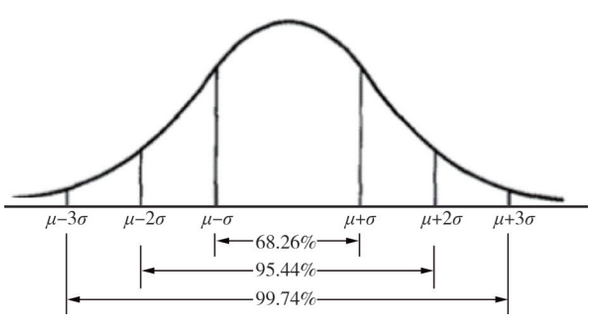


图6 高斯回归模型示意图

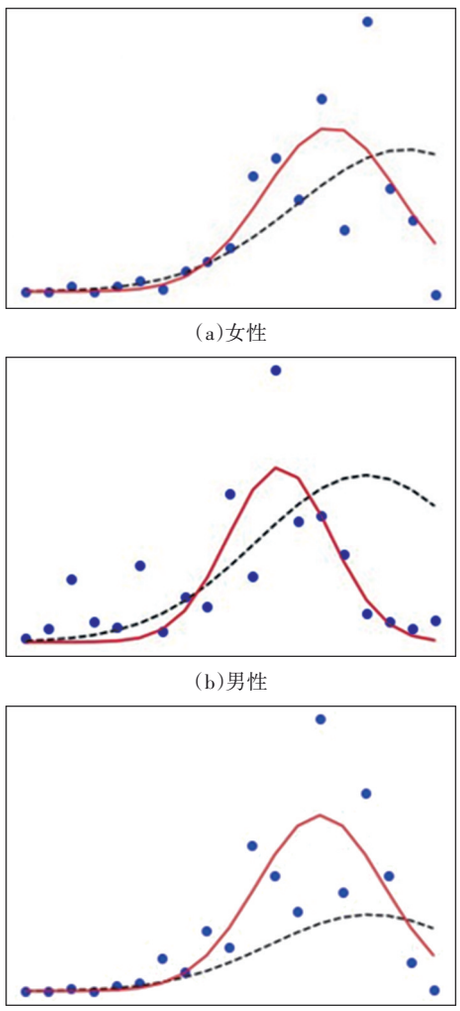
Fig.6 Gaussiam regression model

高斯回归后的温度范围见表3.这里的物理意义可以表示为在这个温度范围内能够满足热舒适要求的样本比例.背部的高斯分布曲线如图7所示,其他部位可见附录图1~9.

表3 10点皮肤温度μ和σ的高斯回归结果

Tab. 3 Results of Gaussian regression for skin temperature μ and σ at 10 points

10个身体部位	女性		男性		全部	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
额头	32.98	0.89	34.03	1.4	33.25	0.88
右背部	34.32	0.61	34.21	0.47	34.5	0.63
左胸部	35.52	0.76	34.71	0.95	34.42	0.83
右上臂	32.67	0.97	33.62	0.61	33.12	1.17
左下臂	32.56	1.15	32.07	0.65	32.02	0.67
左手	33.96	0.97	33.24	0.69	33.8	0.61
右大腿前侧	34.25	1.33	34.37	0.98	34.4	1.07
左小腿后侧	34.49	0.94	34.91	1.12	34.39	1.03
右脚背	34.56	0.54	34.97	0.38	34.79	0.45
左脚背	34.18	0.44	34.54	0.36	34.38	0.43



(a)女性

(b)男性

(c)全部

---初始回归,—最佳回归

图7 背部最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig. 7 Gaussian regression process of optimal skin temperature on back

由于实验开始后前40 min为准备阶段及适应环境,此时获得的皮肤温度并非为受试者希望得到的皮肤温度,此处的皮肤温度数据从实验的第40 min开始与与其对应的593份问卷的接受性结果被应用于高斯回归计算的数据集.表3显示了女性受试者、男性受试者和所有受试者的10点皮肤温度的μ和σ的高斯回归结果.受试者各个身体部位男性女性可接受温度区间皮肤温度相对分布如图8所示.在高斯分布中,数据集围绕μ对称,y在μ处达到极大值.σ描述了数据集分布的分散性[26-27].在本研究中,μ表示受试者最喜欢的皮肤温度,σ表示可接受的温度波动范围.$(\mu-\sigma,\mu+\sigma)$表示68.27%的样本喜欢的温度区间.女性受试者不同身体部位温度范围的变异

性高于男性受试者,这可能表明女性受试者不同身体部位皮肤温度的舒适区更分散,女性所需的舒适热微环境可能比男性更复杂.胸部和下臂的温度范围分别是最大和最小的.女性下臂和上臂的可接受温度范围比男性大,女性喜欢较低的上臂温度,喜欢较高的下臂温度.这可能表明,与男性相比,女性更喜欢手臂温度的均衡分布.然而,女性也更喜欢较高的胸部温度,这可能意味着女性更关心上臂和下臂或大腿和小腿之间的温度平衡,而不是躯干和肢体之间的温度差异造成的热不适.右脚背和左脚背的可接受范围是相对最小的两个,这可能是由于脚的舒适温度范围较小,也可能是由于脚是通风效应最强的部位,在有限的暴露时间内实现了最精确的控制.

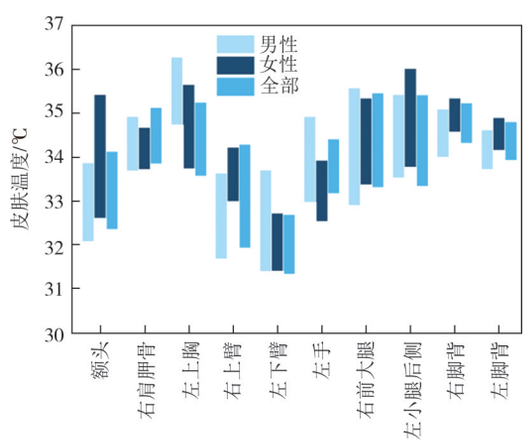


图 8　高斯回归结果为 68.27% 可接受度的 10 点皮肤温度范围

Fig.8　The result of the Gaussian regression is a range of 10 skin temperature points with an acceptable level of 68.27%

根据正态分布规则和用户的需求,68.27% 的可接受范围可以通过 σ 的倍数来修改.高斯回归数据集可以随着新的用户行为不断被替换或扩展.例如,一个新的应用程序收集的关于皮肤温度和可接受度的数据可以直接记录在数据集中,然后一个新的高斯回归可以计算出一个新的可接受的皮肤温度范围来覆盖旧的范围.然后,控制逻辑将根据新的温度范围进行控制.

2.4　基于局部皮肤温度区间的局部加热控制策略

考虑到局部加热装置在床上微环境中放置于脚部,对脚部的影响最大,同时结合关联矩阵的结果,可选出手部、背部和脚部皮肤温度为床上热微环境主要的控制指标.由于局部加热对脚部作用效果最强,对手部次之,对背部作用效果最弱,所以这三个部位皮肤温度指标对加热装置的控制优先级为脚部>手部>背部.第一步先判断脚部皮肤温度是否小于该区间下限,若小于则直接开启局部加热;若不小于,则继续判断手部皮肤温度是否小于其下限,若手部皮肤温度不小于下限,则判断为不开启加热,直接跳至等待 10 min,否则,继续观察背部皮肤温度,若背部皮肤温度小于区间下限,则判断为开启加热,否则判断不开启加热,并跳至等待 10 min 后,重新开始判断是否需要开启加热,如图 9 所示.本控制策略是基于通风床垫和局部加热装置的作用限制只选取了对舒适感影响较为重要的三个身体部位,随着床上微环境控制设备的发展,可根据其他部位的皮肤温度可接受区间进行更高阶的控制策略设计.

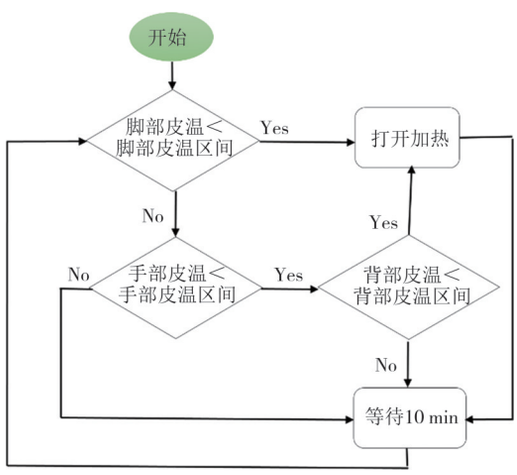


图 9　基于手部、脚部、背部皮肤温度区间的控制策略

Fig.9　Control strategy based on skin temperature intervals of hands, feet and back

3　结 论

1)在使用通风床垫时,女性的皮肤温度与男性相比较低,女性的满意度与男性相比较高.

2)整体可接受度与局部可接受度之间的关联性从大到小排序为胸部、背部、手臂、面部、颈部、额头、大腿、小腿、脚、手.

3)女性胸部可接受皮肤温度范围与上臂处皮肤温度范围相差较大,而男性相差较小.右上臂和左下臂皮肤温度范围差异为男性较大女性较小,说明女性对于躯干与四肢的皮肤温度不均匀的接受度高于男性.

4)脚部、手部、背部的皮肤温度区间下限可作为开启加热装置的依据,控制的优先级为脚部皮肤温度>手部皮肤温度>背部皮肤温度.

参考文献

[1] SONG G, AI Z J, ZHANG G Q, et al. Using machine learning algorithms to multidimensional analysis of subjective thermal comfort in a library[J]. Building and Environment, 2022, 212: 108790.

[2] 艾正涛, 叶金军, MELIKOV A K, 等.现有防疫通风措施及基于先进气流组织的源头控制技术应用[J].湖南大学学报(自然科学版),2022, 49(5):203-214.
AI Z T, YE J J, MELIKOV A K, et al. Present anti-pandemic ventilation measures and application of source control technology based on advanced air distributtion [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49 (5): 203-214. (in Chinese)

[3] BIVOLAROVA M P, MELIKOV A K, KOKORA M, et al. Novel bed integrated ventilation method for hospital patient rooms[C]// In 13th SCANVAC International Conference on Air Distribution in Rooms: new ventilation strategies based in active and passive technology in buildings and for comfort in airplanes. Brazil: São Paulo,2014: 49-56.

[4] BIVOLAROVA M P, MELIKOV A K, KOKORA M, et al. Performance assessment of a ventilated mattress for pollution control of the bed microenvironment in healthcare facilities[C]// Proc of Healthy Buildings Europa. Eindhoven, Netherlands: ISIAQ, 2015.

[5] ZHANG X J, LUO G Z, XIE J C, et al.Associations of bedroom air temperature and CO_2 concentration with subjective perceptions and sleep quality during transition seasons[J]. Indoor Air, 2021, 31(4): 1004-1017.

[6] HOBSON J A, MCCARLEY R W, WYZINSKI P W. Sleep cycle oscillation: reciprocal discharge by two brainstem neuronal groups[J].Science, 1975,189(4196): 55-58.

[7] HOBSON J A. Sleep is of the brain, by the brain and for the brain [J]. Nature, 2005, 437(7063): 1254-1256.

[8] MURPHY P J, CAMPBELL S S. Nighttime drop in body temperature: a physiological trigger for sleep onset?[J]. Sleep, 1997,20(7):505-511.

[9] HASKELL E H, PALCA J W, WALKER J M, et al.The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages [J]. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1981, 51(5): 494-501.

[10] CHOUDHARY S S,CHOUDHARY S R.Sleep effects on breathing and respiratory diseases[J]. Lung India: Official Organ of Indian Chest Society,2009, 26(4):117.

[11] AKBAR A R, KAMRUZZAMAN M, XU W, et al.Development of weft knitted heating pads on V-bed hand flat knitting machine by using conductive yarns[J]. American Journal of Polymer Science & Engineering,2016, 4(1): 133-141.

[12] BISCHOF W, MADSEN T L, CLAUSEN J, et al. Sleep and the temperature field of the bed [J]. Journal of Thermal Biology, 1993,18(5/6): 393-398.

[13] BIVOLAROVA M P, MELIKOV A K, KOKORA M, et al.Local cooling of the human body using ventilated matress in hospitals [C]// In 13th SCANVAC International Conference on Air Distribution in Rooms: new ventilation strategies based in active and passive technology in buildings and for comfort in airplanes. São Paulo, Brazil, 2014:279-286.

[14] SONG G, MELIKOV A K, ZHANG G, et al. Human response to the bed thermal environment generated by a ventilated mattress combined with local heating [J]. Building and Environment, 2023,5/26: 110461.

[15] SONG G, BIVOLAROVA M P, ZHANG G, et al. Control of the bed thermal environment by a ventilated mattress: human subject response [C]// CLIMA 2022 Conference. Rotterdam, the Netherlands, 2022.

[16] KIM Y, SHIN Y, CHO H. Influencing factors on thermal comfort and biosignals of occupant-a review [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021,35(9):4201-4224.

[17] LUO W, KRAMER R, KORT Y D, et al. Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort—A systematic review on which body segments to target [J]. Energy and Buildings, 2022,256:111766.

[18] HE M, LIAN Z, CHEN P. Evaluation on the performance of quilts based on young people's sleep quality and thermal comfort in winter[J]. Energy and Buildings, 2019,183:174-183.

[19] LIU Y, XU H, ZHENG P P, et al.Thermal preference prediction based on occupants' adaptive behavior in indoor environments—A study of an air-conditioned multi-occupancy office in China [J]. Building and Environment, 2021,206:108355.

[20] LI D, MENASSA C C, KAMAT V R. Heat-human embodied autonomous thermostat[J]. Building and Environment, 2020, 178: 106879.

[21] 室内人体热舒适环境要求与评价方法:GB/T 33658—2017[S].北京: 中国标准出版社, 2017.
Thermal comfort reqirement and evaliation for indoor environment: GB/T 33658—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[22] Long infrared underfloor heating film building material[EB/OL]. [2023-05-08]. https://www.banggood.com/da/50CMX2M-220V-Far-Infrared-Floor-Heating-Film-Building-Material.

[23] Ergonomics-evaluation of thermal strain by physiological measurements: ISO 9886[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

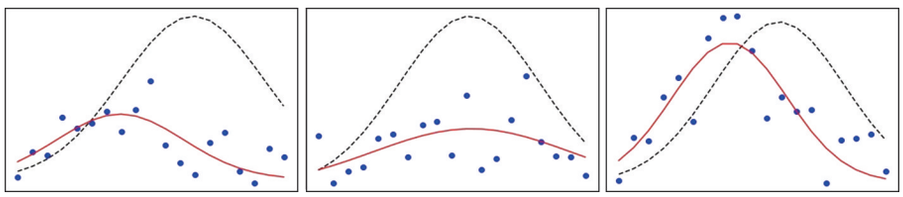
[24] JIN Q, LI X, DUANMU L, et al. Predictive model of local and overall thermal sensations for non-uniform environments [J]. Building and Environment, 2012,51: 330-344.

[25] Technical committee CEN/TC 156. Energy performance of buildings-ventilation for buildings—part 1: indoor environmental input paramters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics-module M1-6 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2019.

[26] BENESTY J, CHEN J, HUANG Y, et al Pearson correlation coefficient[C]//In Noise Reduction in Speech Processing. Berlin: Springer, 2009:1-4.

[27] ZHU H, WILLIAMS C K, ROHWER R, et al. Gaussian regression and optimal finite dimensional linear models [R]. Birmingham: Aston University, 1997.

附录:

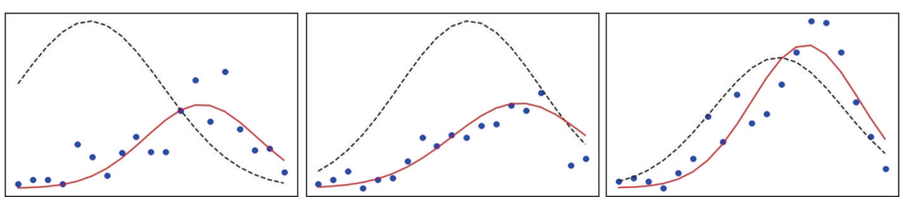


(a)女性　　(b)男性　　(c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 1　额头最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.1　Gaussian regression process of optimal skin temperature on forehead

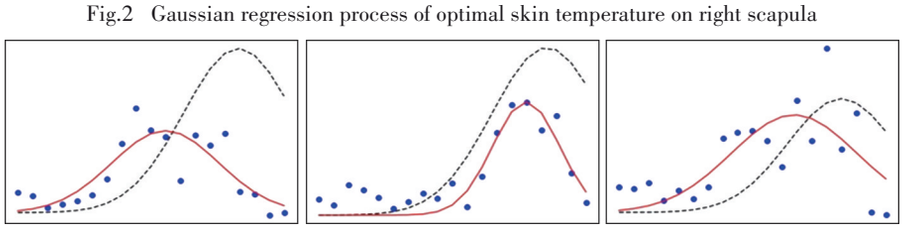


(a)女性　　(b)男性　　(c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 2　左上胸最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.2　Gaussian regression process of optimal skin temperature on right scapula

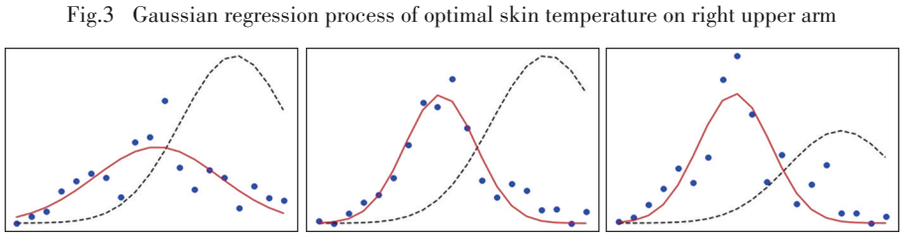


(a)女性　　(b)男性　　(c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 3　右上臂最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.3　Gaussian regression process of optimal skin temperature on right upper arm

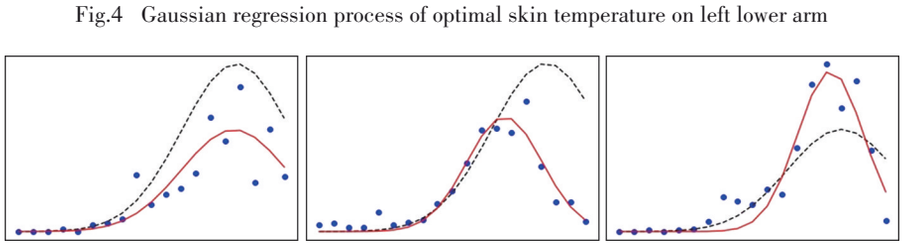


(a)女性　　(b)男性　　(c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 4　左下臂最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.4　Gaussian regression process of optimal skin temperature on left lower arm

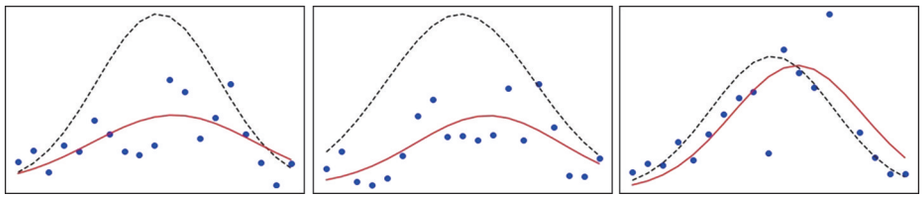


(a)女性　　(b)男性　　(c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 5　左手最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig. 5　Gaussian regression process of optimal skin temperature on left hand

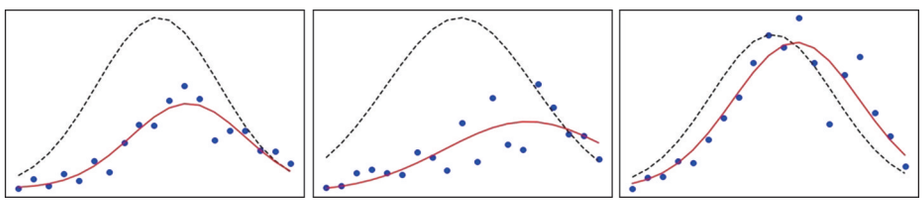


(a)女性 (b)男性 (c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 6 右大腿前侧最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.6 Gaussian regression process of optimal skin temperature on right anterior thigh

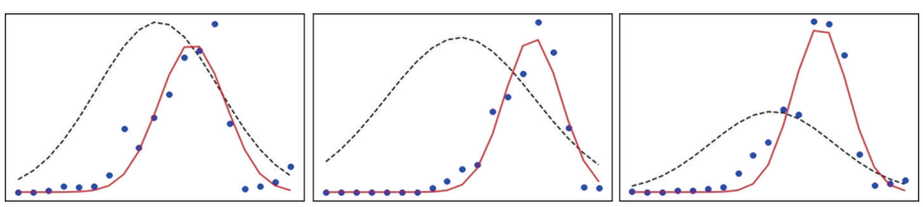


(a)女性 (b)男性 (c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 7 左小腿后侧最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.7 Gaussian regression process of optimal skin temperature on left calf

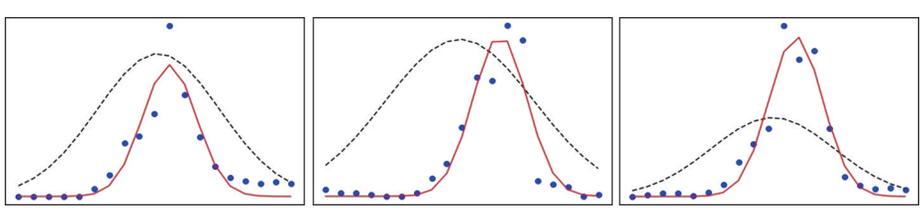


(a)女性 (b)男性 (c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 8 右脚背最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig. 8 Gaussian regression process of optimal skin temperature on right instep



(a)女性 (b)男性 (c)全部

--- 初始回归,— 最佳回归

图 9 左脚背最佳皮肤温度高斯回归过程

Fig.9 Gaussian regression process of optimal skin temperature on left instep