

冷环境下人脸微表情作为热舒适性评价指标的研究

郭成吉^a, 胡松涛^{a,*}, 孙 洁^b, 鹿铭理^a, 胡宇豪^a, 薛令辉^a, 杨 阳^a

(青岛理工大学 a. 环境与市政工程学院; b. 信息与控制工程学院, 青岛 266525)

摘要: 室内热舒适环境不仅关系到人们在办公居住环境中的工作效率和舒适度, 还关系到人们的身体健康, 室内热舒适环境的评价依据仍是一个值得深入讨论的问题。开发了一套人脸微表情识别模型(MERCNN 模型), 通过分析摄像头采集的人脸图像来判断人的热舒适状态, 这是一种新颖且有发展潜力的非接触评价方法。然而, 模型的验证主要靠受试者的主观感知, 缺少客观参数的验证, 且实验人数也较少, 需要进一步的实验研究。基于此, 采集了 31 名受试者在两种热环境(26 和 18 °C)和两种服装热阻(0.44 和 1.08 clo)下的热感觉投票、热舒适投票、皮肤温度和肌电信号, 对比上述主客观参数和能表征面部的特征值, 以此来说明微表情识别的可行性。实验结果表明, 面部微表情识别作为一种新型的非接触评价方法, 能有效地判断人的热舒适状态。

关键词: 建筑室内环境; 热舒适; 微表情识别; 肌电信号; 皮肤温度

中图分类号: TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)04-0011-11

Study on the micro-expressions of human faces as an evaluation index of thermal comfort in cold environment

GUO Chengji^a, HU Songtao^{a,*}, SUN Jie^b, LU Mingli^a, HU Yuhao^a, XUE Linghui^a, YANG Yang^a

(a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The indoor thermal comfort environment is not only related to people's work efficiency and the comfort of people's office and living environments, but also to their physical health. The evaluation basis of indoor thermal comfort environments is still an issue worthy of in-depth discussion. A face micro-expressions recognition model (MERCNN model) was developed to determine a person's thermal comfort status by analyzing the face images collected by cameras, and this is a novel and promising non-contact evaluation method. However, the verification of the model mainly relies on the subjective perception of the subjects, lacking verification by objective parameters. Besides, the number of subjects is also small, so further experimental research is needed. Based on this, this study collects the thermal sensation vote, thermal comfort vote, skin temperature and myoelectric signal of 31 subjects in two thermal environments (26 and 18 °C) and two clothing insulation (0.44 and 1.08

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2022QE075)

作者简介: 郭成吉(1999—), 男, 山东淄博人。硕士, 研究方向为人工环境营造。E-mail: 2579225320@qq.com。

* 通信作者: 胡松涛(1968—), 男, 江苏镇江人。博士, 教授, 主要从事人工环境营造、区域能源等方面的研究。
E-mail: songtao-hu@qut.edu.cn。

clo), and compares the above subjective and objective parameters with the feature values that can characterize the face to illustrate the feasibility of micro-expression recognition. Experimental results show that facial micro-expression recognition, as a new non-contact evaluation method, can effectively judge people's thermal comfort status.

Key words: building indoor environment; thermal comfort; micro-expression recognition; electromyogram; skin temperature

人的身体状态和所处的室内环境息息相关,一个舒适的室内环境不仅能提高我们的生活质量和工作效率,还对我们的健康产生了积极的影响^[1-2]。人的舒适程度受到很多因素的影响,如室内温度、噪声等^[3],其中热舒适性十分关键。因此,在达到节能减排的同时,如何能快速准确地评价人的热舒适性,以创造一个舒适的环境显得十分重要^[4]。

热舒适评价方法的探索一直是热点,FANGER首次提出了预测热舒适的PMV(Predicted Mean Vote)指标和表征热环境不满意程度的PPD(Predicted Percentage Dissatisfied)指数^[5],后来出现了主观评价方法和通过生理参数^[6-7]表征热舒适的接触式评价方法。但是,收集计算PMV所需的参数需要大量的时间,主观评价的方法受人的主观因素影响很大,接触式的评价方法需要人穿戴某种仪器设备,成本昂贵的同时也会限制人的行为。而非接触式评价方法避免了和人的直接接触,有着很好的发展前景。

面部表情识别是近年来很流行的一种非接触式技术,人会通过面部表情对外界的客观刺激进行实时反馈,比如,当人冷热不适时,会产生消极的情绪,反之,会产生积极的情绪,而这种情绪会在面部微表情中表现出来^[8-10]。基于此,本团队提出了一种利用人脸微表情进行舒适性评价的方法,开发了可以判断人舒适感的微表情识别模型(MERCNN模型)^[11],并已经结合受试者的主观问卷验证了模型的重合率,但其不足是缺少生理参数的支撑。

皮肤温度是人体的一项重要生理参数,在有关热舒适研究中的应用十分广泛^[12-13]。有研究发现人的额头温度与热舒适投票显著相关^[14],此外,平均皮肤温度也能表征人的热舒适状态,是一项重要的热舒适评价指标^[15]。面部表情的变化是在面部肌肉的参与下完成的^[16-17],这一过程伴随着肌电信号(EMG)的变化^[18],因此肌电信号可以说和表情联系十分密切,也是验证面部识别效果的一项重要参数。此外,通过热成像可以有效地评估人体热感觉,有研究^[19]发现评估时的最佳视图是正面,其次是侧面、头顶、前臂和手背,本文将面部温度作为评价热舒适性的一项重要参数。

因此,基于本团队的微表情识别模型,分析中性和寒冷环境转换的情况下受试者的热舒适性和面部运动单元的变化情况,模型识别结果除了结合主观问卷外,还采集了肌电信号和面部温度两种客观参数加以验证。本文的研究意义主要有以下3点:①通过生理参数检验了评价结果的准确性,为基于面部微表情识别的热舒适性评价方法提供生理依据。②本文不只是分析了面部识别这一种热舒适评价方法,而是将使用到的几种热舒适评价方法的特点进行对比分析,为之后面部识别模型的完善提供依据。③表情识别作为一种新型的评价技术,能做到实时且非接触地评估人的舒适状态,这为改善室内环境提供了一种新的参考依据。

1 实验设计

1.1 受试者

本次实验一共招募了31名受试者,包括18名男性和13名女性,有关受试者的具体信息见表1。

考虑到本次实验需要采集并分析人脸微表情,选择受试者时选择无面部疾病的健康人群。实验过程中受试者被要求一直静坐(代谢率为1 met^①),且不能进行任何的娱乐活动,以此来排除其对受试者情绪上的干扰。

① 1 met=58.2 W/m²

表 1 受试者信息

性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg·m ⁻²)
男	23.6±0.9	178.6±0.05	74.1±12.0	23.2±3.3
女	23.4±1.3	163.9±0.04	56.9±7.4	21.2±2.7
平均	23.5±1.0	172.3±0.09	66.6±13.3	22.3±3.2

1.2 实验室及实验工况

本实验在青岛理工大学睡眠实验室中进行,布局如图 1 所示。房间 1 和房间 2(每间长 2.7 m,宽 3.0 m,高 3.0 m)均为北向房间,配有分体式空调,用于调节房间内的空气温度。实验过程中采集环境参数所用到的设备见表 2。房间 1 和 2 的环境参数见表 3。受试者服装热阻经过计算是 0.44 clo^①,参考的标准见文献[20-21]。

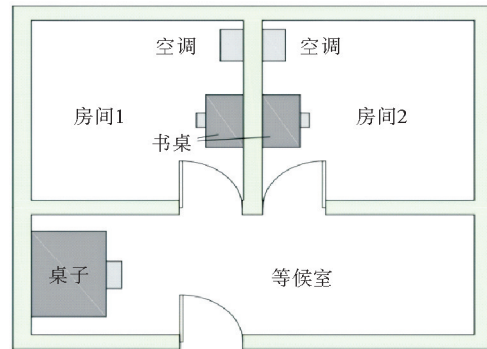


图 1 实验室布局

在实验开始之前,根据受试者的反馈将受试者的热感觉和热舒适分别控制在-0.5~0.5 和 0~0.5 的热舒适标准范围内^[15]。由式(1)和式(2)计算得到操作温度 t_0 ^[22],之后由加州大学伯克利分校建筑环境中心开发的 CBE Thermal Comfort Tool 计算得到 PMV 和 PPD,如表 3 所示。

表 2 设备的主要技术参数

设备名称	设备类型	范围	精度
便携式温度记录仪	iButton DS1923	-40~85 °C	±0.5 °C
黑球温度计	AZ8778	0~80.0 °C	±1 °C
迷你温湿度记录仪	testo 174H	-20~+70 °C	±0.5 °C
便携式风速计	KANOMAX6004	0.1~20 m/s	±(指标值的 5%) m/s
手持红外热像仪	FOTRIC 326C	-20~650 °C	±0.5 °C

$$\bar{t}_r = [(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v_a^{0.6} \times (t_g - t_a)]^{1/4} - 273 \tag{1}$$

$$t_0 = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \tag{2}$$

式中: \bar{t}_r 为平均辐射温度,°C; t_g 为黑球温度,°C; t_a 为空气温度,°C; v_a 为空气流速,m/s; t_0 为操作温度,°C; h_r 为辐射传热系数,W/(m²·K); h_c 为对流传热系数,W/(m²·K)。

表 3 环境参数与人体相关指标

阶段	操作温度/°C	相对湿度/%	服装热阻/clo	风速/(m·s ⁻¹)	代谢率/met	PMV	PPD/%	热感觉
I	26±0.5	60±5	0.44	0.1	1	-0.35	8	中性
II	18±0.5	65±5	0.44	0.1	1	-3.00	99	冷
III	18±0.5	65±5	1.08	0.1	1	-1.05	28	稍凉
IV	26±0.5	60±5	1.08	0.1	1	0.71	16	稍暖

① 1 clo=0.155 m²·K/W

1.3 数据采集和分析方法

1.3.1 主观问卷投票

本次实验收集了热感觉投票(TSV)和热舒适投票(TCV), TSV使用ASHRAE的7点投票量表^[15], 范围是-3—+3, 对应的热感觉分别是冷、凉、稍凉、中性、稍暖、暖、热。TCV使用5点投票量表, 范围是-2—2, 对应的热舒适分别是非常不舒适、不舒适、无感觉、舒适、非常舒适。

1.3.2 客观生理参数

本次实验在测量皮肤温度时使用5点法^[14], 平均皮肤温度(T_{mean})由式(3)得出:

$$T_{\text{mean}} = 0.07T_{\text{额头}} + 0.50T_{\text{前胸}} + 0.05T_{\text{右手背}} + 0.18T_{\text{右大腿}} + 0.20T_{\text{右小腿}} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{额头}}$ 为额头皮肤温度, °C; $T_{\text{前胸}}$ 为前胸皮肤温度, °C; $T_{\text{右手背}}$ 为右手背皮肤温度, °C; $T_{\text{右大腿}}$ 为右大腿皮肤温度, °C; $T_{\text{右小腿}}$ 为右小腿皮肤温度, °C。

冷刺激会造成面部肌肉收缩以抵御寒冷, 此外, 人们还通过肌肉协调联动来表达自身的情绪, 如颧肌收缩时口角将向上提升, 使面部表情呈现愉悦或笑容。口角肌和咬肌也承担了表情表达等功能。本实验中面部肌电信号通过六导联肌肉电传感器(采样率为1000 Hz)获得, 将测量电极片贴在面部颧肌、口角肌和咬肌, 并采集其相关的肌电信号。在时域上, 面部肌电信号的均方根(RMS)反映了一段时间内面部肌肉的平均放电强度, RMS越大表明面部肌肉收缩强度越大, 放电强度越高。

人的面部表情通过PHILIPS外置摄像头采集获得, 采集后的视频通过微表情识别程序进行分析。

实验拍摄的热成像图片用FOTRIC公司推荐的分析软件AnalyzIR进行处理, 温度取值的区域对应1.5节中介绍的5个面部运动单元的位置。

1.4 实验流程

本次实验于2023年5月8日到5月17日在山东青岛完成。受试者首先进入房间1中进行仪器的佩戴, 准备阶段共15 min。之后, 受试者静坐20 min(阶段I), 期间在第0、10、20分钟时填写主观问卷, 在第10分钟采集受试者的微表情和肌电信号, 之后受试者进入房间2静坐30 min(阶段II)。实验第50分钟时, 受试者穿上事先准备好的服装(0.64 clo), 继续静坐20 min(阶段III), 之后受试者回到房间1中静坐20 min(阶段IV)。实验过程中每10 min采集1次微表情和肌电信号, 采集过程持续2 min, 并在采集结束后立马填写1次主观问卷并拍摄红外图像, 具体的实验流程见图2。

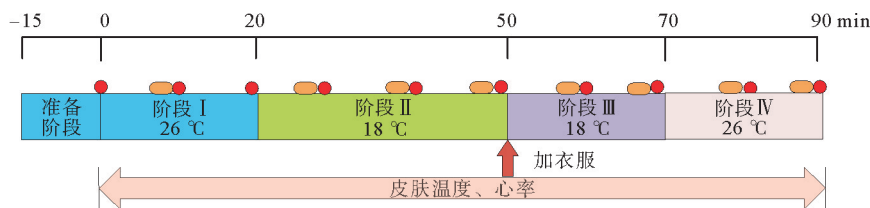


图2 试验流程

● 主观问卷和红外图像; ● 面部微表情和肌电信号

1.5 微表情识别模型以及面部的运动单元

本文中使用的微表情识别模型是由本团队自主研发的, 为了详细地分析人面部各部位的变化情况, 这里引入了面部运动单元变化量(AU值)进行说明。将人在舒适状态下的面部视作标准脸, 当环境工况改变后, 用欧氏距离计算面部图像与标准脸的变化量, 此变化量就是AU值, 它可以反映出面部微表情的变化。分析时将人的面部划分成5个运动单元, 如图3所示。将拍摄的人脸表情视频导入到识别程序后, 对此视频数据进行图像提取、剔除背景、人脸验证等处理, 最终输出人的舒适状态, 目前已实现了实装程序化, 如图4所示。

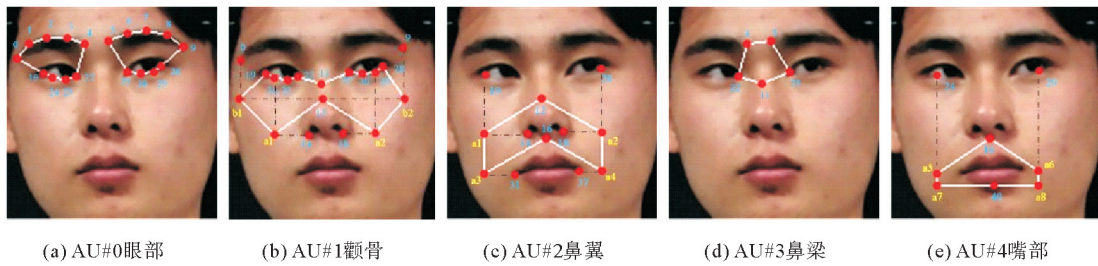


图 3 面部 AU 区域的划分^[11]

1.6 统计分析

用箱线图剔除实验数据中的异常值。为了检验数据集是否符合正态分布,利用 Shapiro-Wilk test 检验数据的正态性,若数据符合正态分布,就使用单因素显著性分析,利用 Bonferroni 进行事后检验,以验证不同温度及服装热阻下人的面部 AU 值是否有显著性差异^[23];否则,就使用非参数检验。概率值 $P < 0.05$ 视为在统计学上有显著性差异。



图 4 面部识别程序

2 结果

2.1 主观问卷

图 5 显示了在整个实验期间不同阶段热感觉和热舒适投票的占比情况。由图 5(a)可知:阶段 I 20 min 时有 92.3% 的受试者感到热中性;阶段 II 20 min 时仅有 3.8% 的受试者感到热中性,其余均感觉到冷不舒服;阶段 III 增加服装热阻使受试者的冷感得到了缓解,在 10 和 20 min 时分别有 19.2% 和 23.1% 的受试者热感觉呈中性;阶段 IV 10 min 时基本恢复到初始水平并稳定,但受上一阶段的影响,10 min 时仍有 23.1% 的受试者感到稍凉,20 min 时感到稍凉的比例降至 7.8%。由图 5(b)可知,阶段 I 所有受试者均感到舒适;阶段 II 中前 20 min 仅有 3.8% 的受试者没有感到不舒服,30 min 时均感到不舒服;阶段 III 10 min 时的舒适人数占比较上阶段增加了约 26.9%,20 min 时舒适占比稍有下降;阶段 IV 20 min 时的舒适占比较 10 min 时有所提高。

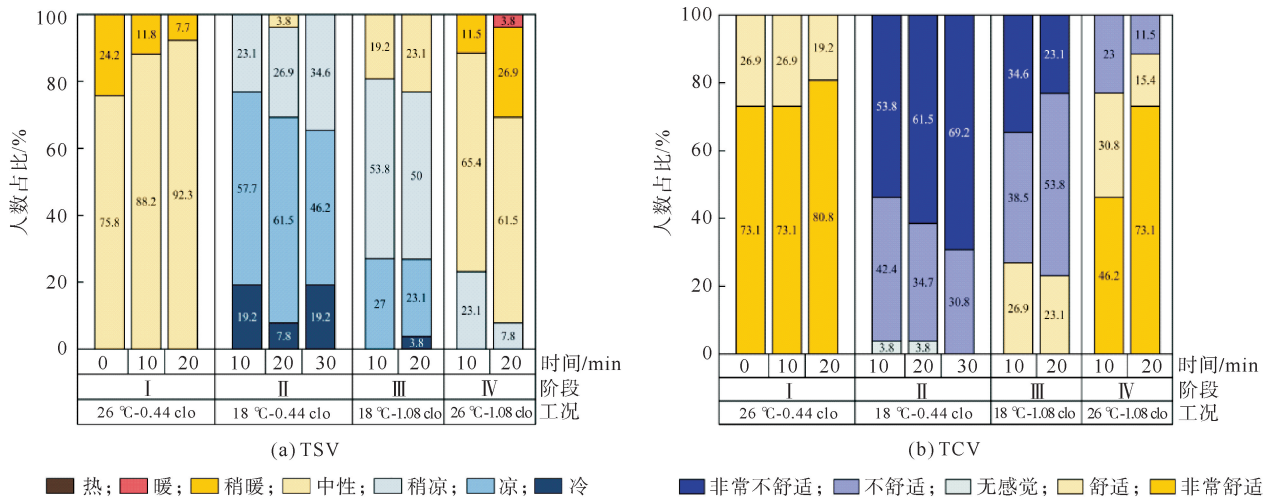


图 5 热感觉和热舒适在不同阶段的投票结果

2.2 皮肤温度

人体的平均皮肤温度变化如图6所示。在阶段I中,约10 min后 T_{mean} 达到稳定;阶段II中由于室温的骤降,在进入的前10 min里, T_{mean} 下降了 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后下降的速率有所减小;在阶段III中由于服装热阻的增加,受试者的 T_{mean} 有所上升,之后受试者回到房间1,阶段IV中受到室温的影响,受试者 T_{mean} 的增加速率较阶段III有了比较明显的提升。

人体局部皮肤温度的变化如图7所示。由于受到冷刺激的影响,在阶段II的前10 min中,受试者各个部位的皮肤温度均出现了明显的下降,其中额头和右手背皮肤温度下降得最多,约为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余部位下降了 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,额头和手背是直接暴露在环境中的,其对于温度的变化十分敏感。在阶段III前10 min中,由于服装热阻的增加,受试者的大腿、小腿和前胸的皮肤温度都出现了一定程度的上升,但整个阶段III额头温度涨幅不大。阶段IV中,额头温度较阶段III有了明显的提高。

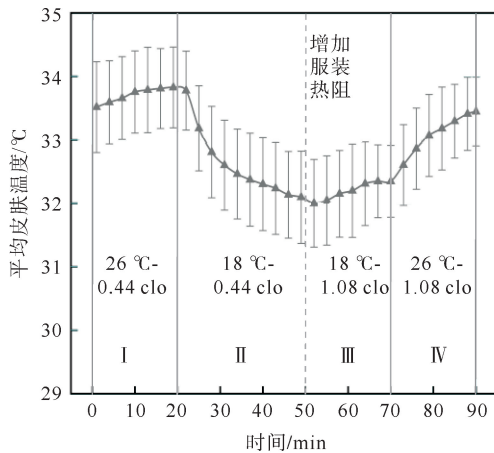


图6 平均皮肤温度的变化

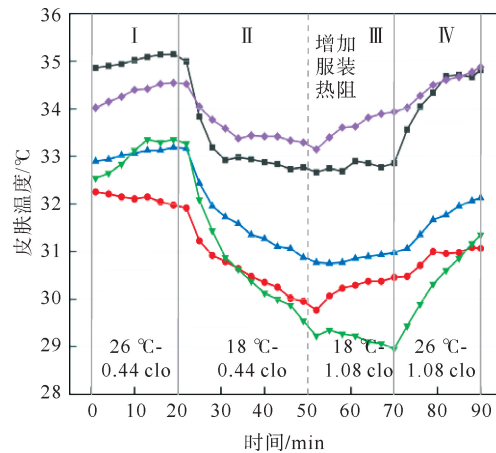


图7 各部位皮肤表面温度的变化

— 额头; — 前胸; — 右手背; — 右大腿; — 右小腿

2.3 微表情

2.3.1 模型识别的结果

不同阶段 MERCNN 模型识别评价系统和问卷校验的重合率如图8所示。阶段I,模型验证的重合率是 88.5% 。阶段II 10、20、30 min 时对应模型识别的重合率分别是 92.3% 、 88.5% 、 84.6% ,受到环境温度的影响,绝大多数受试者进入房间2后不到10 min 就感到强烈的冷不舒适,随着静坐时间的增加,模

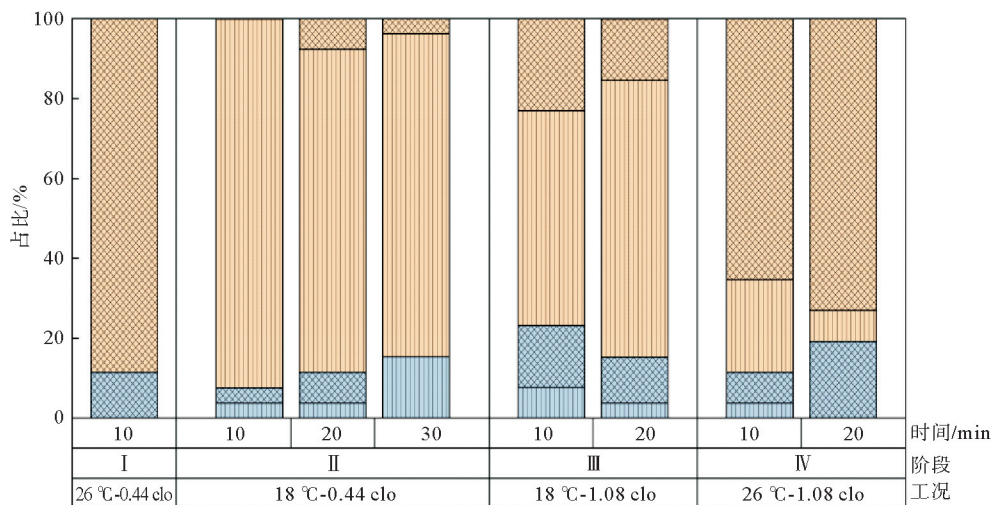


图8 不同阶段中MERCNN和主观问卷校验占比情况

■ 问卷调查(舒适)=评价系统; ■ 问卷调查(不舒适)=评价系统;
 ■ 问卷调查(舒适)≠评价系统; ■ 问卷调查(不舒适)≠评价系统

型识别的重合率有所下降。阶段Ⅲ 10 和 20 min 时模型识别的重合率分别是 76.9%和 84.6%,10 min 时有 15.4%的模型识别结果是舒适但问卷却是不舒适,20 min 时其比例有所下降,但却仍占到了 11.5%,有些受试者在增加了服装热阻后主观热舒适改善了,但面部识别结果仍是热不舒适。阶段Ⅳ 10 和 20 min 时模型识别的重合率分别是 88.5%和 80.8%,受试者的热舒适已有较大的改善。

2.3.2 AU 值的分析

各面部运动单元的 AU 值变化情况如图 9 所示。图 9(a)是阶段Ⅰ到阶段Ⅱ静坐后 AU 值的变化情况,受试者 AU 值在进入阶段Ⅱ 10 min 之内就发生了很大的变化,改变前后 AU 值存在显著性差异,受试者的冷不适在面部很快就有所体现,且之后 20 和 30 min 时受试者的 AU 值变化和 10 min 的相比相差不大,之间并不存在显著性差异。图 9(b)是受试者增加服装热阻后,进入阶段Ⅲ的 AU 值变化情况,相比于阶段Ⅱ,阶段Ⅲ 10 和 20 min 时的 AU 值下降较少,变化前后并不存在显著性差异。图 9(c)是阶段Ⅲ到阶段Ⅳ AU 值的变化情况,受试者的 AU 值在阶段Ⅳ的前 10 min 已明显变小,相较阶段Ⅲ的 AU 值存在显著性差异,20 min 时的 AU 值相较 10 min 时相差不大,并不存在显著性差异。

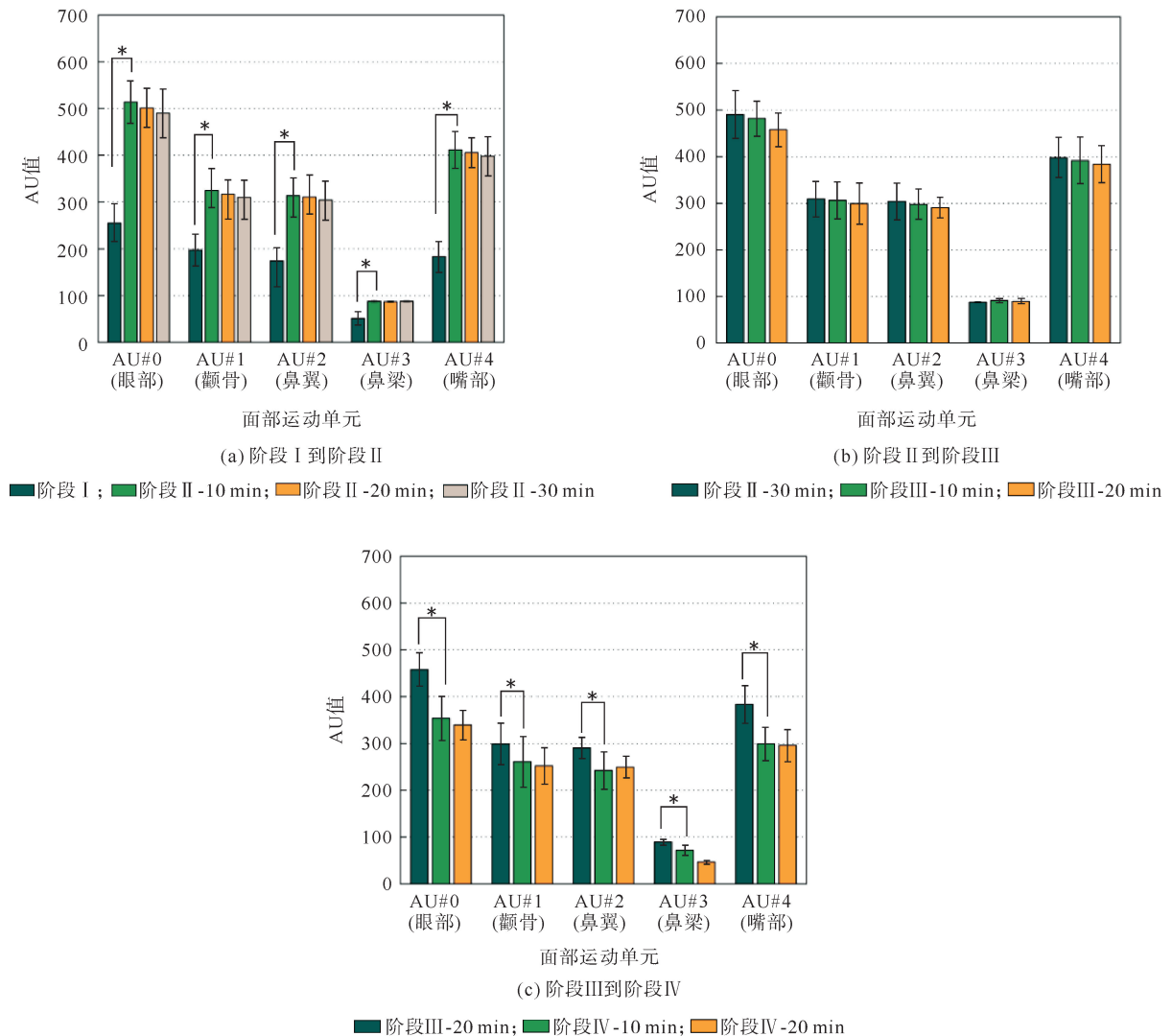


图 9 各面部运动单元在不同阶段下 AU 值的变化

2.4 面部温度

人面部温度在不同阶段的变化情况如图 10 所示。在各个阶段中人脸鼻梁(AU # 3)和嘴部(AU # 4)附近区域的温度相对较高,在阶段Ⅰ中,面部温度在 35~36 ℃。由于环境温度的下降,阶段Ⅱ中面部温度

下降至 33~34 °C,并在之后的 20 min 里基本保持稳定。在阶段Ⅲ中,虽然增加服装热阻,但人面部的温度并未有明显的上升,甚至基本和阶段Ⅱ持平,这与图 7 中阶段Ⅲ的额头温度以及图 9(b)中阶段Ⅲ的 AU 值变化一致,尽管这一阶段中 TSV 和 TCV 有所改善,但对于面部温度的改善效果不大。阶段Ⅳ的温度相较上一阶段有较大的提升,环境温度的回升使面部温度有了明显的改善,但其略低于阶段Ⅰ。以上各阶段的面部温度的变化情况和本文之前的面部 AU 值以及面部肌电信号的 RMS 的变化基本一致,人面部温度和与对应区域的 AU 值的拟合情况如图 11 所示,拟合度均较高, R^2 在 0.7 左右,而 AU#3 的 R^2 达到了 0.82,说明 AU 值和面部温度的变化关系密切。

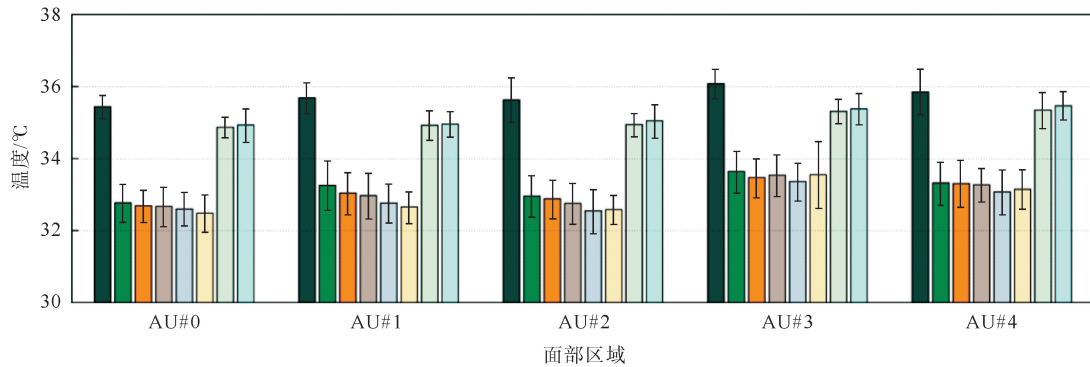
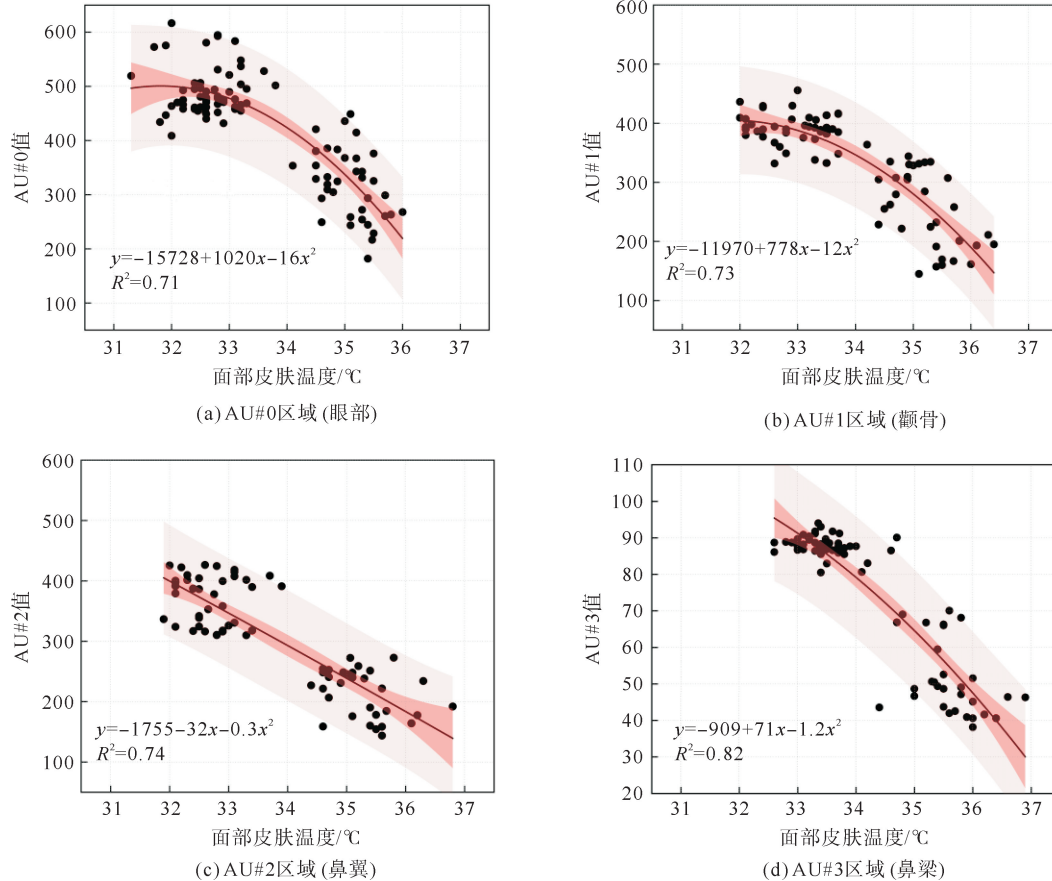


图 10 人面部温度在不同阶段的变化情况

■ 阶段Ⅰ; ■ 阶段Ⅱ-10 min; ■ 阶段Ⅱ-20 min; ■ 阶段Ⅱ-30 min;
 ■ 阶段Ⅲ-10 min; ■ 阶段Ⅲ-20 min; ■ 阶段Ⅳ-10 min; ■ 阶段Ⅳ-20 min



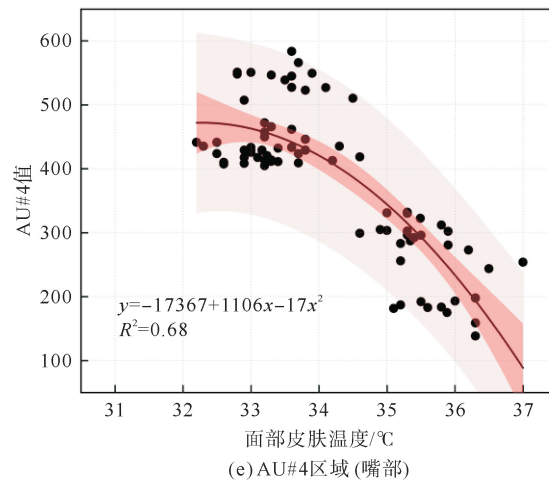


图 11 人面部温度和AU值的拟合情况

● Au值; — 拟合曲线; 95%置信带; 95%预测带

2.5 肌电信号

面部肌电信号的 RMS 和其差异性检验如图 12 和表 4 所示。阶段 I 中受试者是处于放松、舒适的状态,面部的肌电信号处于一个较低的水平;阶段 II 中,随着环境温度的降低,冷刺激使得受试者面部的肌电信号出现明显的上升,与阶段 I 的肌电信号存在显著性差异,这一现象与图 9(a)中人面部 AU 值变化一

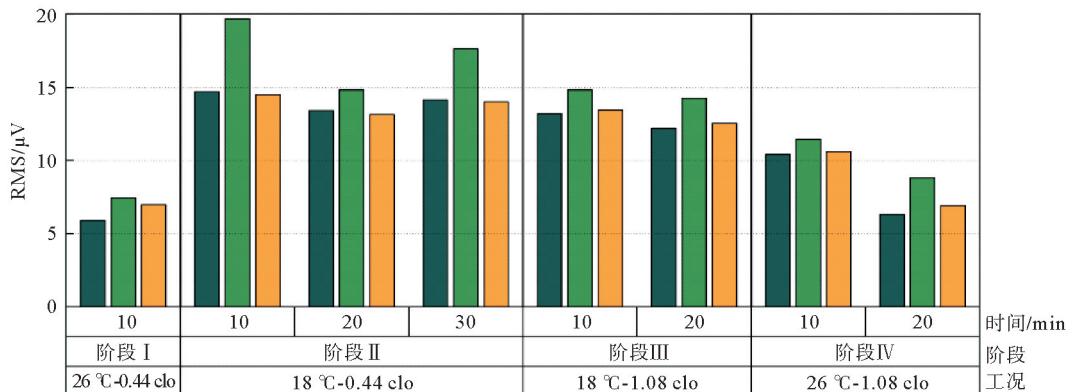


图 12 不同阶段下面部各部位肌电信号RMS的变化

■ 口角肌; ■ 咬肌; ■ 颧肌

致。本次实验设计了在阶段 III 中增加受试者的服装热阻,相比于阶段 II,阶段 III 中面部肌肉的收缩程度并没有得到较大的改善,且并不存在显著性差异,这与图 9(b)中阶段 III 的 AU 值变化一致。阶段 IV 中环境温度的回暖使受试者的面部肌肉收缩情况得到了明显的缓和,回暖前后的 RMS 信号存在非常显著性差异 ($P < 0.01$),阶段 IV 中 20 min 时的 RMS 较 10 min 时有较明显的下降,但也是高于阶段 I 的水平,这说明面部肌肉恢复速度较不适状况时的应激速度慢,这与图 9(c)中阶段 IV 的面部 AU 值表现一致。

表 4 不同阶段下面部各部位肌电信号 RMS 的差异性检验

肌肉	阶段	P
口角肌、咬肌、颧肌	阶段 I 10 min	$< 0.01^{**}$
	阶段 II 10 min	
	阶段 II 30 min	> 0.05
	阶段 III 10 min	
	阶段 III 20 min	$< 0.01^{**}$
	阶段 IV 10 min	

注: ** 表示具有非常显著性差异。

3 讨论

本研究一共设计了2个温度(26、18℃)和2种服装热阻(0.44、1.08 clo),来探讨基于人的面部微表情来判断热舒适性的可行性。此外,在验证的过程中还对比分析了5种不同评价方法。

在受试者增加服装热阻后(阶段Ⅲ),模型显示大部分人为不舒适,但受到心理因素的影响,增衣这一行为使部分受试者的TCV有所缓解。阶段Ⅲ中的AU值较阶段Ⅱ的变化不大,面部肌电信号和红外成像温度也没明显变化,这说明阶段Ⅲ中增加服装热阻这一行为对受试者的面部改善并不大,所以微表情识别模型显示为不舒适,以上部分受试者的TCV和模型识别的冲突导致了模型的重合率在阶段Ⅲ中为最低。

微表情识别这一方法对比其他评价手段有着较明显的优势,人的皮肤温度在环境温度改变后,经历了20 min左右才恢复了稳定,但微表情在受试者进入冷环境后就很快发生了变化,不到10 min面部运动单元就稳定了下来,这说明微表情识别方法的反应速度较皮肤温度快。问卷调查太依赖于主观评价,尤其是改变外部条件如增加衣物后,很容易受到心理因素的干扰,有研究发现人的热舒适性和热感觉之间通常存在分离^[24],这意味着当人的TSV偏离中性温度时,TCV却可能在舒适范围内,从而导致对舒适状态的误判。本研究中舒适状态的改变伴随着肌电信号也相应有所变化,通过肌电信号能判断人的舒适状态,但贴在面部的肌电仪器给行动带来了不便。

基于上述的分析,微表情识别是一种判断热舒适状态的有效评价方法,使用微表情识别舒适状态的方法可以实现无接触、实时地判断人的热舒适状态,且比其他的评价方法有着明显的优势。

4 结论

结合主观问卷和皮肤温度、肌电信号生理参数,研究基于人的面部微表情来判断热舒适性的可行性,同时还对比分析了主观问卷、皮肤温度、微表情、面部温度、肌电信号5种不同评价方法,主要的结论如下:

1) 外界环境温度的改变会引起人的面部运动单元的变化,通过识别人面部微表情能准确地判断人的热舒适状态,是一种有效的热舒适评价方法。

2) 和其他热舒适评价方法相比,微表情识别方法在保证正确率的基础上,可以实现无接触、实时地判断人的热舒适状态,因此相比于其他的方法有自己独特的优势。

本研究在已有微表情识别相关研究的基础上补充了有关生理参数的数据分析,为之后面部识别模型的优化提供了相关数据支持。表情识别作为一种新型的评价技术,能做到实时且非接触地评估人的舒适状态,这为改善室内环境提供了一种新的参考。

参考文献(References):

- [1] GUAN H Y, HU S T, LU M L, et al. Analysis of human electroencephalogram features in different indoor environments[J]. *Building and Environment*, 2020, 186: 107328.
- [2] ZHAO R Y, SUN S F, DING R Y. Conditioning strategies of indoor thermal environment in warm climates[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(12): 1281-1286.
- [3] MANISALIDIS I, STAVROPOULOU E, STAVROPOULOS A, et al. Environmental and health impacts of air pollution: A review[J]. *Frontiers in Public Health*, 2020, 8: 14.
- [4] YANG L, YAN H Y, LAM J C. Thermal comfort and building energy consumption implications: A review[J]. *Applied Energy*, 2014, 115(4): 164-173.
- [5] FANGER P O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering[J]. *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, 1972, 92(3): 225-240.
- [6] WANG Z J, NING H R, JI Y C, et al. Human thermal physiological and psychological responses under different heating environments[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2015, 52: 177-186.

- [7] LIU W W, LIAN Z W, LIU Y M. Heart rate variability at different thermal comfort levels[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 103(3): 361-366.
- [8] EKMAN P. Constants across culture in the face and emotion[J]. *Journal of Personality & Social Psychology*, 1971, 17(2): 124-129.
- [9] PARKINSON T, DEDEAR R, CANDIDO C. Thermal pleasure in built environments: Alliesthesia in different thermoregulatory zones[J]. *Building Research and Information*, 2016, 44: 20-33.
- [10] WAYE K P, BENGTSSON J, RYLANDER R, et al. Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance[J]. *Life Sciences*, 2002, 70(7): 745-758.
- [11] HU S T, SUN J, ZHANG J, et al. Thermoacoustic environment comfort evaluation method based on facial micro-expression recognition[J]. *Building and Environment*, 2022, 221: 109263.
- [12] MEKJAVIC I B, YOGEV D, CIUHA U. Perception of thermal comfort during skin cooling and heating[J]. *Life*, 2021, 11(7): 681.
- [13] RAULT C, SANGARÉ A, DIAZ V, et al. Impact of sleep deprivation on respiratory motor output and endurance: A physiological study[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2020, 201(8): 976-983.
- [14] TONG L, SUN J H, HU S T. Analysis of the relationship between thermal comfort and salivary IgE in healthy adults under abrupt temperature[J]. *Building and Environment*, 2022, 207: 1-8.
- [15] HUIZENGA C, ZHANG H, ARENS E, et al. Skin and core temperature response to partial- and whole-body heating and cooling[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29(7): 549-558.
- [16] LARSEN J T, NORRIS C J, CACIOPPO J T. Effects of positive and negative affect on electromyographic activity over zygomaticus major and corrugator supercilii[J]. *Psychophysiology*, 2010, 40(5): 776-785.
- [17] SATO W, FUJIMURA T, SUZUKI N. Enhanced facial EMG activity in response to dynamic facial expressions[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2008, 70(1): 70-74.
- [18] DIMBERG U. Facial reactions to facial expressions[J]. *Psychophysiology*, 1982, 19(6): 643-647.
- [19] LYU J, DU H, ZHAO Z S, et al. Where should the thermal image sensor of a smart A/C look?: Occupant thermal sensation model based on thermal imaging data[J]. *Building and Environment*, 2023, 239: 110405.
- [20] Engineers A C. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy[S].
- [21] LIBRARY W E. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1979, 2(1): 56-57.
- [22] ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment; Instruments for measuring physical quantities[S].
- [23] STOJANOVIC M N, RANDJELOVIC P J, PAVLOVIC D, et al. An impact of psychological stress on the interplay between salivary oxidative stress and the classic psychological stress-related parameters[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 1(8): 6635310.
- [24] DU C Q, LI B Z, LIU H, et al. Quantification of personal thermal comfort with localized airflow system based on sensitivity analysis and classification tree model[J]. *Energy Buildings*, 2019, 194: 1-11.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)