

纺织品触觉舒适性评价方法研究现状

周语箫^a 沈 娅^a 薛文良^{a,b} 马颜雪^{a,b}

东华大学 a. 纺织学院, b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620

摘要: 在分析纺织品触觉舒适性生理机制的基础上, 从心理指标评价方法、物理指标评价方法、生理指标评价方法 3 个维度, 系统总结纺织品触觉舒适性评价的研究现状, 指出各评价方法的特点与局限性, 探讨未来研究方向。

关键词: 纺织品; 触觉舒适性; 心理指标评价方法; 物理指标评价方法; 生理指标评价方法; 脑电图 (EEG); 事件相关电位 (ERP)

中图分类号: TS 941. 19

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)03-0041-08

Research status of evaluation methods for textile tactile comfort

Zhou Yuxiao^a, Shen Ya^a, Xue Wenliang^{a,b}, Ma Yanxue^{a,b}

a. College of Textiles; b. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Based on the analysis of physiological mechanisms of textile tactile comfort, the research status of textile tactile comfort evaluation was systematically summarized from three dimensions, which were psychological index evaluation method, physical index evaluation method, and physiological index evaluation method. The characteristics and limitations of various evaluation methods were pointed out, and future research directions were discussed.

Keywords: textile; tactile comfort; psychological index evaluation method; physical index evaluation method; physiological index evaluation method; electroencephalogram (EEG); event-related potential (ERP)

在人体与纺织品之间, 触觉是最基础的一种互动体验。纺织品触觉舒适性反映人体皮肤在接触纺织品时所获得的主观感受, 其将直接影响产品的市场吸引力。目前, 有关纺织品触觉舒适性与其影响因素关联性的理论研究尚不全面, 生产者大多依赖

经验, 或通过试错法选择材料、设置工艺参数并反复打样, 开发触觉合适的纺织品, 过程十分费时费力^[1]。有效的纺织品触觉舒适性评价方法有助于量化主观感受, 建立触觉舒适性与其影响因素之间的定量关联, 提升产品开发效率, 从而更好地满足消

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2232025G-06); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (71704021)

收稿日期: 2025-01-13

作者简介: 周语箫, 女, 2001 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为纺织品触觉舒适性的评价

通信作者: 马颜雪, 副教授, 博士, 主要研究方向为纺织品设计, yxma@dhu.edu.cn

费者需求。

本文将梳理近年来较为常用的纺织品触觉舒适性评价方法,分析并比较各种方法的特点,以期为深入研究和发 展纺织品触觉舒适性评价方法提供思路 和方向。

1 纺织品触觉舒适性生理基础

触觉是人体探知外部世界的重要感觉通道^[2]。当纺织品与人体皮肤接触时,两者间的力学交互过程会带给皮肤摩擦、包裹和压缩等刺激。如图 1 所示;皮肤内部的触觉感受器首先捕捉到这些刺激,并将它们转化为相应的神经电位信号;随后,这些信号沿传入神经传递,经脊髓、脑干最终抵达大脑皮层的特定加工区域;最后,信号经传出神经到达效应器。在这一系列过程中,人体形成了对纺织品的触觉认知^[3]。

与触觉相关的感受器主要有 5 种(表 1),它们

物理指标评价方法: 基于纺织品物理指标

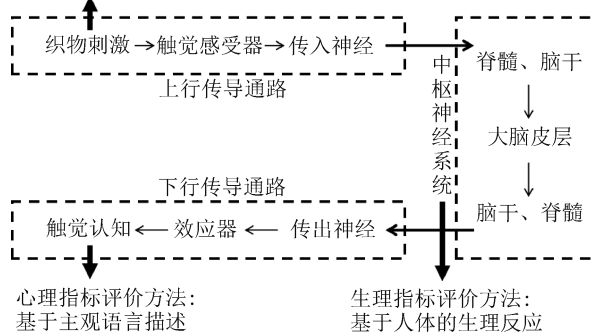


图 1 人体触觉响应机制

Fig. 1 Human tactile response mechanisms

分别是 Merkel 小体、Ruffini 小体、Meissner 触觉小体、Pacianian 环层小体和游离神经末梢^[4,5]。其中,前 4 种触觉感受器主要分布于无毛皮肤区,如指尖、掌心等部位。不同的触觉感受器嵌于皮肤组织的深度不同,它们对触觉刺激的敏感性、分辨率和适应特性等均有差异。

表 1 人体触觉感受器

Tab. 1 Tactile receptors in human body

项目	Merkel 小体	Ruffini 小体	Meissner 触觉小体	Pacianian 环层小体	游离神经末梢
分布区域	指尖皮肤及汗腺尖端	真皮层	靠近皮肤表面的真皮乳头层	真皮层及更深层组织	复层上皮
感官功能	对持续接触刺激敏感,能感知形状和纹理	对切向力(压觉)及高频振动刺激敏感	对轻压、低频振动刺激敏感,能辨识物体质地	对关节处侧向运动、皮肤拉伸刺激敏感	与触觉情绪的产生相关,能感受痛觉和痒觉
传入神经	A β 纤维	A β 纤维	A β 纤维	A β 纤维	A β 纤维及无髓鞘 C 纤维

触觉认知产生的同时,情绪也会在一定程度上被唤醒。纺织品的触觉舒适性是人体情绪的一种外在体现。触觉能够引发积极的情感体验,例如:儿童通过触摸阿贝贝(过渡性客体)可获得安全感与舒适感;柔软的毯子可以改善睡眠质量;等等。但触觉也能引发负面情绪,如:粗糙的布料接触皮肤时可能会引发个体不适感或厌烦感;毛羽划过皮肤表面会引起个体警觉反应;等等。

当前,学界普遍认为,触觉影响情绪的生理机制与人体皮肤中的特定传入神经——无髓鞘 C 纤维密切相关。无髓鞘 C 纤维主要分布于多毛皮肤区域,如手臂与腿部^[6],其对轻柔、缓慢的皮肤触觉表现出高度的敏感性^[7]。触觉所携带的情绪信息可通过无髓鞘 C 纤维传导,经脊髓丘脑束投射至岛叶区域,并在诸如杏仁核、内侧前额叶皮质及后颞上回

等构成的“社会脑”网络关键部位进行深度处理^[8]。这些脑区与情绪调控等紧密相关,并共同影响个体对触觉刺激 的响应。尽管无髓鞘 C 纤维是触觉情绪信息的特异性传导媒介,但日常生活中,人们亦能在缺乏无髓鞘 C 纤维的手心区域获得愉悦的触觉感受^[9]。有研究表明,在没有无髓鞘 C 纤维分布的皮肤区域,个体能够凭借之前的触觉记忆,对由 A β 纤维传导的、涉及速度与力度等特征的辨识性触觉信息做出情绪上的感知,进而使这些区域也能在一定程度上间接接收并处理触觉情绪信息^[10]。

纺织品的肌理特性多样,其与人体皮肤的交互作用也颇为复杂。因此,综合、客观地评价触觉舒适性,有助于开发满足多样化使用需求的纺织品。目前,触觉舒适性评价方法主要分为心理指标评价方法、物理指标评价方法和生理指标评价方法 3 类。

2 心理指标评价方法

纺织品触觉舒适性的心理指标评价方法以被试触摸纺织品后做出的主观语言描述为基础。当外界刺激作用于被试感觉器官产生感受时,被试通过评分、排序等方法量化感受,形成对纺织品触觉舒适性的评价。Tadesse 等^[11]依据 10 项织物触觉特性,对功能性纺织面料手感进行了全面评价。其采用统计分析的方法,验证了主观评价中收集的感官数据的可靠性,并通过小组成员间评价结果的一致性检验,成功构建了针对功能性纺织面料触觉舒适性的评价体系。

纺织品触觉舒适性的心理指标评价方法多以专业心理学方法作为研究工具,如表 2 所示,其中语义区分量表(semantic differential scale)法和李克特量表(Likert scale)法在数量化自我报告中应用较多。语义区分量表由一系列两极形容词对组成,例如“粗糙的-光滑的”“柔软的-硬挺的”等;李克特量表由一系列陈述组成,每项陈述设“非常同意”“同意”“不一定”“不同意”“非常不同意”5 种回答,分别记 5、4、3、2、1 分。语义区分量表关注被试的情感感知,通过捕捉不同纺织品触觉舒适性的细微差别,实现对纺织品触觉舒适性的定性分析;李克特量表法^[12-13]关注被试对纺织品相关陈述的看法,使用便捷,但容易错过对较为复杂感受的捕捉。

表 2 心理指标评价方法中常用的量表工具

Tab. 2 Scale tools commonly used in psychological index evaluation methods

项目	数量化自我报告	图形化自我报告
方法	语义区分量表法、李克特量表法	非言语自我情绪评定工具、情绪自我评估量表
概述	通过量化手段评估、描述或分析个体的自我认知、偏好等主观感受	采用可视化的卡通图像代表不同情绪或情绪状态,使用愉悦度和唤醒度描述自我情绪反应
优点	简单易用,是感官评价中普遍使用的方法	不需要文字基础,并且可以跨语言载体、文化环境
缺点	依赖语言系统;在跨语言文化情境下,以及不具备复杂语言能力的人群中,使用较困难	某些复杂的情绪或感官变化可能难以通过卡通人物准确表达,表达的深度和广度有限

使用心理指标评价方法进行纺织品触觉舒适性相关研究时,建立固定的手执范式或提供标准参考织物,可以降低个体差异带来的影响,提高评价结果的可靠性。胡吉永^[14]在使用触摸法评价织物质感时发现,无论被试是否为该领域的专家,只要被试采用相对固定的手执范式,评价结果都会呈现一致性。Darden 等^[1]在应用定量描述分析方法指导被试对不同材质的纺织品进行触觉评价时发现,若在评价过程中提供“高”和“低”基准确的参考织物,则评价结果具有统计意义上的可复现性。

然而,心理指标评价方法所得感觉受被试个人喜好、经历、敏感度及专注度等多重随机因素影响^[15-16],评价结果缺乏严谨性和稳定性,故该方法在适用性上存在一定的局限,难以用于量化标准的制定。尽管如此,该方法仍凭借直接、综合的特点,以及可在一定程度上反映材料质感的优点,成为了定性评价的一种重要方法。

3 物理指标评价方法

物理指标评价方法通过测量纺织品相关物理性能指标,评估纺织品的触觉舒适性。该方法主要研究织物的手感风格。需要注意,织物的手感风格并不等同于触觉舒适性。手感风格是织物的固有属性,而触觉舒适性更关注纺织品物理属性对个体感官和情绪的影响。尽管物理指标评价方法仅反映织物的性质,但仍可以为触觉舒适性研究提供有效的参考。

物理指标评价方法的发展历程如图 2 所示。这类评价方法可追溯至 1930 年 Peirce 提出的悬臂梁法^[17]。该方法首次将弯曲长度和弯曲刚度作为指标用于评估织物的刚柔性,这标志着从织物物理性能的角度探索手感评价的开始。20 世纪五六十年代,有关织物手感风格的研究显著增多,众多学者使用 Instron 万能材料试验机对织物手感实施

系统的测试与评估^[18-20]。20世纪70年代,对织物手感风格的研究达到一个高峰,日本科学家创新性地开发出 KES-F (Kawabata evaluation system for fabric) 风格仪,用于低应力条件下测量织物的物理性能,并据此评价织物手感。KES-F 风格仪通过构建回归模型,将织物的客观物理性能指标与主观基础手感指标、综合手感相结合,形成了“基本物理量-基础手感-综合手感”的三级评价体系^[21-22]。

但这一成果基于日本纺织服装行业对大量织物的主观手感评价,因此具有一定的地域局限性。20世纪90年代,澳大利亚科学家推出了 FAST (fabric assurance by simple testing) 风格仪,主要用于测定织物的低应力力学性能和尺寸稳定性指标,尤其适用于评估织物的成衣加工适应性^[23]。此外,其低应力力学性能测试结果可作为织物手感风格评价的参考。



图2 织物手感物理指标评价方法发展历程

Fig. 2 Development progress of physical index evaluation methods for fabric handfeel

KES-F 和 FAST 风格仪都属于多台多测多指标式评价系统,二者的区别归纳于表3。多台多测多指标式评价系统通过多台仪器测试织物的多项物理性能指标,并以此综合评价织物手感风格。以 KES-F 风格仪为例,其由4台试验仪组成,分别是 KES-FB1 拉伸与剪切试验仪、KES-FB2 弯曲试验仪、KES-FB3 压缩试验仪、KES-FB4 表面摩擦及粗糙度变化试验仪。KES-F 风格仪通过分析织物在拉伸、弯曲、压缩及表面摩擦等力学行为下的表现,获得与织物触感相关的16项性能指标,以此客观评价织物的手感风格特征。多台多测多指标式评价系统是发展最早、当前应用最为广泛的一类织物手感风格评价系统,但价格高、测试耗时长,因此学术界又不断探索并研发出单台多测多指标式及单台单测多指标式评价系统,以克服上述局限。

表3 KES-F 与 FAST 风格仪对比

Tab. 3 Style testers comparison between KES-F and FAST

项目	KES-F 风格仪	FAST 风格仪
测试速度	较慢,适合实验室研究	快速,适合工业化生产
测试指标	全面评估物理性能和手感风格	侧重于物理性能和加工性能
设备成本	较高	较低
操作难度	复杂,需要专业培训	简单,易于操作

单台多测多指标式评价系统通过将附属装置加装于主设备上,实现了单台仪器的连续测试,并可输出多项织物物理性能指标。如20世纪80年代由上海纺织科学研究院研制的 YG-821 型织物风格仪^[24],仅用1台传感器便能检测织物的弯曲、摩擦、压缩、交织、起拱变形及平整度等多项性能指标,并能依据测得的指标数据对织物手感风格进行评价。

单台单测多指标式评价系统通过单台仪器单次测量获得多个与织物手感风格相关的指标。该类评价系统不仅提升了测试效率,还增强了测量结果的准确性和综合性,现已成为基于物理指标的织物手感风格评价方法的主流。例如,由美国加州大学戴维斯分校的潘宁教授与欣赛宝(Nucybertek)公司共同研制的 PhabrOmeter[®]系统,以环形测试方法为理论基础,通过抽拔或推压织物穿过环状的喇叭口或圆环,构造复杂的织物形变,以模拟人手触摸织物时织物的受力与变形,最后输出载荷-位移曲线、织物手感指纹图,以及织物相对手感等可供分析的量化

数据,表征织物的手感风格特征^[25]。PhabrOmeter[®]系统的测试指标相互独立,这在一定程度上降低了分析的难度和误差。东华大学和南通宏大实验仪器有限公司联合研发的 CHES-FY 纺织品手感评价仪,通过模拟人手对织物进行的拉、压、捏、揉、搓等动作,仅 1 次移动即可完成织物质量以及弯曲、摩擦、拉伸、松弛、压缩、剪切等性能指标的测量^[26-27]。该仪器构造简单,结构紧凑、轻巧,在一定程度上弥补了现有评价系统构造复杂、价格高昂等的不足。PhabrOmeter[®]系统和 CHES-FY 纺织品手感评价仪的对比如表 4 所示。

表 4 PhabrOmeter[®]系统和 CHES-FY 纺织品手感评价仪的对比

Tab. 4 Comparison between PhabrOmeter[®] system and CHES-FY fabric handfeel evaluation instrument

项目	PhabrOmeter [®] 系统	CHES-FY 纺织品手感评价仪
评价指标	主要输出整体手感值,但缺乏具体的细分指标	提供压缩、弯曲、摩擦等多个性能指标
测试速度	快,通常在数秒内完成	慢,需逐项测量各性能指标
适用性	适用于新工艺评价和产品质量控制	适用于需获取详细性能指标的场合,如研发和质量控制等

物理指标评价方法通过量化织物的各项物理性能指标,并结合心理指标,对织物手感风格进行评价。相较于单纯依赖心理指标的评价方法,物理指标评价方法的结论更为客观、可靠。然而,在以 KES-F 风格仪为代表的织物手感风格研究中,织物用途和服装款式也被作为重要的分类依据。这些依据虽然较直观,易为业界所接受,但试验结果缺少生物学方面的清晰解释,且不具备作为标准的恒定性特征,故缺乏普适性。除此之外,现有关于物理指标评价方法的研究大多基于纺织品自身性能展开,虽然适用于企业对现有纺织品展开测试,但难以反映纺织品触觉舒适性的本质感知。因此,纺织品触觉舒适性评价逐渐聚焦生理指标的考量,且这已成为该领域的发展趋势。

4 生理指标评价方法

生理指标评价方法以人体的生理反应为基础,通过心率、呼吸、体表温度、肌电等指标反映人体在外界刺激下发生的生理变化。这种由外界刺激产生的生理反应是一种本能反应,能客观地展现刺激对人体感官的作用,从而真实地表达人体的舒适感。

随着生物神经科学技术的发展,以及纺织品舒适度感知源自人体大脑这一认知的普及^[28],生理指

标评价方法中的脑电信号表征技术在纺织品触觉感知领域的应用越来越广泛。目前,常用的技术有脑电图(electroencephalogram, EEG)^[29-30]、事件相关电位(event-related potential, ERP)^[31]等。

4.1 EEG

EEG 是通过精密仪器,将头皮下大脑皮层中的自发性生物电位放大并记录得到的一种图形。具体来说,它利用贴在头皮上的电极,记录大脑在一段时间内的自发电活动,属于脑电的间接检测方法,也是认知神经科学领域研究知觉的重要工具。EEG 可以客观评估织物与皮肤相互作用时大脑的实时反应。Li 等^[32]通过 EEG 研究了纺织品反复摩擦人体前臂皮肤时的触觉舒适性,发现人体皮肤不适感在法向力较大时加剧,但随着测试次数的增加,不适感逐渐减弱,且不适程度与脑电信号振幅一致。

目前的研究表明,EEG 中的 α 波、 θ 波与纺织品的触觉舒适感呈正相关, β 波、 γ 波则与大脑紧张及接触不适感等关联^[33-34]。Zhang 等^[35]利用 EEG 记录了被试触摸评价面料柔软度时的脑电位,并将评价结果与 KES-F 风格仪测得的物理指标进行比较,发现 α 波功率、 α 节律活动区域与面料柔软度的主观评价结果及物理指标显著正相关。Greco 等^[36]对织物纹理特性与 EEG 频段特征建立关联,分别使用蚕丝织物(愉悦刺激)和麻织物(非愉悦刺激)进行

反复摩擦接触。EEG 结果显示,愉悦刺激主要增强 θ 波、 α 波的活动,非愉悦刺激显著激活 β 波并呈现右半球偏侧化,符合负面情绪处理机制。这验证了 EEG 中的 α 波和 β 波对纺织品触觉刺激舒适感的区分性。

与此同时,EEG 技术还被用于纺织品触觉舒适性评价中被试的筛选。Ye 等^[37]通过监测 EEG 中 α 波的变化和交感神经系统、迷走神经系统的活动,观察织物与皮肤静态和动态接触时被试的生理信号,判断被试对纺织品的触觉敏感度。

4.2 ERP

ERP 技术是利用神经电信号表征人体大脑认知活动的一种方法。该方法将刺激定义为诱发事件,当刺激作用于人的感觉系统或大脑的某一部位时,施加或停止刺激会引发相应脑区的电位变化^[38-39]。ERP 技术反映了大脑对刺激的注意、辨别、比较、记忆、判断及认知等活动。基于 ERP 技术可以实时监测纺织品与皮肤接触这一刺激产生时相关脑区的电位变化情况,进而表征纺织品的触觉舒适性^[40]。

目前,相关研究通常基于 ERP 成分的振幅和潜伏期评价纺织品的触觉舒适性。ERP 利用叠加技术从 EEG 中获取图像,并经滤波等一系列处理后得到相应电位成分。在诱发的 ERP 中,可发现一系列具有正负极性的显著信号,分别以正极性 P 和负极性 N 命名^[28]。ERP 成分的峰值越大,表明注意力和认知程度越高;峰值潜伏期越短,意味着对试验任务的响应速度越快,敏感性越高^[41]。

ERP 中的 N1、P2、P3 电位都与纺织品的触觉舒适性相关,可作为评估大脑神经元的神经生理反应指标,用于区分织物触觉舒适性的细微差别。Song 等^[42]采用 ERP 法评估服装的触觉舒适性,发现当被试接触较光滑的织物时,P3 波的潜伏期较短,振幅较小。Yuan 等^[43]采用具有超高时间分辨率的 ERP 技术,监测不同触觉特性织物刺激下的大脑躯体感觉区,提取并分析了相关电位的信号变化。结果表明,N1 的振幅与织物的硬挺度呈正相关,P2、P3 的振幅与织物的平滑度、柔软度呈负相关。与 EEG 法相比,ERP 技术与人的认知过程紧密联系,且在时间分辨率、检测安全性和普适性上更具优势。

生理指标评价方法为客观量化纺织品触觉舒适性提供了途径。虽然生理指标评价方法得到的波形

信号易受外界环境及被试生理因素(如年龄、性别、健康状况等)影响,且表征结果存在不够直观的问题,但相较于传统的主观评价方法(如问卷调查、专家手感评估等),其减少了主观因素的影响,提高了评价结果的准确性和可靠性,有助于建立统一的评价标准。

当前,关于触觉舒适性生理指标评价方法的研究普遍采用与心理指标评价方法相结合的策略。心理指标评价方法能直接获取用户的主观感受,而生理指标可客观记录使用者对纺织品无意识的生理响应,二者协同应用有助于构建更全面、更可靠的评价体系。张梅梅^[44]通过同步分析干燥状态下纯棉、蚕丝等织物的感官评分与核磁共振数据发现,舒适度高的织物引发的脑区激活程度较低。此类研究不仅验证了生理-心理数据的互补性,也为触觉舒适性的神经机制研究提供了新的路径。

5 结束语

触觉感知是用户对纺织品最基本的感受,它构成了用户体验的核心,并直接影响用户最终的购买决策。3 类纺织品触觉舒适性评价方法对比如表 5 所示。心理指标评价方法依赖被试主观感知,直观性强但客观性有不足,适用于定性评价和小规模研究;物理指标评价方法通过量化织物物理特性进行评价,结论较心理指标评价方法更为客观可靠,易被业界接受,但缺乏标准恒定性、普适性,缺少生物学方面的支撑;生理指标评价方法通过测量被试生理反应评价纺织品触觉舒适性,能客观反映刺激对人体的感官作用,适用于定量评价和标准化研究,现已成为该领域的主流研究方向。

如今,纺织品触觉舒适性评价逐步实现了从经验到科学、从定性到定量的转变,但仍存在一些亟待解决的问题。未来,纺织品触觉舒适性研究可聚焦以下方面:

(1) 进一步探究生理指标与纺织品肌理特征等之间的定量关系,构建预测模型。

(2) 生理指标评价数据通常受生理信号不稳定或外界环境因素干扰,故识别干扰因素并进行有效的控制,是未来该方法研究和应用的重点。

(3) 结合物理指标评价方法、心理指标评价方

表 5 纺织品触觉舒适性评价方法比较

Tab. 5 Comparison of evaluation methods for textile tactile comfort

项目	心理指标评价方法	物理指标评价方法	生理指标评价方法
评价的客观性	低,依赖主观感知,结果不严谨、不稳定	中高,基于量化的物理特性,结论较客观可靠	高,基于测量的生理反应,减少了主观因素影响,量化结果客观
评价的直观性	强,能直接反映主观感受,易于理解	中等,量化的数据需结合专业知识来解释	弱,波形信号复杂,需处理分析后方能加以解释
优点	可直接反映被试感受,易于理解和接受	量化数据较为客观可靠,易被业界接受	量化数据客观,减少了主观因素影响,有助于建立统一标准
缺点	主观性强,结果不稳定,难以用于制定定量标准	缺乏恒定性、普适性,缺少生物学方面的支撑	波形信号复杂,需专业处理分析,直观性弱

法和生理指标评价方法建立多元综合评价体系,可减少单一方法的局限性。

(4)进行个体差异量化分析,如分析个体差异对物理感知阈值、心理评价标准及生理响应模式的影响,开发个性化触觉舒适性预测算法等。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] DARDEN M A, SCHWARTZ C J. Investigation of skin tribology and its effects on the tactile attributes of polymer fabrics [J]. *Wear*, 2009, 267 (5/6/7/8): 1289-1294.

[2] HERTENSTEIN M J, KELTNER D, APP B, et al. Touch communicates distinct emotions [J]. *Emotion*, 2006, 6(3): 528-533.

[3] MCGLONE F, WESSBERG J, OLAUSSON H. Discriminative and affective touch: sensing and feeling [J]. *Neuron*, 2014, 82(4): 737-755.

[4] JOHNSON K O. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2001, 11(4): 455-461.

[5] 胡吉永, 丁辛, 王如彬. 织物手感的认知原理及其研究 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(5): 677-681.

[6] MORRISON I, LÖKEN L S, MINDE J, et al. Reduced C-afferent fibre density affects perceived pleasantness and empathy for touch [J]. *Brain*, 2011, 134 (4): 1116-1126.

[7] ACKERLEY R, WASLING H B, LILJENCRANTZ J, et al.

Human C-tactile afferents are tuned to the temperature of a skin-stroking caress [J]. *Journal of Neuroscience*, 2014, 34(8): 2879-2883.

[8] HENSSEN D J H A, KURT E, KOZICZ T, et al. New insights in trigeminal anatomy: a double orofacial tract for nociceptive input [J]. *Frontiers in Neuroanatomy*, 2016, 10: 53.

[9] 杨虞, 李东, 崔倩, 等. 触觉的情绪功能及其神经生理机制 [J]. *心理科学进展*, 2022, 30(2): 324-332.

[10] LEWIS M, HAVILAND-JONES J M, BARRETT L F. *Handbook of emotions* [M]. 3rd ed. New York: The Guilford Press, 2008: 272-292.

[11] TADESSE M G, HARPA R, CHEN Y, et al. Assessing the comfort of functional fabrics for smart clothing using subjective evaluation [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, 48(8): 1310-1326.

[12] VENTURA M, MACIS A, MANISERA M, et al. On the equivalence of two mixture models for rating data [J]. *AStA - Advances in Statistical Analysis*, 2024, 21: 1-25.

[13] TU Z Y, WANG W. Perceptual imagery of soft sofa fabrics based on visual-tactile evaluation [J]. *BioResources*, 2024, 19(4): 8427-8442.

[14] 胡吉永. 基于触觉认知的织物质感的形成机理研究 [D]. 上海: 东华大学, 2008.

[15] LUNA R, HERNÁNDEZ A, BRODY C D, et al. Neural codes for perceptual discrimination in primary somatosensory cortex [J]. *Nature Neuroscience*, 2005, 8(9): 1210-1219.

[16] DE LAFUENTE V, ROMO R. Neural correlate of subjective sensory experience gradually builds up across cortical areas [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103 (39): 14266-14271.

- [17] 杨栋梁. 织物手感及其评价方法(一)[J]. 印染, 1997, 23(4): 30-32.
- [18] TATEISHI M, UYEDA M, NAKAJIMA S, et al. Studies on the instrumental method for evaluating the handling of fabrics[J]. Journal of Home Economics of Japan, 1959, 9(6): 327-333.
- [19] BOGATY H, HOLLIES N R S, HARRIS M. The judgment of harshness of fabrics[J]. Textile Research Journal, 1956, 26(5): 355-360.
- [20] HOWORTH W S, OLIVER P H. The application of multiple factor analysis to the assessment of fabric handle[J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1958, 49(11): 540-553.
- [21] KAWABATA S. Characterization method of the physical property of fabrics and the measuring system for hand-feeling evaluation[J]. Sen'i Kikai Gakkaishi (Journal of the Textile Machinery Society of Japan), 1973, 26(10): 721-728.
- [22] KAWABATA S, NIWA M, YAMASHITA Y. Recent developments in the evaluation technology of fiber and textiles: toward the engineered design of textile performance[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 83(3): 687-702.
- [23] LY N G, TESTER D H, BUCKENHAM P, et al. Simple instruments for quality control by finishers and tailors[J]. Textile Research Journal, 1991, 61(7): 402-406.
- [24] 翟亚丽. 纺织测试仪器操作规程[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2007: 211.
- [25] PAN N, YEN K C. Physical interpretations of curves obtained through the fabric extraction process for handle measurement[J]. Textile Research Journal, 1992, 62(5): 279-290.
- [26] 孙懿, 杜赵群, 刘萧. 新型织物风格测量仪 CHES-FY 纺织品手感风格评价仪[J]. 纺织检测与标准, 2017, 3(6): 1-5.
- [27] 高瑞强. 基于 CHES-FY 系统的织物摩擦性能表征[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [28] 苑洁, 娄琳, 王其才. 织物触觉舒适度大脑感知技术研究进展[J]. 纺织学报, 2022, 43(9): 211-217.
- [29] ZHANG J N, HUANG Y H, YE F Q, et al. Evaluation of post-stroke impairment in fine tactile sensation by electroencephalography (EEG)-based machine learning[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4796.
- [30] BAGHDADI G, AMIRI M, FALOTICO E, et al. Recurrence quantification analysis of EEG signals for tactile roughness discrimination [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2021, 12(4): 1115-1136.
- [31] 苏家荣, 陈思, 叶婷, 等. 神经电生理法在纺织品舒适性评价中应用的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(9): 45-50.
- [32] LI W, PANG Q, JIANG Y S, et al. Study of physiological parameters and comfort sensations during friction contacts of the human skin [J]. Tribology Letters, 2012, 48(3): 293-304.
- [33] LEE H, KIM K, LEE Y J. Effect of compression pants on EEG spectrum[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2019, 32(2): 197-207.
- [34] MONDÉJAR T, HERVÁS R, JOHNSON E, et al. Analyzing EEG waves to support the design of serious games for cognitive training [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(6): 2161-2174.
- [35] ZHANG X X, YUE J, JIA J J, et al. An electroencephalogram study on softness cognition of silk fabric hand [J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107(12): 1601-1606.
- [36] GRECO A, GUIDI A, BIANCHI M, et al. Brain dynamics induced by pleasant/unpleasant tactile stimuli conveyed by different fabrics [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2019, 23(6): 2417-2427.
- [37] YE T, LIU F, LIU G, et al. Categorization of different types of people based on their electroencephalographic responses to fabric-skin contact [J]. Textile Research Journal, 2023, 93(7/8): 1747-1759.
- [38] 郭丞, 张日辉. 电生理学在康复中的应用[J]. 包头医学院学报, 2009, 25(2): 229-231.
- [39] VAUGHAN H G, COSTA L D, GILDEN L. The functional relation of visual evoked response and reaction time to stimulus intensity[J]. Vision Research, 1966, 6(11/12): 645-656.
- [40] KAPPENMAN E S, FARRENS J L, ZHANG W, et al. ERP CORE: an open resource for human event-related potential research[J]. NeuroImage, 2021, 225: 117465.
- [41] 苑洁, 翟淑娜, 娄琳, 等. 基于事件相关电位技术的织物舒适度研究进展[J]. 纺织学报, 2023, 44(6): 225-231.

(下转第 49 页)