

神经电生理法在纺织品舒适性评价中应用的研究进展

苏家荣¹ 陈思² 叶婷³ 许福军⁴ 邱夷平^{1,2,4}

1. 新疆大学 纺织与服装学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 泉州师范学院 纺织与服装学院, 福建 泉州 362000;

3. 温州大学 美术与设计学院, 浙江 温州 325000;

4. 东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要: 纺织品的舒适性是评价服装的重要指标之一, 其与人们的日常生活和工作息息相关。神经电生理法作为一种客观评价纺织品舒适性的方法, 具有较大的优势。介绍脑电图、肌电图、事件相关电位和心电图等 4 种神经电生理评价方法, 概括其在接触舒适性、压感舒适性和热湿舒适性中的应用, 总结分析影响神经电生理信号的主客观因素, 提出适用不同舒适性的神经电生理评价方法, 以为纺织品舒适性的研究和评价提供新思路。

关键词: 神经电生理法; 纺织品舒适性; 脑电图; 肌电图; 事件相关电位; 心电图

中图分类号: R 333.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)09-0045-06

Research progress on the application of neuroelectrophysiological method in textile comfort evaluation

Su Jiarong¹, Chen Si², Ye Ting³, Xu Fujun⁴, Qiu Yiping^{1,2,4}

1. College of Textiles and Clothing, Xinjiang University, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. College of Textiles and Clothing, Quanzhou Normal College, Quanzhou 362000, Fujian, China;

3. College of Art and Design, Wenzhou University, Wenzhou 325000, Zhejiang, China;

4. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The comfort of textile is one of the important indexes of evaluate clothing, which is closely related to people's daily life and work. As an objective method to evaluate textile comfort, neuroelectrophysiological method has great advantages. Four neuroelectrophysiological evaluation methods, including electroencephalogram, electromyography, event-related potential and electrocardiogram, were introduced, and their applications in contact comfort, pressure comfort and heat and humidity comfort were summarized. Subjective and objective factors affecting neuroelectrophysiological signals were analyzed, and neuroelectrophysiological evaluation methods

基金项目: 国家自然科学基金(51903043); 福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT231083)

收稿日期: 2024-05-14

作者简介: 苏家荣, 女, 1999 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为神经电生理评价方法在舒适性中的应用

通信作者: 邱夷平, 教授, 研究方向为复合材料及神经电生理相关领域, ypqiu@dhu.edu.cn

suitable for different comfortability were proposed to provide new ideas for the study and evaluation of textile comfort.

Keywords: neurophysiological method; textile comfort; electroencephalogram; electromyography; event-related potential; electrocardiogram

随着生产工艺的发展,消费者对纺织品的要求越来越高。其中,纺织品舒适性是评价服装的重要指标之一。当人体皮肤与纺织品接触时,人体所形成的主观感受会涉及复杂的感知和舒适性问题。目前,评价纺织品舒适性的方法有很多,常用的有心理物理学法和物理指标法。其中,心理物理学法利用受试者对不同纺织品的主观感知来量化舒适性,如分档评分法、秩位评定法、语义差异法(SD法)等,但个体之间存在的职业、性别、年龄、所处环境、经验、言语表达等方面的差异会对研究结果产生一定的影响,故不具备普遍性和稳定性^[1];物理指标法通过量化纺织品物理特性来评估纺织品的舒适性,其指标包括透气性、吸湿性、保温性、柔软性等,但该评价过程没有受试者直接参与,缺乏心理学、神经学方面的理论支持,故仅用此法判断舒适性存在一定的局限性^[2]。神经电生理法是通过仪器记录人体器官、神经等组织电位变化的一种方法,其结果能真实反映外界刺激对人体产生的作用^[3],主要评价方法包括脑电图(EEG)、事件相关电位(ERP)、肌电图(EMG)、心电图(ECG)、功能磁共振成像(fMRI)等。现有研究更多的是将这些方法结合使用,以更加全面地评估受试者的舒适性。

当前,纺织品着装方面的舒适性主要有接触舒适性、压感舒适性和热湿舒适性等。其中,接触舒适性最为基础,其为皮肤与外界物体因接触而产生的不可回避的生理感受。本文将从神经电生理的主要评价方法及其在纺织品舒适性评价中的应用,以及影响神经电生理评价结果的因素入手,归纳适用于纺织品舒适性评价的神经电生理法优缺点,揭示神经电生理法评价纺织品舒适性的优势,以期对纺织品舒适性研究提供新思路。

1 神经电生理的主要评价方法

1.1 脑电图

脑电图记录的是人类大脑皮层上持续的节律自

发性的电位变化,其纵轴为大脑皮质中神经元细胞群活动的电位,横轴为时间^[4,5]。人体在不同的状态下呈现的脑电信号是不同的。目前,国际上根据波重复节律的不同,将脑电波统一分为4个频段—— δ 波(0.5~3 Hz)、 θ 波(4~7 Hz)、 α 波(8~13 Hz)和 β 波(14~30 Hz)^[6]。

潘志娟等^[7]研究发现, α 波的增加与情绪的稳定和放松状态有关。当人体感到舒适愉快时,脑电信号中 α 波增加;当人体感到紧张时, α 波的产生受到抑制。因此,通过测定脑电信号的变化,可判断受试者是否舒适。王艺霏^[8]在研究中提出, α 波能量百分比可用于表征人的正面情绪,即 α 波能量百分比越高,人体越感觉舒适。同时还比较了左右两侧枕部 α 波,发现左枕侧 α 波能量百分比更能用于表征人体着装时的正面感知能力。其研究还发现,受试者在裸体状态下受寒冷、紧张、不适等负面情绪影响后,左侧枕部 α 波明显受到抑制,而当受试者穿着衣物后,正面情绪增加,左侧枕部 α 波能量百分比上升。Wang等^[9]也证实了着装舒适性与左右枕侧 α 波有一定的关系。夏羽^[10]研究受试者系戴丝织物时的脑电信号发现, α 波和 θ 波的百分比皆随刺痒感的增加而逐渐下降, α 波、 β 波及 θ 波的百分比与丝织物面密度呈正相关,3种波与大脑的活跃度、兴奋度有关联。张晓夏^[11]研究发现,丝织物越光滑越柔软, α 波百分比越小, β 波百分比越大。

综上所述,脑电信号可用于纺织品舒适性评价,且在神经电生理领域,脑电图已广泛应用于纺织品舒适性的评价。

1.2 事件相关电位

事件相关电位是指中枢神经的任何部位对于故意刺激产生的电位变化,其主要由大量神经元的突触后电位同步总和形成。受刺激的部位可以是感觉器官、感觉神经、感觉通路上任意一点,也可以是与感觉器官有关的任何结构上的任意一点^[12]。因此,当对人体皮肤施加一定的外界刺激或停止刺激时,脑部的某些区域便会产生一定的电位变化^[13]。

Horiba 等^[14]将 3 种手感及材质完全不同的布料置于左前腕内侧,每隔 3 s 刺激 1 次,每种布料刺激 6 次,并记录事件相关电位曲线,发现触感与 P300 波显著关联。夏羽^[10]在触觉刺激试验中发现,P2 波属于早期成分,P3 波属于晚期成分,P2 波和 P3 波可作为织物触感知的评价指标。其中,P3 波和织物的触觉刺激联系密切。织物质地越柔软,舒适程度越高,P3 波振幅越小。

但事件相关电位只能表征为数不多的手感特征,且其波形复杂不易提取,故具体实施方案还有待进一步完善。

1.3 肌电图

肌电图是最早应用的神经电生理技术之一^[15]。关注肌电图波形的平均振幅和面积,可获知肌肉活动单位的激活数量和收缩行为,进而判断人体与纺织品的接触舒适性。平尾之靖等^[16]提到,人体前臂的肌肉放电能够在一定程度上反映织物表面的摩擦性能和凹凸程度,因此可用于评判织物的接触舒适性。且研究表明,在小臂放置电极获取的肌电信号,手部触摸织物得到的感官评价结果,以及 KES-F 织物风格仪测试得到的结果,三者关联程度很高。王传岭^[17]利用柔性织物传感器和肌电信号传感器实现了肌肉疲劳状态的识别与预测。史佳玲^[18]就袜口压力、肌电信号与运动速度三者构建了关联模型,其可为不同运动强度的袜口设计提供指导,使袜口满足运动员不同运动强度的需求,这也为肌电图的应用提供了新方向。

1.4 心电图

心率变异性(HRV)是心电图的一个重要指标,其分析方法有时域分析法、频域分析法和非线性分析法等 3 种。其中,频域分析法将变化的心率信号分解为多种不同能量的频域成分并加以分析^[19-20]。心率变异性一般受交感神经(SNS)和迷走神经(PNS)共同支配,且两者互为拮抗关系。其中,交感神经使人兴奋,迷走神经抑制人兴奋^[21]。因此,观察和分析心率变异性指标可以了解交感神经和迷走神经对身体的调节作用,进而判断受试者对外界刺激的感受。心电信号采集过程中,若采用织物电极,应关注材料的选择、结构的设计以及与皮肤的接触面积等因素,以免影响信号输出的稳定性和准确性^[22-23]。

2 神经电生理法在纺织品舒适性评价中的应用

表 1 整理了现有文献中纺织品舒适性用到的神经电生理评价方法。从表 1 可以看出,大部分神经电生理评价方法都适用于研究接触舒适性,而压感舒适性和热湿舒适性用到的神经电生理评价方法则相对有限。其中,心电图和脑电图是目前评估热湿舒适性的主要神经电生理方法。主观感受通常是多个舒适性综合的结果,但如何区分不同舒适性与不同神经电生理指标之间的关联度大小,如何量化表达,以及建立人的主观感受、物理指标和神经电生理指标三者之间的关系式等,都有待进一步的探索。

表 1 纺织品舒适性用神经电生理评价方法

Tab. 1 Neurophysiological assessment methods of textile comfort

舒适性类型	神经电生理评价方法
接触舒适性	脑电图、肌电图、心电图、事件相关电位、功能磁共振成像
压感舒适性	脑电图、心电图、肌电图
热湿舒适性	脑电图、心电图

2.1 接触舒适性

接触舒适性在纺织品舒适性中最为基础,当服装与人体发生接触时便会产生,而压感舒适性和热湿舒适性都是在接触的基础上进一步获得的。判断接触舒适性可从人体皮肤与织物接触时产生的刺痒感、冷暖感、压迫松紧感、刚柔感、黏体感及透气感等入手。

Hirao 等^[24]基于肌电图和事件相关电位 2 项生理指标,记录了受试者触摸不同织物时的反应,并得出事件相关电位与动态触摸关联性较大,肌电信号与织物客观属性关联较大的结论。王艺霏^[8]运用脑电图和肌电图对着装舒适性进行研究,提出肌电图中肌电位峰值与面积可作为织物接触舒适性的评判指标,但该结论未排除受试者个体差异,故后续研究受到一定的限制。夏羽^[10]发现,事件相关电位的 P2 波和 P3 波峰值与黏体感呈负相关,与大脑活跃度呈正相关,故可使用事件相关电位对纺织品黏体感的维度阈值进行判断,以进一步提高产品质量。

2.2 压感舒适性

医疗保健类、塑身类和体育竞技类服饰等会涉

及压感舒适性^[25]。纺织品的压感舒适性对人体健康来说十分重要,其会影响人体的消化系统、循环系统、呼吸系统、热平衡系统及生殖系统等。

尹玲^[21]就着装压力、心率变异性和脑电信号等3个指标建立了塑身腹带的着装压力舒适性预测评判系统,并通过比较心率变异性时域指标、MRR(相邻RR间期平均值)、SDNN(正常RR间期标准差)、RMSSD(相邻RR间期差值均方根),分析了不同部位着装压力的形成原因。刘运娟^[25]探究了腰部压感对脑电信号的影响,提出脑电 α 波功率与塑形腹带着装压力、着装压力主观舒适感呈正相关,与着装压力主观束缚感呈负相关的观点,并发现着装前后脑部顶区和枕区的压感 α 波功率差异较大,在P3、CPZ、CP4点位观察数据的准确性大幅提高。

综上,脑电信号的 α 波指标和心电信号的心率变异性指标对评价着装压感舒适性都具有参考价值,但当前的研究主要集中在人体表面压力感觉方面,有关压感触觉小体的内部反应和压力发生后自身调节作用机理的研究相对较少。

2.3 热湿舒适性

舒适的热湿环境不仅可以让人心情愉悦,还有利于身体健康^[26]。纺织品热湿舒适性的评价包括热舒适性和湿舒适性2个部分,其中湿舒适性又包括透湿率、透湿度、湿阻和芯吸高度等指标^[27]。

Gescheider等^[28]很早就指出表面温度会改变皮肤触觉感受器的灵敏度。姚穆等^[29]也提出,皮肤中的冷热感神经元反映的是接触物体的温度和神经元记忆的皮肤温度之差,而神经电生理法可以真实地表征人体的主观反应。潘黎^[30]研究发现,清醒状态下,心率变异性、心率和呼吸率可用于评价热舒适性,且清醒状态的舒适环境温度低于睡眠状态的舒适环境温度,对同一温度的热感觉也是清醒后低于睡眠前。Jeong等^[31]在模拟户外场景的人工气候室中,利用脑电信号评价穿着纯棉运动服和吸汗速干户外运动服的热湿舒适性,发现穿着户外运动服的受试者其 α 波相对功率较大,且 α 波和 β 波的相对强度也较大。这进一步表明,脑电图可用于评价热湿舒适性。但现有研究中,神经电生理法探索热湿舒适性仍将心率变异性及脑电活动的 α 波与 β 波作为关键指标。

3 影响神经电生理法评价织物舒适性的因素

3.1 接触方式

评价织物的某些特质时,织物与人体接触时的相对运动十分重要^[32]。Gibson^[33]提出皮肤与织物接触的方式有2种:一种是人体保持静止而织物处于相对运动状态,这种织物的接触舒适性是被动产生的,且在日常生活中较为常见;另一种是织物保持静止而人体处于相对运动状态,如手指或手掌以一定的频率或力度主动地反复摩擦织物,即主动触摸^[34]。潘志娟等^[35]提出主动触摸可以获得更多的感觉信息,其分辨风格差异的灵敏度和准确度最高。此外,手指与织物摩擦时对织物丰满度和粗糙度的分辨能力,相较于手指与织物保持静止状态时更高。

3.2 接触部位

与衣物接触的人体皮肤分有毛皮肤(四肢及大部分人体皮肤)和无毛皮肤(如手掌、手指等)2种,且大部分神经电生理研究也集中在这2种皮肤上。有毛皮肤和无毛皮肤所含刺激感受传入神经元的种类不同^[36],包括存在的感受器也有一定的差异^[37],故人体不同部位的灵敏度和阈值也不尽相同^[38]。有研究表明,有毛皮肤更易感受到愉悦、悲伤等情感^[39-40],且这种感觉大部分是先天的,不需要学习,而无毛皮肤更多地能感受到物体的触觉属性^[41],且这种感觉可通过后天学习或经验积累获得^[42]。

刘宇清^[43]研究着装舒适性时提出,受试者的前臂外侧皮肤(即有毛皮肤)受到织物的接触摩擦刺激时,大脑激活区比较集中,而手掌(即无毛皮肤)受到织物刺激时大脑激活区相互交连,可见织物手感是大脑中多个脑区联合活动的一种感知行为。潘志娟等^[35]用两点阈表示触觉敏感性,发现指尖部位对触觉的空间分辨率(即两点阈的倒数)约为手指其他部位的2倍,为手掌部位的数倍。因此,在神经电生理研究时,触觉能力分辨试验一般选择无毛皮肤测试。

3.3 受试者的选择

在进行神经电生理测试时,受试者的基本情况也非常重要,如性别、年龄、手感经历等的差异^[44]会使得试验数据个体差异较大。此外,每个人的触觉传入神经密度也不同,甚至同一个人不同皮肤区域

也会不同。目前,尚未有研究对人体触觉传入神经的密度和数量进行精确估计,但这些因素又使得不同的人对外界刺激的敏感程度不同^[45]。此外,受试者个体的基础情况,如身体质量指数(BMI)、左右利手等,以及受试者测试前的一些行为,如测试时的精神状态是否良好,测试前是否饮酒或服用了精神类药物,睡眠时间是否充足,饮食是否过度等,都会给神经电生理法研究结果带来影响。

Ye 等^[46]基于静态接触和动态接触测试了不同受试者皮肤接触织物时的脑电信号,分析发现受试者可分为 3 种类型,即高敏人群、中敏人群和低敏人群。Ye 等^[47]研究还发现,低敏人群的数据波动规律性不强,建议选择中敏人群进行神经电生理研究。

4 总结与展望

神经电生理法在评价纺织品舒适性方面具有很大的优势,特别是其不受被试者主观意识和言语表达的干扰,且具有实时性,可以提供更快速的反馈和评估,同时可以综合多种神经电生理信号,提供更为全面和细致的评价。针对不同的纺织品舒适性,选择合适、正确的神经电生理评价方法非常重要。神经电生理法灵敏度高,其研究结果受个体差异、意识状态、精神活动、外界刺激等诸多因素影响。因此,在进行相关研究时,需筛选受试者以降低影响。此外,织物与人体的接触部位也会影响测试结果。不同接触部位皮下传入神经单元不同,这使得接触织物时的触感也不同,且不同接触部位的接触舒适性差异和舒适度阈值区间还有待完善。最后,测试环境(如温湿度、噪声等)和测试时间也会对人体神经电生理法测试结果有一定影响。当然神经电生理法评价纺织品舒适性也存在一定的不足,建议今后在时间维度和舒适度阈值区间等方面展开进一步的研究。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] MATSUDAIRA M. Fabric handle and its basic

mechanical properties[J]. Journal of Textile Engineering, 2006, 52(1):1-8.

[2] 杨栋梁. 织物手感及其评价方法(一)[J]. 印染, 1997, 23(4): 30-32.

[3] SPIRONELLI C, MANFREDI M, ANGRILLI A. Beta EEG band: a measure of functional brain damage and language reorganization in aphasic patients after recovery [J]. Cortex, 2013, 49(10): 2650-2660.

[4] 刘净瑜. 运动想象脑电信号的识别方法及应用[D]. 北京:北京工业大学, 2009.

[5] 冯应琨. 临床脑电图学[M]. 北京:人民卫生出版社, 1980.

[6] 大熊辉雄. 临床脑电图学[M]. 周锦华,译. 北京:清华大学出版社, 2005:29.

[7] 潘志娟, 李栋高. 人体生理反应与纺织品感觉评价[J]. 苏州丝绸工学院学报, 2001, 21(3): 12-17.

[8] 王艺霏. 基于神经电生理学的着装接触舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.

[9] WANG Y Y, WANG Y P, ZHAO M M, et al. Experimental study of clothing tactile comfort based on electro-neurophysiology[J]. Fibric & Textiles in Eastern Europe, 2014, 22(4): 102-106.

[10] 夏羽. 基于神经电生理学的丝织物触感评价和认知研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.

[11] 张晓夏. 基于神经生理学的丝织物手感知机理研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.

[12] 韩济生. 神经科学纲要[M]. 北京:北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社, 1993.

[13] 伍国锋, 张文渊. 脑电波产生的神经生理机制[J]. 临床脑电学杂志, 2000, 9(3): 188-190.

[14] HORIBA Y, KAMIJO M, HOSOYA S, et al. Evaluation of tactile sensation for wearing by using event related potential[J]. Sen'i Gakkaishi, 2000, 56(1): 47-54.

[15] AGOSTINI V, GHISLIERI M, ROSATI S, et al. Surface electromyography applied to gait analysis: how to improve its impact in clinics? [J]. Frontiers in Neurology, 2020, 11: 994.

[16] 平尾之靖, 八木昭宏. 用生理反应评价织物风格方法的研究[J]. 消费科学(日), 1997, 38(4): 52-57.

[17] 王传岭. 基于 EMG 和织物传感器的肌肉疲劳识别与预测研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.

[18] 史佳玲. 女运动袜袜口压力舒适性预测研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.

[19] 郭继鸿, 张萍. 动态心电图学[M]. 北京: 人民卫生

- 出版社, 2003.
- [20] 朴松哲, 李亿军. 正常人心率变异性分析[J]. 心脏杂志, 2000, 12(5): 421-422.
- [21] 尹玲. 基于心率变异和脑波分析的塑身腹带着装压力舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [22] 庞莉娜, 王春红, 王慧泉, 等. 织物心电电极研究进展[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(5): 1-6.
- [23] 许润欣, 肖学良, 王志宇, 等. 织物电极在心电监测服装中的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(2): 1-6.
- [24] HIRAO N, YAGI A. Measurement method for electromyogram and event related potential when touching the fabric [J]. The Japanese Journal of Ergonomics, 1996, 32(6): 327-332.
- [25] 刘运娟. 基于脑电技术的服装压力舒适性评价方法的基础研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [26] 张辉, 黎焰. 服装工效学[M]. 3版. 北京: 中国纺织出版社, 2021: 42-46.
- [27] 颜奥林. 纺织品热湿舒适性测试及综合评价[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [28] GESCHIEDER G A, THORPE J M, GOODARZ J, et al. The effects of skin temperature on the detection and discrimination of tactile stimulation[J]. Somatosensory & Motor Research, 1997, 14(3): 181-188.
- [29] 姚穆, 孙润军, 陈美玉, 等. 人体冷暖感的特征与作用机制及其对服装穿着舒适性的要求[J]. 纺织高校基础科学学报, 2018, 31(3): 261-265.
- [30] 潘黎. 基于人体生理参数的清醒和睡眠状态的热舒适研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [31] JEONG J R, KIM H E. Assessment of the wear comfort of outdoorwear by ECG and EEG analyses[J]. Journal of The Korean Society of Clothing and Textiles, 2009, 33(10): 1665-1672.
- [32] SYMMONS M A, RICHARDSON B. Active versus passive touch; superiority depends more on the task than the mode[M]// BALLESTEROS S. Touch, blindness and neuroscience. Madrid: Universidad Nacional de Education a Distance Press, 2004: 179-185.
- [33] GIBSON J J. Observations on active touch [J]. Psychological Review, 1962, 69: 477-491.
- [34] 于伟东, 储才元. 纺织物理[M]. 上海: 东华大学出版社, 2002.
- [35] 潘志娟, 李栋高. 触摸手法的生理机制及对织物评价的影响[J]. 纺织学报, 2002, 23(3): 13-14.
- [36] ACKERLEY R, CARLSSON I, WESTER H, et al. Touch perceptions across skin sites; differences between sensitivity, direction discrimination and pleasantness[J]. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 2014, 8: 54.
- [37] VALLBO A B, JOHANSSON R S. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation [J]. Human Neurobiology, 1984, 3(1): 3-14.
- [38] JOHANSSON R S, VALLBO A B. Tactile sensibility in the human hand; relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin [J]. The Journal of Physiology, 1979, 286(1): 283-300.
- [39] LÖKEN L S, WESSBERG J, MORRISON I, et al. Coding of pleasant touch by unmyelinated afferents in humans [J]. Nature Neuroscience, 2009, 12(5): 547-548.
- [40] WESSBERG J, OLAUSSON H, FERNSTRÖM K W, et al. Receptive field properties of unmyelinated tactile afferents in the human skin [J]. Journal of Neurophysiology, 2003, 89(3): 1567-1575.
- [41] MCGLONE F, VALLBO A B, OLAUSSON H, et al. Discriminative touch and emotional touch [J]. Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale, 2007, 61(3): 173-183.
- [42] MCGLONE F, OLAUSSON H, BOYLE J A, et al. Touching and feeling: differences in pleasant touch processing between glabrous and hairy skin in humans [J]. European Journal of Neuroscience, 2012, 35(11): 1782-1788.
- [43] 刘宇清. 织物接触感知的磁共振成像及细观力学表征[D]. 上海: 东华大学, 2009.
- [44] ZHANG X X, WANG S S, LIU G L. Study on the fashionable and preferable emotion of men's T-shirt between males and females [J]. Advanced Materials Research, 2011, 331: 658-661.
- [45] CORNIANI G, SAAL H P. Tactile innervation densities across the whole body [J]. Journal of Neurophysiology, 2020, 124(4): 1229-1240.
- [46] YE T, LIU F, LIU G, et al. Categorization of different types of people based on their electroneurophysiological responses to fabric-skin contact [J]. Textile Research Journal, 2023, 93(7/8): 1747-1759.
- [47] YE T, CUI L N, ZHANG C Y, et al. Electroneurophysiological responses to fabric-skin dynamic contact with different fabrics among different types of people [J]. Textile Research Journal, 2023, 93(17/18): 4140-4152.