

服装压力舒适性的研究方法及发展趋势

程宁波, 吴志明

(江南大学 教育部针织技术工程研究中心 江苏 无锡 214122)

摘要: 服装压力是评价服装穿着舒适性的重要指标。为提高服装压力舒适性的研究方法和手段,总结了服装压力常见的主、客观评价方法和装置,分别阐述了有限元、BP 神经网络、脑电波、表面肌电(sEMG)信号的原理,以及在服装压力舒适性研究中的应用现状和特点,并证实了这些研究技术的可行性。同时,提出可测量面的压力、无线传感器的服装压力测试装置的开发和建立更精确的服装压力预测模型,展望了服装性能与人体机能的有机结合,以及 AI 技术和服装结合应用的发展趋势。

关键词: 压力测试评价; 有限元; BP 神经网络; 脑电波; 表面肌电(sEMG)

中图分类号: TS941.17

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2019)03-0038-07

引用页码: 031107

Research method and development tendency of garment pressure comfort

CHENG Ningbo, WU Zhiming

(Engineering Research Center of Knitting, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Clothing pressure is an important index in evaluating wearing comfort of clothing. In order to improve research methods of clothing pressure comfort, this paper summarized the common subjective and objective evaluation methods and devices for testing clothing pressure values, successively expounded the principle, application status and characteristics of the finite element, BP neural network, brain wave and sEMG in clothing pressure comfort study, and confirmed the feasibility of these research techniques. What's more, it proposed the development of measuring surface pressure, the development of garment pressure testing devices with wireless sensors and the establishment of more accurate garment pressure prediction models. The organic combination of clothing performance and human body function, and the development trend of artificial intelligence technology and clothing combined application are expected.

Key words: evaluation of pressure testing; the finite element; BP neural network; brain wave; surface electromyography (sEMG)

随着社会的发展和生活水平的提高,服装舒适性成为了消费者选购服装的重要指标。服装压力舒适性是指人体与服装间相互接触产生的皮肤压力感觉的舒适范围^[1]。随着紧身运动服和塑身内衣等弹性服装的风靡,压力舒适性已成为服装舒适性的研究热点和重点。已有研究表明,影响服装压力的因

素主要有人体、服装、环境等,合适的服装压力对人体产生积极作用,如缓解运动中的肌肉疲劳,有利于运动后肌肉恢复,提高运动表现等^[2-4],但过大的服装压力会产生不舒适感,也会对人体产生危害,因此服装压力舒适性的研究是非常重要的^[5]。通过对服装压力分布预测、测试等的研究,可以为服装设计提供理论依据和参考,从而指导生产,提高服装性能和增强企业间竞争力。本文主要从压力舒适性的测试评价方法展开,阐述了目前在航天、机械、汽车、医学和运动神经等领域已经得到广泛应用和认可的新技术在服装压力舒适性研究中的应用,分别为有限元、神经网络、脑电波、表面肌电。

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61602212); 国家轻工技术与工程一流学科自主课题资助项目(2018-28)

作者简介: 程宁波(1992—),女,硕士研究生,研究方向为现代服装制造技术。通信作者: 吴志明,教授,wxwuzm@163.com。

1 压力舒适性的测试评价方法

1.1 客观评价方法

客观评价就是指通过服装压力测量仪器测量压感部位的压力值来评价压力舒适性,具有一定的可靠性和准确性,是压力舒适性研究的重要方法。目前已经出现了多种不同的压力测试装置,常用的有以下几种:气压式压力测试装置、气囊式压力测试装置、传感器式压力测试装置(如电阻式压力测试装置、电容式压力测试装置、半导体压力测试装置)、弹性光纤装置、流体式压力测试装置。其中美国 FlexiForce 传感器压力测试系统、日本 AMI 气囊式传感器压力测试系统和德国 Novel pliance 服装压力测试系统最常见,均可动态连续测量人体在不同姿势、不同运动状态下某个测量点的压力变化规律。由于测试系统是通过线缆连接传感器探头,运动中有牵绊,使得动态测量存在一定的不便和误差,而且测量成本高。服装是以人为载体的,仅从客观测量值评判服装的舒适性是不够的,穿着者的感受是不可忽略的,故需将人的主观穿着感受结合起来,更有实用价值。

从目前的研究情况来看,压力测试设备仅能获得某个点的压力值,仍无法对某个部位的压力分布进行预测,或是某个面的压力测量。

1.2 主观评价方法

主观评价是直接由穿着者来感知的,符合以人为本的基本原则。服装压力舒适性的主观评价一般采用心理学标尺法,即 5 级区间标尺:1 分为无压迫感,2 分为轻微压迫,3 分为压迫,4 分为很压迫,5 分为非常压迫。随分值增大压迫感依次增加,将主观感受定量化,其中主要的评价指标有压迫感、束缚感、刺痒感、凉爽感、柔软感、厚重感等,以及整体的舒适感。但由于人体的着装舒适感受环境、人体、服装、运动等多方面的影响,因此仅采用主观评价是不科学的,缺乏一定的可重复性和准确性,应将主客观评价结合起来评判服装压力舒适性。

2 服装压力舒适性的分析方法

2.1 有限元分析

有限元法是基于近代计算机的快速发展而发展起来的一种近似数值方法,其原理就是将连续的、均匀的物体划分为有限个单元体,单元体通过节点连接,对物体施加力的作用,引入边界条件,再通过力

的平衡条件建立一套线性方程组,通过求解便可以得到每一个单元节点的位移和应力,目前在航空航天、建筑、医学和机械等领域已经得到广泛的应用。近些年许多学者逐渐将有限元引入服装舒适性研究领域,建立了服装压力分布预测模型,并验证了有限元法的可行性,成为了近期服装压力舒适性研究的热点。参考已有研究理论,在有限元模拟中可将人体视为弹性体,人体的材料属性参数见表 1^[6-10]。

表 1 有限元模型中各材料属性

Tab. 1 Material properties of the finite element model

类别	单元类型	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/kPa	泊松比
皮肤	She1193	1 100	150	0.46
骨骼	Solid185	1 185	7.3	0.30
软组织	Solid185	1 100	60	0.49

早在 2004 年,Winnie YU^[11]开发了一种人体模型,并尝试用于压力测试从而节约测试的成本。该模型采用真实的女性人体尺寸,分别用不同模量的软质聚氨酯泡沫和硅橡胶来模拟人体软组织和皮肤,使用不同的织物在真实受试者和人体模型上做对比测试,发现二者的压力值相近。该研究的人体模型为测试服装压力提供了一个新颖的思路,为后期压力分布预测研究奠定了基础。之后,有学者将人体模型用于服装压力的测试和分布预测,进行了进一步的研究和验证。Mirjalili 等^[12]采用 Ansys-9 软件建立人体模型用于服装压力预测,发现测试压力与有限元分析压力分布数值误差小于 7%,验证了有限元建立服装压力分布预测模型的可行性和有效性;但该模型是将人体视为由圆柱体和圆锥体组合成的几何体,而实际人体是一个复杂的曲面体,因此该模型的精确度直接影响了模拟结果的精确度。忽略人体的动态,仅对静态人体模型进行研究,并不能对实际穿着压力舒适性进行准确预测和评价,因此,ZHANG^[13]在已有的基础上,提出了运用有限元方法进行动态服装压力数值模拟,将人体与服装的接触模拟成动态接触,通过不同材料的实验测量,发现结果与有限元分析压力值较接近。由此可见,在允许的精度范围内该模型模拟服装动态压力是有效的,可用来模拟和预测服装与人体的动态力学行为。但是 ZHANG 的模拟存在一定的局限性,因为他将人体视为刚性体,服装视为具有几何非线性的薄弹性外壳。因此,该动态模型不能模拟真实的人体动态,不能真实反映服装与人体的动态接触。

随着科技的进步和计算机的发展,不少学者采

用医学界的 CT 扫描方法、最新的三维人体扫描技术提取的数据来建立人体模型,极大提高了模型的精确度,从而使得模型更加接近于真实人体,得出类似的结论,而且发现有限元模型不仅可用于预测接触压力分布,还可用于估算服装的变形^[14-17]。Yu 等^[18]通过 3D 激光扫描仪获得手的几何形状,得出了类似的结论。然而,在目前的研究中,虽然提高了模型的精度,仍缺乏对人体与服装动态接触的模拟和动态压力分布的预测。

该方法可预测人体某个部位的压力分布,通过应力云图能直观地显示人体和织物的压力大小分布,极大程度上节约测量成本和提高效率。但由于人体是由骨骼、肌肉、软组织和韧带等构成的曲面体,动态下人体和织物会产生变形和应力,在模拟过程中动态模型的建立、边界条件的设定和加载负荷等计算量很大而且十分复杂,与实际穿着过程的模拟仍存在一定的差距,所以模型的实际应用仍然存在一些不足和困难。

2.2 BP 神经网络

BP(Back Propagation,反向传播算法)神经网络是一种类似于模仿人类神经系统的信息处理技术,是目前应用最广泛的神经网络。BP 神经网络一般是多层的,它强调采用误差反向传播的学习算法进行权值调整,使误差沿梯度方向下降,经过反复学习训练,确定与最小误差相对应的网络参数(权值和阈值),训练即告停止。此时经过训练的神经网络即能对类似样本的输入信息,自行处理输出误差最小的经过非线性转换的信息。

研究表明,BP 神经网络在面料性能预测方面有广泛应用,服装面料性能是服装压力舒适性的影响因素之一。刘晓航^[19]以面料、里料和人体数据作为输入层,共 28 个节点,以主观压迫感和塑形效果作为输出层,选用 Python 进行训练、学习,结果预测值与实际值对比误差小于 5%,结果表明神经网络具有良好的预测效果,为塑身内衣舒适性建立了可靠的神经网络智能预测系统,也为面料性能与压力舒适性的关系研究提供了新思路。由于该模型的输出参数是主观值,导致了模型预测的结果缺乏一定的客观性和可靠性。以上研究表明了 BP 神经网络对服装舒适性具有较好的预测效果,由于选取的输入、输出参数不同,形成了不同的预测模型。为了更全面地探索面料性能与压力舒适性的关系,孟祥令^[20]通

过因子分析法获取更符合研究的织物性能因子作为输入变量,将人体着装的主观评价因子分值(松紧感、柔软感、粗糙感、压迫感、总体舒适感)作为输出层的变量建立不同的神经网络模型,结果发现 BP 模型对于松紧感与压迫感的预测较好,该研究对接触压力舒适性的研究方法进行了探索和验证。吴志明等^[21]将客观服装压力值作为输入参数,各项主观感觉因子分值作为输出参数,选择 $1 \times 3 \times 3$ 的 BP 网络模型(图 1),结果表明预测值与实际测试值相差甚少,得出颈部压力舒适阈值为 1.046 kPa,并认为服装压力与主观感觉因子有密切关系,该研究摒弃了传统的回归分析法而是利用 BP 神经网络探讨人体颈部的服装压力阈值及相关感觉因子的相关性,对于建立完善的服装压力舒适性的评价模型具有指导意义。此外,韩韬等^[22]提出了基于 LSTM 神经网络结构的人体不同部位的压力预测,采用柔性压力阵列收集一个部位压力信息来预测人体其他部位的压力分布。

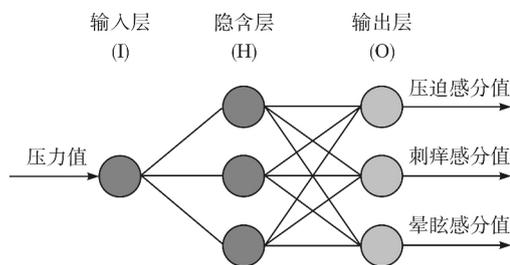


图 1 BP 神经网络

Fig. 1 BP neural networks

2.3 脑电波技术

脑电波技术作为一种客观的生理心理学的研究技术和评价方法,目前已经逐渐被应用于服装舒适性,包括热湿舒适性、接触舒适性、压力舒适性、视觉美观舒适性等研究领域^[23-25]。脑电波原理是:在人体中细胞两侧离子分布不均匀,细胞内外离子(Na^+ 、 K^+ 、 A^-)的浓度存在很大差异,因而在细胞膜两侧存在很高的浓度梯度,在这样的浓度梯度作用下,离子将向低浓度一侧扩散,从而形成一定的电位差。

服装压力舒适性是服装的物理机械信号作用于人体皮肤,然后该刺激信号在大脑形成感觉,从而产生的一个综合的主观舒适判断^[26]。Y Horiba^[27]通过脑电图(EEG)测量来评估由服装中腰带施加在腹部上的压力所产生的心理和生理压力。在研究中,将电极固定在头皮上,测量 EEG 在腰部压力和非压力状态、睁眼并闭着眼睛状态的脑电波。实验表明,在

腰带产生压力条件下, α 波强度比较明显, 在睁眼情况下, 与非压力条件下的 α 波强度相比, 腰带压力下 α 波的强度显示下降; 闭眼情况下, 两种压力条件下的 α 波强度没有明显差异, 并认为服装紧身压力的视觉感官也会影响脑电波变化。随后, 杉田明子等^[28] 采用脑电波再次验证了服装压力影响受试者的生理和主观评价。在此基础上, 有学者将压力测量和脑电波结合, 试图将压力舒适性感觉从定性分析转为定量评价。尹玲^[29] 将胸部至小腹间作为实验对象, 研究了不同压力的塑身腹带对人体心率变异、脑电波的影响规律, 该研究为服装压力舒适感觉定量评价和压力舒适性阈值的预测提供了新的研究思路和技术方法, 使得压力舒适性的研究更具可靠性和客观性。服装压力舒适性受多方面因素影响, 如环境、服装、人体等。M Uemae 等^[30] 发现在不同亮度条件下, 腰带产生的压力感对脑电波的影响不同。刘运娟^[31] 将 EEG 和 ERPs 两种脑电技术结合, 分别探索主观感受和脑电指标的关系, 以及服装压力和脑电成分的关系, 实验发现在同一动作时与未穿着塑形腹带相比, 穿着状态时的 α 波频谱能量更大。服装压力抑制了 α 波, 使人产生不舒适感, 但不同的动作也影响了 α 波频谱能量变化, 证明了在一定服装压力下脑电 α 波强度与主观心理反应、束缚感和舒适感是有相关性的, 为压力舒适性的后续研究提供了理论基础和参考价值。

综上所述, 由于人对服装舒适性主观感受和评价受多方面因素影响, 包括服装、环境等, 存在个体差异性, 可重复性差, 因此将客观心理学的脑电波技术引入舒适性研究会更精确、更客观、更可靠。由于脑电波或脑电图是非常敏感的客观指标, 容易受环境、个体差异的影响, 保持单一变量原则比较困难。

2.4 表面肌电技术

已有许多研究表明适当的服装压力不仅能提高运动机能表现, 而且能够缓解运动产生的肌肉疲劳和恢复, 也有研究表明过大的服装压力会对人体产生危害, 会加速运动中的肌肉产生疲劳。sEMG 能够反映肌肉活动状态, 可以用于肌肉疲劳的评价^[32]。表面肌电具有无创性、时效性、精确性和易操作性等特点, 目前在临床医学、人类工效学、康复医学和体育科研等领域得到广泛应用。肌肉疲劳对体会产生一定的危害, 有学者研究发现紧身运动服产生的

压迫在运动中对人体有积极作用, 如维持肌肉功能、缓解肌肉疲劳、提高运动表现、防护性能, 在运动后有利于肌肉恢复^[33-35]。

肌肉疲劳受运动强度、运动时间、运动者体质和服装压力等多方面因素影响。日本 Mikiko 和 Miyamoto N^[36-37] 探索了服装压力与腿部肌肉表面 EMG 指标的关系, 认为适当的压力可以缓解小腿肌肉的运动疲劳。陈金鳌等^[38] 同步采集不同程度紧身压迫下踏蹬运动中股内侧肌下 iEMG 和 MF 值, 发现不同程度紧身压迫在不同强度的运动下, 服装压力对肌肉疲劳会产生不同的影响。之后, 有学者进一步研究了不同强度的运动下服装压力对肌肉活动的影响, 得出了类似的结论^[39-40]。

不同部位肌肉的运动机能存在差异, 李梦园等^[41] 选取频域指标中的 MPF、MF 和时域指标中的 MA、RMS 作为肌电测试指标, 结合心率数据变化和疲劳性主观评价, 发现跑步运动中服装压力越大对股直肌和股外侧肌着装疲劳性的缓解作用越明显, 运动强度对股直肌和股外侧肌没有明显影响, 而服装压力的大小对臀大肌、股二头肌、半腱肌没有明显影响。卢华山等^[42] 进一步以跑步运动服装为例, 将 RMS 指标和测量压力值结合分析, 再次验证了增大服装压有利于缓解肌肉疲劳, 而且不同部位肌肉疲劳的缓解作用不同。可见, 不同运动强度、不同服装压力对不同部位肌肉的影响存在较大差异性, 因此结合肌肉疲劳的研究, 有利于运动服装的分区设计。

表面肌电是生物力学和人体运动学领域的一种评价方法, 服装压力对肌肉有重大影响, 肌电信号是评价肌肉疲劳的主要指标, 因此将表面肌电应用于服装领域, 为设计出更符合人体工效学的服装提供了研究方法和思路。由于肌电传感器应放置在肌肉的肌腹(肌肉最隆起处) 并与肌纤维方向一致, 传感器的精确放置对于非专业领域的人具有一定的困难, 同时, 肌电传感器体积不够小, 会影响服装对测试肌肉的压迫, 而且传感器数据的可监测范围不够大, 无法采集一些室外运动数据。

3 发展趋势

服装压力舒适性是服装人体工效学中的研究热点, 但目前服装压力舒适性的研究还存在一些缺陷, 有待进步和完善。基于以上的总结和分析, 认为未来研究可关注以下几个方面。

3.1 无线传感器和新的动态压力测试装置的开发

虽然目前服装压力测试装置可基本满足动态压力的测量,但还有待提高。近年开发的足底压力分析仪可进行步态、静态站立姿势足部压力测试和压力可视化,操作简便且更容易从步态和平衡测试中获得分析结果,比以往更快速,已在医学领域得到广泛应用。因此开发新的压力测试装置,提高传感器精度,研究无线压力传感器可使操作更简易、数据更可靠、测量部位更广、测试结果呈现更直观且多样化。

3.2 服装机能和人体机能的有机结合

服装压力舒适性是服装和人体共同作用的结果,现有的研究很少涉及人体在运动中的变形和摩擦,只考虑了织物的组成和性能等,要进一步提高服装的舒适性、功能性和防护性,就必须对人体形态特征、人体运动中各个部位的变化规律、运动特点及生物力学等进行深入研究,包括着装后的心理、生理变化等。不同类型运动中的生理、心理指标存在差异,需针对性研究相关的指标并综合分析,这些因素都会影响压力的大小分布和压力舒适性的评价。将服装机能和人体机能的有机结合使得评价结果更具代表性,也是压力分布预测的基础。

3.3 AI技术与服装的结合应用

随着个性化定制的推广,服装三维虚拟试衣系统也发展得如火如荼。在服装定制过程中,选择面料后,能在虚拟三维模特展示的同时,将服装压力分布和大小进行可视化展示,但目前的模拟试衣仍然相对简单、粗糙。由于人体与服装在动态接触过程中都会产生变形和动态的相互作用力,若能结合AI(Artificial Intelligence,人工智能)技术对织物力学习能和变形、人体动态变化规律,以及织物与人体间的应力变化进行模拟和学习,就能通过三维试衣直观显示出人与服装间动态接触的压力分布和变化,使得三维虚拟试衣更加精确、逼真。

4 结 语

服装压力对人体健康和人体舒适感极为重要,服装舒适性是服装行业的一个研究重点和热点。本文阐述了服装压力舒适性的主、客观评价方法,综述已有的研究方法,对服装压力舒适性的研究方法进行分析和总结,它们在服装压力舒适性应用中都有特点。但目前的动态压力测试还有待提高和改善,服装机能和人体机能的结合研究需做进一步探

讨,提出建立高精度的服装压力预测模型,并将AI技术与服装行业结合应用,使得三维实体展示和服装压力分布可视化更加精确、真实,从而提高行业核心竞争力。

参考文献:

- [1]石丸園子,中村美穂,野々村千里,等. 人体への加圧が圧感覚と快適感に及ぼす影響について[J]. 繊維製品消費科学,2011,52(3): 197-207.
ISHIMARU Sonoko, NAKAMURA Miho, NONOMURA Chisato, et al. Effects of the human body pressure on a pressure sensation and comfort sensation [J]. Journal of the Textile Machinery Society of Japan, 2011, 52(3): 197-207.
- [2]SAHIRO Mizuno, MARI Arai. Wearing lower-body compression garment with medium pressure impaired exercise-induced performance decrement during prolonged running [J]. Plos One, 2017, 12(5): 1-12.
- [3]赵西西. 马拉松跑步状态下肢骨骼肌肉系统的防护研究与产品开发[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016: 74-75.
ZHAO Xixi. Marathon Running Condition of the Musculoskeletal System of Lower Limbs Protection Research and Product Development [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016: 74-75.
- [4]HILL J A, HOWATSON G, VAN SOMEREN K A, et al. The effects of compression garment pressure on recovery from strenuous exercise [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017, 12(8): 1078-1084.
- [5]横井亮子,吉田美奈子,笹川栄子. ガードルの圧迫が身体に及ぼす影響について[J]. 繊維製品消費科学 2006, 47(9): 537-547.
RYOKO Yokoi, MINAKO Yoshida, EIKO Sasagawa. The influence of girdle's compression on the body [J] Textile Products Consumption Science, 2006, 47(9): 537-547.
- [6]KENEDI R M. Strength of biological materials [J]. Journal of Anatomy, 1971, 144: 582.
- [7]SMOLEN C, QUENNEVILLE C E. A finite element model of the foot/ankle to evaluate injury risk in various postures [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2017, 45(8): 1993-2008.
- [8]YEUNG K W, LI Y, ZHANGAA X. A 3D biomechanical human model for numerical simulation of garment-body dynamic mechanical interactions during wear [J]. The Journal of the Textile Institute, 2004, 95(1): 59-79.
- [9]HENDRIKS F M, BROKKEN D, OOMENS C C, et al. Influence of hydration and experimental length scale on the mechanical response of human skin in vivo, using optical coherence tomography [J]. Skin Research and Technology,

- 2004 ,10(4) : 231-241.
- [10] HENDRIKS F M , BROKKEN D , EEMEREN V J , et al. A numerical experimental method to characterize the non-linear mechanical behavior of human skin [J]. *Skin Research and Technology* ,2003 ,9(3) : 274-283.
- [11] YU Winnie , FAN Jintu , QIAN Xiaoming. A soft mannequin for the evaluation of pressure garments on human body [J]. *Sen'i Gakkaishi* ,2004 ,60(2) : 57-64.
- [12] MIRJALILI Seyed Abbas , RAFEEYAN Mansour , SOLTANZADEH Zeynab. The analytical study of garment pressure on the human body using finite elements [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* ,2008 ,16(3) : 69-73.
- [13] ZHANG X , YEUNG K W , LI Y. Numerical simulation of 3D dynamic garment pressure [J]. *Textile Research Journal* ,2002 ,72(3) : 245-252.
- [14] YINGLEI L , KAI-FI C , AMEERSING L , et al. Finite element modeling of male leg and sportswear: contact pressure and clothing deformation [J]. *Textile Research Journal* ,2011 ,81(14) : 1470-1476.
- [15] ZHANG M , DONG H N , FAN X R , et al. Finite element simulation on clothing pressure and body deformation of the top part of men's socks using curve fitting equations [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology* ,2015 ,27(2) : 207-220.
- [16] 唐鹏程,朱英,赵敏珠,等. 肘关节有限元模型模拟碰撞损伤的生物力学特性分析[J]. *第三军医大学学报* ,2018 ,40(7) : 596-602.
TANG Pengcheng , ZHU Yin , ZHAO Minzhu , et al. Establishment of 3-D finite element model of elbow joint and its application for analysis of impact injury [J]. *Journal of Third Military Medical University* ,2018 ,40(7) : 596-602.
- [17] YAN L , AMEERSING L. Biomechanical evaluation of heel elevation on load transfer: experimental measurement and finite element analysis [J]. *Acta Mechanica Sinica* ,2012 (1) : 232-240.
- [18] YU A , YICK K L , NG S P , et al. Numerical simulation of pressure therapy glove by using finite element method [J]. *Burns* ,2016 ,42(1) : 141-151.
- [19] 刘晓航. 基于神经网络的塑身内衣舒适性系统评价研究[D]. 北京: 北京服装学院,2017: 10-42.
LIU Xiaohang. Study on the Systematic Evaluation of the Comfort of Shapewear Based on Neural Network [D]. Beijing: Beijing Clothing University ,2017: 10-42.
- [20] 孟祥令. 弹性织物着装接触压力研究与触压舒适性评价系统的建立[D]. 上海: 东华大学,2010: 6-10.
MENG Xiangling. Study on Clothing Contact Pressure of Elastic Fabric and Establishment of Evaluation on Wearing Touch and Pressure Comfort [D]. Shanghai: Donghua University ,2010: 6-10.
- [21] 吴志明,陈星毅. 基于BP神经网络的颈部服装压舒适阈值的预测[J]. *天津工业大学学报* ,2010 ,29(5) : 26-29.
WU Zhiming , CHEN Xingyi. Subjective assessment of comfort threshold of clothing pressure on human neck based on BP neural networks [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University* ,2010 ,29(5) : 26-29.
- [22] 韩韬,郝矿荣,丁永生,等. 基于深度LSTM神经网络的人体服装压力信息预测[J]. *东华大学学报(自然科学版)* ,2018(5) : 1-10.
HAN Tao , HAO Kuangrong , DING Yongsheng , et al. Prediction of human clothing pressure information based on deep lstm network [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)* ,2018(5) : 1-10.
- [23] 李东,万贤福. 基于脑电技术的面料触感捕捉刺激器的设计与开发[J]. *纺织器材* ,2016 ,43(5) : 6-10.
LI Dong , WAN Xianfu. The design and development of EEG-based fabric tactile sensation stimulator [J]. *Textile Accessories* ,2016 ,43(5) : 6-10.
- [24] JEONG-RIM Jeong , HEE-EUN Kim. Assessment of the wear comfort of outdoorwear by ECG and EEG analyses[J]. *Journal of Korean Society of Clothing and Textiles* ,2009 ,33(10) : 1665-1672.
- [25] HORIBA Y , KAMIJO M , HOSOYA S , et al. Availability of evaluating thermal comfort feeling by using electroencephalogram(EEG) [J]. *Journal De Physiologie* ,2000 ,1(2) : 9-14.
- [26] KAMIJO M , HORIBA Y , HOSOYA S , et al. Evaluation of Thermal Comfortable Feeling by EEG Analysis [C]//The 2000 Spring of KOSES & International Sensibility Ergonomics Symposium. 2000: 230-234.
- [27] HORIBA Y , KAMIJO M , SADOYAMA T , et al. Effect on brain activity of clothing pressure by waist belts [J]. *Kansei Engineering International Journal* ,2001 ,2(1) : 1-8.
- [28] 杉田明子,岡部和代,木岡悦子. 中高年女性におけるガードル着用効果と快適性[J]. *繊維製品消費科学* ,2002 ,43(6) : 365-376.
AKIKO Sugita , KAZUYO Okabe , ETSUKO Kioka. Girdle wearing effect and comfort in middle-aged women [J]. *Journal of the Japan Reseach Associa* ,2002 ,43(6) : 365-376.
- [29] 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: 15-20.
YI Lin. Study on Pressure Comfort in Wearing Waist Nipper on the Basis of Human's Heart Rate Variability and Electroence Phalogram [D]. Shanghai: Donghua University ,2012: 15-20.
- [30] UEMAE M , UEMAE T. Influence of visual stimuli with brightness changes on physiological response under clothing pressure to abdomen [J]. *Transactions of Japan Society of*

- Kansei Engineering ,2014(13) : 479-484.
- [31]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: 26-44.
LIU Yunjuan. Basic Research on Clothing Pressure Comfort Evaluation Method Based on EEG Technology [D]. Wuxi: Jiangnan University ,2016: 26-44.
- [32]李玉章. 表面肌电在体育中的应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2015: 2-15.
LI Yuzhang. Application of Surface Electromyography in Sports [M]. Shanghai: Fudan University Press ,2015: 2-15.
- [33]DE GLANVILLE K M , HAMLIN M J. Positive effect of lower body compression garments on subsequent 40 km cycling time trial performance [J]. Journal of Strength and Conditioning Research ,2012(26) : 480-486.
- [34]MATTHEW W Driller , SHONA L Halson. The effects of wearing lower body compression garments during a cycling performance test [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance ,2013(8) : 300-306.
- [35]MARTIM Bottaro , SAULO Martorelli , JOSE Vilaca. Neuromuscular compression garments: effects on neuromuscular strength and recovery[J]. Journal of Human Kinetics ,2011 (10) : 27-31.
- [36]NOSAKA Mikiko , MOROOKA Harumi , TORIUMI Kiyoshi , et al. Clothing pressure design of high elastic knee-socks using emg for reducing muscle fatigue [J]. Journal of Textile Engineering ,2006 ,52(5) : 205-210.
- [37]MIYAMOTO N , HIRATA K , MITSUKAWA N. Effect of pressure intensity of graduated elastic compression stocking on muscle fatigue following calf-raise exercise [J]. Journal of Electromyography and Kinesiology ,2011 ,21(2) : 249-254.
- [38]陈金鳌, 陆阿明, 王国栋, 等. 不同程度紧身压迫对踏蹬运动中股内侧肌 sEMG 变化特征的影响[J]. 体育科学 ,2012 ,32(7) : 22-31.
CHEN Jin' ao , LU Aming , WANG Guodong , et al. Effect of tight-fitting sportswear of different compression degrees on variation characteristics of sEMG on vastus medialis during cycling motion [J]. China Sport Science ,2012 ,32(7) : 22-31.
- [39]EDUARD Kurz , CHRISTOPH Anders. Effects of wearing lower leg compression sleeves on locomotion economy [J]. Journal of Sports Sciences ,2018 ,36(18) : 2105-2110.
- [40]NAOKAZU Miyamoto. Is graduated pressure profile an essential feature for compression stockings to reduce fatigue development of the plantar flexors? [J]. Sports Performance ,2015(1) : 213-221.
- [41]李梦园. 影响女子运动着装疲劳性相关因子与疲劳阈值研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017: 6-9.
LI Mengyuan. Affect Women' s Sports Dress Fatigue Related Factor and the Fatigue Threshold Value Research [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University ,2017: 6-9.
- [42]卢华山, 阎玉秀. 跑步运动中服装压对女子下肢肌肉疲劳的影响[J]. 纺织学报, 2017 ,38(7) : 118-123.
LU Huashan , YAN Yuxiu. Influence of clothing pressure on female lower limb muscle fatigue during running sports [J]. Journal of Textile Research ,2017 ,38(7) : 118-123.