

# 服装压力舒适性仿真研究进展

梁宇,李慧\*

(北京服装学院 信息工程学院,北京 100029)

**摘要:**综述服装压力舒适性、服装压力仿真研究现状,介绍有限元法在服装压力仿真研究中的应用,总结目前相关领域研究的不足,展望服装压力仿真的研究发展方向。

**关键词:**服装压力;虚拟压力;舒适性;有限元法

**中图分类号:**TS 941.17

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0356(2022)04-0006-04

随着人们生活水平的不断提高,服装的压力舒适性也开始备受关注。关于服装压力舒适性的研究主要分为真实服装压力和虚拟服装压力2类,目前关于真实和虚拟的服装压力研究,主要集中在文胸、瑜伽服、束缚带、袜子等贴身衣物上,研究的人体部位主要集中在胸、腰、臀、腿等,虽然有一定的研究成果,但在服装行业,服装设计依然主要依赖于设计师的实践经验和大量的试错。通过仿真研究建立可靠的物理模型,可以对服装压力进行仿真预测。推进服装压力仿真研究,可以减少服装设计中不必要的试错,很大程度避免一些危害人体健康的试验。

## 1 真实服装压力研究现状

纵观前人成果,服装压力舒适性的研究涉及力学、人体工学、纺织材料学等学科领域。关于单方面的生理研究在日本和一些欧美国已经有比较丰硕的成果,真实服装压力研究主要包括服装压力分布研究、服装压力舒适阈值研究及服装压力舒适性的影响因素研究。真实服装压力研究是虚拟服装压力研究的基础。

### 1.1 服装压力分布研究现状

1991年,MAKAB<sup>[1-2]</sup>对人体穿着文胸后多个部位服装压力进行测量及分析,找出8个舒适性不佳的部位。Shimizu等<sup>[3]</sup>对文胸的压力分布进行了研究,比较在静态和动态下人体8个部位的压力。研究发现,在运动和静止状态下,人体最大受压点略有不同,并且同一个部位的压力值在运动状态下要大于该部位在静止状态的压力值<sup>[4]</sup>。李世霞<sup>[5]</sup>研究发现文胸对人体压力

较大的部位为钢托、肩部、侧缝和后侧等。

### 1.2 服装压力舒适阈值研究现状

由于人体曲率的改变会影响到各部位的压力值<sup>[6-7]</sup>,不同体型、不同运动状态下人体的各部位受压情况也存在着较大差异。Denton<sup>[8]</sup>主要对令人体感觉舒适性不佳的服装压力进行研究,研究发现令人感觉舒适度不佳的范围为5.88~9.8 kPa,与人体表皮毛细血管压力平均值7.85 kPa相吻合。当服装压力超过表皮毛细血管压力临界值时,血液被迫流向人体穿戴压力较小的身体部位,一般为腿部等较低部位,从而造成这些部位肿胀<sup>[9]</sup>。刘红<sup>[10]</sup>主要对女性穿着运动背心时胸部的服装压力进行测量与分析研究,得到胸部的压力舒适范围为0.95~1.36 kPa,背部为0.59~0.9 kPa,肩部为1.135~1.64 kPa,侧缝处为0.48~0.73 kPa,腹部为0.29~0.43 kPa。岑司竹<sup>[11]</sup>结合血流量和运动心率方面的理论知识,对女性穿着文胸时胸部的服装压力进行测量与分析,研究发现侧颈点服装舒适压力范围为4.15~5.67 kPa,后背肩胛骨提肌点为3.23~4.48 kPa,BP点为2.56~3.97 kPa,乳房侧下点为2.02~3.33 kPa,乳房下缘点为1.69~2.74 kPa,侧中点为1.63~2.18 kPa,下胸围上侧缝到脊椎1/4点为3.98~4.79 kPa,下胸围上脊椎与侧缝的中点为4.04~4.91 kPa。张文斌等<sup>[12]</sup>发现在穿戴不同款式服装的时候,压力舒适性范围存在不同,在对部分服装款式的压力舒适性范围开展研究后得到泳衣压力舒适范围为0.98~1.96 kPa,紧身胸衣舒适范围为2.94~4.90 kPa,医用长袜舒适范围为2.94~5.88 kPa,紧身服舒适范围为小于1.96 kPa。王永荣等<sup>[13]</sup>选取女性上身8处测试点,利用束带对舒适服装压力阈值进行研究,肩部、胸部、腹部3个部位测得的压力舒适阈限分别为1.7、0.98、1.34 kPa,小于以往学者测

收稿日期:2021-11-16

基金项目:北京服装学院分类发展定额专项(NHFZ20210197)

第一作者:梁宇(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为服装舒适性与功能服装。

\*通信作者:李慧,女,副教授,主要从事信息处理和智能系统相关研究,  
E-mail:gxylhui@bift.edu.cn.

得的阈限。图1为近年来学者研究着衣后不同人体部位舒适服装压力平均值。

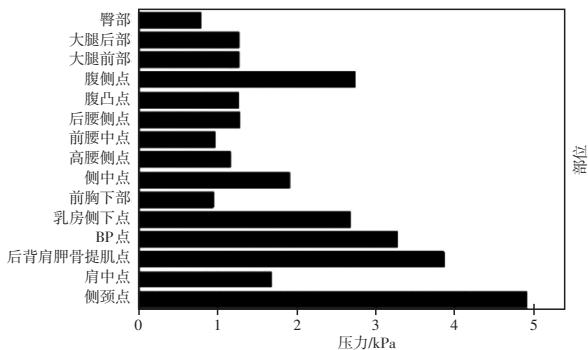


图1 不同人体部位舒适服装压力平均值

## 2 虚拟服装压力研究现状

### 2.1 有限元理论

有限元法<sup>[14-17]</sup> (Finite Element Method, 简称FEM), 起源于航空工程中的矩阵分析, 此算法的本质是一种求解偏微分方程的算法。其中, 偏微分方程通常被用于求解时空相关问题的物理过程。绝大多数情况下, 这些偏微分方程的解可能无法求出。不过, 可以通过对所求解域进行离散化构造近似的方程, 来获取与偏微分方程类似的数值模型方程, 并通过数值方法进行求解。由此得到的解便称作近似解, 与偏微分方程真实解相对应, 有限元法的主要工作便是求解这些近似解。

网格划分越稠密时, 求得近似解越贴近真实解。有限单元算法的核心内容是通过离散化分解, 将复杂的求解域模型剖分成有限个细小单元拼合而成的结构。计算机通过对每个单元的力学特性进行分析, 将剖分好的单元在有限元算法的规则下, 拼接为一个整体, 通过计算得到所求解模型的力学特性。有限元算法的主要研究对象是单元, 在进行网格划分时最需要注意的一个问题是相邻单元的参数要求具有一定的连续性。

### 2.2 虚拟服装压力的有限元求解过程

根据前人研究, 织物的多种性能对服装压力都会产生一定影响<sup>[18-20]</sup>, 但对人体下胸围受压的应力应变分析中, 需将复杂的实际情况抽象为相对简单的力学模型, 否则问题将会变得极其复杂难以处理, 采用有限元法计算出相对准确可靠的结果, 步骤如下。

步骤1: 合理的网格剖分, 对该模型待求解区域进行网格划分, 将整个区域分割成若干离散的单元。对于模型在各方向梯度下的离散化公式如式(1)和(2)所

示。

$$0 = \nabla \cdot (FS)^T + F_V \quad (1)$$

$$F = 1 + \nabla_U \quad (2)$$

步骤2: 单元分析, 将每个连接在一起的单元节点作为插值点, 进行分片插值, 建立线性插值函数。设人体应力为  $S$ , 应变为  $\epsilon$ , 模型各方向应力求解偏微分方程为:

$$S = S_{ad} + J_i F_{ine|}^{-1} (C : \epsilon_{e|}) F_{ine|}^{-T} \quad (3)$$

$$\epsilon_{e|} = \frac{1}{2} (F_{e|}^T F_{e|} - 1) \quad (4)$$

$$F_{e|} = FF_{ine|}^{-1} \quad (5)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q \quad (6)$$

模型各方向应变求解偏微分方程为:

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u + (\nabla u)^T \nabla u] \quad (7)$$

式中:  $u$  是人体受应力后的位移。

步骤3: 求解近似变分方程, 输出近似解求解结果。

$$C = C(E, v) \quad (8)$$

### 2.3 服装压力分布的有限元预测模型

21世纪初, 便有学者将有限元理论的仿真研究应用在服装压力舒适性领域中, 取得了一定的成果, 近几年由于仿真技术的发展, 对虚拟服装压力的仿真研究也更进一步。

Yeung K W等<sup>[21]</sup>结合弹性力学理论和三维建模技术, 建立了人体及服装动态平衡三维力学模型, 其中人体模型由硬骨头、皮肤和软组织3层构成, 人体在动态情况下服装压力分布可由该数学模型模拟出来, Yeung K W通过该模型得到了穿着紧身裤时从脚踝到腰部的压力分布。李毅等<sup>[22]</sup>基于织物力学特性分析人与服装动态接触过程中的力学分布, 研发出服装机械力学系统来进行服装压力预测。覃蕊等<sup>[23]</sup>运用有限元方法来模拟男短袜袜口对小腿部施压后压力与位移的关系。在研究中, 人体被视为弹性体, 腿部和袜口之间的接触被视为弹性接触。朱珊<sup>[24]</sup>通过有限元法对人体腰部所受服装压力做了分析研究, 在ANSYS软件中对人体腰部的应力分析进行了仿真研究。Zhang M等<sup>[25]</sup>通过位移分布评价压力舒适度, 利用有限元法和曲线拟合探索小腿横截面上压力与位移的多重关系。

2019年Dan R等<sup>[26]</sup>以连裤袜腰部为研究对象, 构建人体与连裤袜的接触为弹力接触, 用ANSYS模拟了弹力连裤袜样品在穿衣过程中腰部相应的位移分布。2021年Dan R等<sup>[27]</sup>通过有限元模拟曲线拟合, 深

入研究人体穿着弹性连裤袜在运动状态下,压力/位移比与角度之间的函数关系。Shichen Zhang 等<sup>[28]</sup>在 ANSYS 中通过有限元模型的全因子分析,评价了不同设计特征对文胸肩带的影响。得出拉伸对文胸肩带运动位移影响最大,对杨氏模量影响最小的结论。

## 2.4 有限元软件

基于不同应用领域,目前常见的有限元软件有 COMSOL Multiphysics、ANSYS、LUSAS、Algor、MSC Nastran、ABAQUS、Hyper mesh、LMS-Samtech、Fe map/NX Nastran 和 FEPG 等软件。ANSYS 是目前最流行的有限元软件<sup>[29]</sup>,其最大特征是可以根据具体需求选择是否使用有限元法,但在几何建模方面存在不足。它通过代码对几何进行建模,这使得所建模型不够准确,并且在求解所用公式的修改方面极为不便。而上述 ANSYS 的不足之处,在 COMSOL 中都可以得到很好的解决,在 COMSOL 中仅使用有限元法,它本身具有开发几何研究的界面。COMSOL 多物理仿真模拟也为研究复杂问题提供了极强的解决方案。在实际情况中,通过物理过程描述的现象并不是一个简单的在一个物理场下的问题。例如:考虑影响服装压的环境因素,当人体处在温度变化的条件下,在求解时便需要进行固体力学模型和传热模型耦合。图 2 为在 COMSOL 中模拟人体下胸围侧中点受压后,该点周围的压力分布,图 3 为根据仿真所得数据在 MATLAB 中绘制人体下胸围侧中点加载后应力分布三维图。

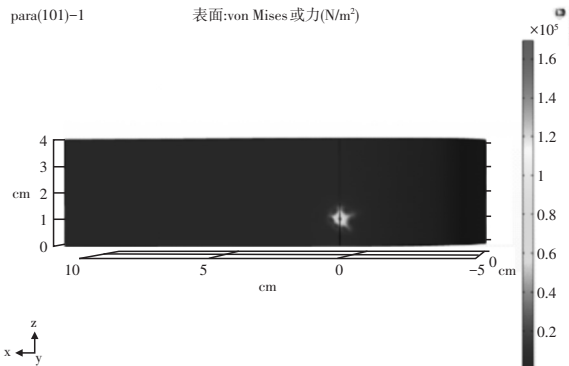


图 2 在一点上加载后模型的应力分布

## 3 结束语

近几年关于真实和虚拟服装压力的研究虽然有了一定的成果,仍存在着不足。

(1)真实服装压力测量方面。现有研究中对关于真实的压力测量研究主要还是静态压力,由于测试压

力设备的局限,对运动状态下服装压力的研究还没有普遍开展。

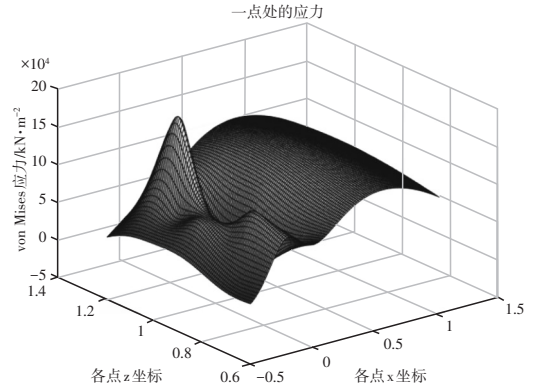


图 3 人体最大受压点加载后应力分布

(2)服装压力仿真方面。早期关于虚拟压力的仿真研究普遍存在着模拟的运动过程单一、预测的压力分布误差较大等问题。近年来,由于三维扫描技术的发展,在建模精度方面有了一定的提高,但是大部分学者多是在 ANSYS、ABAQUS 及 CLO 中进行一些虚拟服装压力的研究,目前为止很少有人通过 COMSOL 对服装压力进行仿真研究,对多物理场耦合仿真也很少涉足。由于人体体型复杂,人体的内部生理环境是一个极为复杂的生态系统,所以现有的仿真研究大都将人体看作刚体来建模,仿真结果也会与真实服装压力存在较大误差。

如今服装行业竞争越来越激烈,服装是否有“黑科技”、是否有足够的专业理论支撑也是相当一部分消费者在购买服装时重点考虑的因素,推进仿真研究,为服装产品提供可靠的理论依据,可以大大减少产品研发中人力资源成本。在以后的研究中还需运用科学手段获取运动状态下的服装压力,提高建模的精确性、准确性和完整性,对人体与服装的关系进行深入研究。

## 参考文献:

- [1] MAKABE H, MOMOTA H, MITSUNO T, et al. A study of clothing pressure developed by the brassiere[J]. Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1991, 32(9): 416-423.
- [2] MAKABE H, MOMOTA H, MITSUNO T, et al. Effect of covered area at the waist on clothing pressure[J]. Sen'i Gakkaishi, 1993, 49(10): 513-521.
- [3] SHIMIZU Y, SASAKI K, WATANABE K, et al. Dynamic measurement of clothing pressure on the body in a brassiere[J]. Sen'i Gakkaishi 1993, 49(1): 57-62.
- [4] 王小兵,姚穆. 体育防护用品的压力舒适性及运动功能性探讨[J]. 西北纺织工学院报, 2001, 15(2): 56-59, 65.

- [5] 李世霞. 后比拉力对文胸压力及安定性的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [6] 陈星毅, 吴志明. 弹性针织服装的压力舒适性研究[J]. 天津工业大学学报, 2009, 28(5): 33-37.
- [7] 侯响彤, 徐蓼芫, 王芳芳. 女性大腿截面曲率与下肢服装压力分布的关系[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2015, 14(2): 43-48.
- [8] DENTON M J. Fit Stretch and Comfort[J]. Textiles, 1972(3): 12-17.
- [9] PRATT J, WEST G. Pressure garments: A manual on their design and fabrication[M]. Bath Press, 1995.
- [10] 刘红. 弹力运动背心的压感舒适性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [11] 岑司竹. 基于血流量和运动心率的运动文胸压力舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [12] 张文斌, 方方. 服装人体工效学[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.
- [13] 王永荣, 罗胜利, 廖银琳, 等. 女性服装压力舒适阈限的测试与研究[J]. 纺织学报, 2018, 39(3): 132-136.
- [14] PREIS K, BIRO O, BUCHGRABER G, et al. Thermalelectromagnetic coupling in the finite-element simulation of power transformers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 999-1002.
- [15] ETEIBA M B, AZIZ M M A, SHAZLY J H. Heat conduction problems in SF<sub>6</sub> gas cooled-insulated power transformers solved by the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1457-1463.
- [16] ALLAHBAKHSI M, AKBARI M. Heat analysis of the power transformer bushings using the finite element method[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 714-720.
- [17] 谢裕清, 李琳, 宋雅吾, 等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5957-5965.
- [18] ITO N, INOUE M, NAKANISHI M, et al. The relation among the biaxial extension properties of girdle cloths and wearing comfort and clothing pressure of girdles [J]. Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1995, 36: 102-108.
- [19] INAMURA A, NIWA M, NAKANISHI M. Relationship between wearing comfort and physical properties of girdles[J]. Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1995, 36(1): 109-118.
- [20] MOROOKA H, NAKAHASHI M. Compressive property of legs and clothing pressure of pantyhose from the view point of difference image[J]. Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1997, 38(6): 324-332.
- [21] YEUNG K W, LI Y, ZHANG 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: 59-79.
- [22] LI Y, ZHANG X. Mechanical sensory engineering design of textile and apparel products[J]. Journal of Textile and Institute, 2005, 93(2): 54-67.
- [23] 覃蕊, 陈东升, 范学荣, 等. 服装压力分布及预测的研究与进展[J]. 纺织学报, 2010, 31(4): 139-144.
- [24] 朱珊. 基于有限元分析的三维人体腰部服装压力舒适性研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2012.
- [25] ZHANG M, DONG H, FAN X, 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.
- [26] DAN R, SHI Z. Numerical simulation of the area shrinkage mass for the waist of elastic pantyhose by using FEM [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2020, 32(2): 244-254.
- [27] DAN R, SHI Z. Dynamic simulation of the relationship between pressure and displacement for the waist of elastic pantyhose in the walking process using the finite element method[J]. Textile Research Journal, 2021, 91(13-14): 1497-1508.
- [28] ZHANG S, YICK K, CHEN L, et al. Finite-element modelling of elastic woven tapes for bra design applications[J]. The Journal of The Textile Institute, 2020, 111(10): 1470-1480.
- [29] 邓珣. 振动环境应力下 SiC 高温压力传感器结构性能分析及机制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

## Research Progress of Clothing Pressure Comfort Simulation

LIANG Yu, LI Hui\*

(School of Information Engineering, Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The current situation of clothing pressure comfort and clothing pressure simulation research were reviewed. The application of finite element method in clothing pressure simulation research were introduced. The shortcomings of current research in related fields were summarized, and the development direction of clothing pressure simulation was prospected.

**Key words:** clothing pressure; virtual pressure; comfort; finite element method