



压力服定制技术研究进展

林剑叠^{1a}, 阎玉秀^{1a}, 金子敏^{1b}, 陶建伟²

(1. 浙江理工大学, a. 服装学院; b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018;

2. 浙江棒杰医疗科技有限公司, 浙江义乌 322000)

摘要: 定制是制作压力服的一种重要手段。从压力服材料性能、人体生理特征、人体尺寸测量手段、服装压力评价和舒适阈值 5 个方面分析了压力服定制压力的影响因素; 归纳了 3 种压力服量身定制的方法, 即折减系数法、Laplace 定律法及 3D 虚拟设计法, 并分析了这 3 种方法的局限性。针对当前定制技术制作压力服存在效率低、操作性不强及服装压舒适阈值不明确等问题, 从服装压力舒适阈值研究、织物力学性能的量化研究、3D 人体建模的智能化研究以及不同人体材料力学属性数据化研究 4 个方面提出了一种 3D 虚拟定制压力服模式, 该模式可以减少定制压力服在整个制作过程中所花费的时间与成本, 为压力服的开发提供一定的参考。

关键词: 压力服; 服装压; 定制技术; 3D 虚拟设计; 研究进展

中图分类号: TS941.17

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0013-08

Research progress on customization technology of compression garment

LIN Jiandie^{1a}, YAN Yuxiu^{1a}, JIN Zimin^{1b}, TAO Jianwei²

(1a. School of Fashion Design and Engineering; 1b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Bangjie Medical Technology Co., Ltd., Yiwu 322000, China)

Abstract: Customization is an important means of making compression garment. The paper analyzed the factors that affect the customization pressure of compression garment from five aspects, including material performance of compression garment, physiological characteristics of human body, body size measurement methods, clothing pressure evaluation and comfort threshold. And three customization technologies of compression garment were concluded, including the reduction coefficient method, Laplace's law and 3D virtual design method, and their limitations were analyzed. In view of the problems of low efficiency, poor operability and unclear comfort thresholds of clothing pressure in making compression garment by current customization technologies, a 3D virtual customization mode of compression garment was proposed from 4 aspects, including research on comfort threshold of clothing pressure, quantitative research on mechanical properties of fabrics, intelligent research on 3D human modeling. This mode could reduce the time and the cost in the entire production process of customized compression garment. This paper provides theoretical reference for the development of compression garment.

Key words: compression garment; garment pressure; customization technology; 3D virtual design; research progress

收稿日期: 2020-06-12 网络出版日期: 2020-11-05

基金项目: 浙江省科技厅省级新产品试制计划项目(2018D60SA733455)

作者简介: 林剑叠(1994-), 男, 广东陆丰人, 硕士研究生, 主要从事服装数字化技术方面的研究。

通信作者: 阎玉秀, E-mail: yanyuxiu777@163.com

0 引言

压力服是指对人体特定部位施加一定机械性压力的服装。常见的压力服包括紧身运动服、塑身服、压力治疗服等。紧身运动服的压力需要根据运动特征进行专门的分类设计^[1]。一类是针对长时间的体力活动,这类服装需要对人体特定部位施加适当的压力,减少运动员在运动过程中肌肉震荡,促进肌肉中乳酸清除、增强血液循环与肌肉状态恢复,如长跑服等;另一类是针对速度类的运动,这类服装需要减少液体或空气阻力对运动的影响,通过控制服装表面的材料状态,来达到减少气体阻力或者液体阻力,如速滑冰服、泳衣等。塑身服主要由针织尼龙/氨纶织物制成,采用比人体肢体更小围度的面料尺寸设计达到收紧或施压于身体的特定部位,通常采用高压来重塑或矫正体型,可以改善人体美观性^[2]。压力治疗服则可以分压力衣与弹力袜。压力衣专门用于预防或治疗由烧伤、手术后或伤疤过度增生引起的肥厚性瘢痕^[3];弹力袜起初开发用于治疗下肢深静脉血栓形成,目前已应用于各种静脉疾病的常用预防与治疗,例如静脉高压、静脉曲张、水肿、血栓形成后综合症、下肢静脉溃疡和淋巴水肿等^[4],弹力袜还具有良好的保健与运动防护功能,渐进式弹性压缩长袜(Graduated compression stockings, GCS)还可有效提升人体的舒适性^[5]。

目前,关于压力服的研究主要集中在服装压的预测上,其数值各有差异,具体原因则受服装材料性能、人体体型及个体感应程度高低等因素的影响^[6]。当服装压水平过高时,服装压力将可能会成为人体负担并伤害身体,而过低则起不到压力服的工效,这促使定制成为压力服制作的主要方法。随着计算机技术的发展,虚拟定制可以更高精准度控制服装压,同时避免传统压力服在开发过程中因大量调试而产生高制作成本。因此,将虚拟技术用于压力服的定制是实现压力服定制技术改善的重要手段,本文重点介绍了压力服定制技术的研究现状,并提出3D虚拟定制压力服模式,为虚拟技术用于压力服的定制提供理论依据。

1 压力服定制压力的影响因素

服装压是影响压力服性能的主要因素,设计服装压大小不合适会影响压力服所具有的功能效果。压力服定制压力的影响因素主要有压力服材料性能、人体生理特征、人体尺寸测量手段、服装压力评价和压力服压力阈值。

1.1 压力服材料性能

弹性材料为织物提供优异的弹力与弹性恢复率性能。制作压力服所选用弹性织物的物理性能和机械性能直接影响服装的压力大小。通过调整织物拉伸性能,可以改变压力服的压力传递。如改变面料弹性材料含量、纱线支数、组织结构、平方米克重和面料密度等,可以调整织物的拉伸性能,从而实现根据选择不同类型的织物在穿着时提供所需的应力来设计所需服装压^[6-7]。

1.2 人体生理特征

人体皮肤、血液循环系统、呼吸系统等正常的生理特征对服装压力范围有所要求。王佳^[8]对采用血压计对下肢进行着装的模拟加压与穿着压力袜加压,研究了不同压迫方式对下肢受压部位皮肤血流量、压迫感的影响。研究发现,在一定压力范围内,加压使皮肤的血流量增加,当压力超过一定临界值时血流量逐渐减少。塑形服装或日常紧身服装对身体的某些部位施加过度和持续的服装压力,可能对呼吸系统产生负面影响。郭兆蓉等^[9]实验研究发现4.00~6.60 Pa之间的塑身内衣压力会增加呼吸频率。Morooka等^[10]研究了泳衣压力对不同受试者心率、皮肤血液循环和呼吸功能的影响。泳衣保持穿着状态时,站立姿势,血压升高,心率降低,运动期间摄入氧气量与呼吸量减少;当服装压力低于1.00 Pa时,静脉泵运送加速,当肩部和腹股沟区域的服装压力过高时,血液流向下肢被抑制,运动后血压恢复正常被推迟。阎玉秀等^[11]通过测量受试者穿着不同压力内衣在篮球运动状态下的压力值与心率变异值,表明心率变异可作为评价服装压舒适阈值的依据。在篮球运动状态下,青年女性胸部受压数值应控制在2.07~3.27 kPa内,使其保持舒适平稳的生理状态。

1.3 人体尺寸测量手段

卡尺、卷尺等手动型测量工具是获取人体尺寸数据的重要途径。这些测量方式成本低、操作简便,但测量结果却易受到测量者技术水平与主观判断的影响^[12]。人体尺寸是压力服定制压力水平的数据基础,微小变化会影响压力服装与人体之间的界面压力。因而,在压力服定制过程中,若没有精确的身体尺寸测量,经反复试制以获取合适的服装压会消耗大量的成本。随着数字化技术的推进,图像分析与3D人体扫描等非接触性人体测量方法备受学者们的青睐。在医学上,通过图像分析,可监测人体的面部外形、皮肤伤口及体型变化^[13-15];3D人体扫描

仪获取直立人体尺寸,截取人体特定部位的轮廓数据,结合 CT 技术,可模拟监测人体受压下生物力学状态^[16]。与直接人体测量方法相比,3D 扫描提供精确的人体尺寸测量和完整的人体几何图形,可用于计算机模型模拟与拟合。

1.4 服装压力评价

压力服中关于服装压力的确定,主要包括主观评价与客观评价两种方法。主观评价主要是通过受试者的主观感受完成,一般采用心理学标尺来完成。在评估医疗压力服装的压力强度时,涉及将两根手指插入衣服边缘下方,或者抬起接缝并使其紧贴皮肤^[17],以感觉服装的松紧程度。对于非医疗类压力服装则通过设计好的问卷调查表,让受试者穿上压力服后对服装压感的舒适性指标进行主观评价^[18-19]。由于个体的差异,主观评价存在测试结果不准确和不可量化的问题。客观评价包括服装压力直接测量与间接测量。服装压直接测量是使用压力传感器直接对压力服装进行测试,在着装过程中,将传感器放置于人体与压力服之间并紧贴人体服装表面进行测量。国内外较具代表性的服装压测量设备有流体压力测量、压阻式传感器测量、气压式传感器测量及弹性光纤压力测试系统^[20]。使用压力传感器直接测量法需与人体接触,且其易受传感器的精度、体积及厚度的影响,从而导致测量误差^[21]。间接测量是近年来的服装压力研究热点,主要包括人体生理活动表征法、软体假人测量法和理论算法。

人体生理活动表征法指通过皮肤出汗率、心率、呼吸量、无氧阈值、脑波等生理变化来评价服装压力的舒适阈值变化范围与压力效益^[22-24]。人体生理活动表征法可以客观地反映出人体在某种状态的服装压力阈值,但目前存在测量仪器昂贵、仪器操作复杂、测试数据比较局限于个体等问题。

软体假人测量法指通过玻璃纤维增强塑料、硅胶海绵、聚酯氨等模拟人体骨骼、皮肤和软组织^[25-26],对人体特定部位进行实体仿真。经仿真人体尺寸定制压力服,发现其压力测量结果与实际人体测量值相关性高,但仅作为相同尺寸的人体进行压力测量,且制作成本高,具有应用的局限性。

理论算法通常将织物面料参数或人体体型参数作为输入变量,服装压力值或服装宽裕量作为输出变量,主要包括 Laplace 定律及数值模拟法。Laplace 定律及其定律推广公式广泛运用于压力服的定制,将在压力服定制技术方法中详述。数值模拟法主要以建立三维人体模型为基础,通过建立预

测部位的人体几何模型、物理建模与数值计算,对其进行应力、位移、接触压力等分析,数值模拟服装压力与皮肤相互作用的主要手段是有限元法。有限元法通过服装和人体组织的几何和机械性能作为其仿真的基本输入,将应力、位移、接触压力等分析作为可视化的输出,从而增加人体与服装之间相互作用的理解。有限元法将压力预测值与直接测量值进行比较来验证仿真模型,以验证模型的准确性。目前,通过建立织物与人体几何模型,将人体视为线弹性体与将面料视为各向同性的弹性壳是有限元法研究评价服装压力的主流,且具有较好的预测性^[27-30]。但有限元法只针对静态人体的特定部位与特定面料,对预测动态人体的压力分布将是对有限元模型的更高要求,这使得有限元法在压力服定制的应用受到局限。

1.5 服装压舒适阈值

压力服对人体的压力应在适当范围内,各类压力服对施加于人体的压力大小应遵循压力效果与人体舒适性最优原则。紧身运动服的压力阈值应符合运动员对服装防护功能与人体舒适的要求,客观测量与主观评估结合已成为评估紧身服装压力舒适阈值的主流研究方向。Denton^[31]在 1972 年指出服装压的舒适范围是为 1.96~3.92 kPa。当服装压超过这个范围时,则会使人感觉不舒适。Marks^[32]为了评估出人体感受服装不舒适压力值的最低限度,采用一种弹性织物带子作为研究对象。研究表明人体感受不舒适的临界压是 6.86 kPa 左右,而人体皮肤表面的毛细血管血压平均值为 7.84 kPa,两者间的压力值比较接近。塑身服的压力水平设计基于穿着者的舒适感与塑身的预期效果,目前塑身服的标准压力水平仍处于初步探索阶段^[6]。Watanuki^[33]研究表明,塑身服施加于人体以维持静脉血液回流所需的最低临界压力应为 1.88 kPa。Makabe 等^[34]认为当塑形服与人体的接触压力超过 4.00~5.33 kPa 时,会感觉不适。Chan 等^[35]建议塑身腰带的最佳压力分布设计为臀部 0.53 kPa,前腹部 0.93~1.20 kPa,左右侧腰部 1.60 kPa。关于压力医疗服的有效治疗所需的确切压力尚未科学确定,压力衣/瘢痕的接触压力和压力衣的合身性是通过“视觉,触觉和体验”进行评估的^[36]。评价压力衣对瘢痕施加实际压力的研究存在两种结果^[37-39]:部分学者们认为压力衣施加于瘢痕小于 3.33 kPa(约 2.00~3.20 kPa)的压力可以显著改善肥厚性瘢痕^[37-38];也有学者认为压力衣施加未指定的较高压

力会在时间上对疤痕成熟产生更快的结果^[39]。这两者由于治疗效果的要求不同,其所需的压力值产生了显著的不同。

2 压力服定制技术

压力服制作方法主要包括批量生产法与量身定做^[40]。批量生产法,指按照人体各部位尺寸批量生产各种规格压力服装产品的方法。该方法生产的压力服与消费者需要压迫的部位通常不太贴合,服装压力不够精确、均匀,不能很好地满足消费者需求,需要对产品进行调整。量身定做法,即量身定制技术,依据个体尺寸差异制作压力服,根据设计原理主要分为折减系数法、Laplace 定律法和 3D 虚拟设计法。

2.1 折减系数法

折减系数法主要应用于治疗有烧伤引起的肥厚性疤痕的压力衣制作,首先测量患者疤痕部位相应的尺寸,然后与疤痕部位相同尺寸的基础上折减一定的百分比,将折减的尺寸制作成纸样,即得到成衣制作尺寸^[41]。折减百分比的数值调整范围在 5%~20%之间,市场上大部分压力治疗服装,通常采取 20%的折减系数,用于不同疤痕患者的治疗,而较少压力治疗服根据不同的患者在 10%~20%的折减系数进行调整^[42]。折减系数也用于同一患者在治疗过程中对治疗压力要求不同,而对现有的压力衣进行调整。亦有学者提出根据在不同年龄段的患者应采用不同折减系数进行压力衣的制作,特别对未成年的患者,对患有面部烧伤的儿童患者施加过大的压力,则患者有患牙齿或骨骼生长障碍的风险^[43]。

2.2 Laplace 定律法

Laplace 定律源于描述弹性膜或流动薄膜层的压力变化与其表面张力之间的关系。Cheng 等^[44]和 Macintyre 等^[45]运用 Laplace 公式预测织物在已知张力下传递到已知半径圆柱体的压力值,见式(1):

$$P = \frac{T}{R} \quad (1)$$

其中: P 是界面压力, N/m^2 ; T 是单位长度的织物张力, N/m ; R 是被施加界面压力的人体部位半径, m 。

Ng 等^[46]基于 Laplace 定律考虑织物张力的不足,考虑织物弹性模量,引入压缩因子建立关系,来表征服装缩放量与服装界面压力之间的关系,该关系用公式描述为:

$$Re = \frac{1}{1 + \frac{2\pi EI(CF)}{C_{\text{human}}P}} \quad (2)$$

其中: Re 是服装缩放量, cm ; EI 为弹性模量, MPa ; CF 为压缩因子; C_{human} 为人体某部位的周长, cm ; P 为服装压, mmHg 。

Dubuis 等^[47]对 Laplace 公式进行改进,用于医疗临床实践中计算多层绷带对皮肤施加的压力,见式(3):

$$P = \frac{T \times n \times 4620}{CW} \quad (3)$$

其中: P 是压力, mmHg ; T 是子绷带张力, kgf ; n 是施加的层数,层; C 是肢体的周长, cm ; W 是子绷带的宽度, cm 。常数 4620 由测量单位的转换得出。

Barhoumi 等^[48]根据弹性面料应力—应变关系与弹性模量的线性关系,亦得到 Laplace 定律的推广公式,如式(4):

$$P = \frac{2\pi\epsilon Ee}{C} \quad (4)$$

其中: ϵ 是面料拉伸值,%; E 为面料的弹性模量, MPa ; e 为面料的厚度, mm 。

以上 Laplace 定律及其定律推广公式运用于定制压力服的研究都考虑进织物的机械性能或数量对压力服的影响,但忽略了人体下肢的曲率变化,其研究了已知下肢的周长求得下肢四周的平均压力,而不是特定部位的压力分布。Liu 等^[49]通过 3D 扫描仪测量了穿着压缩袜后的腿部,运用高阶多项式拟合腿部几何形态,再通过求导的方式获得局部部位的曲率,利用具有曲率参数的 Laplace 定律预测特定部位的压力,为制作施加特定压力的服装提供了理论基础,但也忽略了人体软组织的特定属性。

2.3 3D 虚拟设计法

3D 虚拟设计法指通过建立三维人体着装模型,运用仿真算法计算出具有规定压力分布的服装纸样参数,并将这些参数运用于仿真面料的裁剪、缝制等,从而开发具有特定压力范围的服装,进而降低定制压力服开发成本以及提高其开发效率。

为了精确计算服装压力,在弹性织物的计算中,必须考虑由于在身体不同区域中的软组织被压缩而引起解剖截面变形。Ilska 等^[50]与 Kowalski 等^[51]运用 3D 扫描仪测量了穿着压缩袜前后的腿部,运用 Laplace 定律比较由织物应力与腿部解剖横截面引起的误差,研究表明:由于人体软组织的收缩,与最初计算的相比,服装压平均降低了 9.2%,最大压力损失预计约为其 4 倍,达到 37.0%。

早期学者出于服装贴合性与“人体-服装”界面压力为零,提出将平整化面料贴合身体表面的某些部分,以此来设计令身体无负担的泳衣或骑行服装^[52]。没有考虑服装尺寸和身体尺寸之间的差异以获得所需的服装压力,故在压力服定制过程中不需要考虑服装面料的机械性能。2010年,Wang等^[53]提出一种数值算法,在3D人体腿部模型中规定拉伸应变值,计算出适合该人体腿部的2D纸样参数,将其折叠回3D模型时,基本实现规定人体部位压力分布。2018年,Victor等^[54]提出通过建立针织材料的伸长率、女性人体形态、及两者之间关系的数据库,针对人体表面的模型参数进行3D到2D展开的方法,进行压力服装的虚拟制作。利用该方法制作几套不同女性体型特征的塑形压力服,与传统的压力服设计方法相比,预测压力与测量压力之间的绝对差值从33.0%降低到14.0%。

3D虚拟设计法采用精确的3D模型,综合考量人体变形对服装压分布的影响及织物性能的量化,是压力服数字化定制的发展方向。但该开发方法的局限性亦包括三维人体建模的精度不足、人体变形特征对服装压分布的影响较大与面料力学性能的量化困难。

2.4 压力服定制技术的局限性

压力服定制技术的局限性源于织物拉伸性能与人体部位形态的可变性。压力服定制压力的常规做法是采用固定的折减系数,如肢体周长测量值减少15.0%,在皮肤界面表面产生织物拉伸应力。由于织物包含弹性纤维含量、纱线支数、组织结构、平方米克重和面料密度等性能影响压力服的拉伸性能,这类做法导致出厂压力服需要频繁的调整和更换^[46]。

Laplace定律可以一定程度用于压力服的定制,但应用Laplace定律易将人体肢体看作标准的圆柱体,而人体受压部位的曲率形态变化各异,求得特定部位曲率需较高精度的人体测量仪器和复杂的模型算法,存在操作性不强的特点。Laplace定律以考虑织物的拉伸性和人体的几何形态作为研究的热点,但把人体软组织特征作为其中的参数,是Laplace定律应用于压力服装制作的挑战^[47-49]。

人体是由不规则的几何体构成,下肢生物组织具有复杂几何形状和非线性力学行为^[16],在3D虚拟设计中将人体软组织的收缩视为线弹性体,具有仿真不合理性。

各类服装压舒适阈值的确定是压力服开发存在的问题之一,压力衣的最佳治疗压力尚未确定^[3],紧

身运动服装压力舒适阈值大多通过主观评价确定^[18-19],塑形服施加压力于人体以形成最佳塑形效果的研究仍处于探索阶段^[6]。

3 压力服定制技术的发展

随着计算机技术的发展,数字化定制是压力服制作的发展方向,其根据材料的性能、消费者的舒适性能等要求,个性化量身定制压力服符合消费者的需求。将仿真算法用于定制技术的3D虚拟定制压力服模式是未来压力服定制发展的方向之一,该模式具体如图1所示。该模式由3D实体模型重构、数据库1~3、着装虚拟压力分析、调整松弛状态压力服的纸样参数与压力服制作等部分组成。首先,根据3D人体扫描数据进行人体着装部位的实体重构,将重构模型的外轮廓作为界面压力为零的服装,对服装进行纸样分割设计,获取松弛状态的虚拟压力服纸样参数;然后调用数据库1~3,选用数据库1的某一面料类型,将其力学性能数据赋予服装,选用数据库2的某一类人体类型,将其生物力学数据赋予3D实体模型,对赋值后的服装与3D实体模型进行虚拟服装压分析;在虚拟压力分析中,若服装对实体模型施加的压力值符合数据库3选用的服装压舒适阈值,则将松弛状态的虚拟压力服纸样展开为平面纸样,并记录开发纸样参数数值,否则调整模型中的纸样参数大小,直至着装受压大小符合选用的服装压舒适阈值;最后根据得到纸样参数数值,进行压力服制作。该模式的发展可以提高制作压力服的精度,同时该模式的发展可减少定制压力服在整个开发过程中所花费的时间与成本。基于当前3D虚拟设计法对参与仿真数据要求,该模式的开发与发展成熟需要以下几个方面的研究:

a)服装压舒适阈值研究:消费者对压力服功能性的需求要求决定服装压的大小,针对压力衣、紧身运动服、塑形服等不同功能性压力服进行相应压力舒适阈值研究,形成服装压舒适阈值数据库,是开发具有特定压力范围服装的首先要求。

b)织物力学性能的量化研究:织物在设计与生产时,需考虑弹性纤维含量、纱线支数、组织结构、平方米克重和面料密度等织造工艺参数对织物力学性能的影响。而织物力学性能是各类模型仿真的输入参数,可模拟服装不同机械性能对服装压的影响。从织物设计与生产的角度,量化织物的力学性能,建立具有特定力学性能的面料数据库,是进行压力服数字化定制生产的基础。

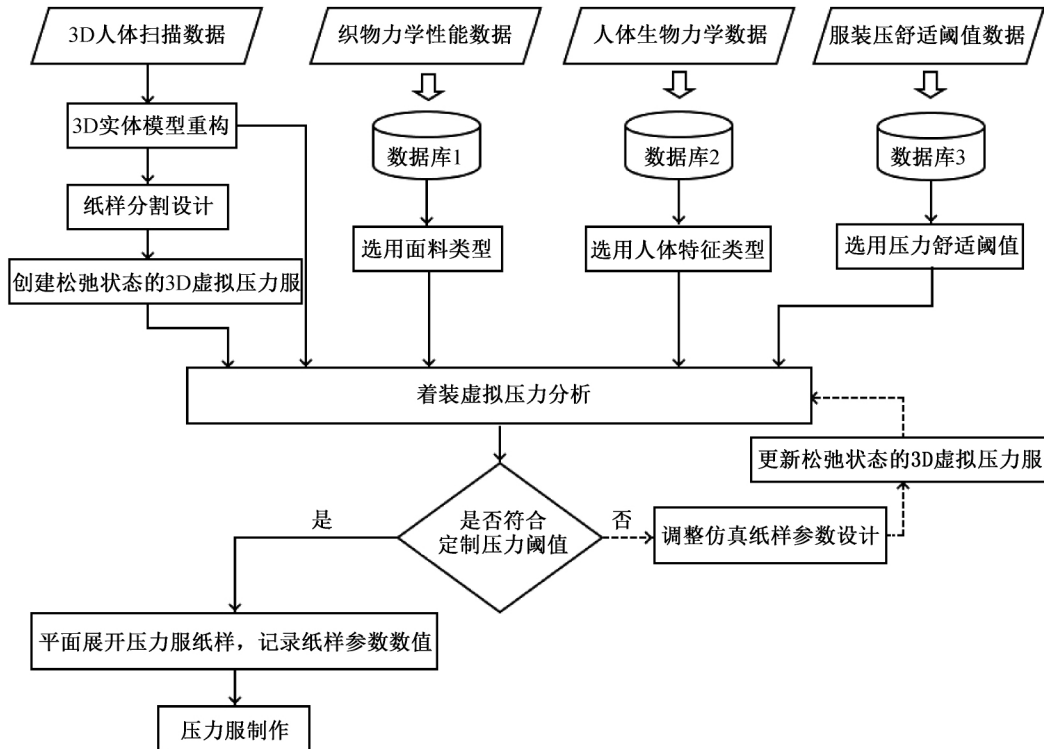


图1 3D虚拟定制压力服模式

c) 3D 人体建模的智能化研究: 3D 扫描仪、CT 扫描等工具提供精确的人体尺寸测量数据和完整的人体几何图形, 将其运用于人体仿真模型和虚拟拟合十分有效。但在成熟的压力服数字化定制模式中, 人工建模的成本过高, 仍需实现人体测量数据到 3D 人体模型的智能化建模。

d) 不同人体材料力学属性数据化研究: 人体的骨骼、软组织等材料力学属性设置是进行人体生物力学仿真的基础要求, 但人体力学材料属性设置受年龄、职业、生活方式等的影响。研究不同人群中人体材料力学属性差异, 并进行数据库管理, 有助于在减少不合理压力仿真的情况下, 进行压力服数字化定制。

4 结 语

随着人们对健康和身体体态的关注, 对紧身运动服及塑身服的压力与舒适性能的要求将逐渐重视。而在医疗领域, 压力服作为压力治疗手段的载体, 是目前用于长期治疗烧伤瘢痕、静脉曲张等疾病的重要工具。通过研究表明:

a) 影响压力服定制压力的因素主要包括压力服材料性能、人体生理特征与测量手段、服装压力评价和舒适阈值。明确这些影响因素对压力服定制技术的改善具有重要的引导作用。

b) 压力服量身定制技术包括折减系数法和 Laplace 定律法及 3D 虚拟设计法。折减系数法和 Laplace 定律法是目前研究制作各类压力服常用的定制技术, 但都存在一定的不足。3D 虚拟设计法因目前技术的局限性, 未应用到实际的生产开发。但其以计算机算法为载体, 成熟的生产模式具有高效率、低成本的特点, 是压力服数字化定制技术发展的新方向。

c) 3D 虚拟设计未来可以发展成为一种压力服定制模式, 其为综合服装压舒适阈值、织物力学性能的量化、3D 人体建模的智能化与不同人体材料力学属性数据化 4 个方面的研究, 形成压力服定制化数字系统。该模式的发展与成熟可以减少定制压力服在整个制造过程中所花费的时间与成本, 为压力服的开发提供理论参考。

参考文献:

- [1] Gupta D. Functional clothing-definition and classification [J]. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2011, 36(4): 312-326.
- [2] 段杏元, 于伟东. 整形内衣压力舒适性的研究方法及其进展[J]. 纺织学报, 2007, 28(11): 144-148.
- [3] Puzey G. The use of pressure garments on hypertrophic scars[J]. Journal of Tissue Viability, 2002, 12(1): 11-15.

- [4] Lim C S, Davies A H. Graduated compression stockings [J]. Canadian Medical Association Journal, 2014, 186 (10): E391-E398.
- [5] Zhang L L, Sun G W, Li J C, et al. The structure and pressure characteristics of graduated compression stockings: experimental and numerical study[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(23/24): 5218-5225.
- [6] Yu A, Yick K L. Compression and stretch fit garments [C]// Engineering of High-Performance Textiles. Holand:Elsevier, 2018:279-303.
- [7] Barhoumi H, Abdessalem B, Marzougui S. Influence of manufacturing parameters of knitted compression fabric on interface pressure[J]. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2018, 4(1): 426-433.
- [8] 王佳. 着装压力与人体生理舒适性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008:33-44.
- [9] 郭兆蓉, 徐军, 刘雪婷. 塑身内衣对人体生理影响的测试实验[J]. 西安工程大学学报, 2012, 26(2): 168-173.
- [10] Morooka H, Nakahashi M, Morooka H, et al. Effects of clothing pressure exerted on a trunk on heart rate, blood pressure, skin blood flow and respiratory function[J]. Journal of the Textile Machinery Society of Japan, 2001, 54(2): 57-62.
- [11] 阎玉秀, 高婕, 金子敏, 等. 女子篮球运动内衣压力对心率变异指标的影响[J]. 纺织学报, 2014, 35(6): 100-104.
- [12] 姚怡, 唐洁芳. 三维服装技术的研究与应用[J]. 丝绸, 2014, 51(7): 36-41.
- [13] Deng Y M, Yick K L, Kwok Y L, et al. Development of a three dimensional measuring system for neonates' head and facial morphology [J]. Journal of Donghua University, 2007, 24: 309-312.
- [14] Lin Y L, Wang M J J. Automated body feature extraction from 2D images[J]. Expert Systems With Applications, 2011, 38(3): 2585-2591.
- [15] Meunier P, Yin S. Performance of a 2D image-based anthropometric measurement and clothing sizing system[J]. Applied Ergonomics, 2000, 31(5): 445-451.
- [16] Lu Y T, Yang Z Y, Wang Y X. A critical review on the three-dimensional finite element modelling of the compression therapy for chronic venous insufficiency [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2019, 233(11): 1089-1099.
- [17] MacIntyre L, Baird M. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars: A review of the problems associated with their use[J]. Burns, 2006, 32 (1): 10-15.
- [18] 徐军, 周晴. 运动内衣压力分布的主观评定[J]. 纺织学报, 2005, 26(2): 77-78.
- [19] 刘晓航, 刘莉. 青年女性穿着塑裤的主观压力舒适性研究[J]. 针织工业, 2018(2): 62-66.
- [20] 覃蕊, 陈东生, 范雪荣, 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.
- [21] 刘宇, 王永荣, 罗胜利, 等. 服装压力分布测试和理论预测模型的研究进展[J]. 针织工业, 2019, 2: 56-60.
- [22] 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: 48-59.
- [23] 王荃. 服装压对自行车骑行绩效机能的影响与评价 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020: 7-12.
- [24] 吴志明, 赵敏, 陈星毅. 颈部服装压对人体颈动脉窦生理的影响[J]. 纺织学报, 2011, 32(5): 98-102.
- [25] 王康, 李艳梅, 王蓉. 压力测试用柔性腿模的结构仿真研究[J]. 丝绸, 2019, 56(4): 18-23.
- [26] Yu W, Fan J T, Qian X M. A soft mannequin for the evaluation of pressure garments on human body [J]. Fiber, 2004, 60(2): 57-64.
- [27] Dan R, Fan X R, Shi Z, et al. Study on the relationship between pressure and stiffness coefficient, and elastic elongation of the top part of men's socks using finite element method[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2015, 27(5): 751-766.
- [28] Lin Y L, Choi K F, Luximon A, et al. Finite element modeling of male leg and sportswear: Contact pressure and clothing deformation[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(14): 1470-1476.
- [29] 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.
- [30] Wu J H, Jin Z M, Jin J, et al. Study on the tensile modulus of seamless fabric and tight compression finite element modeling[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(1): 110-122.
- [31] Denton M J. Fit, stretch, and comfort[J]. Textiles, 1972, 3(1): 12-17.
- [32] Marks L E. Sensory Processes; The New Psychophysics[M]. New York: Academic Press, 1974: 290-318.
- [33] Watanuki S. Improvements on a design of girdle by using cardiac output and pressure sensation [J]. The Annals of Physiological Anthropology, 1994, 13(4): 157-165.
- [34] Makabe H, Momota H, Mitsuno T, et al. A study of clothing pressure developed by the girdle[J]. Journal of

- the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1991, 32: 424-438.
- [35] Chan A P, Fan J. Effect of clothing pressure on the tightness sensation of girdles[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2002, 14(2): 100-110.
- [36] Salisbury R E. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars: An evaluation of current construction techniques in NHS hospitals[J]. Yearbook of Plastic and Aesthetic Surgery, 2006, 2006: 213-214.
- [37] Nedelec B, de Oliveira A, Calva V, et al. Longitudinal evaluation of pressure applied by custom fabricated garments worn by adult burn survivors[J]. Journal of Burn Care & Research, 2019, 41(2): 254-262.
- [38] Carr-Collins J A. Pressure techniques for the prevention of hypertrophic scar[J]. Clinics in Plastic Surgery, 1992, 19(3): 733-743.
- [39] Reid W H, Evans J H, Naismith R S, et al. Hypertrophic scarring and pressure therapy[J]. Burns, 1987, 13: S29-S32.
- [40] 李小欢, 赵立环, 衡冲, 等. 压力服制作及其服装压评价的研究[J]. 针织工业, 2016(4): 63-67.
- [41] Leung W Y, Yuen D W, Ng S P, et al. Pressure prediction model for compression garment design[J]. Journal of Burn Care & Research, 2010, 31(5): 716-727.
- [42] MacIntyre L, Ferguson R. Pressure garment design tool to monitor exerted pressures[J]. Burns, 2013, 39(6): 1073-1082.
- [43] 付晋凤, 张梦思. 儿童烧伤治疗及瘢痕防治策略的探讨[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2018, 13(4): 241-246.
- [44] Cheng J C Y, Evans J H, Leung K S, et al. Pressure therapy in the treatment of post-burn hypertrophic scar: A critical look into its usefulness and fallacies by pressure monitoring[J]. Burns, 1984, 10(3): 154-163.
- [45] MacIntyre L. Designing pressure garments capable of exerting specific pressures on limbs[J]. Burns, 2007, 33(5): 579-586.
- [46] Ng S F, Hui C L. Pressure model of elastic fabric for producing pressure garments [J]. Textile Research Journal, 2001, 71(3): 275-279.
- [47] Dubuis L, Rohan CP Y, Avril S, et al. Patient-specific computational models: Tools for improving the efficiency of medical compression stockings [M]// Computational Biomechanics for Medicine. New York, NY: Springer New York, 2013: 25-37.
- [48] Barhoumi H, Marzougui S, Abdesslem S B. Clothing pressure modeling using the modified Laplace's law[J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2020, 38(2): 134-147.
- [49] Liu R, Liu J D, Lao T T, et al. Determination of leg cross-sectional curvatures and application in pressure prediction for lower body compression garments[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(10): 1835-1852.
- [50] Ilška A, Ilška A, Kowalski K, et al. Using a 3D body scanner in designing compression products supporting external treatment[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2017, 25: 107-112.
- [51] Kowalski K, Karbowski K, Kłonowska M, et al. Influence of a compression garment on average and local changes in unit pressure[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2017, 25: 68-74.
- [52] Liu K X, Wang J P, Zhu C, et al. Development of upper cycling clothes using 3D-to-2D flattening technology and evaluation of dynamic wear comfort from the aspect of clothing pressure[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2016, 28(6): 736-749.
- [53] Wang C C L, Tang K. Pattern computation for compression garment by a physical/geometric approach [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(2): 78-86.
- [54] Victor E K, Ilya V T, Dominique C A. Virtual design of knitted compression garments based on body scanning technology and the three-dimensional-to-two-dimensional approach [J]. Textile Research Journal, 2018, 89(12): 2456-2475.

(责任编辑:刘国金)