

# 女性胸部形态与三维建模研究综述

顾依然<sup>1</sup>, 祖玮琳<sup>1</sup>, 孙红<sup>1</sup>, 王军<sup>1,2,\*</sup>

(1.大连工业大学 服装学院, 辽宁 大连 116034;

2.大连工业大学 服装设计与工程国家级实验教学示范中心, 辽宁 大连 116034)

**摘要:**为解决女性胸部建模存在的问题,满足大众对个性化胸部模型的要求,从参数选择、分类标准、建模方法等方面详细阐述胸部形态和胸部建模方法的研究进展,分析三维人体测量、三维人体建模、虚拟试衣等数字化技术在研究中的应用情况。研究表明女性胸部建模涉及统计学、人体工程学、计算机图形学等多领域的交叉合作,个性化、数字化的胸部模型是未来的发展趋势。分析指出,虚拟试衣为未来人体模型应用的主要领域之一,建立适合虚拟试衣条件下的胸部模型可以更好地满足大众对线上试衣的需求。

**关键词:**胸部形态;三维建模;虚拟试衣

**中图分类号:**TS 941.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0356(2022)08-0050-07

胸部形态是体现女性曲线美的重要部分,研究发现胸部形态受 BIM 值<sup>[1]</sup>、年龄、哺乳<sup>[2]</sup>等多重因素影响。在胸部形态研究领域,国内外学者对计算机图形学、统计学等方法进行多次尝试,主要通过特征参数、特征截面对胸部形态分类。

随着互联网技术的发展,三维建模技术逐渐成为计算机图形学领域的研究热点之一,女性胸部建模研究也随人们对个性化的重视蓬勃发展。虚拟试衣作为未来服装数字化的发展方向对人体模型的需求日益增多,为满足大众对个性化模型的需求,人体的分区建模技术也逐渐成熟。目前国内外研究者在曲面建模、图形建模、有限元建模和虚拟试衣建模等方面进行大量探索,积累了许多高效建立个性化胸部模型的方法。

文中主要对女性胸部形态与胸部建模方面的研究情况进行分析,重点分析女性胸部形态分类、特征曲线以及胸部三维建模的研究进展与未来发展趋势。

## 1 胸部形态研究

胸部研究最早可以追溯到 1926 年的一家澳大利亚内衣公司,该公司提出以上下胸围为标准对女性胸部形态进行分类<sup>[3]</sup>。现代社会中女性选择文胸时有了更高要求,制作文胸前要全面了解女性胸部特点,找出不同的形态分类标准,满足女性对更加个性化、合体化

文胸的需求。

### 1.1 胸部形态分类

胸部特征尺寸主要指人体胸部围度、宽度、深度、角度等测量得到的参数,胸部的衍生参数主要有乳深宽比、胸围差、乳房角度等计算获得的参数,均为研究胸部形态分类的重要指标。相关研究指出,胸部的形态通常包括圆盘形、圆锥形、半球形等多种形态,仅用上下胸围差作为参数描述胸部形态的传统方法已经不再准确,因此需要提供更加完整、系统的参数作为描述胸部特征的依据<sup>[4]</sup>。

Rong Zheng 选取 456 名受试者通过 K-means 聚类方法建立了新的文胸尺寸标准,在 8 个影响胸部形态的因素中提取了胸围和乳深宽比 2 个变量作为新型文胸分类标准,该研究是早期基于 3D 裸乳特征提出文胸尺寸系统的案例<sup>[5]</sup>。

Yu Liu 收集 275 名受试者的原始数据,利用逆向工程软件 Polyworks 提取 108 个测量值,经过主成分分析之后以胸宽值、乳深比值和胸围值为特征参数制作结构更加合理的文胸,提供了一种效率更高的定制文胸方法<sup>[6]</sup>。

常丽霞对 270 名西部地区青年女性胸部形态进行分析,选取了身高、乳高、乳深、胸径比等 11 个特征指标通过聚类分析将胸部形态细化为 9 类<sup>[7]</sup>;之后又测量了 257 名女性,通过以上 11 个指标构建描述胸部特征的回归方程<sup>[8]</sup>。

赵馨从河南、湖北、湖南 3 个地区 180 名青年女性数据中随机挑选 60 组数据,以乳深、乳根围等作为特

收稿日期:2022-03-07;修回日期:2022-03-18

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJC60096);辽宁省教育厅科研项目(J2019023、J202002、J2020030)

第一作者:顾依然(1998—),女,在读硕士研究生,主要研究方向为数字化技术与应用。

\*通信作者:王军(1978—),女,副教授,博士,E-mail:574014917@qq.com。

征参数,将BP点到颈椎点的垂直距离/BP点到腰线的距离、BP点到领窝点的距离/乳间距、乳根围/乳深作为胸部形态的分类标准<sup>[9]</sup>。

成恬恬分析了227名18~25岁女大学生的胸部数据,并依据现有文胸号型分类分析了实际影响乳房形态的因素;通过分析两乳点间距、锁骨凹处到乳点的距离,将乳房基本形态分为内敛型、中间型、外扩型;又通过乳房夹角将乳房形态分为偏高型、中间型、偏低型<sup>[10]</sup>。

刘羽对267位18~35岁女性进行三维扫描,提取了19个与乳房角度相关的测量项目,通过乳房深和乳房角将人体胸部分为9类,如图1所示。该研究将人体侧面形态和胸部细部数据进行合理结合,探索了乳房角度与胸部形态之间的关系<sup>[11]</sup>。

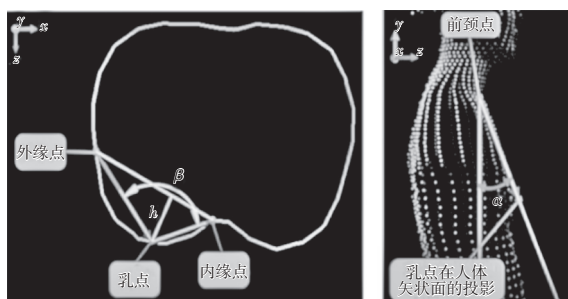


图1 乳房外缘点、内缘点、乳点、乳房深示意图

综上所述,在对胸部形态的相关研究中,形态分类变得更加多元化,表现出胸部形态研究的个性化与多元化趋势。目前胸部形态分类指标仍以局部参数为主,较少考虑胸部与体型整体之间的相关性。

## 1.2 文胸作用下胸部形态变化

文胸作为一种基础内衣对胸部形态有一定的修饰和美化作用,穿着文胸时一些胸部的细节数据会发生变化,这些变化可以更好地探究不同文胸对胸部产生的影响,分析文胸号型、版型的适体性问题,对文胸版型结构优化设计具有重要意义。

陈敏之测量了203名20~35岁的江浙地区女性的净体胸部和穿着常规薄款文胸的数据来研究文胸对胸部产生的变化,选择测量19项对胸部形态影响较大的项目,将净体与穿着文胸数据的差值与0之间做显著性检验,通过降维筛选出截面变化因子、挺度变化因子、丰满度变化因子和聚胸变化因子为影响胸部形态的4个主要因子<sup>[12]</sup>。

Jie Pei通过多元线性回归建立净体胸部与穿着文胸之间的联系,将一种通过颜色反应变化程度的热图

作为反映胸部细节数据变化剧烈程度的图像,其中红色橙色与原有相比数值增大,主要集中在乳房上部和两乳房中间部位,蓝色灰色部分与原有相比数值变小,主要集中在乳房下部,如图2、3所示。试验发现,穿着文胸后部分试验者胸部会变得圆润、上挺和聚拢,结构文胸的效果明显优于柔软文胸<sup>[13]</sup>。

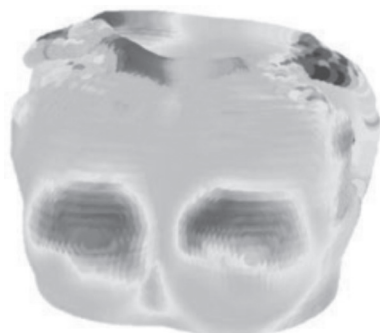


图2 穿着结构型文胸后胸部热值图

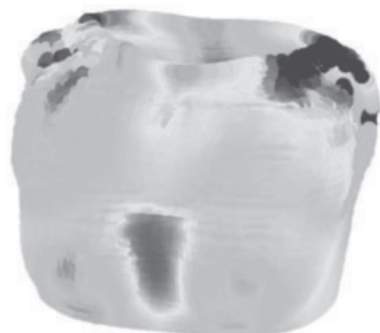


图3 穿着柔软文胸后胸部热值图

李婧通过研究文胸对圆盘形、圆球形和纺锤形3种不同胸部形态的塑形效果和压力舒适性建立一种文胸推荐系统。该系统通过分析消费者胸型,从客观角度为消费者提供适合的文胸版型款式,对女性选择正确的文胸有一定的指导意义<sup>[14]</sup>。

余越云通过测量乳房运动前后的位置变化探究7款运动文胸对乳房振幅的影响,由于不同款式的运动文胸对胸部的防护效果不同,选取乳头点、乳房内侧、乳房外侧、乳房下侧、乳房上侧作为测量对象,得到胸部各个方向的相对位移结果,对比不同种类运动文胸对胸部起到的保护作用<sup>[15]</sup>。

综上,穿着文胸会使女性的胸部形态更加美观,一定程度改善胸部的下垂情况。分析穿着文胸与净体时女性胸部形态变化,为研究文胸对胸部产生的压力、优化文胸版型等问题提供研究基础。在运动时文胸可以保护胸部防止运动时振幅过大给女性带来负担,为研究胸部在运动中发生的位移、改善运动文胸的舒适性

和合体性等问题提供数据支撑。

## 2 胸部特征曲线研究

胸部特征曲线是指描述胸部特点的辅助线和胸部截面曲线,分析特征曲线可对胸部细节开展更好的研究。辅助线将胸部进行分区分块,通过细节反应胸部形态。胸部截面呈现了胸部不同位置平面的特点,更加直观展现了胸部特征。

### 2.1 胸部轮廓曲线

胸部轮廓特征曲线主要为乳底截面曲线,该曲线为研究胸部边界形态、测量乳房体积提供了研究参考,与内部的辅助线结合可以更好地研究胸部细节形态,建立胸部内部数据之间的联系。

Hyun-Young Lee 等借助三维人体测量仪对 37 位女性的乳房进行测量,通过研究女性胸部的形态确定使用折线法拟合乳房轮廓曲线,并以此为基础提出了一种新的乳底轮廓形状评判参数,该参数在判断乳底轮廓的同时也优化了测量乳房体积的边界,使测量的体积更接近人体情况<sup>[16]</sup>。

马静测量了 235 名 18~25 岁华东地区女性的 35 个胸部指标,通过 15 个辅助线和辅助点将人体进行精确划分,如图 4 所示。经过分析,胸部大小受横奶杯弧线长、纵奶杯弧线长和胸围差 3 个胸部特征参数的影响最大<sup>[17]</sup>。

Abbey Peterson 使用三维软件沿胸部轮廓将乳房基底分成 12 个三角形和 4 个扇区,如图 5 所示,通过区域划分与不规则乳房底部结合创建虚拟胸壁,分离乳房半球,计算乳房体积<sup>[18]</sup>。

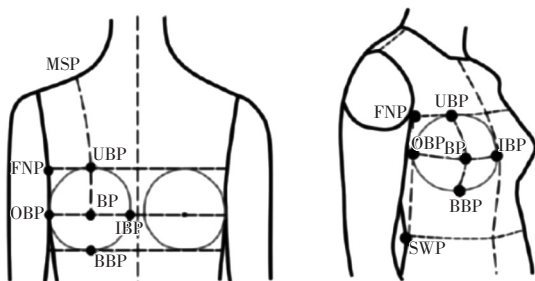


图 4 分界线与坐标点示意图

### 2.2 胸部截面曲线

截面曲线是平行或垂直于女性胸围线的横截和纵截平面,截面形态曲线与其他研究形式相比呈现的结果更加直观,便于研究胸部特点。

侯魏通过对 456 名 20~39 岁之间女性的胸部数

据进行分析,得到胸部整体形态、乳房丰满度、乳房横截面内侧形态、乳房横截面外侧形态、乳房纵截面形态、乳房方向 6 个描述乳房形态的因子。分析得出胸部整体形态、乳房丰满度为最主要的 2 个因子,提出以下胸围为号、乳房丰满度为型建立新的文胸号型标准<sup>[19]</sup>。

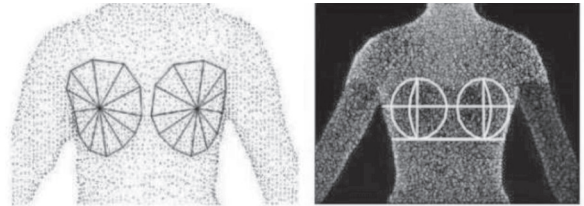


图 5 乳房基底分区分型

Susan P. Ashdown 提取了 478 名美国和欧洲女性的 66 个胸部原始数据,构建了宽度比、维度比等特征参数对胸部进行描述。通过对胸部侧面形态的研究弱化胸围差胸部形态对描述的影响,经过分析,使用上下乳房直线长度比、上乳房直线与乳底夹角和上下乳房直线夹角作为分类标准,如图 6 所示,为研究乳房侧面形态提供了新思路,丰富了胸部形态的研究方法<sup>[20]</sup>。

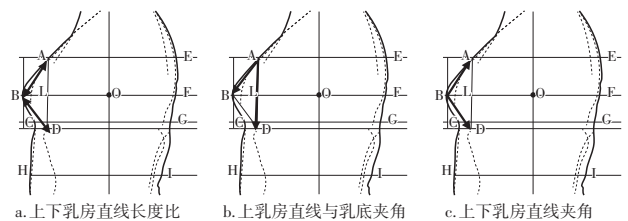


图 6 胸部侧面形态分类标准示意图

Jie Pei 提出了一种观察胸部截面到底部距离的新方法,以胸高点顶点做垂直于乳底的直线,再沿平行于乳底的方向截取若干平面,根据距乳底的距离结合地理学知识绘制胸部等高线地图,如图 7 所示;使用网格地图作为等高线地图的缩略版,可以更加清晰捕捉胸部形状的细微变化,如图 8 所示<sup>[21]</sup>。

综上所述,目前胸部特征曲线的研究成果主要应用在胸部截面形态研究和体积测量等相关领域。研究发现胸部的截面形态更多作为一种研究的辅助方法与其他方法结合使用,测量乳房体积更多使用辅助线确定胸部底面积和外轮廓的方法。

## 3 胸部建模方法研究

目前人体建模有线框建模、实体建模、曲面建模、



混合建模等建模方法,线框建模通过人体关节点和骨骼建立基础的拓扑关系;实体建模通过几何体对人体进行拟合;曲面建模通过数学公式及曲线对表面进行模拟;混合型建模是对以上几种建模方法的混合应用。由于胸部为人体曲率变化较大的部位,因此胸部建模与人体建模相比需要更多的细节数据,建模过程也有较大的难度。

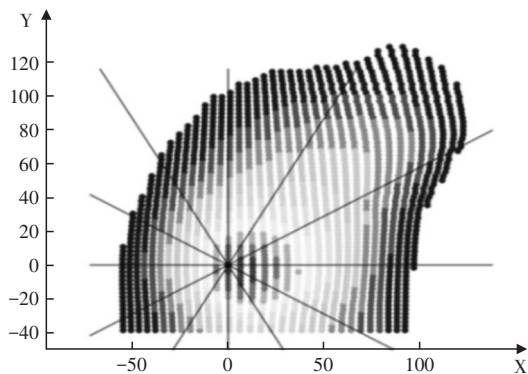


图7 胸部等高线地图

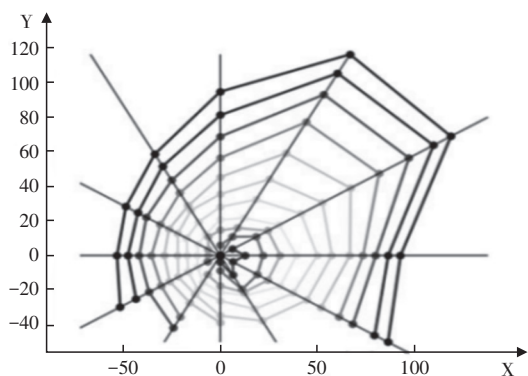


图8 胸部网格地图

### 3.1 曲面建模

曲面建模是基于 MAYA、3DMAX、Geomagic 等软件对模型进行参数化修改,在原有的多边形建模的基础上加入 Bezier 曲面、NURBS 曲面等拟合曲面,可以有效解决多边形模型的不平滑性<sup>[22]</sup>。

白玉从乳房的立体形态、丰满程度和聚拢高耸程度三方面对胸型进行划分,研究人体体型和胸型分类,分析胸部与周围部位形态的关系,并在 UG/Open 软件中通过 NURBS 曲线拟合建立参数可调节的文胸人台<sup>[23]</sup>。

高晓晓和马静通过三维扫描获得人体点云数据,应用探测曲率、构造曲面片、构建格栅、拟合曲面修正 NURBS 曲线模型的方法建立胸部模型<sup>[24]</sup>。

徐瑶瑶通过逆向建模直接扫描文胸模杯获取模杯

结构线,利用曲线的拐点、峰值点等调整模杯的形态,控制模杯结构<sup>[25]</sup>。

曲面建模的操作过程较为简单,需要的点云数据相对较少,是建立模型的首选方法。目前曲面建模中 NURBS 曲面使用最广泛,可以快速准确地建立人台和胸部模型,但由于曲面函数关系的灵活性较差,在建立特殊体型的模型时较受限。

### 3.2 图形建模

图形建模主要利用点、线、面三者之间的拓扑关系,修改优化网格几何形面片进行建模。分块优化法可以准确且全面反映人体外形特征,结合线性回归分析获得人体外形主成分权重,建立含有映射关系的人体模型<sup>[26]</sup>。图形建模可以更加自由地控制模型,在曲面建模的基础上对细节部分进行修改,便于建立个性化的三维人体模型。

王建萍首先通过 B 样条构建胸部模型,后使用 Dirichlet 图形的自由变形技术在女性胸部的细节部位进行更改,实现早期的交互式个性化女性胸型数据库的建立<sup>[27]</sup>。

修毅使用双变形轴将复杂胸围围线分为若干个简单曲线,利用迭代初始轴和角度加权平均原理分别对不同位置的简单曲线进行变形处理<sup>[28]</sup>,再将若干简单曲线段组合为复杂的胸围围线,完成女体胸部模型的曲面变形<sup>[29]</sup>。

Michael W. Gopper 将统计形状模型(SSM 模型)应用在女性乳房切除和重建手术中,提取逆向建模生成的胸部数据,结合主成分分析的方法将缺失的乳房形状和体积精准还原。与原有的容积法相比,基于 SSM 建模的乳房边缘和形状更加接近病人的乳房形态<sup>[30]</sup>。

图形建模在曲面的变化上显得更为灵活,建立的模型更符合真实人体情况。但该方法需要庞大的点云数据作为变形依据,也需要更多的数学计算做到精准控制模型变化,故该方法效率较低,难度较大。

### 3.3 有限元建模

有限元模型早期在工业实践中广泛使用,近期作为一种新型方法在人体建模中出现,该方法与传统建模不同的地方在于融入了材料、约束等条件,使模型具有动态变化的特征。使用有限元方法进行胸部建模时将女性胸部视为弹性体,改变弹性体的材料和受力情况以便于观察、模拟更多的胸部动作。

Joanne Yip 在网格有限元模型中加入重力条件、阻力条件和部分位移发生的偏差,确定合适的乳房系数,使用 Mooney-Rivlin 超弹性材料模型建立胸部有限元模型,使用该模型捕捉穿戴文胸时胸部的动态形变<sup>[31]</sup>。

Yue Sun 在建立好的胸部模型基础上加入非线性乳房材料系数,利用迭代变化来模拟乳房运动产生的变形,又使用超弹性材料开发了乳房动态模型以模拟活动过程中乳房形变,如图 9 所示<sup>[32]</sup>。该方法实现将乳房的静态和动态有限元模型结合起来,后经过优化模型建立了一种基于数值模拟的新型文胸试穿系统,验证了有限元模型用于预测变形和接触压力的合理性<sup>[33]</sup>。Ruixin Liang 在此研究的基础上模拟文胸与身体之间接触的压力,对比不同文胸静态接触压力验证模型的合理性,为未来制作文胸提供基础<sup>[34]</sup>。

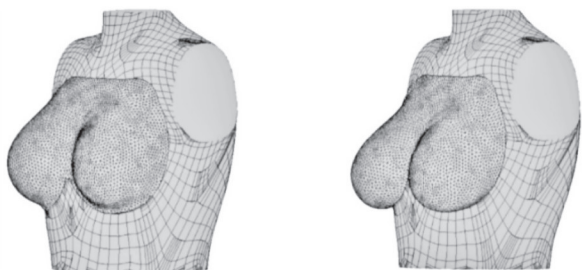


图 9 无重力与有重力的胸部有限元模型

有限元模型因重力、环境、阻尼等外界因素有条件建立更符合实际情况的胸部模型,超弹性材料模拟胸部运动产生的位移是有限元动态建模的关键。该研究不仅可以用来研究胸部形态,也为未来研究胸部压力及文胸的制作提供研究基础。

### 3.4 虚拟试衣中三维胸部建模

虚拟试衣是在计算机虚拟的环境下模拟人体模型和服装试穿情况,主要通过参数化建模、二维图像生成、三维扫描等方法建立模型。参数化建模相较二维图像法得到模型的效率和精确度都有提升。基于三维扫描的人体建模是利用扫描设备对人体进行扫描,获取人体表面的数据信息,之后再经过相应的点云处理重现人体模型<sup>[35]</sup>,该方法具有高稳定性和高精度的优点。

苏刚选择国外比较成熟的网格光滑算法理论对人体模型进行数学几何处理,建立 4 个相切的椭圆形,如图 10 所示,结合椭圆的凸边与凹边模拟胸部截面图像,初步拟合后加入 Sqrt3 细分算法对椭圆拟合进行改善,研究发现网格光滑处理提高了虚拟试衣中人体

几何模型的呈现效果<sup>[36]</sup>。

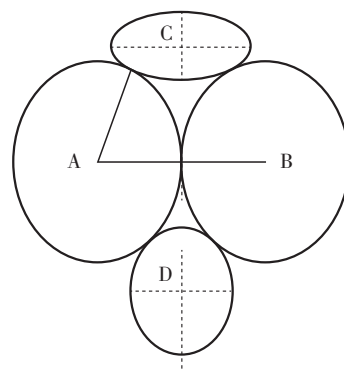


图 10 椭圆拟合胸部

顾力文对人体模型特征曲面的控制点进行二次开发,使其可以沿线方向运动,为建立更加符合虚拟试衣需求的人体模型,控制胸围截面的前中控制点和后中控制点对胸部等位置进行了消除人体部分凹陷结构的处理,该方法在虚拟试衣的参数化建模中满足了不同模型的需求,提高了工作效率<sup>[37]</sup>。

Jida Huang 使用层次分析法使相邻部位的参数进行关联,例如在逆向模型中输入腰围数据时胸围和臀围会根据腰围数据进行修正,当维度增加时对应生成的网格面积也随之增加。这种方法结合了线性回归和网格细分两种方法的优点,重现更多的人体信息,在个性化建模和虚拟试衣中建立更真实的模型,解决了部分极端情况带来的困扰<sup>[38]</sup>。

综上所述,目前胸部建模最高效的方法是基于三维扫描的逆向建模,三维扫描法通过收集大量的胸部数据为胸部建模提供大量细节。无论线上线下的购物方式,虚拟试衣技术的出现带来了极大的便利,不断完善试衣模型可以使消费者有更加个性化、科技感的购物体验。

## 4 结束语

对女性胸部形态、胸部曲线及三维建模等方面的研究进展进行梳理,列举分析国内外的研究现状,对相关领域的研究方向和趋势进行展望。女性胸部形态多变,研究过程中需注意胸部与身体其他部位的协调情况,使建立的胸部模型更贴近实际。目前胸部建模技术以曲面建模和逆向建模为主,有限元建模作为新兴技术在胸部建模中有较大的发展空间。

胸部作为女性体表曲率变化最大的部位之一,也是女性最重要的体型特征之一,研究构建胸部模型十

分必要。现有的胸部模型大多以人体模型为依托,细节的精确程度较差,后续研究可挖掘影响服装穿着效果的关键部位以及胸部间各细节数据,构建参数化胸部模型。目前大多胸部模型应用在文胸制作、文胸压力测试、胸部位移等研究中,未来研究将向着定制化、数字化的趋势发展,建立适用于虚拟试衣的胸部模型,提升消费者线上购物的体验感。

#### 参考文献:

- [1] SHI Y, SHEN H, TAYLOR L W, et al. The impact of age and body mass index on a bra sizing system formed by anthropometric measurements of Sichuan Chinese females [J]. *Ergonomics*, 2020, 63(11): 1434-1441.
- [2] MCGHEE D E, RAMSAY L G, COLTMAN C E, et al. Bra band size measurements derived from three-dimensional scans are not accurate in women with large, ptotic breasts [J]. *Ergonomics*, 2017, 61(3): 464-472.
- [3] ZHENG R. Breast sizing and development of three-dimensional seamless bra [D]. Hongkong: Hong Kong Polytechnic University, 2007.
- [4] WHITE J, SCURR J. Evaluation of professional bra fitting criteria for bra selection and fitting in the UK [J]. *Ergonomics*, 2012, 55(6): 704-711.
- [5] ZHENG R, YU W, FAN J. Development of a new Chinese bra sizing system based on breast anthropometric measurements [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2007, 37(8): 697-705.
- [6] LIU Y, WANG J P, ISTOOK C L. Study of optimum parameters for Chinese female underwire bra size system by 3D virtual anthropometric measurement [J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2016, 108(6): 877-882.
- [7] 常丽霞, 张欣, 齐静. 基于三维人体测量技术的女性乳房形态细分研究 [J]. *纺织学报*, 2006, 27(12): 21-24.
- [8] 常丽霞, 李爱英, 乔敏, 等. 基于非接触测量技术的女性胸部形态特征分析 [C] // 人-机-环境系统工程创立 30 周年纪念大会暨第十一届人-机-环境系统工程大会论文集, 2011: 75-79.
- [9] 赵馨. 华中地区青年女性的胸部形态、文胸结构设计研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2018.
- [10] 成恬恬. 武汉地区 18-25 岁女大学生胸部形态研究及文胸版型自动化生成 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2017.
- [11] 刘羽, 王建萍. 基于乳房角度的乳房形态分类 [J]. *丝绸*, 2017, 54(8): 31-37.
- [12] 陈敏之. 文胸作用下女体胸部形态变化效果分析及其模拟研究 [D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [13] PEI J, FAN J, ASHDOWN S P. Detection and comparison of breast shape variation among different three-dimensional body scan conditions: Nude, with a structured bra, and with a soft bra [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(21-22): 4595-4606.
- [14] 李婧, 鲁虹, 张欢. 基于胸部形态的文胸推荐系统实现与应用 [J]. *丝绸*, 2018, 55(9): 62-67.
- [15] 余越云, 吴志明. 运动文胸对乳房振幅影响因素的研究 [J]. *丝绸*, 2021, 58(3): 51-57.
- [16] LEE H Y, HONG K, KIM E A. Measurement protocol of women's nude breasts using a 3D-scanning technique [J]. *Applied Ergonomics*, 2004, 35(4): 353-359.
- [17] 马静. 基于胸部特征参数的个性化文胸样板研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [18] PETERSON A, SUH M. Exploratory study on breast volume and bra cup design [J]. *Journal Textile and Apparel, Technology and Management*, 2019, 11(1): 1-13.
- [19] 侯魏. 基于胸部形态分类的三维钢圈设计 [D]. 北京: 北京服装学院, 2010.
- [20] PEI J, PARK H, ASHDOWN S P. Female breast shape categorization based on analysis of CAESAR 3D body scan data [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(4): 590-611.
- [21] PEI J, FAN J, ASHDOWN S P. A novel method to assess breast shape and breast asymmetry [J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2019, 110(8): 1229-1240.
- [22] 王巍, 董杭波, 张皋鹏. 面向大规模定制的服装三维网络展示技术 [J]. *丝绸*, 2016, 53(12): 29-35.
- [23] 白玉. 不同胸型的参数化文胸人台的研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2012.
- [24] 高晓晓, 江红霞. 应用 3D 打印技术的运动文胸模杯个性化定制 [J]. *纺织学报*, 2018, 39(11): 135-139.
- [25] 徐瑶瑶, 朱俐莎, 杜磊, 等. 文胸模杯曲面形态特征曲线提取与分析 [J]. *纺织学报*, 2016, 37(11): 103-108.
- [26] 高一获, 蒋夏军, 施慧彬. 基于尺寸建立个性化人体模型的方法 [J]. *计算机科学*, 2017, 44(12): 279-282.
- [27] 王建萍, 张渭源. 三维女性胸形建模方法与实现 [J]. *针织工业*, 2007(5): 28-30.
- [28] 修毅, 王银辉. 数字人体模型中腰部剖面曲线参数化变形算法 [J]. *纺织学报*, 2017, 38(4): 97-102.
- [29] 修毅, 王银辉, 张颖. 数字人体模型参数化变形的实现 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(4): 568-573.
- [30] GOPPER M W, NEUBAUER J, KALASH Z, et al. Improved accuracy of breast volume calculation from 3D surface imaging data using statistical shape models [J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0233586.

- [31] LIANG R, YIP J, YU W, et al. Numerical simulation of nonlinear material behaviour: Application to sports bra design[J]. *Materials and Design*, 2019, 183:108177.
- [32] SUN Y, CHEN L, YICK K, et al. Optimization method for the determination of Mooney-Rivlin material coefficients of the human breasts in-vivo using static and dynamic finite element models[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 90(2):615-625.
- [33] SUN Y, YICK K, YU W, et al. 3D bra and human interactive modeling using finite element method for bra design [J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 114(9):13-27.
- [34] LIANG R, YIP J, YU W. Computational modelling methods for sports bra-body interactions[J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2020, 32(14):921-934.
- [35] 张昭华, 应思艺, 郭云昕, 等. 三维人体扫描技术在服装工效学中的应用[J]. *上海纺织科技*, 2015, 43(8):40-44.
- [36] 苏刚. 面向虚拟试衣的三维人体几何模型光滑算法的研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2018.
- [37] 顾力文, 阮艳雯, 刘晓刚. 基于人体特征曲线和开源软件二次开发的服装 3D 建模方法[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(2):275-284.
- [38] HUANG J, KWOK T H, ZHOU C. Parametric design for human body modeling by wireframe-assisted deep learning[J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 108:19-29.

## Research on Female Breast Morphology and Three-dimensional Modeling

GU Yiran<sup>1</sup>, ZU Weilin<sup>1</sup>, SUN Hong<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Fashion, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Clothing Design and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

**Abstract:** In order to solve the current problems of female breast modeling and meet the public's requirements for personalized breast models, the research progress of breast shape research and breast modeling method in terms of parameter selection, classification standards, and modeling methods was elaborated. The application of digital technologies such as three-dimensional body measurement, three-dimensional body modeling, and virtual fitting in the research was analyzed. Research showed that female breast modeling involved cross-cooperation in many fields such as statistics, ergonomics, computer graphics, etc. Personalized and digital chest model was the future development trend. The analysis pointed out that virtual fitting was one of the main areas of future application of mannequins. Establishing a chest model suitable for virtual fitting conditions can better meet the public's demand for online fitting.

**Key words:** breast shape; 3D modeling; virtual fitting

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

## 关于《纺织科技进展》杂志 加入中国知网“优先出版”平台的启事

本刊已于2016年12月正式加入中国知网的“期刊优先数字出版”平台,可在纸质期刊出版之前,于中国知网的优先数字出版平台中出版,发布已录用、编辑、排版规范定稿的文献。欢迎广大读者、作者来函、来电咨询。