

基于 Web3D 的博物馆服饰虚拟展示关键技术研究进展

柯莹^{1,2,3}, 梁惠娥^{1,2}, 王宏付^{2,3}

(1. 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省非物质文化遗产研究基地, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学 服装工程研究室, 江苏 无锡 214122)

摘要:系统总结了基于 Web3D 的博物馆服饰虚拟展示所涉及的关键技术,即三维服装建模、三维人体建模、碰撞检测以及 Web3D 虚拟引擎技术;在对国内外研究工作的基础上进行总结和分析,阐述了各项技术的研究现状及特点,指出制约馆藏服饰虚拟展示的技术瓶颈,并展望各关键技术为促进博物馆服饰虚拟展示方面的发展方向。

关键词:博物馆服饰;虚拟展示;三维服装模型;三维人体模型;碰撞检测;Web3D 技术

中图分类号:TS 941.26 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2016)02-0176-06

Research Development on Key Technology of Museum Costume Virtual Display Based on Web3D Technology

KE Ying^{1,2,3}, LIANG Hui'e^{1,2}, WANG Hongfu^{2,3}

(1. School of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Non-Material Culture Heritage Base, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Clothing Engineering Laboratory, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Virtual display of museum costume and cultural heritage using web pages become a hot research area, with the development of mobile internet technology. The paper systematically summarized the research status of the key technologies related to virtual display of museum costume based on Web3D, that is 3D garment modeling technology, 3D human body modeling technology, collision detection technology and Web3D engine technology. In addition, technological difficulties restricting the development of virtual display of museum costume were analyzed. Furthermore, the development trends of virtual display of museum costume were pro-posed.

Key words: museum costume, virtual display, 3D garment model, 3D human body model, collision detection, Web3D technology

服饰博物馆是传承文化发展的载体,为服饰研究提供了宝贵的资料。虚拟现实技术和互联网技术的不断成熟与发展,为博物馆内服饰展品进行全方位立体感的展示提供了技术支持,并提供了一个网络化、虚拟化和人性化的 3D 虚拟展示平台。用户从浏览器便可了解展品服饰的外形特征和历史属性,可以观察馆藏服饰的纹理细节和质感。

目前馆藏服饰的数字化展示仍是以二维图片合成为主,多采用类似于谷歌街景的全景图技术,

国内以上海丝绸博物馆为代表。Drexel 大学的服饰博物馆通过 Quicktime VR 技术 360°全方位展示服装藏品,同样也是采用二维图片合成技术,通过拍摄服装的局部照片来显示馆藏服饰的细节特征,如图 1 所示^[1]。而使用三维虚拟展示馆藏服饰的博物馆仍然较少,三维虚拟展示通过使用模拟软件工具或者服装设计 CAD 软件提供的布料模型设计出服装三维模型。Kang 使用 DC Suite 和 Maya Qualoth 建模软件,复制出 18 世纪洛可可风格的三维服装

模型,为在线博物馆的三维展示提供了参考方法(见图 2)^[2]。在线的三维数字化虚拟展示是馆藏服饰发展的新方向,而实现服饰的逼真模拟需要多种技术的支持。文中将从博物馆服饰虚拟可视化角度,探讨 Web3D 博物馆服饰虚拟所涉及的关键技术研究现状,重点阐述服装建模、三维人体建模、碰撞检测,以及 Web3D 虚拟现实引擎技术,总结服饰虚拟展示的技术瓶颈,并提出 Web3D 博物馆服饰虚拟展示的发展方向。



图 1 中国清朝服饰
Fig.1 Chinese robe,Qing dynasty



图 2 数字重建洛可可风格的服装
Fig.2 Digital reproduction of traditional costumes in Rococo era

1 基于 Web3D 的博物馆服饰虚拟关键技术及发展现状

构建在线博物馆服饰虚拟展示需要多个技术支持,主要包括三维服装建模、三维人体建模、碰撞检测以及 Web3D 引擎技术。

1.1 三维服装建模

博物馆服饰虚拟展示需要构建真实感的三维服装模型,而模拟服装面料是构建三维服装模型的基础。服装面料由天然或人工纤维的网状织物构成,为柔性物体,与薄壳结构相似,具有各向异性、不可压缩、抗拉等特性^[3]。面料模型的构建主要有 3 种方法:几何法、物理法以及两种方法的混合。

1.1.1 几何法 几何法通过研究面料的物理特性,从而采用几何建模的方式模拟面料。这种方法产生的皱褶通常比较规则、均匀,且无需考虑面料的材质、弹性系数等。最早的几何模型为 Weil 的悬链线模型,该模型基于悬链线计算出面料自由悬挂时的形状,通过设置约束点来模拟面料的悬垂状态,但模型无法模拟褶皱^[4]。而后 Ng 和 Grimsdale 提出交叉截面模型,采用纯几何变化模拟特殊情况下面料的变形^[5]。近年来使用几何法表现柔性面料的技术不断发展,Sturnpp 提出一种自适应形状匹配方法,通过预处理将面料网格分割成一组重叠的簇集。首先计算质点在重力作用下无约束时候的位置,然后同变化后的位置簇集进行匹配,确定其目标位置,之后将质点变化到目标位置。在簇集不是很大的情况下,可以保持高效的计算效率^[6]。CHEN 提出基于网格插值的纯几何法,采用能量最小化方法求解面料的最终悬垂状态^[7]。该方法避免了面料动画的不稳定性。Rohomer 提出模拟服装褶皱的几何法,通过平面拉伸张量来引导确定褶皱产生的区域,参数化曲线模拟褶皱,基于上一刻的褶皱曲线和当前的拉伸分布来计算当前时刻的褶皱曲线,最后隐式计算出最后变形的曲面^[8]。

1.1.2 物理法 物理法在分析服装面料物理特性的基础上,建立面料的物理受力模型,结合牛顿动力学原理计算每个时刻的面料状态。Terzopoulos 为物理模拟法的开创者,通过引入弹性力学模型,将面料网格化后,采用半隐式积分法计算面料的位置,该模型为连续模型,计算量巨大,并且其模型中未包括弹性模量等基本材料力学参数^[9]。Breen 利用 KES 评价系统,提出面料粒子系统模型。模型将面料离散为一个一个没有体积的质点,质点间的相互作用通过一系列没有质量的弹簧实现,同时考虑面

料的拉伸压缩力、剪切力和平面外方向弯曲力^[10]。该模型与面料的微观结构相似,在力学模拟上表现不错,同时计算复杂度较低。但该模型只能处理各向同性问题;Provet 将粒子和弹性变形结合在一起,提出质点-弹簧模型,将质量相同的虚拟质点通过无质量的弹簧相互连接,计算出质点间的结构力、剪切力及弯矩^[11]。该模型简单实用,仿真和数值计算易快速实现,从而被广泛使用。但是模型也存在一些缺陷,如系统不能直接捕获物体的轮廓效果。由于面料材质的多样性(如轻薄的丝绸和厚重的毛呢),在面料虚拟中,需要选择合适的运动模型参数来表现不同材料的动态特性。基于视频捕获或运动捕获数据进行参数学习,数据来源准确可靠,隐含了更多的运动规律,可以表现不同材料的动态特性。Bhat 等首次对面料运动模型中的全部参数进行研究,通过分析面料运动视频中的褶皱,结合模拟退火法,优化了包括各种阻尼系数在内的全部模型参数^[12]。该方法能较好地表现面料运动的大体趋势,但丢失了很多运动细节。WANG 等根据不同样品的测量数据建立分段弹性模型,通过分段建立线性模型的方式来提高实时性^[13]。

1.1.3 混合法 KANG 等人提出了一种全局—局部的混合方法模拟皱褶裙摆的变形^[14]。Cordier 等利用服装静止状态的衣下空间距离,将服装模型进行划分,其中距离近的区域采用基于几何的方法,距离远的区域采用物理方法^[15]。服装模型的划分基于静止状态,因此具有一定的局限性。学者也提出了其他服装模拟的方法,如自适应网络法、并行计算法等,都是在几何法与物理法的基础上发展起来的。自适应网络法,通常采用动态计算顶点和曲面的曲率,依据手工设定的阈值,将网格划分为不同区域的精细化程度,对于较多弯曲和易褶皱的区域采用高密度网格,其他区域采用相对稀疏的网格,从而保证快速逼真地模拟出面料效果。Lee 等对降维的面料系统进行求解,通过线性差值重构系统原始解,并进行误差修正,该方法适用于 LOOP 曲面细分构造的初始化高精度模型^[16]。一些学者将并行计算技术引入到布料系统中,以提高计算效率^[17]。

1.1.4 3 种建模方法比较 几何法计算稳定,效率高,但是合成之后缺乏动感,模拟出来的效果比较规则、均匀,更适合表现服装的静止状态。基于物理方法,通过建立面料受力模型来计算变形,是模拟逼真面料效果的有效技术手段,保持了面料的主要物理特性以及关键特征,通过有效的数值求解,

反映了较为真实的效果。但是物理模拟的稳定性较差和计算开销影响了算法的实时性。混合法以实时性为目标,在不降低逼真效果的前提下,提高模拟过程的实时性。总之,几何法的模拟效果、外形对比结果最好,但计算难度最大,且实时性最差;而物理法的模拟效果和悬垂感最差,但是该方法的计算难度最低,且实时性最好。混合法介于几何法和物理法之间,但是该方法模拟的面料质感变化最好。

1.2 三维人体建模技术

三维人体数字模型是虚拟着装的主体。Funge 等在 1999 年提出建立三维人体模型的 5 个分级模型层次:几何层、运动层、物理层、行为层和感知层^[18]。这 5 个层次在模拟真实感及实现技术的复杂性方面逐渐递增,目前大部分的研究都集中在前 3 层。为了满足服装虚拟展示的需要,建立逼真的人体模型时,首先需要获取三维人体数据,然后采用特定的建模方法来构建人体模型。

人体数据的获取方法主要分为直接法和间接法。直接法使用软尺、测距计等仪器直接测量出人体各部位的尺寸数据^[19]。间接法主要通过扫描拍照来获取人体数据,其方法包括激光测量法、立体摄影法、白光相位法以及多视角的二维图像数据等。目前最常用的方法是采用非接触式三维人体扫描系统,如[TC]²NX-16、Human solutions 等^[20]。

在获得人体数据后,如何建立逼真的数字化人体模型,是虚拟三维服装展示的关键问题。三维人体模型主要分为基于几何的模型和基于物理的模型。几何建模利用测量数据,根据几何元素构建人体模型,主要包括线、多边形、简单形体(如圆柱体、球体等)以及曲面建模。在参数曲面建模方法中,NURBS 曲面已成为描述物体外形的工业标准。该方法需将人体分割为多个部分,通过每部分的人体数据点反算控制点后构建 NURBS 曲面,同时还需考虑每部分的光滑拼接问题。物理建模在人体外部几何特征的基础上,增加了人体的物理属性和外部环境因素,能获得更真实的建模效果,并可将人体的动态特征表现出来。

随着逆向工程技术的发展,三维扫描结合逆向工程处理的方法便呈现出其快捷高效的优势。运用逆向工程软件如 Geomagic、Rapidform 等将获取的点云数据处理,获得全面的人体三维形态,满足了快速建立人体模型的需要。另外,逆向工程软件还可以对模型进行面片组织(patch organization)、面片光顺(patch relaxing)等处理,以调整人体模型的

精确度^[21]。

1.3 碰撞检测

服装模型虚拟穿着时会与人体模型发生碰撞,因此碰撞检测是服装穿着模拟的另一个关键技术。学者已经在碰撞检测领域做了大量研究,提出一整套比较成熟的理论和算法。理论上,碰撞都是通过物体模型的几何特征求交集计算来判断的,即判断面料的边界是否与另一块面料的边界相交,是否与人体模型的边界相交。目前碰撞算法可以分为基于图形的碰撞检测和基于图像的碰撞检测^[22]。基于图形的碰撞检测通常将模型划分为体积相等的小单元或者采用体积略大而几何特性简单的包围盒来模拟模型,尽可能减少需进行相交测试的几何对象的数目,以提高算法的实时性。基于图像的碰撞检测算法则主要利用图形硬件对物体的二维图像采样和相应的深度信息来判别两物体间的相交情况。

面料相对柔软,容易发生形变,因此面料的碰撞检测较为复杂。Bridson 等采用轴向层次包围盒技术加快碰撞检测^[22]。Harmon 等提出不同于刚性作用区域的新方法,简化了碰撞检测,改进了 Bridson 的做法,提高了算法的鲁棒性^[23]。Choi 等采用空间分解的方法检测碰撞,对包含面料的空间进行分解后,把每一个粒子和三角形以及对应的空间坐标记录下来,然后独立进行碰撞检测^[24]。这种方法虽然高效但是接近线性的性能。除了考虑面料与人体间的碰撞,还需检测面料间的自碰撞。Baraff 提出全局相交分析的解决方案,来解决面料表面相交自碰撞问题^[25]。采用该方法,当面料的分辨率不够高或者较为复杂的情况下,会产生不真实的伸展行为,影响面料的真实感表现。Schvartzman 等采用层次化的数据结构和算法,来实现高效的自我碰撞检测^[26]。

1.4 Web3D 技术

Web3D 技术是构建馆藏服饰展示系统的最核心技术,通常包括模型管理、资源管理、服务器调度等模块。各模块之间协同工作,实现服饰替换的动态展示,具有良好的低端硬件兼容性,为馆藏服饰的展示提供了强有力的技术支持和保障。

基于 VRML 的 Web3D 技术,是最早的一种 Web3D 建模技术,但通过 VRML 生成的模型对于光照和材质表现不好,产生的仿真效果较差,制约了馆藏服饰细节的展示^[27]。基于 HTML5 的 Web3D 技术,WebGL 是一种 3D 绘图标准,这种绘图技术标准允许把 JavaScript 和 OpenGL 结合在一起,WebGL

可以为 HTML5 Canvas 提供硬件 3D 加速渲染,借助系统显卡在浏览器里更流畅地展示 3D 场景和模型,还能创建复杂的导航和数据可视化^[28]。基于引擎的 Web3D 技术,3D 引擎在对部分通用技术细节进行整理和封装的基础上,形成了面向底层的函数库。现在主流的引擎有 Java3D、Unity3D、Flash 3D。其中,Java3D 是 Java 语言在三维图形领域的扩展,是一套基于场景绘制的 3D API 集^[29]。而 Unity 3D 因具有高度完善的光影渲染系统,是全面整合的专业游戏引擎,适合开发虚拟展示系统,但是需要安装浏览器插件^[30]。Flash 3D 引擎具有免插件安装,可实现轻量化脚本程序设计的引擎^[31]。

Web 3D 技术具有强大的交互性、更强的真实感且易于在网络上传输,利用该技术进行馆藏服饰的保护,一方面可以借助互联网技术传播馆藏服饰的文化艺术,另一方面又可以克服传统文字、图片、视频等手段展示的不足,使馆藏服饰展示更真实、更形象,且更具影响力^[32]。

2 关键技术存在问题和的发展方向

2.1 关键技术存在问题及瓶颈

利用现有技术开发基于 Web3D 的馆藏服饰虚拟展示平台,主要问题如下:

1) 围绕面料仿真的真实性和实时性,研究者开展了很多研究工作,虽然在效果和性能上有了显著提高,但依然无法满足馆藏服饰模拟的应用需求。服装的穿着效果由面料特性决定,而分析真实的面料变形和受力特征,需要大量的实例数据才能建立更有效的面料模型。另外,虚拟场景中人体的碰撞检测技术比较繁琐,再加上系统计算性能的制约,导致三维虚拟馆藏服饰的真实感和帧绘制之间难以取得较佳的计算平衡,无法保证场景的自然逼真性。

2) 随着移动互联网的发展,在移动设备上实现网页级 Web3D 的馆藏服饰虚拟展示成为必然。但由于网页与移动平台计算性能有限,而虚拟馆藏服饰展示又需大量精细的三维服装模型,这些模型不仅使存储空间迅速膨胀,更直接影响网络的传输和下载。因此如何快速构建轻量化的三维服装模型,是实现馆藏服饰虚拟展示的技术瓶颈之一。

2.2 相关技术发展方向

1) 构建多精度三维面料和服装模型:通过 KES 和视频捕捉实验获取面料物理特性,丰富面料的实例数据,更有效地建立面料变形和受力特征的关系,同时考虑采用多精度面料模型的分析思路,分

区域研究面料的变形曲率和拉伸变化,对高变形区域进行精化,提高细节褶皱的保真效果,对不易变形区域采用简化计算,从而构建多精度的三维面料和服装模型。

2) 研发适用于服饰的 Web3D 引擎:研发适用于虚拟馆藏服饰的 Web3D 引擎,使之能够快速检测模型间的碰撞,提供标准的人体模型和具有真实感的绘制手段,实现各种材质、光影、粒子、动画效果的自然逼真性和光影美。另外,利用该引擎,可以多角度对馆藏服饰观赏,并进行简单的交互以增强现场体验感,是馆藏服饰虚拟展示发展的趋势。

3 结 语

文中综述了构建基于 Web3D 的馆藏服饰虚拟展示平台所需要的主要关键技术的研究现状及进展,构建馆藏服饰虚拟展示平台,需要三维服装建模、三维人体建模、碰撞检测以及 Web3D 引擎技术的配合和实现,相关技术的研究已很成熟,但仍然存在技术瓶颈。最后总结了基于 Web3D 的馆藏服饰虚拟展示的发展方向,即构建多精度三维面料和服装模型、研发适用于服饰的 Web3D 引擎。

参考文献:

[1] Martin K, Ko H. Imagining historic fashion; digital tools for the examination of historic dress [C]// 2011 Second International Conference on Culture and Computing (Culture Computing). Japan: IEEE Computer Society, 2011: 51-56.

[2] Kang Y, Ko Y, WU S, et al. Digital production of traditional costumes [C]// Digital Heritage International Congress (Digital Heritage). [s. l.]: IEEE, 2013: 239-242.

[3] 朱淮冰, 金小刚, 冯结青, 等. 面料动画模拟综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16 (5): 613- 618.

ZHU Huaiying, JIN Xiaogang, FENG Jieqing, et al. Study on cloth animation [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2004, 16 (5): 613- 618. (in Chinese)

[4] Weil J. The synthesis of cloth objects [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4) : 49-54.

[5] Ng H, Grimsdale R L. A geometrical editor for fold formation [C]// Chin R. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer-Verlag, 1995, 1024: 124-131.

[6] Sturmp T, Spiilmann J, Becker M, et al. A geometric deformation model for stable cloth simulation [C]// Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPHYS). Grenoble, France: [s. n.], 2008: 39- 46.

[7] CHEN M, TANG K. A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation [J]. The Visual Computer, 2010, 26: 853-863.

[8] Rohmer D, Popa T, Cani M P, et al. Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29 (6): 157-157.

[9] Terzopoulos D, Fleischer K. Modeling inelastic deformation: viscoelasticity, plasticity, fracture [C]// Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1988 (4): 269-278.

[10] Breen D E, House D H, Wozny M J, et al. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles [C]// SIGGRAPH 94 Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Technique. New York, USA: ACM, 1999.

[11] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [J]. In Graphics Interface, 1995, 23 (19): 147-154.

[12] Bhat K, Twigg C, Hodgins J, et al. Estimating cloth simulation parameters from video [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2003). [s. l.]: ACM Press, 2003: 37-51.

[13] WANG Huamin, Brien J F, Ramamoorthi R. Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement [J]. ACM Trans on Graphics, 2011, 30(4) : 1-11.

[14] KANG M K, LEE J. A real-time cloth draping simulation algorithm using conjugate harmonic functions [J]. Computers and Graphics, 2007, 31(2) : 271-279.

[15] Cordier F, Magnenat-Thalmann N. Real-time animation of dressed virtual humans [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3) : 327-335.

[16] LEE Y, SUNG Eui Y, Oh S, et al. Multi-resolution cloth simulation [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(7) : 2225-2232.

[17] TANG M, TOMG R, Narain R, et al. A GPU-based streaming algorithm for high-resolution cloth simulation [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7) : 21-30.

[18] Funge J, Tu X Y, Terzopoulos D. Cognitive modeling: knowledge, reasoning and planning for intelligent characters [C]// SIGGRAPH 99 Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1999: 29-38.

[19] 陈亮, 赵曙光, 张丽娟, 等. 虚拟三维服装展示的发展历史与研究热点 [J]. 纺织学报, 2011, 32(10) : 153-160.

CHEN Liang, ZHAO Shuguang, ZHANG Lijuan, et al. History and research hot spot of three-dimensional virtual garment display [J]. Journal of Textile Research, 2011, 32

- (10):153-160. (in Chinese)
- [20] Daanen H A M, Ter Haar F B. 3D whole body scanners revisited[J]. Displays, 2013, 34 (4): 270-275.
- [21] 李燕, 黄凯. 基于 Geomagic 的三维人体建模技术[J]. 纺织学报, 2008, 29(5): 130-134.
- LI Yan, HUANG Kai. Technique of 3D human body modeling based on Geomagic [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(5): 130-134. (in Chinese)
- [22] 邹益胜, 丁国富, 许明恒, 等. 实时碰撞检测算法综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 8-12.
- ZOU Yisheng, DING Guofu, XU Mingheng, et al. Survey on real-time collision detection algorithms[J]. Application Research of Computer, 2008, 25(1): 8-12. (in Chinese)
- [23] Bridson R. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 594-603.
- [24] Harmon D, Vouga E, Tamstorf R, et al. Robust treatment of simultaneous collisions [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 15-19.
- [25] Choi K, Ko H. Stable but responsive cloth [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 604-611.
- [26] Baraff D, Witkin A. Untangling cloth [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 862-870.
- [27] 陈屹, 陈泽琳, 温武, 等. 基于 VRML 的虚拟现实协同系统的研究[J]. 计算机应用研究, 2003, 20(4): 49-51.
- CHEN Yi, CHEN Zelin, WEN Wu, et al. Research of the virtual CSCW system based on VRML [J]. Application Research of Computers, 2003, 20(4): 49-51. (in Chinese)
- [28] 李海波. 基于 WEBGL 的 3D 试衣系统的设计与实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [29] Oracle Inc. Oracle [EB/OL]. (2014) [2015]. <http://oracle.com/technetwork/java>.
- [30] Unity Technologies Inc. Unity3d [EB/OL]. (2013) [2015]. <http://unity3d.com>.
- [31] 仇宾. Web3D 技术及其在网络教学中的研究与应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [32] 谭云兰, 贾金原, 彭硕, 等. 基于 Web3D 的虚拟旅游关键技术研究进展[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1541-1548.
- TAN Yunlan, JIA Jinyuan, PENG Shuo, et al. Survey on some key technologies of virtual tourism system based on Web3D [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1541-1548. (in Chinese)

(责任编辑: 杨勇)

(上接第160页)

- WANG Fangyuan, JIN Tian, WANG Jianping. A survey on female consumer behavior on sports bra in Shanghai [J]. Knitting Industries, 2014(3): 60-62. (in Chinese)
- [3] ZHOU Jie, YU Winnie, Sunpui Ng. Identifying effective design features of commercial sports bras [J]. Textile Research Journal, 2013, 83(14): 1500-1513.
- [4] Lorentzen D, Lawson L. Selected sports bras: a biomechanical analysis of breast motion while jogging [J]. Physician and Sportsmedicine, 1987, 15(5): 128-139.
- [5] 段杏元. 运动对文胸穿着舒适性的影响研究[J]. 针织工业, 2013(5): 54-56.
- DUAN Xingyuan. Study of wearing comfort of bra in motion states [J]. Knitting Industries, 2013(5): 54-56. (in Chinese)
- [6] 陈嘉毅. 运动文胸研究现状及发展趋势[J]. 轻纺工业与技术, 2010, 39(5): 56-58.
- CHEN Jiayi, GAO Shuping. Research status and development trend of sports bra [J]. Light and Textile Industry and Technology, 2010, 39(5): 56-58. (in Chinese)
- [7] CHEN X N, Gao S A, WANG J P, et al. Effect of sports bra type and gait speed on breast discomfort, bra discomfort and perceived breast movement in Chinese women [J]. Ergonomics, 2016, 59(1): 130-142.
- [8] 王方圆, 陈晓娜, 王建萍. 基于位移与压力的运动文胸舒适性[J]. 纺织学报, 2013, 34(1): 106-109.
- WANG Fangyuan, CHEN Xiaona, WANG Jianping. Preliminary study of effect of breast displacement on bra comfort [J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(1): 106-109. (in Chinese)

(责任编辑: 杨勇)