

DOI: 10. 13475/j. fzx. 20171203405

# 应用 3D 打印技术的运动文胸模杯个性化定制

高晓晓, 江红霞

(生态纺织教育部重点实验室(江南大学) 江苏 无锡 214122)

**摘要** 为使运动文胸模杯更加合体舒适,探索了基于逆向工程对运动文胸模杯建模,运用 3D 打印技术制作模杯的方法。首先通过三维人体扫描仪扫描人台获取点云数据,再运用 Geomagic Studio 软件优化点云数据,构造胸部 NURBS 曲面,根据模杯款式及体表曲率,运用 UG 软件截取模杯轮廓并对截取曲面进行厚度设计。3D 打印运动文胸模杯模型过程中,首先对创建的模型切片,再运用光固化原理对模型进行 3D 打印,最终制得 3D 打印运动文胸模杯。同时分析了 3D 打印运动文胸模杯内表面与人台体表曲面之间存在的误差,其中曲面重构平均偏差为 0.01 mm,3D 打印机精度为 0.03 mm。结果表明,结合逆向工程,运用 3D 打印技术,可以生产出合体的模杯,实现女性运动文胸模杯的个性化定制。

**关键词** 3D 打印; 运动文胸; 模杯; 逆向工程; 点云数据

中图分类号: TS 941.73; TP 391.41 文献标志码: A

## Customization of sports bra cup based on 3-D printing

GAO Xiaoxiao, JIANG Hongxia

(Key Laboratory of Eco-Textiles( Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract** In order to make sports bra cup more fit and comfortable, a method was explored for building the sports bra cup model based on reverse engineering and 3-D printing the model for making cups. Firstly, the 3-D body scanner was used to obtain the point cloud data by scanning body form, then Geomagic Studio software was used to optimize the point cloud data and construct breast's NURBS surface, UG software was used to intercept the bra cup outline according to the bra cup style and body surface curvature and designed the thickness value for the intercepted surface. During 3-D sports bra cup model printing process, the model slice was firstly created, and then with the principle of light curing, the 3-D model was printed. Finally 3-D printing sports bra cup was achieved. The error between the surface of the 3-D printing sports bra cup and the surface of the body form was also analyzed. The results show that the average deviation of the surface reconstruction is 0.01 mm, and the precision of the 3-D printer is 0.03 mm. The research indicates that using 3-D printing technology with reverse engineering can produce fit bra cups, achieving female sports bra cup customization.

**Keywords** 3-D printing; sports bra; bra cup; reverse engineering; point cloud data

3D 打印技术应用于制造业具有周期短、成本低、材料利用率高、柔性高效等优势,被称为是第 3 次工业革命的推动者。20 世纪 80 年代中后期,美国麻省理工学院发明了 3D 打印技术,1990 年,美国 Stratasys 公司率先推出了基于熔融沉积成型(FDM)的 3D 打印机,我国对 3D 打印的研究工作

开始于 20 世纪 90 年代初<sup>[1]</sup>。3D 打印是以计算机三维设计模型为依据,将三维实体分为若干个二维平面,利用激光束、电子束等将材料层层累积黏结,最终叠加成型为三维实体<sup>[1]</sup>。3D 打印技术虽然不能完全替代现有传统制造业,但其在个性化定制方面有着很大的优势,应用市场开发潜力巨大<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2017-12-19 修回日期: 2018-08-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51417B);江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修资助项目(苏教办师[2015]7号);湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题资助项目(DTL2018006)

第一作者简介: 高晓晓(1991—),女,硕士生。主要研究方向为服装设计与工程。

通信作者: 江红霞, E-mail: 1987919485@qq.com。

3D 打印的服饰产品有戒指、耳环、项链、眼镜、鞋等。早在 2004 年,设计师 Philip Delamore 采用 3D 打印制作了鞋子<sup>[2]</sup>;2010 年,法国艺术家与荷兰时装设计师合作完成了一系列 3D 打印服装;2017 年,阿迪达斯计划利用液态 3D 打印技术,批量生产了 Futurecraft 4D 运动鞋,实现限量的个人定制运动鞋的生产。虽然 3D 打印已能够打印某些服饰产品,但是和传统的纺织材料相比在力学性能上还有很大差距,尤其是拉伸强度,可通过将 3D 打印技术与传统纺织品结合来提高其拉伸强度<sup>[3]</sup>。

市场上的运动文胸主要通过通过对乳房施加压力控制乳房的晃动,按号型制作的文胸模杯造型固定,不同个体的女性乳房与模杯形态、容积的匹配程度不同,模杯压力分布情况也相应不同。目前,国内外关于 3D 打印技术在文胸模杯制作中的应用方面的研究较少。为实现运动文胸模杯的个性化定制,本文探索了基于逆向工程对运动文胸模杯建模,运用 3D 打印技术制作模杯的方法。该模杯以个体的乳房表面为内表面,贴合乳房,压力分布均匀,更加舒适、健康;同时 3D 打印技术的应用省去了模具制作的中间流程,从而节约了资源,简化了个性化定制运动文胸模杯生产过程。

## 1 运动文胸模杯概述

模杯是模杯型文胸的罩杯,通常是在一定的温度和压力作用下,可塑性材料层(海绵贴布)经过模制装置加工而成的文胸罩杯或文胸整体。

运动文胸模杯一般为覆盖整个乳房的全罩杯。全罩杯文胸可有效控制乳房的晃动,减少乳房晃动给运动带来的不便,厚度一般在 0.2 ~ 0.6 cm 之间<sup>[4]</sup>。运动文胸模杯与普通文胸模杯相比,造型简单,模杯整体厚度均匀。本文采用厚度均匀的全罩杯模杯作为研究对象。

### 1.1 运动文胸分类

运动文胸按模杯种类可分为 4 种,即 2 片固定型、2 片插入型、1 片无缝型、无模杯运动文胸。其中:第 1 种运动文胸是将 2 片模杯缝合固定在文胸整体中;第 2 种运动文胸的模杯属于夹层,可独立取出;第 3 种运动文胸的模杯在面积上覆盖了文胸整体(不包括肩带部分)的前半部分。

### 1.2 传统模杯制作流程

传统的文胸模杯制作流程一般为模型设计、模具制作、材料准备、模压定型。使用计算机软件进行模杯模具的三维立体模型设计过程中,对于造型设计首先需要确定模杯的外表面造型,接着根据厚度、

功能性确定内表面造型,内衣模杯厂的模杯一般通过凹凸模具热压制得,所以模杯模具由凹模具与凸模具组成,一般下为凸模具,上为凹模具,模具的制作材料一般为合金铝;模具设计师制定材料种类、定型工艺等技术参数;绘图员编写数控锣机加工指示;技术员操作数控锣机加工铝料得到模具。

材料准备和模压定型的工序步骤为:检验布料、海绵等原材料;海绵贴布;裁切海绵贴布;罩杯定型机加热铝模到预定工艺温度,一般在 180 ~ 200 °C 之间,热压海绵贴布,得到定型模杯<sup>[5]</sup>。

## 2 三维模杯建模

为了使模杯贴合人体,增强模杯舒适度,基于逆向工程在人台的拟合曲面上截取乳房曲面创建三维运动文胸模杯模型。逆向工程一般采用非接触式测量仪扫描物体表面获取点云数据,在此基础上构建曲面,得到数字化三维实体模型<sup>[6]</sup>。

### 2.1 三维人体 NURBS 曲面构建

#### 2.1.1 点云数据采集

点云数据是由三维数据采集设备对实体表面采样得到的三维空间上的几何点<sup>[7]</sup>。本文点云数据通过三维人体扫描仪对标准女性扫描人台扫描获取,如图 1 所示。其中三维人体扫描仪为德国 TECMATH 公司的 VITUS SMART XXL 人体扫描仪,采用 alvanon 中国扫描系列 M 号人台。将扫描人台文件以 .stl 格式输出。



图 1 人台点云数据

Fig. 1 Point cloud data of body form

#### 2.1.2 点云数据预处理

受目前三维扫描仪的制约,扫描过程中设备的震动、仪器校准的精确度等使采集的点云数据存在系统误差和偶然误差,扫描所得的点云数据存在缺陷。点云数据的质量直接关系到曲面的质量,数据预处理是逆向建模前需进行的必要步骤。将得到的 .stl 格式的点云数据文件读入逆向工程软件 Geomagic Studio 中,从点云数据中截取需要的部分,

本文只截取胸部的前半部分, 然后进行点云数据优化处理, 如去除体外孤点, 减少噪声, 增补点云等。

### 2.1.3 多边形的编辑

对优化处理后的点云数据进行封装后, 进入多边形编辑阶段。首先检测三角片的相交情况并进行修复。在 Geomagic Studio 软件中, 曲面是由无数个小三角片构成的, 相交的三角片将导致后期构建错误的曲面。然后细化多边形, 使多边形更加精细, 确保之后所构造的曲面的质量。最后松弛多边形, 使多边形网格趋于平滑<sup>[8]</sup>。

### 2.1.4 NURBS 曲面构建

Geomagic Studio 创建 NURBS(非统一有理 B 样条) 曲面过程如下: 第 1 步用构造曲面片功能构建曲面片布局图; 第 2 步用构造格栅命令在曲面片内创建 1 个有序的  $u-v$  网格, 格栅数量要适中, 格栅数量越多, 人体曲面更精确, 但不利于后期建模, 然后拟合曲面, 生成 1 个 NURBS 曲面。最后合并曲面, 最终构建的 NURBS 曲面如图 2 所示。



图 2 NURBS 曲面  
Fig. 2 NURBS surface

将生成的 NURBS 曲面与原始点云数据进行曲面偏差分析, 所得偏差色谱图如图 3 所示。偏差分析结果为: 最大上偏差 2.02 mm, 最大下偏差 -0.70 mm, 平均偏差 0.01 mm, 标准偏差 0.03 mm。从图 3 可看出, 除了边缘位置偏差相对较大, 曲面整体偏差很小。将文件以 .iges 的格式输出。

## 2.2 模杯曲面的获取

### 2.2.1 模杯结构控制参数

运动文胸模杯款式如图 4 所示, 此款运动文胸模杯为一片式模杯, 在面积上覆盖了整个运动文胸除肩带以外的前半部分, 有关此款运动文胸模杯造型的结构控制参数主要有: 下围线长(确定模杯的宽度, 一般到人体侧中缝位置)、前中长(确定领口最低点位置, 领口不宜过低)、杯高(确定模杯整体高度, 与运动文胸减震功能相关, 杯高过小, 模杯不能完全包裹乳房, 导致运动文胸不能达到减震的目的)、侧高(确定模杯体侧面高度)。文胸模杯结构

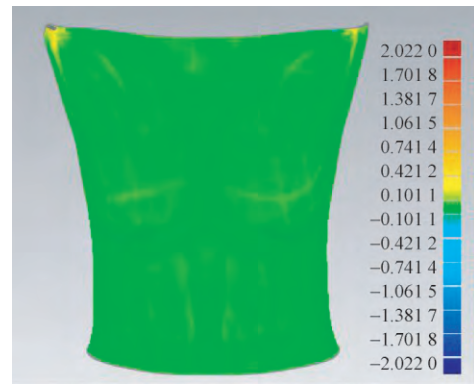


图 3 曲面偏差分析

Fig. 3 Analysis of surface deviation

控制参数的设计值分别为: 下围线长 35 cm; 前中长 11.5 cm, 杯高 19 cm, 侧高 6 cm。

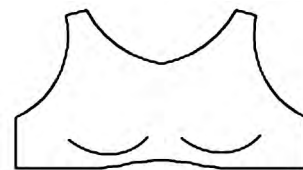


图 4 运动文胸模杯款式

Fig. 4 Cup style of sports bra

### 2.2.2 模杯内表面轮廓线的创建

模杯需贴合人体, 因此使用 UG 软件直接在人体曲面上创建轮廓线, 截取人体 NURBS 曲面作为模杯内表面的曲面。把 .iges 格式的文件导入 UG 软件, 把曲面的位置摆正, 调整视图到俯视图。

模杯底围线是创建模杯轮廓线的基础, 为了确定底围线的水平位置, 过  $BP$  点创建一个以  $X$  轴为法向的基准平面  $a$ , 求得该平面与曲面的交线, 该曲线的曲率梳如图 5 所示。点  $A$  是  $BP$  点以下的曲线的曲率峰值点, 该曲线的曲率峰值点反映的是乳房过渡到躯干的临界点, 以点  $A$  的位置为模杯底围线的水平位置。过点  $A$  创建一个以  $Y$  轴为法向的基准平面  $b$ , 求得平面  $b$  与曲面相交的曲线, 以中点向左右各取 17.5 cm 截取曲线, 该曲线为模杯底围线水平参考线。

确定底围线后, 在前中心位置创建一个以  $X$  轴为法向的  $c$  基准平面, 并求得曲面与该平面的交线, 所得曲线即为前中心线, 在前中心线与底围线的交点处向上截取 12.5 cm 为模杯的前中心线, 由下端向上 1 cm 标记点。在距离底围平面  $b$  向上 19 cm 处创建基准水平面  $d$ , 并求其与曲面的交线, 该交线为模杯的上围线, 在曲线中点位置向左右截取 9 cm, 截得的曲线端点作为罩杯耳仔的上端点, 在该端点处创建一个与水平面向下倾斜  $10^\circ$  的基准平面, 求其与曲面的交线, 并从交点处向外

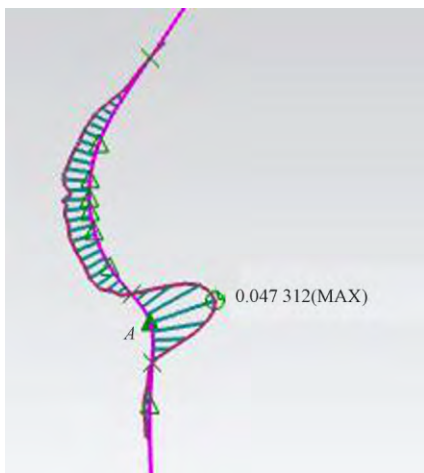


图 5 曲线曲率分析

Fig. 5 Curvature analysis of curve

截取2.5 cm为模杯耳仔的宽度。在底围线的端点创建垂直于路径的基准平面 *e* 和 *f*,求得平面与曲面的交线,在与底围线的相交处向上截取6 cm为模杯的侧缝线。在曲面上连接各个相关点并进行调整后形成模杯内表面的外轮廓线。创建模杯外轮廓线过程中所需的各个基准平面、辅助线及模杯外轮廓线如图6所示。

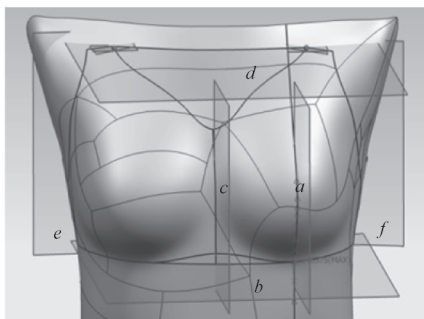


图 6 模杯内表面的外轮廓线

Fig. 6 Outline of inner surface of cup

### 2.2.3 模杯曲面截取

创建出完整的轮廓线后,运用UG修剪曲面的功能截取轮廓线以内的曲面,得到模杯内表面的曲面,如图7所示。在此过程中需注意,修剪曲面的轮廓线必须是封闭的,中间不能存在缝隙。

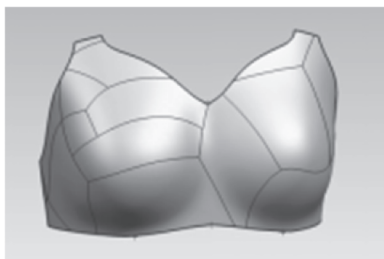


图 7 模杯内表面的曲面

Fig. 7 Surface of cup inner surface

## 2.3 模杯实体模型创建

模杯是三维实体,具有一定的厚度,由于运动文胸需要良好的透气性,模杯厚度一般相对较小。截取模杯的内表面曲面后,在内表面曲面的基础上向外加厚2 mm,得到运动文胸模杯的整体模型,如图8所示。三维运动文胸模杯的整体建模完成。

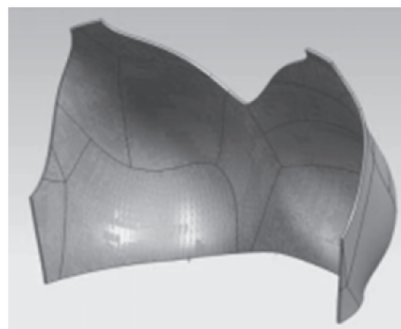


图 8 运动文胸模杯模型

Fig. 8 Cup model of sports bra

## 3 3D 打印运动文胸模杯

模杯建模完成后,下一步就是打印模杯模型。目前,文胸模杯的主要材质是海绵,企业常用的海绵材质有三明治材质、立绵材质、普通海绵材质<sup>[9]</sup>,受目前3D打印材料的限制,还不能打印海绵材质,有待于后续3D打印材料的相关研发。

3D打印技术的工艺有光固化成型(SLA、DLP)、熔融沉积成型(FDM)、选择性激光烧结(SLS)、聚合物喷射(PolyJet)等。目前已可打印柔性材质的模型,本文没有采用柔性材料,使用了SLA型3D打印机,打印耗材为光固化材料光敏树脂,该材料主要成分有低聚物、活性稀释剂、光敏剂等,光敏剂可在相应波长的紫外光照射下固化。

对模型进行3D打印前,需要完成相关的前期准备工作,主要有以下2步:运用amber 3D软件对模型布局,将.stl格式的模杯模型文件打开,模型放入指定尺寸的长方体平台中后,保存文件格式为.atl;之后对已布局好的模型进行切片,把模型分为无数个厚度为0.03 mm的二维图形,切片完成后,文件保存为.atj格式。最后把.atj格式的文件存入3D打印机进行打印。3D打印运动文胸模杯成品如图9所示。

## 4 误差分析

在制作3D打印运动文胸模杯的过程中由于偶然误差及系统误差的存在,3D打印运动文胸模杯与



图 9 3D 打印运动文胸模杯  
Fig.9 3-D Printed sports bra cup

扫描人体不会达到完全贴合,误差来源主要有点云数据误差、曲面重构误差、3D 打印误差等。

#### 4.1 点云数据误差

由三维扫描仪扫描得到的点云数据误差主要来源于三维扫描仪机器自身、外界干扰因素。

就三维扫描仪自身而言,其在进行激光扫描时发出的激光光斑大小、仪器的稳定性、设备校准定位情况等都直接影响扫描精度。同时,有限的扫描角度、被测物自身某些部位遮挡等使激光无法到达或回到接收器从而造成扫描数据缺失。

外界干扰因素主要有外界光的干扰、被测物体的反光性。通常情况下,扫描在暗室进行,外界光线会对扫描仪发出的激光造成干扰。反光性不佳或太强的物体表面都需涂显像剂<sup>[10]</sup>。

#### 4.2 曲面重构误差

曲面重构误差主要源于对原始点云数据的处理、多边形编辑、曲面拟合等。3D 软件通常采用最小二乘逼近的方法实现曲面拟合。在对多边形进行松弛等处理时将造成与原始点云数据的偏差。

#### 4.3 3D 打印误差

3D 打印技术的误差主要来自于三维模型的切片处理,切片处理会造成模型的层与层之间的过渡信息丢失,导致 X-Y 方向的尺寸存在偏差、模型表面光滑度下降。层厚越小,3D 打印的精度越高,但是打印时间会随之增加。

## 5 结束语

本文探讨的 3D 打印运动文胸模杯的方法,与传统的使用模具热压制得模杯的方法相比,生产批量号型模杯效率较低,但在制作个性化定制模杯方面拥有明显的优势,省略了模具制作环节,节省了原材料,模杯更加合体。使用相关建模软件,模杯可呈现镂空等结构设计,能够很大程度上满足运动文胸对透气性的需求,但是受目前 3D 打印材料的限制,3D 打印模杯的服用性能差强人意,有待于 3D 打印

材料的进一步发展。

FZXB

#### 参考文献:

- [1] 罗军. 中国 3D 打印的未来[M]. 北京: 东方出版社, 2014: 26 - 28.  
LUO Jun. The Future of 3D Printing in China [M]. Beijing: Oriental Press, 2014: 26 - 28.
- [2] TREADAWAY C. Developments in Digital Print Technology for Smart Textiles [M]. Amsterdam: Elsevier Inc, 2009: 300 - 318.
- [3] SABANTINA L, KINZEL F, EHRMANN A, et al. Combining 3D printed forms with textile structures: mechanical and geometrical properties of multi-material systems[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 87(1): 1 - 5.
- [4] 印建荣. 内衣结构设计教程[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2006: 73.  
YIN Jianrong. Underwear Structure Design Tutorial [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2006: 73.
- [5] 李勇. 文胸模杯生产技术[J]. 西安工程大学学报, 2012, 26(6): 714 - 718.  
LI Yong. Bra model cup production technology [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2012, 26(6): 714 - 718.
- [6] 刘伟军, 孙玉文. 逆向工程: 原理、方法及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 1 - 3.  
LIU Weijun, SUN Yuwen. Reverse Engineering: Principles, Methods and Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 1 - 3.
- [7] 黄明. 三维测量点云数据重构方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009: 1 - 2.  
HUANG Ming. Research on data reconstruction method of 3D measurement point cloud [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009: 1 - 2.
- [8] 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. 3D human modeling technology based on Geomagic [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(5): 130 - 134.
- [9] 孟祥红. 运动文胸热湿舒适性研究及设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 25 - 26.  
MENG Xianghong. Study and design on the thermal comfort of sports bra [D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 25 - 26.
- [10] 邵毅翔. 基于逆向工程及 3D 打印技术的误差分析应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017: 18 - 19.  
SHAO Yixiang. Research on application of error analysis based on reverse engineering and 3D printing technology [D]. Shanghai: East China University, 2017: 18 - 19.