

# 基于3D草图的个性化鞋楦设计

徐永昌<sup>1</sup>, 成思源<sup>1,2</sup>, 杨雪荣<sup>1</sup>

(1.广东工业大学, 广州 510006; 2.广东省创新方法与决策管理系统重点实验室, 广州 510006)

**摘要:** **目的** 将基于3D草图的曲面重建方法应用于个性化鞋楦设计。**方法** 对个性化鞋楦设计方法进行研究, 确定足楦设计标准, 使用基于3D草图的逆向设计方法, 在脚部模型上创建包含足型关键参数的鞋楦3D草图。根据3D草图选择合适的曲面创建工具生成鞋楦CAD模型。通过修改鞋楦3D草图, 实现鞋楦模型的变形设计。**结论** 以Geomagic Design X为设计平台, 根据足楦设计标准, 实现了基于足部扫描模型的鞋楦3D草图提取和CAD模型创建。修改鞋楦3D草图中头势曲线, 在草图约束驱动下得到新款式3D草图, 创建了新鞋楦模型, 实现了个性化鞋楦的创建和再设计。

**关键词:** 个性化设计; 鞋楦; 逆向设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)04-0252-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.04.041

## Design of Personalized Shoe Last Based on 3D Sketch

XU Yong-chang<sup>1</sup>, CHENG Si-yuan<sup>1,2</sup>, YANG Xue-rong<sup>1</sup>

(1.Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Innovation Method and Decision Management System, Guangzhou 510006, China)

**ABSTRACT:** The work aims to apply the surface reconstruction method based on 3D sketch in the personalized shoe last design. The personalized shoe last design method was studied, and the foot last design standard was determined. The reverse design method based on 3D sketch was used to create 3D sketch of shoe last containing key parameters of foot shape on foot model. According to the 3D sketch, the appropriate surface creation tool was selected to generate shoe last CAD model. By modifying the 3D sketch of shoe last, the deformation design of shoe last model was realized. Taking Geomagic Design X as the design platform and according to the foot last design standards, 3D sketch extraction and CAD model creation of shoe last based on foot scanning model are realized. By modifying the head curve of shoe last 3D sketch, a new style 3D sketch driven by sketch constraint is obtained, thus creating a new model of shoe last, and realizing the creation and redesign of personalized shoe last.

**KEY WORDS:** personalized design; shoe last; reverse design

随着人们对鞋子舒适性、美观性要求的不断提高, 个性化的定制鞋子越来越受人们的欢迎。鞋楦是制作鞋子的模具, 直接影响着用户穿着鞋子时的舒适性。在个性化鞋楦设计中, 使用三维扫描仪采集脚的点云数据, 再结合逆向设计方法能够极大地提高定制鞋楦的设计效率, 缩短新款鞋子的研发周期<sup>[1]</sup>。基于

足部三维扫描数据的鞋楦设计分为有实体和无实体鞋楦造型。其中, 有实体鞋楦造型先通过扫描标准鞋楦, 建立标准鞋楦数据库; 再扫描客户脚型, 将其与标准鞋楦库的数据进行对比, 选择最接近的标准鞋楦; 最后对选择的鞋楦进行变形设计<sup>[2]</sup>。无实体鞋楦造型直接以扫描的脚部模型为设计依据, 根据鞋楦设

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 广东省科技计划项目(2014A040402006, 2014A040401078); 广东省研究生教育创新计划项目(2015SFKC23); 广州市高校创新创业教育项目资助(20170422)

作者简介: 徐永昌(1992—), 男, 湖北人, 广东工业大学硕士生, 主攻逆向工程、个性化设计。

通信作者: 成思源(1975—), 男, 重庆人, 广东工业大学教授, 主要研究方向为逆向工程技术创新方法。

计规律，进行鞋楦设计<sup>[3]</sup>。

在无实体鞋楦造型方面，浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室进行了研究，主要提出了两种实现方式：(1) 根据足型和鞋楦设计参数的对应关系，从足部扫描数据中获得鞋楦设计主要参数<sup>[4]</sup>，进行鞋楦定制设计；(2) 利用足部三维扫描数据建立足部特征模型，确定鞋楦特征模板和顶点相应的关系，从而组合建立鞋楦轮廓曲线，之后进行曲面细分造型得到定制鞋楦模型<sup>[5]</sup>。这两种方法不能完整提取足部有效参数，导致局部特征丢失，且不利于后续的编辑修改。

在现有的无实体鞋楦造型方法基础上，本文提出一种基于 3D 草图的个性化鞋楦设计方法。基于 3D 草图的模型重建是逆向设计中的一种曲面重建方法，该方法通过对模型的设计要素进行分析，确定设计意图和设计参数，然后用截面曲线、边界曲线、特征曲线提取模型的设计参数<sup>[6-7]</sup>。在提取的曲线之间添加约束关系构建 3D 草图，最后按照由线到面的方法进

行正向的参数化曲面重建。提取的鞋楦 3D 草图可保留点云中的有效信息，通过修改 3D 草图进行再设计创作新款式的鞋楦。

### 1 基于 3D 草图的个性化鞋楦设计流程

将基于 3D 草图的曲面重建方法应用于鞋楦个性化设计，设计流程见图 1。在足部扫描数据中提取符合足楦设计标准的鞋楦 3D 草图，根据 3D 草图采用合适的曲面造型方法（放样、拉伸、曲面填补等）构建鞋楦 CAD 模型。鞋楦 3D 草图的各曲线之间包含着约束关系，如共点、共线、共面、距离等。通过改变曲线控制点位置，调整曲线形状，在草图约束驱动下使整个鞋楦 3D 草图变形，进而改变鞋楦 CAD 模型。这种方法通过构建 3D 草图在脚部模型上提取鞋楦设计参数，由 3D 草图生成鞋楦 CAD 模型，变形设计时只需修改 3D 草图。

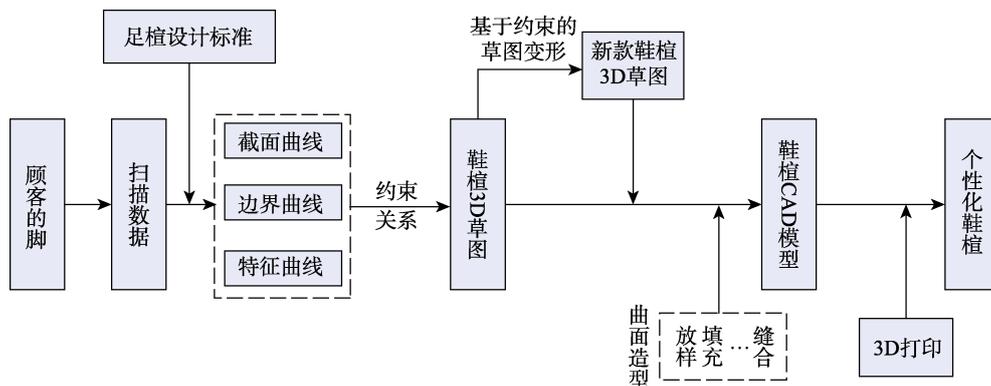


图 1 基于 3D 草图的个性化鞋楦设计流程

Fig.1 Design process of personalized shoe last based on 3D sketch

#### 1.1 足楦设计标准

脚的形体是一个不规则的三维几何体，鞋楦的形状根据脚的形体和生理机能等因素来综合设计<sup>[8]</sup>。足楦设计标准是从脚型和鞋楦在长度、宽度（围线）和特征点对应 3 个方面的关系进行的总结。在长度方向上，为了保证脚在鞋内有一定的活动余地，使脚在行

走时鞋不会“顶脚”，需要加上一定的放余量。宽度方向上，主要是脚型和鞋楦在跖围、跗围、兜围处的围长关系，即鞋楦的跖围和跗围应接近脚型的跖围和跗围，鞋楦的兜围要大于脚型的兜围。全国成年男女的脚型规律见表 1<sup>[9]</sup>，反映了特征点、脚长的对应关系和特征尺寸与特征点关系。

表 1 全国成年男女的脚型规律表

Tab.1 The foot pattern rule of adult men and women through the country

特征点与脚长关系		特征尺寸与特征点关系	
脚趾端部位	100%脚长	脚长	脚趾端点至后跟突点的距离
拇指外凸点部位	90%脚长	跖围	过第一和第五跖趾关节的最突点的围度
小指端部位	82.5%脚长	跗围	过前跗骨突点，第五跖骨粗隆点和脚心凹处的围度
前掌凸度部位	68.8%脚长	兜围	过后跟突点和舟上弯点处的围度
第五跖趾部位	63.5%脚长		
跗骨部位	55.3%脚长		
腰窝部位	41%脚长		
中心部位	22.5%脚长		
踵心部位	18%脚长		

鞋楦底边沿曲线在第五跖趾部位以后的曲线与脚型轮廓接近,第五跖趾部位之前的曲线一般用来进行头势的设计<sup>[10]</sup>。鞋楦头势基本形式有方头、偏头、圆头、尖头。不同款式的鞋楦有不同的前翘高和后跟高。前翘高指脚趾端点距离脚底平面的距离,后跟高指踵心点距离脚底平面的距离。足楦设计标准,为从脚部模型创建鞋楦 3D 草图提供了依据。

## 1.2 创建鞋楦 3D 草图

基于 3D 草图的曲面重建适用于复杂的自由曲面模型,该方法通过分析设计对象的设计要素,提取模型中表达设计意图的 3D 草图,再根据 3D 草图进行曲面重建。设计要素可以通过边界曲线、特征曲线和截面曲线来提取。边界曲线包括模型的外边界、内边界。特征曲线是通过视觉感知的曲线,对重建三维模型有重要的造型意义。通过曲率分析,特征曲线也是曲率变化较大位置的曲线。截面曲线是一种曲面造型曲线,根据模型的造型特点,提取的截面曲线应为模型特征的截面草图。本文以 Geomagic Design X 为平台,进行鞋楦 3D 草图的创建和变形设计。Geomagic Design X 具有完整的 3D 曲线逆向设计处理流程,且

可以在逆向处理流程中加入正向设计,方便设计者进行正逆向混合建模<sup>[11]</sup>。

在构建鞋楦 3D 草图时,首先根据足楦设计标准提取鞋楦设计参数,然后创建表达创意和便于曲面造型的特征曲线。脚部模型没有边界参数需要提取,不需创建边界曲线。足楦设计标准中确定了足型和鞋楦在长度、宽度(围度)和特征点对应 3 个关系,通过截面曲线来提取足型在长度、宽度方面参数。提取截面曲线时先设定截面与脚部模型相交获取截面数据,然后根据截面数据拟合样条曲线。这些截面包括脚底面、脚廓面、中轴面、跖围面、跗围面、兜围面、统口面。在创建截面时,依据足型的脚趾端点、跟突点、踵心点、脚掌着地点等足型关键点。脚廓面截取的曲线包含了足型的脚长信息和宽度信息,脚趾端点至后跟突点的距离为脚长,在脚长上加上放余量可得到鞋楦长度。通过中轴面创建的中轴线,包含了脚底部的踵心点和脚掌着地点。通过跖围面、跗围面、兜围面和统口面可创建跖围、跗围、兜围和统口曲线。创建的截面曲线见图 2。提取截面的准确性,需要设计者对脚型特征比较熟悉,且在点云处理阶段不能进行大程度的平滑操作。

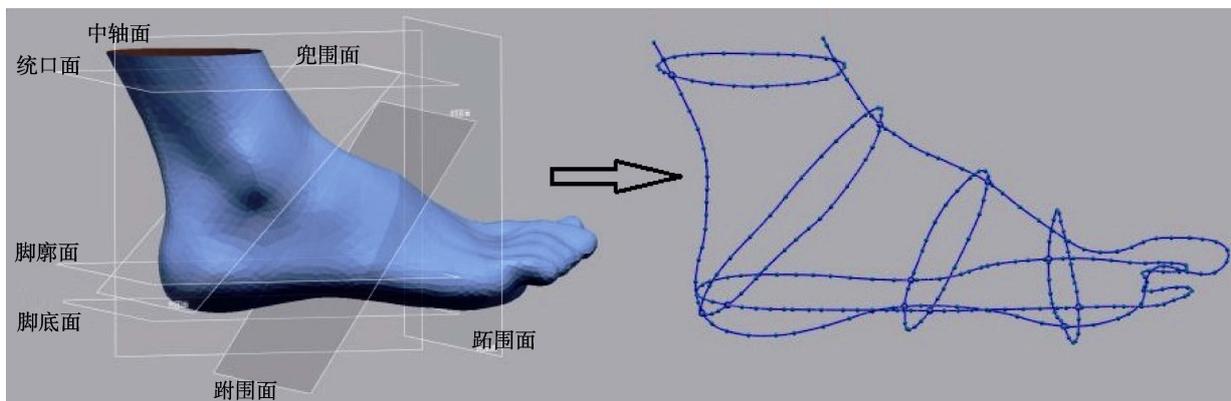


图 2 创建的截面曲线  
Fig.2 Section curve created

在特征点对应方面,根据表 1 所列足型规律,确定中轴线上的踵心点、前掌凸度部位和腰窝部位。这些特征点对应着鞋楦上的特征点,在鞋楦变形设计时,要保持这些特征点固定。为了便于创建光顺的鞋楦曲面和鞋楦变形设计,在踵心点、前掌凸度部位和腰窝部位创建特征曲线。在 Geomagic Design X 中创建特征曲线可以采用从截面创建和手动绘制的方式,第一种创建的曲线贴合在模型表面上,第二种可以创建空间中任意位置曲线。根据设计意图选择合适的创建方式。

同一鞋号的鞋无论样式如何变化,从第五跖趾部位以后尺寸基本保持不变,脚趾端点处的宽度和脚趾高度决定了鞋子前端对人脚的容纳与否,所以对于同一个体,此值应该固定<sup>[12]</sup>。在鞋楦的头势设计上,应

保持鞋楦 3D 草图中脚趾端点处的宽度和脚趾高度固定,使头势设计不会影响穿着的舒适度。通过截面曲线提取鞋楦设计的关键参数,特征曲线为曲面创建提供了过渡曲线,便于生成光顺的曲面,特征点的对应可以提高鞋楦的舒适性。

当截面曲线和特征曲线中的一条曲线发生改变之后,会导致整个鞋楦草图的崩溃,主要原因是现在各曲线只包含几何信息,而没有包含其相接的拓扑信息。需要在各曲线之间添加约束关系,通过约束构建包含拓扑信息的 3D 草图。针对鞋楦 3D 草图创建和修改过程中的实际情况,在曲线之间添加必要的约束。鞋楦 3D 草图约束见表 2。

结合足楦设计标准,在曲线间添加约束。中轴线上的踵心点和脚掌着地点,应保持固定。前中轴线上

表 2 鞋楦 3D 草图约束  
Tab.2 Shoe last 3D sketch constraint

共点约束	$C_1 = \{type_1, (e_1, e_2), Hd_1\}, Hd_1$ , 约束元素集中各元素坐标值相同
共线约束	$C_2 = \{type_2, (e_1, e_2, e_3), Hd_2\}, Hd_2$ , 约束元素集中各元素坐标值共线
共面约束	$C_3 = \{type_3, (e_1, e_2, e_3, e_4), Hd_3\}, Hd_3$ , 约束元素集各个元素坐标值共面
尺寸约束	$C_4 = \{type_4, (B_1), Hd_4\}, Hd_4$ , 约束元素集中个元素坐标值在 x,y,z 方向上不超过一定尺寸范围

统口前点与鞋楦最前点之间的节点应该在同一条直线上。跖围、跗围、兜围曲线和长度方向截面曲线满足共面约束。脚趾端点和后跟突点之间距离、脚趾端点处的楦宽应添加尺寸约束，鞋楦 3D 草图见图 3。使用 Geomagic Design X 的 3D 草图模块，将脚部点云模型，转换为符合足楦设计标准的鞋楦 3D 草图时，操作分为设计参数的提取和约束关系的添加，设计参数提取的准确性决定着鞋楦的舒适性。相比于其它无实体鞋楦设计方法操作更灵活，可以自主提取脚部模型上所需设计信息。

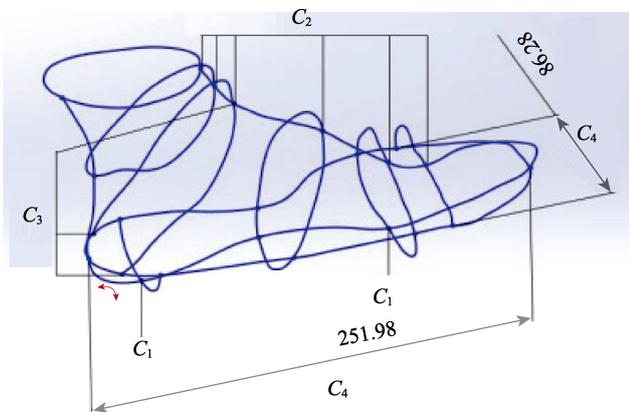


图 3 鞋楦 3D 草图  
Fig.3 Shoe last 3D sketch

## 2 创建鞋楦模型及变形设计

草图是特征生成和修改的基础，通过草图可以创建的特征有拉伸、旋转、放样等。脚部模型是一个封闭的复杂自由曲面，通过创建鞋楦 3D 草图将其分割为简单的开放自由曲面，使用曲面放样、曲面填充即可创建鞋楦各分片曲面，再使用曲面缝合工具可以创建封闭的鞋楦 CAD 模型。Geomagic Design X 提供了正向的曲面创建模块，在创建 3D 草图后使用曲面创建工具生成鞋楦 CAD 模型，创建的鞋楦 CAD 模型见图 4。在获得鞋楦 3D 草图后对草图中的曲线进行修改，在草图约束驱动下可实现变形设计<sup>[13]</sup>。

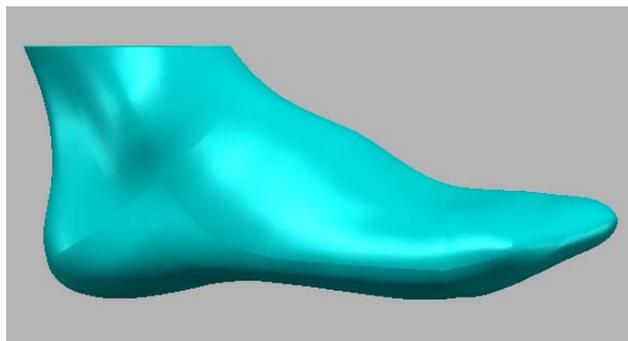


图 4 创建的鞋楦 CAD 模型  
Fig.4 CAD model of shoe last created

基于约束驱动的鞋楦变形是利用草图曲线控制点位置改变，在草图约束驱动下使整个草图变形<sup>[14]</sup>，再使得由草图生成的模型发生变形。控制点位置改变可以直接拖动也可通过修改尺寸约束实现。鞋楦 3D 草图中的 5 种约束，按其约束力强弱，有一个约束等级和优先级为<sup>[15]</sup>：固定约束>共点约束>共线约束>共面约束>尺寸约束。相应的约束求解顺序为：尺寸约束>共面约束>共线约束>共点约束>固定约束。创建的鞋楦 CAD 模型见图 5。

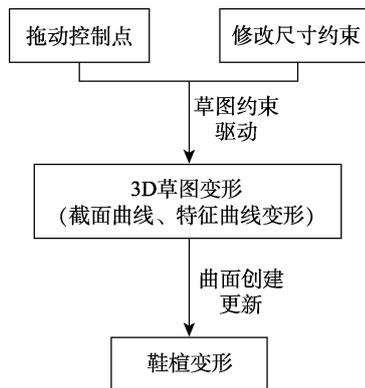


图 5 鞋楦模型的变形流程  
Fig.5 Deformation process of shoe last model

基于草图约束驱动鞋楦模型变形的步骤为：(1) 设计者通过鼠标或者键盘手动操作完成；(2) 用基于草图约束驱动实现鞋楦 3D 草图的变形；(3) 基于鞋楦 3D 草图的鞋楦曲面更新。以鞋楦头势变形设计为例，修改鞋楦 3D 草图上反映鞋楦头势的截面曲线，拖动其控制点到合适位置，在草图约束驱动下，鞋楦 3D 草图发生变形，得到修改头势后的草图，再通过曲面放样和填充工具重新生成鞋楦 CAD 模型。鞋楦头势的变形设计见图 6，在使用 Geomagic Design X 进行变形设计时，拖动控制点方式比较好操作；修改尺寸约束，草图整体会有较大的变形，需要修正不合适的曲线。基于草图约束驱动的鞋楦变形设计，相比其它方法操作灵活，在保证满足足楦设计标准下，设计者通过改变曲线上的控制点可直接改变鞋楦 3D 草图，进而通过曲面重建得到变形后的 CAD 模型。

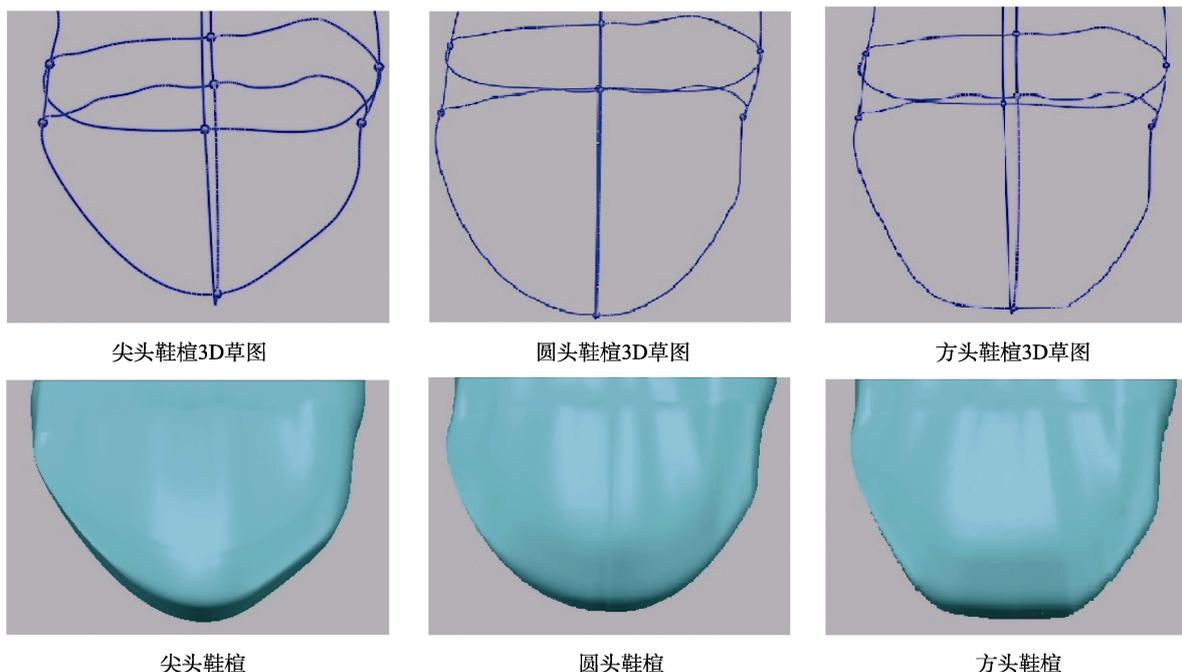


图6 鞋楦头势的变形设计

Fig.6 Design of deformed shape of shoe last head

### 3 结语

针对无实体鞋楦设计,提出了基于3D草图的个性化鞋楦设计方法,可以实现无实体鞋楦造型和鞋楦再设计。个性化鞋楦设计包含两部分:(1)根据个人足部模型设计出满足舒适性的鞋楦;(2)实现鞋楦变形,设计不同款式和用途的鞋楦。通过扫描足部,获取点云模型,以Geomagic Design X为设计平台,结合足楦设计标准在点云模型上提取鞋楦设计参数,创建鞋楦3D草图。根据草图选择合适的曲面创建工具生成鞋楦CAD模型,完成个性化鞋楦设计的第一部分。创建的鞋楦3D草图包含了足型的关键参数和特征点,在保证舒适性下修改反映鞋楦头势的曲线,在草图约束下驱动草图的变形,得到新款式3D草图,由草图再创建新款式鞋楦。这种方法采用正逆向结合的设计方法,通过逆向处理在足部点云模型上提取鞋楦设计参数,创建3D草图,再采用正向的曲面创建方法由草图生成鞋楦CAD模型,通过修改草图生成不同款式鞋楦。

#### 参考文献:

[1] 支卫新,平雪良,田媛,等.鞋楦的数字化设计与软件开发[J].计算机工程与应用,2016,52(3):17—20.  
ZHI Wei-xin, PING Xue-liang, TIAN Yuan, et al. Digital Design and Software Development of Shoe Last[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(3): 17—20.

[2] 史辉.基于脚型三维形貌的自动化鞋楦定制关键技术研究[D].北京:清华大学,2008.  
SHI Hui. Study on the Techniques of Automatic Customized Shoe Last Based on 3D Foot Shapes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.

[3] 任怀艺,王伯雄,刘辉,等.鞋楦定制中非均匀有理样条特征曲线的自适应变形[J].光学精密工程,2013,21(1):181—188.  
REN Huai-yi, WANG Bo-xiong, LIU Hui, et al. Adaptive Deformation of Characteristic NUBS Curve for Customized Shoe-last[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 181—188.

[4] 徐从福,刘勇,蒋云良.个性化鞋楦CAD系统的设计与实现[J].计算机辅助设计与图形学报,2004,16(10):1437—1441.  
XU Cong-fu, LIU Yong, JIANG Yun-liang, et al. Design and Real ization of Customized Shoe Last CAD System[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1437—1441.

[5] 陆国栋,顾铭秋,王剑,等.基于脚部三维扫描的鞋楦建模方法研究[J].机械,2005,32(4):13—15.  
LU Guo-dong, GU Ming-qiu, WANG Jian, et al. Research of Shoe-last Modeling Algorithm based on Feet Range Scans[J]. Machinery, 2005, 32(4): 13—15.

[6] MAURA M, MICHELE G. Reverse Engineering and Restyling of Aesthetic Products Based on Sketches Interpretation[J]. Res Eng Design, 2009(20): 79—96.

[7] VARADY T. New Trends in Digital Shape Reconstruc-

- tion[J]. *Res Eng Design*, 2005(2): 7—26.
- [8] 葛春丽. 基于自由曲线形状控制的鞋楦逆向建模与修改[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- GE Chun-li. Reverse Modeling and Modifying of Shoe-last Based on Freeform Curve Shape Control[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [9] 顾铭秋. 基于特征信息的三维鞋楦处理中的若干技术及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- GU Ming-qiu. Research and application of 3D Last Processing Technology Based on Feature Information[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [10] 高潮. 皮鞋鞋楦 CAD/CAM 系统中若干关键技术研究及实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- GAO Chao. Study on Some Key Technologies and Realization in Shoe Last CAD/CAM System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [11] 丛海宸, 成思源, 杨雪荣, 等. 基于领域划分的逆向参数化建模[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(6): 71—74.
- CONG Hai-chen, CHENG Si-yuan, YANG Xue-rong, et al. Reverse Parametric Modeling Based on Division of Region[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2016(6): 71—74.
- [12] ROUNT N. 3D Foot Scan to Custom Shoe Last[J]. *Special Issue of IJCCT*, 2010, 1(2): 14—48.
- [13] ZHANG Yi-fan. Shoe-last Design Exploration and Customization[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2012, 103(5): 541—548.
- [14] 王青, 耿卫东, 鲍虎军. 基于曲线约束的鞋楦曲面变形技术[J]. *机械工程学报*, 2010, 9(5): 158—164.
- WANG Qing, GENG Wei-dong, BAO Hu-jun. Shoe Last Surface Deformation Technology Based on Curve Constraint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 9(5): 158—164.
- [15] 黄志华. 基于三维扫描输入的鞋楦建模和变形技术研究及实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- HUANG Zhi-hua. Research & Realization of Modelling and Deforming Technology for Shoe Last Based on Input of 3D Scanning[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.