

【特别策划】

面向人体的个性化设计技术研究

成思源, 陈斌, 杨雪荣
(广东工业大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 研究和总结面向人体的个性化设计的相关技术方法, 主要包括借助三维人体测量技术为用户提供特有的身体数据, 在此基础上设计个性化产品的可配置模块, 从而快速定制出属于用户自身的个性化产品。**方法** 研究面向人体的数据获取方法和针对人体特征的三维建模方法, 为个性化设计提供数据支撑; 提出与人体特征相匹配的个性化设计流程, 以及面向大批量定制的设计需求, 通过定义模块化产品的配置信息, 达到设计重用的目的, 从而实现针对不同用户的个性化产品快速定制。**结论** 个性化设计针对人体形态存在的差异性, 向不同用户提供符合特定需求的设计产品, 是产品设计的重要发展趋势, 也对设计方法提出了新的要求。通过研究面向人体的个性化设计技术, 实现针对不同个体形态的快速定制, 促进该领域的进一步发展。

关键词: 大规模定制; 个性化设计; 模块化; 人体形态

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)22-0041-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.22.007

Personalized Design Technology for Human Body

CHENG Si-yuan, CHEN Bin, YANG Xue-rong
(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to study and summarize the technology methods related to personalized design for human body, mainly including providing users with unique body data with the help of three dimensional human body measurement technology, and then designing configurable modules of personalized products on this basis, so as to quickly customize personalized products of users. The data acquisition method for human body and the 3D modeling method for human body characteristics were studied to provide data support for personalized design. The personalized design process matching with human body characteristics and the design requirements of mass customization were put forward. The design reuse was achieved by defining the configuration information of modular products, so as to realize the rapid customization of personalized products for different users. Personalized design is an important development trend of product design by providing different users with design products that meet specific needs according to the difference of human body form and also puts forward new requirements for design methods. Through the research of personalized design technology for human body, the rapid customization of different individual forms can be realized to promote the further development of this field.

KEY WORDS: mass customization; personalized design; modularization; human form

伴随社会的发展和水平的提高, 用户的需求已经从以往的基本功能需求向着人性化、个性化的趋势发展, 从面向单个用户的个性化定制 (Personal-

ization) 到面向不同用户的大规模定制 (Mass Customization) 的转变已成为业界的新热点, 促使企业必须以尽可能经济性的手段提供高度个性化的产品

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 广东省研究生教育创新计划项目 (2020JGXM039); 广州市高校创新创业教育项目 (20170422)

作者简介: 成思源 (1975—), 男, 重庆人, 博士, 广东工业大学教授, 主要研究方向为逆向工程技术、机械 CAD/CAE 技术、计算机辅助检测技术、技术创新方法。

来满足不同用户的需求^[1]。相关的信息技术,如互联网+、物联网和虚拟现实等,以及可重构制造系统、增材制造等制造技术的发展为个性化需求的实现提供了支撑,产品设计方面也从通用化、标准化向个性化、定制化转变,相应的设计方法是实现大规模定制的关键因素^[2-3]。

面向人体的个性化设计主要是根据特定用户的人体特征参数进行定制,适配其身体特有形态,以保证用户的舒适性。考虑到不同用户身体部位在尺寸、特征方面的差异性,传统的设计方法不能满足与用户身体适配性的要求,“形式追随身体”也成为了工业设计需要考虑的现实需要^[4]。因此,借助三维人体扫描和逆向建模技术,快速准确地建立人体特定部位的三维模型,为个性化设计提供了良好的数据支撑。在模块化基础上的配置设计,为从个性化定制到大批量定制的转变提供了可依循的途径^[5]。研究和总结面向人体的个性化设计相关技术方法,主要包括借助三维人体测量技术为用户提供特有的身体数据,在此基础上设计模块化产品及可配置模块,从而快速定制出属于用户自身的个性化产品。

1 人体测量技术

人体测量技术作为面向人体的个性化设计的数据获取手段,其发展历程可概括为由手工向自动化、接触式向非接触式,以及二维向三维方式的变化^[6]。由数据来源的不同,人体测量技术又可分为体外测量技术和体内测量技术。体外测量技术包括传统的手工测量和非接触式人体测量,体内测量主要是来自于医学领域的透射测量技术。

1.1 传统的手工测量

传统的手工测量是一种接触式的人体测量方式,通过使用软尺、马丁测量仪、角度尺等工具,直接测量出人体各部位横向、纵向和围度尺寸等^[7]。传统手工测量常用仪器见图1,传统的手工测量效率低,同时要求测量者有一定经验,逐渐导致无法满足市场需求。然而传统的手工测量有简便、成本低的优势,并未被完全取代,在人体的围度(腰围、胸围等)和皮

褶厚度的测量中仍被使用。传统的手工测量也可与其他测量方法相结合,达到特定的测量要求。何宇雯等人^[8]采用手工测量方法对在校大学生的身高、腰围等进行测量,分析得出了相应的回归模型,为其余测量方法提供了数据参考。王旭等人^[9]采用手工测量和三维人体测量方式对青年女性前臂尺寸进行了测量,结果表明手工测量的数据波动性较大,但在手工测量过程中配合使用激光投线仪能够提高其测量精度。

1.2 非接触式人体测量

1.2.1 二维人体测量技术

二维人体测量技术可概括为图像获取、图像处理和数据提取三个阶段^[10]。首先以规定的采集要求和人体姿势,通过相机获取人体的二维图像,然后对采集到的图像进行灰度化、去噪和边缘检测等操作后提取人体轮廓,最后通过数学建模或编程等方式得出人体特征参数。人体二维图像采集见图2。二维人体测量仅需被测者的图片信息,为实现高效、低成本的个性化服装定制提供可能,关键在于获取清晰的人体轮廓边缘和确定人体特征点。研究者提出过多种基于二维图像计算人体围度的方法,但由于体型众多不一,难以建立统一的计算模型;另外,由于人体尺寸是基于二维图像直接或间接得出的,测量误差难以验证,对误差的评估还有待研究。于宗琴等人^[11]对人体二维图像进行处理、提取轮廓和确定特征点后,得出了人体胸围的计算模型,为人体围度的测量提供了一种有效的方法。季开宸^[12]对处理后的人体图像进行宽度、厚度和高度的提取,建立了对应基于三维人体点云围度的回归模型,初步建立了非接触式二维测量系统。

1.2.2 三维人体测量技术

三维人体测量能够生成精确、完整的三维人体数据,从而设计出贴合人体,以及具有更高舒适度的个性化产品。同时,三维人体测量在个性化护具、个性化服装定制、人体数据库的建立等领域应用广泛。根据其测量原理大致可将三维人体测量分为激光测量、结构光测量和立体摄影测量^[13-14]。

激光测量法也称三角测量法,根据相似三角形的原理,在不同方位实现激光的发射与接收,通过分



图1 传统手工测量常用仪器

Fig.1 Conventional manual measuring instruments

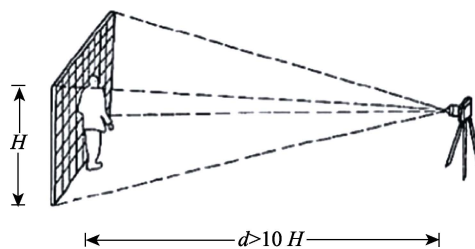


图 2 人体二维图像采集

Fig.2 Two-dimensional image acquisition of the human body

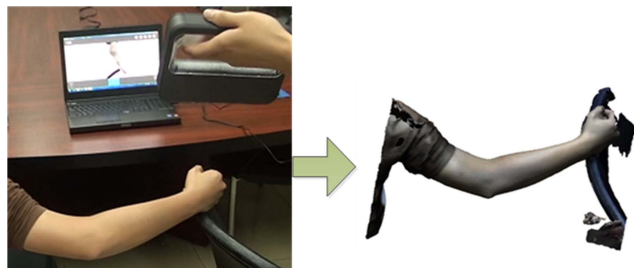


图 3 手臂表面的数据采集

Fig.3 Data acquisition on the arm surface

析反射光的时间间隔、光轴角度等,得到人体数据信息^[15]。该方法的测量精度高、扫描速度快,但适用于测量人体的激光扫描设备昂贵,性价比不高,难以大范围推广。由于激光是一种受激辐射后放大的光,对人体有一定危害,所以也可使用以红外线为光源的三角测量法获取人体表面数据,典型的设备有 Sense 三维扫描仪和 Kinect 传感器。

Sense 三维扫描仪主要由红外线 CMOS 摄像头、RGB 摄像头和红外线发射器三部分组成。工作时,通过红外线发射器发出经过编码的红外线,由红外线 CMOS 摄像头接收,两者构成 3D 深度感应器,RGB 摄像头记录人体色彩信息,以此获得人体表面的坐标信息与颜色信息。用 Sense 三维扫描仪采集手臂表面数据,扫描过程中,尽量使扫描仪与手臂之间的距离保持合适且不变,并沿着手臂移动和旋转,以获得完整的手臂表面数据^[16]。手臂表面的数据采集见图 3。

Kinect 传感器是一种深度信息获取设备,内置有红外深度传感器、颜色传感器、红外发射器和麦克风等,通过深度图像的融合获得人体三维模型,进而提取人体尺寸信息,其具有体积小、性价比高的特点,同时也能够实现较好的扫描精度^[17]。Kinect 传感器有一定的市场认可度,适合在服装店面向客户使用,但也存在扫描图像噪声大、多幅深度图像融合重建算法开发难等不足,未来的相关研究重点主要集中在扫描速度和精度的提升上。

结构光测量是将诸如点、网格或条纹之类的白光图案投射到被测对象表面,同时摄像系统进行数据采集,然后通过分析计算生成被测对象的表面数据。结构光对人体无害,相关的测量方法也比较成熟,但对环境的要求较高,如基于白光的三维扫描设备需在阴

暗的环境中进行测量,并且要求被测者穿着浅色衣物,以防止数据丢失。苏显淦等人^[18]应用结构光三维成像技术对人脸进行测量,验证了该方法的可行性。李中伟^[19]针对数字光栅投影关键问题开发了两种结构光三维测量系统,并将其应用于人体测量,得到了理想的结果。

立体摄影测量利用深度摄像机多角度拍摄人体,并同时记录深度信息,然后使用立体三角剖分等算法来识别和匹配两张照片的表面特征,以生成复合 3D 模型,最后将颜色纹理信息映射到该模型上^[20]。三维摄影测量系统因耗时少、成像精确和数据处理便捷等优势被逐渐应用于临床^[21]。Moghaddam 等人^[22]通过立体摄影测量法证明了颅骨畸形患者使用颅骨成形头盔后头部形状的改善情况,结果表明超过 95% 的患者在头盔治疗中表现出对称性改善。

精确、完整的三维人体数据在个性化产品设计中尤为重要,目前在个性化服装定制、三维人体数据库、现代医疗、影视与游戏制作、虚拟现实和人机工程学等领域都得到了广泛的应用。易军等人^[23]在扫描获取准确的人体数据后,将其应用在了服装产品设计中,包括面向消费者的虚拟试衣和面向设计者的个性化服装修改上,表明三维人体数据在服装产品设计中能够有效改善服务和提高产品的舒适性。姜自伟等人^[24]通过激光扫描获取手臂数据,建立了手臂模型并设计了一种数字化夹板,结果表明人体数据能够使夹板设计更加贴合人体,不易松脱。汪一翔^[25]基于女性足部数据,通过半参数化软件 Rhino 设计制作了个性化高跟鞋模型,并利用了 3D 打印技术进行制作,实验结果表明个性化的高跟鞋有更好的舒适性,并且相较于传统的高跟鞋定制方法更加高效,重复性好,方便修改。廖政文等人^[26]基于人体前臂数据,设计了一种个性化康复矫正器模型,并在 Abaqus 软件中进行有限元结构的优化分析,最后通过 3D 打印实验,表明其在舒适性、透气性和重量等方面的优越性。何人可等人^[27]结合三维扫描和传统手工测量方法,测量了来自全国各地 2 200 名受试者的头部数据,设计构建了一个时效性新、采样广泛、特征丰富的中国人体头部数据库,为目标用户头戴产品的设计提供了数据基础。Vitali 等人^[17]使用多个 Kinect 传感器在开源库中实现了客户身体形态的获取和自动化重建,同时开发了一个虚拟现实应用程序——Tailor Tracking 插件,能够使用虚拟卷尺对客户身体的重建模型进行测量并显示测量值,为个性化服装设计提供了数据支持。

1.2.3 4D 扫描技术

4D 扫描可被视为即时的 3D 扫描,用于捕获对象一段时间内动态信息的连续 3D 扫描。4D 扫描要求扫描图像的捕获时间快,以及从不同的位置和视点捕获,同步扫描对象,其发展仍具有挑战性^[28]。在运动服装、军用服装设计等领域,因运动导致的人体尺寸

变化不可忽略,为此,衣物必须能够容纳人体尺寸的变化,缓解更早的人体表面压力和肌肉疲劳。4D 扫描技术为设计者考量变化的人体尺寸提供了支持,基于动态的扫描数据,未来的个性化服装设计中可考虑通过改善衣物材料和不同材料间的裁缝方法达到适配动态尺寸变化的效果。然而 4D 扫描生成的人体数据繁多,给数据处理带来了挑战,同时,相关的个性化产品设计还需进一步研究^[29]。Novak 等人^[30]开发了一种基于激光扫描技术的 4D 扫描系统,记录了步行过程中的脚形态,实验结果表明该系统能够达到较高测量精度,动态的测量数据也对鞋子的舒适度有更准确的描述。

1.3 体内测量技术

现代医疗中,体内组织与器官的成像是进行医学观察、医疗诊断和手术等的重要步骤,精准医疗的发展对个性化医疗器械的设计也提出了更高的要求。借助体内测量技术,可以将人体内部通过计算机图像的方式予以呈现,所生成的图像为人体内部的二维截面图像,通过叠加处理生成三维模型。

体内测量技术主要通过 CT、MR 或超声等方式扫描人体,获得人体内部组织结构的序列断层扫描数据,在计算机中对这些数据进行三维可视化处理,最终生成组织结构截面序列的三维模型,是一种融合图像处理、计算机图形学、科学计算可视化和虚拟现实技术的非接触式检测方法^[31],克服了传统内窥镜与人体接触的缺点。通过体内测量得到人体内部组织的断层图像后,导入医学影像系统,如 Mimics 等软件中进行处理重建,可生成完整的人体内部结构三维数据,见图 4。王安民等人^[32]在 Mimics 软件中处理股骨 CT 图像,得出了三维股骨模型,设计完成了一种个性化股骨假体,并分析了股骨假体在截骨面和外形上的匹配程度,并通过实验进行了验证。

2 面向人体的模块化设计技术

2.1 个性化产品的模块化设计

随着用户对个性化需求的提高,对企业具有的定制型产品设计开发能力也提出了更高的要求。面对动态多变的市场,用户的多样性和个性化需求对传统的设计也提出了挑战,发展了相应的设计方法。其中模块化的产品架构是实现个性化的基础,是沟通用户需求和设计产品的有效途径。

模块化设计的思想可追溯到我国北宋时期的活字印刷术,通过运用标准件、互换件、通用件、重用性等模块化方法和原则,解决了雕版印刷中的难题。“模块化设计”的概念在 20 世纪中期被提出,并用于工业产品的设计中^[33]。模块化产品由一组特定的模块组合而成,其中的模块是指一种特定的零部件或组合件。与传统的零部件不同,模块在产品系统中具有

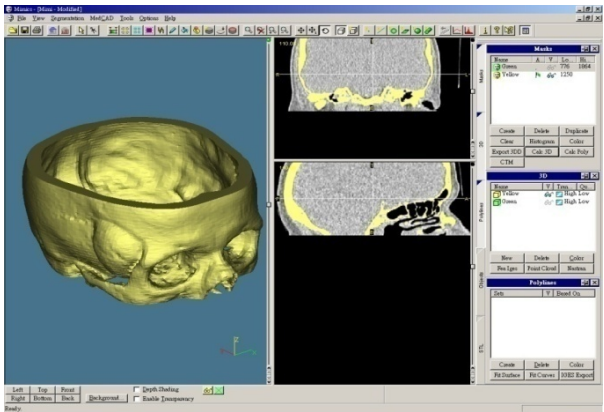


图 4 Mimics 软件中图像处理与建模
Fig.4 Image processing and modeling in Mimics software

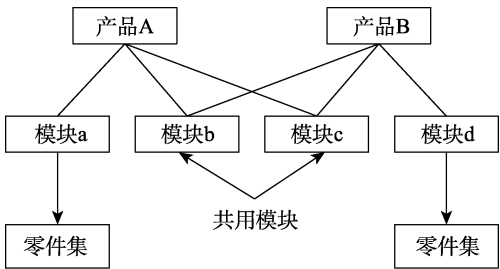


图 5 模块化产品的结构
Fig.5 Modular product structure

独立结构、标准接口及特定的功能,具有通用化、标准化、系列化的特点,满足互换性的要求^[34]。与传统的设计方法相比,模块化设计方法是一种可以实现产品定制的有效方法。传统方法通常是依据经验自下而上地完成产品从局部到整体的设计;而模块化设计是自上而下地完成产品系统框架设计,见图 5,通过将整体结构分解为一系列的模块,形成模块化的产品体系,并通过不同的产品模块的组合,从而获取满足用户需求的定制产品。

模块化架构为产品提供了局部修改能力,设计者可以在产品的整体架构和其余模块保持不变的情况下,根据用户需要修改个别模块,从而将零件的标准化和产品的多样性结合起来,使企业有能力快速创建大量的设计变形与衍生,从而节省设计成本,缩短产品设计周期。目前,关于模块化设计的研究主要集中在模块划分的准则、方法及划分后产品概念的评价等。李伟湛等人^[35]以一款平地机为例,依据不同的功能层进行功能分解,功能模块化在定义后通过图形化的方式重组,得出了多种产品外观造型创意。侯文彬等人^[36]基于车身结构提出了一套能够筛选出共享模块和非共享模块的模块划分方法。AEBayrak 等人^[37]以最大化产品模块效益和生命周期为目标,基于共享模块提出了一个概念模块化设计的多目标优化框架。

可将模块化产品的设计流程分为需求分析、功能设计、模块设计、结构设计等几个阶段。其中,需求分析决定了产品应具有的功能。根据 KANO 模型的

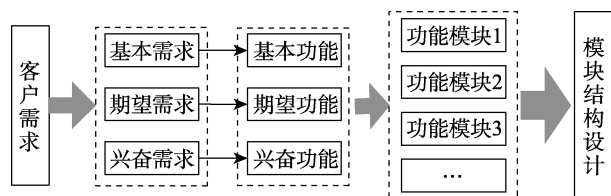


图 6 基于 KANO 需求模型的模块化设计流程

Fig.6 Modular design process based on KANO requirements model

需求分类方法，用户需求类型可以划分为基本型、期望型和兴奋型三类。其中，针对用户的个性化定制可归为兴奋型需求，对客户需求满意度呈梯度关系；但随着相关技术的不断提高和推广，个性化需求带来的客户满意度会不断下降并转变为期望型需求或基本型需求^[38]。根据对产品的需求分析，可将相应的产品功能划分为多个模块，从而实现产品的各项功能，与之相应的模块化设计流程，见图 6。通过模块化设计满足个性化需求的实现已得到了广泛的应用。刘英^[39]运用模块化的思想，对鞋子的多样化、个性化创新设计进行了研究和探讨。董欢欢等人^[40]基于用户的差异性需求，通过形状文法对模块单元进行了推演，获得了与用户需求相匹配的产品形态。曹木丽等人^[41]运用 KANO 需求模型获取了用户需求，并分析出其中的个性化需求，提出了针对智能养生壶的交互设计策略。文婷等人^[42]按一定规则对划分后的衣柜模块进行了配置设计，提出了一套能够满足用户个性化的线上衣柜定制设计流程。

在设计与人体接触的个性化产品时，除了满足基本需求的功能模块外，还需要考虑的是人体与产品相互适配的需求，即产品的适配性，对应的模块可称为个性化或适配性模块。对于这类产品来说其重要性不言而喻，如果产品与人体之间存在适配性不当，会导致受力不均匀、穿戴不舒适，甚至会妨碍行动，或造成伤害。因此，在设计这类产品时，必须将满足适配性需求的理念融进模块化设计中，根据产品个性化需求与功能属性间的转换关系，设计与人体适配性需求相对应的专门模块。

由于与人体相适配的表面形状往往变化不规则，所以对于贴合人体形态的个性化产品也提出了很高的人机工程要求。因此在设计与人体直接接触的产品形态时，为给用户提供一个舒适、安全的体验，尤其需要关注“用户—产品”的相互适配问题，而如何快速地重建出人体的三维模型是首要步骤。通过人体测量技术获取用户的精确表面数据，为个性化设计提供了数据基础。接下来根据获取的人体表面数据进行三维建模，是提取与识别个性化需求，从而设计与之匹配的适配性模块的必要环节。

2.2 人体表面建模技术

人体表面建模技术根据存储于计算机中的模型

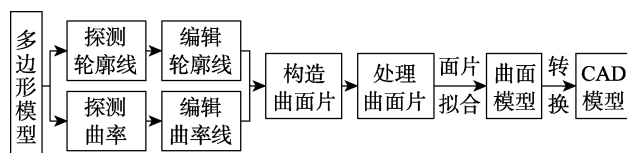


图 7 逆向非特征建模流程

Fig.7 Reverse non-characteristic modeling process

类型不同，可分为线框建模、曲面建模、实体建模、混合建模和基于物理的建模等。此外，根据人体测量数据的来源不同，也可将人体表面建模方法分为基于三维人体扫描数据的人体建模、基于数据模型重用的人体建模、基于图像的人体建模和基于视频的人体建模。

2.2.1 基于三维人体扫描数据的人体建模

当前基于三维扫描数据的逆向建模方法主要分为特征建模和非特征建模^[43]。其中特征建模方法针对具有规则特征的数据模型，通过识别、定义数据模型中的规则几何单元，如平面、圆柱和球体等，创建出对应的参数化 CAD 模型；而非特征建模则针对具有自由曲线曲面的非规则特征，通过不同区域的划分继而创建出具有较高精度的表面模型。由于人体表面具有多样性、复杂性等特点，所以基于三维人体扫描数据的建模通常采用非特征建模方法。

非特征建模的一般流程，见图 7，首先对扫描获取的原产品点云数据进行预处理，得到多边形网格模型；再对多边形模型进行探测轮廓线或探测曲率线操作，编辑生成轮廓线或曲率线，将其作为分割线将数据划分为不同区域，继而在各划分区域中创建网格曲面片；最后拟合并拼接各曲面片，获得精确的 NURBS 曲面^[44]。李明宇等人^[45]提出了一种基于边界划分的逆向非特征建模方法，该方法通过自定义平面或曲线对多边形数据模型进行裁剪，创建出若干边界，将原数据模型划分为相互独立的近似四边形的数据区域，然后对各区域分别创建较规则的网格曲面片，最终进行曲面拟合，获得较高精度的 NURBS 曲面模型。另外人体扫描数据可能由于身体遮挡会出现缝隙或缺失区域，所以研究者在此基础上提出了人体参数化建模。该技术根据人体造型的特征点与线的分布，定义了一组可以控制的特征点和特征尺寸，从不完整的数据重建完整的 3D 人体模型，并可通过参数化进行修改^[46]。

2.2.2 基于数据模型重用的人体建模

在诸如视频游戏、体育训练等需要捕获人体运动数据的领域，人体数据往往繁多且捕获成本高，为此出现了运动捕获数据重用的研究。当用户创建运动时，在已捕获的运动数据库中搜索最佳的备选片段，通过拼接、混合、过渡等方式形成目标运动，这种方式称为运动捕获数据重用^[47]。Marcon 等人^[48]开发了一种通过采集和处理人体数据序列识别人体手势

的系统,该系统依赖于从 3D 数据库中提取人体运动数据的鲁棒特征。Wang 等人^[49]研究和开发了一种用于生成个性化人体模型的虚拟建模系统,用户通过输入关键特征参数来创建人体关键部位的轮廓,轮廓用于创建人体表面模型。

2.2.3 基于图像的人体建模

基于图像的人体建模通过有多张图像上提取特征点,得到尺寸信息,最后由尺寸信息经自由变形生成标准的三维人体^[50]。王力^[51]提出了一种基于人体轮廓和 Maya 建模软件的人体建模方法,该方法生成的人体三维模型是基于以正面横截线为长轴,以侧面横截线为短轴的椭圆,实验表明该方法提高了建模效率。崔勇^[52]提出了一种基于人体正交图片的虚拟人体三维重构方法,对人体模型的不同特征部位进行了划分,使用了 FFD 自由变形法并实现了参数化变形。

2.2.4 基于视频的人体建模

人体三维扫描设备由于成本较高,难以大众普及,而基于视频的人体建模为此提供了一种可行的方法。该方法通过摄像机获取人的移动视频,通过捕获的人体形状与标准人体模型的对比分析,生成完整和逼真的人体模型。Alldieck 等人^[53]从人体运动视频中的多个视图捕获静态形状,首先将标准 T 型姿势中裸人的 SMPL 模型拟合到每帧的身体形状和 3D 姿势上,使每帧的每个轮廓点与人体模型的 3D 点相关联,然后通过变换得到个性化的人体模型;并将人的紧身或宽松的衣服表示为与 SMPL 参数人体模型的偏差,接着优化身体形状参数和自由形式的顶点位移,得出逼真的人体模型。

3 个性化产品的大规模定制设计

3.1 大规模定制

随着经济全球化和互联网、大数据等技术的发展,用户对产品个性化的需求越来越高,导致市场的供求关系也从以生产为主导的卖方市场向以用户需求为导向的买方市场转变。这就要求企业的生产模式也要随之发生变化,在考虑生产成本和质量的前提下,必须最大限度地满足用户的多样性、个性化需求^[54]。在这种背景下,大规模定制的生产模式应运而生。

与传统的大规模生产所提供的具有统一架构的产品相比,个性化的产品由于需要考虑到单一用户的需求而提供特定的模块,势必会带来成本的提高,因此难以大面积推广。然而大规模定制的概念,就是以大批量生产的成本和速度,提供定制的个性化产品和服务的生产方式。1987 年戴维斯首次将这种生产方式定义为大规模定制,1993 年派恩等定义并系统阐述了这一概念,并从管理学的角度对这一生产方式进行了分析^[55-56]。大批量定制目前被认为是 21 世纪最

主要的生产模式,目前在汽车、家电、机床、航空、软件、计算机等行业中也得到了不同程度的应用。大规模生产、定制生产、大批量定制生产的比较见表 1,从几个方面分析三者之间的区别^[57-58]。

大批量定制产品对模块化设计也提出了新的要求。钱晓波等人^[59]提出大规模定制产品开发阶段最重要的是聚焦对产品模块的分解和控制,提供了一系列在基础设计的方案基础上,适当并成功的产品组合过程。Christopher 等人^[60]提出未来的个性化的产品应具有开放的架构并包含三类模块:通用模块(Common Modules)作为产品的共享平台;定制化模块(Customized Modules)允许顾客根据需求进行选择、混合及匹配;个性化模块(Personalized Modules)允许顾客进行创造和设计。其中模块的差异性是成功设计个性化产品的关键。个性化产品应包含的三类模块见图 8。

如何根据大批量用户的个性化要求,快速设计出满足不同个体要求的产品,即实现大批量定制设计,是实施大批量定制生产的前提要素。产品的配置设计就是在模块化产品的基础上,根据用户对个性化产品的不同需求,按照一定的规则对产品相关模块或组件进行匹配变型,从而快速获得满足用户需求的产品设计方案,是实现大批量定制的重要设计方法。

表 1 大规模生产、定制生产、大批量定制生产的比较
Tab.1 Comparison of mass production, customization production and mass customization production

生产方式	出发点	产品特性	目标
大规模生产	满足大众化需求	统一的架构、相同的产品	成本、质量、规模经济
个性化定制生产	满足特殊化需求	模块化的架构、特定的参数、单一的产品	多样性、质量、差异价值
大批量定制生产	满足大众化特殊需求	模块化的架构、可调的参数、相同模块的不同产品	多样性、质量、效率、范围经济

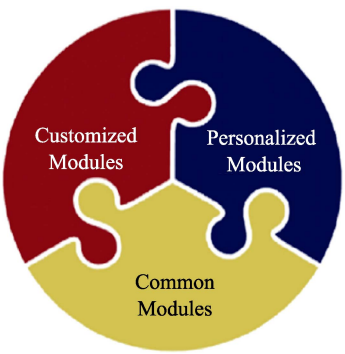


图 8 个性化产品应包含的三类模块
Fig.8 Personalized products containing three types of modules

3.2 个性化产品的配置设计

面向人体的个性化设计方法及其关键技术是针对特定用户的个性化需求所采用的,但在面向不同用户需求的大批量定制时,目前还做不到所有产品均从零开始进行个性化设计。因此,介于个性与共性之间,可适当调整的配置设计为大批量定制的实现提供了可行的设计策略。通过研究不同用户需求的相似之处,就是产品的共性,实现相似产品的快速设计;研究相似产品的不同之处,就是产品的个性,满足用户的个性化需求。对于面向人体的设计来说,每个人的组成结构都是一样的,人与人之间存在一定的共性;但每个人的具体外形都不一样,因而也存在着差异性,也即是个性。对于一种定制的产品来说,相似性表现在不同用户的需求虽然不同,但是该产品在设计过程、功能结构等方面仍存在相似的地方;而差异性主要表现在产品的个性化模块部分,该部分可以根据特定的用户需求进行定制设计,满足不同个体的需要^[61-62]。配置设计的思路,就是重用产品在功能、模块结构、设计方法等方面的相似性,在设计过程中通过模块的差异性满足不同用户的个性化需求,从而简化设计过程,实现个性化产品的快速定制。

产品配置设计的思想诞生于 20 世纪 70 年代,直到 90 年代, Mittal 等人^[63]提出了产品配置设计的概念,并指出产品配置设计中的重要特征包括:以已有的产品组件为基础,配置过程中不产生新的组件;组件间的连接关系已知且保持不变,配置结果为更新后的组件集合。针对大规模定制的需求,产品配置设计的基本原理就是以产品已有的模块化资源平台为基础,通过输入不同用户的个性化需求,根据一定的配置规则,针对个性化需求调整相应的模块,从而输出快速定制的产品,见图 9。随着工业与信息化技术的发展,对产品配置设计方法的研究也随之增多,并得到了广泛应用。如谭建荣等人^[64]针对大批量定制的特点,提出了基于产品功能结构的产品配置与求解方法,实现了对用户需求的快速响应;冯毅雄等人^[65]将配置过程分为不同的设计域层次,提出了适用于不同层次及类型的递归化设计方法,并应用于电梯轿架的设计中。李新龙等人^[66]以换热器产品为例,研究了

针对产品族的配置设计过程及数据模型的表示方法。

目前面向大批量定制的配置设计主要应用在机械、家具等行业,但其所遵循的相似性、重用性原理和设计手段具有普适性。面向人体的个性化产品配置设计就是以三维人体扫描的数据和模块化设计方案为基础,在已有的个性化设计基础上,根据不同的个性化需求定义产品的配置变型信息,采用相应的适配性调整来响应个性需求。考虑到人体结构的相似性,所设计的产品的功能模块是相似的,其设计过程可以重用。根据配置设计的原则,可根据特定用户设计相应的适配性模块及个性化结构,而其他的功能模块则给予保留或相适应地进行调整,以适应不同用户的异质性。

个性化产品配置设计可包含以下步骤:首先,根据个性化产品的需求,按照模块化设计的思想,划分不同的功能模块并进行设计,得到面向人体定制的个性化产品;其次,通过三维人体扫描的建模获取其他给定用户的个性化需求,即需要满足不同人体外形的适配性条件;最后,依据所获取的个性化需求,调整所涉及的功能模块。面向人体的个性化产品主要需要考虑的是根据不同人体的接触面形态特征,对相应的适配性模块进行变形,使产品和不同的人体相匹配。

3.3 面向人体的变形设计技术

产品的配置设计可以通过参数化设计技术,即产品各零部件之间及其内部的尺寸参数传递关系来实现;或采用变形设计技术,即产品的整体拓扑结构与内部各组件间的配合面调整来实现。同一产品的不同模块也可以采用不同的设计方法进行配置。通常基于参数化设计的配置主要适用于规则的形状和尺寸,而对于不规则的形状特征则需要考虑变形设计^[67]。

机械产品或结构通常采用参数化设计技术来配置功能模块,以满足不同规格型号的要求,也称为可伸缩设计(Scalable Design)。参数化设计是通过调整或设置参数的方式对产品形状尺寸进行约束,因此,在配置过程中只需要修改模型中的参数或组件间的连接关系,就可以实现对产品模型的再设计。同时,由于基于参数化的 CAD 系统的普遍应用,使得产品模型的修改变得十分便捷。如吴庆鸣等人^[68]以门式启

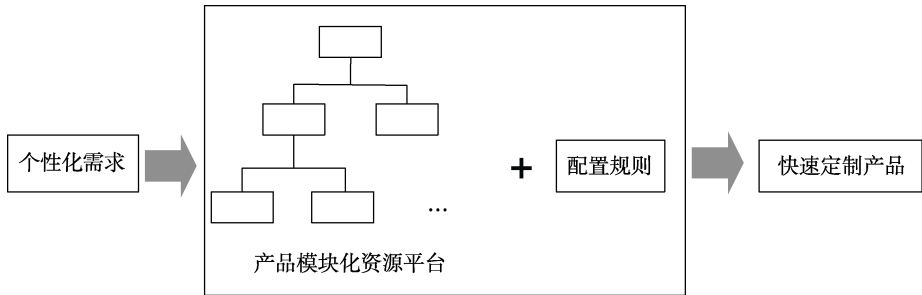


图 9 产品配置设计的基本原理
Fig.9 Basic principles of product configuration design

闭机的配置设计为例,通过研究其中的参数传递规则,实现了用户输入设计参数来驱动产品模型的变型与分析。刘夫云^[69]将复杂网络理论应用于大批量定制的产品配置领域,提出尺寸参数在一个零件内部及不同零件之间的传递方法,以联轴器产品为例实现了配置产品的尺寸修改。汪沙娜^[70]基于对产品功能的模块化、尺寸形态的参数化,提出了一种可以让使用者参与到产品设计环节的平台,通过参数化驱动实现家具产品的自主设计效果;宋健^[71]分析了产品个性化需求下参数化设计的应用及其优势,为以参数化技术为感性的设计找到了理性的支撑,为满足市场产品多样化、多元化需求提供了路径。

与人体适配的个性化产品,特别是其适配性模块,由于往往包含不规则的自由曲面形状,所以其特征无法用参数化信息来完全表达,从而这种采用参数化方法无法实现有效的再设计,可考虑采用变形设计方法。变形设计指的是在保持产品总体框架和拓扑结构不变的前提下,为满足个性化需求或某种特定的要求,对产品的局部结构形式、要素或尺寸进行变更或调整,从而得到新产品的设计方法^[72]。曲面类产品的变形设计就是按照力学或感性的方式来设计和修改工程曲线、曲面,从而实现对自由表面形状的自然、直接的变形和控制。在变形设计的过程中,始终需要确保原曲面之间的连续性及拓扑关系不变,并满足所设定的约束条件^[73]。因此,从力学的观点看,变形过程就是物体在外力和约束的作用下所发生的形状变化,关键在于基于不同的力学原理实现变形的过程和应用。

目前,许多商业化的 CAD 造型软件已具有一定的变形设计功能,如 CATIA、UG、ThinkDesign 等^[74]。基于目标曲线的产品变形修改见图 10,首先添加一组变形过程中的约束条件和变形目标,构建出驱动变形的目标函数及约束优化方程;变形时,通过数学或物理的手段优化模型中的曲线和曲面形状,获得新的物体形状。因此可以说产品的变形设计是基于目标几何约束,实时对精确曲面进行修改或再设计的过程。

在对面向人体的个性化产品进行配置设计时,以通过模块化设计得到的个性化产品适配性模块为初始对象,以通过三维人体扫描和模型重建提取的其他用户的形状特征为目标对象,采用基于约束的变形技

术,对初始对象进行变形,从而得到与不同用户相匹配的变形后模块,其他模块再根据需要进行相应的调整。通过该流程,将逆向工程技术在三维人体数据采集和重建方面的优势,与变形设计快速实现不规则形状精确修改的优势相结合,从而可实现面向人体的个性化产品的快速定制设计^[75]。从本质上扩大了已有个性化产品的特征尺寸、规格范围,使产品形状在保持总体框架和拓扑结构不变的情况下,通过变形调整以适应不同的个性化需求,给设计过程带来更大的灵活性,以满足大批量定制的设计需求。

徐永昌等人^[76]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;并通过修改鞋楦 3D 草图,在特征尺寸约束驱动下对鞋楦模型进行变形,实现了个性化鞋楦的创建和再设计。苏恒^[77]对基于变形技术的医疗护具个性化设计进行了研究,首先通过用户的人体特征参数查找并获取了相应的护具特征模板,然后利用基于用户特征参数为约束的曲面变形技术,对模板中的特征参数进行变形,从而得到了个性化的护具模型。石琦霞^[78]研究了不同人体下肢之间的相似性和差异性,分析了三维扫描数据得到建模所需的特征点,通过配置设计和接触面的变形实现了面向大批量定制的人体假肢接受腔的数字化设计。黄香等人^[79]针对不同牙齿形态,提出了一类基于骨架线驱动的曲面变形设计方法并进行了应用。

4 结语

随着工业 4.0 技术的发展,客户需求的个性化、多样化趋势愈发明显,产品设计制造日益呈现出小批量和个性化等特征,大规模个性化定制时代已经来临^[80]。通过大批量定制为不同顾客的个性化需求提供定制产品和服务,以有效解决顾客需求多样化与大批量生产单一性高效率之间的矛盾。研究了面向人体的个性化设计在大批量定制模式下的关键技术,对其中的三维人体测量与表面建模、模块化设计和配置设计、参数化设计和变形设计等相关技术的作用原理及相互关系进行了论述和分析。

对于面向人体的个性化设计而言,与人体相匹配的适配性是需要特别考虑的问题,而针对人体的三维测量和建模技术,可以有效获取人体表面的形状特征,从而设计出与之匹配的适配性模块。考虑到人体具有的相似性和差异性,在针对不同个体进行设计时,通过运用配置设计的原理,对产品特定的模块按一定的规则进行快速的变型设计,从而在已有的个体化设计方案基础上针对不同客户需求快速采取相应调整,是实现大批量定制的策略。在考虑不同的人体接触面时,通过调整参数难以满足不同人体的适配性要求,而主要考虑基于功能和几何约束的曲面变形设计技术,才可实现对接触面的精确修改。

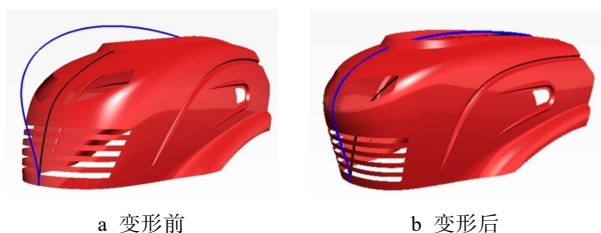


图 10 基于目标曲线的产品变形修改
Fig.10 Product deformation modification
based on target curve

需要说明的是,考虑人体形态的适配性只有个性化设计的一个方面,主要涉及生理层面,由具体可见的物理构造所形成的对象与人体间的相互匹配,满足尺寸和形状适配等方面要求。而在更为广泛的心理层面,考虑不同用户的审美和个人偏好等方面的差异,进行相应的个性化设计,就需要考虑满足个性化心理需求的功能适配性,以及将用户深度参与、智能交互等思想引入到定制过程中,这也是未来发展的方向^[81-82]。

参考文献:

- [1] ZHENG P, XU X, YU S, et al. Personalized Product Configuration Framework in an Adaptable Open Architecture Product Platform[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 422-435.
- [2] TIHONEN J, FELFERNIG A. An Introduction to Personalization and Mass Customization[J]. Journal of Intelligent Information Systems, 2017, 49(1): 1-7.
- [3] KANEKO K, KISHITA Y, UMEDA Y. Toward Developing a Design Method of Personalization: Proposal of a Personalization Procedure[J]. Procedia CIRP, 2018, 69: 740-745.
- [4] 陈国东, 王颖琇, 倪益华, 等. 基于语义认知的瓷瓶大规模个人产品定制设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 176-180.
CHEN Guo-dong, WANG Ying-xiu, NI Yi-hua, et al. Large-scale Personal Product Customization Design of Porcelain Bottles Based on Semantic Cognition[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 176-180.
- [5] 徐开元, 徐武彬. 面向大批量定制的产品配置设计技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(9): 108-111.
XU Kai-yuan, XU Wu-bin. Product Configuration Design Technology for Mass Customization[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technology, 2010(9): 108-111.
- [6] 赵雅彬, 朱伟明, 卫杨红. 服装定制人体测量技术的研究[J]. 上海纺织科技, 2017, 45(11): 9-10.
ZHAO Ya-bin, ZHU Wei-ming, WEI Yang-hong. Anthropometric Technology of Clothing Customization[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2017, 45(11): 9-10.
- [7] 陈伟伟, 陈雁. 非接触式三维人体测量技术的进展及应用[J]. 纺织科技进展, 2010(6): 88-90.
CHEN Wei-wei, CHEN Yan. The Development and Application of Non-contact Three-dimensional Body Measurement Technology[J]. Textile Science and Technology Progress, 2010(6): 88-90.
- [8] 何宇雯, 尚笑梅. 人体腰围高范围的预测研究[J]. 中原工学院学报, 2019, 30(4): 20-23.
HE Yu-wen, SHANG Xiao-mei. The Prediction of Human Waist Height Range[J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2019, 30(4): 20-23.
- [9] 王旭, 冯向伟, 任雨佳, 等. 青年女体前臂细部尺寸测量方法研究[J]. 中原工学院学报, 2018, 29(3): 41-44.
WANG Xu, FENG Xiang-wei, REN Yu-jia, et al. The Measurement Method of Forearm Detail of Young Female Body[J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2018, 29(3): 41-44.
- [10] 刘琴, 尚笑梅. 服装人体测量技术研究进展[J]. 现代丝绸科学与技术, 2019, 34(6): 32-34.
LIU Qin, SHANG Xiao-mei. Research Progress of Clothing Anthropometric Techniques[J]. Modern Silk Science and Technology, 2019, 34(6): 32-34.
- [11] 于宗琴, 王琴华. 人体二维照片图像学尺寸测量技术研究[J]. 工业技术与职业教育, 2018, 16(2): 14-15.
YU Zong-qin, WANG Qin-hua. The Size Measurement Technology of Human Body Two-dimensional Photo Imaging[J]. Industrial Technology and Vocational Education, 2018, 16(2): 14-15.
- [12] 季开宸. 基于青年男体二维非接触测量系统围度拟合的完善[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
JI Kai-chen. The Improvement of Surrounded Degree Fitting Based on Two Dimensional Non-contact Measurement System for Young Male Body[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014.
- [13] 黄承亮. 三维激光扫描技术在人体三维建模中的应用研究[J]. 测绘, 2013, 36(1): 13-15.
HUANG Cheng-liang. The Application of 3D Laser Scanning Technology in 3D Modeling of Human Body[J]. Surveying and Mapping, 2013, 36(1): 13-15.
- [14] DINDAROĞLU F, KUTLU P, DURAN G S, et al. Accuracy and Reliability of 3D Stereophotogrammetry: a Comparison to Direct Anthropometry and 2D Photogrammetry[J]. The Angle Orthodontist, 2016, 86(3): 487-494.
- [15] 郭云昕, 张微, 刘咏梅, 等. 三维人体测量技术的现状和比较[J]. 国际纺织导报, 2016, 44(8): 38-40.
GUO Yun-xin, ZHANG Wei, LIU Yong-mei, et al. Current Status and Comparison of Three-dimensional Body Measurement Technology[J]. International Textile Herald, 2016, 44(8): 38-40.
- [16] 成思源, 王小康, 杨雪荣. 三维人体扫描技术在个性化设计中的应用[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(5): 47-49.
CHENG Si-yuan, WANG Xiao-kang, YANG Xue-rong. Application of Three-dimensional Human Body Scanning Technology in Personalized Design[J]. Experimental Technology and Management, 2018, 35(5): 47-49.
- [17] VITALI A, RIZZI C. Acquisition of Customer's Tailor Measurements for 3D Clothing Design Using Virtual Reality Devices[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(3): 131-145.
- [18] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 9-18.
SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, CHEN Wen-jing. Structured Light Three-dimensional Imaging Technology[J]. China Laser, 2014, 41(2): 9-18.
- [19] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与

- 系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- LI Zhong-wei. Structured Light 3D Measurement Technology and System Based on Digital Grating Projection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [20] PEYER K E, MORRIS M, SELLERS W I. Subject-specific Body Segment Parameter Estimation Using 3D Photogrammetry with Multiple Cameras[J]. PeerJ, 2015, 3: 831.
- [21] 蒋健羽, 于泉, 沈刚. 三维摄影系统测量颌面软组织的原理、应用和精确性评价[J]. 口腔材料器械杂志, 2018, 27(2): 101-104.
- JIANG Jian-yu, YU Quan, SHEN Gang. The Principle, Application and Accuracy Evaluation of Three-dimensional Photography System for Measuring Maxillofacial Soft Tissue[J]. Journal of Dental Materials and Devices, 2018, 27(2): 101-104.
- [22] MOGHADDAM M B, BROWN T M, CLAUSEN A, et al. Outcome Analysis after Helmet Therapy Using 3D Photogrammetry in Patients with Deformational Plagiocephaly: the Role of Root Mean Square[J]. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2014, 67(2): 159-165.
- [23] 易军, 陈雨茜. 三维人体扫描技术在服装产品设计中的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(16): 164-169.
- YI Jun, CHEN Yu-qian. The Application of Three-dimensional Body Scanning Technology in the Design of Clothing Products[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(16): 164-169.
- [24] 姜自伟, 黄枫, 成思源, 等. 数字化夹板设计及有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(7): 1052-1056.
- JIANG Zi-wei, HUANG Feng, CHENG Si-yuan, et al. Digital Splint Design and Finite Element Analysis[J]. Chinese Tissue Engineering Research, 2017, 21(7): 1052-1056.
- [25] 汪一翔. 利用 3D 打印技术设计制作个性化高跟鞋的方法研究[J]. 设计, 2017(1): 94-96.
- WANG Yi-xiang. The Method of Designing and Making Personalized High-heeled Shoes with 3D Printing Technology[J]. Design, 2017(1): 94-96.
- [26] 廖政文, 莫诒向, 张国栋, 等. 3D 打印个性化康复矫形器的设计制作[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(4): 470-477.
- LIAO Zheng-wen, MO Yi-xiang, ZHANG Guo-dong, et al. Design and Production of 3D Printed Personalized Rehabilitation Orthotics[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(4): 470-477.
- [27] 何人可, 杨文秀, 王海宁. 中国三维人头测量研究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 103-110.
- HE Ren-ke, YANG Wen-xiu, WANG Hai-ning. Three-dimensional Head Measurement in China[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 103-110.
- [28] YANG X, CHEN L, JUNG K, et al. Potential Application of Temporal 3D (4D) Scanning to Ergonomic Design: State-of-the-art and its Perspectives[J]. Journal of the Ergonomics Society of Korea, 2020, 39(1).
- [29] ZAKARIA N, GUPTA D. Anthropometry, Apparel Sizing and Design (Second Edition)[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020.
- [30] NOVAK B, MOŽINA J, JEZERŠEK M. 3D Laser Measurements of Bare and Shod Feet During Walking[J]. Gait & posture, 2014, 40(1): 87-93.
- [31] 杜阿安, 杨新, 薛海红, 等. 心脏三维虚拟内窥镜系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2012, 29(5): 974-982.
- DU A-an, YANG Xin, XUE Hai-hong, et al. Heart Three-dimensional Virtual Endoscopy System[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2012, 29(5): 974-982.
- [32] 王安民, 宋长辉, 杨永强, 等. 膝关节股骨假体的个性化设计与匹配程度分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1572-1578.
- WANG An-min, SONG Chang-hui, YANG Yong-qiang, et al. Individualized Design and Matching Degree Analysis of Knee Femoral Prosthesis[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2018, 30(8): 1572-1578.
- [33] 王岳. 模块化理论在产品中的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(12): 92-94.
- WANG Yue. The Application of Modularity Theory in Product Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(12): 92-94.
- [34] 李兵, 关惠元, 吴智慧. 面向 MC 的家具模块化设计研究[J]. 包装工程, 2011, 32(4): 66-69.
- LI Bing, GUAN Hui-yuan, WU Zhi-hui. MC-oriented Furniture Modular Design[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(4): 66-69.
- [35] 李伟湛, 杨先英. 基于模块化功能分解的大型复杂构造产品造型设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(16): 134-139.
- LI Wei-zhan, YANG Xian-ying. Modeling Design Method of Large-scale Complex Structure Products Based on Modular Function Decomposition[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(16): 134-139.
- [36] 侯文彬, 单春来, 于野, 等. 模块化平台的模块划分及共享模块筛选方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 188-196.
- HOU Wen-bin, SHAN Chun-lai, YU Ye, et al. Module Division of Modular Platform and Shared Module Selection Method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 188-196.
- [37] BAYRAK A E, COLLOPY A X, PAPALAMBROS P Y, et al. Multi-objective Optimization of Modular Design Concepts for a Collection of Interacting Systems[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(1): 83-94.
- [38] 王玉豪. 产品个性化需求转换与模块化设计评价研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG Yu-hao. Research and Application of Product Personalized Demand Conversion and Modular Design Evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [39] 刘英. 模块化设计方法在鞋子创新设计中的意义[J]. 包装工程, 2011, 32(14): 83-86.
- LIU Ying. The Significance of Modular Design Methods in Shoe Innovation Design[J]. Packaging Engineering,

- 2011, 32(14): 83-86.
- [40] 董欢欢, 王伟伟, 吕曼曼, 等. 面向个性化需求的模块化设计模型研究[J]. 包装工程, 2017, 38(6): 129-133.
DONG Huan-huan, WANG Wei-wei, LYU Man-man, et al. Modular Design Model for Individual Needs[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(6): 129-133.
- [41] 曹木丽, 张昆, 张宁, 等. 基于个性化需求的智能养生壶交互设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(18): 225-229.
CAO Mu-li, ZHANG Kun, ZHANG Ning, et al. Interactive Design of Intelligent Health Pot Based on Individual Needs[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(18): 225-229.
- [42] 文婷, 杨依依. 衣柜产品定制设计方法研究[J]. 家具与室内装饰, 2019(4): 17-19.
WEN Ting, YANG Yi-yi. The Custom Design Method of Wardrobe Products[J]. Furniture and Interior Decoration, 2019(4): 17-19.
- [43] 林希玲, 饶锡新, 曹俊华. 基于 Geomagic 的曲面重构方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(7): 28-30.
LIN Xi-ling, RAO Xi-xin, CAO Jun-hua. The Surface Reconstruction Method Based on Geomagic[J]. Modular Machine Tool and Automated Processing Technology, 2013(7): 28-30.
- [44] 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 Domain Division[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technology, 2016(6): 71-74.
- [45] 李明宇, 成思源, 丛海宸, 等. 基于边界划分的人体 CAD 建模及应用[J]. 现代制造工程, 2018(9): 66-69.
LI Ming-yu, CHENG Si-yuan, CONG Hai-chen, et al. Human Body CAD Modeling and Application Based on Boundary Division[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(9): 66-69.
- [46] CHENG Z Q, CHEN Y, MARTIN R R, et al. Parametric Modeling of 3D Human Body Shape: a Survey[J]. Computers & Graphics, 2018, 71: 88-100.
- [47] 蓝荣祎. 人体运动捕获数据的建模与重用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
LAN Rong-yi. Modeling and Reuse of Human Motion Capture Data[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [48] MARCON M, PARACCHINI M B M, TUBARO S. A Framework for Interpreting, Modeling and Recognizing Human Body Gestures through 3D Eigenpostures[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019, 10(5): 1205-1226.
- [49] WANG M, SHEN Y. The 3D Human Body Modeling for Virtual Fitting Based on the Key Characteristic Parameters[M]. Heidelberg: Transactions on Edutainment XIV, 2018.
- [50] 黄蓉. 基于图像的三维人体建模及模型的动画展示方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
HUANG Rong. Image-based Three-dimensional Human Body Modeling and Model Animation Display Method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [51] 王力. 基于图像的非接触式人体测量与建模技术研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
WANG Li. Image-based Non-contact Human Body Measurement and Modeling Technology[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [52] 崔勇. 基于正交图片的三维虚拟人体模型重构[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
CUI Yong. Three-dimensional Virtual Human Model Reconstruction Based on Orthogonal Pictures[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [53] ALLDIECK T, MAGNOR M, XU W, et al. Video Based Reconstruction of 3D People Models[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.
- [54] HU S J. Evolving Paradigms of Manufacturing: from Mass Production to Mass Customization and Personalization[J]. Procedia Cirp, 2013, 7: 3-8.
- [55] 谭建荣, 冯毅雄. 大批量定制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
TAN Jian-rong, FENG Yi-xiong. Mass Customization Technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [56] 派恩 B, 约瑟夫. 大规模定制: 企业竞争的新前沿[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.
PINE B, JOSEPH. Mass Customization: the New Frontier of Enterprise Competition[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2000.
- [57] 李浩, 陶飞, 文笑雨, 等. 面向大规模个性化的产品服务系统模块化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2204-2214.
LI Hao, TAO Fei, WEN Xiao-yu, et al. Modular Design of Product Service System for Large-scale Individualization[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2204-2214.
- [58] KOREN Y, SHPITALNI M, GU P, et al. Product Design for Mass-individualization[J]. Procedia Cirp, 2015, 36: 64-71.
- [59] 钱晓波, 许柏鸣. 从大规模制造向大规模定制转型的设计方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(20): 34-38.
QIAN Xiao-bo, XU Bai-ming. The Design Method of the Transformation from Mass Manufacturing to Mass Customization[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(20): 34-38.
- [60] BERRY C, WANG H, HU S J. Product Architecting for Personalization[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(3): 404-411.
- [61] 靳文奎, 何人可. 基于三维人体测量的穿戴式工业产品造型适配性设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(4): 123-126.
JIN Wen-kui, HE Ren-ke. The Design of Suitability of Wearable Industrial Products Based on Three-dimensional Body Measurement[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(4): 123-126.

- [62] 靳文奎, 何人可. 三维人体数据驱动产品设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 117-120.
JIN Wen-kui, HE Ren-ke. Product Design Driven by Three-dimensional Human Body Data[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 117-120.
- [63] MITTAL S, FRAYMAN F. Towards a Generic Model of Configuraton Tasks[J]. IJCAI, 1989, 89: 1395-1401.
- [64] 谭建荣, 李涛, 戴若夷. 支持大批量定制的产品配置设计系统的研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003(8): 931-937.
TAN Jian-rong, LI Tao, DAI Ruo-yi. Product Configuration Design System Supporting Mass Customization[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2003(8): 931-937.
- [65] 冯毅雄, 程锦, 谭建荣, 等. 面向大批量定制的配置产品变型设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007(2): 315-318.
FENG Yi-xiong, CHENG Jin, TAN Jian-rong, et al. Configuration Product Variant Design for Mass Customization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2007(2): 315-318.
- [66] 李新龙, 盛步云, 萧筝, 等. 基于产品族的产品配置设计方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11): 129-132.
LI Xin-long, SHENG Bu-yun, XIAO Zheng, et al. Product Configuration Design Method Based on Product Family[J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2015(11): 129-132.
- [67] 宋飞. 客户需求驱动的产品变型设计方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
SONG Fei. Customer Demand-driven Product Variant Design Method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [68] 吴庆鸣, 宗驰, 张强, 等. 复杂产品变型设计及其参数传递方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2955-2960.
WU Qing-ming, ZONG Chi, ZHANG Qiang, et al. Complex Product Variant Design and Its Parameter Transmission Method[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(24): 2955-2960.
- [69] 刘夫云, 祁国宁. 配置产品尺寸参数传递方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2007(4): 144-151.
LIU Fu-yun, QI Guo-ning. Configuration Product Size Parameter Transfer Method and Its Application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(4): 144-151.
- [70] 汪沙娜. 基于参数化驱动的产品造型设计应用研究[J]. 包装工程, 2017, 38(6): 100-104.
WANG Sha-na. The Application of Product Modeling Design Based on Parametric Drive[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(6): 100-104.
- [71] 宋健. 个性化需求下的产品参数化设计方法理论研究[J]. 家具与室内装饰, 2018(5): 18-19.
SONG Jian. Theoretical Research on Product Parametric Design Methods under Individual Demand[J]. Furniture and Interior Decoration, 2018(5): 18-19.
- [72] TERZOPOULOS D, QIN H. Dynamic NURBS with Geometric Constraints for Interactive Sculpting[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1994, 13(2): 103-136.
- [73] 程丰备, 刘振宇, 谭建荣, 等. 一种骨架线驱动的产品曲面变形设计方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 120-127.
CHENG Feng-bei, LIU Zhen-yu, TAN Jian-rong, et al. A Design Method for Product Surface Deformation Driven by Skeleton Line[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 120-127.
- [74] 寇满, 杨雪荣, 梁汉卫, 等. 基于曲面变形技术的数据融合方法研究[J]. 机械设计与制造, 2012(6): 44-46.
KOU Man, YANG Xue-rong, LIANG Han-wei, et al. Data Fusion Method Based on Surface Deformation Technology[J]. Machine Design and Manufacturing, 2012(6): 44-46.
- [75] 王小康. 面向快速定制的个性化医疗器械的配置设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
WANG Xiao-kang. The Configuration Design of Personalized Medical Devices for Rapid Customization[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [76] 徐永昌, 成思源, 杨雪荣. 基于3D草图的个性化鞋楦设计[J]. 包装工程, 2019, 40(4): 252-257.
XU Yong-chang, CHENG Si-yuan, YANG Xue-rong. Personalized Shoe Last Design Based on 3D Sketches[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(4): 252-257.
- [77] 苏恒. 面向大批量定制的个性化医疗护具设计方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
SU Heng. Design Method of Personalized Medical Protective Gear for Mass Customization[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [78] 石琦霞. 面向大批量定制的人体假肢接受腔的数字化设计方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
SHI Qi-xia. Digital Design Method of Human Prosthesis Cavity for Mass Customization[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [79] 黄香, 程筱胜, 戴宁, 等. 基于骨架驱动的牙齿形态设计[J]. 东南大学学报(医学版), 2012, 31(1): 18-23.
HUANG Xiang, CHENG Xiao-sheng, DAI Ning, etc. Tooth Morphology Design Based on Skeleton Drive[J]. Journal of Southeast University (Medical Edition), 2012, 31(1): 18-23.
- [80] WANG Y, MA H S, YANG J H, et al. Industry 4.0: a Way from Mass Customization to Mass Personalization Production[J]. Advances in Manufacturing, 2017, 5(4): 311-320.
- [81] 李强, 汝渴, 刘计良, 等. 面向大规模个性化的交互式云制造模式[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 788-796.
LI Qiang, RU Ke, LIU Ji-liang, et al. Interactive Cloud Manufacturing Model for Large-scale Personalization[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 788-796.
- [82] TAN C, CHUNG H, BARTON K, et al. Incorporating Customer Personalization Preferences in Open Product Architecture Design[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 72-83.