

生物三维打印机硬件控制系统研究

徐泽玮,李宗安,朱莉娅,戴 鑫,杨继全

(南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种生物三维打印机硬件控制方法,并基于 ATmega2560 芯片实现了生物三维打印机的控制.研究了打印原理及成型工艺,采用 Altium Designer 软件绘制了控制系统的硬件电路,包括控制电路的主控单元、运动控制单元、喷头控制单元、加热控制单元、限位开关控制单元、USB 数据传输单元等,绘制 PCB 板并完成硬件电路的焊接及调试工作,提高了生物三维打印精度.

[关键词] 三维生物打印,成型工艺,硬件控制系统

[中图分类号] TP23 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)04-0065-07

Research on Biological 3D Printing Hardware Control System

Xu Zewei, Li Zongan, Zhu Liya, Dai Xin, Yang Jiquan

(Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: A hardware control method of a bio-3D printer is proposed. The control of a bio-3D printer is realized based on ATmega2560 chip. The printer principle and forming process are studied. The hardware circuit of the control system is drawn by Altium Designer software, including the main control unit of the control circuit, the motion control unit and the nozzle control. Drawing PCB board with unit, heating control unit, limit switch control unit, USB data transmission unit and completing the welding and debugging of hardware circuit improves the accuracy of biological three-dimensional printing.

Key words: 3D biological print, molding process, the hardware control system

在生物医学领域中的三维打印技术被称为生物三维打印.生物三维打印是基于普通三维打印增材制造^[1]层层叠加的原理,利用一层层的生物构造块,制造出人体的各种组织和器官.生物三维打印机通过使用 CT 等扫描技术所得到的患者身体各个部位的精确图像数据,在短时间内打印出相应的组织.由于三维数据来源于病人的身体扫描,打印后的植入物完全可以模拟原有的器官,顺利地进行替换,匹配度较高,减轻了植入过程对患者的身体带来的影响.

生物三维打印机的打印原理基本相似.打印有活性的细胞或器官的打印机一般有两个打印头^[2],一个放置最多达 8 万个的人体细胞(被称为“生物墨”);另一个打印头则放置可打印的“生物纸”,“生物纸”的主要成分是水凝胶^[3],可用作细胞的生长支架.生物三维打印机一般会使用患者自身的细胞作为“生物墨”,这样可避免后期产生排异反应.这种生物三维打印机首先打印器官或细胞的 3D 模型的底层,接着将一层细胞置于另一层细胞上,打印完一层“生物墨”之后,再打印一张“生物纸”,不断重复这一过程,直至打印完成.随后,自然生成的细胞开始重新组织、融合,从而形成新的器官.生物三维打印过程如图 1 所示.

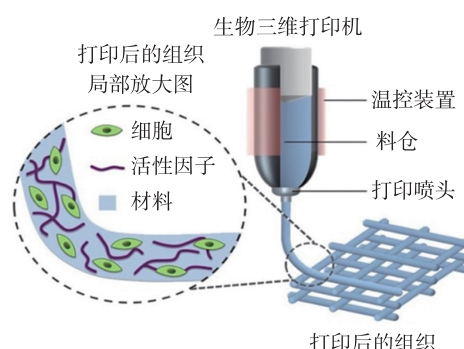


图 1 生物三维打印过程

Fig. 1 Biological three-dimensional process

收稿日期:2017-11-27.

基金项目:南京师范大学高层次人才引进基金(184080H202B135)、江苏省高等学校自然科学研究基金(18KJB460021)、国家自然科学基金(51705259)、江苏省重点研发计划(BE2016010).

通讯联系人:李宗安,博士,讲师,研究方向:智能制造与微纳 3D 打印技术. E-mail: zongan_li@njnu.edu.cn

据美国物理学家组织网 2016 年 2 月 24 日报道,美国科学家已研发出能打印出皮肤、软骨、骨头和其他身体器官的多用途生物三维打印机^[4],并已成功打印出了 10 cm² 的猪皮肤. 使用生物三维打印机打印的颞骨和耳软骨如图 2 所示. 使用复合细胞的水凝材料逐层打印的骨骼、耳鼻、膀胱等人体器官如图 3 所示. 唐都医院完成了世界首例胡桃夹综合征三维打印血管外支架植入术^[5],利用生物三维打印技术个性化制备了钛合金多孔静脉血管外支架. 赖雪聪等^[6]发明了制备心血管支架的生物三维打印装置及设备,在旋转轴上进行支架的打印成型,为支架的制备提供了新方法. 目前,打印出的成品表面粗糙、精度不够,而人体组织器官结构复杂,这就对生物三维打印的精度有了更高的要求. 生物三维打印机的精度不够很大程度上是由于其控制系统不够稳定和精确,因此对生物三维打印机的控制精度和控制方法仍需深入研究.

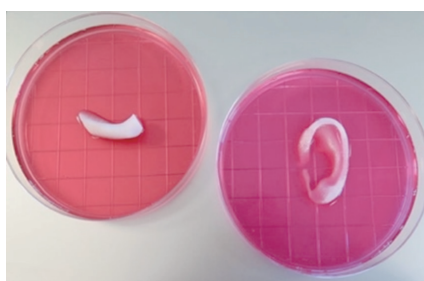


图 2 三维打印的颞骨和耳软骨

Fig. 2 Jawbone and ear cartilage printed by 3D printing



图 3 三维打印的骨骼、膀胱、耳鼻

Fig. 3 Bone, bladder, ear and nose printed by 3D printing

本文提出一种生物三维打印机硬件控制方法,并基于 ATmega2560 芯片实现了生物三维打印机的控制. 通过对控制电路的主控单元、运动控制单元、喷头控制单元、加热控制单元、限位开关控制单元、USB 数据传输单元等硬件电路的设计及调试,提高了生物三维打印精度.

1 生物三维打印机的工作流程

生物三维打印机开始工作时,硬件控制系统首先进行复位操作. 上位机软件完成对需打印的模型切片后,打印喷头和打印成形平台开始升温加热至所打印材料的预设温度,控制系统按照上位机切片后的 gcode 文件中的模型打印信息,控制 x 、 y 、 z 轴按切片后的模型打印信息进行运动. 同时,控制稳定气源不断喷射打印材料,从而实现生物三维打印功能. 本设计的三维生物打印机工作流程如图 4 所示.

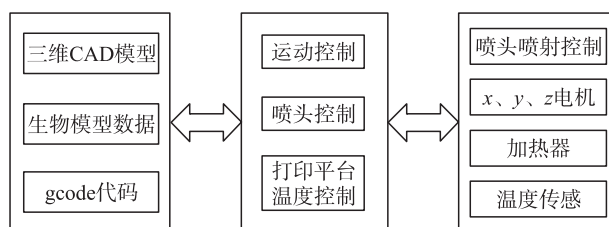


图 4 生物三维打印工作流程图

Fig. 4 Working flow chart of three-dimensional biological printing

生物三维打印机的机械系统主要包括^[7]: x 、 y 、 z 三轴运动支架、打印成形平台、喷头托架、导气管、打印的喷射喷头. 为实现打印功能,打印喷头应能相对于打印成形平台在三维空间内任意移动. y 轴方向上的移动采用步进电机带动打印成形平台来实现, x 轴、 z 轴方向上的移动则依靠步进电机带动打印喷头来实现. 不同的是, x 轴和 y 轴方向采用的是同步带传动方式,而 z 轴方向则采用丝杆传动方式. 本文所设计的生物三维打印机采用气压式挤出方式,当收到单片机发出的打印信号,继电器闭合,24 V 开关电源导通,电磁阀开始工作,电磁阀与气泵相连接,以此实现打印的效果.

2 生物三维打印机的硬件设计

硬件控制系统^[8]包括主控制单元、运动控制单元、喷头控制单元、加热控制单元、限位开关控制单元和 USB 数据传输单元.

2.1 主控单元

在整体的运动控制方面,需对 3 个电机的运动进行控制,驱动 3 个步进电机作为运动的执行控制,并在高速运动条件下实现高精度打印. 选择 ATmega2560 作为生物三维打印机的主控芯片,不仅因为它能很好地满足系统的性能要求,同时其价格也相对便宜.

在硬件的控制系统中^[9],上位机和主控器 ATmega2560 通过 USB 数据线进行数据的传输和交换. 当主控制器接收到来自上位机控制端发出的命令信号,将其翻译成机器可以识别并执行的 G 代码,与此同时,系统的控制器还会将打印模型过程中各个控制单元的状态参数传回给上位机软件,形成闭环回路. 打印时的工作状态如图 5 所示.

2.2 运动控制单元

生物三维打印机要实现生物的成形制造,要实现喷头相对于打印成形平台在三维空间里的任意方向、位置的移动,所以运动控制单元采用步进电机作为运动的执行器件^[10].

为实现喷头的高精确运动,采用 THB6128 微步步进电机,使步进电机按照单片机发出的运动指令精确运动,执行打印命令. 选择运动控制系统的驱动芯片在 1/128 的细分模式下,为了实现此细分功能,需要将驱动芯片里的 M1、M2、M3 管脚都接上高电平的信号. 驱动芯片上的 RESET、ENABLE 管脚应接一个上拉电阻,而 STEP、DIR 管脚则应与主控芯片的对应管脚相连接^[11]. 将输出管脚 OUT1A、OUT2A、OUT1B、OUT2B 分别连接微步步进电机的 4 种颜色的连接线,剩余的管脚按所设计的电路原理图连接,即可实现生物三维打印机的运动控制. 控制电路的原理图如图 6 所示.

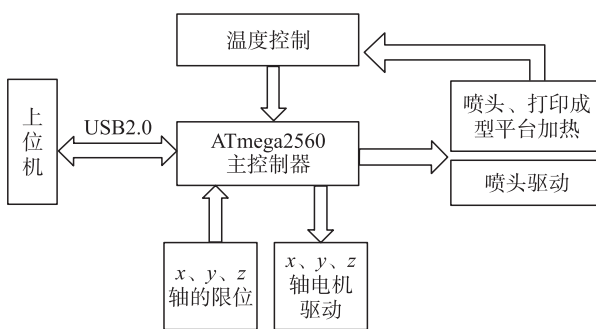


图 5 打印的工作状态图

Fig. 5 Working state diagram of printing

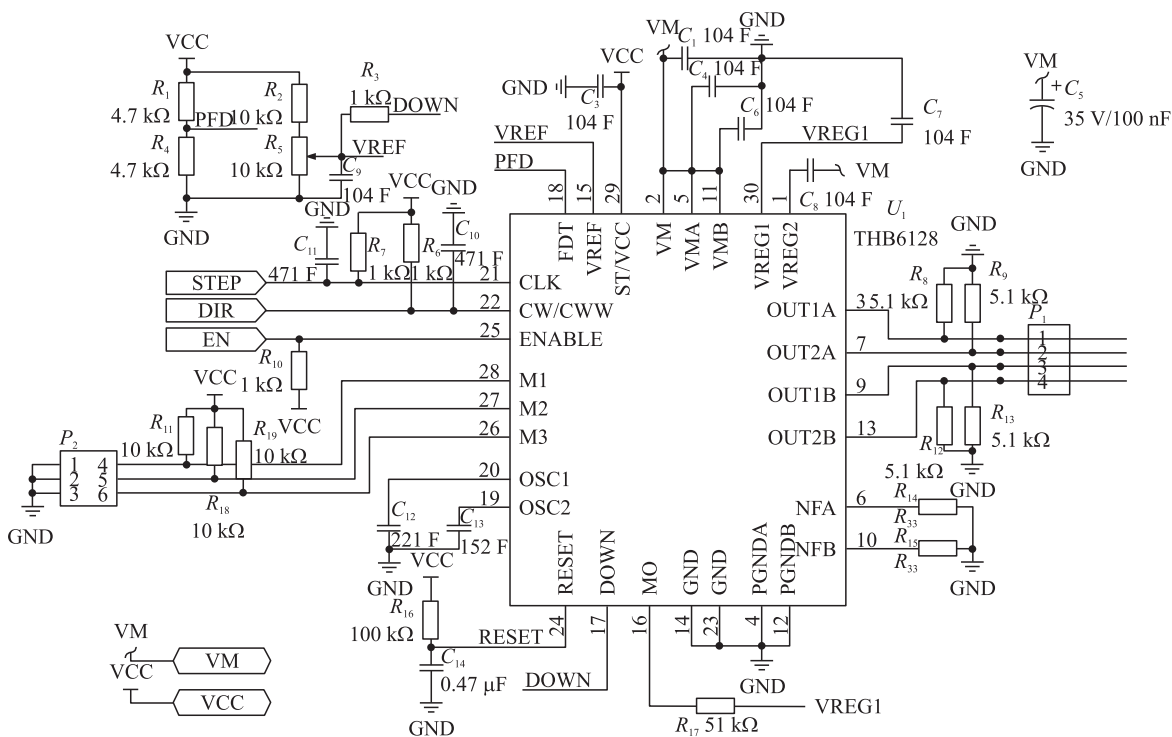


图 6 步进电机驱动控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of motor drive control

2.3 喷头控制单元

喷头控制单元的作用主要包括对喷头喷射打印材料的控制、喷头的加热升温控制以及喷头的温度检测传感控制. 喷头的控制单元影响了喷头喷射打印材料的精度及质量,从而直接影响了最后成形“零件”的打印质量^[12-14].

2.3.1 打印喷头的控制部分

喷头部分的设计如图 7 所示. 本文的生物三维打印机采用气压式挤出方式,使用一个塑料注射器式的容器作为喷头装置,内置打印材料,喷头后方用气管连接喷头和气泵. 为了将喷头固定在打印机上,打

印一个模型来固定喷头,将喷头固定在 y 轴上,使其可以随着 y 轴的运动而运动. 喷头固定装置主视图如图 8 所示. 当下位机收到单片机发出的打印信号,继电器闭合,24 V 开关电源导通,电磁阀开始工作,电磁阀与气泵相连接,从而控制气管中的进气与出气,以此达到打印的效果.

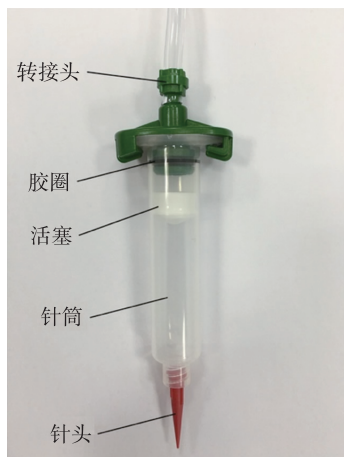


图 7 打印喷头示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the print nozzle

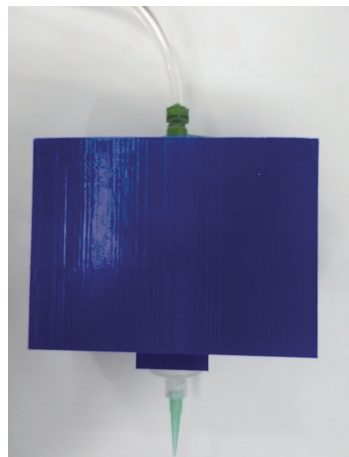


图 8 喷头固定装置主视图

Fig. 8 Main view of the nozzle holder

2.3.2 喷头温度检测控制

为保证生物打印材料能被正常喷出,有时需要将喷头加热并保持在一个恒定的温度范围内,需实时检测并控制喷头的温度. 如图 9 所示,温度监测采用 K 型热电偶,设定点控制器及调节器配套使用,以此实现对喷头的温度检测传感控制^[15]. 采用 AD597 作为温度设定点控制器. AD597 是一款单芯片的可配合 K 型热电偶使用的热电偶调节器和设定点控制器,可对 K 型热电偶的输入进行冷结补偿和放大,从而得到与温度成比例的内部信号,将所得信号与外部施加的设定电压进行比较,以此产生低阻抗开关输出电压.

2.4 加热控制单元

加热模块包括打印成形平台的加热模块和打印喷头的加热模块,这两个模块的加热系统相同. 加热模块系统主要由加热管和功率驱动管两部分组成,通过主制器发出的加热信号,经驱动管功率放大驱动加热管对打印成形平台和喷头进行加热,以确保打印材料顺利喷射及材料与成形平台相互粘合.

选择型号为 REP30N06LE 的金属氧化物半导体场效应管驱动加热模块的加热管,加热模块的驱动原理如图 10 所示. HEATER 端接收到来自主控芯片的加热控制信号,通过控制功率驱动管的通断,间接控制加热管两端电压,从而实现对打印成形平台和喷头温度的自动控制^[16]. 加热管采用型号为 M3 的单头加热管. 单头加热器可用于不能进行两端接线的加热介质,可在 $-20 \sim +260$ °C 的温度条件下使用.

2.5 限位开关控制单元

为了限定三维生物打印 x 、 y 、 z 轴的运动极限位置,在运动极限位置处安装一组接触式限位开关^[17]. 当 x 、 y 或 z 轴接触到限位开关时,也即行程开

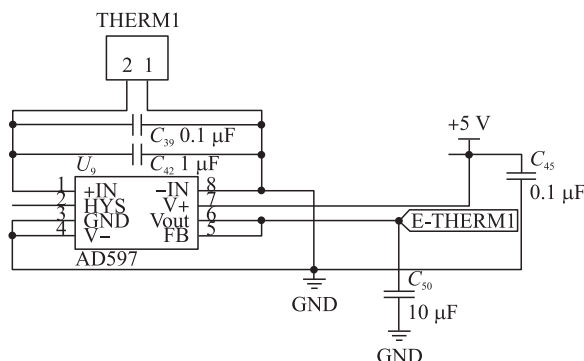


图 9 K 型热电偶及配套使用的温度设定点控制器——AD597 原理图

Fig. 9 K-type thermocouple and the temperature set point controller used together-AD597 schematic

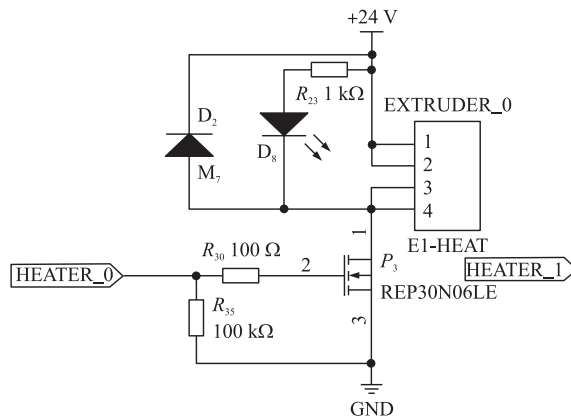


图 10 加热模块驱动原理图

Fig. 10 Schematic diagram of heating drive module

关的机械触头碰上档块时,即切断控制电路,打印机停止运行,以此来达到限位控制的目的. 由于机械运动的惯性,行程开关有一定的“超行程”以保护开关不受损坏. 限位开关的原理如图 11 所示.

2.6 USB 数据传输单元

生物三维打印机的 PC 端串口的 TTL 工作信号是 12 V 的,而一般控制电路的 TTL 工作信号是 5 V 的,需进行串口的电平转换. 结合各种条件,选择 AVRUSB 作为通讯接口芯片^[18-19],采用 USB2.0 通用串行总线标准,上位机软件的成型控制数据信息经 USB 数据线发送给 ATmega16 数据处理芯片,转换后发送给 ATmega2560 单片机,并通过 USB 数据线将打印过程中传感器的各种信息和打印状态传回给 PC 机.

3 成型实验

用 Solidworks 绘制支架模型,并对模型进行分层切片处理,如图 12 所示. 经上位机打印软件连接生物三维打印机,将切片模型数据导入打印软件. 在打印成型之前,确定打印机的各项功能状态显示正常.

实验使用相同的模型打印两组支架,第一组使用普通生物三维打印机,第二组使用本硬件控制系统的生物三维打印机. 由于本次实验所用的生物材料不需加热,因此需先在打印软件中将喷头加热温度、喷头最小打印温度、打印成型平台加热温度、打印成型平台最小打印温度均调整为 0℃,然后保存. 模型打印完成后,使用 UV 灯照射固化. 两组光固化后的模型分别如图 13(a)和(b)所示,光学显微镜下观察如图 14 所示.

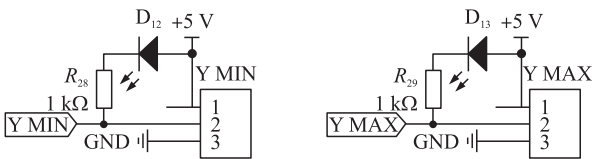


图 11 限位开关原理图

Fig. 11 Schematic diagram of limit switch

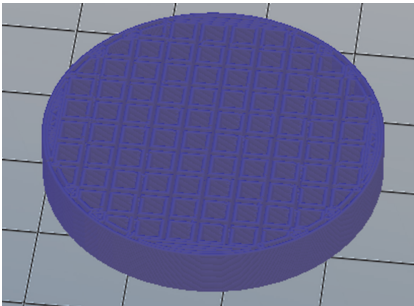
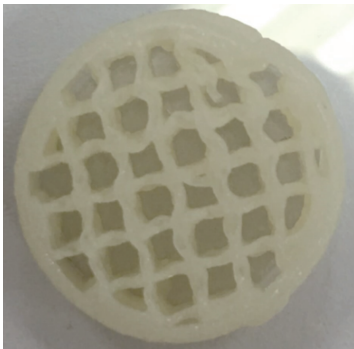


图 12 模型分层切片处理

Fig. 12 Model layered slice processing



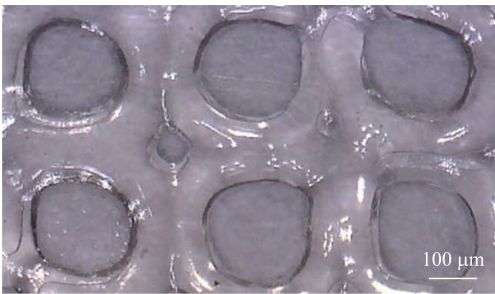
(a) 普通生物三维打印机打印模型



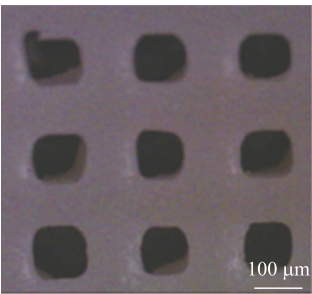
(b) 本文生物三维打印机打印模型

图 13 光固化后的两组模型

Fig. 13 Two sets of models after light curing



(a) 普通生物三维打印机打印模型



(b) 本文生物三维打印机模型

图 14 光学显微镜观察支架结构

Fig. 14 The stent structure observed by optical microscope

由图 13 可知,经本硬件控制系统打印出的模型精确度更高,表面更加光滑. 光学显微镜观察显示,使用本硬件控制系统打印出的支架孔隙结构完整,孔与孔之间相互连通;而普通生物三维打印机所打印模型支架表面分布较多孔径范围较大的微孔,精确度远远不够. 对此可知,本文所设计的生物三维打印机的硬件控制系统可实现较高精度的打印.

4 结语

生物三维成型装置虽已初步达到设计目标,但仍存在许多不足和需改进的地方. 例如成型模型的表面纹理、模型尺寸、模型精度等方面还有待提高,且由于材料的限制还不能打印血管、器官等复杂模型. 生物三维打印成型装置的控制系統、机械系統有待进一步改善,生物三维打印的制造技术需研究多学科融合,如生物模型的建模理论、快速成型技术、材料设计技术、生物科学技术、智能控制技术等,只有这样才可能真正解决生物三维打印的成型技术问题.

[参考文献](References)

- [1] 王雪莹. 3D 打印技术及其产业发展的前景预见[J]. 创新科技,2012(12):14-15.
WANG X Y. Prospects for 3D printing technology and its industrial development[J]. Innovation and technology,2012(12):14-15. (in Chinese)
- [2] MOON S,HASAN S K,SONG Y S,et al. Layer by layer three-dimensional tissue epitaxy by cell-laden hydrogel droplets[J]. Tissue engineering part C methods,2010,16(1):157-166.
- [3] 袁勇耀,赵科. 功能化聚丙烯乳液制备方法研究进展[J]. 粘接,2011,32(4):81-84.
YUAN Y Y,ZHAO K. Research process of preparation of aqueous functionalized polypropylene emulsions[J]. Adhesion,2011,32(4):81-84. (in Chinese)
- [4] 周长春,王科峰,谢鹏飞,等. 生物三维打印技术的研究现状及发展趋势[J]. 科技与企业,2014(13):381-382.
ZHOU C C,WANG K F,XIE P,et al. Research status and development trend of Bio 3D printing technology[J]. Science technology and enterprise,2014(13):381-382. (in Chinese)
- [5] 佚名. 唐都医院完成世界首例胡桃夹综合征 3D 打印血管外支架植入术[J]. 医学争鸣,2016(1):4.
ANON. Tangdu hospital completed the world's first 3D printed extravascular stent implantation of Nutcracker Syndrome[J]. Negative,2016(1):4. (in Chinese)
- [6] 赖雪聪,徐铭恩,倪孝杰,等. 用于制备心血管支架的 3D 打印装置及设备:CN106176000A[P]. 2016-12-07.
LAI X C,XU M E,NI X J,et al. 3D printing device and equipment for preparing cardiovascular stents:CN106176000A[P]. 2016-12-07. (in Chinese)
- [7] KIM G B,LEE S,KIM H,et al. Three-dimensional printing:basic principles and applications in medicine and radiology[J]. Korean journal of radiology,2016,17(2):182-197.
- [8] 杨继全. 三维打印设计与制造[M]. 北京:科学出版社,2013.
YANG J Q. 3D printing design and manufacturing[M]. Beijing:Science Press,2013. (in Chinese)
- [9] 雷蔓,吕健,刘征宏,等. 基于逆向工程与 3D 打印的工艺品保护与开发[J]. 制造业自动化,2014(9):141-144.
LEI M,LÜ J,LIU Z H,et al. Protection and development of handicrafts based on reverse engineering and 3D print[J]. Manufacturing automation,2014(9):141-144. (in Chinese)
- [10] MURPHY S V,ATALA A. 3D bioprinting of tissues and organs[J]. Nature biotechnology,2014,32(8):773-785.
- [11] DALY R,HARRINGTON T S,MARTIN G D,et al. Inkjet printing for pharmaceuticals—a review of research and manufacturing[J]. International journal of pharmaceuticals,2015,494(2):554-67.
- [12] 姜杰,朱莉娅,杨建飞,等. 3D 打印技术在医学领域的应用与展望[J]. 机械设计与制造工程,2014(11):5-9.
JIANG J,ZHU L Y,YANG J F,et al. Review of 3 dimensional printing technology in the medical field[J]. Machine design & manufacturing engineering,2014(11):5-9. (in Chinese)
- [13] 施建平. 基于 FDM 工艺的多材料数字化制造技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.
SHI J P. Exploration and research expand on digital design and manufacture of multi-material parts based on FDM technology[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2013. (in Chinese)
- [14] 王海静. 基于多传感器信息融合的码垛过程监控与故障诊断的研究[D]. 天津:河北工业大学,2007.
WANG H J. Research on monitoring and fault diagnosis of palletizing process based on multisensor Information Fusion[D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2007. (in Chinese)

- [15] SACHS E,CIMA M,CORNIE J. Three-dimensional printing:rapid tooling and prototypes directly from a CAD model[J]. Journal of engineering for industry,1992,39(1):201–204.
- [16] GREEN D W. Tissue bionics:examples in biomimetic tissue engineering[J]. Biomedical materials,2008,3(3):3750–3756.
- [17] WILSON B S,DORMAN M F. Cochlear implants:a remarkable past and a brilliant future[J]. Hearing research,2008,242(1/2):3–21.
- [18] KOCH L,GRUENE M,UNGER C,et al. Laser assisted cell printing[J]. Current pharmaceutical biotechnology,2013,14(1):91–97.
- [19] ALAN T,RAHUL G T,GEOFF L,et al. Clinical trials for stem cell therapies[J]. BMC medicine,2011,9(1):52.

[责任编辑:严海琳]