

基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的应用现状及进展

梅丹娥(综述) 陈金玲(审校)

摘 要 3D 打印技术作为一种新兴的快速成型技术,可通过提取不同影像学数据(CT、MRI 及超声图像),经图像后处理打印出相应 3D 模型。其能直观、全面地展示复杂的心内解剖结构,近年来在先天性心脏病、心脏瓣膜病及心律失常等疾病的诊断与治疗中的应用日益广泛。本文就基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的应用现状及进展进行综述。

关键词 超声心动描记术;3D 打印技术;心脏疾病

[中图法分类号]R540.45

[文献标识码] A

Application and progresses of ultrasound-derived three-dimensional printing technology in diagnosis and treatment of cardiac diseases

MEI Dan'e, CHEN Jinling

Department of Ultrasound Imaging, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China

ABSTRACT As a new rapid prototyping technology, three-dimensional (3D) printing technology can extract different imaging data (CT, MRI and ultrasound images) and print the corresponding 3D model after image processing. 3D printing technology can display the complex intracardiac anatomy intuitively and comprehensively. In recent years, 3D printing technology is widely used in the diagnosis and treatment of cardiac diseases, such as congenital heart disease, valvular disease and arrhythmia. This article reviews the application and progresses of 3D printing technology based on ultrasound images in the diagnosis and treatment of cardiac diseases.

KEY WORDS Echocardiography; 3D printing technology; Cardiac diseases

3D 打印技术作为影像学图像与实物之间的纽带,具有高仿真性及复制精细微小结构的能力,在心脏疾病的术前诊断、个体化手术方案的制定、术中监测及术后评估中均可发挥重要作用。3D 打印的数据源可为 CT、MRI 及超声等多种影像学方法所获取的图像,随着超声图像分辨率的提高,硬件及软件设备的不断更新,以超声图像作为数据源进行的 3D 打印技术逐渐开展。本文以三维超声图像作为数据源的 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的应用现状和前景进行综述。

一、3D 打印概况

3D 打印技术又称快速成型技术或增材制造技术,出现于 20 世纪 90 年代初期,是一种以数字模型文件为基础,应用粉末状金属或塑料等可成型材料,通过逐层叠加成型的方式来构造实物模型的技术,其打印精度高,并可以实现个性化制造^[1]。医用 3D 打印始于骨科、器官移植及整形外科等专业^[2-4],随着个体化心脏介入治疗的开展及 3D 打印技术的不断提高,近年来在

心血管领域也展现出一定的应用前景。Lazkani 等^[5]为了使个体化心脏介入手术更安全、有效地进行,打印出 1 例心梗后室间隔缺损患者心脏的 3D 模型,该模型能从左室面和右室面全面、直观展示室间隔缺损的形态、大小、数目及周边结构(如肺动脉瓣、主动脉瓣的情况),临床医师根据模型提前选择封堵器型号,进行术前演练,分析手术方法与途径,最终手术成功。Dankowsk 等^[6]打印出 1 例功能性二尖瓣反流患者的心脏模型,通过 3D 模型可多角度清晰显示心内解剖结构(左房、左室、二尖瓣瓣叶、瓣环及乳头肌等),应用于经皮二尖瓣环成形术前模拟介入治疗,通过在模型中确定导线、导丝的型号、最佳放置位置及手术途径,证实了 3D 打印技术在结构性心脏病介入手术中的临床价值。

二、基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的优势及具体流程

(一)基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的优势
超声心动图能对心脏组织直接成像,可实时动态监测感

基金项目:湖北省卫生和计划生育委员会青年人才项目(WJ2017Q009);中央高校科研专项基金重点重大培育项目(2042015kf1048)

作者单位:430060 武汉市,武汉大学人民医院超声影像科

通信作者:陈金玲,Email:77810848@qq.com

趣区在心动周期中的变化情况,在心脏疾病的诊断及治疗中均已广泛应用^[7]。随着个体化介入治疗的开展,新兴的 3D 打印技术进入心脏疾病诊疗领域,不仅能够提供更加全面、直观的视觉感受,提高心脏疾病诊断精度,还能提供触觉感受,使术者更加真实地理解手术过程中由于外界压力导致组织产生的位移和形变,进行术前规划及术中导航,提高手术成功率^[8]。目前较多研究^[9-10]以 CT、MRI 为数据源进行 3D 打印,相对 CT、MRI,超声图像分辨率高,对于心内软组织及薄膜样结构的显示有独特优势^[11],操作简单且不涉及辐射及药物使用,因此基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中有较高的应用价值。

(二)基于超声图像 3D 打印技术的具体流程

1.3D 超声容积医学数字成像和通信(digital imaging communication in medicine, DICOM)图像的获取。基于超声图像 3D 打印技术的首要条件是获取感兴趣区 3D DICOM 原始数据,3D 超声容积图像即为这类数据,通过设置最佳参数可获得精细度和分辨率均较高的图像待后续处理。随着超声技术的不断发展,三维超声心动图被证实可以作为 3D 打印的可靠数据源,已有研究^[12-14]成功应用超声三维容积图像作为数据源打印出房间隔缺损、二尖瓣及左心耳等 3D 模型。

2.3D 图像后处理,获取标准镶嵌语言(standard tessellation language, STL)格式文件。图像分割即为把图像分成若干个特定的、具有独特性质的区域并提取出感兴趣区的过程。常用的后期处理软件主要有 Mimics、Materialise、OsiriX 及 MeshLab 等。阈值分割是医学领域中最常用的图像分割方法,通过设定不同的特征阈值,把图像像素点分为若干类,保留图像中特征阈值范围内的信息。对于阈值分割不能完全分离的区域,通过交互式分割等方法进一步处理,去除干扰图像内容及噪声信号,经上述处理后的最终感兴趣区数据以 STL 格式文件进行保存,并输出至 3D 打印机。

3.将 STL 格式文件输出至 3D 打印机获取模型。3D 模型的构建依赖于 2D 薄型层面堆积转为 3D 实体的技术,即将整个三维模型沿水平面切割成一定数量的二维薄片,通过分层加工、叠加成型的方式逐层增加材料生成相应空间实物模型。目前医学领域中常用的打印方式主要为选择性激光烧结成型、熔融沉积成型、立体光固化成型、聚合物喷射成型及生物材料打印等^[15]。不同打印方式成型特点及所选取的打印材料各不相同,可根据实际需求选择不同打印材料及打印方式获取满意的 3D 模型。

三、基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病诊疗中的应用现状

心脏疾病种类繁多,而每一类疾病所包含心脏解剖结构的改变也复杂多样,治疗方式与难度差别很大。3D 打印技术具有标准化建模和个体化制造等优点,在先天性心脏病、心脏瓣膜病及心律失常等疾病的诊疗中日益发挥重要作用。

(一)3D 打印技术在先天性心脏病中的应用

1.单纯先天性心脏病。主要包括房间隔缺损、室间隔缺损及动脉导管未闭等。3D 打印技术基于超声图像打印出实物模型,能更加直观、准确及全面地再现心内解剖结构,360°显示病变部位及其周围情况,为临床医师提供更多诊断信息。Samuel 等^[16]

将房间隔缺损 3D 超声容积图像经分割、重建等处理制作出 3D 模型,该模型准确、全面地显示房间隔缺损患者的心内结构,证实了以超声图像作为数据源进行 3D 打印的可行性及其临床应用价值。Faganello 等^[12]基于超声图像打印出 1 例继发孔型房间隔缺损模型,在 3D 模型中测得其大小为 10 cm×6 cm,与原始超声图像中所测量的大小相同。Olivieri 等^[17]采集 8 例室间隔缺损患者的 3D 超声心动图图像,以 1:1 的比例打印出 3D 模型,并测量室间隔缺损形态学参数,与二维超声心动图中相应数据进行比较,结果显示 3D 打印模型精准度较高,误差小于 1 mm。上述研究证实 3D 打印模型能准确展示出室间隔缺损形态、大小、数目及其周围结构,可有效提高先天性心脏病的诊断精度。

除提供诊断信息外,3D 打印技术对于单纯先天性心脏病个体化介入治疗方案的规划和决策也有重要作用。邱旭等^[18]将三维超声心动图及 CT 所获取的影像学资料经过后处理软件进行三维拼接、重建,并用硅胶打印出心脏模型,在 3D 模型中进行体外房间隔缺损封堵测试,选择封堵器型号及封堵位置,术中证实选用的封堵器型号及置入位置均适宜,患者预后良好,解决了多发型房间隔缺损介入封堵治疗中封堵器置入困难、残余分流率高的难题,具有重要的临床应用价值。

2.复杂先天性心脏病。主要包括法洛四联症、大动脉转位等,鉴于这类疾病的复杂性,即使对其做了全面影像学检查,仍然可能丢失关键的诊断信息,导致漏诊或误诊。Loke 等^[19]以法洛四联症患儿的经食道三维超声心动图作为数据源打印出 3D 模型,运用调查问卷的方式,对比通过影像学图像与 3D 模型对法洛四联症的认识情况,结果显示临床医师通过 3D 打印模型对法洛四联症的理解更深刻、全面。法洛四联症 3D 打印模型可多角度、清晰地显示感兴趣区的结构,可以根据模型推断右室流出道狭窄程度与患儿临床症状之间的关系,有望通过 3D 打印模型提高复杂先天性心脏病的诊断精度。

另外,在复杂先天性心脏病中,以单一影像学技术作为数据源进行 3D 打印可能无法完整精细的显示病理结构,而使用两种或多种数据源进行 3D 打印,可有效发挥各种成像方式的优势,增加病变结构可视化程度。Gosnell 等^[20]通过采集 1 例矫正型大动脉转位、室间隔缺损及肺动脉闭锁患者的心脏 CT 和超声图像,经图像拼接、分割处理,将影像学资料转化成实体模型,该模型精准度较高,直观、精细再现了患者的病理结构。除此之外,3D 打印模型能全方位显示手术视角,并为外科医师提供术前演练的场所,进而提高手术成功率。总之,3D 打印技术可以使临床医师在深刻理解病变部位三维空间关系的基础上做出更加合理准确的诊断,为复杂先天性心脏病的治疗提供帮助。

(二)3D 打印技术在心脏瓣膜病中的应用

心脏瓣膜病是由于各种原因引起的心脏瓣膜结构或(和)功能的改变,通常伴有血流动力学的异常。各种影像学方法中,超声对于心脏瓣膜的显示有独特优势,随着个体化介入治疗的开展,基于超声图像 3D 打印技术在心脏瓣膜疾病诊疗中的应用越来越广泛。

1.精准评估瓣膜解剖结构及生理功能。心脏瓣膜解剖结构精细,具有重要的生理功能,对其形态结构的准确显示及血流动

力学的研究成为热点。3D 打印技术能精准构建出心脏瓣膜,此外通过体外血流动力学评估体系的建立,还可以应用 3D 打印心脏瓣膜模拟在体瓣膜血流动力学状态,以便更好地理解瓣膜的解剖及动态特征。Mahmood 等^[21]使用经后处理的正常二尖瓣、缺血性二尖瓣及黏液样变性二尖瓣动态三维超声心动图容积图像,应用立体光固化成型方式打印出 3 种不同形态二尖瓣模型,全程仅用 90 min,打印出的瓣膜高度保留和复制了原始超声图像信息,为正常及病变二尖瓣解剖结构的全面认识提供了直观模型。Muraru 等^[22]将三尖瓣超声容积图像进行后处理,制作出 3D 模型,并在 3D 模型上测量其形态学参数(穹窿部高度及容积,瓣环左右径、前后径、周长及面积等),与三维超声心动图所获取的相应参数对比,3D 打印模型与三维超声心动图中三尖瓣形态学参数测值间差异均无统计学意义且相关性较高,验证了 3D 打印三尖瓣模型的精准度,为其形态结构的全面理解和个体化介入治疗奠定良好基础。

3D 打印模型除了可完成形态还原外,还可以模拟瓣膜功能。Mashari 等^[23]基于超声图像,以硅胶为材料打印出个体化二尖瓣模型,将其置于体外血流动力学模拟系统内,获取二尖瓣压力时间曲线、跨瓣压差及瓣口血流频谱,并通过血流频谱测量压力半降时间及二尖瓣瓣口面积,与患者实际超声参数进行比较,结果表明 3D 打印二尖瓣模型与在体二尖瓣生理参数无差异,证实 3D 打印模型不仅能在解剖学上高度复制实体瓣膜结构,还能从功能学上模拟在体瓣膜血流情况。

2. 心脏瓣膜病个体化介入治疗中的应用。随着医疗水平的提高,个体化瓣膜介入手术,如经导管主动脉瓣置入术(transcatheter aortic valve implantation, TAVI)、经导管二尖瓣成形术(transcatheter mitral valvuloplasty, TMVP)均已广泛应用于临床。3D 打印模型在术前规划、术中导航及术后疗效评估方面均有一定临床价值。

个体化心脏瓣膜病的治疗中,精准合理的手术规划是决定手术效果的重要前提。Vukicevic 等^[24]通过将 CT 与超声图像的融合,以不同硬度和弹性的材料打印出正常的二尖瓣、钙化的二尖瓣,并构建了完整的左室及包括腱索、乳头肌在内的二尖瓣装置,成功完成二尖瓣钳夹术、二尖瓣穿孔封堵术等的模拟操作,根据术前操作中遇到的问题优化手术方案,成功进行治疗,并缩短了手术时间。在二尖瓣成形术中,选取适宜的二尖瓣装置至关重要,临床对人工瓣环尺寸及类型的选择多依赖于影像学资料及外科医师的经验性判断,为了使成形术更加有效进行,Owais 等^[25]基于超声容积图像,用塑料打印出二尖瓣环 3D 模型,进行术前演练,为术中最佳二尖瓣装置的选择提供了准确可行的方法。国内学者^[26]采集主动脉瓣 CT 及 3D 超声图像,构建出完整心脏及主动脉瓣模型,成功为 1 例 77 岁高龄的主动脉瓣重度狭窄合并关闭不全患者实施了 TAVI 手术规划与导航,且手术时间仅 1 h,术中 X 线暴露时间较以往手术明显缩短。

瓣膜手术存在较多并发症,其中残余瓣周漏较为常见,对瓣周漏程度的准确评估决定后续操作,3D 打印技术在瓣膜术后疗效及并发症的评价中有一定优势。Olivieri 等^[17]制作出 8 例室间隔缺损及主动脉瓣瓣周漏的 3D 模型,在 3D 模型及其二维超声

心动图采集的图像上对瓣周漏的径线进行测量,结果显示 3D 打印模型精准度高,能够准确评估瓣周漏的大小及周围结构,为后续治疗提供较高参考价值。

(三) 3D 打印技术在心律失常中的应用

目前,已有研究^[27]报道 3D 打印技术在心律失常治疗过程中的应用。心房颤动是最常见的心律失常之一,容易引起脑梗死。经导管左心耳封堵术是降低心脑血管事件的有效手段,对左心耳解剖结构的深刻理解、封堵器的准确选择是封堵术成功的关键^[28]。新型的 3D 打印技术在左心耳封堵术中展现出较高的应用价值。Obasare 等^[29]基于超声图像打印出左心耳模型,选取 21 mm 封堵器在 3D 模型上进行术前模拟操作,术中根据选择的封堵器进行左心耳封堵并获得成功,手术时间明显缩短,术后无相关并发症。Fan 等^[30]采集 1 例双叶左心耳三维图像,以硅胶打印出 3D 模型,并应用于术前模拟操作,通过两次调整封堵方案,最终选取适合型号的封堵器将左心耳两个分叶成功封堵。研究^[31-32]基于超声图像打印出 10 例左心耳心壁及心腔模型,在心腔模型观察左心耳形态结构,心壁模型进行解剖径线的测量及术前演练,并在此基础上进行左心耳封堵术前模拟系统的建立和评估,结果表明 3D 打印模型能精准、直观地展示左心耳的解剖细节,在 3D 打印模型中封堵器置入效果较好,能为外科医师提供参考,使基于经食道三维超声心动图和 3D 打印技术的左心耳封堵术前模拟系统可以实现左心耳封堵的术前演练及评估,成为左心耳封堵术前准备的重要补充。

四、基于超声图像 3D 打印技术的局限性

基于超声图像 3D 打印技术在心脏疾病的诊疗中发挥重要作用,但仍然存在一定局限性:①超声对心内薄膜样结构的显示存在优势,但对心外解剖结构的清晰展现存在限制,在心脏肿瘤中无法全面显示肿瘤边界、纵隔转移情况,因此,目前仍多以 CT 图像进行后处理,获取心脏肿瘤 3D 模型,用于临床诊断及手术指导^[33];②3D 打印多次后处理过程中可能会过滤掉细微解剖结构,导致最终获取模型与原始数据间的细小差异,Mathur 等^[34]打印出的主动脉根部 3D 模型由于多次后处理丢失部分信息,构建的模型中存在较多空隙;③3D 打印技术应用静态模型模拟动态实体,无法直观、便捷地评价心脏的动态特征。

五、基于超声图像 3D 打印技术的展望

随着超声技术的不断发展,原始图像质量将得到进一步优化,以超声图像为数据源的 3D 打印技术精准度也会随之提高;另外,随着 3D 打印材料的突破,可寻找到与心脏组织硬度、弹性等物理参数高度一致的材料进行打印,进而制作出更加仿真的模型,使其在心脏疾病的临床诊断、术前规划、术中监测及术后评估等环节中的作用得到进一步加强。

综上所述,3D 打印技术作为影像学资料与实物间的桥梁,在先天性心脏病、心脏瓣膜病及心律失常等心脏疾病中的应用将越来越广泛,可为临床诊疗提供重要信息。

参考文献

- [1] Mishra S. Application of 3D printing in medicine[J]. Indian Heart J, 2016, 68(1): 108-109.

- [2] Won SH, Lee YK, Ha YC, et al. Improving pre-operative planning for complex total hip replacement with a Rapid Prototype model enabling surgical simulation[J]. Bone Joint J, 2013, 95-B(11): 1458-1463.
- [3] Lee V, Singh G, Trasatti JP, et al. Design and fabrication of human skin by three-dimensional bioprinting[J]. Tissue Eng Part C Methods, 2014, 20(6): 473-484.
- [4] Liu YF, Xu LW, Zhu HY, et al. Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing[J]. Biomed Eng Online, 2014, 13(1): 63.
- [5] Lazkani M, Bashir F, Brady K, et al. Postinfarct VSD management using 3D computer printing assisted percutaneous closure[J]. Indian Heart J, 2015, 67(6): 581-585.
- [6] Dankowski R, Baszko A, Sutherland M, et al. 3D heart model printing for preparation of percutaneous structural interventions: description of the technology and case report[J]. Kardiologia, 2014, 72(6): 546-551.
- [7] Erdem A, Sartas T, Zeybek C, et al. Transthoracic echocardiographic guidance during transcatheter closure of atrial septal defects in children and adults[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(1): 53-61.
- [8] Mashiko T, Otani K, Kawano R, et al. Development of three-dimensional hollow elastic model for cerebral aneurysm clipping simulation enabling rapid and low cost prototyping[J]. World Neurosurg, 2015, 83(3): 351-361.
- [9] Ghisiawan N, Herbert CE, Zussman M, et al. The use of a three-dimensional print model of an aortic arch to plan a complex percutaneous intervention in a patient with coarctation of the aorta[J]. Cardiol Young, 2016, 26(8): 1568-1572.
- [10] Bhatla P, Tretter JT, Ludomirsky A, et al. Utility and scope of rapid prototyping in patients with complex muscular ventricular septal defects or double-outlet right ventricle: does it alter management decisions? [J]. Pediatr Cardiol, 2017, 38(1): 103-114.
- [11] Meier LM, Meineri M, Hiansen JQ, et al. Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing[J]. Neth Heart J, 2017, 25(2): 65-75.
- [12] Faganello G, Campana C, Belgrano M, et al. Three dimensional printing of an atrial septal defect: is it multimodality imaging? [J]. Inter J Cardiovasc Imaging, 2016, 32(3): 427-428.
- [13] Mahmood F, Owais K, Montealegre Gallegos M, et al. Echocardiography derived three-dimensional printing of normal and abnormal mitral annuli[J]. Ann Card Anaesth, 2014, 17(4): 279-283.
- [14] Liu P, Liu RJ, Zhang Y, et al. The value of 3d printing models of left atrial appendage using real-time 3d transesophageal echocardiographic data in left atrial appendage occlusion: applications toward an era of truly personalized medicine[J]. Cardiology, 2016, 135(4): 255-261.
- [15] 孙小磊, 汪纛, 张晖, 等. 3D 打印技术在临床中的应用现状及展望[J]. 中国医疗设备, 2017, 32(1): 99-102.
- [16] Samuel BP, Pinto C, Pietila T, et al. Ultrasound-derived three-dimensional printing in congenital heart disease[J]. J Digit Imaging, 2015, 28(4): 459-461.
- [17] Olivieri LJ, Krieger A, Loke YH, et al. Three-dimensional printing of intracardiac defects from three-dimensional echocardiographic images: feasibility and relative accuracy[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2015, 28(4): 392-397.
- [18] 邱旭, 吕滨, 徐楠, 等. 应用 3D 打印技术及超声引导介入技术治疗多发房间隔缺损的可行性[J]. 中华医学杂志, 2017, 97(16): 1214-1217.
- [19] Loke YH, Harahsheh AS, Kriege A, et al. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease[J]. BMC Med Educ, 2017, 17(1): 54.
- [20] Gosnell J, Pietila T, Samuel BP, et al. Integration of computed tomography and three-dimensional echocardiography for hybrid three-dimensional printing in congenital heart disease[J]. J Digit Imaging, 2016, 29(6): 665-669.
- [21] Mahmood F, Owais K, Taylor C, et al. Three-dimensional printing of mitral valve using echocardiographic data[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(2): 227-229.
- [22] Muraru D, Veronesi F, Maddalozzo A, et al. 3D printing of normal and pathologic tricuspid valves from transthoracic 3D echocardiography data sets[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2017, 18(7): 802-808.
- [23] Mashari A, Knio Z, Jeganathan J, et al. Hemodynamic testing of patient-specific mitral valves using a pulse duplicator: a clinical application of three-dimensional printing[J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2016, 30(5): 1278-1285.
- [24] Vukicevic M, Puperi DS, Jane Grande-Allen K, et al. 3D Printed modeling of the mitral valve for catheter-based structural interventions[J]. Ann Biomed Eng, 2017, 45(2): 508-519.
- [25] Owais K, Pal A, Matyal R, et al. Three-dimensional printing of the mitral annulus using echocardiographic data: science fiction or in the operating room next door? [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2014, 28(5): 1393-1396.
- [26] 林加凡. 中国首例 3D 打印技术导航 TAVI 手术在上海完成[J]. 海南医学, 2015, 26(4): 607.
- [27] Bauch T, Vijayaraman P, Dandamudi G, et al. Three-dimensional printing for in vivo visualization of his bundle pacing leads[J]. Am J Cardiol, 2015, 116(3): 485-486.
- [28] Li HK, Yao Q, Shen B, et al. Application of 3D printing technology to left atrial appendage occlusion[J]. Int J Cardiol, 2017, 231(15): 258-263.
- [29] Obasare E, Melendres E, Morris DL, et al. Patient specific 3D print of left atrial appendage for closure device[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2016, 32(10): 1495-1497.
- [30] Fan Y, Kwok KW, Zhang Y, et al. Three-dimensional printing for planning occlusion procedure for a double-lobed left atrial appendage[J]. Circ Cardiovasc Interv, 2016, 9(3): e003561.
- [31] 宋宏宁, 周青, 邓倾, 等. 基于三维经食管超声的 3D 打印模型指导左心耳封堵的可行性研究[J]. 中华超声影像学杂志, 2016, 25(4): 294-299.
- [32] 宋宏宁, 周青, 陈金玲, 等. 基于经食管三维超声心动图和 3D 打印的左心耳封堵术前模拟系统的建立和评估[J]. 中华超声影像学杂志, 2017, 26(1): 1-6.
- [33] Son KH, Kim KW, Ahn CB, et al. Surgical Planning by 3D printing for primary cardiac schwannoma resection[J]. Yonsei Med J, 2015, 56(6): 1735-1737.
- [34] Mathur M, Patil P, Bove A. The role of 3d printing in structural heart disease: all that glitters is not gold[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(8): 987-988.