

动态心脏体模在心脏计算机断层扫描成像质量控制中的应用

赵鹏,李梦,潘文才,郎朗,肖晶晶,种银保
陆军军医大学新桥医院医学工程科,重庆 400037

【摘要】论述了动态心脏体模作为计算机断层扫描(CT)设备心脏成像质量评价与质量保证工具的重要性;介绍了当前几类动态心脏体模在心脏CT成像质量控制中的应用进展,包括运动型、功能型和仿真型动态心脏体模。分析了现有动态心脏体模在解剖结构、组织材料和运动特性的不足,并提出利用等效材料制作四腔室心脏体模和基于容积-时间曲线控制模拟心脏全周期运动的可行性,以探究研制一种“结构仿生、运动仿真”动态心脏体模的可行性,从而为建立心脏CT成像质量定量评价标准提供理论依据和技术支撑。

【关键词】动态心脏体模;心脏计算机断层扫描;等效材料;运动仿真;质量控制

【中图分类号】R318;R445

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)06-0659-07

Application of dynamic heart phantom for quality control of cardiac computed tomography imaging

ZHAO Peng, LI Meng, PAN Wencai, LANG Lang, XIAO Jingjing, CHONG Yinbao

Department of Medical Engineering, Xinqiao Hospital, Army Medical University, Chongqing 400037, China

Abstract: The current dynamic heart phantom is classified as moving gated, functional and simulation phantoms. Herein the significance of dynamic heart phantom applied for the quality evaluation and quality assurance of cardiac computed tomography (CT) imaging is briefly discussed, and its developments in the quality control of cardiac CT imaging are introduced. The analysis revealed that the existing dynamic heart phantoms have limitations in anatomical structure bionic design, tissue equivalent material and movement characteristics simulation. Therefore, the feasibilities of using equivalent material to establish a four-chamber heart phantom and simulating motions in the whole cardiac cycle based on volume-time curve are expounded. Furthermore, the possibilities of a dynamic heart phantom of "structure bionic design and motion simulation" are investigated. This study provides theoretical basis and technical support for the establishment of standards for quantitatively evaluating the cardiac CT imaging quality.

Keywords: dynamic heart phantom; cardiac computed tomography; equivalent material; motion simulation; quality control

前言

据美国心脏病学会2016年发布的数据显示,全球31%的死亡由心血管疾病引发,现已成为人类健康的头号杀手^[1]。临床上心血管造影成像是诊断心血管疾病的“金标准”^[2],但其有创、辐射剂量大、检查体位受限。相对而言,心脏计算机断层扫描(Computed

Tomography, CT)成像作为一种无创影像检查,对心血管疾病诊断的准确率达80%以上^[3-4],已逐渐成为早期筛查及术后评估的重要检查手段。然而,心脏是人体最为复杂的运动脏器,现有的心脏CT成像技术易受患者心率差异、CT设备性能、扫描参数设置和后处理重建等影响^[5-6],产生运动伪影、血管错位和边缘模糊等问题^[7],大大降低心脏CT成像质量,严重影响心血管疾病诊断的准确率,更甚者会导致医患纠纷。因此,如何确保心脏CT成像质量对心血管疾病的精确诊疗和医疗质量安全至关重要。

一般心脏CT成像是利用多层螺旋CT空间分辨率高、容积覆盖速度快、图像信噪比高的优势,采用心电门控或心电触发技术^[7],以低扫描螺距、高曝光功率,结合对比剂增强和分期注射的方式,采集融合

【收稿日期】2018-03-09

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0103100);军队“十二五”重点项目(BWS12J36)

【作者简介】赵鹏,博士,高级工程师,硕士生导师,从事数字诊疗装备质量控制标准化技术研究,E-mail: zhaop9@gmail.com

【通信作者】种银保,学士,高级工程师,硕士生导师,从事医学装备管理、技术保障、教学及科研,E-mail: chongyinbao@163.net

心电信息的全心动周期或R-R间期心脏收缩/舒张达到最慢时刻的原始图像,并通过专用的心脏重建软件把每个心动周期中相似时相的信息用于图像重建,进而以动态多时相数据获得四维心脏影像,用于观察整个心动周期各房室收缩和舒张的情况。目前,国内CT的质量控制标准的制定均参照国际电工委员会的通用准则IEC 1223-2-6^[8],主要包括《GB/T-17589-2011 X射线计算机断层摄影装置质量保证检测规范》和《JJG 961-2001 医用诊断CT X射线辐射源检定规程》等,检测器具均为头部剂量体模、影像性能体模等静态体模,检测项目有CT剂量指数、层厚、CT值线性、空间分辨率、低对比度分辨率、水的CT值、场均匀性和噪声等。上述性能指标是基于几何投影原理或物体对X线衰减的差异,并通过轴位扫描而获得,可用于CT设备对静态脏器成像质量的客观评价,但对于心血管等运动脏器,特别是心动过速、早搏、房颤等高速无规律运动时成像的质量控制却无能为力。换言之,现有CT质量控制体系中尚缺乏标准的动态体模作为检测器具。

理想的动态心脏体模是一种能真实模拟人体心脏解剖结构、节律运动和血液流动,具有材料等效性、运动仿真性和参数确定性,能够客观反映正常心脏和典型心脏疾病特征,用于评价心脏CT成像质量的标准化模型。随着心脏CT成像技术的广泛应用,其质量迫切需要全面系统的定量评价,考虑到基于患者研究的局限性和辐射损伤,研制动态心脏体模的意义非常重大。近年来,国内外学者报道了大量模拟心脏解剖结构、运动特征的动态心室或冠状动脉体模,并用于不同扫描方式和重建算法,从而对冠脉钙斑测量、心功能分析和重建软件等进行评价研究,根据其结构组成、运动方式和功能特点可分为运动型、功能型和仿真型这3大类^[9-11]。本研究将分类介绍上述动态体模在心脏CT成像质量控制中的应用进展,以探究研制一种“结构仿生、运动仿真”动态心脏体模的可行性,从而为建立心脏CT成像质量定量评价标准提供理论依据和技术支撑。

1 动态心脏体模在心脏CT成像质量控制中的应用

1.1 运动型动态心脏体模

早期学者们为代替人体探索解决心脏CT成像运动伪影的方法,发明了模拟心脏二维/三维运动方式、结构形态简单的单参数心脏体模,即运动型动态心脏体模。1980年,Morehouse等^[12]首次报道了这种简易的运动体模,该体模主要由圆柱形橡胶薄膜、多

孔合成树脂内芯、储液筒和活塞组成(图1)。当活塞上下移动时,会驱动液体通过多孔内芯使橡胶薄膜径向扩张和收缩,从而模拟心脏的收缩和舒张运动,频率为55 BPM。该体模虽不具备心脏的真实结构和功能,但具有周期性容积变化,Morehouse等利用其特点成功分析了单排CT通过心电门控技术逐帧扫描心脏时产生运动伪影的原因,并强调了运动体模在心脏CT成像算法研究中的重要性。

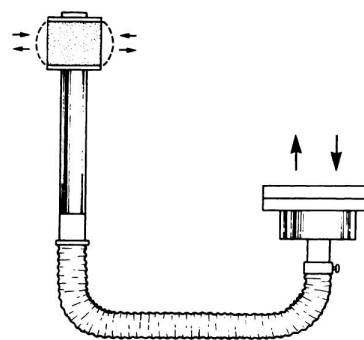


图1 一种简易动态体模示意图

Fig.1 Schematic diagram of a simplified dynamic phantom

多排螺旋CT问世后,机架旋转速度大幅提升,心脏图像实现快速采集,学者们尝试从运动仿真方面改进简易运动体模,并将其用于心脏CT成像重建算法的研究。2002年,Horiguchi等^[13]针对多层螺旋CT设计了一种由橡胶球囊、亚克力棒、驱动器和控制器等组成的运动体模。该体模的橡胶球囊内充盈液体以模拟心室,表面挂载亚克力棒以模拟冠状动脉钙化斑块,控制器按照ECG时序同步发送指令驱动橡胶球囊模拟收缩和舒张运动,并模拟ECG触发多排螺旋CT进行扫描。Horiguchi等利用该体模低心率(64.5 BMP)下薄层扫描数据的单扇区和多扇区重建,有效验证了多扇区重建算法能够获得高时间分辨率、高信噪比的图像,并能提高冠脉钙化积分测量的准确性。

然而,早期运动伪影仍是影响心脏成像的首要问题,为进一步优化厂家扫描方案,改善多排螺旋CT的成像质量,Wicky等^[14]设计了两种较为复杂的运动体模。一种是水平-旋转运动体模(图2a),由塑料试管、运动平板、传动机构和旋转电机等组成,塑料试管内充满对比剂以模拟冠状动脉,旋转电机经由传动机构驱动塑料试管在Y-Z平面内做水平-旋转运动,频率为45~88 BMP;另一种是三相类摆运动体模(图2b),该体模有4种不同规格的导尿管模拟冠状动脉,并分别固定于一根木质杆的尾部,木质杆头部受3根偏心杆的三相旋转运动的影响,在X-Z平面内产生上下类摆运动,以模拟心动周

期内的3个运动时相。上述体模均具有两种运动方式, 类似于心脏三维运动在二维空间的分解, Wicky等利用

这种复合运动体模对比不同扫描方案, 提出低螺距和时间分辨率可有效减少运动伪影, 改善心脏成像质量。

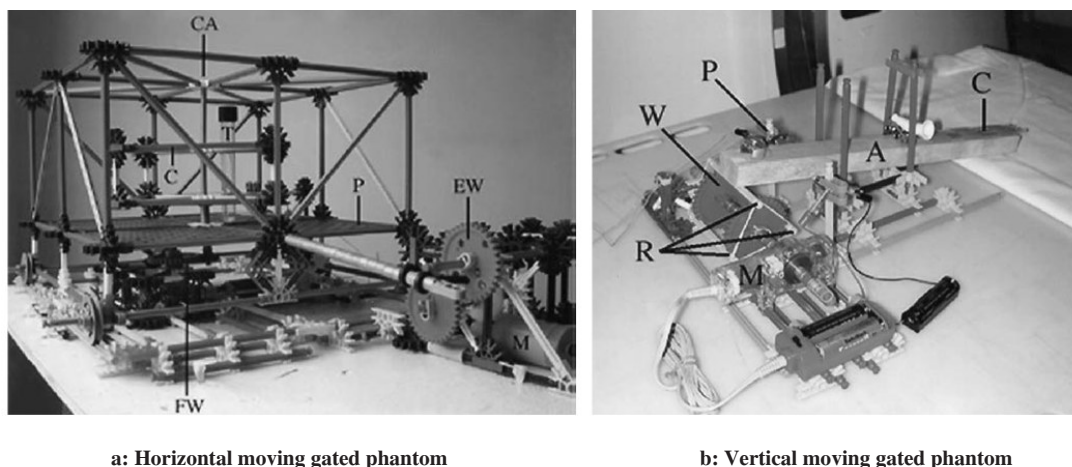


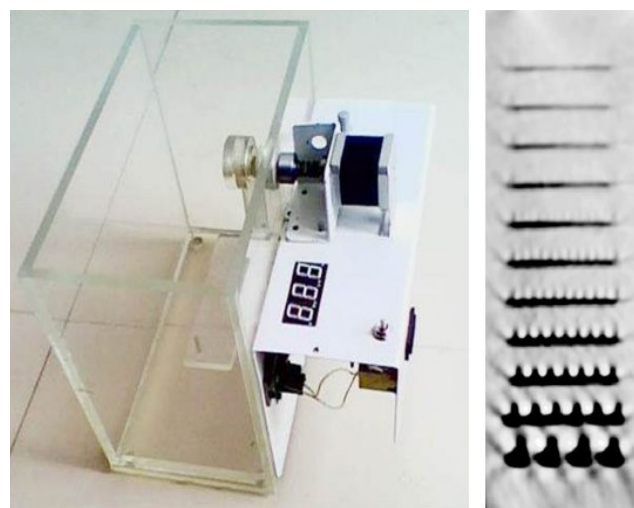
图2 不同运动方式的运动体模

Fig.2 Moving gated phantom with different moving pattern

Elements of the horizontal moving gated phantom: C, carrousel; CA, central axial; EW, eccentric wheel; FW, fixed wheel; M, rotational motor; P, the platform situated on four wheels; T, a plastic tube of 14 mm diameter. Elements of the vertical moving gated phantom: A, wooden arm; C, catheter; M, rotational motor; P, photodiode; R, three eccentric rods; W, a pair of wheels.

人体心脏除了空间三维运动, 还有连续时间上速度的周期性变化。2005年, Bengemann等^[15]研制了一种能够按照预设速度-时间曲线运动的变速动态体模, 该体模由嵌入两块亚克力(PMMA)板之间的弹性柱体构成, 其底部还固定有一个空间分辨率体模。运动时, 计算机编程控制空压机驱动可移动的亚克力板使弹性柱体产生压缩变形, 以模拟不同心动周期和相同周期内心室的变速运动, 预设曲线可自定义或用正弦波拟合真实的ECG波形, 心率范围

为60~120 BMP。Bengemann等利用该体模首次系统评价了心率、螺距、旋转时间和重建算法等多个因素对心脏成像时间、空间分辨率的影响。随后国内泰山医学院王鹏程团队首次研制了一款结合空间分辨率插件的变速动态体模(图3), 并用于定量分析心率、扫描速度和重组算法等对冠状动脉成像质量的影响^[16]。虽然其仅利用旋转电机驱动空间分辨率插件按照正弦波产生了一个收缩期和舒张期比例可调的简单变速运动, 但在国内尚属首例。



a: Dynamic phantom and its spatial resolution image

b: Simulated curve of volume change

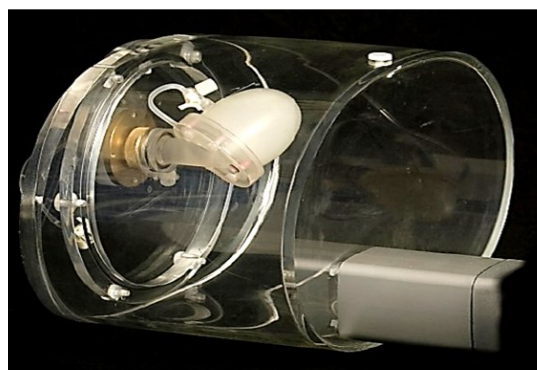
图3 一种结合空间分辨率的变速动态体模

Fig.3 A variable speed dynamic phantom with spatial resolution module

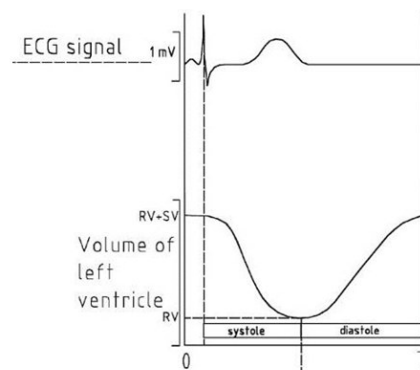
1.2 功能型动态心脏体模

随着CT设备硬件和软件不断更新对心脏成像质量的提升,推动了其在心血管形态结构和功能成像方面的临床应用,以至于学者们对动态心脏体模的材料等效、运动仿真和功能参数提出了更高的要求。2004年,Visser等^[17]率先发明了一款经典的动态心脏体模,该体模由模拟左心室、胸腔模体、凸轮、活塞泵和控制单元组成(图4)。模拟左心室由两层1 mm的硅凝胶膜制成,内外膜间填充放射性溶液模拟心肌灌注,内膜腔内填充对比剂模拟心室容积变

化(范围45~200 mL),整个心室嵌于胸腔模体内,根部通过Luer接口与活塞泵相连。胸腔模体呈椭圆形,柱状体内部充满液体,两侧可安装由泡沫颗粒组成的肺部插件。控制单元控制旋转电机驱动凸轮,活塞泵跟随凸轮特殊曲面轮廓进行水平往复运动,致使模拟左心室容积周期性变化,每搏输出量为70 mL,心率为60~80 BMP。硅凝胶膜富有弹性,当心室容量大于70 mL时,将产生明显的膨胀或压缩形变。该体模是最早具有模拟心室容积变化和每搏输出量的功能型动态体模。



a: Gated heart phantom



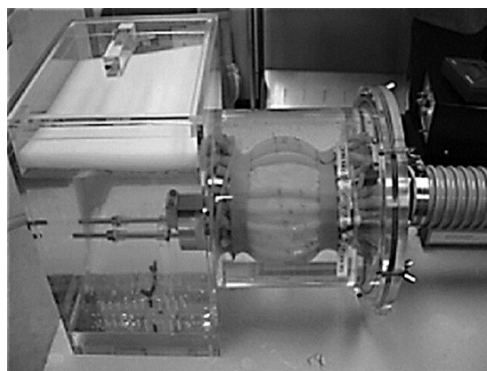
b: ECG signal and volume of left ventricle

图4 阿姆斯特丹动态心脏体模

Fig.4 Amsterdam three-dimensional gated heart phantom

2005年,Horiguchi等^[18]在前期研究的基础上,研制了一款模拟冠状动脉钙化斑块和心率异常的功能型动态心脏体模(图5),由橡胶管、橡胶球囊、驱动器和控制器等组成。橡胶管内分别放置由硅胶、玻璃泥和聚四氟乙烯合成的4种不同内径和大小的钙化模型,模拟冠状动脉钙化斑块。橡胶球囊内部充满稀释的造影剂模拟左心室,外部浸入植物油,表面平行安装了12根橡胶管,根部固定并与活塞相连(内径

10 cm)。步进电机受控推动活塞水平往复运动,使橡胶球囊内部容积变化并产生收缩-舒张和扭转运动,每搏输出量为100 mL,心率0~100 BMP。与上述体模相比,该体模的优点在于能够设置心率序列模拟正常心率、心动过速和心律不齐,但仅以正弦波简单拟合左心室时间-容积曲线。尽管如此,Horiguchi等利用该体模成功评价了心率异常时冠状动脉钙化斑块重复测量的变异性。



a: Prototype



b: Improved phantom

图5 模拟不同冠状动脉钙化程度和心率异常的动态心脏体模

Fig.5 Dynamic heart phantom for simulating different degrees of coronary artery calcification and abnormal heart rate

最近功能型动态体模已逐渐应用于单光子发射CT心脏成像技术的评价。2015年,Chrysanthou-Baustert等^[19]参考阿姆斯特丹体模设计了一款能够模拟心肌缺损的动态心脏体模,而Narihir等^[20]通过控制调节心室内外壁的容积比例实现了心肌灌注成像的量化评价。

1.3 仿真型动态心脏体模

目前,动态心脏体模已代替人和动物广泛用于CT、磁共振成像、单光子发射CT和超声心脏成像质量的评价研究,并不断从材料仿生和运动仿真方面完善或扩充现有体模的设计思路、加工工艺和功能设置,使其从运动型、功能型向能够真实模拟人体的仿真动态体模逐渐演变。加拿大Shelley公司一直致力于验证各类心脏成像技术的仿真型动态心脏体模,如图6所示的多模态动态体模DHP-01,主要由模拟心脏、有机玻璃容器、伺服电机、控制系统及其软件组成,模拟心脏包含左心室、右心室和心肌,由聚乙烯醇或水凝胶等材料制成,具有一定的生物力学和多模态成像特性。模拟心脏安装于盛满水的有机玻璃容器的有轨支撑装置上,并通过轴承杆与两个伺服电机联接。控制系统驱动两个伺服电机使模拟心脏产生压缩、拉伸和扭转等形变运动,并可利用其专用软件自定义各项参数指标模拟复杂的心脏运动和心率波形,特别是按照生理波形模拟血液流动,心率 ≤ 200 BMP,旋转角度 $\leq 41^\circ$,每搏输出量 < 80 mL。2014年,Wood等^[21]首次利用该体模实现了对三维超声心室容积和射血分数等心功能测量的定量评价,后续研究人员在CT设备的心脏功能成像的量化评价中,该体模也发挥了重要的作用。

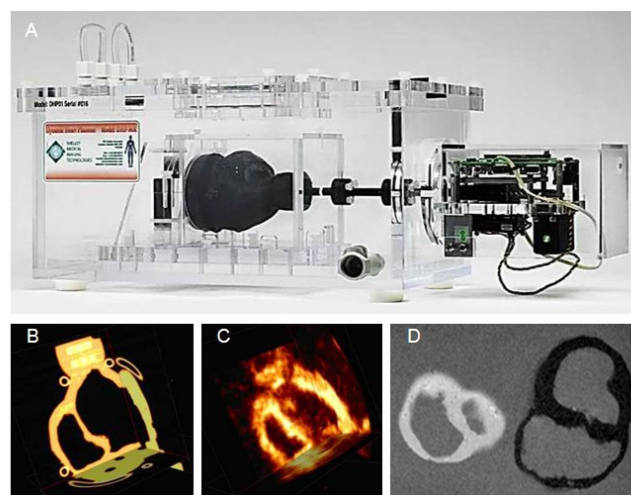


图6 多模态心脏运动体模DHP-01

Fig.6 Multimodal dynamic heart phantom DHP-01

A: Dynamic heart phantom; B: Computed tomography image; C: Ultrasound image; D: Magnetic resonance image of T₁-weighted spin-echo sequence

然而,相较于CT,由于心脏磁共振成像能够获得更好的形态结构和功能参数,所以兼容磁共振的动态体模更注重结构和运动仿真。2011年,Swailles等^[22]报道了一种能够真实模拟心脏、呼吸运动和血液流动的磁共振仿真体模(图7)。该体模主体是一个密闭的塑料容器,底部由木板支撑。模拟心脏由硅胶注塑成型,分为两个腔室,分别与肺循环和体循环模拟血管连接,接口处安装有3个由乳胶手套指端制成的单向阀模拟瓣膜;两侧肺叶由填满海绵颗粒的1 L塑料袋构成,内部充满水并与肺循环管路连接,可模拟肺叶的收缩舒张;各种血管由管径6.35~12.70 mm的乳胶管制成,内部充盈水模拟血液流动,并具有过压保护装置。体模的心脏运动由液压系统、行星齿轮电机和传动机构实现。两个充满异丙醇的12 mL注射器通过长管连接构成液压系统,行星齿轮电机通过凸轮轴与液压系统一端的注射器连接,通过长管驱动另一端注射器模拟心脏搏动;血液循环利用流体泵驱动,各种管阀配合其实现充盈和抽出;呼吸运动由呼吸机产生,呼吸速率和潮气量可调。但由于磁共振环境的限制,上述电机、流体泵和呼吸机均置于扫描室外,各种管路的延长会对仿真运动的可靠性带来严重影响。

此外,据报道,瑞士苏黎世联邦理工学院Nicholas Cohrs博士研发了一种在形状和功能上更能真实模拟人体的仿真心脏,该心脏主要利用硅树脂材料通过先进的三维打印技术制成,包含右心室和左心室,腔室之间无隔膜,具有一定的生物相容性,工作时采用电动气控的方式通过对一个心室加压使另一个心室模拟肌肉收缩将液体泵出^[23]。尽管由于材料工艺的局限性,其最长搏动时长仅45 min,但这种人工心脏将对未来动态心脏体模的研制具有一定的指导的意义。

2 总结与展望

动态心脏体模作为CT设备心脏成像质量评价与质量保证的有效工具,既能提供影像性能评价指标,又能量化分析临床应用程序的参数设置、图像重建和智能诊断等功能,尤其是具有临床检查不可替代的优势,有助于提高心脏动态成像质量和心血管功能检查的成功率,为确保心血管疾病的精确诊断和医疗质量安全发挥着重要的作用。

然而,尽管现有动态心脏体模种类繁多、功能各异,但在解剖结构、组织材料和运动特性方面仍存在诸多不足。解剖结构方面,上述动态心脏体模大多以模拟左心室或二腔室心脏为主,未能实现模拟完整的四腔室心脏,冠状动脉及其斑块的构建也难以

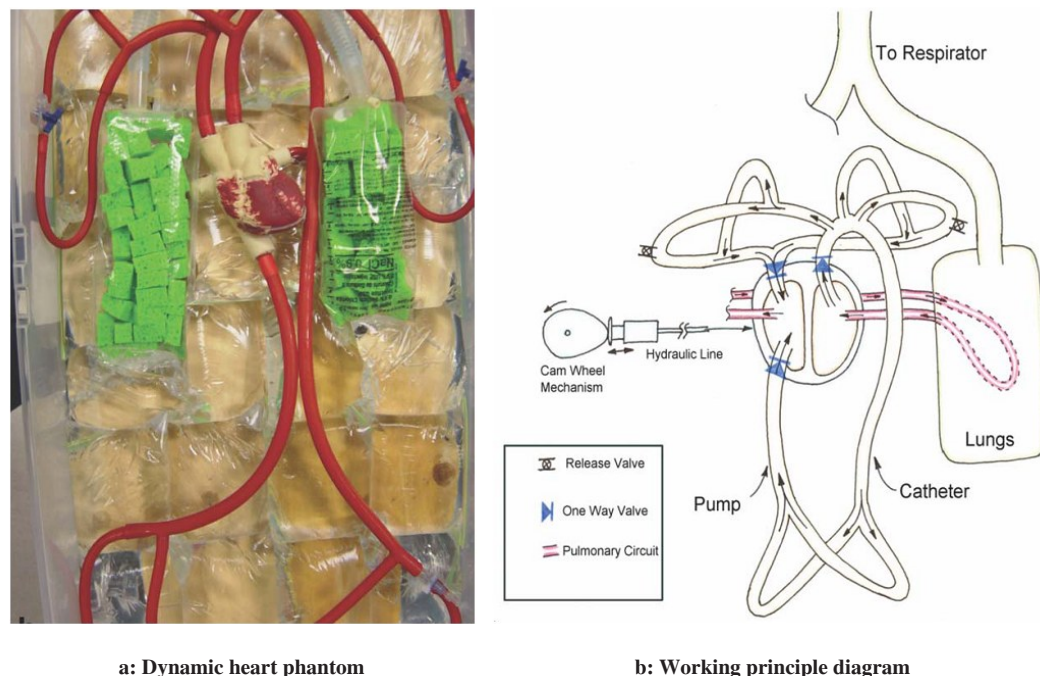


图7 模拟心脏、呼吸运动和血液流动的3D仿真体模
Fig.7 Three-dimensional simulation phantom for simulating cardiac motion, respiration motion and blood flow

统一标准,心肌、心包和瓣膜等结构组织更鲜少模拟,同时内部结构的细节无法与现有的高精度仿人体辐照体模相比。组织材料方面,等效材料的选择直接影响体模所成图像的质量,上述功能型和仿真型体模大多采用硅橡胶或聚乙烯醇等复合材料制作心脏,虽具有较好的生物力学特性,但未能充分考虑有效原子系数、电子密度和辐射的等效性,而对于模拟血管的弹性模量和模拟其他心脏部位材料的选择至今几乎无据可依。运动特性方面,早期的动态心脏体模已具有心电门控技术,运动型动态心脏体模部分实现了心脏四维运动的仿真,功能型动态心脏体模能够设置不同心率和每搏输出量等功能参数,而仿真型动态心脏体模还能模拟不同心室容积的变化,但各类动态心脏体模却互不相同,互不兼容,无法真实复现心脏和冠状动脉在机械运动和血流动力学方面特性。综上所述,现有动态心脏体模尚无法满足质量控制检测的技术标准,在正常和病理模型影像学计量特征方面更待进一步标准化。

“中国模拟人之父”林大全教授^[24]早期成功研制了一套具有组织等效性的全身辐照体模,已广泛应用于放疗过程中的剂量验证。本研究在其基础上,成功合成了具有一定弹性和组织等效性的心脏体模材料,采用三维打印技术研制了一系列模拟不同狭窄程度的冠状动脉体模,并利用GE公司研制的动力装置,针对各厂家的中高端CT开展了冠状动脉成像后处理软件功能符合性评价研究,已初步建立了临

床应用软件符合性评价方法^[25]。针对运动特性的问题,有望结合医学影像技术与人工智能图像处理技术,通过图像分割心脏R-R间期内多个时相4个心腔并计算其容积^[26],或者直接估算R-R间期内多个时相4个心腔容积^[27-28],建立各腔室的时间-容积变化的数学模型,改进现有动态心脏体模模拟全期相运动的特性,以探究研制一种“结构仿生、运动仿真”动态心脏体模的可行性,从而为建立心脏CT成像质量定量评价标准提供理论依据和技术支撑,并进一步补充完善现有数字诊疗装备质量控制中的不足,提升我国重大数字诊疗装备质量控制和安全保障能力。

【参考文献】

- [1] MOZAFFARIAN D, BENJAMIN E J, GO A S, et al. Heart disease and stroke statistics-2016 update [J]. Circulation, 2016, 133(4): e38-e360.
- [2] 戴汝平. 心血管影像学新发展对“金标准”的挑战[J]. 中华放射学杂志, 1997, 31(2): 4-5.
DAI R P. The challenge of new development of cardiovascular imaging for gold standard [J]. Chinese Journal of Radiology, 1997, 31(2): 4-5.
- [3] LEE Y J, LIM Y S, LIM H W, et al. Diagnostic accuracy of 64-slice multidetector CT angiography for detection of in-stent restenosis of vertebral artery ostium stents: comparison with conventional angiography [J]. Acta Radiol, 2014, 55(8): 1000-1007.
- [4] ANDREINI D, PONTONE G, MUSHTAQ S, et al. Diagnostic accuracy of multidetector computed tomography coronary angiography in 325 consecutive patients referred for transcatheter aortic valve replacement [J]. Am Heart J, 2014, 168(3): 332-339.
- [5] LEE A M, BEAUDOIN J, ENGEL L, et al. Assessment of image

- quality and radiation dose of prospectively ECG-triggered adaptive dual-source coronary computed tomography angiography (cCTA) with arrhythmia rejection algorithm in systole *versus* diastole: a retrospective cohort study[J]. *Int J Cardiovasc Imag*, 2013, 29(6): 1361-1370.
- [6] BERGER-KULEMANN D V, SCHÖPF V. Dual-source cardiac computed tomography angiography (CCTA) in the follow-up of cardiac transplant: comparison of image quality and radiation dose using three different imaging protocols[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(8): 2310-2317.
- [7] 李鹏雨, 李坤成. 多层螺旋CT冠状动脉成像技术原理与应用进展[J]. *中国医疗设备*, 2008, 23(10): 152-156, 140.
- LI P Y, LI K C. Technology and application of multislice CT coronary artery imaging[J]. *China Medical Devices*, 2008, 23(10): 152-156, 140.
- [8] IEC 1223-2-6. Constancy tests X-ray equipment for computed tomography[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 1994: 11-37.
- [9] KOPPA F, OHNESORGE B, BECKER C, et al. Reproducibility and accuracy of coronary calcium measurements with multi-detector row *versus* electron-beam CT[J]. *Radiology*, 2002, 225(1): 113-119.
- [10] BASSINGTHWAIGHTE J B. Design and strategy for the Cardionome Project[J]. *Adv Exp Med Biol*, 1997, 430(430): 325-339.
- [11] 张璞, 万国庆, 孙劼. 简述动态心脏模体在医学成像中的应用[C]//全国射线数字成像与CT新技术研讨会论文集, 2014.
- ZHANG P, WAN G Q, SUN J. The application of dynamic heart phantom in medical imaging[C]//Proceedings of the symposium on new technology of digital imaging and CT, 2014.
- [12] MOREHOUSE C C, BRODY W R, GUTHANER D F, et al. Gated cardiac computed tomography with a motion phantom[J]. *Radiology*, 1980, 134(1): 213-217.
- [13] HORIGUCHI J, NAKANISHI T, TAMURA A, et al. Technical innovation of cardiac multirow detector CT using multisector reconstruction[J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2002, 26(4): 217-226.
- [14] WICKY S, ROSOL M, HAMBERG L M, et al. Evaluation of retrospective multisector and half scan ECG-gated multidetector cardiac CT protocols with moving phantoms[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2002, 26(5): 768-776.
- [15] BEGEMANN P G, VAN STEVENDAAL U, MANZKE R, et al. Evaluation of spatial and temporal resolution for ECG-gated 16-row multidetector CT using a dynamic heart phantom[J]. *Eur Radiol*, 2005, 15(5): 1015-1026.
- [16] 陈圆圆. 新型心脏动态体模的设计与临床应用[D]. 泰安: 泰山医学院, 2009.
- CHEN Y Y. Design and clinical application of a new dynamic heart phantom[D]. Tai'an: Taishan Medical University, 2009.
- [17] VISSER J J, SOKOLE E B, VERBERNE H J, et al. A realistic 3-D gated heart phantom for quality control of gated myocardial perfusion SPET: the Amsterdam gated (AGATE) heart phantom[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2004, 31(2): 222-228.
- [18] HORIGUCHI J, SHEN Y, AKIYAMA Y, et al. Electron beam CT *versus* 16-MDCT on the variability of repeated coronary artery calcium measurements in a variable heart rate phantom[J]. *Am J Roentgenol*, 2005, 185(4): 995-1000.
- [19] CHRYSANTHOU-BAUSTERT I, POLYCARPOU I, DEMETRIADOU O, et al. Characterization of attenuation and respiratory motion artifacts and their influence on SPECT MP image evaluation using a dynamic phantom assembly with variable cardiac defects[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(2): 698-707.
- [20] NARIHIRO H, MASAHISA O, OSAMU H, et al. Development of a 2-layer double-pump dynamic heart phantom[J]. *J Nucl Med Technol*, 2016, 44(1): 31-35.
- [21] WOOD P W, GIBSON P H, BECHER H. Three-dimensional echocardiography in a dynamic heart phantom: comparison of five different methods to measure chamber volume using a commercially available software[J]. *Echo Res Pract*, 2014, 1(2): 51-60.
- [22] SWAILES N E, MACDONALD M E, FRAYNE R. Dynamic phantom with heart, lung, and blood motion for initial validation of MRI techniques[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2011, 34(4): 941-946.
- [23] COHRS N H, PETROU A, LOEPFE M, et al. A soft total artificial heart-first concept evaluation on a hybrid mock circulation[J]. *Artif Organs*, 2017, 41(10): 948-958.
- [24] 林大全. 中国第一具仿真辐照体模研制与医学应用[C]. 中国生物医学工程学会医学物理学学术年会, 1991.
- LIN D Q. Development and medical application of the first anthropomorphic radiant phantom in China[C]. Academic Annual Conference of Chinese Society of Biomedical Engineering, 1991.
- [25] 赵鹏, 郎朗, 潘文才, 等. 基于动态心脏体模的冠脉CTA成像后处理软件质量评估[C]. 中国医学装备协会第二十五届学术年会, 2016.
- ZHAO P, LANG L, PAN W C, et al. Evaluation of the quality of coronary CT angiography imaging post-processing software used a dynamic heart phantom[C]. The 25th Academic Annual Conference of Chinese Medical Equipment Association, 2016.
- [26] ABADI S, ROGUIN A, ENGEL A, et al. Feasibility of automatic assessment of four-chamber cardiac function with MDCT: initial clinical application and validation[J]. *Eur J Radiol*, 2010, 74(1): 175-181.
- [27] LUO G, SUN G, WANG K, et al. A novel left ventricular volumes prediction method based on deep learning network in cardiac MRI[C]. Computing in Cardiology Conference, 2017.
- [28] ZHEN X T, ZHANG H Y, ISLAM A, et al. Direct and simultaneous estimation of cardiac four chamber volumes by multioutput sparse regression[J]. *Med Image Anal*, 2017, 36: 184-196.

(编辑: 谭斯允)