

## ·医学影像学技术·

## 基于非均匀有理 B 样条的四维心脏-躯干体模及其在医学影像研究中的应用

李崇国 吴大可 郎锦义

**【摘要】**在医学影像研究中,新的医学影像研究工具模拟方式的作用日益重要。基于非均匀有理 B 样条的四维心脏-躯干(4D NCAT)体模是在成像处理时,采用影像处理精确模型就能够提供来自受试者不同解剖部位的成像数据。4D NCAT 已广泛用于 SPECT、PET、CT 等医学影像研究,并已用于调强放射治疗四维逆向计划系统。

**【关键词】**体层摄影术,发射型计算机,单光子;体层摄影术,X线计算机;体模,显像术;计算机模拟

**The four-dimensional non-uniform rational B-splines-based cardiac-torso phantom and its application in medical imaging research**

Li Chong-guo, WU Da-ke, LANG Jin-yi

(Department of Radiation Oncology, Sichuan Cancer Hospital, Chengdu 610041, China)

**【Abstract】** Simulation skill is playing an increasingly important role in medical imaging research. four-dimensional non-uniform rational B-splines-based cardiac-torso (4D NCAT) phantom is new tool for medical imaging research and when combined with accurate models for the imaging process a wealth of realistic imaging data from subjects of various anatomies. Can be provided 4D NCAT phantoms have been widely used in medical research such as SPECT, PET, CT and so on. 4D NCAT phantoms have also been used in inverse planning system of intensity modulated radiation therapy.

**【Key words】** Tomography, emission-computed, single-photon; Tomography, X-ray computed; Phantoms, imaging; Computer simulation

在医学影像研究中,对描述、评估和优化医学成像体系来说,模拟是一个极有价值的工具,其作用也越来越重要。模拟包括计算机产生的体模、成像过程的模拟、快速解算方法等。而在医学影像研究和开发中,对理论推导、实验方式和临床研究来说,体模已经成为一个重要而不可或缺的补充。现将基于非均匀有理 B 样条(non-uniform rational B-splines, NURBS)曲面构建的四维 NURBS 心脏-躯干(four-dimensional NURBS-based cardiac-torso, 4D NCAT),体模在医学领域中的应用作一综述。

## 1 4D NCAT 体模

数字人体模型大致可以划分为三类<sup>[1]</sup>。第一类

模型称为程式化模型,主要用于辐射防护的目的;第二类模型是基于体层图像模型,器官通过真实的体层图像经图像分割和标识产生;第三类模型是基于混合方程的体素模型,器官边界利用数字定义的方法从体素数据中提取,并通过数学方法进行还原,具有器官真实性特征和数据量小、延伸到四维以及简单方便的特性<sup>[1]</sup>。第三类模型综合了第一类模型和第二类模型的优点,器官的形状比第一类模型更加真实,且保持了解剖结构及器官运动的灵活性。第三类的初期研究工作是利用约翰霍普金斯大学 Segars<sup>[2]</sup>的 4D NCAT 模型和美国仁斯里尔大学的徐榭等<sup>[3]</sup>的可视人模型来进行的。

4D NCAT 体模是 Segars 等研制的数字体模(图 1,图 2),属于第三类模型。4D NCAT 体模是一个基于像素体模真实性和几何学体模灵活性的杂交体。最初,4D NCAT 体模是为低分辨率核医学成像研究(尤其是 SPECT 和 PET)以及缺乏所需解

基金项目:四川省科技厅应用基础项目(07JY029-061)

作者单位:610041 成都,四川省放射肿瘤学重点学科,四川省肿瘤医院放疗中心

通信作者:郎锦义(E-mail:langjy@tfol.com)

剖细节的高分辨率成像方式(如CT)而设计,提供了一个真实而灵活的人体解剖和生理学模型,为早期的数学心脏-躯干仿真模型带来了多方面改进。把心脏和呼吸的精确模拟整合入当前的4D NCAT模型中是一个重大的阶段。在NCAT体模中,使用来自美国国家医学图书馆的三维可视人(正常男性和女性人体完整而解剖细节详细的三维表现)男性解剖数据集作为NCAT的基础,用NURBS曲面构建体模内器官的形状,加上成像过程的精确模拟,可以把NCAT体模延伸为4D NCAT,以模拟常见患者的运动如心脏和呼吸运动(图1,图2)。4D NCAT体模所采集的MRI和CT数据都是来自于正常男性志愿者。

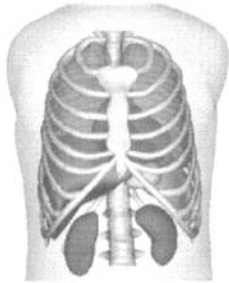


图1 基于非均匀有理B样条的四维心脏-躯干体模肺的冠状面

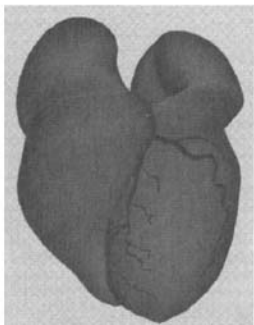


图2 基于非均匀有理B样条的四维心脏-躯干体模心脏冠状面

由于4D NCAT体模的基础是基于人体的数据和曲面基元的内在灵活性,所以在模拟解剖变化和患者运动方面,可以提供一个真实而灵活的人体解剖模型。把显像过程的精确模拟与计算机产生的体模相结合、NURBS曲面与实际患者的数据相对应,使体模非常接近正常人体的解剖结构以及心脏和呼吸运动,它能够模拟接近于实际患者的多种形式的成像数据,所以计算机产生的体模比基于固体几何

学的体模更加真实。另外,NURBS基元给予体模一个数学基础,从而使得体模非常灵活。通过仿射和其他转换很容易改变NURBS曲面,用以逼真地模拟解剖变化和患者的运动。

4D NCAT体模不像当前用于CT中的计算机体模,其设计上的优点是能够改变它的器官形状而真实地模拟不同的解剖变化和患者的运动。当前,已经更新了4D NCAT体模的解剖和生理,使其包含了高分辨率CT研究所需要的细节层次。另外,研制出了CT过程中更先进的模型,以产生与实际患者影像十分相似的体模CT影像。

## 2 4D NCAT体模在医学中的应用

### 2.1 4D NCAT体模用于SPECT研究

在心肌SPECT中,呼吸运动能够引起伪影,伪影能导致心脏疾病的错误诊断,但通过呼吸门控可以校正呼吸伪影。Segars等<sup>[2]</sup>用4D NCAT体模的模拟来验证呼吸门控的效果:在一个呼吸周期(5s/周期),用4D NCAT体模产生了128个体模,把体模的横膈和心脏从吸气末到呼气末的运动幅度设为4cm,心动频率设为1次/s,呼吸周期分为不同的呼吸门控次数(16, 8, 4),对每个门控,用分析投影算法模拟衰减、散射和探测器反应的3个效应,得到投影数据,然后用有序子集最大期望值(ordered-subset expectation maximization, OS-EM)法和迭代算法补偿3个效应以重建投影,结果表明,呼吸门控是一种有效的方式,而对于减少影像伪影来说,呼吸门控的时机则依赖于呼吸期间心脏运动的幅度。

人们已经发现一种自动从门控SPECT上量化左心室功能的方式,其根据心脏的形状模型和主动的成形算法来量化左心室功能。该模型包含了左心室形状变异的统计学信息。Lomsky等<sup>[4]</sup>用4D NCAT体模和蒙特卡罗法模拟研究在心脏功能测定与数字体模的左心室容积之间的差异,结果示舒张末期容积的差异是11ml,收缩末期容积的差异是3ml,而射血分数的差异是3%。核医学诊断严重依赖于病变中<sup>99m</sup>Tc标记的红细胞的特征性的时间吸收。动态SPECT是一种独特的重建方式,它能够产生三维影像的时间系列,可改进当前用于捕获动态行为的二维平面成像。Luyt等<sup>[5]</sup>用数字4D NCAT体模的蒙特卡罗模拟产生640个有或没有散

射的投影,模拟人体躯干,并产生器官内的衰减图和放射性分布的三维体素图。Lorena等<sup>[6]</sup>用4D NCAT2.0数字体模来模拟影像,用于生物医学影像的软性对准算法的实施和评估中。而Smyczynski等<sup>[7]</sup>将关于肺内呼吸运动的信息与4D NCAT体模相结合,用于模拟单个肺部结节的呼吸运动,以探讨SPECT肿瘤显像时呼吸运动的影响。Lee等<sup>[8]</sup>用4D NCAT体模研究了不同门控方案和图像重建方式获得的心脏SPECT影像中对心脏门控的影响,认为4D NCAT体模是改进门控心脏SPECT的有用工具。

为评估肥胖患者的门控SPECT处理的四维重建方式,Sayeram等<sup>[9]</sup>用OS-EM方法和四维重刻度区块迭代最大后验法(rescaled block iterative-maximum a posteriori)重建算法重建临床门控SPECT投影数据,用数据导出不同器官的定量替曲膈吸收比的相对分布,用人体测量数据决定标准肥胖男性和女性4D NCAT体模机体大小,通过肥胖体模模拟替曲膈吸收比产生投影数据,模拟泊松噪声,重建噪声数据;在定性方面,四维处理方式明显改进心脏运动可视化。结果认为,4D NCAT体模是计算机化体模,它包括了心脏和呼吸运动的模型,能够模拟心肌灌注运动缺陷、不同器官和身体的大小,能修正放射性吸收比和衰减贴图,因此4D NCAT体模为研究者测试不同重建方式和其他参数提供了一个金标准。

为评价一种探测和定量SPECT心肌灌注时系列改变的新算法的精确性,Faber等<sup>[10]</sup>用4D NCAT体模产生了72个不同左心室位置、大小、计数比和灌注缺陷严重性的模拟。他们用全线性和刚性转换自动对准图像,用西达-埃默里(cedars-ernory, CE)图像质量程序对灌注实行定量,用 $t$ 检验比较在配准前和配准后的一个特定的灌注缺陷内的改变,用接收器运作特征分析比较配准方式。

4D NCAT体模的一个限制就是它不能精确模拟来自于心脏病(如冠状动脉疾病)的心脏功能变化。Veress等<sup>[11]</sup>为了增强4D NCAT体模的功能,在生理学上通过把左心室的有限元素力学模型融入4D NCAT体模的心脏模型,模拟正常和异常的心脏运动,以探讨SPECT心内膜下和透壁性心肌梗死之间收缩功能的差异。对异常的心脏运动来说,与原来的4D NCAT跳动的心脏模型相比较,有限

元素力学模型产生更加精确的模拟结果。当4D NCAT体模与这种模型相结合,就可以评估和改进心脏疾病的四维显像技术,因而4D NCAT体模用于心脏成像研究中的潜力很大。

## 2.2 4D NCAT体模用于PET研究

在PET中,由于偏离衰减校正因子导致伪影和定量误差,因而潜在地产生不准确的解释和(或)不正确的临床决定。用传统的PET时,来自偏离散射扫描的伪影是常见的。在PET-CT中,对失准和(或)伪影来说,因为CT是呼吸周期的快照,而PET是采自多个呼吸周期,所以进一步增加了产生伪影的可能。为了自动排列衰减和散射数据,Alessio等<sup>[12]</sup>用4D NCAT体模的无噪音PET模拟测量瞄准基线程序,产生了呼吸周期的整个吸气时相和呼气时相的散射数据,用来自于这个呼气的散射数据对准整个吸气的衰减图像,结果对准衰减图像减少了心肌中的数个伪影。

在心脏PET中,呼吸导致的器官运动是一个主要的挑战。Gorji等<sup>[12]</sup>用4D NCAT体模产生的四维普通男性躯干来模拟,用迭代算法重建“幻像”(eidolon)PET模拟器产生的发射弦波图,比较横截面图、活动轮廓、噪声比、校正和未校正影像的左心室心肌宽度,以探讨所用校正的效果,结果认为,在PET心脏图像上,呼吸运动校正有好的整体效果,能够减少横膈运动和变形所致的误差。

## 2.3 4D NCAT体模用于SPECT-CT研究

Lee等<sup>[13]</sup>用4D NCAT体模和蒙特卡罗模拟法开发和验证了一个模拟数据集,用于心脏和呼吸门控SPECT-CT:为了同时包括心脏和呼吸运动,产生了不同的呼吸和心脏门控时帧组合的3D NCAT体模,用24帧/心动周期的3D NCAT体模模拟除心脏外的机体的呼吸运动,用48帧/心动周期的3D NCAT体模模拟跳动的的心脏,然后用长蒙特卡罗模拟得到几乎无噪音投射数据集,以模拟<sup>99m</sup>Tc-甲氧基异丁基异腈心肌灌注SPECT,结果表明,4D NCAT体模能模拟双重心脏和呼吸运动,为心脏和呼吸门控方案的开发、图像重建和研究运动校正方式的最佳参数提供了一个有力的工具。

## 2.4 4D NCAT体模用于PET-CT融合研究

为利用来自于非刚性转换的三维CT数据的衰减图来改进基于CT的三维PET数据的衰减校正,Segars等<sup>[15]</sup>利用有仿真呼吸模型(基于高分辨呼吸

门控 CT 数据) 的 4D NCAT 体模在单一呼吸控制期间获得三维 CT 数据, 并与更长采集时间和多个呼吸周期获得的同一个患者的三维 PET 发射数据相匹配, 用 4D NCAT 体模呼吸模型转换变形三维 NCAT 体模, NCAT 的其他器官遵循四维呼吸模型提供的相应转换, 然后把转换应用于三维 CT 图像, 以形成用于衰减校正的衰减图, 结果: NCAT 呼吸模型达到三维 CT 和 PET 数据传输的极好的配准, 改进的 PET-CT 融合提供了更加精确的衰减图。作者认为, 有呼吸运动的仿真模型的 4D NCAT 体模是一个极有用的工具。

在 PET 影像中, 呼吸运动导致的影像质量下降和伪影是腹部和胸部研究时解释和正确量化的一个重要的误差源。为了产生呼吸运动补偿的影像, Rubio-Guivernau 等<sup>[16]</sup> 将超分辨率技术应用于呼吸门控 PET, 把所提供的信息整合进入所获得的所有门控图像中, 用模拟的 PET-CT 评估所提出的算法在同一时间模拟呼吸运动时, 4D NCAT 体模产生了仿真活力分布, 同时也产生了线性衰减系数影像。

### 2.5 4D NCAT 体模应用于 CT 研究

4D NCAT 体模应用于高分辨成像时缺乏解剖细节, 当描述因解剖变化和正常生理运动所致的实际人体器官的复杂的形状变形时缺乏足够的现实性和灵活性。为有效地模拟高分辨 CT, Segars 等<sup>[17]</sup> 通过现存的 4D NCAT 体模开发了一种新的解析投影算法, 以精确计算直接来自没有体素化的体模曲面定义的投影(并行、扇形、锥形几何), 然后用为 CT 投射影像的扇形和锥形束重建推导的算法重建这些投影数据, 结果认为, 由于 CT 向容积测定和动态成像方向发展, 在研究机体和测量仪器因素对 CT 的影响、图像采集策略、图像处理和重建方式、图像可视化和解释技术方面, 这些模拟工具有巨大的应用潜力。

4D NCAT 体模增强的解剖和生理将为高分辨成像研究提供一个重要的工具。Segars 等<sup>[18]</sup> 用爱荷华大学 Eric Hoffman 博士的基于呼吸门控 CT 数据灵活的参数化的呼吸模型来模拟 4D NCAT 体模的呼吸运动, 通过分析患者数据得到 4D NCAT 体模更加逼真的呼吸运动, 分析结果认为, 4D NCAT 体模能够模拟呼吸运动中的变化, 将成为研究呼吸运动对医学成像的影响以及开发补偿那些效应方式的更大的资源。

为探索数据采集的最佳时间分辨率, Segars 等<sup>[19]</sup> 使用 4D NCAT 体模研究了用多层螺旋 CT 获得冠状动脉影像时, 心率对图像质量和伪影产生的影响。在这个研究中, 他们更新了 4D NCAT 体模心脏模型, 使其包括更详细的基于高分辨临床门控多层螺旋 CT 数据的解剖和生理学, 把增强功能的 4D NCAT 体模用于飞行员模拟研究, 以探讨心率先对 CT 的影响; 用 4D NCAT 来模拟已知冠状动脉内的斑块大小和位置、心率不同(60~120 次/min)的患者, 用投影数据重建 CT, 测定斑块的差异, 以评估心率的影响, 并决定每种情况所要求的最佳的时间分辨率。结果认为, 4D NCAT 体模对心脏运动的现实性模拟提供了一个有价值的工具。

### 2.6 4D NCAT 体模用于调强放射治疗研究

呼吸运动所致调强放射治疗的质量变化能够通过传统线性加速器上的多叶准直器动态靶向追踪来校正。McQuaid 等<sup>[20]</sup> 提出一种新的程序: 用四维直接优化子野法把组织和输出设备的运动整合入治疗优化中, 这个程序能够优化四维患者模型的静态或动态输出。这个研究在 4D NCAT 体模上实施, 在四维患者模型上重复, 通过重新计算四维模型所有时相的剂量, 评估 4D NCAT 体模上静态计划的运动影响, 并用 4D NCAT 体模数据和四维患者数据证明了四维逆向计划系统。

## 3 结语

综上所述, 在医学影像研究中, 模拟方式的作用越来越重要。在模拟研究中, 使用计算机模拟体模的一个主要优点是体模的精确的解剖和生理功能是已知的。4D NCAT 体模已经并且将不断被应用于 SPECT、PET 和 CT 等医学影像研究中, 为研究影像上的解剖和患者运动的影响提供了一个极好的工具, 并为评估和改进医学成像设备、图像采集策略、采集技术、图像处理和重建方式、图像可视化和解释技术提供了一个金标准。可以预见, 随着体模研究的进一步深入, 数字体模将会在医学领域中得到更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 张居营, 徐榭, 石成玉. 四维动态数字人体模型的开发及其在放疗计划中评估器官呼吸运动影响的研究 [J]. 中国医学影像技术, 2006, 22(9): 1301-1305.
- [2] Segars WP, Tsui BMW. Study of the efficacy of respiratory gating in

- myocardial SPECT using the new 4D NCAT phantom [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2001, 3: 1536-1539. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F7884%2F21744%2F01008630.pdf%3Farnumber%3D1008630&authDecision=-203>.
- [3] 徐榭, 赵自强, 石成玉, 等. 基于美国可视人项目图像的成年男子解剖模型及其在医学虚拟仿真上的应用 [J]. 中国基础科学, 2002, (6): 25-30.
- [4] Lomsky M, Richter J, Johansson L, et al. A new automated method for analysis of gated-SPECT images based on a three-dimensional heart shaped model [J]. Clin Physiol Funct Imaging, 2005, 25(4): 234-240.
- [5] Luyt N, Wells RG. Imaging of hepatic hemangiomas using multi-rotation dynamic SPECT [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2003, 4: 2932-2936. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9356%2F29716%2F01352498.pdf&authDecision=-203>.
- [6] Lorena S Correa Prado, E Andrés Valdez Díaz, Raúl Romo. Elastic models application for thorax image registration [J/OL]. J Phys: Conf Ser, 2007, 1-9. <http://www.iop.org/EJ/abstract/1742-6596/90/1/012055>.
- [7] Smyczynski MS, Segars WP, Narayanan MV, et al. Modeling the respiratory motion of solitary pulmonary nodules for investigating SPECT tumor imaging [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2001, 3: 1371-1375. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F7884%2F21744%2F01008592.pdf&authDecision=-203>.
- [8] Lee TS, Segars WP, Tsui BMW. A study of the effect of cardiac gating in myocardial SPECT using the 4D NCAT [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record IEEE Xplore, 2003, 4: 2681-2685. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9356%2F29716%2F01352440.pdf&authDecision=-203>.
- [9] Sayeram S, Lalush DS. Performance evaluation of 4D reconstruction methods for gated cardiac single photon emission computed tomography in obese patients [J/OL]. Comput Cardiol, 2007, 34: 371-374. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?isnumber=4745405&arnumber=4745499&count=217&index=93](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=4745405&arnumber=4745499&count=217&index=93).
- [10] Faber TL, Modersitzki J, Folks RD, et al. Detecting changes in serial myocardial perfusion SPECT: a simulation study [J]. J Nucl Cardiol, 2005, 12(3): 302-310.
- [11] Veress AI, Segars WP, Weiss JA, et al. Normal and pathological NCAT image and phantom data based on physiologically realistic left ventricle finite-element models [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2006, 25(12): 1604-1616.
- [12] Alessio A, Caldwell J, Chen G, et al. Attenuation-emission alignment in cardiac PET/CT with consistency conditions [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2006, 6: 3288-3291. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?isnumber=4179711&arnumber=4179752&count=170&index=30](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=4179711&arnumber=4179752&count=170&index=30).
- [13] Kourosh Ebrahim Nejad Gorji, Hossein Rajabi, Ebrahim Hajizadeh, et al. Reducing the respiratory motion artifacts in PET cardiology: a simulation study [J/OL]. Iran J Nucl Med, 2007, 15(2): 49-57. [http://journals.tums.ac.ir/abs.aspx?tums\\_id=6125](http://journals.tums.ac.ir/abs.aspx?tums_id=6125).
- [14] Taek-Soo Lee, Segars WP, Tsui BMW. The development and application of a realistic simulation dataset for simultaneous cardiac and respiratory gated ECT/CT [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2007, 5: 3656-3659. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4436263/4436808/04436914.pdf?arnumber=4436914>.
- [15] Segars WP, Tsui BMW, Da Silva AJ, et al. CT-PET image fusion using the 4D NCAT phantom with the purpose of attenuation correction [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2002, 3: 1775-1779. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?isnumber=27794&arnumber=1239666&count=128&index=35](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=27794&arnumber=1239666&count=128&index=35).
- [16] Rubio-Guivernau JL, Ledesma-Carbayo MJ, Lamare F, et al. Respiratory motion correction in PET with super-resolution techniques and non-rigid registration [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, NSS '07. IEEE Xplore, 2007, 5: 3560-3563. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=4436895](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4436895).
- [17] Segars WP, Tsui BMW, Frey EC, et al. Extension of the 4D NCAT phantom to dynamic X-ray CT simulation [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Xplore, 2003, 5: 3195-3199. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9356%2F29717%2F01352577.pdf%3Farnumber%3D1352577&authDecision=-203>.
- [18] Segars WP, Mori S, Chen CTY, et al. Modeling respiratory motion variations in the 4D NCAT phantom [J/OL]. Nuclear Science Symposium Conference Record, NSS apos, '07. IEEE Xplore, 2007, 4: 2677-2697. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4436263%2F4436631%2F04436697.pdf%3Farnumber%3D4436697&authDecision=-203>.
- [19] Segars WP, Taguchi K, Fung GSK, et al. Effect of heart rate on CT angiography using the enhanced cardiac model of the 4D NCAT [J/OL]. Proc SPIE, 2006, 6142: 164-172. <http://spiedigitallibrary.org/Getabs/Servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PSISDC00614200001614201000001&idtype=cvips&gifs=yes>
- [20] McQuaid D, Webb S. Target-tracking deliveries using conventional multileaf collimators planned with 4D direct-aperture optimization [J]. Phys Med Biol, 2008, 53(15): 4013-4029.