

生物电阻抗测量技术研究与应用

裴飞霸, 张和华, 尹 军

第三军医大学大坪医院野战外科研究所医学工程科, 重庆 400042

【摘要】目的:生物电阻抗法是生物医学检测的基本方法,利用人体组织与器官的电特性及其变化规律提取与人体生理、病理状况相关的生物医学信息的检测技术,具有无创、无害、廉价、操作简单和功能信息丰富的特点,而且测量结果准确、测量可重复性高等优点。所以,基于生物电阻抗的医学检测技术越来越多的应用于研究与临床中。**方法:**本文阐述了生物电阻抗法用于生物医学检测的几个方面,即电阻抗式呼吸监测、阻抗血流图、生物电阻抗法人体成分检测、生物电阻抗法胃动力学检测、生物电阻抗法人体心肺复苏评估、电阻抗断层成像技术等。**结果:**虽然生物电阻抗法测量影响因素很多,包括电极极化和人体接触阻抗、系统电极间相对固定的位置等系统电极的影响;运动对生物电阻抗法的影响、人体测量时食物的摄入量、人体测量时姿势的变化等受测者的测量时状态对测量结果的影响。但是,生物电阻抗法在生物医学测量中依然占有重要的地位。**结论:**生物电阻抗法是生物医学检测的基本方法。通过本文的综述对于我们借助于生物电阻抗测量测量人体生理及病理信息具有具有的借鉴意义。

【关键词】生物电阻抗法; 测量系统; 人体成分; 心肺复苏

【DOI 编码】doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.02.019

【中图分类号】R318 **【文献标识码】**A **【文章编码】**1005-202X(2015)02-0234-05

Research and Applications of Electrical Bioimpedance Measurement Technology

CHANG Fei-ba, ZHANG He-hua, YIN Jun

Department of Medical Engineering, Institute of Surgery Research, Daping Hospital, The Third Military Medical University, Chongqing 400042, China

Abstract: Objective Bioelectrical impedance method is the basic method for biomedical detection, with electrical properties and the change law of the body's tissues and organs, the detection technology collects biomedical information related to human physiological and pathological conditions. It is noninvasive, harmless, cheap, simple to operate and informative. It also has advantages of accurate measured results and high measurement repeatability. Therefore, medical detection based on bioelectrical impedance technology is increasingly used in the research and clinical. **Methods** This paper describes the application of bioelectrical impedance detection method in biomedical aspects, i.e. electrical impedance respiration monitoring, impedance of blood flow, bioelectrical impedance body composition detection, bioelectrical impedance method to detect stomach dynamics, bioelectrical impedance method to assess human cardiopulmonary resuscitation and electrical impedance tomography technology. **Results** Although there are many influencing factors using bioelectrical impedance measurement method, including electrodes system such as the electrode polarization and the body contact between the electrode impedance, the system of relatively fixed position system; And measurement time state influence on measurement results such as impact of exercise on bioelectrical impedance method, the influence of anthropometric when food intake, the body posture change when measurement. However, bioelectrical impedance analysis in biomedical measurements still occupies an important position. **Conclusion** Bioelectrical impedance method is the basic method for biomedical detection. This article reviews for us having the significance on measuring the human body physiological and pathological information by bioelectrical impedance measurement.

Key words: bioelectrical impedance analysis; measurement system; human body composition; cardiopulmonary resuscitation

【收稿日期】2014-12-10

【基金项目】全军医学科技青年培育项目(13QN120)

【作者简介】裴飞霸(1985-),男,硕士,主要研究方向:生物医学信号检测、传输及信息编码技术研究。E-mail: chang573788260@163.com。

【通信作者】尹 军(1968-),女,高级工程师,主要研究方向:医学仪器管理与研发。E-mail: gaiety@126.com。

前言

生物电阻抗提供了一种相对比较简便的生物医学检测方法,它是利用人体组织与器官的电特性及其变化规律提取与人体生理、病理状况相关的生物医学信息的检测技术,具有无创、无害、廉价、操作简单和

功能信息丰富的特点,而且测量结果准确、测量可重复性高等优点。

基于生物电阻抗的医学检测技术越来越多的应用于研究与临床中,主要是由于人体的电阻抗特性和生物电阻抗法的原理所决定的。当人体通过不同频率的交流电流时候,随着频率的不同,所穿透人体组织深度也不同,并且不同人体组织表现为不同的电阻抗特性,所以可以根据这个特性来测量人体组织与器官的生理、病理信息;同时,由于生物电阻抗法测量系统多样性,所以在对人体某一具体部位成分进行测量时,要根据实际需要选择最佳的测量系统、构建合适的数学模型和采用最佳的设计测量方案。虽然生物电阻抗法测量影响因素很多,包括电极极化和人体接触阻抗、系统电极间相对固定的位置等系统电极的影响;运动对生物阻抗法的影响、人体测量时食物的摄入量、人体测量时姿势的变化等受测者的测量时状态对测量结果的影响。但是,生物电阻抗法在生物医学测量中占有重要的地位。

本文阐述了生物电阻抗法生物医学检测的几个方面的应用,即电阻抗式呼吸监测、阻抗血流图、生物电阻抗法人体成分检测、生物电阻抗法胃动力学检测、生物电阻抗法人体心肺复苏评估、电阻抗断层成像技术等。通过本文的综述对于我们借助于生物电阻抗测量人体生理及病理信息具有的借鉴意义。

1 生物电阻抗测量系统

基于生物电阻抗法的人体测量系统,在不同频段有不同的测量方法,用于不同部位时情况也稍不一样,但总体测量结构大致如图1所示。

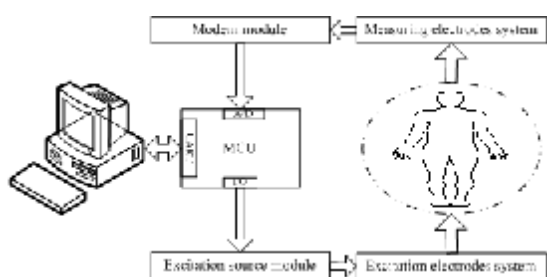


图1 生物电阻抗测量系统

Fig.1 Bioelectrical Impedance Measurement System

测量的关键在于电极系统的选择。根据采用的电极数目,可以把测量系统分为两电极、四电极、六电极和八电极等测量系统。合适的选择测量系统是测量不同身体部位的关键。而从测量时使用的频率和电子技术相关理论可以分为:单频测量方法、多频测量方法和复阻抗测量方法。

2 生物电阻抗测量技术应用

生物电阻抗法是生物医学测量的基本方法,基于生物电阻抗的医学检测技术越来越多的应用于研

究与临床中。目前,生物电阻抗法用于生物医学检测主要是电阻抗式呼吸监测、阻抗血流图、生物电阻抗法人体成分检测、生物电阻抗法胃动力学检测、生物电阻抗法人体心肺复苏评估、电阻抗断层成像技术等几个方面的应用。

2.1 电阻抗式呼吸监测

电阻抗呼吸监测是根据人体呼吸时胸腔的张弛会引起胸部组织电阻抗的变化,而胸部电阻抗的变化与肺容量的变化存在一定对应关系。所以可以通过测量呼吸时胸部电阻抗的变化来监测呼吸频率和呼吸波形等。电阻抗式呼吸监测测量系统(图2)普遍采用四电极,其中两个激励电极对称分置于胸腔两侧腋下中线肋骨之间的皮肤表面,而两个测量电极对称分置于激励电极在前胸体表的连线上,位于两激励电极内侧,分别于邻近激励电极保持适当距离,例如4 cm。

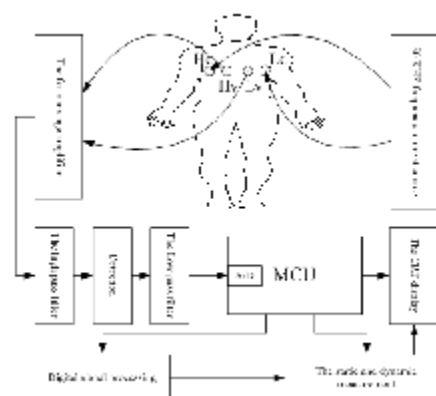


图2 电阻抗式呼吸监测系统

Fig.2 The Respiratory Monitoring System Based on Bioelectrical Impedance

由高频恒流源经激励电极给胸腔通以恒定高频电流,随着呼吸过程中胸部电阻抗的周期性变化,使两测量电极间的电压幅度发生相应变化,该高频电压信号经放大、检波和低通滤波等电路处理后,便可输出直接反映胸电阻抗变化的电压信号。该信号可经功率放大后推动记录仪描记出呼吸曲线,能反映受试者的呼吸频率和呼吸深度的动态变化。如果用呼吸流量计对个体受试者预先进行胸电阻抗变化与肺容量变化关系曲线的定量标定,则可利用预存于系统内的标定曲线对胸电阻抗变化信号标定而得到肺容量变化曲线,由此曲线可测量出呼吸的潮气量。

2.2 阻抗血流图

阻抗血流图即从体外反映血管容积随时间变化的电阻抗变化图,通过电阻抗变化图来检测组织器官内血液循环导致的生理、病理信息。测量的主要人体组织电阻抗参数有阻抗 Z 、阻抗变化量 ΔZ 、 dZ/dt 等。就其测量部位的不同可以分为心阻抗图(Impedance Cardiogram, ICG)^[1-3]、脑阻抗图(Impedance Encephalogram, IEG)^[4-6]、肺循环阻抗图(Impedance Pulmonary Rheogram, IPR)和肢体阻抗图等^[7-9]。心阻抗图主要研

究目标是心脏搏血,目前国内外计算心脏搏血输出量主要通过 Nyboer-Kbicek 公式计算,但是由于心脏搏血流入大、主动脉并不是全部用于扩大血管的截面积,有 43% 则通过小动脉和毛细血管流入腔动脉。所以,当基础阻抗 Z 过大或过小以及阻抗微分 dZ/dt 图的图形变异太大时,其测量误差就较大。所以,为精确计算心输出量 Sramek 提出了修正的锥台模型。脑阻抗血流图主要通过电阻抗式血管容积描记技术描记头部血管搏动性血容量改变及其机能状态的电阻抗图。它主要应用于诊断脑动脉硬化、血管性头痛以及闭塞性脑血管病等。而肺循环阻抗图则是反映每个心动周期的肺循环容积改变曲线图。

2.3 生物电阻抗法人体成分检测

目前,基于生物电阻抗的人体成分测量法可以分为整体阻抗测量法、分段阻抗测量法和局部阻抗测量法。整体阻抗测量法即是全身阻抗测量法,这种方法普遍采用单一频率的电流源作为激励源。在单频全身阻抗测量中多采用四电极测量系统,这样就减少了皮肤与电极系统的接触阻抗。通过测量得到的电阻抗信息就可以计算得知阻抗指数 H^2/R 的信息,而人体的成分与 H^2/R 存在稳定的相关性,所以基于四电极的单频率全身阻抗可以估算人体的全身成分分析。

目前利用生物电阻抗法测量人体成分主要还是测量人体的全部躯体的电阻抗,还不能达到对人体局部的电阻抗测量,即便有的设备可以计算得到人体局部的电阻抗,但是还是主要通过构建人体阻抗数学模型,通过估算计算得到人体腹部的电阻抗,所以测量结果不是很准确。基于腹部脂肪是反映全身脂肪的重要形式,目前越来越多的研究更加关注于人体腹部脂肪含量测量方法的研究^[10-11]。

为了测量建立人体腹部脂肪的电阻抗模型中不同深度的脂肪的电阻抗信息,以此计算人体腹部不同深度的脂肪含量。相关研究按照人体腹部脂肪按不同深度分布的特点,建立了人体腹部不同深度脂肪含量的电阻抗数学模型并设计了测量人体腹部脂肪检测装置^[12]。其装置具体硬件框图如图 3 所示,该系统主要由激励信号发生器、幅度相位检测器模块、人机交互界面、微处理器系统、通信模块等组成。

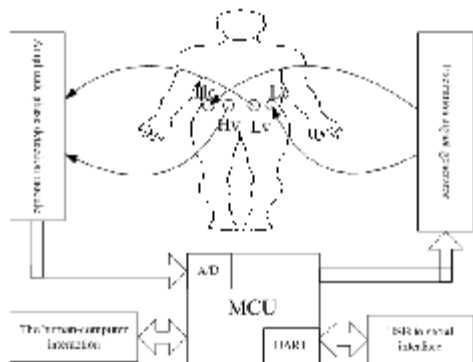


图 3 人体局部(腹部)成分检测系统

Fig.3 The Partial Body (Abdomen) Composition Detection System

2.4 生物电阻抗法胃动力学检测

胃肠疾病是近年来的研究热点,其诊断除依据临床表现,更有赖于胃动力和功能的检测。但各检查方法大都难以全面、有效地反映胃肠道动力与消化生理、病理变化规律。因此,急需探索开发出能全面、准确了解胃运动状态的多参数检测仪器与评价方法。生物阻抗检测方法是通过对体表电极连续地检测胃阻抗运动信号,提取与胃动力学状况相对应的阻抗特性及其变化信息,能反映胃的收缩、蠕动及排空过程。体表胃阻抗法作为一种无创的诊断方法为胃部疾病的诊断提供新的思路和方法^[13]。

在生物电阻抗法胃动力学检测测量中采用四电极测量系统。将 4 只 Ag/AgCl 电极置于受试者上腹,其中的一对激励电极输入激励电流源,另一对电压检测电极用于提取阻抗信号,以获得胃运动信息。图 4 分别为受试者一段 3 min 的原始胃阻抗信号与同步胃电信号波形。为了更加清晰判断提取的信号是不是胃蠕动信号,对图 4(位置 A)的原始阻抗胃运动信号进行了小波变换处理,可以看到信号的低频成份重构的结果。通过小波多分辨分析与重构,滤除了呼吸、血流等高频信号的干扰,重构后的信号为光滑的胃收缩信号,该信号反映了胃的机械收缩和运动,由波形可以看到提取的信号包含 2-4CPM 的胃蠕动节律。

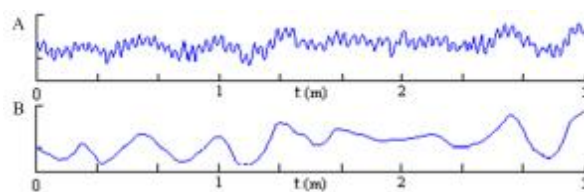


图 4 阻抗混合信号(A),胃运动信号(B)

Fig.4 Impedance of Mixed Signal (A), the Stomach Movement Signal (B)

2.5 生物电阻抗法人体心肺复苏评估

心血管疾病造成的心脏骤停唯一的抢救途径就是心肺复苏(Cardiopulmonary Resuscitation, CPR),而心肺复苏成功率的关键措施取决于高质量的胸外按压。胸外按压的质量与按压深度、按压频率和胸廓的回弹程度等密切相关^[14-17]。尤其是足够的按压深度,它是保持一定冠状动脉灌注压(Coronary Perfusion Pressure, CPP)的关键。虽然按压深度、按压频率可以在患者胸口上方放置加速度传感器或位移传感器来获取按压深度情况,但是需要额外增加器件是它存在的固有缺陷之一。而经胸阻抗(Transthoracic Impedance, TTI)在心肺复苏中应用广泛,通过建立心肺复苏过程中 TTI 变化值与 CPP 和按压深度之间的关系,利用 TTI 实时监测胸外按压质量。

相关研究通过建立了动物实验模型并研究 TTI 变化值与 CPP 和按压深度之间的关系如图 5 所示。研究结果表明高质量的胸外按压中 TTI 变化值和按压深度的相关系数为 0.89 ($P < 0.001$), TTI 变化值和

CPP 的相关系数为 0.83 ($P < 0.001$), 均具有很好的线性相关性^[18]。因此, TTI 信号监测心肺复苏质量具有广阔的应用前景。如何利用 TTI 信号对心肺复苏质量进行监测并实时反馈, 是一项具有重要意义的研究课题。

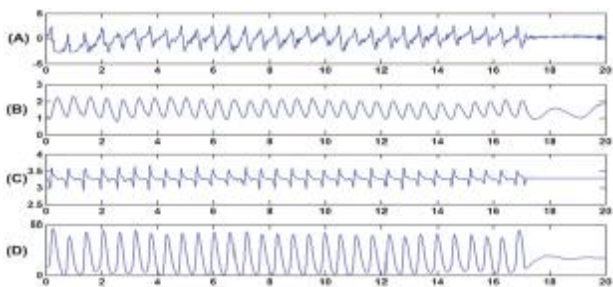


图 5 心电信号(A), 胸阻抗信号(B), 加速度信号(C), 基于加速度信号的按压深度信号(D)

Fig.5 ECG(A), Transthoracic Impedance(TTI)(B), Acceleration Signal(C) and the Reconstructed Compression Depth Signal(D) in the Experiment

2.6 电阻抗断层成像技术

电阻抗断层成像技术 (EIT; Electrical Impedance Tomography) 是一种具有功能成像、无损伤和医学图像监护等优势的新兴医学成像技术^[19]。它可以分为利用组织或器官电阻抗分布的绝对值为成像目标的静态 EIT 和利用组织或器官电阻抗分布的相对值为成像目标的动态 EIT。EIT 系统由数据测量系统(Data Measurement System, DMS) 及图像重建算法两部分组成, 如图 6 所示。

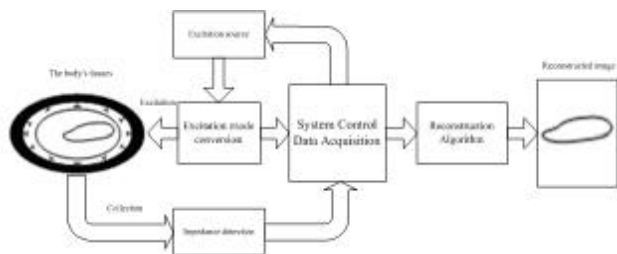


图 6 EIT 检测系统

Fig.6 EIT Detection System

测量系统主要作用就是为图像重建算法提供人体目标组织内阻抗分布信息, 主要由激励源和阻抗检测部分组成。激励源通过激励模式转换选择正弦电压或正弦电流作为激励信号刺激与人体组织; 阻抗检测通过解调技术提取出反映体内阻抗分布的电信号。图像重建根据解调的组织电阻抗信息利用重建算法电阻抗数据处理实现目标组织内图像重建、图像显示等功能。

EIT 主要优势是功能成像, 可以体现出人体组织的生理(组织充血等)、病理(癌变等)信息等, 且测量技术对人体无创无害, 系统结构简单, 测量简便。但是 EIT 成像空间分辨率不及超声、CT。所以, 如何提高目

标成像算法的稳定性、提高图像的分辨率和可靠性, 以及实现较高精度的实时成像, 这些都是 EIT 急待解决的问题。

3 总结

生物电阻抗法是生物医学测量的基本方法, 基于生物电阻抗的医学检测技术越来越多的应用于研究与临床中。目前, 生物电阻抗法用于生物医学检测主要是电阻抗式呼吸监测、阻抗血流图、生物电阻抗法人体成分检测、生物电阻抗法胃动力学检测、生物电阻抗法人体心肺复苏评估、电阻抗断层成像技术等几个方面的应用。虽然生物电阻抗法测量影响因素很多, 包括电极极化和人体接触阻抗、系统电极间相对固定的位置等系统电极的影响; 运动对生物阻抗法的影响、人体测量时食物的摄入量、人体测量时姿势的变化等受测者的测量时状态对测量结果的影响, 但是生物电阻抗法在生物医学测量中依然占有重要的地位。

【参考文献】

- [1] Allen MT, Fahrenberg J, Kelsey RM, et al. Methodological guidelines for impedance cardiography[J]. Psychophysiology, 1990, 27(1): 1-23.
- [2] Kelsey RM, Guethlein W. An evaluation of the ensemble averaged impedance cardiogram[J]. Psychophysiology, 1990, 27(1): 24-33.
- [3] Willemsen GH, DeGeus EJ, Klaver CH, et al. Ambulatory monitoring of the impedance cardiogram [J]. Psychophysiology, 1996, 33 (2): 184-193.
- [4] Schwan HP. The practical success of impedance techniques from an historical perspective[J]. Ann N Y Acad Sci, 1999, 873(1): 1-12.
- [5] Eyre JA, Oozeer RC, Wilkinson AR. Diagnosis of neonatal seizure by continuous recording and rapid analysis of the electroencephalogram [J]. Arch Dis Child, 1983, 58(10): 785-790.
- [6] Quigg M, Leiner D. Engineering aspects of the quantified amplitude-integrated electroencephalogram in neonatal cerebral monitoring[J]. J Clin Neurophysiol, 2009, 26(3): 145-149.
- [7] Feng J, Shao S, Zhang X. Apparatus and method for detecting and processing impedance rheogram: U.S. Patent 5025784[P]. 1991-6-25.
- [8] Wei P, Dong SF. Effects of ligustrazine controlled release capsule in chronic pulmonary heart disease[J]. Journal of Tongji Medical University, 1991, 11(2): 101-105.
- [9] Zhou XN, Dong SF, Niu RJ. Assessment of the clinical value of impedance pulmonary rheogram in the early diagnosis of cor pulmonale[J]. Acta Academiae Medicinae Wuhan, 1982, 2(4): 240-244.
- [10] Hiuge-Shimizu A, Kishida K, Funahashi T, et al. Absolute value of visceral fat area measured on computed tomography scans and obesity-related cardiovascular risk factors in large-scale Japanese general population (the VACATION-J study)[J]. Ann Med, 2012, 44 (1): 82-92.
- [11] Kishida K, Funahashi T, Shimomura I. Clinical significance of visceral fat reduction through health education in preventing atherosclerotic cardiovascular disease-Lesson from the Amagasaki Visceral Fat Study: A Japanese perspective[J]. Nutr Metab (Lond), 2011, 8: 57.
- [12] 李章勇, 裴飞霸, 任超世, 等. 一种基于多频生物电阻抗法的人体腹部脂肪检测系统的设计[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1643-1647.
- Li ZY, Chang FB, Ren CS, et al. A design based on bioimpedance

- spectroscopy method in human abdominal adipose measurement system[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1643-1647.
- [13] 赵舒, 任超世. 生物阻抗胃动力检测方法[J]. 中国医学装备, 2010, 7(8): 1-6.
- Zhao S, Ren CS. A method for measurement of bio-impedance gastric motility[J]. China Medical Equipment, 2010, 7(8): 1-6.
- [14] Stiell IG, Brown SP, Christenson J, et al. What is the role of chest compression depth during out-of-hospital cardiac arrest resuscitation? [J]. Crit Care Med, 2012, 40(4): 1192.
- [15] Fried DA, Leary M, Smith DA, et al. The prevalence of chest compression leaning during in-hospital cardiopulmonary resuscitation [J]. Resuscitation, 2011, 82(8): 1019-1024.
- [16] Brown TB, Dias JA, Saini D, et al. Relationship between knowledge of cardiopulmonary resuscitation guidelines and performance [J]. Resuscitation, 2006, 69(2): 253-261.
- [17] Wik L, Kramer-Johansen J, Myklebust H, et al. Quality of cardiopulmonary resuscitation during out-of-hospital cardiac arrest [J]. JAMA, 2005, 293(3): 299-304.
- [18] Zhang H, Yang Z, Huang Z, et al. Transthoracic impedance for the monitoring of quality of manual chest compression during cardiopulmonary resuscitation[J]. Resuscitation, 2012, 83(10): 1281-1286.
- [19] 马磊, 严碧歌, 孙渭玲. 电阻抗断层成像技术进展[J]. 现代生物医学进展, 2007, 7(5): 780-782.
- Ma L, Yan BG, Sun WL. Progress on electrical impedance tomography[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2007, 7(5): 780-782.

(上接第 220 页)

- Zhang FL, Wang YD, Liu QZ, et al. Delta three-dimensional semiconductor array verification for intensity modulated planning of helical tomotherapy [J]. Chin J Radiat Oncol, 2013, 22: 309-311.
- [16] 张富利, 王雅隼, 刘清智, 等. 应用 Octavius 体模配合 PTW Seven29 二维矩阵进行 HT 计划剂量验证 [J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2014, 23.
- Zhang FL, Wang YD, Liu QZ, et al. Evaluation of PTW Seven29 combining Octavius phantom for tomotherapy patient-specific quality assurance[J]. Chin J Radiat Oncol, 2014, 23(5): 422-425.
- [17] Bedford JL, Lee YK, Wai P, et al. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification[J]. Phys Med Biol, 2009, 54: N167-N176.
- [18] Chandraraj V, Stathakis S, Manickam R, et al. Consistency and reproducibility of the VMAT plan delivery using three independent validation methods[J]. J Appl Clin Med Phys, 2010, 12: 129-140.
- [19] Journal of the ICRU Report 83: Prescribing, Recording, and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) [R]. Oxford University Press, 2010.
- [20] Low DA, Dempsey JF. Evaluation of the gamma dose distribution comparison method[J]. Med Phys, 2003, 30: 2455-2464.
- [21] Geurts M, Gonzalez J, Serrano-Ojeda P. Longitudinal study using a diode phantom for helical tomotherapy IMRT QA[J]. Med Phys, 2009, 36: 4977-4983.