

文章编号: 1004-4140 (2009) 01-0063-06

一种用于三维辐照剂量检测的光学CT技术

王培玮¹, 王贤刚², 徐沔¹

1. 中国计量科学研究院, 北京 100013

2. 清华大学 核能与新能源研究院, 北京 100084

摘要: 放射治疗已经发展到 3D 适形和调强阶段, 使得剂量不但具有 3D 空间分布而且随时间变化, 传统的 3D 水箱的静态测量方式已经不能满足剂量验证的要求。本论文提出了用组织等效性好的辐射敏感材料制成模体, 模体辐照后产生辐射效应并存储空间剂量分布信息, 然后采用 OCT 读出剂量分布, 从而完成测量任务, 发展成 3D 凝胶剂量学。本课题设计研制了用于聚合物凝胶模体 3D 剂量检测的光学 CT 系统, 采用锥束投照扫描, 帧投影采集方式, 对约 580 nm 波长可见光的衰减系数进行图像重建, 并在此基础上描绘等剂量图等放疗临床需要的剂量学资料。OCT 的扫描重建时间, 分辨能力, 剂量响应等都得到满意的结果。采用自制的 MAGIC 测量模体, 用 6 MV 医用加速器的 X 射线进行照射, 空间剂量分布信息存储稳定, 并得到满意的剂量图。

关键词: 光学 CT; 辐射敏感凝胶; 3D 凝胶剂量学; 剂量图; 放疗剂量学

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

近年迅速发展的肿瘤病变精确放疗技术, 以精准射束、多射束立体布置合成特异的照射野, 照射过程动态调整射线强度, 给出适应病变体积避让正常组织的复杂剂量分布。迅速得到临床的应用, 并也在心血管、脉管再狭窄处置等重要医疗领域推广应用。

新放疗技术的剂量交付的复杂性, 以及更为强调治疗计划的核验认证、放疗过程的质量控制和治疗结果的质量保证, 要求剂量及其 3D 分布的精确测定。目前, 剂量图的空间分辨能力要求达到毫米量级, 在腔内近距治疗情况, 甚至要求到 0.5 mm 以下。传统使用的电离室剂量计 (点剂量测量, 但空间分辨能力差), 胶片 (常用于获取平面剂量分布), 已不能满足新治疗技术发展的要求。3D 水箱是测定剂量分布的常用器具, 但是这种传统方法只适合单射束固定照射。

人们综合考虑辐射效应探测、效应信息保持和信息量值检出, 设计成功辐射敏感的组织等效模体 (Phantom), 作为效应探测和效应信息保持介质, 实现辐照剂量信息 (图像) 稳定和准确地保持, 而后完成立体分布的剂量值的测量——光学 CT 技术。这种新型剂量技术能适合 3D 立体剂量确认和评定的需要, 保证高精度放射治疗技术可靠用于临床并保证治疗质量。

1 3D凝胶剂量学的发展和现状

在早年化学剂量计测量原理的基础上, 引进凝胶介质实现固定存储空间剂量信息, 利用 MRI 和 X-CT 读出剂量分布, 形成新型的剂量技术——放射治疗 3D 凝胶剂量学, 极具发

收稿日期: 2008-08-19。

展活力。1999 年起形成世界范围的国际学术会议^[1-3], 成为放射治疗剂量测量和标准研究的新热点, 并受到以研讨当前社会对电离辐射测量的需要为宗旨的电离辐射测量和标准理事会(The Council on Ionizing Radiation Measurements and Standards, CIRMS)的重视, 各届会议不断强调发展新型 3D 剂量学、探索建立 3D 剂量的计量标准, 为放射治疗的新技术发展提供质量保证和治疗处置核验鉴定^[4-5]。在上述的背景下, NPL 和 NIST 都立即制订这一剂量学新技术的发展计划, 开展了积极的研究工作^[6-9]。2007 年 10 月 NPL 发表了其第一个研究进展报告^[10], 其工作进行得迅速引人注目。同时也说明此项剂量测量新技术的发展, 进入到了精确定量和迫切需要发展计量标准的阶段。

3D 凝胶剂量学公认的技术目标为: 检测空间分辨 $\leq 1\text{ mm}^3$; 整体测量时间 $\leq 1\text{ hr}$ (完成 3D 剂量分布图); 检测精密度 $1\% \sim 2\%$; 剂量准确度 $2\% \sim 4\%$ 。目前, 英国国家计量机构 NPL 给出凝胶剂量计(单元试样)辐照剂量的总不确定度为 $\pm 1.5\% \sim \pm 3\%$ ($k=2$)^[10]。这代表了当前达到的先进测量水平。

目前, 组织等效的辐射敏感测量模体, 主要采用辐射变色凝胶(Fricke 凝胶^[11])、辐射聚合物凝胶(MAGIC 凝胶^[12], PAGAT 凝胶^[13])以及辐射变色塑料(PRESAGE 凝胶^[14])。辐照剂量信息读出方法, 早期多利用医院现有的 X 射线 CT、MRI 设备。近几年根据辐射感生材料光学衰减性能发生变化的原理, 发展了用于剂量检测的光学 CT(OCT)技术^[15], 现已成为 3D 凝胶剂量学的主要技术方向^[16]。

光学 CT 技术方面, 采用单束激光-单探测器逐点扫描方式^[17], 容易排除光的折射散射等干扰因素达到较好的成像要求, 虽然结构复杂, 特别是工作效率低, 但是相当实用。采用宽束(锥束或平行束)光线-面探测器方案有其优点, 但技术难度加大, 特别是要得到高的图像质量和剂量准确度, 必须解决遇到的光学信号传输和检测中的干扰问题以及提高成像质量问题。我们依靠从事剂量学和 CT 技术方面研究工作的技术积累, 在放射治疗单位同事的支持下, 建立起凝胶剂量学研究基础, 开发了适于进入放射治疗临床实用的 3D 剂量计原型机。原型机包括凝胶测量模体和 OCT(光学计算机层析技术)剂量数据解读系统, 获得中国国家专利^[18]。在此基础上针对精确放射治疗的需要, 对模体存储的 3D 剂量信息的精确检测解读, 进行深入研究。

国内放射治疗界已注意到 3D 凝胶剂量学这一新的发展动态。但至今未见有其他的研究报告。

2 原理和设计方案

针对适形的复杂照射野和动态变化的照射条件, 新型 3D 剂量测量技术选择特定的辐射敏感成分(剂量指示器), 混合在组织等效性好的固定介质中, 做成测量模体。经 X 射线、 γ 射线及电子束等辐照, 材料中辐射能量沉积使预设的敏感成分产生特定效应定量变化, 在一定范围内, 这一辐射响应与所受的吸收剂量具有确定的关系。而固定介质确保模体内各点产生效应的敏感成分的空间位置不变, 形成定量准确、定位稳定的剂量数据信息存储。继而, 对应辐射效应选择适当的检测方法(探针), 通过积分(累积)检测和微分(分立)解析, 实现空间各点存储的剂量数据信息读出, 经图像处理和计量定标, 完成辐射剂量的空间分析和测定。测量模体可以在完全个体化治疗条件下模拟对病患部位的照射, 形成空间坐标稳定的剂量数据存储后, 即可进一步通过辐射效应检测实现数据读出并建立 3D 剂量

分布。
3D 剂量测量系统组成如图 1 所示。

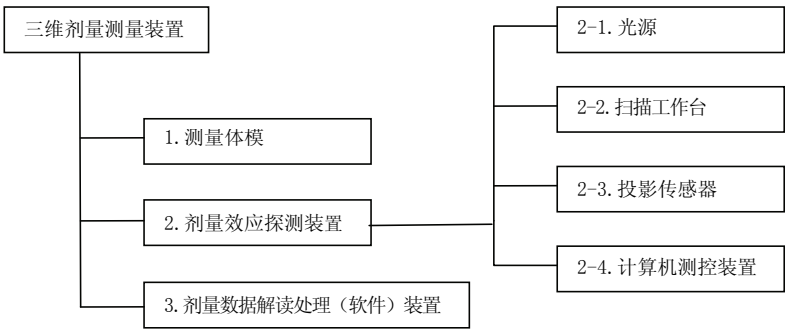


图 1 3D 剂量测量系统组成示意图
Fig.1 Components of 3D dose measurement System

OCT 技术采用可见波段的光线，射束穿过物体进行扫描，得到对物体特性的投影数据，经计算重建物体扫描截面的特性图像。根据 CT 值与辐射剂量的关系，可进行剂量校准，最后得到医疗临床需要的剂量数据和剂量（分布）图。OCT 系统的原理结构见图 2。

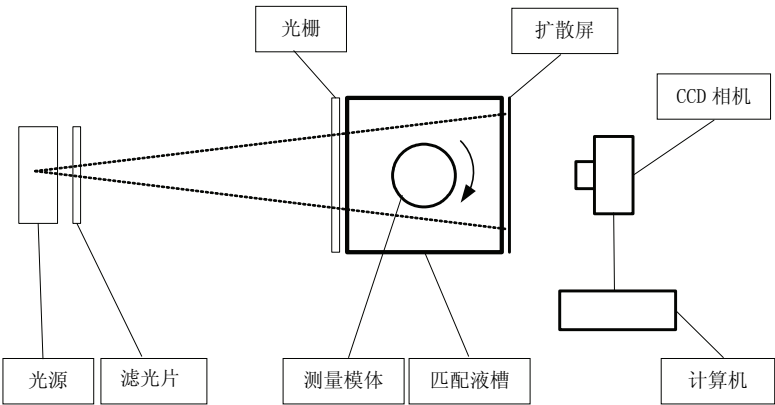
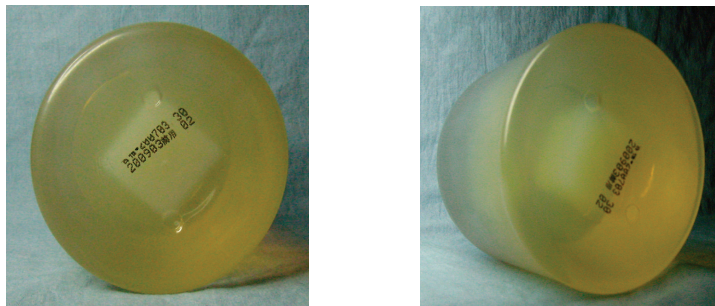


图 2 3D 剂量计 OCT 系统原理结构
Fig.2 3D OCT dosimeter schematic diagram

3 实验和结果

我们研制的 3D 剂量计原型为 OCT 读出系统和聚合物凝胶测量模体方案。
用于聚合物凝胶模体 3D 剂量检测的 OCT 系统，采用锥束投照，旋转扫描，帧投影采集方式，对可见光的衰减系数进行图像重建，并在此基础上描绘等剂量图等放疗临床需要的剂量学资料。光源由高压汞灯、光阑和快门及单色滤光片组成，选择约 580 nm 波长的可见光。聚合物凝胶模体放在装有折射率匹配液的体模槽中，减少界面折射等的影响。步进电机驱动模体进行扫描。扫描一周采集 400 帧投影。采用高性能 CCD 相机完成采集，并实时传输至计算机。
测量模体采用 Fong 等^[12]的 MAGIC 聚合物凝胶。我们制作的模体照片见图 3，清晰可见方形照射野和立体的照射靶区域。



经 $3.0\text{ cm} \times 3.0\text{ cm}$ 照射野, 6 MV X 射线辐照 5 Gy, 可见靶体积透明度的变化, 左图为正视; 右图为侧视, 可见 3D 射野

图 3 组织等效测量模体

Fig.3 Tissue equivalent measurement phantom

对于 OCT 读出系统, 首先调试系统参数, 达到 CT 系统关于投照、扫描和图像重建的基本要求。进一步根据可见光的特点, 仔细进行光传输的试验和调整, 特别是模体放置在折射率匹配液内, 达到良好的折射率匹配。排除对投影质量的各种光学因素干扰。图 4 为 OCT 系统的工作照片。从正在扫描的模体及其投影, 可见柱状的辐照区域。

OCT 系统的实际扫描时间 (400 投影) 约 5 min, 图像重建时间约 300 s (100 层切片), 分辨能力 0.25 mm。

测量模体用 6 MV 医用加速器的 X 射线进行照射 5 Gy, 从图 4 可见辐射剂量产生的模体材料性能的变化。经 OCT 读出系统检测, 得到空间剂量分布, 图 5 为等剂量图。

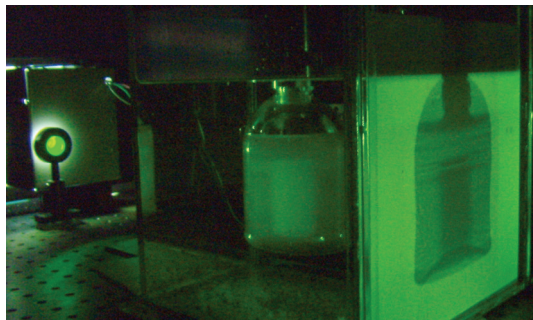
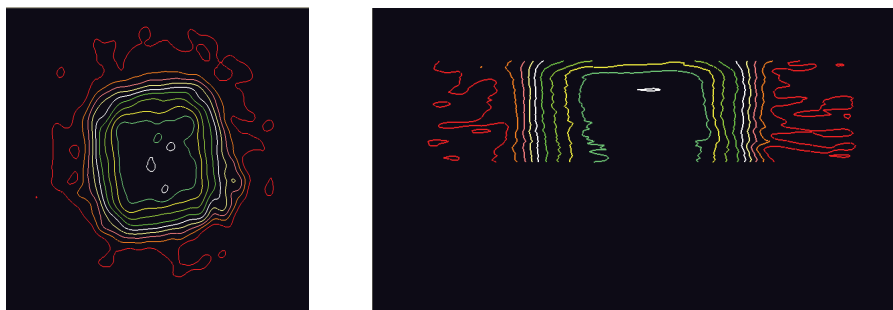


图 4 扫描读出中的测量模体

Fig.4 Measurement phantom in scanning



$3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 方野 6 MV X 射线 5 Gy 剂量, 左图是横向等剂量图, 右图是纵向等剂量图

图 5 等剂量图

Fig.5 Isodose map

4 结束语

本文介绍了设计和建造一种新型 3D 剂量测量装置 (3D 凝胶剂量计), 采用聚合物凝胶

辐射敏感测量模体和 OCT 读出系统。测量工作正常, 空间分辨能力好于 1 mm, 并初步测得满意的剂量图。

这种新型的 3D 凝胶剂量计是医用模拟人体体模和剂量计的一体化整合, 其特点是: 具有组织等效性, 测量模体元素组成类似人体组织; 无方向性, 尺寸和形状可根据需要制备, 剂量效应累积存储, 对光子能谱和剂量率不敏感, 能适应随时间变化的剂量交付; 良好的空间分辨能力, 特别适于测定陡峭剂量梯度区域的剂量分布(高剂量率近距治疗 HDR brachytherapy), 以及高准确度 3D 体积剂量测定。可用来解决放疗新技术发展面临的对窄束组合照射野和动态照射条件下的高精度高空间分辨剂量测量难题。同时提供了进行质量保证要求的剂量验证和鉴定的基础。

设计的 OCT 读出系统, 考虑系统结构简单, 使用中调整维护容易, 采取锥束投照方案。技术难度增加, 特别是须很好地解决光学匹配和干扰修正等。

从实验结果看, 测量模体存在灵敏度局部不均现象, 制备中尚需严格控制。

进一步计划进行剂量校准, 并在个体化治疗条件下全面真实模拟测量, 进行测量结果与放射治疗计划的比较。以及评估对病人的实际治疗进行全面核验和认证的实用性。

致谢: 1998 年在北京医院放射治疗科刘明远教授的提议下, 我们开始了放疗凝胶 3D 剂量学的研究工作, 至今一贯得到先生的关注、帮助和指导; 模体的加速器辐照实验工作得到李高峰主任和吴钦宏物理师的大力协助和指导。

参考文献

- [1] Baldock C, De Deene Y. DOSGEL' 99: Proceedings of the 1st international workshop on radiation therapy gel dosimetry[G]. Lexington, Kentucky, USA: Canadian Organization of Medical Physicists and the Canadian College of Physicists in Medicine, 1999.
- [2] Baldock C, De Deene Y. DOSGEL 2001: Proceedings of 2nd international conference on radiotherapy gel dosimetry[G]. Brisbane, Queensland, Australia: Queensland University of Technology, 2001.
- [3] Baldock C, De Deene Y. DOSGEL 2004: Third international conference on radiotherapy gel dosimetry[G]. Gent, Belgium: Ghent University, 2004.
- [4] Nardi K. Third report on national needs in ionizing radiation measurements and standards[R]. Duluth, GA 30096, USA: CIRMS, 2001.
- [5] Nardi K. Fourth report on needs in ionizing radiation measurements and standards[R]. Duluth, GA 30096, USA: CIRMS, 2004.
- [6] NPL-NMSPU. NMS programme for ionising radiation metrology—October 2004 to September 2007[R]. Teddington, UK: NPL, 2004.
- [7] Roberts N, Duane S, Judge S M, et al. NPL REPORT DQL-RN 020: Proposed NMS programme for acoustics and ionising radiation metrology—October 2007 to September 2010[R]. Teddington, UK: NPL, 2007.
- [8] Judge S M, DuSautoy A, De Lavison P. NPL REPORT AC 5: National measurement system for acoustics and ionising radiation metrology—October 2007 to September 2010[R]. Teddington, UK: NPL, 2008.
- [9] Soares C G. CCRI(I)/07-13: Update on NIST Beta-particle dosimetry standards and calibrations[R]. F-92310 Sèvres, France: BIPM, 2007.
- [10] Pearce J A D, Crossley D C. NPL REPORT-IR 1: Gel dosimetry for direct measurement of dose distributions[R]. Teddington, UK: NPL, 2007.
- [11] Schreiner L J. Review of Fricke gel dosimeters[R]//Baldock C, De Deene Y. DOSGEL 2004. Gent,

- Belgium: Ghent University, 2004: 9-21
- [12] Fong P M, Keil D C, Does M D, et al. Polymer gels for magnetic resonance imaging of radiation dose distributions at normal room atmosphere[J]. *Phys Med Biol*, 2001, 46(12): 3105-13.
- [13] Venning A J, Brinda S, Hill B, et al. Preliminary investigation of a novel normoxic PAG gel dosimeter with tetrakis (hydroxymethyl) phosphonium chloride as an anti-oxidant[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2004, 3: 155-158.
- [14] Adamovics J, Jordan K, Dietrich J. PRESAGE™-development and optimization studies of a 3D radiochromic plastic dosimeter-Part 1[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2006, 56: 172-175.
- [15] Doran S J, Krstajić N. The history and principles of optical computed tomography for scanning 3-D radiation dosimeters[R]//J Provencher. DOSGEL 2006: 4th International Conference on Radiotherapy Gel Dosimetry. Sherbrooke, Canada: University of Sherbrooke, 2006: 45-57.
- [16] Maris T G. DOSGEL 2008: The 5th international conference on radiotherapy gel dosimetry[G]. Crete, Greece: University of Crete, 2008.
- [17] Gore J C, Ranade M, Maryański M J, et al. Radiation dose distributions in three dimensions from tomographic optical density scanning of polymer gels: I. Development of an optical scanner[J]. *Phys Med Biol*, 1996, 41(12): 2695-2704.
- [18] 王培玮, 王贤刚, 徐沔. 三维剂量测量装置: 中国, 200720149090.6[P]. 2008-04-23.
Wang P W, Wang X G, Xu M. 3D Dosimeter: China, 200720149090.6[P]. 2008-04-23.

An Optical CT Technology for 3D Radiation Dose Verification

WANG Pei-wei¹, WANG Xian-gang², XU Mian¹

1. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Modern radiotherapy requires new approaches to dosimetry. The dosimeters must be able to assess the dose not only in a point but also in complex three-dimensional objects. Recently 3D Gel dosimetry using a tissue-equivalence phantom to record dose stereo-distribution then to acquire 3D dose data with MRI and optical evaluation techniques is a highly promising tool to address the emerging needs of radiotherapy dosimetry. An optical CT system used to scanning 3D dose distribution in a polymer gel has been designed. The optical CT system has a cone light beam (580nm) scanner, a CCD camera to acquire the project data and a PC for scan control and for mapping of 3D dose distributions. Scan time and reconstruct time, resolution and dose respond are practically satisfaction. The polymer gel dosimeter is a MAGIC phantom. The irradiation of gel dosimeter was performed using a 6 MV accelerator X-ray with a field size of 3 cm x 3 cm. The dose information is stable. The dose distribution map acquired is satisfaction.

Key words: optical CT; radiation sensitive gel; 3D gel dosimetry; dose distribution; radiotherapy gel dosimetry

作者简介: 王培玮(1960—), 女, 1984年毕业于清华大学工程物理系加速器物理专业, 1999年以前工作于中国科学院高能物理研究所, 从事同步辐射光束线的研究与建造, 中国计量科学研究院高级工程师, 主要从事电离辐射计量, 射线成像系统的研制, Tel: 010-64276784, E-mail: wangpw@nim.ac.cn.