

直线加速器均整和非均整模式下射线质和射野输出因子的蒙特卡罗模拟与实测值比较

岳海振¹, 张艺宝¹, 刘卓伦¹, 弓健¹, 蒋璿¹, 张辉², 吴昊¹

1. 北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】目的:利用蒙特卡罗方法分别模拟TrueBeam直线加速器6 MV均整和非均整(Flattening Filter-Free, FFF)模式, 计算其射线质和射野输出因子, 并比较上述参数与实际测量结果的差异。**方法:**利用Beamnrc和Dosxyznrc程序建立加速器机头模型并计算两档能量在参考条件下不同射野的剂量学数据。输出上述数据, 计算各个射野射线质与实际测量值的相对偏差, 对其绝对值做统计分析; 利用各个射野中心轴上水下10 cm处的剂量值获取射野输出因子, 并计算与测量值的相对偏差, 绝对化后做统计分析。**结果:**6 MV和6FFF两档能量射线质相对偏差绝对值分别为 $(0.459 \pm 0.462)\%$ 和 $(0.486 \pm 0.300)\%$, 射野输出因子相对偏差绝对值分别为 $(1.315 \pm 1.868)\%$ 和 $(0.904 \pm 1.214)\%$ 。**结论:**该模型的射线质和输出因子与测量结果相对偏差较小, 基本可用于临床剂量学研究。

【关键词】直线加速器; TrueBeam; 均整模式; 非均整模式; 蒙特卡罗; 射线质; 输出因子

【中图分类号】R144.1; TH774

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)06-0548-05

Comparison between Monte Carlo simulation and measurement of beam quality and output factor with flattened and flattening filter-free of linear accelerator

YUE Hai-zhen¹, ZHANG Yi-bao¹, LIU Zhuo-lun¹, GONG Jian¹, JIANG Fan¹, ZHANG Hui², WU Hao¹

1. Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract: Objective To simulate the flattened and flattening filter-free (FFF) modes of 6 MV photon beams emitted from TrueBeam accelerator by using Monte Carlo method, and to compare the calculated beam quality and output factor with the measured results. **Methods** Beamnrc and Dosxyznrc programs were used to model the linear accelerator head. And the dosimetric data of two modes under reference conditions were calculated and output for various field sizes. The relative deviations between the calculated beam quality of various field sizes and the measurement were calculated, and the absolute values of relative deviations were statistically analyzed. On the beam central axis of various field sizes, the output factors were calculated at 10 cm depth under the water surface. The absolute differences between the calculated output factors and the measurement were statistically analyzed. **Results** The absolute values of the relative deviation of 6 MV and 6FFF beam quality were respectively $(0.459 \pm 0.462)\%$ and $(0.486 \pm 0.300)\%$, and those of 6 MV and 6FFF output factor were respectively $(1.315 \pm 1.868)\%$ and $(0.904 \pm 1.214)\%$. **Conclusion** For the proposed model, the relative deviations between the calculated beam quality and output factor and the measurement were small, so the proposed model can be applied for clinical dosimetric investigations.

Key words: linear accelerator; TrueBeam; flattened filter mode; flattening filter-free mode; Monte Carlo; beam quality; output factor

【收稿日期】2016-02-16

【基金项目】国家自然科学基金(11505012, 81402535); 质检公益性行业科研专项(201510001-002); 北京市医院管理局“青苗”计划专项经费资助(QML20151004)

【作者简介】岳海振(1982-), 男, 工程师, 研究方向: 医学物理, E-mail: yuezhz@163.com

【通信作者】吴昊(1976-), 硕士, 高级工程师, 研究方向: 医学物理, Tel: 010-88196033, E-mail: wuhao_bicr@sina.com

前言

随着调强技术的发展, 直线加速器的非均整(FFF)模式在肿瘤放射治疗中发挥着越来越重要的作用^[1-4]。FFF模式广泛应用在立体定向体部放射治疗(SBRT)^[5-7]和立体定向放射外科(SRS)^[8]中。相对于均整模式, FFF模式下剂量率显著提高, 大大缩短

了患者治疗时间,同时减少了患者在治疗过程中体位变化所带来的误差^[9-10]。由于去掉了均整器,FFF模式下射野剂量学参数有一定特殊性,其能谱变化、百分深度剂量、离轴比及射野输出因子均与常规均整模式显著不同,这给加速器基础数据的测量、质量控制工作和临床剂量学研究带来了新的挑战。基础数据的准确性直接影响患者治疗计划的剂量。

本研究利用Beamnrc和Dosxyznrc程序^[11-12],建立6 MV均整模式(简称6 MV)和FFF模式(简称6FFF)两档X射线的蒙特卡罗模型,通过对1 cm×1 cm到40 cm×40 cm射野的百分深度剂量进行蒙特卡罗模拟,获取两档能量各个射野的射线质和射野输出因子,并与测量数据进行对比研究,以期通过理论计算与实验测量相结合的方法互为验证,确保基础数据的可靠性,为进一步临床剂量学研究奠定模型基础。

1 材料与方法

1.1 加速器及其机头模型

以Varian公司TrueBeam加速器为研究对象,该机型除常规均整模式(6、8、10、15 MV)外,还具有6FFF和10FFF两档FFF模式的光子能量,其最高剂量率分别为1400 MU/min(6FFF)、2400 MU/min(10FFF)。

蒙特卡建模利用加拿大国家研究委员会(National Research Council Canada, NRC)研发的Beamnrc程序,根据Varian公司提供的加速器机头几何与材料密度参考数据,输入机头各组件的结构参数,包括靶、初级准直器、均整块、监测电离室、反光镜、次级准直器等。

Beamnrc其他重要参数设置如下:①电子输运截止能量(ECUT)和碰撞产生电子的最低能量(AE)设置为0.700 MeV,光子输运截止能量(PCUT)和韧致辐射产生光子的最低能量(AP)为0.010 MeV;②模拟中采用方向性韧致辐射分裂技术,光子分裂数设置为2000,分裂半径定义在SSD=100 cm处。光子分裂只发生在射野范围内,超出射野范围会按照所谓的Russian转盘进行简化处理。分裂半径要足够大,能够包括整个治疗射野,且包括对中心轴剂量贡献的地方。半径太大会降低计算效率,一般情况下分裂半径等于相应射野的大小^[13];③入射源为ISOURC=19,入射电子能量为6.000 MeV,半高全宽为0.75 mm。

1.2 Dosxyznrc参数设置

本研究中剂量计算部分采用加拿大NRC DOSXYZnrc程序,输入源设置为ISOURCE=9,把Beamnrc模型so格式头文件作为DOSXYZnrc的入射源。剂量计算用水模体设置为60 cm×60 cm×60

cm。DOSXYZnrc主要参数设置为:①电子输运终止能量(ECUT)和碰撞产生电子的最低能量(AE)均为0.521 MeV,光子输运终止能量(PCUT)和韧致辐射产生光子的最低能量(AP)为0.010 MeV;②体素 V_{xyz} 设置为0.5 cm×0.5 cm×0.2 cm(4 cm×4 cm以上)、0.2 cm×0.2 cm×0.2 cm(4 cm×4 cm以下);③为了尽可能提高模拟精度,降低模拟结果的不确定度(0.2%以内),10 cm×10 cm射野入射粒子数设置为 4×10^{10} ,其他射野按照其与标准射野面积的比例关系设置相应的入射粒子数,最大为 9.99×10^{10} 。

应用MATLAB程序将模拟生成的egslst文件中百分深度剂量数据转化为PTW公司MEPHYSTO® mc²软件可读的数据格式,便于进行模拟数据与测量数据的gamma1D对比分析,采用较为严格的Local Dose方法,其中剂量误差设置为1%,位置误差为1 mm。

1.3 射线质与射野输出因子

按照IAEA398报告,射线质由PTW分析软件根据相应射野中心轴的百分深度剂量计算得到,射线质(Quality Index, QI)计算公式为 $QI = D_{20}/D_{10}$ 。本研究采用平行板电离室(PTW34001)和半导体探测器(PTW60016)进行百分深度剂量的测量(大野采用PTW34001,小野采用PTW60016),SSD=100 cm。

考虑到射野大小与探测器有效测量体积的相对关系,本研究输出因子的测量对于1 cm×1 cm到3 cm×3 cm射野采用半导体探测器(PTW 60016),4 cm×4 cm~40 cm×40 cm 6射野采用0.125cc电离室(PTW 31010),测量条件均为SSD=100 cm,测量深度为10 cm。蒙特卡罗模拟中,射野输出因子(Output Factor, OF)的计算公式如下:

$$OF = \frac{D_{xyz}}{D_{xyz(10 \times 10)}} \times 100\%$$

其中 D_{xyz} 为蒙特卡罗模拟中射野中心轴上的参考深度处(本研究取水下10 cm)的剂量值,表示单个电子打靶后在射野中心轴上某深度处的沉积剂量,其单位为Gy/Partical。 $D_{xyz(10 \times 10)}$ 为10 cm×10 cm射野的 D_{xyz} 值。

2 结果

2.1 PDD曲线

图1分别给出不同射野情况下蒙特卡罗模拟得到的PDD曲线与测量值的结果对比,所有曲线在深度为10 cm处进行归一。用gamma1D(Local Dose方法,剂量误差<1%,位置误差<1 mm)分析,其中2 cm×2 cm以上射野均能通过,而1 cm×1 cm射野两者有一定偏差,将限值改为1.5 mm、1.5%则能通过。

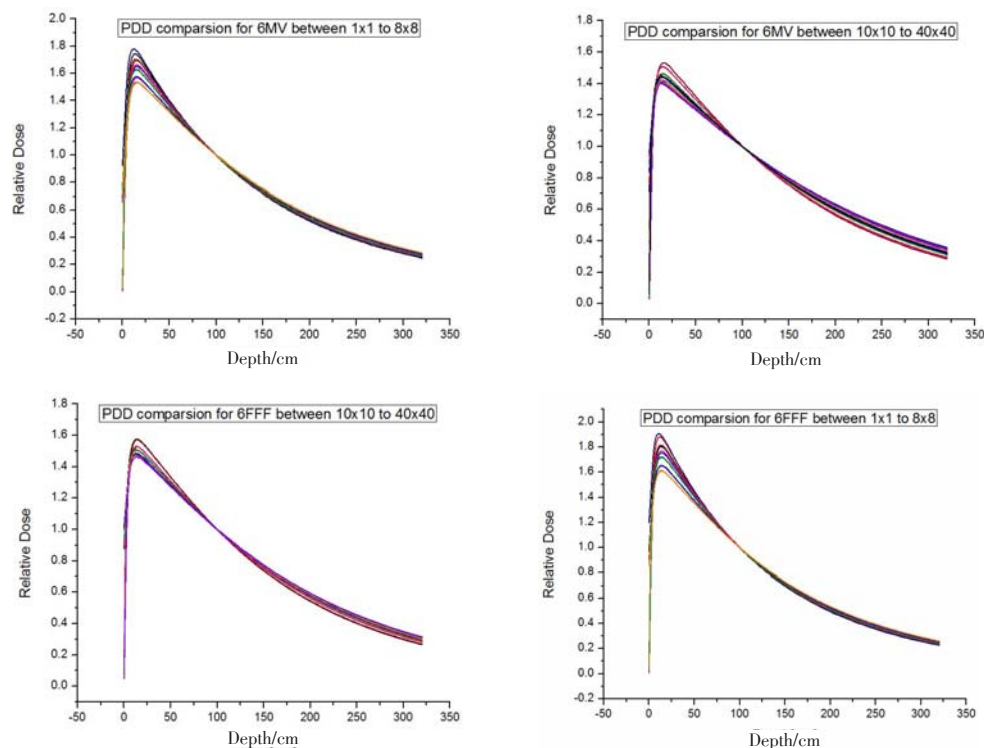


图1 两档能量PDD数据模拟结果与测量结果对比

Fig.1 Percentage depth dose (PDD) comparison between simulation and measurement of two modes

2.2 射线质比较

6 MV 和6FFF 下不同射野的射线质和测量值相对偏差结果如表1所示。分别取其绝对值做均值分析,其平均值和标准差分别为 $(0.459 \pm 0.462)\%$ 、

$(0.486 \pm 0.300)\%$,其中 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 射野的相对偏差较大,分别为1.88%、1.0%。同一射野的射线质6FFF相对于6 MV 较小,说明去除均整器使射线质变软。

表1 6 MV 和6FFF 射线质模拟与测量值的相对偏差

Tab.1 Comparison of beam quality between simulation (MC) and measurement (Meas.) for 6 MV and 6FFF

Field size/cm ²	6 MV			6FFF		
	MC	Meas.	Dev/%	MC	Meas.	Dev/%
1×1	0.610 8	0.599 5	1.88	0.573 5	0.5678	1.00
2×2	0.614 5	0.610 8	0.61	0.579 9	0.577 6	0.40
3×3	0.615 7	0.617 0	-0.21	0.582 8	0.582 6	0.03
4×4	0.623 0	0.620 6	0.39	0.589 2	0.584 2	0.86
6×6	0.635 4	0.639 6	-0.33	0.601 2	0.606 3	-0.84
8×8	0.650 2	0.651 7	-0.23	0.615 1	0.618 2	-0.50
10×10	0.664 1	0.665 8	-0.26	0.626 4	0.630 0	-0.57
15×15	0.691 6	0.689 5	0.30	0.651 2	0.652 9	-0.26
20×20	0.710 0	0.707 5	0.35	0.667 9	0.667 4	0.07
25×25	0.723 6	0.720 4	0.44	0.662 9	0.667 6	-0.70
30×30	0.729 8	0.730 9	-0.15	0.682 6	0.684 5	-0.28
35×35	0.732 8	0.738 1	-0.72	0.691 4	0.688 2	0.46
40×40	0.741 5	0.742 2	-0.09	0.690 6	0.690 9	-0.04

Dev: Absolute deviation

2.3 射野输出因子

6 MV 和 6FFF 下不同射野的输出因子和测量值相对偏差结果如表 2 所示,分别取其绝对值做均值分析,其平均值和标准差分别为 $(1.315 \pm 1.868)\%$ 和

$(0.904 \pm 1.214)\%$, 其中 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 射野相对偏差较大,分别为 7.32%、4.63%。其余同一射野下两档能量的蒙卡模拟与实际测量射野输出因子基本一致。

表 2 6 MV 和 6FFF 输出因子模拟与测量值的相对偏差

Tab.2 Comparison of output factor between simulation and measurement for 6 MV and 6FFF

Field size/cm ²	6 MV				6FFF			
	D _{depth10}	MC	Meas.	Dev/%	D _{depth10}	MC	Meas.	Dev/%
1×1	6.218E-17	0.727	0.677	7.32	1.391E-16	0.713	0.681	4.63
2×2	6.419E-17	0.857	0.793	1.01	1.565E-16	0.802	0.795	0.81
3×3	7.195E-17	0.893	0.830	1.29	1.653E-16	0.847	0.837	1.23
4×4	7.445E-17	0.870	0.861	1.04	1.711E-16	0.877	0.870	0.77
6×6	7.619E-17	0.890	0.889	0.14	1.816E-16	0.930	0.927	0.39
8×8	8.272E-17	0.967	0.962	0.48	1.888E-16	0.967	0.969	-0.15
10×10	8.558E-17	1.000	1.000	0.00	1.952E-16	1.000	1.000	0.00
15×15	9.032E-17	1.055	1.062	-0.66	2.045E-16	1.048	1.052	-0.43
20×20	9.424E-17	1.101	1.104	-0.25	2.094E-16	1.073	1.082	-0.85
25×25	9.571E-17	1.118	1.134	1.38	2.142E-16	1.097	1.101	-0.34
30×30	9.798E-17	1.145	1.155	-0.88	2.160E-16	1.107	1.113	-0.60
35×35	9.845E-17	1.150	1.167	1.42	2.170E-16	1.112	1.121	-0.80
40×40	9.929E-17	1.160	1.175	1.26	2.193E-16	1.124	1.125	-0.14

D_{depth10} was the deposit dose after single particle targeting at 10 cm depth under the water surface (Gy/Particle).

3 讨论

目前蒙特卡罗模拟研究中,大多数是从 Varian 网站上下载的次级准直器以上的相空间数据为输入源,模拟结果一般与 Varian 公司提供的 gold beam data 为基准做对比研究^[14-16]。但这种方式由于忽略了次级准直器的反散射线对监测电离室的影响,在对蒙卡模型做绝对剂量刻度时会引入 2.5% 左右的误差^[17]。另外, gold beam data 的离轴比数据是由电离室获取,电离室的体积效应对射野半影会有平滑作用进而导致半影展宽,由此可能使计划系统在计算射野边缘剂量时不够准确。

本文对比了 6 MV 与 6FFF 模式下各个射野的射线质和输出因子的蒙特卡罗模拟值与实测值之间的差别,结果显示两档能量的射线质符合程度较好,相对偏差在 1% 以内, $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 以上射野输出因子的模拟与测量结果相对偏差均在 2% 以内, $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 射野为 7.32% 和 4.63%。

本研究要注意几方面的问题:首先,为了提高模

拟精度,降低模拟结果的不确定度,同时节省计算时间,本研究针对不同射野设置不同的 Voxel 大小和入射粒子数,其中要获取相同的不确定度,入射粒子数与射野面积基本上成正比。其次, PDD 数据测量时需要选用射束方向分辨率较高的 Roos 探测器,采用从下到上的测量方式,适当延长驻留时间,以此减少水波纹对测量结果的影响。在建成区和最大剂量点周围采样间隔设置为 1 mm,并且对水下 5 mm 以上的点采用外推的形式得到。第三,关于输出因子的测量,考虑到探测器有效测量体积与射野大小的关系,尤其对于 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 以下射野,为避免出现过响应,降低边缘效应,需要针对不同射野大小选择不同的探测器。

对于极小野,如 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 及以下射野,其基础数据的精度与测量方法和探测器的性能有较为直接的关系,这也是导致本研究中小野结果出现较大偏差的潜在因素。如何进一步减少小野和极小野测量的不确定度将是下一步研究的重点和方向。

【参考文献】

- [1] NAVARRIA P, PENTIMALLI S, ASCOLESE A, et al. Lung metastases in oligometastatic patients: a new SBRT approach using VMAT with flattening filter-free (FFF) beams [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(3): S579.
- [2] ABACIOGLU M, UNAL S, OZEN Z, et al. Head and neck IMRT with or without flattening filter: a dosimetric comparison [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(3): S872-S873.
- [3] VASSILIEV O N, KRY S F, KUBAN D A, et al. Treatment-planning study of prostate cancer intensity-modulated radiotherapy with a Varian Clinac operated without a flattening filter [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 68(5): 1567-1571.
- [4] ZWAHLEN D R, LANG S, HRBACEK J, et al. The use of photon beams of a flattening filter-free linear accelerator for hypofractionated volumetric modulated arc therapy in localized prostate cancer [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(5): 1655-1660.
- [5] VERBAKEL W, ONG C, SENAN S, et al. Flattening filter-free beams for SBRT: advantages and risks [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(Suppl 3): S826-S827.
- [6] KRAGL G, BAIER F, LUTZ S, et al. Flattening filter free beams in SBRT and IMRT: dosimetric assessment of peripheral doses [J]. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 2011, 21(2): 91-101.
- [7] ZHANG G G, KU L, DILLING T J, et al. Volumetric modulated arc planning for lung stereotactic body radiotherapy using conventional and unflattened photon beams: a dosimetric comparison with 3D technique [J]. *Radiat Oncol*, 2011, 6(1): 152-157.
- [8] KIM G, RICE R, LAWSON J, et al. Stereotactic radiosurgery with FFF mode photon beams [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(3): S823.
- [9] BUCCIOLINI M, BIANCHI BUONAMICI F, MAZZOCCHI S, et al. Diamond detector versus silicon diode and ion chamber in photon beams of different energy and field size [J]. *Med Phys*, 2003, 30(8): 2149-2154.
- [10] 吴昊, 蒋璠, 韩树奎, 等. 常见探测器的空间分辨率比较 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2011, 28(2): 2501-2504.
- WU H, JIANG F, HAN S K, et al. Comparison of the spatial resolution among Various detectors [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2011, 28(2): 2501-2504.
- [11] ROGERS D W, WALTERS B R, KAWRAKOW I. BEAMnrc users manual. NRCC Report PIRS-0509(A) revL [R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 2013: 288.
- [12] WALTERS B R, KAWRAKOW I, ROGERS D W. DOSXYZnrc users manual. NRCC Report PIRS-794 revB [R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 2013: 125.
- [13] KAWRAKOW I, ROGERS D W, WALTERS B R. Large efficiency improvements in BEAMnrc using directional bremsstrahlung splitting [J]. *Med Phys*, 2004, 31(10): 2883-2898.
- [14] CONSTANTIN M, PERL J, LOSASSO T, et al. Modeling the TrueBeam linac using a CAD to Geant4 geometry implementation: dose and IAEA-compliant phase space calculations [J]. *Med Phys*, 2011, 38(7): 4018-4024.
- [15] BELOSI M F, RODRIGUEZ M, FOGLIATA A, et al. Monte Carlo simulation of TrueBeam flattening-filter-free beams using Varian phase-space files: comparison with experimental data [J]. *Med Phys*, 2014, 41(5): 051707.
- [16] TEKE T, DUZENLI C, BERGMAN A, et al. Monte Carlo validation of the TrueBeam 10×FFF phase-space files for applications in lung SABR [J]. *Med Phys*, 2015, 42(12): 6863-6874.
- [17] POPESCU I A, SHAW C P, ZAVGORODNI S F, et al. Absolute dose calculations for Monte Carlo simulations of radiotherapy beams [J]. *Phys Med Biol*, 2005, 50(14): 3375-3392.

(编辑:黄开颜)

广东省科技期刊编辑学会审读组对《中国医学物理学杂志》进行现场审读

根据广东省科技期刊编辑学会今年审读工作计划并应《中国医学物理学杂志》编辑部的邀请,2016年5月31日,学会审读组对《中国医学物理学杂志》进行了现场审读。参加审读的专家组成员有刘淑华、吴惠勤、吴秋玲、张楚民、刘清海;主办单位南方医科大学生物医学工程学院冯前进院长、《中国医学物理学杂志》卢广文主任及编辑部人员共13人出席了会议。

审读会议由学会审读组组长刘淑华副理事长主持。冯院长对学会审读专家组的到来表示热烈欢迎和感谢,审读专家分别从量和单位、参考文献、图表、文字表达与校对、数字使用、摘要与关键词、四封目次页、版权标志等方面进行专题审读。审读专家组充分肯定了《中国医学物理学杂志》在办刊质量与社会影响方面取得的成绩,并就审读样刊2016年第4期在标准化与规范化、语言文字运用等方面存在的问题进行了详细交流和探讨。

卢广文主任要求编辑人员要认真吸纳专家的意见,虽然这些意见中有些看起来是很小、很不起眼的一些问题,但却影响刊物的编校质量和办刊水平,今后要加以改进、进一步提升刊物质量。现场审读交流取得了良好效果。