

Varian 医用直线加速器 DMLC 物理参数的 测量与验证

李军^{1,2,3} 张西志² 张先稳² 陈雪梅² 桂龙刚² 汤晓斌^{1,3} 柴磊^{1,3} 陈达^{1,3}

摘要 目的 通过测量 Varian IX 和 23EX 医用直线加速器 60 对和 40 对动态多叶准直器 (dynamic multileaf collimator, DMLC) 的叶片透射因子、叶片间漏射因子、叶片位置校正因子及内、外半影, 探讨 DMLC 参数是否受 X 射线能量和叶片数目的影响, 并探讨 DMLC 参数在治疗计划系统 (treatment planning system, TPS) 的必要性和重要性。方法 采用 Kodak X-Omat V 胶片分析仪测量工具, 分别对 Varian 医用直线加速器 60 对和 40 对的 DMLC 叶片透射因子、叶片间漏射因子、叶片位置校正因子及内、外半影这 5 种参数测量。并将测得的 DMLC 参数结果引入到 TPS 的原始机器数据中。在 TPS 中对模体设计逆向调强计划, 并在加速器上对夹有胶片的模体进行照射, 对比分析胶片实测的剂量分布结果和 TPS 计算得到的剂量分布结果。结果 对于相同叶片数目的 DMLC, X 射线能量越大, 参数值越大。对于相同的 X 射线能量, DMLC 叶片数目越多, 参数值越大。在 TPS 中引入测得 DMLC 参数后, TPS 计算得到以及胶片实测得到的 80% 等剂量线面积重合度均大于 95%, 曲线的分离度均小于 3 mm。结论 DMLC 参数均会受叶片数目以及加速器 X 射线能量大小的影响, 但只要将测得的 DMLC 参数正确引入到 TPS 中进行, 则实测得到的剂量分布与 TPS 计算得到的剂量分布均能满足高重合度和低分离度, 从而满足临床治疗要求。

关键词 加速器; DMLC; 物理参数; 测量; 验证

DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2015.05.14.

中图分类号 R318.04 **文献标志码** A **文章编号** 1002-3208(2015)05-0509-05

Measurement and verification on DMLC physical parameters of Varian medical linac accelerator

LI Jun^{1,2,3}, ZHANG Xizhi², ZHANG Xianwen², CHEN Xuemei², GUI Longgang²,
TANG Xiaobin^{1,3}, CHAI Lei^{1,3}, CHEN Da^{1,3}

1 Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016; 2 Radiotherapy Center, Subei People's Hospital of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu Province 225001; 3 Collaborative Innovation Center of Radiation Medicine of Jiangsu Higher Education Institutions, Nanjing 210016

基金项目: 国家自然科学基金(11475087)、江苏省博士后科研资助计划(1002012C)、中央高校基本科研业务费、青年科技创新基金(NS2014060)资助

作者单位: 1 南京航空航天大学核科学与工程系(南京 210016)

2 江苏省苏北人民医院放疗科(江苏扬州 225001)

3 江苏省高校放射医学协同创新中心(南京 210016)

通信作者: 陈达, 中国科学院院士, 教授。E-mail: dachen@nuaa.edu.cn

【Abstract】 Objective To measure the parameters of dynamic multileaf collimator (DMLC) including leaf transmission factor, between-leaf leakage factor, leaf position correction factor, inner and outer penumbra for 60 pairs of leaves in Varian IX medical linac accelerator and 40 in Varian 23 EX, respectively, to analyze the effects of X-ray energy and leaf numbers on the DMLC parameters, whose importance is also analyzed in treatment planning system (TPS). **Methods** The five parameters of DMLC:

leaf transmission factor, between-leaf leakage factor, leaf position correction factor, inner and outer penumbra are measured, and the results are imported into TPS. The inverse intensity-modulated radiation therapy (IMRT) is designed for phantom in TPS, and the phantom with a film is irradiated on the accelerator couch, then the dose distribution is comparatively analyzed between the measured results on the film and TPS. **Results** As to the same number of DMLC leaves, the higher the X-ray energy, the bigger the parameters. As to the same X-ray energy, the more the DMLC leaves, the bigger the parameters. The area contact ratios of 80% isodose line got from both actual measurement on the film and TPS are higher than 95%, and the separation degree of the curves are both lower than 3 mm. **Conclusions** Although each DMLC parameter can be influenced by the leaf number and X-ray energy, the dose distributions of both actual measurement and TPS are capable of satisfying higher contact ratio and lower separation degree by guiding the measured DMLC parameters into TPS, which meet the clinical application requirement.

【Keywords】 accelerator; DMLC; physical parameter; measurement; verification

0 前言

随着放射治疗技术的进展,调强治疗(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)在临床的使用越来越广泛。尽管调强治疗的实施手段有多种,如三维补偿块、多叶准直器、电磁扫描等方式,但 Varian 加速器目前应用最普遍的调强治疗技术是通过动态多叶准直器(dynamic multi-Leaf collimator, DMLC)实施。

DMLC 作为一种有价值的治疗工具,在使用的灵活性和方便性上具有很大的优点,但由于 DMLC 成形的灵活性和治疗方式的多样性也对其放射治疗的剂量分析有了更高的要求。深入了解和正确掌握 DMLC 的机械和剂量学特性是肿瘤放射物理的基本任务^[1-2]。

在调强放疗技术中,由于对于复杂的靶区加速器单次照射的机器跳数(machine unit, MU)可能高达 1000 MU,因此准直器以及叶片之间的漏射对靶区和正常组织影响很大,需要定量测量分析。本文在简要描述包括叶片透射因子 TF(transmission factor)、叶片间漏射因子 LF(leakage factor)、叶片位置校正因子及内、外半影等 DMLC 参数基础上,通过胶片分析仪的测量与验证,将这些参数引用到治疗计划系统(treatment planning system, TPS),探讨 DMLC 参数在调强计划中正确使用的必要性和重要性。

此外,DMLC 实现调强有静态调强和动态调强两种方式。静态调强也称分布照射技术(step and shoot),是将不均匀的射野强度分级成若干个子野

(segment)进行逐个照射,两个子野切换之间必须停止射线出束。动态调强又称滑动窗口照射技术(sliding window),是通过调节 DMLC 叶片相对运动速度来实现对射野强度的调节,特点是在叶片运动过程中可能一直伴随着射线产生。不论使用哪一种调强方式,最终得到的剂量的准确性都依赖于对 DMLC 参数的正确考虑。本文的主要目的是提供一种实用的方法来测量 DMLC 的各项参数,以便输入治疗计划系统 TPS 中,提高调强治疗计算结果和测量结果的一致性,达到精确治疗的目的。

1 材料和方法

1.1 材料

美国 Varian 公司的 Clinac-IX 和 Clinac-23EX 医用电子直线加速器,美国 Kodak X-Omat V 胶片分析仪。Clinac-IX 加速器的多叶光栅由 60 对叶片组成,光栅中心 40 对叶片每片宽度在等中心位置的投影为 5 mm,两端 20 对叶片每片宽度在等中心位置的投影为 10 mm。Clinac-23EX 加速器的多叶光栅由 40 对叶片组成,每片宽度在等中心位置的投影为 10 mm。

1.2 实验方法

Varian Clinac-IX 和 Clinac-23EX 医用直线加速器使用的 DMLC 分别为 Varian 60 对和 Varian 40 对 MLC。测量的 DMLC 参数包括叶片透射因子、叶片间漏射因子、叶片位置校正因子及内、外半影因子。DMLC 参数的测量结果将被引入到 TPS 的原始机器数据中,并参与调强优化计算。基于实测的 DMLC 参数计算得到的调强计划结果,在加速器上对夹有

胶片的模体进行照射,并使用剂量验证系统对胶片得到的剂量分布与 TPS 计算的剂量分布进行对比分析。

在 DMLC 参数测量前,需要做以下准备工作:一是需要标定 DMLC 叶片位置精度和光野与射野的重合性,DMLC 各叶片位置精度应控制在 0.5 mm 以内,光野与射野的重合性应在 0.4~1.1 mm 范围内;二是确定刻度胶片的灰度剂量关系,在确定 DMLC 符合要求后,可以测量 DMLC 的各项指标。

1.2.1 叶片透射因子和叶片间漏射因子测量

设置钨门大小为:Y 方向 10 cm;X 方向 10 cm。叶片状态:闭合到最小间隙(Gap) = 0.5 mm,出束跳数为 100 MU,在胶片上预先画好 10 cm×10 cm 正方形,将胶片水平放置在厚度 ≥ 2 cm 的等效水组织上,并使胶片处于等中心所在平面(SAD=100 cm),将钨门大小设置为 10 cm×10 cm,使光野与胶片上的 10 cm×10 cm 正方形对齐,在正方形的四角及中心用针点出标记(穿透避光膜使胶片局部曝光成标记点),用来标注灯光野位置。标记完毕,覆盖 1.5 cm 和 3.0 cm (1.5 cm 为 6 MV 光子在 10 cm×10 cm 射野下的最大剂量深度 D_{\max} ;3.0 cm 为 15 MV 光子在 10 cm×10 cm 射野下的最大剂量深度 D_{\max}) 厚度的等效水组织。

操作 DMLC 使所有叶片闭合到叶片间的最小间隙(Gap)为 0.5 mm 位置(Varian DMLC 需要设置叶片间的最小间隙 Gap),控制台预置照射 500 MU,用胶片测量 6 MV,15 MV X 线的读数,重复测量 3 次取其平均值^[3],再通过胶片剂量分析仪进行分析,通过分析垂直于叶片运动方向的截面曲线,通过 MLC 开野和闭合时的比值可以自动得到叶片透射因子和叶片间漏射因子(注意:截取位置避开灯光野标注点)。由于通过 DMLC 透漏射所得到的注量胶片并不完全对称平稳,为了保证测量结果的准确性,可分别在距叶片中缝(Gap 处) -4 cm、-3 cm、-2 cm、2 cm、3 cm、4 cm 位置垂直叶片运动方向截取多条截面曲线。

1.2.2 叶片位置校正因子和内、外半影测量

钨门大小为:Y 方向 15 cm,X 方向 15 cm;叶片子野大小:Y 方向为 10 cm,X 方向为 10 cm。处方剂量为 100 MU。测量方法同叶片透射因子和片间漏射因子测量,根据给定跳数照射。基于照射得到的胶片结果,通过分析平行于叶片运动方向的截面曲

线,可以自动得到叶片位置校正因子(位置校正因子为胶片自动读出的射野大小除以加速器显示的射野大小)和内外半影(注意:截取位置避开灯光野标注点),由于通过 DMLC 透、漏射所得到的注量胶片并不完全对称平稳,为了保证测量结果的准确性,可截取多条截面曲线。

1.2.3 对比逆向调强的测量结果与计算结果

将测量得到的 DMLC 参数加入到 TPS 系统的机器参数内,针对模体设计逆向调强计划,并在加速器上对夹有胶片的模体实施该计划,可得到逆向调强计划的测量结果。分析并对比结果,可得到等剂量线的比较结果和任意截面的剂量对比情况。

2 结果

Varian 60 对和 40 对叶片的 DMLC 参数的测量结果见表 1。

表 1 DMLC 参数测量结果
Table 1 Measurement results of DMLC parameters

项目	60 对叶片		40 对叶片	
X 射线能量/MV	6	15	6	15
叶片透射因子/%	0.89	1.22	0.67	1.03
叶片漏射因子/%	1.13	1.56	0.87	1.35
叶片位置校正因子/cm	0.07	0.11	0.05	0.09
内半影/cm	0.54	0.78	0.43	0.71
外半影/cm	0.85	1.12	0.75	0.98

MLC 叶片类型不同以及 X 射线能量的不同,导致 X 射线的穿透能力和散射本领不同,进而对这些 DMLC 参数(包括叶片透射因子、叶片漏射因子、叶片位置校正因子、内半影、外半影)产生较大影响。

根据表 1 结果可知:无论是 60 对的 MLC 叶片还是 40 对的 MLC 叶片,用 15 MV 测得的 DMLC 参数都较 6 MV 测得的参数值高;60 对 MLC 叶片较 40 对 MLC 叶片而言,在同一种能量下测得的上述各参数都更高。

将上述两组 DMLC 参数分别引入 TPS,分别将逆向调强计算结果和实测结果进行对比分析,结果表明采用上述两组 DMLC 参数后,逆向调强计算结果与实测结果的 80% 等剂量线面积重合度都大于 95%,曲线的分离度均小于 3 mm,完全符合临床要求。通过在两台 Varian 医用直线加速器上对 60 对

和 40 对 DMLC 的逆向调强测量结果表明,将实测的 DMLC 参数引入到 TPS 计划系统,将在很大程度上提高逆向调强的计算结果的准确性。试验的计算值和实际测量结果的吻合程度完全符合临床要求。

3 讨论与结论

DMLC 的各参数和加速器的设计、射线能量密切相关,是加速器验收和常规质量保证与控制的重要内容。随着固定野调强放疗以及旋转弧形调强放疗技术的应用,由于使用子野或野中野技术,单次照射的机器输出跳数可能很高,对 DMLC 的漏、透射等参数要求越来越高。同时要根据不同的 MLC 型号区别对待,叶片端面的透射剂量比较大,尤其对为防止叶片碰撞而在叶片端面留有 5 mm 左右间隙的 MLC,治疗计划设计时要优化准直器的角度,防止射线透过叶片端面直接照在患者的重要组织或器官上,产生严重的辐射损伤,Ing 等^[4]研究了漏射线对晶体受照剂量的影响。而 LoSasso^[5]和 Liu 等^[6]也研究发现 MLC 的透射率约为 1.5%,因此在治疗计划参数设置时对漏射和透射参数进行实测是必须考虑的,Varian 医用直线加速器的 DMLC 有后备的钨门,作为独立的准直器使用能很好地保护重要组织或器官^[7]。但在优化放疗计划时还应根据情况转动准直器利用钨门再次遮挡重要危及器官,最大限度地降低辐照风险,减少对重要组织或器官的损伤。

由于 DMLC 叶片的宽度直接决定了 DMLC 所组成的不规则射野与计划靶区体积(PTV)形状的几何适形度;叶片越薄,适形度越好,但加工也较困难,驱动电机等机构越多且复杂,造价相应提高,因此必须在适形度和造价之间作合理的选择。MLC 叶片的高度必须能将原射线的辐射强度削弱到 5% 以下,即至少需 4~5 个半值厚度,叶片高度一般不少于 5 cm 厚的钨合金,如果将透射线剂量降到 2% 以下,通常需 7.5 cm 的钨合金厚度。

临床应用要求每个叶片独立运动灵活,摩擦力小,相邻叶片之间不能挤靠太紧,但贴得太松又容易引起射线泄漏,即产生漏射剂量。为解决这一矛盾,可将每个叶片加工成一面带凹槽,另一面带凸榫,使相邻两片之间以槽榫凹凸迭合,利用射线只能直线传播的特点获得很好的防透漏射效果^[8]。这种槽榫凹凸结合既不必太紧,也不必太深。DMLC 的叶片间漏射率可确保小于 2%。治疗或后备准直器的

自动跟随是为了屏蔽相对叶片和相邻叶片之间的泄漏射线^[9-10]。

DMLC 的参数测量应建立在常规放疗设备的质控基础上,因而在做 DMLC 质控测量之前首先要保证加速器其他的参数应准确。如加速器的机架、准直器的到位精度,准直器的等中心精度,灯光野和射野的一致性。另外,叶片端面弧形设计致使端面间透射线较高,而在 TPS 中设计调强计划时,端面闭合常出现在射野内,这就更应该重视透射线对剂量精度的影响^[11-12]。叶片运动过程中到位精度如有误差,如闭合不严会增加透射量,因此应加强对 DMLC 叶片的保养和检测工作。

DMLC 漏透射参数同样会随机架角度变化,这是由于机架角度变化导致 MLC 的重力惯性变化而引起位置误差,最终导致实际受到的剂量和 TPS 计算的剂量存在一定偏差^[13]。Luo 等^[14]研究了在前列腺调强放疗中的 MLC 因重力等原因引起的位置误差导致的剂量学效应关系,他们发现了靶区剂量误差与平均 MLC 到位误差的相互关系,如果叶片位置扩大 0.2 mm,靶区剂量就会改变 1%。而对于动态 MLC 的调强放疗,Zygmanski 等^[15]报道 MLC 叶片误差约为 0.05 cm,Woo 等^[16]发现当用电离室测量射野边缘时,如果叶片位置不精确时会造成 13% 的剂量误差,Sharpe 等^[17]报道当子野为 1 cm×1 cm 时,如果 MLC 叶片位置误差为 2 mm,吸收剂量就会相差 16%,误差为 1 mm 时则相差 8%。当加速器机架角度为 0°时,MLC 叶片运动方向始终与重力方向垂直,这时 MLC 叶片引起的剂量误差最小,因此为了减少 MLC 叶片对放疗剂量的影响,定期对 MLC 叶片进行维护和保养是必要的。

DMLC 受漏透射线,内外半影以及叶片到位精度等因素的影响,而设计 TPS 治疗计划时,必须要修正上述因素给 MLC 带来的影响,保证医用直线加速器实际治疗剂量分布能与 TPS 计划中的剂量分布保持一致,确保患者受到精确治疗。必须对 DMLC 测量参数(包括叶片透射因子、叶片漏射因子、叶片位置校正因子、内半影、外半影)进行实测,根据本文研究结果,上述参数虽然会受到 MLC 叶片数目和 X 线能量的影响。但将测得的 DMLC 参数引入 TPS,并对逆向调强计算结果和实测结果进行对比分析,其结果都能证明逆向调强计算结果与实测结果的 80% 等剂量线面积重合度都大于 95%,曲

线的分离度均小于 3 mm, 完全满足临床应用要求。

参考文献

- [1] Biggs BP, Galvin J, Klein E, et al. Basic application of multileaf collimators [R]. Report of the AAPM Radiation Therapy collimators. Report of the committee Task Group No.50 (Medical Physics, 2001).
- [2] Boyer A, Biggs P, Galvin J, et al. 2001 Basic application of multileaf collimators AAPM Report No.72 [R]. Madison, WI: Medical Physics Publishing, 2001.
- [3] 张玉海, 夏火生, 韩守云, 等. 三维治疗计划系统参数检测与剂量验证 [J]. 中国医学物理学杂志, 2007, 24 (3) : 163-165. Zhang Yuhai, Xia Huosheng, Han Shouyun, et al. Parameter measurement and dosimetry verification of 3D TPS [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2007, 24 (3) : 163-165.
- [4] Ing Tilo Wiezorek, Nico Banz, Michael Schwedas, et al. Dosimetric Quality Assurance for Intensity-Modulated Radiotherapy [J]. Strahlentherapie Und Onkologie, 2005, (7) : 468-474.
- [5] LoSasso T. IMRT delivery performance with a Varian multileaf collimator [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 71 (1) : S85-S88.
- [6] Liu HH, Wang X, Dong L, et al. Feasibility of sparing lung and other thoracic structures with intensity-modulated radiotherapy for non-small-cell lung cancer [J]. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 2004, 58: 1268-1279.
- [7] Klein EE, Low DA. Interleaf leakage for 5 and 10 mm dynamic multileaf collimation systems incorporating patient motion [J]. Med Phys, 2001, 28: 1703-1710.
- [8] Lo sasso T, Chui CS, Kutcher GJ, et al. The use of multi-leaf collimator for conformal radiotherapy of carcinomas of the prostate and nasopharynx [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1993, 25 (2) : 161-170.
- [9] Palta JR, Yeung DK, Frouhar V. Dosimetric considerations for a multileaf collimator system [J]. Med Phys, 1996, 23 (5) : 1219-1224.
- [10] Das DJ, Desobry GE, McNeeley SW, et al. Dosimetric characteristics of the Elekta beam modulator TM [J]. Phys Med Biol, 2005, 50 (6) : 5479-5492.
- [11] LoSasso T, Chui CS, Kutcher GJ, et al. The use of a multi-leaf collimator for conformal radiotherapy of carcinomas of the prostate and nasopharynx [J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics 1993; 25: 161-170.
- [12] Liu C, Simon TA, Fox C, et al. Multileaf collimator characteristics and reliability requirements for IMRT Elekta system [J]. International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, 2008, 71: S89-92.
- [13] 李长虎, 田卫群, 徐利明. 不同机架角度时瓦里安多叶准直器叶片到位精度分析 [J]. 中国医学物理学杂志, 2012, 29 (2) : 3257-3249. Li Changhu, Tian Weiqun, Xu Liming. The compare of the position accuracy of varian multileaf collimator with different gantry angle [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2012, 29 (2) : 3257-3249.
- [14] Luo W, Li J, Price RA Jr, et al. Monte Carlo based IMRT dose verification using MLC log files and R/V outputs [J]. Med Phys, 2006, 33 (7) : 2557-2564.
- [15] Zygmanski P, Kuang JH, Jiang SB, et al. Dependence of fluence errors in dynamic IMRT on leaf-positional errors varying with time and leaf number [J]. Med Phys, 2003, 30 (10) : 2736-2749.
- [16] Woo MK, Nico A. Impact of multileaf collimator leaf positioning accuracy on intensity modulation radiation therapy quality assurance ion chamber measurements [J]. Med Phys, 2005, 32 (5) : 1440-1445.
- [17] Sharpe MB, Miller BM, Yan D, et al. Monitor unit settings for intensity modulated beams delivered using a step-and-shoot approach [J]. Med Phys, 2000, 27 (12) : 2719-2725.

(2014-10-30 收稿, 2015-01-15 修回)