

容积旋转调强多叶准直器叶片位置 误差分析研究

李成强 陶城 朱健 卢洁 刘同海 尹勇

250117 济南, 山东省肿瘤医院

通信作者: 尹勇, Email: yongyinsd@163.com

DOI: 10.3760/ema.j.issn.0254-5098.2016.12.005

【摘要】 目的 研究鼻咽癌容积旋转调强计划执行过程中多叶准直器叶片的位置误差, 验证一种检测叶片到位精度的方法。方法 随机数字表法选取 32 例鼻咽癌患者的容积旋转调强双弧计划, 分别为第 1 个治疗弧(顺时针 $181^{\circ} \sim 179^{\circ}$)与第 2 个治疗弧(逆时针 $179^{\circ} \sim 181^{\circ}$), 每个治疗弧包含 A、B 两组叶片, 使用 Argus 软件提取在 Varian Trilogy 加速器上计划实际执行时的 Dynalog 文件, 比较叶片实际位置与计划位置间的差别。结果 所有计划在 ± 2 、 ± 1.5 、 ± 1 和 ± 0.5 mm 位置误差以内的叶片占比分别为 99.99%、99.90%、99.07% 和 93.98%; 第 1、2 个治疗弧和 A、B 组在 ± 1 mm 位置误差以内的叶片占比分别为 98.08%、100% 和 98.97%、99.01%。第 1 个治疗弧与第 2 个治疗弧的叶片位置误差范围分别为 $-2.95 \sim 2.99$ 和 $-0.22 \sim 0.23$ mm, 差异有统计学意义($t = 2.35, P < 0.01$); A 与 B 组的叶片位置误差范围分别为 $-2.95 \sim 2.68$ 和 $-2.92 \sim 2.99$ mm, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。结论 容积旋转调强计划执行中, 叶片到位精度在误差控制范围内, 多个治疗弧计划验证时需要考虑对治疗弧分别验证, 日志文件分析可作为加速器叶片到位精度检测的一种行之有效的方

【关键词】 容积旋转调强; 日志文件; 多叶准直器; 位置误差

基金项目: 国家自然科学基金(81301298, 81472811); 山东省自然科学基金(ZR2011HL060)

Analysis of multi-leaf collimator leaf position deviation in volumetric modulated arc therapy Li

Chengqiang, Tao Cheng, Zhu Jian, Lu Jie, Liu Tonghai, Yin Yong

Shandong Cancer Hospital, Jinan 250117, China

Corresponding author: Yin Yong, Email: yongyinsd@163.com

【Abstract】 Objective To evaluate the position deviation of multi-leaf collimator (MLC) in volumetric modulated arc therapy for nasopharyngeal carcinoma and to verify a method of detecting the leaf position accuracy. **Methods** Thirty-two volumetric modulated arc plans of nasopharyngeal carcinoma were randomly selected. A clockwise arc with a gantry range of 181° to 179° and a counterclockwise arc with a gantry range of 179° to 181° were used for each plan. Each arc contained two leaf groups, groups A and B. By using the Argus software, the actual MLC leaf positions were extracted from the Dynalog files in the Varian Trilogy accelerator. The planned MLC leaf positions were compared with the actual positions, and the differences were calculated between them. **Results** The proportions of the leaf position errors within ± 2 , ± 1.5 , ± 1 and ± 0.5 mm were 99.99%, 99.90%, 99.07% and 93.98%, respectively. The proportions of the leaf position errors within ± 1 mm were 98.08%, 100%, 98.97% and 99.01% for the first therapeutic arc (ARC1), second therapeutic arc (ARC2), A and B groups, respectively. The leaf position errors range of ARC1 and ARC2 were -2.95 to 2.99 and -0.22 to 0.23 mm ($t = 2.35, P < 0.01$). The leaf position errors range of leaf bank A and leaf bank B were -2.95 to 2.68 and -2.92 to 2.99 mm ($P > 0.05$). **Conclusions** During the volumetric modulated arc radiotherapy, the leaf positions deviation are in control. The Dynalog files can be used as an effective way to analysis the leaf position errors.

【Key words】 Volumetric modulated arc therapy; Dynalog file; Multi-leaf collimator; Position error

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (81301298, 81472811); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2011HL060)

容积旋转调强 (volumetric-modulated arc therapy, VMAT) 通过机架的旋转,使加速器在出束的同时伴随着剂量率、叶片位置的连续变化,在保证计划质量不亚于固定野调强技术的前提下,缩短了照射时间并节省加速器机器跳数,提高放疗效率,并具有潜在的放射生物学优势^[1-3]。VMAT 计划控制点间叶片位置、运动速度受机架转速、剂量率、累积跳数等因素相互制约,叶片的运动控制更加复杂,叶片位置误差会直接影响计划剂量分布,可能会给患者带来不可预知的危险^[4]。本研究通过提取并解析加速器记录叶片实际执行位置的日志文件,分析叶片的到位精度,监测 VMAT 计划执行过程中叶片到位情况,验证一种新的多叶光栅质量控制方法。

资料与方法

1. 一般临床资料:采用随机数字表法选取山东省肿瘤医院 2015 年 6 月至 2015 年 8 月收治的 32 例鼻咽癌患者。

2. 计划设计:使用美国 Varian 公司的 Eclipse V 11.0 计划系统设计双弧 VMAT 计划,采用渐进分辨率优化算法 (progressive resolution optimizer, PRO³)。第 1 个治疗弧 (ARC1) 机架按 181° ~ 179° 顺时针旋转,准直器角度设为 15°;第 2 个治疗弧 (ARC2) 机架按 179° ~ 181° 逆时针旋转,准直器角度设置为 345°。所有患者放疗计划均于实际执行前通过 ArcCheckTM 剂量验证,并由 Varian Trilogy (RapidARC) 加速器执行治疗。该加速器内置 MillenniumTM 60 对多叶光栅 (multi-leaf collimator, MLC), 中心区域 40 对叶片等中心宽度为 5 mm, 两侧各 10 对 (共 20 对) 叶片等中心宽度为 10 mm。叶片以等中心轴为界对称的分为两组:分别为 A 和 B 组,每组包含 60 条叶片。

3. 叶片位置分析与检测:加速器每 50 毫安秒检测 1 次全部 MLC 端面位置,并将坐标值记录于动态日志 DynaLog 文件中。借助美国 Varian 公司的 Argus V 4.7 软件解析和提取加速器实际执行计划时记录的 DynaLog 文件,该文件实时记录了容积旋转调强计划实施过程中的机械参数,通过 Fortran 自编程序,解读文件中每个控制点叶片的实际位置,Argus 软件同时可以导出计划叶片位置文件,利用自编程序对叶片实际位置和计划位置进行比较分析。本研究仅针对活动叶片,不考虑铅门覆盖下的叶片。为实现计划的个体化验证和叶片整体

位置误差分布的检测,分析的叶片位置信息包括:所有活动叶片的位置误差;对比 A 与 B 组叶片位置误差的不同;对比 ARC1 叶片位置误差和 ARC2 叶片位置误差的不同。每个患者均提取疗程中前 3 个执行分次的日志文件进行上述误差的分析,共 64 个全弧,每个弧有 179 个控制点。

4. 统计学处理:所有数据结果使用频率直方图显示。差异分析采用 SPSS 16.0 软件,对 A 与 B 组叶片位置误差的差异和 ARC1 与 ARC2 间叶片位置误差的差异分别行配对 *t* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

1. 所有叶片位置误差频率:所有叶片位置误差频率趋势如图 1 所示。误差在 ± 2 、 ± 1.5 、 ± 1 和 ± 0.5 mm 以内的叶片占所有叶片的百分比分别为 99.99%、99.90%、99.07% 和 93.98%,误差范围为 $-2.95 \sim 2.99$ mm。

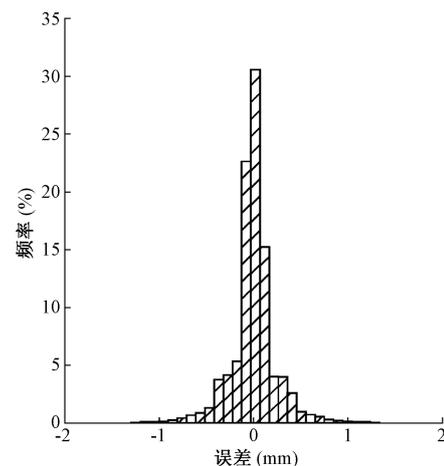


图 1 所有叶片位置误差频率

Figure 1 Histograms of leaf position errors for all leaf

2. A 与 B 组叶片位置误差频率:两组叶片位置误差频率趋势如图 2 所示。A 组误差在 ± 2 、 ± 1.5 、 ± 1 和 ± 0.5 mm 内叶片占该组叶片的百分比分别为 99.99%、99.90%、98.97% 和 94.09%。B 组误差 ± 2 、 ± 1.5 、 ± 1 和 ± 0.5 mm 内叶片占该组叶片的百分比分别为 99.99%、99.93%、99.01% 和 94.24%。A 与 B 组的叶片位置误差范围分别为 $-2.95 \sim 2.68$ 和 $-2.92 \sim 2.99$ mm,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

3. ARC1 与 ARC2 叶片位置误差频率:ARC1 和 ARC2 叶片位置误差频率如图 3 所示。ARC1 误差

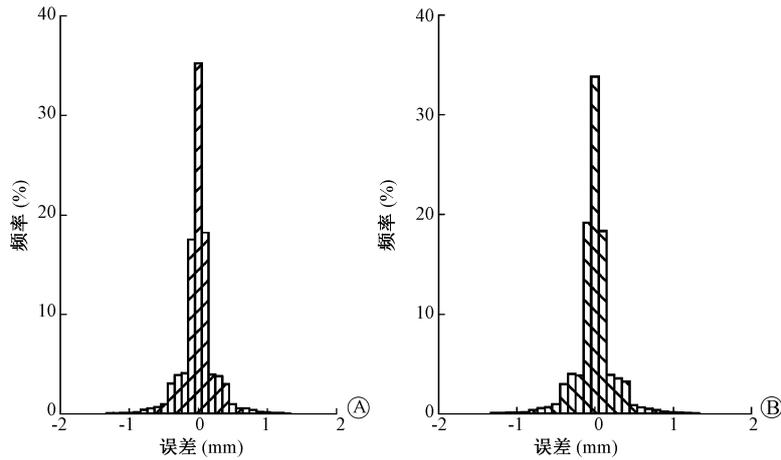


图 2 叶片位置误差频率 A. A 组; B. B 组

Figure 2 Histograms of leaf position errors A. A group; B. B group

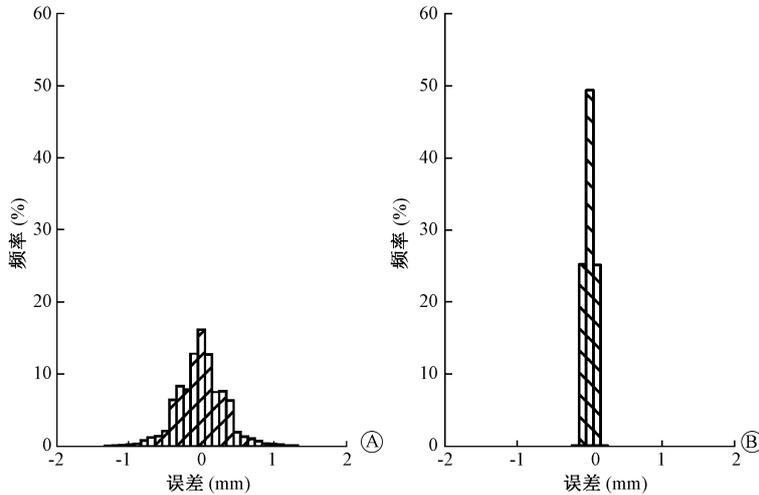


图 3 叶片位置误差频率 A. 第 1 个治疗弧; B. 第 2 个治疗弧

Figure 3 Histograms of leaf position errors A. The first therapeutic arc; B. The second therapeutic arc

在 ± 2 、 ± 1.5 、 ± 1 和 ± 0.5 mm 内叶片占该治疗弧叶片的百分比分别为 99.98%、99.84%、98.08% 和 88.56%。ARC2 叶片位置误差均在 0.5 mm 以内。ARC1 与 ARC2 的叶片位置误差范围分别为 $-2.95 \sim 2.99$ 和 $-0.22 \sim 0.23$ mm, 差异有统计学意义 ($t = 2.35, P < 0.01$)。

讨 论

VMAT 技术通过动态地调整加速器旋转速度、剂量率和叶片位置及速度,提高了治疗效率^[5-6],技术的复杂性也相应地增加,在放疗计划方案设计和执行过程中,随之而来的不确定因素更多,如计划设计和传输错误、子野序列执行过程中加速器的机械到位误差、机器输出剂量的波动和患者摆位误差等,都会影响到患者接受的剂量^[7-9]。叶片位置决

定旋转调强计划每个控制点射野的大小,如果叶片位置精度不够,叶片到位误差较大,导致计划剂量得不到精确投照,最终会影响放疗疗效,有可能会给患者带来不可预知的危险,因此,叶片到位精度的检测是确保剂量准确投照的重要环节。

加速器叶片到位精度的影响因素主要包括校准程序、射野光野一致性和重力因素等,这些因素可能会使叶片发生偏移、外扩或者内收等系统误差^[10-12]。为保证剂量传输的准确性,应避免叶片出现位置误差而造成靶区和危及器官受量发生变化^[13]。上述几种类型的叶片位置误差对计划剂量分布的影响是不同的,外扩或者内收的叶片系统误差由于能够明显改变子野面积大小,该类误差对计划剂量分布影响显著^[14]。Oliver 等^[15]分析了前列腺 VMAT 计划的等效均匀剂量 (equivalent uniform

dose, EUD) 受叶片位置误差的影响发现, MLC 叶片偏移误差对 EUD 影响为 $-1.0\%/mm$, 叶片外扩对 EUD 影响为 $8.2\%/mm$, 叶片内收对 EUD 影响为 $-7.2\%/mm$ 。在对多叶准直器进行质量控制的过程中应更加注重检测叶片是否存在系统外扩或者内收误差, 本研究通过分析 Argus 记录的加速器文件可以分析活动叶片的实际到位误差。

Ling 等^[16]针对执行 VMAT 计划的加速器叶片的到位精度设计了常规质量控制方法, 加速器在机架旋转速度、剂量率和叶片速度变化情况下投照时叶片到位精度好于 0.2 mm , 但加速器执行 VMAT 计划时叶片有往复、插指等更为复杂的运动情况, 该方法未能给出加速器实际执行旋转调强计划时叶片的到位误差情况。Fontenot^[9]利用放疗网络与传输系统 Mosaiq 对 Elekta Infinity 加速器执行 Pinnacle VMAT 计划叶片到位精度进行了分析, 结果显示, 2 mm 内的 MLC 叶片到位误差平均百分比为 87.3% 。本研究中监测的 MLC 叶片到位误差在 2 mm 内的平均百分比为 99.99% , 明显优于上述报道结果。研究中提到加速器控制系统与 Mosaiq 网络记录与传输系统两者在记录叶片位置时存在时间延迟的现象, 可能是导致叶片到位精度较本研究差的原因。

本研究通过分析比较计划文件中的叶片位置与加速器执行计划时叶片的实际位置, 结果显示, 位置误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 之内的叶片占有所有叶片的百分比为 99.99% , 且叶片位置误差成对称分布; A 与 B 组叶片位置误差均为对称分布, 两误差间差异无统计学意义, 该类误差数据分析可以作为检测叶片是否发生系统偏移、内收或外扩的误差依据; ARC2 的叶片到位精度好于 ARC1 叶片的到位精度, 分析其原因可能为计划优化时 ARC2 的复杂度较 ARC1 低, 提示在进行多弧容积旋转调强计划验证时, 有必要考虑对各个弧段分别验证, 以便找到可能影响整体计划通过率的弧段。同时, 本方法也可以结合治疗前模体验证的方法对 VMAT 计划进行综合验证分析, 在 VMAT 模体验证计划实施的同时采集日志文件, 分析该计划在模体上验证的 γ 通过率和叶片到位精度, 该方法也是个体化验证的补充。

综上所述, 加速器在执行复杂的鼻咽癌容积旋转调强计划时, 叶片位置在可控范围, 在进行计划验证或者计划复杂度分析时可对每个治疗弧进行分析。日志文件分析可以作为叶片到位精度检测

的方式, 叶片位置到位精度的检测符合精准放疗的要求。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 未接受有关公司的任何赞助, 不涉及各相关方的利益冲突

作者贡献声明 李成强负责采集数据, 论文撰写, 对结果进行统计和分析; 陶城、朱健、刘同海负责计划制定和数据处理; 卢洁、尹勇设计实验, 指导论文的撰写和修改

参 考 文 献

- [1] Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc [J]. *Med Phys*, 2008, 35 (1): 310-317. DOI: 10.1118/1.2818738.
- [2] Bedford JL. Treatment planning for volumetric modulated arc therapy [J]. *Med Phys*, 2009, 36 (11): 5128-5138. DOI: 10.1118/1.3240488.
- [3] Bortfeld T, Webb S. Single-Arc IMRT? [J]. *Phys Med Biol*, 2009, 54(1): N9-N20. DOI: 10.1088/0031-9155/54/1/N02.
- [4] Bzdusek K, Friberger H, Eriksson K, et al. Development and evaluation of an efficient approach to volumetric arc therapy planning [J]. *Med Phys*, 2009, 36 (6): 2328-2339. DOI: 10.1118/1.3132234.
- [5] Cedric XY, Tang G. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation [J]. *Phys Med Biol*, 2011, 56(5): R31-54. DOI: 10.1088/0031-9155/56/5/R01.
- [6] Rao M, Cao DL, Chen F, et al. Comparison of anatomy-based, fluence-based and aperture-based treatment planning approaches for VMAT [J]. *Phys Med Biol*, 2010, 55 (21): 6475-6490. DOI: 10.1088/0031-9155/55/21/009.
- [7] Wang C, Luan S, Tang G, et al. Arc-modulated radiation therapy (AMRT): a single-arc form of intensity-modulated arc therapy [J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53 (22): 6291-6303. DOI: 10.1088/0031-9155/53/22/002.
- [8] Boylan C, McWilliam A, Johnstone E, et al. The impact of continuously-variable dose rate VMAT on beam stability, MLC positioning, and overall plan dosimetry [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2012, 13 (6): 254-266. DOI: 10.1120/jacmp.v13i6.4023.
- [9] Fontenot JD. Feasibility of a remote, automated daily delivery verification of volumetric-modulated arc therapy treatments using a commercial record and verify system [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2012, 13(2): 113-123. DOI: 10.1120/jacmp.v13i2.3606.
- [10] 白瞳, 朱健, 尹勇. 静态调强放疗中多叶光栅到位精度数字化分析 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2014, 34 (11): 837-840. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2014.11.009.
Bai T, Zhu J, Yin Y. Digital analysis of multi-leaf collimator position accuracy in static intensity modulated radiotherapy [J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2014, 34 (11): 837-840. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2014.11.009.
- [11] Clarke MF, Budgell GJ. Use of an amorphous silicon EPID for measuring MLC calibration at varying gantry angle [J]. *Phys Med*

- Biol, 2008, 53(2): 473-485. DOI: 10.1088/0031-9155/52/4/014.
- [12] Antypas C, Floros I, Rouchota M, et al. MLC positional accuracy evaluation through the Picket Fence test on EBT2 films and a 3D volumetric phantom[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(2): e70-e71. DOI:10.1120/jacmp.v16i2.5185.
- [13] Bai S, Li G, Wang M, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma[J]. Med Dosim, 2013, 38(2): 143-147. DOI: 10.1016/j.meddos.2012.10.002.
- [14] 李成强, 陶城, 朱健, 等. 多叶准直器叶片位置误差对鼻咽癌调强放疗剂量的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(7): 544-547. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.07.016.
- Li CQ, Tao C, Zhu J, et al. Impact of multileaf collimator position errors on simultaneous integrated boost intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2015, 35(7): 544-547. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.07.009.
- [15] Oliver M, Bush K, Zavgorodni S, et al. Understanding the impact of RapidArc therapy delivery errors for prostate cancer[J]. J Appl Clin Med Phys, 2011, 12(3): 32-43. DOI: 10.1120/jacmp.v12i3.3409.
- [16] Ling CC, Zhang P, Archambault Y, et al. Commissioning and quality assurance of RapidArc radiotherapy delivery system[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(2): 575-581. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2008.05.060.

(收稿日期:2016-07-04)

· 消息 ·

肿瘤精确放射治疗将实现国产化产学研突破

由解放军总医院放射治疗科李建雄主任牵头,全国 30 家大型医院、科研机构、大型企业联合攻关的国家重点研发计划“数字诊疗装备”重点专项 2016 年度项目“肿瘤精确放疗系统化临床解决方案的研发与临床应用”获得国家 4 287 万元资金资助,并即将正式启动。该项目将形成以国产化设备为平台、临床应用为核心、新技术应用为助推的放疗领域的产、学、研系统化突破。

近年来,尽管我国放疗装备技术发展迅速,但是 500 万以上的高端放疗装备主要依赖进口。事实上,以医用电子直线加速器、伽玛刀为代表的大型国产放疗设备在适应病种的治疗中,无论是技术还是疗效,均可与国际产品相抗衡,但却缺乏临床数据,既得不到医院认可,也得不到患者的认可。据 2015 年的统计结果,国产加速器由 2002 年 55.35% 的占有率下降为 26.67%,成为历史阶段性最低点。

产、学、研结合不紧密、国产设备的性能和适用范围不明确是其重要原因。此外,国产放疗设备在低等级医院治疗不规范导致疗效差、在高等级医院认可度低进一步限制了国产设备的临床应用。

为此,解放军总医院联合 2 家企业、3 所科研机构、24 所医院,分 17 个子课题,共同研究编制国产放疗设备在不同等级医院的精确放疗解决方案,使之系统化、规范化,形成可复制、可推广的经验,以规范在市县基层医院的使用、推广在省级以上(包括省级)医院的应用、促进国产设备的升级和改造,从而提高国产设备的生产、治疗、研发水平。

参与单位兼顾地域差异、临床和学术差异、所在地经济发展差异,能够普遍反映国内高中低各层级医院的现状和发展需求。高水平三甲医院的放疗技术、经验和管理制度,与代表国内主要放疗力量的省市县各级医院有机结合,形成的解决方案极具代表性。可证实国产设备在临床治疗中的可靠性和适用范围,规范市县级医院放疗设备规范性的使用,推动国产设备在国家级和省级医院的大力推广。

目前,国内每年接受放疗人数约占新发肿瘤患者的 14%,远低于国际推荐 70% 的比例。放疗设备昂贵导致无法大量引进,从而增大患者治疗量,是最基础的原因。该重点研发项目通过明确国产设备的临床优势,为国产放疗设备的临床应用提供循证依据和理论指导,为经费受限的医疗机构提供系统解决方案,促进国产放疗装备在各级医院广泛应用。从而救治更多适合放疗的肿瘤患者,维护人民的生命健康。

(解放军总医院 邱栗 怀思远)