

电子射野影像装置实施医用电子直线加速器晨检的可行性研究

李大明^{1,2}, 吴琰³, 谢金森¹, 彭照明², 杨鹏飞², 张哲², 刘雅洁²

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 北京大学深圳医院放射治疗科, 广东 深圳 518036; 3. 深圳市第三人民医院设备科, 广东 深圳 518112

【摘要】目的:通过对电子射野影像装置(EPID)在机械和剂量响应方面性能的研究,探讨其作为晨检设备的可行性。**方法:**首先对 Trilogy 直线加速器的 EPID 进行机械到位重复性、剂量线性响应测试;其次编辑一组模拟射野平移和对称性偏移的射野,检测 EPID 和 MyQA Daily 晨检仪对平移和对称性偏移的响应,并比较设置值和测量值之间的线性相关性;最后用 EPID 和 MyQA Daily 晨检仪连续 30 d 对加速器晨检,分析其测量结果及耗时。**结果:**EPID 位置重复性最大偏差 0.4 mm;剂量响应线性相关($R^2>0.999$)。在对称性偏移测试中,均能有效检测 0.2% 偏移且设置值和测量值之间线性相关($R^2>0.995$);平移测试中,EPID 线性略优于晨检仪($R^2=0.992$ vs $R^2=0.976$)。晨检任务中两者所有测量结果均在允许范围内,Y 方向对称性和平坦度结果显示 EPID 和晨检仪测量值相差可达 1.00% 以上,其他数据表现相近。耗时结果表明 EPID 平均用时(129.97 ± 4.16) s,比 MyQA Daily 晨检仪平均用时(184.53 ± 4.23) s 节省超过 50 s。**结论:**EPID 可以作为一种可靠、省时的晨检设备执行日常加速器晨检工作,但是不能作为加速器性能判断标准。

【关键词】电子射野影像装置;平坦度;对称性;晨检;直线加速器

【中图分类号】R318;R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2025)01-0014-06

Feasible study on implementing daily quality assurance for linear accelerator with electronic portal imaging device

LI Daming^{1,2}, WU Yan³, XIE Jinsen¹, PENG Zhaoming², YANG Pengfei², ZHANG Zhe², LIU Yajie²

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Department of Radiation Oncology, Peking University Shenzhen Hospital, Shenzhen 518036, China; 3. Department of Medical Equipment, Shenzhen Third People's Hospital, Shenzhen 518112, China

Abstract: Objective To analyze the performances of electronic portal imaging device (EPID) in mechanical and dosimetry responses, and to investigate the feasibility of adopting EPID as a daily quality assurance (QA) equipment. **Methods** The EPID of Trilogy linear accelerator was tested for mechanical position repeatability and dose linear response. Then, a group of special fields were edited manually for simulations of field translation and symmetry deviations, and the sensitivities of EPID and MyQA Daily to field translation and symmetry deviations were evaluated, and moreover, the linear correlation between the set value and the measured value was analyzed. Finally, daily QA was conducted with EPID and MyQA Daily for 30 consecutive days, and the measurement results and time consumption were analyzed. **Results** The maximum deviation of EPID position repeatability was 0.4 mm, and the dose response was linearly correlated ($R^2>0.999$). The symmetry deviation test results showed that both of EPID and MyQA Daily were capable to effectively detect the 0.2% offset in symmetry, and a linear correlation was demonstrated between the set value and the measured results ($R^2>0.995$). In translation test, the linear correlation of EPID was more explicit than that of MyQA Daily ($R^2=0.992$ vs $R^2=0.976$). In daily QA, all the measured results of EPID and MyQA Daily were within the clinic acceptance tolerance. Moreover, the mean value of Y-directional symmetry and flatness measured by EPID was approximately 1.00% larger than MyQA Daily. The average time required by EPID was 50 s less than MyQA Daily [(129.97 ± 4.16) s vs (184.53 ± 4.23) s]. **Conclusion** EPID can be served as a reliable and efficient daily QA equipment for linear accelerator. However, it is not capable to be used as a criterion for evaluating linear accelerator performance.

Keywords: electronic portal imaging device; flatness; symmetry; daily quality assurance; linear accelerator

【收稿日期】2024-08-26

【基金项目】湖南省自然科学基金(2022JJ30481)

【作者简介】李大明,工程师,研究方向:医学物理,E-mail: lidaming1005@163.com

【通信作者】刘雅洁,博士,主任医师,研究方向:肿瘤放射治疗,E-mail: Anthea1966@163.com

前言

目前,肿瘤放射治疗已进入精确放疗时代,需要有严谨的质量保证(Quality Assurance, QA)来满足临床需求。根据TG142号报告,晨检是加速器QA的重要内容之一^[1],在考察加速器剂量输出稳定性同时,对准直器物理位置精度也有明确要求,所以晨检设备需同时满足准确识别剂量和位移的能力。临床上通常使用晨检仪来执行此任务,其稳定性和准确性已经得到临床认可^[2-4]。但晨检仪也存在一定的局限性,如摆位重复性容易受操作人员的不同而受影响^[5]。电子射野影像装置(Electronic Portal Imaging Device, EPID)作为直线加速器的一部分,具有自动摆位、剂量响应准确和分辨率高等优点,广泛应用于治疗摆位^[6-7]、剂量验证^[8-10]和机械位置检测^[11-12]等方面。基于如上优点,有专家在性能测试结果中认可了EPID作为晨检工具的可能性,但是在和常规晨检设备的日检任务对比以及实际应用上需要更多数据^[13-14]。对此,本研究将探索EPID作为晨检设备的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究使用 Trilogy (Varian Inc., Palo Alto, California, U.S.) 直线加速器及其自带的 MV (Megavolt)级 aS1000 型 EPID 系统。EPID 由 1 024×768 个非晶硅探测器构成完整探测板,分辨率为 0.392 mm×0.392 mm,最大有效测量面积为 40 cm×30 cm。在模拟射野平移和对称性偏移实验中,照射野均由 Shapper32 (Varian Inc., Palo Alto, California, U.S.)软件设计,且 X 方向仅由多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)参与形成,其他测试均由铅门形成照射范围。所有实验均选择 6 MV 光子射线,治疗辐射头角度设为 0°,照射面积为 10 cm×10 cm,模体中的剂量分布均由 Eclipse (v15.5)优化计算获得。EPID 在测量中行等中心摆位,即源像距(Source-to-Image Distance, SID)为 100 cm,采集的剂量分布影像由 Portal Dosimetry 软件 (PD, v15.1)和 RIT 软件 (v6.7, Radiological Imaging Technology Inc., Colorado Springs, Colorado, U.S.)进行分析。

晨检仪为 MyQA Daily (IBA Inc., Louvain-La-Neuve, Belgium),该设备共包含 125 个直径为 3.2 mm,高为 2.0 mm 的圆柱形电离室,具体分布如图 1 所示。晨检仪中心区域 9 个电离室用于输出剂量(Output Factor, OF)检测,中心轴和对角线轴上的电离室用于分析射野大小(Field Size)、平坦度(Flatness)和对称

性(Symmetry)等参数。图中紫色区域为测量 10 cm×10 cm 射束时的有效测量范围。晨检仪自带软件分析得到相关实验数据。

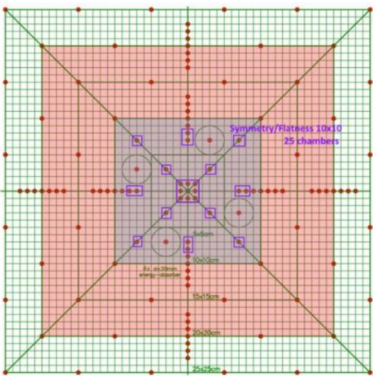


图1 IBA 晨检仪电离室分布图
Figure 1 Illustration of IBA MyQA Daily array

实验前对 EPID 进行校准,主要分 4 步进行。第一步:探测板等中心校准和影像的等中心校准。等中心校准是厂家工程师按照安装验收手册要求完成,通过前指针来确定等中心高度(机架零度时,探测器平面位于 98.8 cm±0.1 cm 高度),X 和 Y 方向的中心则通过探测板上的刻度线和准直器机头十字线投影验证。影像中心校准通过采集 4 个不同准直器角度(0°、±90°和 195°)、8 个不同机架角度(180°、±45°、±90°、±135°和 0°)下的 MV 和 KV (Kilovolt)影像,随后将获取的影像导入 Iso-Cube (Varian Inc., Palo Alto, California, U.S.)软件分析并完成校准,并用 Winston-Lutz 测试方法进行验证^[15]。第二步:通过 Imager Maintenance (Varian Inc., Palo Alto, California, U.S.)软件完成图像校准,用于修正图像质量,主要分本底校准(Dark Field)和增益校准(Flood Field)两阶段完成。第三步:剂量校准,利用厂家自带的校准数据包对探测器进行剂量响应曲线修正,并且定标输出剂量使 EPID 位于等中心高度处 10 cm×10 cm 条件下 100 MU (Monitor Unit)=1 CU (Calibration Unit)。最后通过 Las Vegas 和 Mobius (Model: 1129-MC², Varian)模体对探测板分辨率、对比度、均匀度和缩放比例验证。依据 Winston-Lutz 测试时间差异,整个校准和验证过程持续 4~6 h。按照本中心 EPID 使用频率每月进行一次 QA,保障 EPID 各项性能均满足 TG142 报告中关于 MV 平板探测器的基本要求。

本实验中对称性和平坦度计算方法采用 IEC-60976 光子分析协议^[16]。对称性和平坦度公式分别如式(1)~(2)所示:

$$\text{Symmetry} = \frac{\text{Max}(|D_{\text{Left}} - D_{\text{Right}}|)}{D_{\text{center}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Flatness} = \frac{D_{\text{max}}}{D_{\text{min}}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, D_{max} 和 D_{min} 表示照射野内最大剂量和均整区域(80%射野宽度)内最小剂量。 D_{Left} 、 D_{Right} 和 D_{center} 分别代表均整区域内与射野中心轴对称的左右两点的剂量以及中心轴上剂量。根据IEC和国家发布的医用电子直线加速器质量控制指南^[16-17]相关要求,平坦度和对称性需分别在106%和103%范围内,且TG142报告中晨检任务要求输出剂量相对于基准值偏差不能大于±3%、平坦度和对称性稳定在±1%以内、射野大小变化不能超过基准值±1 mm。

1.2 EPID到位重复性测试

设置机架角度为0°, 机器跳数=100 MU, 控制EPID从待机位置自动伸展至等中心位置出束, 同时EPID采集当前射野剂量分布影像, 完成后将EPID缩回至待机位置。循环对EPID采取自动摆位、剂量采集以及缩回操作11次, 以第一次采集的剂量影像数据为基准值, 用PD自带的Auto align功能分析后10次影像相对于基准影像在X和Y方向的位移差异。在机架角度为90°、270°和180°时重复测试, 评价不同机架角度EPID到位重复性。

1.3 剂量线性响应测试

设置机架为0°, 控制加速器分别输出1、2、4、8、16、32、50、100、200、300和400 MU的剂量, 经EPID采集射野剂量信息后, 记录各MU剂量下EPID中心点的剂量, 以观察其剂量响应是否呈线性。为评估EPID剂量响应的稳定性, 以每隔一天测量一次的频率重复检验一周内EPID的剂量响应。

1.4 模拟射野平移变化和对称性变化响应测试

1.4.1 射野平移响应测试

用Shaper32编辑14个仅通过MCL运动形成的动态多叶准直器(Dynamic Multileaf Collimator, DMLC)照射野。优化控制点剂量权重, 使射野内剂量分布均匀。参考射野F0在X和Y方向均关于中心轴对称。对照野F1~F10相对于参考射野向X负方向以0.1 mm步进平移, 射野F11、F12、F13分别相对F0平移1.2、1.5和2.0 mm。采集前, 在EPID的十字线投影中心贴一铅点, 便于RIT软件的光射野一致性功能分析各射野偏移值, 考察其设置偏移和实测偏移之间线性相关性。同时使用PD软件中的Auto align功能计算各对照野相对参考野在X方向位置的偏移, 评价PD软件中Auto align的精确性。在MyQA Daily上执行同样的一组射野, 利用X方向各射野偏移数据, 分析晨检仪对位置响应。

1.4.2 模拟对称性变化响应测试

使用shaper32编辑11个DMLC射野, 优化各控制点权重, 使之模拟束流对称性变化。X方向均只由MLC形成, 机器跳数=100 MU。设F0为基准野, F1~F10为对照野, 调节DMLC中控制点权重, 使各对照野在X=-5.0 cm处的剂量比X=5.0 cm处剂量依次提高0.2%, 射野内剂量梯度变化均匀。经EPID和MyQA Daily测量后, 分析各射野对称性和平坦度等信息, 评价两者在对称性设置偏移和实际测量偏移之间的对应关系, 计算拟合曲线的 R^2 。

1.5 EPID与MyQA Daily在晨检任务中的比较

利用EPID和MyQA Daily连续执行30 d晨检任务, 其中晨检仪作等中心摆位, EPID分等中心摆位和往枪端平移5 cm摆位两种测量方式, 记录3种晨检所用时间。晨检任务要求机架和准直器角度设为0°, 预设输出剂量为100 MU, 能量6 MV, 射野大小为10 cm×10 cm。为减少晨检顺序对结果产生的可能影响, 两种设备每天交替先后执行晨检任务。为定量评价二者的晨检表现, 本研究选择X/Y方向上的射野大小、对称性、平坦度和输出剂量作为评价指标。

2 结果

2.1 EPID到位重复性测试

图2显示了4个机架角度(0°、90°、180°和270°)的EPID测量结果。各个角度在X方向的重复到位精度较为稳定, EPID的X轴方向偏差均在0.1 mm内, Y轴方向则存在较大差异, 偏差范围0.0~0.4 mm。从实验结果来看, EPID能满足临床晨检中摆位要求。

2.2 EPID剂量线性响应测试

在剂量线性响应测试中, 数据显示EPID射野中心点的剂量与加速器的MU呈线性关系($R^2 > 0.999$)。对测量结果进一步分析, 当EPID接受大于8 MU的照射时, EPID射野中心剂量测量值与TPS计算参考值偏差均小于1.0%; 随着机器跳数降低, EPID射野中心剂量和TPS计算值之间偏差增大, 当机器跳数为1 MU时, EPID射野中心剂量相比TPS参考值偏移接近10.0%。如图3a所示。

2.3 EPID和MyQA Daily在模拟射野平移和对称性变化测试响应

2.3.1 射野平移响应测试

在RIT和PD软件分析中的结果显示EPID在设置平移值和测量平移值之间存在强线性关系。对设置平移值和测量平移值进行线性拟合后获得RIT组的拟合曲线的 R^2 大于0.999, PD组对应的拟合曲线的 R^2 为0.992。各射野中心X方向的离轴剂量曲线如图3b所示。MyQA Daily在本项

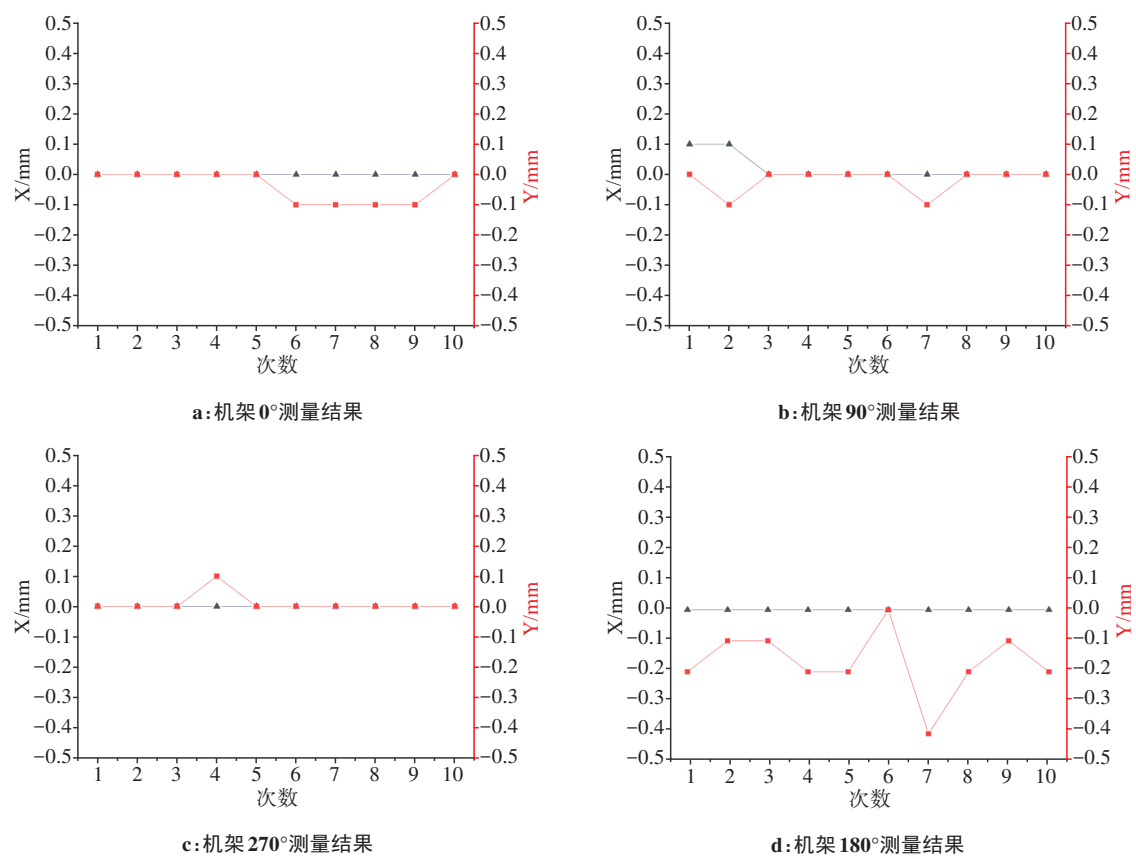


图2 不同机架角度 EPID 到位重复性测试
Figure 2 EPID mechanical position repeatability tests at different gantry angles

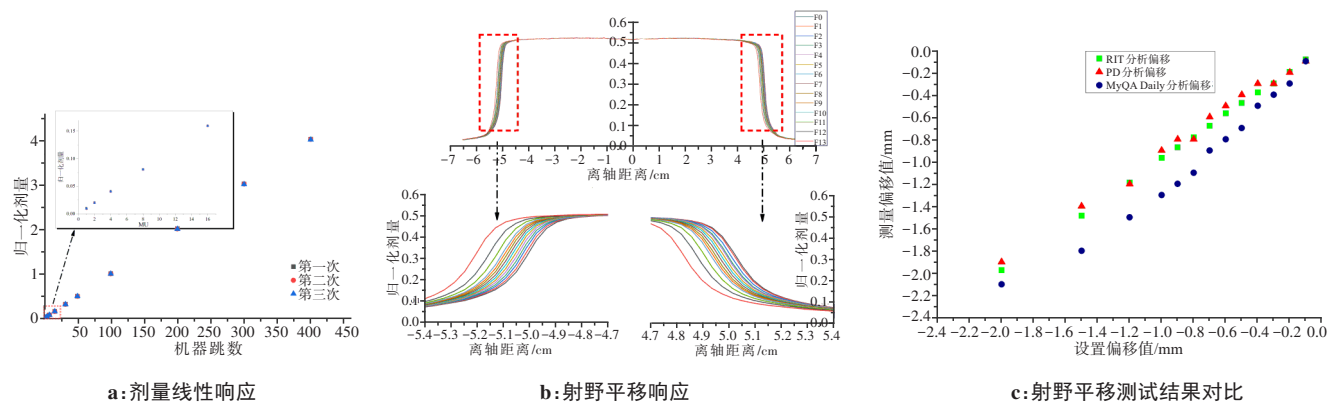


图3 EPID 在剂量线性变化和射野平移测试中的响应
Figure 3 Responses of EPID on dose linear deviation and field translation tests

测试相对EPID表现较弱,其拟合曲线的 $R^2=0.976$,对比测试结果如图3c所示。结果表明在位移变化较小时三者相差较少,随着偏移距离的增加,晨检仪测量值偏差相对RIT和PD组稍有增大。

2.3.2 模拟对称性变化响应测试 在模拟对称性变化的实验中,观察到EPID在射野中心X方向的对称性随着设置值偏离平衡位置发生相应变化(图4a),MyQA Daily也获得相同结果。对EPID和MyQA Daily的测量对称性数据与设定的对称性偏移数据的

变化曲线进行线性拟合,拟合后EPID测量组拟合曲线的 $R^2=0.999$,MyQA Daily组拟合曲线的 $R^2=0.998$ (图4b),两者表现相当。从变化趋势上看,EPID相对于晨检仪的变化率更加明显。

2.4 EPID与MyQA Daily在晨检任务中的比较

晨检任务测试中,通过对称性、平坦度、射野大小以及输出因子等方面的比较分析,EPID和MyQA Daily测量结果在稳定性上均满足临床要求。两者在X方向相关参数不论是均值(Mean)还是标准差(SD)均表现

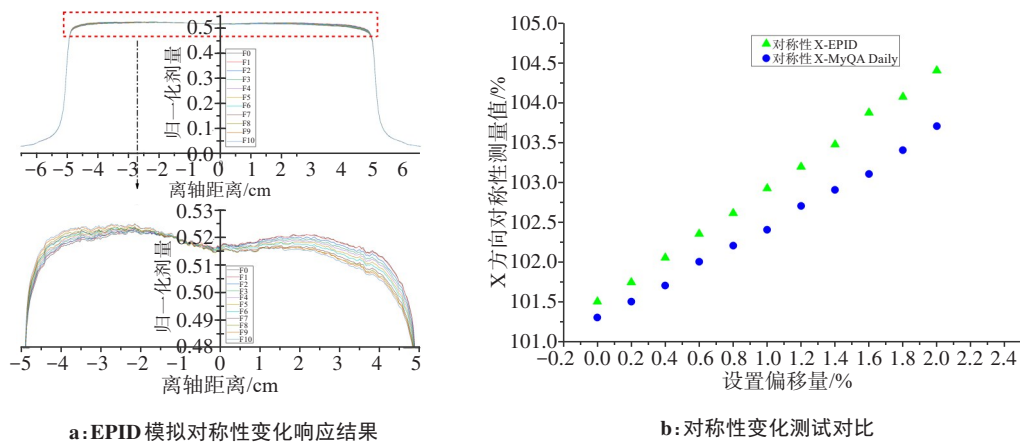


图 4 EPID 和 MyQA Daily 在射野对称性变化测试结果比较

Figure 4 Comparison of the performance between EPID and MyQA Daily on field symmetry offset test

相差不大,而Y方向方面EPID测量的对称性和平坦度结果相对 MyQA Daily 测量值偏大,标准差相差无几。EPID 和 MyQA Daily 测量的对称性分别为: $101.90\%\pm0.15\%$ vs $100.70\%\pm0.09\%$,EPID 组中 Y 方向平坦度为 $103.21\%\pm0.12\%$,晨检仪整个射野内平坦度为 $102.28\%\pm0.15\%$ 。EPID 往枪端方向平移 5 cm 后,输出因子降低至 $98.16\%\pm0.60\%$,远小于晨检仪等中心处的

$100.06\%\pm0.34\%$,Y 方向对称性和平坦度分别增大至 $104.05\%\pm0.16\%$ 和 $105.66\%\pm0.11\%$ 。结果如图 5a 所示。

EPID 在晨检耗时上相对于 MyQA Daily 展现了一定的优势,在 30 d 的晨检任务中,对比发现 EPID 要比晨检仪在平均单次晨检时间节省超过 50 s (图 5b), MyQA Daily 和 EPID 平均耗时分别为 (184.53 ± 4.23) s 和 (129.97 ± 4.16) s。

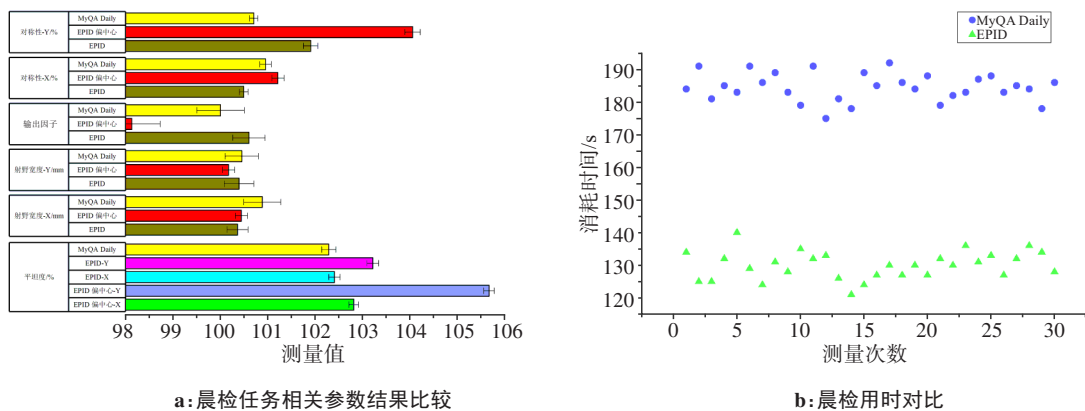


图 5 EPID 和 MyQA Daily 晨检任务中比较结果

Figure 5 Comparison of the performance between EPID and MyQA Daily on daily QA

EPID 表示该组测量时 EPID 探测器平板测量中心和辐射中心重合,且 SID=100 cm;EPID 偏中心表示在 EPID 条件下,探测器平板向枪端平移 5 cm 进行测量

3 讨论

本研究详细探索了 EPID 在摆位、射野平移和剂量响应方面的准确性和稳定性,并在各项晨检指标上与晨检仪进行了直观比较。实验结果表明:(1)EPID 能准确稳定地实施摆位,进一步对不同机架角度之间到位重复性分析,EPID 在 X 方向最大偏差 0.3 mm,Y 方向最大偏差 0.8 mm;(2)EPID 能准确稳定地反映输出剂量;

(3)对于各项晨检指标的稳定性上,EPID 在射野大小、平坦度、对称性和输出剂量与晨检仪表现相当,但在 Y 方向剂量测量值相对于晨检仪偏大。

射野平移实验结果显示,两者的测量值和实验值都呈良好线性相关,但 EPID 拟合曲线的 R^2 大于晨检仪。很多学者在对加速器的 MLC 到位精度研究中利用了 EPID 对位移的敏感性,并获得 EPID 对位置偏差以及重复性小于 0.5 mm 结论,且大部分叶片到位

精度能 $\leq 0.1\text{ mm}$ ^[18-20],所以本实验采用MLC作为位置变化的控制量是可行的。倪昕晔等^[21]研究表明EPID可以分辨0.1 mm偏差,与Li等^[22]研究结果相同。而本研究中,EPID对0.1 mm位移变化测量结果进一步证实了其对位置检测的灵敏性,相对晨检仪表现更优。EPID和晨检仪对位置的灵敏差异,可能由于两种设备探测器分布以及分辨率差别引起,具体原因则需要进一步研究证实。

通过对剂量方面测试结果分析,不论是平坦度、对称性以及输出剂量EPID和MyQA Daily两者数据相似。已有研究结果证明EPID作为QA工具时其剂量的精度可以保持在1%左右^[11]。本次实验模拟对称性变化得到了很好的反馈,即便只有0.2%的剂量梯度变化也能被EPID有效识别。不同的是,实验结果中Y方向的对称性和平坦度数据和晨检仪测量结果偏差较大,EPID的支撑臂对探测器的背向散射可能是其中一个重要因素。已有文献证实,支撑臂的金属结构对探测器剂量分布有1%~2%的影响,大范围照射时更显著^[23-25]。若对散射进行修正,可能对测量结果有改善。

EPID平移5 cm的结果体现了其剂量响应和探测板位置存在一定关系,这一点有区别于常规胶片。Y方向测量结果和输出剂量发生明显变化,其中对称性测量结果甚至超过103%,而晨检仪和EPID在等中心处的测量结果属于正常范围。此现象可能是源于以下三方面因素共同作用结果。其一,探测板平移后,测量区域处于校准文件中偏中心范围(X方向:-5~5 cm,Y方向:0~10 cm),而实际晨检中,照射野并没有作对应的偏中心设置;其二,在EPID校准探测器剂量响应过程中,校准文件的离轴曲线为厂家自带的数据库,并非实验加速器真实数据;第三,背向散射未有效修正。这也是本研究还需进一步完善的地方,同时也启示使用者在利用EPID作为质控工具时候,应尽量与校准过程中的设置保持一致,避免盲目对加速器进行调整。

综上所述,EPID在执行晨检任务方面具有准确、稳定的表现,同时所消耗时间相对于晨检仪要少,提高了晨检效率,可以用于执行晨检任务。但是也存在一些诸如背向散射修正和探测器剂量响应修正等问题还需彻底解决,故其测量结果不能作为评价加速器性能标准。

【参考文献】

- [1] Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [2] 胡倩倩, 张艺宝, 刘卓伦, 等. 四种常见加速器晨检仪的性能比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(7): 532-535.
Hu QQ, Zhang YB, Liu ZL, et al. Performance comparison of four common LINAC daily QA instruments[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(7): 532-535.
- [3] Binny D, Lancaster CM, Kairn T, et al. Monitoring daily QA 3 constancy for routine quality assurance on linear accelerators[J]. Phys Med, 2016, 32(11): 1479-1487.
- [4] Nicewonger D, Pamela Myers Daniel Saenz Neil Kirby Karl Rasmussen Niko Papanikolaou Sotiri Stathakis. PTW QUICKCHECKweblne: daily quality assurance phantom comparison

- and overall performance[J]. J BUON, 2019, 24(4): 1727-1734.
- [5] 金晓丽, 芦莹, 师勤莹, 等. 直线加速器日质控数据分析及过程评估[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(3): 220-224.
Jin XL, Lu Y, Shi QY, et al. Daily quality control data analysis and process evaluation of linear accelerator[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(3): 220-224.
- [6] Kang SW, Li J, Ma JB, et al. Evaluation of interfraction setup variations for postmastectomy radiation therapy using EPID-based *in vivo* dosimetry[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(10): 43-52.
- [7] Alharthi T, Arumugam S, Vial P, et al. EPID sensitivity to delivery errors for pre-treatment verification of lung SBRT VMAT plans[J]. Phys Med, 2019, 59: 37-46.
- [8] Olaciregui-Ruiz I, Rozendaal R, van Kranen S, et al. The effect of the choice of patient model on the performance of *in vivo* 3D EPID dosimetry to detect variations in patient position and anatomy[J]. Med Phys, 2020, 47(1): 171-180.
- [9] Matsushita N, Nakamura M, Sasaki M, et al. Analyses of integrated EPID images for on-treatment quality assurance to account for interfractional variations in volumetric modulated arc therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(1): 110-116.
- [10] Moustakis C, Ebrahimi Tazehmahalleh F, Elsayad K, et al. A novel approach to SBRT patient quality assurance using EPID-based real-time transit dosimetry: a step to QA with *in vivo* EPID dosimetry[J]. Strahlenther Onkol, 2020, 196(2): 182-192.
- [11] Billekin F, Yedekci Y, Ozyigit G. Feasibility of novel *in vivo* EPID dosimetry system for linear accelerator quality control tests[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2019, 42(4): 995-1009.
- [12] Sumida I, Yamaguchi H, Kizaki H, et al. Quality assurance of MLC leaf position accuracy and relative dose effect at the MLC abutment region using an electronic portal imaging device[J]. J Radiat Res, 2012, 53(5): 798-806.
- [13] 闫冰, 吴爱东. 非晶硅电子射野影像装置在直线加速器日检中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(10): 988-992.
Yan B, Wu AD. Application of amorphous silicon electronic portal imaging device in daily quality assurance of linear accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(10): 988-992.
- [14] Sun BZ, Goddu SM, Yaddanapudi S, et al. Daily QA of linear accelerators using only EPID and OBI[J]. Med Phys, 2015, 42(10): 5584-5594.
- [15] Lutz W, Winston KR, Maleki N. A system for stereotactic radiosurgery with a linear accelerator[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1988, 14(2): 373-381.
- [16] IEC. Medical electrical equipment - medical electron accelerators - Functional performance characteristics: IEC 60976: 2007[S]. Genève: IEC, 2007.
- [17] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心. 医用电子直线加速器质量控制指南[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(4): 241-258.
National Cancer Center/National Cancer Quality Control Center. Quality control guidelines for medical electronic linear accelerators[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(4): 241-258.
- [18] 李长虎, 田卫群, 徐利明, 等. 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): 3247-3249.
Li CH, Tian WQ, Xu LM, et al. The compare of the position accuracy of Varian multileaf collimator with different gantry angle[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2012, 29(2): 3247-3249.
- [19] Fredh A, Korreman S, Munck af Rosenschöld P. Automated analysis of images acquired with electronic portal imaging device during delivery of quality assurance plans for inversely optimized arc therapy[J]. Radiother Oncol, 2010, 94(2): 195-198.
- [20] 周文珊, 喻洁, 孙刚涛, 等. 湖北省7台医用直线加速器调强放射治疗多叶光栅叶片到位精度验证方法研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2019, 39(2): 132-136.
Zhou WS, Yu J, Sun GT, et al. Verification of positioning accuracy of MLC leaves of 7 medical linear accelerators in IMRT in Hubei province[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2019, 39(2): 132-136.
- [21] 倪昕晔, 高留刚, 林涛. Delta-4探测MLC细小位置偏差敏感性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(2): 168-171.
Ni XY, Gao LG, Lin T. Study of sensitivity for detecting small positional deviation of MLC by 3D detector array delta-4[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(2): 168-171.
- [22] Li YH, Chen LX, Zhu JH, et al. A quantitative method to the analysis of MLC leaf position and speed based on EPID and EBT3 film for dynamic IMRT treatment with different types of MLC[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(4): 106-115.
- [23] Rowshanfarzad P, Sabet M, O'Connor DJ, et al. Reduction of the effect of non-uniform backscatter from an E-type support arm of a Varian a-Si EPID used for dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2010, 55(22): 6617-6632.
- [24] King BW, Greer PB. A method for removing arm backscatter from EPID images[J]. Med Phys, 2013, 40(7): 071703.
- [25] Rowshanfarzad P, McCurdy BMC, Sabet M, et al. Measurement and modeling of the effect of support arm backscatter on dosimetry with a varian EPID[J]. Med Phys, 2010, 37(5): 2269-2278.

(编辑:薛泽玲)