

基于 Pylinac 的医用直线加速器射线质分析方法探究



高翔

厦门大学附属第一医院, 厦门 361001

【摘要】 医用直线加速器束流射线质的准确性和稳定性关乎整个放射治疗的精度, 通过开源程序包来实现束流特性的定量分析, 提出一种更加便捷准确的数据分析方法。利用指形电离室与 EPID 获取射线质信息, 用基于 Python 的 Pylinac 程序包对射线的绝对输出剂量、均整度、对称性、百分深度曲线定量分析, 并将 EPID 分析与主流探测分析仪器对比分析。程序包能准确计算绝对输出剂量等信息, EPID 的分析结果与 Mapcheck 结果没有显著性差异 ($p < 0.05$)。Gamma (1 mm/1%) 值表明测量曲线与建模数据具有很好的一致性 ($\gamma = 96.2\%$)。Pylinac 能够准确评估加速器射线质特性, 可以用作加速器日检、月检、年检的工具。

【关键词】 Pylinac; 医用直线加速器; 输出剂量; 均整度; 对称性

【中图分类号】 TB98

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2023)03-0029-06

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0003

【引用本文】 高翔. 基于 Pylinac 的医用直线加速器射线质分析方法探究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(3): 29-34.

An Investigation into Methods of Beam Quality Analysis for Medical Linear Accelerators Based on Pylinac

GAO Xiang

The First Affiliated Hospital of Xiamen University, Xiamen 361001, China

【Abstract】 The accuracy and stability of the beam quality in medical linear accelerators (LINAC) are crucial for the precision of radiation therapy. This study introduces a more convenient and accurate method for quantitatively analyzing beam characteristics using the open-source Pylinac program. Beam quality information was obtained using thimble ionization chambers and electronic portal imaging devices (EPIDs). The Python-based Pylinac program was used for quantitative analysis of the absolute output dose, flatness, symmetry, and percentage depth dose curves. Furthermore, the results of the EPID analysis were compared with those of mainstream detection analysis instruments, such as MapCheck. The program was able to accurately calculate the absolute output dose and other parameters, with no significant differences observed between the results of the EPID and MapCheck ($p < 0.05$). The gamma (1 mm/1%) value indicated a high level of consistency between the measured curves and the model data ($\gamma = 96.2\%$). Pylinac can accurately evaluate the beam quality characteristics of accelerators and can serve as a tool for daily, monthly, and annual inspections.

【Key words】 Pylinac, medical linear accelerator, output dose, flatness, symmetry

0 引言

在 20 世纪 60 年代, 放射治疗最开始被用于肿瘤治疗时, 通常被认为是一门经验性的临床学科, 并没有很好的治疗效果。伴随着新的治疗方法、治疗机器的诞生, 放射治疗从二维放疗到三维适形放疗 (3 Dimensional Conformal Radiotherapy, 3DCRT),

再到调强放疗 (Intensity Modulated Radiotherapy, MRT)、容积旋转调强放疗 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)、立体定向放疗 (Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT), 技术的进步一直推动着放疗的发展^[1]。在强调精准放疗、大剂量、大剂量率的今天, 设备的质控向着步骤更简洁、项目更全

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-01-16

基金项目: 福建省中青年教育科研项目 (JAT210852); 福建省市场监督管理局重点科研项目 (FJMS2020018); 漳州职业技术学院校级课题 (ZZY2021B031)。

作者简介: 高翔 (1987-), 厦门大学附属第一医院工程师、物理师, 研究方向: 医学仪器质控, 邮箱: gximp@qq.com。

面、逻辑更通顺、检测项目更多、检测精度更高的方向发展^[2-3]。

目前加速器质量控制的方法仍然存在不少困难和疑惑^[4-5],主要体现在以下几个方面:1)检测中缺少与基准值的比对,同时在比对的过程中往往只是针对某个特定的参数而非全局进行分析,不易发现潜藏的问题。2)传统的质控流程还存在分析时间长、分析的过程复杂、分析的结果不够直观的问题,其中人为误差、数据存储、统计分析等问题亟待解决。随着人工智能的发展,利用智能化软件对结果进行分析,减少人为误差,越来越受到加速器质控领域研究人员的青睐^[4]。

目前用于放疗质控的程序很多,包括商用的及开源的程序,其中商用的程序主要有: Doselab (VARIAN, USA)、Suncheck Machine (Sun Nuclear, USA)、MyQA (IBA, Belgium) 等^[6-11]。商用程序的优点是界面优美、操作简便,但往往价格比较昂贵,而且软件功能不能定制,后期升级麻烦。而开源程序可以免费下载安装,简单便捷,对于预算不足的基层放疗单位而言,开源软件提供了一个很好的选择。目前的开源程序主要是基于 Matlab 以及 Python 编写的,本文研究主要基于 Python 的 Pylinac 程序包。

1 原理与方法

1.1 实验原理

放射治疗、手术和化疗是当今治疗恶性肿瘤最常见的三种手段^[12-14],其中放疗是利用医用直线加速器产生的放射性射线对肿瘤部位进行照射来达到治疗肿瘤的目的,因此,加速器射线质的测量的准确性影响治疗的有效性和安全性。射线质的测量包括:能量、百分深度曲线、对称性、均整度等的测量,射线质的测量常用的方法有:电离室测量法、闪烁体测量法和半导体探测器测量法等^[15-16];前两种方法操作复杂且成本巨大,也会引入人为误差,而通过利用加速器自带的半导体探测器 EPID 系统对射线测量可以方便快捷的提高检测效率。实验通过对探测器测量的图像、数据等进行定量分析,输出数字结果并显示分析的图表信息,提高质控的标准化。

1.2 实验设备

瓦里安 Truebeam 直线加速器, 6 MV 光子, 内

置 120 多叶准直器 (multi leaf collimator, MLC)。水箱为 IBA 公司的 Blue Phantom2 水箱, 0.6 cm³ 指形电离室 (PTW, 30013), 0.125 cm³ 指形电离室。机载 EPID (Truebeam, Varin), 40 cm×30 cm, 像素 1024×768, 分辨力 0.39 mm。

1.3 测试方法

1.3.1 绝对输出剂量计算

Pylinac 中输出剂量的计算校准模块由 TG51 和 TRS398^[17-18] 两个子模块构成, 每个子模块都有各自的定义, 包含不同剂量计算的函数和类, 在基本功能和辅助功能的定义上, 两个模块也有重叠。除了典型的绝对剂量的计算之外, 这些模块还包括其他辅助功能, 例如: PDD 和 TRS 转换, 以便 TG-51 从 TPR 确定 K_Q 值并避免繁琐的 PDD_x 计算。此外, 压力单位转换器可以将各种压力单位 (比如 mmHg) 转换为 Pylinac 使用的 kPa。

为避免在温度、气压等数值输入时, 输入错误数值导致程序运行崩溃, Pylinac 建议设定阈值, 详细的设定可参见代码:

```
from pylinac import tg51
tg51.MIN_TEMP = 0 #设定最小温度阈值
tg51.p_tp(temp=5, press=100) #输入当前温度、气压
```

根据 TG-51 定义编写各校正因子的公式, 包括温度气压校正因子 P_{TP} , 极化校正因子 P_{pol} , 离子复合因子 P_{ion} , 静电计校准因子 P_{elec} 等。各校正因子计算公式如式(1)~(3)。

$$P_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + 20} \times \frac{101.33}{P} \quad (1)$$

其中, T 为测量环境的温度 (°C); P 为测量时的气压 (kPa)。

$$P_{pol} = \frac{|M_{raw}^+| + |M_{raw}^-|}{2 \times |M_{raw}|} \quad (2)$$

其中, M_{raw}^+ 为电离室正偏压测得的电荷量; M_{raw}^- 为电离室负偏压测得的电荷量; M_{raw} 为测量时设定电压测得的电荷量。

$$P_{ion} = \frac{1 - \frac{V_H}{V_L}}{\frac{M_{raw}^H}{M_{raw}^L} - \frac{V_H}{V_L}} \quad (3)$$

其中, V_H 、 V_L 分别为电离室测量时的高压和低压, M_{raw}^H 、 M_{raw}^L 分别为对应高、低压时剂量仪的读数。

TG51 中光子束水下 10 cm 绝对输出剂量计算公式如式(4)。

$$D_w^Q = M \times k_Q \times N_{D,w}^{60Co} \quad (4)$$

其中, M 是校正后的剂量仪读数; k_Q 为品质转换因子; $N_{D,w}^{60Co}$ 为电离室校准因子, 一般由计量机构或标准实验室提供。 M 的计算公式如式(5)。

$$M = P_{ion} \times P_{TP} \times P_{elec} \times P_{pol} \times M_{raw} \quad (5)$$

指形电离室 k_Q 因子的计算公式如式(6)^[15]。

$$k_Q = A + B \times 10^{-3} PDD(10)_x + C \times 10^{-5} \times [PDD(10)_x]^2 \quad (6)$$

其中, A 、 B 、 C 为电离室校正曲线拟合因子, 因电离室型号的不同而不同; $PDD(10)_x$ 是水下 10 cm 处的百分深度剂量数值, $63 < PDD(10)_x < 86$ 。

1.3.2 均整度、对称性分析

对均整度和对称性的测量, 通过 EPID 读取射野剂量数据, 然后调用 Pylinac 程序包对 EPID 采集到的 DICOM 数据分析实现。取代了原先使用 Mapcheck 或者 Matrix 等第三方检测仪器测量的方式^[19-22], 直接使用 EPID 会更加便捷。Pylinac 中集合了 Varian 与 Elekta 两种计算公式, 本研究中使用的是 Varian 公式, 如式(7)~(8)。

$$Flatness = \frac{|D_{max} - D_{min}|}{|D_{max} + D_{min}|} \quad (7)$$

$$Symmetry = 100 \times \max \frac{L_{pt} - R_{pt}}{D_{CAX}} \quad (8)$$

其中, D_{max} 、 D_{min} 分别为 80% 射野内最大与最小点的剂量值; L_{pt} 、 R_{pt} 为射束中心轴对称位置的点剂量值; D_{CAX} 为中心轴位置处的点剂量值。由式(7)~(8)可知, 均整度是一个非负值; 对称性可正可负, 负值表示右侧剂量偏高, 正值表示左侧剂量偏高。

1.3.3 百分深度曲线分析

百分深度剂量的测量主要用在加速器年检中, 由 3 维水箱搭配 0.125 m³ 电离室采集获得。传统的加速器年检数据分析是计算 D_{20}/D_{10} 的实测值与建模时的差异, 分析机器束流的稳定性。本研究通过调用程序包 Pymedphys 包读取保存测量结果的.csv 文件, 实现测量 PDD 跟建模 PDD 的 1 维 γ 通过率分析, 通过对整条曲线的分析可以准确地了解束流状态的变化, 这比单纯使用 D_{20}/D_{10} 这一参数更加全面, 同样的方法也可以用来分析测量得到的 profile 曲线。

2 测试结果分析

2.1 输出剂量的数据分析

Pylinac 的绝对剂量输出模块并不能像其他模块一样可以大量缩短质控的时间成本, 也没有图形化的界面, 而且它可能需要编写少量的代码, 但好处是在编写代码的同时能让物理师更好地理解每个参数的定义, 对计算逻辑及原理有更深层次的理解。PTW 30013 指形电离室测量时对应的温度: 23.0 °C, 气压: 101.3 kPa, 温度修正到电离室标准测量条件: 20.0 °C, 气压: 101.3 kPa。通过式(1)~(6)计算可得, P_{TP} : 1.010; 电离室采集电荷分别为: -400 V: (16.03, 16.04, 16.03) nC, 400 V: (16.05, 16.04, 16.05) nC, -200 V: (15.94, 15.94, 15.93) nC; 计算可得 P_{ion} : 1.006, P_{pol} : 1.001, 水下 10 cm 对应的 $PDD(10)_x$: 67.4, 品质转换因子 k_Q : 0.990。需要指出的是 Pylinac 是一款数据分析程序包, 并没有数据存储及结果趋势分析的功能, 因此可以配合其他的程序包(如 Pyqaserver 或者 PyQAttrack 等)使用, 这样就可以实现一段时间内机器输出稳定性的直观展示。

2.2 利用 Pylinac 对 EPID 图像分析

Pylinac 中的射野分析模块可以对 EPID 获得的图像量化分析^[10], 可以测量射野的均整度、对称性、射束半影、射野实际照射宽度等, 见表 1。Pylinac 有三种确定射野中心的方法: 人工像素点确认、射束中心、几何中心, 见图 1。图 1 是 15 cm×15 cm 照射野影像, 横纵轴分别表示像素值的大小, 可以得出中心点分别到上下左右四个边界的距离, 将像素点转换为距离后, 分别为: 74.7 mm、75.1 mm、76.6 mm、74.8 mm。确定完中心点位置后, 通过模块可以间接测量初级准直器的到位精度, 因此也可以通过修改代码完成部分加速器月检内容, 满足个性化需求。

图 2 是 20 cm×20 cm 时照射野的均整度和对称性分析结果, 其中图 2(A1)、图 2(A2) 分别表示垂直方向的均整度和对称性, 图 2(B1)、图 2(B2) 分别表示水平方向的均整度和对称性, 曲线横坐标表示射野宽度, 纵坐标表示归一后的剂量值。在对称性的图片中, 橙色和蓝色分别代表镜像前和镜像后的曲线结果, 两者重合度越高表明对称性越好。取连续 10 个月的 EPID 采集的结果与 Mapcheck 采集的结果对比分析, 利用卡方检验进行数据分析, 结果表明

两种测量方式并不存在显著性差异($p < 0.05$), 参见表 1, 可见 EPID 测量不确定度的不确定度小于 Mapcheck, 不确定度来源主要是半导体探测器的摆位误差以及部分半导体探头的老化等。除了可以快

速计算均整度和对称性外, Pylinac 同样可以分析 EPID 图像的半影区和射野大小的准确性, 避免了肉眼观察带来的各种人为误差。

表 1 EPID 与 Mapcheck 数据对比结果
Tab.1 Comparison of EPID and Mapcheck data

	Horizontal		Vertical	
	EPID	Mapcheck	EPID	Mapcheck
对称性 (%)	1.031±0.42	1.02±0.85	1.625±0.32	1.63±0.78
均整度 (%)	1.511±0.36	1.62±0.78	0.704±0.26	0.60±0.66
半影大小(mm)	2.3	/	2.7	/
射野大小(mm)	201.4	/	199.8	/
方法	Varian			

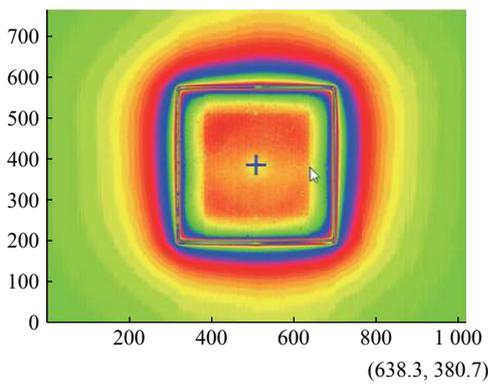


图 1 射束中心点的确定
Fig.1 Determination of the beam central axis

2.3 百分深度曲线与 profile 的数据分析

Pylinac 并没有直接分析百分深度曲线(PDD)的模块, 通过调用 Pymedphys 包实现测量 PDD 与建模 PDD 的 1 维 γ 通过率分析。图 3 是 PDD 与 Profile 剂量曲线, 其中线条为参考剂量曲线(金标准或建模数据), 圆点为实际水箱扫描测量曲线, 星点为两条曲线计算的 $\gamma(1\text{ mm}/1\%)$ 值。图 3(A) 是 PDD 曲线 $\gamma = 1\text{ mm}/1\%$ 的分析数据, 可见剂量建成区误差较大, 这可能是由表面剂量测量不准引起的。图 3(B) 是 Profile 曲线 $\gamma = 1\text{ mm}/1\%$ 的通过率分析, 最大误差在半影区。右侧分别为对应的通过率的直方图显示, 由右侧柱状图可见, 两种情况下的 $\gamma(1\text{ mm}/1\%)$ 通过率分别为 96.19% 与 100%。

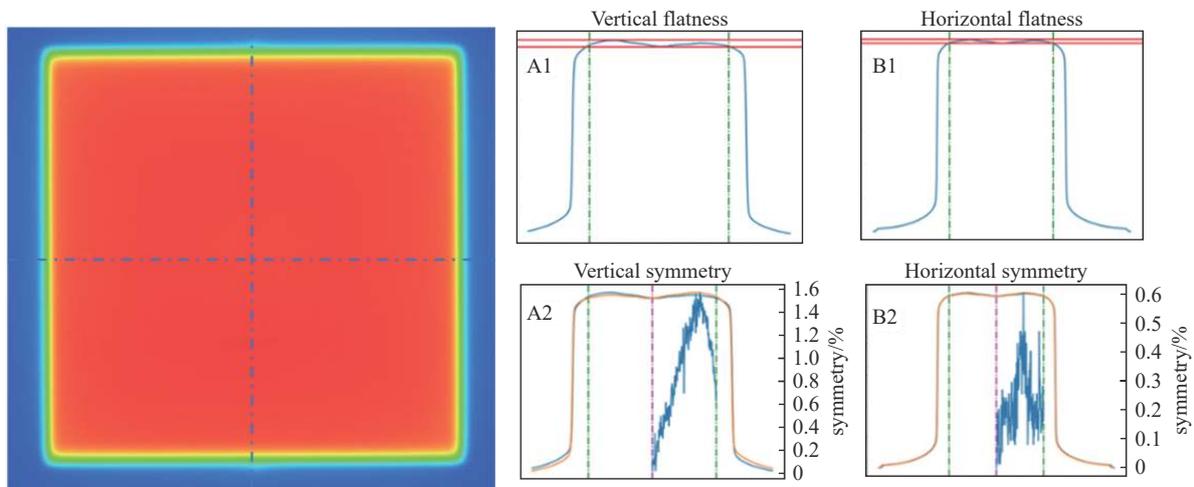


图 2 EPID 图像对称性、均整度的分析结果
Fig.2 Analysis of symmetry and flatness of EPID images

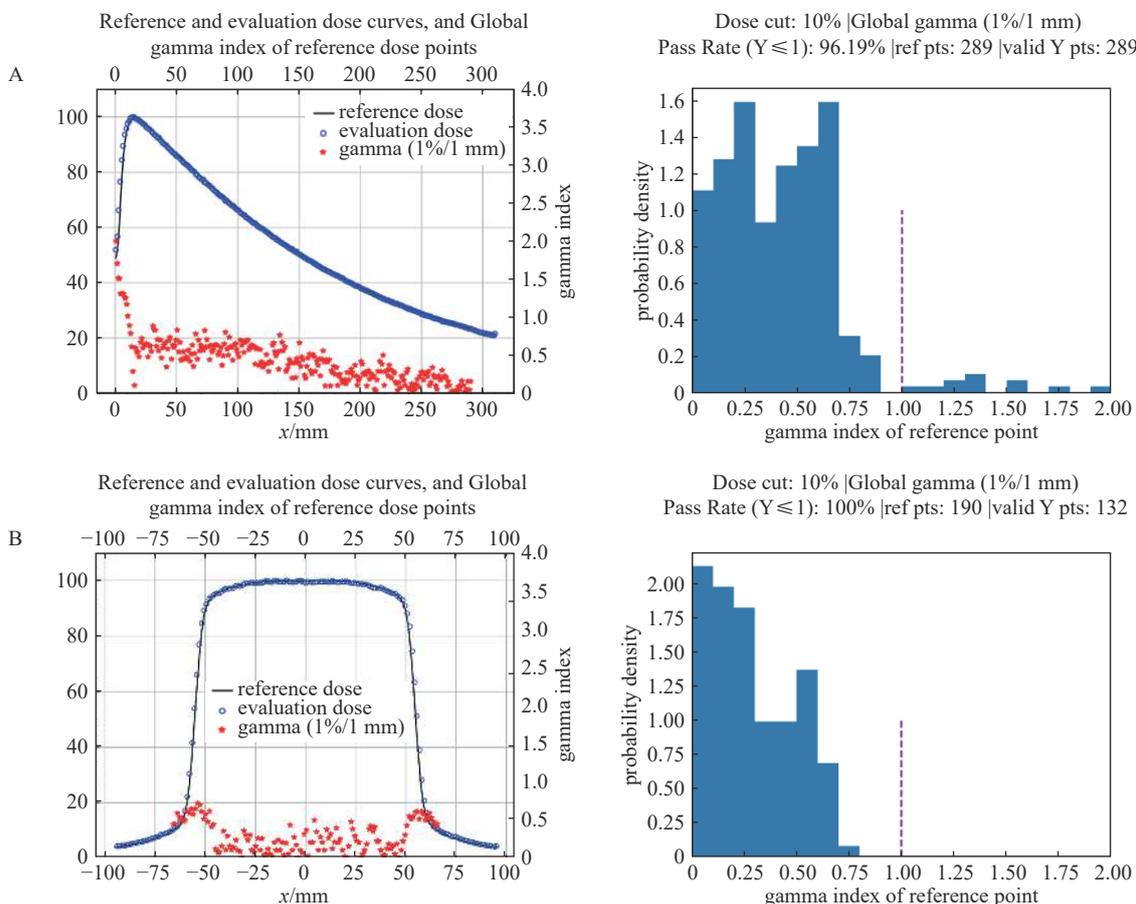


图3 PDD 与 Profile 剂量曲线
Fig.3 PDD and profile dose curves

通过对整条曲线的分析更加准确地反映了束流状态的变化,这比之前利用 D_{20}/D_{10} 判断束流稳定性更全面,这种方法为年检水箱数据的处理提供了一种新思路。Pymedphys 同样可以计算 2 维、3 维剂量 γ 通过率,在此不展开讨论。

3 结论

在强调精确放疗的今天,机器运行的精度、剂量输出的精度是影响放射治疗准确性的两个关键因素^[23-26]。AAPM 要求^[8],照射到病人身上的总剂量误差要小于 5%,除去机械方面的误差,这就要求绝对剂量的输出误差小于 3%。放疗计划的计算是基于机器建模时的数据,因此,建模数据通常被认为是“金标准”。通过对测量数据进行准确的计算,分析当前束流状态与建模时数据的差异可以帮助对加速器运行状态有很好的把握。

随着计算机在放疗领域的发展,通过人工智能算法对加速器运行数据进行分析越来越受青

睐^[19-20]。鉴于软件及算法的开源性,使用者可以根据使用目的不同修改源代码,完成分析。本研究通过调用 Pylinac 程序包,编辑公式调用 TG51 模块中的校正因子数据来实现绝对剂量的计算。通过读取分析 EPID 获得的射野在 10 cm×10 cm 时的影像,计算均整度和对称性等参数,可以对射束中心和准直器到位精度准确分析,实现检定过程的标准。通过调用 Pymedphys 包对三维水箱测得的数据与建模时的“金标准”数据分析,计算 gamma (1 mm/1%) 数值,实现整个放疗计划计算的一致性。

相比于现有的商用软件价格昂贵、模块固定的缺点,本研究利用少量代码即可完成复杂的计算,功能更加灵活,具有更少的人为参与、更精确的数值计算等特点。在此之前, gamma 通过率多用于分析放疗计划通过率,判断治疗计划是否具备可执行性。本研究创新性地引入了 1 维 gamma 计算的概念,通过比对 PDD 与 profile 曲线对束流进行评估,相比于之前的 D_{20}/D_{10} 方法,此方法更加全面客观。

参考文献

- [1] 蒋国梁. 三维适形放疗和调强放疗[J]. *肿瘤*, 2003(4): 261-262.
- [2] 胡逸民. 放射治疗面对的困难及可能的技术对策——肿瘤放射物理的进展[C]//全国医用辐射防护与安全学术研讨会论文汇编. 北京: 中华医学会, 2004.
- [3] ABSHIRE D, LANG M K. The Evolution of Radiation Therapy in Treating Cancer[J]. *Seminars in oncology nursing*, 2018, 34(2): 151-157.
- [4] 黄培, 何侠. 基于患者安全的肿瘤医院放疗精准质控管理实践及思考[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2019(10): 796-798.
- [5] 邓祯祥. VMAT在眼部肿瘤放射治疗中的剂量学优势[J]. *计量技术*, 2020(2): 60-62,68.
- [6] 齐洪志, 杨玉刚, 郝洁, 等. SunCHECK 软件在调强放疗计划剂量验证中的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(3): 289-294.
- [7] 时飞跃, 王敏, 秦伟, 等. DoseLab 软件检测 CT 图像噪声的程序改进及应用分析[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(3): 327-330.
- [8] Klein E E, Hanley J, Bayouth J. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. *Medical Physics*, 2009(9): 4197-4212.
- [9] 高大地, 王佳舟, 罗吉, 等. 基于 Pylinac 的放射治疗 QA 数字化分析系统[J]. *计算机系统应用*, 2021(30): 95-101.
- [10] 吴志强, 陈元华, 王佳舟, 等. 基于患者出射 EPID 剂量验证的在体调强放疗质控技术研究[J]. *中国癌症杂志*, 2020, 30(9): 689-693.
- [11] 余利星, 翟睿, 龚晓云, 等. 基于磁性纳米材料分离的肿瘤标志物 HSP90 α 质谱分析方法[J]. *计量技术*, 2020(5): 14-18,78.
- [12] 国家卫生健康委员会. 原发性肺癌诊疗指南(2022年版)[J]. *中国合理用药探索*, 2022, 19(9): 1-28.
- [13] 佚名. 乳腺癌诊疗指南(2022年版)[J]. *中国合理用药探索*, 2022, 19(10): 1-26.
- [14] 中国抗癌协会妇科肿瘤专业委员会. 子宫颈癌诊断与治疗指南(2021年版)[J]. *中国癌症杂志*, 2021, 31(6): 474-489.
- [15] 张曦, 张绍刚, 王坤. IAEA TRS-398 临床剂量学应用[J]. *计量科学与技术*, 2021, 65(11): 19-23.
- [16] 王志鹏. 医用电子束水吸收剂量绝对测量及量值传递方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [17] HUQ M S, HWANG M S, TEO T P, *et al.* A dosimetric evaluation of the IAEA-AAPM TRS483 code of practice for dosimetry of small static fields used in conventional linac beams and comparison with IAEA TRS-398, AAPM TG51, and TG51 Addendum protocols[J/OL]. *Medical physics*, 2018. [2023-01-04]. DOI:10.1002/mp.13092.
- [18] ZINK K. Twenty years after – das neue Dosimetrieprotokoll IAEA TRS-398 am Horizont sichtbar![J]. *Zeitschrift für medizinische Physik*, 2020, 30(4): 249-251.
- [19] MUIR B R, ROGERS D W O. Monte Carlo calculations of electron beam quality conversion factors for several ion chamber types[J]. *Medical Physics*, 2014, 41(11): 111701.
- [20] 高翔, 余燕娟, 石丽婉. 胶片剂量仪与半导体探测器在小野剂量数据测量中的比较分析[J]. *计量学报*, 2020, 41(7): 873-878.
- [21] 黄成伟, 丁力, 张中伟, 等. 医用加速器测量分析软件的验证[J]. *计量技术*, 2008(9): 46-49.
- [22] KOULOULIAS V E. Quality assurance in radiotherapy[J]. *European journal of cancer*, 2003, 39(4): 415-422.
- [23] 付庆国, 戴建荣, 朱小东, 等. 国内外肿瘤放疗 QA 与 QC 的相关规范介绍[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(2): 218-221.
- [24] 齐雅平, 霍万里, 金孙均, 等. 质子放射治疗参考剂量研究进展概述[J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(6): 38-44.
- [25] CHAN M F, WITZTUM A, VALDES G. Integration of AI and Machine Learning in Radiotherapy QA[J]. *Frontiers in artificial intelligence*, 2020, 3: 577620.
- [26] LAM D, ZHANG X, LI H, *et al.* Predicting gamma passing rates for portal dosimetry-based IMRT QA using machine learning[J]. *Medical physics*, 2019, 46(10): 4666-4675.

本文编辑: 石亚楠

(上接第 64 页)

- [26] 王元清, 林错错, 石永久. 露天日照条件下钢结构构件温度的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(S1): 140-147.
- [27] 王博, 徐鑫, 陈一鸣. 基于 ANSYS Workbench 的天然气管冲刷磨损仿真模拟[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(12): 86-95.
- [28] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓, 等. 湍流理论与模拟[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [29] 郑贤臣. 几种辐射模型在 FLUENT 中的应用[J]. *现代科技*, 2009, 63(11): 1671-1689.
- [30] 严寒, 张鸿雁. 不同辐射模型在太阳辐射数值模拟中的比较[J]. *节能技术*, 2015, 33(5): 42.

本文编辑: 霍炜炜