

统计过程控制在医用电子直线加速器机械性能监测中的应用

梁兰, 肖青, 张翔宇, 宋莹, 李光俊, 柏森

四川大学华西医院肿瘤中心放射物理技术中心, 四川 成都 610041

【摘要】目的:使用统计过程控制方法分析医用电子直线加速器长期过程表现, 监测加速器状态变化趋势, 并评估加速器各项指标性能状态。**方法:**收集2019年6月至2021年4月加速器机器性能检测(MPC)数据。绘制每个机械指标的单值控制图, 分析各指标过程特征, 并使用过程能力指数 C_{pk} 及 C_p 评估加速器各项机械指标的过程质量。**结果:**加速器机械精度明显优于当前厂商推荐的规格限值, 但控制图监测结果显示各指标均存在一定程度的过程漂移。过程能力分析结果显示所有指标的 C_{pk} 及 C_p 均大于1.33, 过程质量优秀。**结论:**加速器在满足当前MPC规格限的情况下依然可能发生过程失控。统计过程控制方法可及时发现过程中的异常改变, 过程能力指数可有效评估过程质量, 为质量管理及临床决策提供有效的信息。

【关键词】医用直线加速器; 统计过程控制; 机器性能检测; 质量保证

【中图分类号】R815.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)02-0133-06

Application of statistical process control in mechanical performance monitoring of linear accelerators

LIANG Lan, XIAO Qing, ZHANG Xiangyu, SONG Ying, LI Guangjun, BAI Sen

Department of Radiation Oncology, West China Hospital of Sichuan University, Chengdu 610041, China

Abstract: Objective To analyze the long-term performance of the medical linear accelerator, monitor the accelerator state and evaluate the mechanical performance of the accelerator by statistical process control method. **Methods** The daily quality assurance data from June 2019 to April 2021 were collected. The control charts for individuals were draw to monitor the process state, and the process quality was evaluated using process capability indexes (C_{pk} and C_p). **Results** The mechanical accuracy of the accelerator was obviously better than the specification limits recommended by the current manufacturer, while almost all mechanical indexes had process shifts to varying degrees according to the results of control chart. The process capability analysis showed that the C_{pk} and C_p of all test items were greater than 1.33, indicating excellent process quality. **Conclusion** When accelerator performance meets the current machine performance check specifications, process shifts may still occur. The statistical process control method can detect the shifts immediately, and process capability index can evaluate the process quality effectively, guiding the quality management and clinical decision making.

Keywords: medical linear accelerator; statistical process control; machine performance check; quality assurance

前言

随着立体定向放疗等精确放疗技术的开展, 医用电子直线加速器的稳定性和精确性的要求也随之

升高。为确保直线加速器的性能在可接受水平, 美国医学物理学家协会(American Association of Medical Physicists, AAPM)、中国国家卫健委等专业组织和机构发布了一系列指南和建议来指导加速器的质量保证(Quality Assurance, QA)过程^[1-2]。传统的QA程序是根据通用临床规格限做二元决策, 这一方法只能将误差控制在一定范围内, 无法有效识别及改善过程中的潜在不确定性。统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)利用统计学方法对过程质量特性进行监控及评估, 能有效识别特殊原因导致的过程偏移, 广泛应用于制造和工程^[3]。近年来, SPC也逐渐被用于放疗中, 包括患者摆位监

【收稿日期】2022-11-15

【基金项目】国家自然科学基金(81972848); 四川省科技计划项目(2021YFS0143); 中华国际医学交流基金会肿瘤精准放疗星火计划(2019-N-11-04)

【作者简介】梁兰, 硕士, 研究方向: 放射治疗物理技术, E-mail: lianglan.scu@foxmail.com

【通信作者】宋莹, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 放射治疗物理技术, 人工智能, E-mail: songying_wch@163.com

控^[4-5]、患者个体化的QA结果分析^[6-9]、加速器状态监控^[10]等。本研究使用SPC方法分析加速器长期过程表现,并评估加速器各项指标在当前规格限下的状态,为监测加速器状态变化趋势和采取干预措施提供临床参考。

1 材料与方法

1.1 设备及数据收集

回顾性收集2019年6月至2021年4月加速器机械精度晨检数据及维修、调试及校准记录,检测指标包括辐射束轴相对于等中心点的偏移,限束系统旋转误差,机架绝对和相对旋转误差,X1、X2、Y1、Y2 钨门到位精度,治疗床横向、前后、垂直方向到位精度,治疗床沿X、Y、Z轴旋转误差以及治疗床的等中心旋转共15个指标。所有测量均在一台Edge型医用电子直线加速器(美国瓦里安公司)上进行,晨检设备采用加速器自带的机器性能检测(Machine Performance Check, MPC)系统,如图1所示,该系统主要由MPC软件和IsoCal质量控制模体组成,可对加速器射野参数及机械精度进行验证^[11-12]。每天治疗前,由治疗师对机器进行晨检,先将机架和准直器角度置于0°,摆放模体后进入MPC功能模块执行测试程序。测试过程中系统自动进行需要的移动,获得一系列千伏级(kV)及兆伏级(MV)影像^[13-14],然后对影像数据进行分析,与预先设定的基准值比较。若各项性能偏差在规格限内,则测试通过,该加速器可用于临床治疗;超出规格限,则测试失败,需排查及纠正导致失败的因素再用于治疗。若加速器在检修后,某项指标到位情况仍存在明显系统性偏差,则需要工程师针对该指标按照厂家提供的标准流程进行校准。

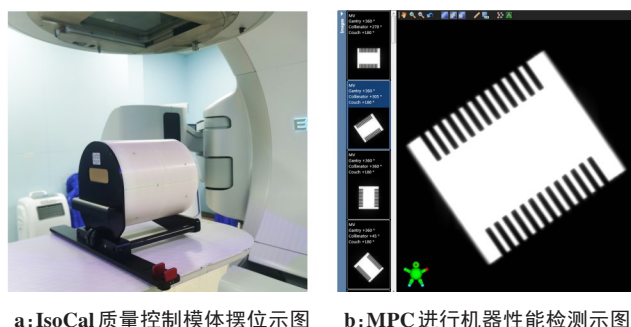


图1 MPC晨检示意图

Figure 1 MPC for daily QA

1.2 SPC方法

SPC应用统计学方法对过程进行评估和监控,最

常用的两个工具是过程控制图和过程能力指数。过程控制图可监控过程状态,并对过程发生的异常改变进行预警;过程能力指数可评估过程能力满足规格要求的相符程度。

1.2.1 过程控制图 最常用的过程控制图是休哈特控制图,由中心线(Central Line, CL)、控制上限(Upper Control Limit, UCL)和控制下限(Lower Control Limit, LCL)组成。当观测值在上下控制限内,则过程受控,无需采取任何干预措施;当观测值超出控制限,则表示过程失控,需调查并纠正导致过程失控的因素。本研究使用单值控制图对过程进行监控,其控制限计算方法如下^[3]:

$$MR_i = |x_{i+1} - x_i|, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$CL = \bar{x} \quad (2)$$

$$LCL = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (3)$$

$$UCL = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (4)$$

其中, x 是观测值; MR_i 是移动极差,单值控制图中采用移动极差作为过程变异的估计值; \overline{MR} 是所有 MR_i 的平均值; $d_2=1.128$ 。

SPC可分为两个阶段:阶段一为分析阶段,其目的在于使过程处于统计稳态,且使过程能力足够;阶段二为监控阶段,其目的是通过控制图监控生产过程,并对过程中发生的异常改变进行预警。本研究回顾性模拟了SPC两个阶段,控制图的绘制方式如下:根据控制图判稳原则,当连续25个点均在控制限内时表示过程稳定,因此阶段一取连续25个点计算控制限,若有观测值超出控制限,则舍去最开始的点,同时往后取一个点重新计算控制限,直到连续的25个点均在控制限内。过程受控时,计算过程能力指数,若过程质量达标,则使用该控制限作为阶段二控制限;若过程质量不达标,则需要结合维修记录判断导致过程质量下降的因素,消除相关因素后重新计算控制限。当阶段一过程稳定且过程质量达标时,进入阶段二监控阶段。当阶段二出现失控点时,结合维修、调试记录判断失控原因,若无故障则重新取连续25个点,重复以上步骤,更新控制图;若有故障,则消除相关故障后再重新收集数据监控。校准后按上述流程重新取值计算控制限以达到存在校准情况的指标。

1.2.2 过程能力分析 当过程受控时,使用所有受控点计算过程能力指数,评估过程质量。过程能力指数包括 C_p 和 C_{pk} , C_p 只考虑了过程离散程度和可接受标准的关系, C_{pk} 不仅考虑了过程离散程度,还考虑了过程均值偏离目标值的可接受程度。计算方法

如下^[3]:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

(5)

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) = \min\left(C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}, C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right)$$

(6)

其中, μ 是过程均值, σ 是过程标准差, USL 是规格上限, LSL 是规格下限。

本研究使用的规格限为厂商推荐的 MPC 规格限, 其较于 AAPM TG-142 号报告及国家卫健委 WS 674-2020 号报告所推荐的规格限更为严格。当 $C_p < 1.00$ 、 $C_{pk} < 1.00$ 时, 表示该过程不可接受, 需要被改善; 当 $1.00 \leq C_p \leq 1.33$ 、 $1.00 \leq C_{pk} \leq 1.33$ 时, 表示过程状态良好, 可以进一步改善;

当 $C_p > 1.33$ 、 $C_{pk} > 1.33$ 时, 表示过程质量优秀, 无需进行改善。

2 结果

2.1 晨检结果及数据特征

回顾性收集了 2019 年 6 月至 2021 年 4 月共 422 d 加速器机械精度的 MPC 晨检数据, 包括辐射束轴相对于等中心点的偏移、限束系统旋转误差、机架旋转误差、钨门以及治疗床到位精度等 15 个指标。限束系统和机架由于编码器故障分别于 2020 年 8 月 26 日、2020 年 3 月 24 日进行维修及校准, X1、X2 钨门到位精度于 2020 年 3 月 21 日进行校准。MPC 各指标统计结果及规格限详见表 1。

表 1 加速器各机械指标晨检结果统计及各指标的 MPC 推荐的规格限

Table 1 Daily QA results and the specifications recommended by MPC for each mechanical index of accelerator

检测项目	MPC 规格限		均值	标准差	最小值	最大值
限束系统旋转误差/°	±0.5	校准前	-	-	-	-
		校准后	-0.27	0.01	-0.31	-0.21
机架绝对旋转误差/°	±0.3	校准前	-0.01	0.05	-0.31	0.04
		校准后	-0.15	0.02	-0.19	-0.11
机架相对旋转误差/°	±0.3	校准前	0.08	0.16	-0.20	0.23
		校准后	-0.10	0.03	-0.12	0.10
X1 钨门到位精度/mm	±1	校准前	-0.49	0.08	-1.35	-0.34
		校准后	-0.25	0.03	-0.31	-0.12
X2 钨门到位精度/mm	±1	校准前	0.57	0.05	0.40	0.86
		校准后	0.05	0.05	-0.10	0.17
Y1 钨门到位精度/mm	±2		-0.20	0.05	-0.37	-0.03
Y2 钨门到位精度/mm	±2		0.33	0.08	0.05	0.54
辐射束轴相对于等中心点的偏移/mm	0.5		0.29	0.02	0.19	0.34
治疗床横向到位精度/mm	±0.7		-0.09	0.04	-0.17	0.00
治疗床前后到位精度/mm	±0.7		-0.06	0.07	-0.20	0.12
治疗床垂直到位精度/mm	±1.9		-0.13	0.04	-0.23	0.00
治疗床沿 X 轴旋转误差/°	±0.1		-0.01	0.01	-0.06	0.01
治疗床沿 Y 轴旋转误差/°	±0.1		-0.01	0.01	-0.05	0.25
治疗床沿 Z 轴旋转误差/°	±0.4		0.03	0.01	0.01	0.05
治疗床的等中心旋转/mm	0.75		0.25	0.05	0.15	0.95

其中 X1 钨门到位精度、治疗床沿 Y 轴旋转误差、治疗床的等中心旋转、机架绝对旋转误差各有 1 例观测值超出规格限, 其余指标检测结果均在规格限内。限束系统校准前编码器一直处于故障状态, 因未分析此校准前的限束系统旋转误差数据。

2.2 控制图监测及过程能力分析结果

图 2a~c 分别为机架相对旋转误差、治疗床前后到位精度、Y1 钨门到位精度的过程控制图。其中, 失控点用红色和黄色表示, 红色点表示失控是由加速器故障导致, 黄色点表示失控不是由加速器故障导致; 红色虚线为 MPC 规格限, 绿色实线为控制上下限, 绿色竖直虚线表示在此处该指标进行过校准。

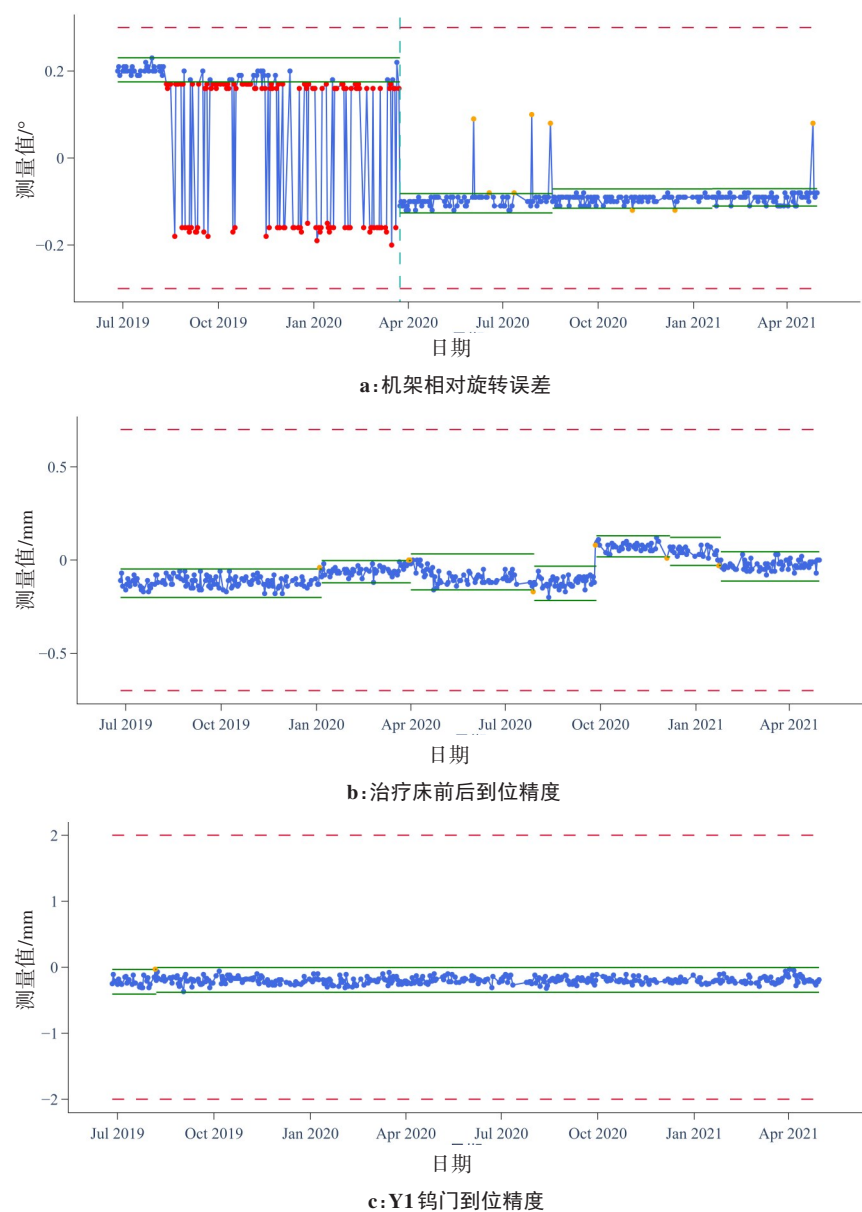


图 2 单值控制图监测结果
Figure 2 Monitoring results of control chart for individuals

各指标控制上下限、中心线、失控率及过程能力指数计算结果见表 2。控制图监测结果显示,加速器各项指标控制限均小于规格限,且过程多次发生改变。其中变化最频繁、波动范围最大的是治疗床前后到位精度,其控制上、下限及中心线波动范围分别为-0.05~0.13 mm、-0.22~0.02 mm、-0.12~0.07 mm;过程最稳定、变化次数最少的是 Y1 钨门到位精度。其次,所有指标均有观测值失控,其中机架相对旋转误差校准前失控率高达 70.22%。过程能力分析结果显示,各指标 C_{pk} 和 C_p 均大于 1.33,过程质量优秀,无需对过程进行改善。

3 讨论

直线加速器剂量和机械学精度与肿瘤放疗疗效

密切相关,AAPM TG-142 号报告要求每天对医用电子直线加速器进行检测,以确保其性能稳定^[1]。传统的 QA 程序是基于预先设定的规格限对 QA 结果做出判断,若结果在规格限内,则通过,无需采取任何措施;若结果超出规格限则不通过,需采取相应纠正措施。这样的二元决策忽视了过程中潜在的变化,不利于改善过程质量。Pawlicki 等^[15-16]提出利用 SPC 方法获得基于特定过程的干预限值,可提高对过程中系统性变化的识别能力。Able 等^[17]利用 X-bar 控制图监测光束转向参数,对设备故障进行提前预警。肖青等^[18-19]使用 SPC 方法分析容积旋转调强放疗计划 γ 通过率,建立不同部位容积旋转调强放疗计划 γ 通过率的容差限值和干预限值,并评估了医用电子直线加速器射束匹配性能。Li 等^[20]通过 SPC 方法分

表 2 加速器各机械指标的单值控制图及过程能力分析结果
Table 2 Results of control charts for individuals and process capability analysis on the accelerator

检测项目		控制上限(UCL)	控制下限(LCL)	中心线(CL)	C _{pk}	C _p	失控率/%
限束系统旋转误差	校准前	-	-	-	-	-	-
	校准后	-0.25°~-0.20°	-0.31°~-0.28°	-0.28°~-0.25°	6.49~13.43	13.64~28.69	1.30
机架绝对旋转误差	校准前	0.01°~0.04°	-0.04°~-0.03°	-0.01°~0.01°	6.65~9.82	6.97~10.28	5.06
	校准后	-0.12°~-0.10°	-0.20°~-0.16°	-0.16°~-0.14°	3.67~5.93	7.36~10.98	1.63
机架相对旋转误差	校准前	0.23°	0.18°	0.20°	3.09	9.45	70.22
	校准后	-0.08°~-0.07°	-0.13°~-0.11°	-0.10°~-0.09°	5.47~7.41	8.11~10.86	3.27
X1 钨门到位精度	校准前	-0.33 mm	-0.57 mm	-0.45 mm	6.73	12.95	2.84
	校准后	-0.23~-0.12 mm	-0.32~-0.28 mm	-0.28~-0.21 mm	12.1~15.7	15.98~20.57	4.05
X2 钨门到位精度	校准前	0.65 mm	0.47 mm	0.56 mm	5.42	12.38	2.84
	校准后	0.19 mm	-0.10 mm	0.05 mm	9.83	10.25	0.00
Y1 钨门到位精度		-0.04~-0.01 mm	-0.41~-0.38 mm	-0.22~-0.19 mm	9.25~13.76	10.36~15.27	0.24
Y2 钨门到位精度		0.50~0.57 mm	-0.02~0.11 mm	0.28~0.31 mm	8.12~8.73	9.56~10.52	0.47
辐射束轴相对于等中心点的偏移		0.32~0.33 mm	0.23~0.26 mm	0.28~0.30 mm	4.45~6.26	10.41~14.43	1.66
治疗床横向到位精度		-0.06~0.03 mm	-0.19~-0.15 mm	-0.13~-0.06 mm	7.60~10.77	8.77~12.69	0.95
治疗床前后到位精度		-0.05~0.13 mm	-0.22~0.02 mm	-0.12~0.07 mm	6.57~10.66	7.86~11.61	1.66
治疗床垂直到位精度		-0.05~-0.02 mm	-0.29~-0.18 mm	-0.16~-0.10 mm	13.70~18.17	14.79~19.62	0.95
治疗床沿 X 轴旋转误差		-0.01°~0.02°	-0.03°~-0.01°	-0.02°~0.00°	5.13~6.59	6.19~6.78	4.03
治疗床沿 Y 轴旋转误差		-0.01°~0.02°	-0.03°~-0.02°	-0.02°~0.00°	3.22~8.86	3.42~10.53	1.90
治疗床沿 Z 轴旋转误差		0.03°~0.05°	0.00°~0.02°	0.01~0.03°	22.85~32.67	24.87~35.72	0.71
治疗床的等中心旋转		0.28~0.39 mm	0.11~0.23 mm	0.20~0.31 mm	4.73~8.49	7.49~13.06	7.58

析头颈部患者在激光表面引导下的摆位误差。Sanghangthum 等^[21]、Jin 等^[22]及刘礼东等^[23]使用 SPC 方法监测加速器输出剂量,详细阐述 SPC 的实际应用方法。López-Tarjuelo 等^[24]使用 SPC 方法回顾性分析电子线输出剂量、平坦度和对称性的过程特征,并发现在满足现有规格限的情况下电子线的输出剂量、平坦度和对称性都存在较大的过程漂移。

本研究利用 SPC 方法对加速器长期机械性能进行分析,数据表明瓦里安 Edge 加速器机械精度较高。各指标到位不确定性明显低于 TG-142 号报告及 WS 674-2020 号报告推荐的月检、年检规格以及 MPC 推荐的规格限,如治疗床横向、前后及沿 Y 轴旋转平均到位误差分别为 -0.09 mm、-0.06 mm、-0.01°,远低于 TG-142 号报告推荐的 2.00 mm/1.00°,WS 674-2020 号报告推荐的 2.00 mm/0.50°和 MPC 规格限 0.70 mm/0.40°。过程能力分析结果显示,所有指标 C_{pk} 及 C_p 都大于 1.33,甚至达到 20 左右。同时发现加速器的精度在满足现有规格限的情况下,其状态可能受多种因素的影响而发生改变,通过 SPC 方法能准确监测到加速器状态的变化,从而提示物理师及维修工程师何时进行检修。

如图 2a 所示,机架相对旋转误差在第 32 个观测值处超出控制限。调查发现,失控原因是机架编码器故障,由于晨检结果一直在规格限内,迟迟未能发现该故障。临床上,控制图监测到的失控大多可找到相关原因,但由于加速器本身的精密性和复杂性,有时候难以找到导致过程失控的因素。图 2b、c 分别为治疗床前后到位精度和 Y1 钨门到位精度的过程控制图,两个指标都有未知因素导致过程发生改变。Y1 钨门到位精度于第 28 个观测值处发生失控,之后过程又在另一个水平处于受控状态,治疗床前后到位精度多次从一个受控状态变化到另一个受控状态。对变化之后的过程进行过程能力分析,C_{pk}和 C_p 远大于 1.33,表明虽然有潜在因素导致过程失控,但变化之后的过程质量依旧满足要求。因此当过程发生改变后,维修工程师应首先检修加速器并寻找失控原因,当找不到失控原因且加速器无故障时,则可密切关注后续过程,若过程重新稳定,且过程能力指数达标,则可降低关注程度并更换新的控制限继续监控。另外,由于加速器的长期运行难免会出现机械磨损从而导致过程失控,而轻微的机械磨损对加速器机械精度影响有限,频繁更换轻微磨损的零件

不符合经济学效益,因此当机械磨损导致过程失控时,维修工程师可根据改变后的过程能力评估结果分析是否需要更换零件。

目前本研究仅对直线加速器机械部分做了SPC,而未对加速器输出剂量做监控。根据前期收集到的数据以及已发表的相关文献可发现瓦里安加速器输出剂量随时间推移呈持续的增长趋势,这个趋势可能是加速器内部问题导致,然而目前未找到相关原因^[25-27]。休哈特控制图要求数据之间互相独立且呈正态分布,因此不适用于输出剂量监控。后续研究将继续寻找能更好地监控加速器输出剂量的方法,从而保证加速器处于稳定可控状态,提升治疗精度。

4 结论

本研究表明,加速器在满足当前规格限的情况下,依然可能发生过程失控并需要检修加速器、排除故障。使用控制图监控加速器机械性能指标可及时发现过程失控和加速器状态的异常变化。过程能力分析可以有效评估过程质量,并且可以帮助维修工程师判断是否有必要更换损坏或磨损的加速器部件。

【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] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 医用电子直线加速器质量控制检测规范 WS 674—2020[S]. 北京: 中华人民共和国卫生行业标准, 2020.
National Health Commission of the People's Republic of China. Specification for testing of quality control in medical linear accelerator WS 674-2020[S]. Beijing: Health Industry Standards of the People's Republic of China, 2020.
- [3] Montgomery DC. Introduction to statistical quality control, 6th edition[M]. Hoboken: Wiley, 2009.
- [4] Moore SJ, Herst PM, Louwe RJ. Review of the patient positioning reproducibility in head-and-neck radiotherapy using statistical process control[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 127(2): 183-189.
- [5] Lowther NJ, Hamilton DA, Kim H, et al. Monitoring anatomical changes of individual patients using statistical process control during head-and-neck radiotherapy[J]. *Phys Imaging Radiat Oncol*, 2019, 9(C): 21-27.
- [6] Cui T, Peng JX, Jin XL, et al. Improving intensity-modulated radiation therapy quality assurance by adopting statistical process control[J]. *Cancer Radiother*, 2022, 26(3): 427-432.
- [7] Price RA, Veltchev I, Lin T, et al. Evaluating suggested stricter gamma criteria for linac-based patient-specific delivery QA in the conventional and SBRT environments[J]. *Phys Med*, 2022, 100: 72-80.
- [8] Sanghangthum T, Suriyapee S, Srisatit S, et al. Statistical process control analysis for patient-specific IMRT and VMAT QA[J]. *J Radiat Res*, 2013, 54(3): 546-552.
- [9] Tiplica T, Dufreneix S, Legrand C. A Bayesian control chart based on the beta distribution for monitoring the two-dimensional gamma index pass rate in the context of patient-specific quality assurance[J]. *Med Phys*, 2020, 47(11): 5408-5418.
- [10] Schlesinger DJ, Sanders JC, Muller DA, et al. 8+ year performance of the gamma knife perfexion/icon patient positioning system and possibilities for preemptive fault detection using statistical process control[J]. *Med Phys*, 2021, 48(7): 3425-3437.
- [11] 彭旭东, 张俞, 何垠波, 等. 瓦里安机器性能检测的故障维修案例分析[J]. *中国医学装备*, 2021, 18(9): 192-195.
Peng XD, Zhang Y, He YB, et al. Case analysis: failure maintenance of Varian MPC[J]. *China Medical Equipment*, 2021, 18(9): 192-195.
- [12] Pearson M, Eaton D, Greener T. Long-term experience of MPC across multiple TrueBeam linacs: MPC concordance with conventional QC and sensitivity to real-world faults[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(8): 224-235.
- [13] Clivio A, Vanetti E, Rose S, et al. Evaluation of the machine performance check application for TrueBeam linac[J]. *Radiat Oncol*, 2015, 10: 97.
- [14] Barnes MP, Greer PB. Evaluation of the TrueBeam machine performance check (MPC) beam constancy checks for flattened and flattening filter-free (FFF) photon beams[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18(1): 139-150.
- [15] Pawlicki T, Whitaker M, Boyer AL. Statistical process control for radiotherapy quality assurance[J]. *Med Phys*, 2005, 32(9): 2777-2786.
- [16] Pawlicki T, Chera B, Ning T, et al. The systematic application of quality measures and process control in clinical radiation oncology[J]. *Semin Radiat Oncol*, 2012, 22(1): 70-76.
- [17] Able CM, Hampton CJ, Baydush AH, et al. Initial investigation using statistical process control for quality control of accelerator beam steering[J]. *Radiat Oncol*, 2011, 6: 180.
- [18] 肖青, 李光俊, 李治斌, 等. 基于AAPM TG-218报告应用统计过程控制技术监测患者个体化容积旋转调强放疗质量保证过程的初步研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2020, 37(5): 842-847.
Xiao Q, Li GJ, Li ZB, et al. Preliminary study on monitoring patient-specific volumetric modulated arc therapy quality assurance process with statistical process control methodology on the basis of TG-218 report[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2020, 37(5): 842-847.
- [19] 肖青, 李光俊, 张祥斌, 等. 统计过程控制在医用电子直线加速器射束匹配性能评估中的应用研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2021, 45(1): 109-113.
Xiao Q, Li GJ, Zhang XB, et al. Application of statistical process control in evaluation of performance for beam-matched medical electron linacs[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2021, 45(1): 109-113.
- [20] Li Z, Xiao Q, Li G, et al. Performance assessment of surface-guided radiation therapy and patient setup in head-and-neck and breast cancer patients based on statistical process control[J]. *Phys Med*, 2021, 89: 243-249.
- [21] Sanghangthum T, Suriyapee S, Srisatit S, et al. Retrospective analysis of linear accelerator output constancy checks using process control technique[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2013, 14(1): 4032.
- [22] Jin XL, Song JB, Peng JX, et al. Study on the established customized limits for the daily quality assurance procedure[J]. *J Radiat Res*, 2022, 63(1): 128-136.
- [23] 刘礼东, 李军峰, 李书舟, 等. 统计过程控制方法在加速器日常输出剂量稳定性中的研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(2): 138-142.
Liu LD, Li JF, Li SZ, et al. Statistical process control method in evaluating the stability of daily output dose of linear accelerator[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2021, 38(2): 138-142.
- [24] López-Tarjuelo J, Luquerollopis N, García-mollá R, et al. Statistical process control for electron beam monitoring[J]. *Phys Med*, 2015, 31(5): 493-500.
- [25] Luketina IA, Greig L. Linear accelerator output variability[J]. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2004, 27(3): 155-159.
- [26] Binny D, Aland T, Achibald-heeren BR, et al. A multi-institutional evaluation of machine performance check system on treatment beam output and symmetry using statistical process control[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(3): 71-80.
- [27] Puyati W, Khawne A, Barnes M, et al. Predictive quality assurance of a linear accelerator based on the machine performance check application using statistical process control and ARIMA forecast modeling[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(8): 73-82.

(编辑:谭斯允)