

6 Sigma 过程能力控制技术对加速器射野 均匀性的评估与改进

李娴雅^{1,2} 梁文杰¹ 杨海明¹ 管永精² 孙绍涵³ 付庆国¹

1(广西医科大学附属肿瘤医院 南宁 530021)

2(广西大学 物理科学与工程技术学院 南宁 530004)

3(广西医科大学附属武鸣医院 南宁 530199)

摘要 针对医科达 Synergy 直线加速器均匀性检测过程中出现的不稳定情况,应用 6 Sigma 过程能力控制技术对采集的直线加速器束流均匀性数据进行统计学分析,评估其稳定性及受控状态。在评估结果不佳的情况下,对 X、Y 方向上的对称性及平坦度进行相关性分析,建立了合理的多元回归模型,并给出了最优解。改进后,加速器束流均匀性有明显的改善,整体达到了预期的稳定状态。利用单值-移动极差图监控束流均匀性,对不稳定状态及时发出预警,及时、准确地采取适当的措施来校正束流均匀性,进而长时间维持均匀性在平稳状态,实现了加速器的质量控制由被动检测进入主动预防并修正阶段。

关键词 直线加速器, 6 Sigma 过程能力控制技术, 质量控制, 均匀性

中图分类号 TL53

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110202

Evaluation and improvement of acceleration's flatness and symmetry by six sigma capability and control technology

LI Xianya^{1,2} LIANG Wenjie¹ YANG Haiming¹ GUAN Yongjing² SUN Shaohan³ FU Qingguo¹

1(Guangxi Medical University Affiliated Tumor Hospital, Nanning 530021, China)

2(School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

3(Wuming Hospital of Guangxi Medical University, Nanning 530199, China)

Abstract [Background] Six sigma capability and control technology has been used to analyze the data of synergistic linear accelerator and evaluate the stability and controlled state. Uniformity of accelerator irradiation field is an important performance parameter of intensity-modulated radiation therapy (IMRT) with linear accelerator. [Purpose] This study aims to employ six sigma capability and control technology in IMRT to keep the beam uniformity stable for a long time. [Methods] X-ray uniformity data were collected and recorded for 9 consecutive months, once a week. A data record includes four types of parameters: X-direction flatness, X-direction symmetry, Y-direction flatness and Y-direction symmetry. First of all, the correlation between symmetry and flatness in the X, Y direction in the irradiation field of X-ray beam were analyzed. At the same time, a reasonable multiple regression model was established to search an optimal solution of beam uniformity. Then, the uniformity of accelerator would be

国家自然科学基金地区科学基金项目(No.11665006)、广西卫计委科研项目(No.Z20180635)、广西卫计委科研项目(No.Z2013415)资助

第一作者: 李娴雅, 女, 1991 年出生, 2017 年于广西大学获硕士学位, 核物理专业

通信作者: 付庆国, E-mail: fqg801219@163.com

收稿日期: 2019-04-17, 修回日期: 2019-06-18

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11665006), Guangxi Health Commission Scientific Research Project (No.Z20180635), Guangxi Health Commission Scientific Research Project (No.Z2013415)

First author: LI Xianya, female, born in 1991, graduated from Guangxi University with a master's degree in 2017, major in nuclear physics

Corresponding author: FU Qingguo, E-mail: fqg801219@163.com

Received date: 2019-04-17, revised date: 2019-06-18

adjusted to the optimal solution. Finally, the Individual and Moving Range Charts (I-MR) were applied to monitor the uniformity, and to provide timely warnings when unstable conditions exist. **[Results]** Through the above improvements, the uniformity performance is better and stable. The results reflect the instability of beam uniformity. **[Conclusion]** This technology can change the quality control of the accelerator from the pattern of passive detection mode to the active prevention mode.

Key words Linear accelerator, Six sigma capability and control technology, Quality control, Beam uniformity

利用医用直线加速器做调强放射治疗(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT)是一种有效治疗肿瘤的方式^[1]。加速器照射野的均匀性是描述束流的重要性能参数,其中包括平坦度和对称性。良好的束流均匀性对于患者的治疗效果具有重要意义。在放疗物理的质控上,通常使用平面探测器矩阵在X和Y两个方向上对平坦度和对称性进行测量,采集多个数据点,并计算平均值,在平均值高于国家标准时再进行调整。在2009年国家质量监督检验检疫总发布的JJG 589检定规程中,对医用直线加速器X辐射源均匀性的计算方法及容差范围均有明确的规定^[2]。目前,国内大部分医院的质控均依据该标准执行。但规程主要针对测量时刻均匀性的评估,不能很好地监测临床治疗阶段。此外,由于加速器束流初期不稳定,均匀性可能高于国家标准,而平均后的结果却在国家标准范围内,因此该方法得出的结果不能全面的反映均匀性。为了更全面地评估和改进临床治疗中的束流均匀性,本文将6 Sigma过程能力控制技术应用用于加速器束流均匀性的检测和评估。6 Sigma过程能力控制是一种系统的过程改进方法,通过测量均匀性、分析数据,进而提出改进方法、评估改进结果,最后达到过程无异常,并处于受控状态^[3]。6 Sigma技术在生产制造领域如制药、冶金、电子和机械等^[4-8]均有广泛应用。

近年来,6 Sigma技术在放疗领域展现出良好的应用前景,多个团队将此方法应用于放疗领域^[9-14]。如李定宇等^[7]采用6 Sigma技术常用的控制工具统计过程控制技术(Statistic Process Control, SPC)对直线加速器的输出偏差进行分析;李光俊等^[8]将SPC应用于容积旋转调强加速器(Volumetric-Modulated Arc Therapy, VMAT),监测加速器日常运行质量;Able等^[9]利用SPC对直线加速器的50个参数建立预测模型,用以预测组件故障或系统故障。本文在对2018年1月~9月的加速器数据进行统计学分析时,发现存在均匀性不稳定的情况,利用6 Sigma过程能力控制技术中的相关性分析与回归分析,对加速器均匀性的历史数据进行建模并求最优解,进而将均匀性调整到最优状态,并应用SPC长期维持该状态。

1 实验数据采集

本文采用IBA公司生产的二维平板电离室矩阵MatriXX测量临床治疗加速器(医科达 Synergy)的均匀性。根据JJG 589检定规程要求:源皮距(Source Skin Distance, SSD)取100 cm,并开10 cm×10 cm的射野,在X射线束轴水下10 cm处垂直于射束的位置测量,辐射野均整区内最大吸收剂量与最小吸收剂量的比值即为X射线辐射野的平坦度。

$$F = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_{\max}$ 为辐射野均整区内最大吸收剂量; $D_{\min}$ 为辐射野均整区内最小吸收剂量。根据JJG 589检定规程, F 应不大于106%。

在均整区对称于射线束轴的任意两点的吸收剂量的比值(大值比小值)即为X射线辐射野的对称性。

$$M = \frac{D_{i,\max}}{D_{i,\min}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $D_{i,\max}$ 为均整区对称于射线束轴的任意较大吸收剂量点; $D_{i,\min}$ 为均整区对称于射线束轴的任意较小吸收剂量点。根据JJG 589检定规程, M 应不大于103%。

为科学评估加速器的均匀性,本文在2018年1月~2018年9月期间,以“周”为测量频率,每周测量一次6 MV X射线的均匀性。每组数据从出束后开始采集,每秒记录一个数据点,一个数据点包括了X方向平坦度(X Direction Flatness, X-Flatness)、X方向对称性(X Direction Symmetry, X-Symmetry)、Y方向平坦度(Y Direction Flatness, Y-Flatness)、Y方向对称性(Y Direction Symmetry, Y-Symmetry)4类参数,每类参数依次采集10个数据点。以一次测量为一组数据,测量25次,共计25组数据,250个数据点。利用6 Sigma统计分析软件Minitab对数据进行分析。

2 数据分析

2.1 统计分析历史数据

为评估加速器均匀性总体状态,对 25 组样本数据进行统计分析,如图 1(为简洁,Minitab 分析数据统一省略百分号)。

X 、 Y 方向对称性的方差为 0.09, X 、 Y 方向平坦度的方差分别为 0.10、0.12,相比于对称性,平坦度波动较大。对于 Y 方向平坦度、 X 方向对称性、 Y 方向

对称性,其峰度均为正值,数据分布中低于均值的数据点较多; X 方向平坦度,峰度 $=-1.18 < 0$,数据整体为右偏,因为有部分数据点值较大,已经超过国家标准 106%,最大值为 106.26%。对于这部分数据,往往出现在束流初期。由于一次束流测量均值合乎国家标准时,无需采取调整措施,因此在往期加速器质量控制中忽视了这种束流不稳定的情况。为细致的评估加速器的均匀性,我们将 4 类参数做过程控制图分析其过程能力及 Sigma 水平,用以衡量该系统过程优劣程度。

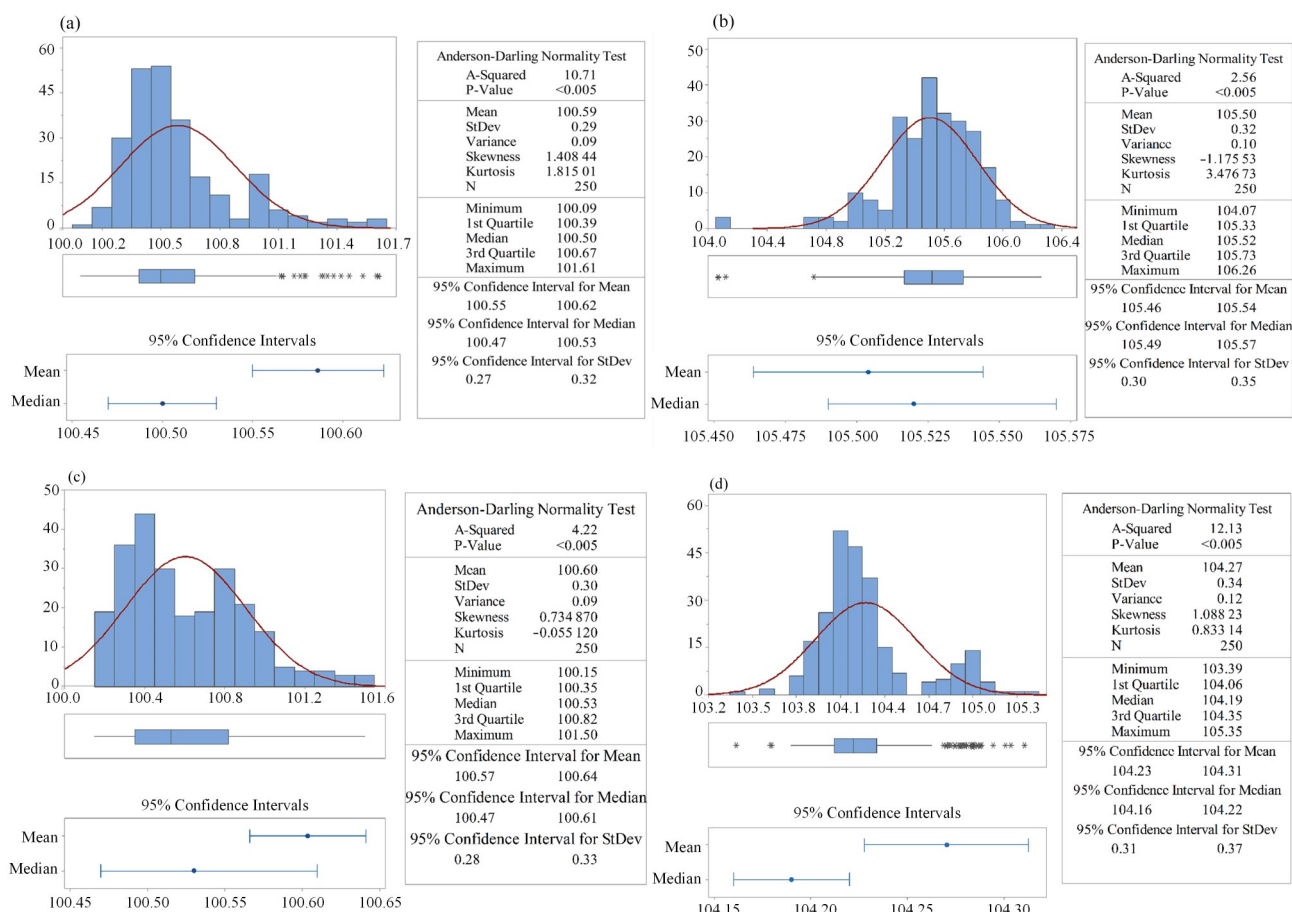


图1 数据均匀性汇总分析图 (a) X 方向对称性, (b) X 方向平坦度, (c) Y 方向对称性, (d) Y 方向平坦度

Fig. 1 Data uniformity summary analysis chart (a) X direction symmetry, (b) X direction flatness, (c) Y direction symmetry, (d) Y direction flatness

2.2 过程能力分析

在图 1 中,利用 Adersong-Darling 方法对历史数据进行正态性检验, $P < 0.05$, 因此数据整体呈现非正态分布,无法用常规休哈特控制图分析。通过 Minitab 的“个体分布标识”功能分析,结果表明无法使用 BOX-COX 等方法对数据进行正态转化。在有 250 个数据点的基础上(高于 100 个数据点),利用分位数控制图(图 2)进行分析。图 2 中,上控制限(Upper

Control Limit, UCL)用 0.995 分位数;下控制限(Low Control Limit, LCL)用 0.005 分位数,中心线为中值(Mid-value)。规格上限及规格下限表示目标的期望值,一般以行业标准为准。对于平坦度,规格上限(Upper Spec Limit, USL)为 106%,规格下限(Lower Spec Limit, LSL)为 100%;对于对称性,规格上限为 103%,规格下限为 100%。

图 2 显示,在 X 方向平坦度、对称性及 Y 方向平

坦度的控制图中,出现超过上、下控制限的点,因此判定系统存在不稳定风险。

根据非正态分布的过程能力指数计算公式:

$$CNPk = \min \left(\frac{USL - P_{.50}}{P_{.995} - P_{.50}}, \frac{P_{.50} - LSL}{P_{.50} - P_{.005}} \right) \quad (3)$$

式中:USL为规格上限;LSL为规格下限; $P_{.50}$ 为中值; $P_{.995}$ 为0.995分位数; $P_{.005}$ 为0.005分位数。计算相应的CNPk值,查西格玛(Sigma)水平转换表得到相应的西格玛水平(σ)、合格率(%)以及不合格率,其中不合格率用PPM(Parts Per Milion)表示,即每百万机会缺陷数。表1列出了过程能力的相关数据。

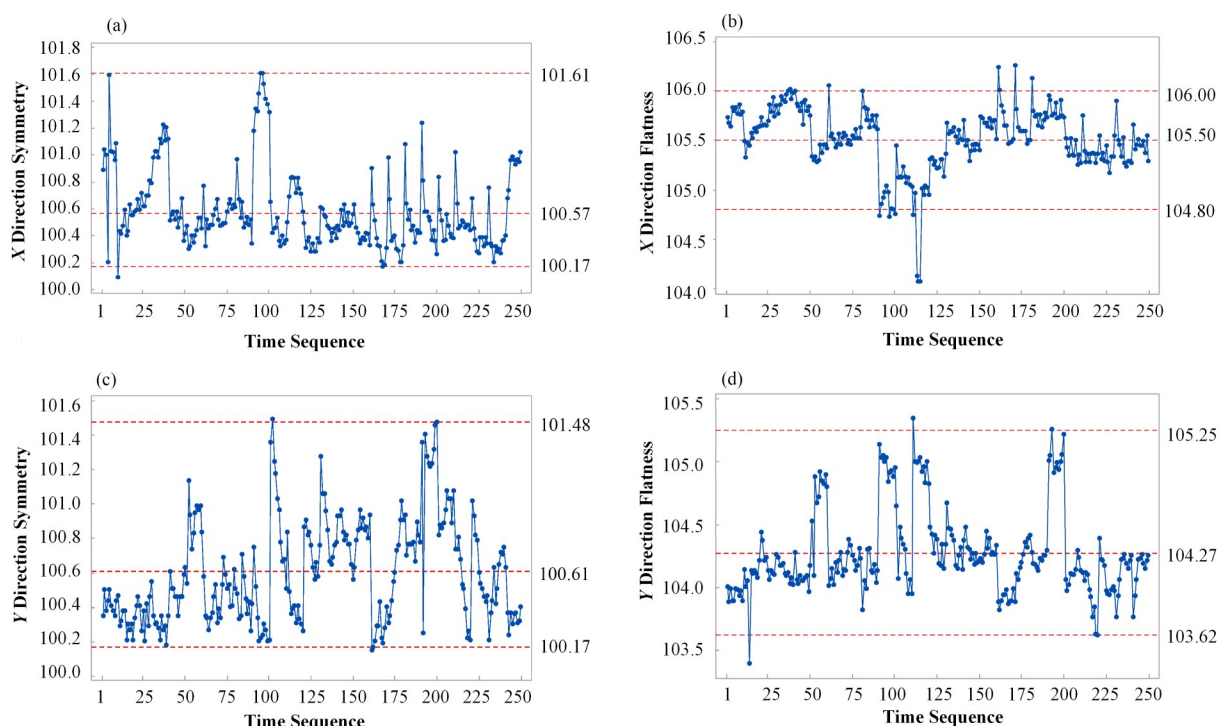


图2 均匀性分位数控制图 (a) X方向对称性,(b) X方向平坦度,(c) Y方向对称性,(d) Y方向平坦度

Fig. 2 Quantile control chart of slatness and symmetry (a) X direction symmetry, (b) X direction flatness, (c) Y direction symmetry, (d) Y direction flatness

表1 过程能力结果
Table 1 The results of process capability

参数 Parameter	X方向平坦度 X-flatness	X方向对称性 X-symmetry	Y方向平坦度 Y-flatness	Y方向对称性 Y-symmetry
下控制限 Lower control limit (LCL)	104.08%	100.17%	103.62%	100.17%
上控制限 Upper control limit (UCL)	106.21%	101.61%	105.25%	101.48%
中值 Mid-value	105.50%	100.57%	104.27%	100.61%
上规格限 Upper spec limit (USL)	106%	103%	106%	103%
下规格限 Lower spec limit (LSL)	100%	100%	100%	100%
过程能力指数 CNPK	0.70	1.43	1.77	1.39
西格玛水平 (σ)	3.60	5.78	6.81	5.67
Sigma level (σ)				
合格率	98.320%	99.999%	99.999%	99.997%
Percent of pass				
每百万机会缺陷数	16 800	17	3	23
Parts per million of defects				

对于均匀性的过程能力分析结果,X方向对称性、Y方向平坦度及Y方向对称性合格率均为99%以上,而X方向平坦度低于99%,同时PPM高达

16 800,即百万次实验中,将有约16 800次的测量结果高于国家标准106%。因此,对于束流的均匀性系统,过程状态不稳定。为保证束流均匀性的稳定及

过程变差在可接受范围内,该系统应采取改进措施,确保精准放疗,保证患者治疗效果。

3 性能改善

3.1 相关性分析

通过相关性分析判断 X 、 Y 方向平坦度、对称性的相关程度,结果如表2。

表2 相关性分析结果
Table 2 The results of correlation analysis

均匀性参量 Uniformity	Y 方向平坦度 Y -flatness	Y 方向对称性 Y -symmetry
X 方向平坦度 X -flatness	-0.425	
Y 方向对称性 Y -symmetry	0.374	
X 方向对称性 X -symmetry		0.235

输出中 P 值均为 $0 < 0.05$,显著水平较高,因此表2中 X 方向平坦度与 Y 方向平坦度、 Y 方向对称性与 Y 方向平坦度、 X 方向对称性与 Y 方向对称性具有相关性。表2数据为相关系数,系数为正表示正相关,即当一个参数变大,对应的参数则相应变大;系数为负表示负相关,即当一个参数变大,对应的参数则相应变小;无相关系数的各组则没有相关关系。为将

X 方向平坦度调整到国家标准106%以下,工程师根据上述参数的相关性,在 X 对称性、 Y 方向平坦度及对称性状态良好的条件下进行合理调整,最终均匀性达到最优。因此上述分析结果为调整均匀性提供了理论基础。

3.2 多元回归分析及模型最优解

为确定改进后的目标值,进一步分析各变量之间的变化规律,以 X 、 Y 方向对称性、 Y 方向平坦度为响应变量, X 方向平坦度为预测变量做回归分析。输出结果如下:

1)从ANOVA表分析回归方程总的显著性检验结果, P 值= $0 < \alpha = 0.05$,说明显著性水平在 $\alpha = 0.05$ 下,线性回归方程总效果是显著的;

2)回归显著性的度量指标: R -sq=42.71%; R -sq(调整)=42.01%,二者很接近,模型可以接受。从回归系数检验来看,4个变量的 P 值均小于0.05;故三个参数都是显著因子。

3)对于四合一的残差图(图3):残差与数据的顺序图(Observation Order)显示,残差对于观察值顺序随机分布;残差与拟合值图(Fitted value)未见喇叭口形状分布,说明线性模型可接受;残差的正态概率图(Residual)显示,数据点基本在一条直线上,可认为残差符合整体分布;同时三个响应变量的残差正常。

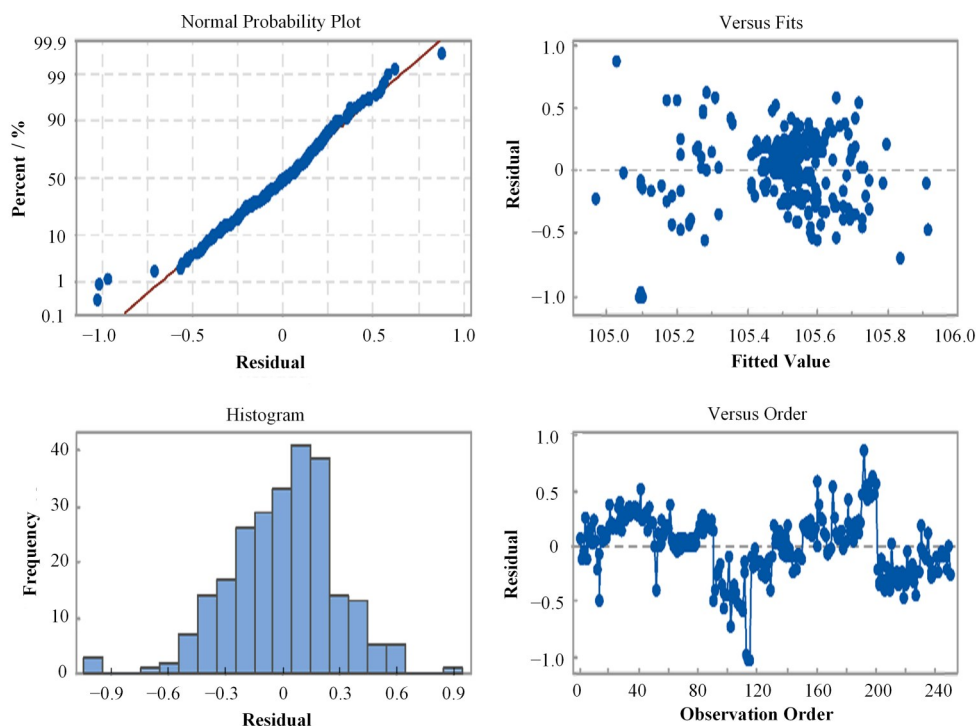


图3 X 方向平坦度四合一残差图
Fig.3 Residual plot for X direction flatness

上述结果表明:假设的线性模型可接受,4类参数关系服从下述回归方程:

$$X_1 = 110.2 + 0.2265X_2 - 0.5438X_3 + 0.2909X_4(4)$$

式中: X_1 为 X 方向平坦度; X_2 为 X 方向对称性; X_3 为 Y 方向平坦度; X_4 为 Y 方向对称性。对回归方程做优化响应, 计算出4类参量的最优解: 当 $X_2=100.5\%$; $X_3=105.35\%$; $X_4=100.6\%$ 时, $X_1=104.896\%$ 为最优解。

4 改进加速器均匀性实验

在直线加速器中, 影响均匀性系统的参数繁多,

表3 t 检验结果
Table 3 The result of t test

均匀性参量 Uniformity	均值 Mean value / %	标准差 Standard deviation	准误差 Accuracy error	95% 置信区间 95% confidence interval / %
X 方向平坦度 X -flatness	104.85	0.148	0.027	(104.792, 104.903)
X 方向对称性 X -symmetry	100.72	0.089	0.016	(100.683, 100.749)
Y 方向对称性 Y -symmetry	100.51	0.134	0.024	(100.460, 100.560)
Y 方向平坦度 Y -flatness	105.34	0.146	0.027	(105.283, 105.392)

改进后, 4类参数的标准差均在 0.1 左右, 优化误差在 0.02 左右, 数据波动及优化误差均在可接受范围内, 同时回归模型的最优解均处于测量数据的 95% 置信区间内。因此, 经过对加速器进行调整, 均匀性实现回归方程预测的最优解。

主要是用于控制束流打靶前的方向 2R I CTRL 与 2T I CTRL 两项参数, 此外, 还有如枪电流控制 (GUN I CTRL)、剂量水平 (DOSE LEVEL) 等诸多参数会间接影响该系统。在影响均匀性系统的参数与均匀性关系未知的情况下, 实验依据 X 、 Y 方向平坦度、对称性的相关关系, 调整影响均匀性系统的参数。当 X 、 Y 方向平坦度、对称性分别在最优解附近时, 再次应用 MatriXX 及国家标准规定的测量方法连续测量, 测量结果做 t 检验, 检验结果如表 3。

5 评估和监控改进后的均匀性

为了实现控制图预警的功能, 将改进后的均匀性做单值-移动极差 (I-MR) 控制图, 用于分析受控状态及过程能力。通过单值图 (如图 4) 分析超过控制限的异常点以及波动趋势。

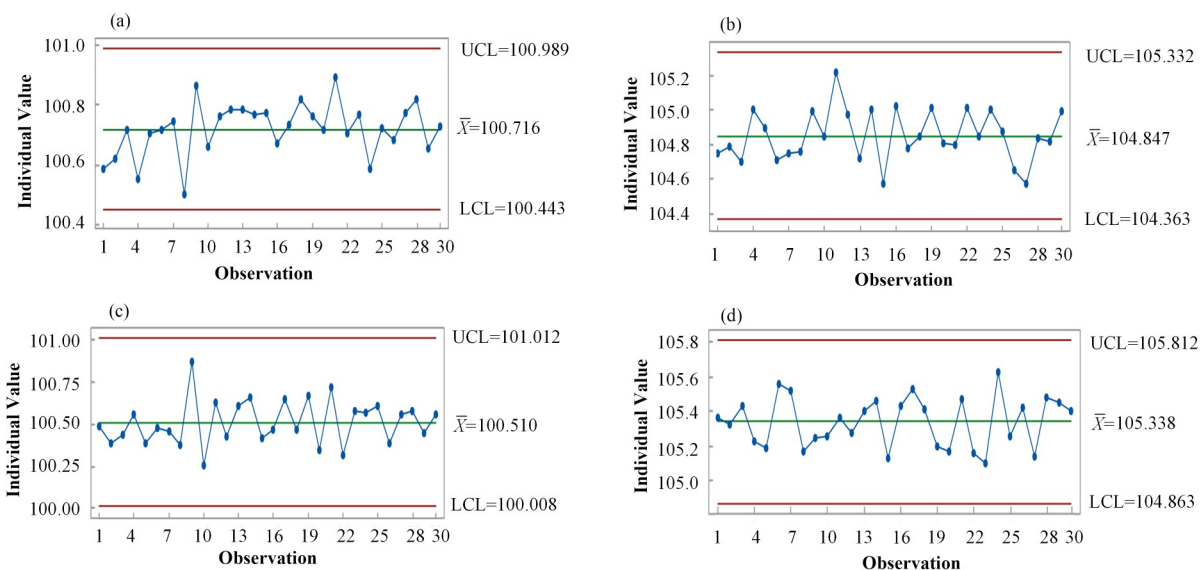


图4 改进后均匀性的单值图 (a) X 方向对称性, (b) X 方向平坦度, (c) Y 方向对称性, (d) Y 方向平坦度
Fig.4 Individual value plot of flatness and symmetry after improvement (a) X direction symmetry, (b) X direction flatness, (c) Y direction symmetry, (d) Y direction flatness

对于改进后的4类参数,控制图中均没有符合包括“点出界就判异”在内的8条判异标准的点,同时波动稳定。其中 X 方向平坦度的上控制限为105.332%,下控制限为104.36%; X 方向对称性的上控制限为100.999%,下控制限为100.443%; Y 方向对称性的上控制限为101.012%,下控制限为100.008%; Y 方向平坦度的上控制限为105.812%,下控制限为104.863%。计算短期能力指数(Process Capability Index, CPK)、长期能力指数(Process Performance Index, PPK)来评判其受控能力, X 方向平坦度的CPK=2.57, PPK=2.59; X 方向对称性CPK=8.48, PPK=8.55; Y 方向对称性CPK=6.14, PPK=6.19; Y 方向平坦度CPK=22.87, PPK=23.07;4类参数的CPK、PPK相差不大,因此可以判断目前束流的均匀性只受到随机误差波动的影响,同时过程能力指数均大于1.67,且PPM均为0,说明百万次实验中均不会出现超过上、下控制限的点。因此,改进后的均匀性系统稳定且处于受控状态。上述系统在工作过程中,单个的均匀性数据可能全都不同。但是在连续束流过程中,数据将形成一组有规律且可描述的分布图像。根据分布图像,可以对该系统进行输出预测。

将图4的上、下控制限作为控制限值,监控束流的均匀性。在未来常规质控的基础上,采用控制用控制图,对均匀性进行监控,建立过程反馈系统。将检测数据输入控制图中,对满足判异准则的数据点,控制图能及时发出预警,提示工程师进行相应调整。避免均匀性变差,影响精准放疗。

6 结语

本文对加速器均匀性历史数据统计分析,发现系统存在不稳定的风险, X 方向平坦度的不良率较高。通过6 Sigma 过程能力控制技术中的相关性和回归分析,建立合理模型,全面地分析 X 、 Y 方向平坦度及对称性的内在关系,并调整均匀性趋近回归模型的最优解。改进后,再次测量,均匀性有明显改进,同时束流稳定且过程能力良好。本文有以下创新点:首先,利用分位数控制图全面分析当次测量的每一个数据点,同时将历史数据与与当次测量数据结合,可以更好的分析均匀性的变化关系;其次,6 Sigma 过程能力控制技术中的相关性分析和回归分析可以找出 X 、 Y 方向平坦度及对称性的内在关系及最优解,帮助工程师准确的采取措施,改进系统达到最优状态;再次,受控状态的控制图可以对均匀性进行预测,在过程能力不佳或不良率较高的情况下,提示工程师及时采取相应的措施进行改进,避免均匀

性继续变差,确保加速器精准治疗;最后,在束流均匀性稳定且受控的情况下,工程师可以灵活的把控对该项参数的质控,优化工作时间和流程。综上所述,本文采用6 Sigma 过程能力控制技术全面的对均匀性进行分析、改进及评估,效果显著,实现加速器均匀性的质控由被动检测进入主动预防阶段,提高加速器的稳定性,解决加速器质控滞后的弊端,提高调强放射治疗的精准程度。

参考文献

- 1 梁霞,李龄. 鼻咽癌IMRT自适应放疗研究进展[J]. 中国癌症防治杂志, 2018, 10(04): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5671.2018.04.20.
LIANG Xia, LI Ling. Research progress of IMRT adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2018, 10(04): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5671.2018.04.20.
- 2 郭洪涛. JJG589-2008《医用电子加速器辐射源》检定规程中技术要求和检定方法[J]. 中国计量, 2009, (6): 122-125.
GUO Hongtao. JJG589-2008 <medical electron accelerator radiation source> technical requirements and verification methods in verification regulation[J]. Chinese Measurement, 2009, (6): 122-125.
- 3 马逢时. 六西格玛管理统计指南[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2013.
MA Fengshi. Six sigma management statistics guide[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2013.
- 4 Amini L, Andrade H, Bhagwan R, et al. SPC: a distributed, scalable platform for data mining[ED/OL]. 2019-02-06. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/citations?doi=10.1.1.161.5471>.
- 5 Institute E S. Quality control and applied statistics[M]. Executive Sciences Institute, 1956. DOI: 10.2307/2281631.
- 6 赵小松,李晓卫,聂斌. 统计过程控制中基于数据深度的非参数变点控制图[J]. 工业工程, 2012, 15(3): 92-97. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7375.2012.03.018.
ZHAO Xiaosong, LI Xiaowei, NIE Bin. Non-parametric variable point control chart based on data depth in statistical process control[J]. Industrial Engineering, 2012, 15(3): 92-97. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7375.2012.03.018.
- 7 李定宇,戴建荣. 统计过程控制方法在加速器质量保证中的应用[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2009, 33(1): 54

- 58. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2009.01.054.
- LI Dingyu, DAI Jianrong. Application of statistical process control method in accelerator quality assurance [J]. International Journal of Radiological Medicine Nuclear Medicine, 2009, **33**(1): 54 – 58. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2009.01.054.
- 8 李光俊, 李衍龙, 肖江洪, 等. VMAT 加速器日常运行分析及过程质量控制[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, **24**(2): 100–103. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.02.023.
- LI Guangjun, LI Yanlong, XIAO Jianghong, *et al.* Daily operation analysis and process quality control of VMAT accelerator[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, **24**(2): 100 – 103. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.02.023.
- 9 Able C M, Baydush A H, Nguyen C, *et al.* A model for preemptive maintenance of medical linear accelerators-predictive maintenance[J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2014, **90**(1): S738–S738. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2014.05.2147.
- 10 Nguyen C I. An Interface for analysis of medical linear accelerator parameters using process behavior charts[D]. Winston-Salem, NC: Wake Forest University, 2014.
- 11 Hanna S M. Application of statistical process control (SPC) in the manufacturing of medical accelerators[C]. Particle Accelerator Conference, 2003. DOI: 10.1109/PAC.2003.1289610.
- 12 Andersson P, Bjelkengren U, Sjöström D, *et al.* SU-E-T-104: utilizing statistical process control and EPID for routine QA of medical linear accelerators[J]. Medical Physics, 2011, **38**(6): 3509 – 3510. DOI: 10.1118/1.3612055.
- 13 Able C, Hampton C, Baydush A. SU-E-T-54: initial investigation applying statistical process control to accelerator beam quality[J]. Medical Physics, 2011, **38**(6, Part11): 3497–3498. DOI: 10.1118/1.3612005.
- 14 Saito A, Rangaraj D, Yaddanapudi S, *et al.* SU-E-T-157: a statistical technique to unmask accelerator performance trends[J]. Medical Physics, 2011, **38**(6): 3522. DOI: 10.1118/1.3612107.