

瓦里安千伏级锥形束CT系统间剂量学一致性研究

王美娇¹, 张艺宝², 李莎², 贾飞^{3,4}, 吴昊², 丁艳秋¹, 郭文¹

1. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088; 2. 北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科, 恶性
肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142; 3. 郑州大学第一附属医院放射治疗部, 河南 郑州 450052; 4. 郑州大
学基础医学院放射医学教研室, 河南 郑州 450052

【摘要】目的:以两台相同型号、不同机龄的瓦里安锥形束CT(CBCT)为平台,选取球管电压值kVp与加权CT剂量指数CTDI_w,分别测量验证6套标准扫描参数的系统间剂量学一致性。**方法:**(1)选取德国PTW管电压表验证标称电压稳定性;(2)选取德国PTW CT电离室,分别在Full-fan和Half-fan模式下测量直径为16 cm头部和32 cm体部一体式CTDI模体中心和外周4点剂量以计算CTDI_w;(3)利用SPSS 21.0版软件对数据进行检验, $P<0.05$ 为统计学有显著意义。**结果:**实测管电压均高于标称值,新旧CBCT的6个扫描参数平均偏高 (2.5 ± 0.7) kVp和 (2.9 ± 0.8) kVp,相对偏差范围1.30%~3.12%;旧CBCT各参数的CTDI_w值均高于新CBCT,偏差幅度4.90%~11.46%,平均偏高 $8.73\%\pm2.95\%$ 。**结论:**瓦里安CBCT的剂量学稳定性较好,但球管电压的偏差有随着使用年限增加的趋势,相同型号、相同扫描参数的机器间CTDI_w值也不尽相同。CBCT的剂量学一致性应该作为常规质量控制和工作保证的一部分进行监测。

【关键词】瓦里安;锥形束CT;加权CT剂量指数;剂量学;扫描参数;放射防护

【中图分类号】R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)06-0546-04

Dosimetric consistency of different Varian kV-cone beam CT systems: a comparative study

WANG Meijiao¹, ZHANG Yibao², LI Sha², JIA Fei^{3,4}, WU Hao², DING Yanqiu¹, GUO Wen¹

1. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China; 2. Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China; 3. Department of Radiation Oncology, First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 4. Department of Radiation Medicine, Basic Medical College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: Objective To verify the dosimetric consistency between two Varian CBCT systems of the same type but of different working years using 6 sets of standard scanning parameters. **Methods** The stability of the tube voltage (kVp) of the two systems was measured using PTW DIAVOLT-MULTI (Germany). In a standard CTDI phantom consisting of the head and body modules (diameters of 16 cm and 32 cm, respectively), the dose at the central and 4 peripheral points were measured with a PTW CT chamber (Germany) to calculate the weighed CT dose index (CTDI_w) in both the full-fan and half-fan modes. **Results** Measurement using the 6 sets of standard scanning parameters showed that the kVp of both the new and old CBCT systems was higher than the nominal values by (2.5 ± 0.7) kVp and (2.9 ± 0.8) kVp, respectively, with deviations ranging from 1.3% to 3.12%. Compared to the new system, the old CBCT system had a higher CTDI_w by $(8.73\pm2.95)\%$ on average, with deviations ranging from 4.90% to 11.46%. **Conclusion** The dosimetric consistency of Varian CBCT is stable but the deviation of kVp increases as the working year of the machine increases. The CTDI_w can vary between different Varian CBCT systems even of the same type and with the same scanning parameters. Monitoring of the dosimetric consistency is recommended for routine quality control and maintenance of the CBCT systems.

Keywords: Varian; cone beam CT; weighed CT dose index; dosimetry; scanning parameter; radiological protection

【收稿日期】2017-03-10

【基金项目】国家自然科学基金(11505012);北京市自然科学基金(7172048, 1174016);北京市医院管理局“青苗”计划专项经费(QML20151004);
质检公益性行业科研专项(201510001-02)

【作者简介】王美娇, 硕士研究生, 研究方向:放射医学, E-mail: 18301663962@163.com

【通信作者】郭文, 博士, 研究员, 研究方向:辐射检测与评价, E-mail: guowen_cn@126.com

前言

以调强和容积调强技术为代表的现代放疗技术极大改善了致死辐射剂量与肿瘤的适形度^[1],但从靶区边缘到相邻危及器官巨大的剂量跌落也对摆位精度提出了更高的要求,以保证肿瘤控制率^[2]并避免正常器官损伤^[3]。以千伏级锥形束CT(CBCT)为代表的影像引导不仅可以满足精准放疗的摆位要求^[4],还被广泛应用于计划剂量重建^[5]、治疗过程运动管理^[6]和自适应放疗^[7]等先进领域,是放疗中使用最为广泛的成像模态之一。与诊断CT辐射剂量相关的致癌风险已被学界和公众广为重视^[8]。然而,CBCT在放疗引导中的扫描频次和单次剂量均高于诊断CT^[9],其累积的辐射剂量和风险不容忽视^[10]。虽然加速器治疗射线的稳定性^[11]和CBCT图像质量^[12]已被广泛关注,但成像系统的剂量学一致性尚缺乏研究报道。

本工作以两台相同型号、不同年龄的瓦里安CBCT为平台,选取典型并可测量的两个重要参数,即球管电压值kVp与加权CT剂量指数(CTDI_w),分别测量验证6套标准扫描参数的系统间剂量学一致性。

1 材料与方法

1.1 瓦里安CBCT和标准扫描参数

本工作使用北京大学肿瘤医院两台载于瓦里安Clinac iX医用直线加速器上的相同型号CBCT,装机时间分别为2015年(新)和2009年(旧),均由机械臂支撑的千伏X线源(kVS)和非晶硅平板探测器(kVD)构成,与加速器等中心。软件平台均为OBI V1.6版,所用的6个标准扫描条件关键参数如表1所示。其中,Full-fan和Half-fan模式分别适用于扫描尺寸小于24 cm和大于24 cm的结构。

表1 瓦里安OBI V1.6版CBCT标准扫描条件关键参数

Tab.1 Key parameters of standard scanning protocols of Varian OBI CBCT (V1.6)

Parameter	Standard dose head	Low dose head	High-quality head	Pelvis	Pelvis spot light (full-fan bow-tie filter)	Low-dose thorax
X-ray voltage/kVp	100	100	100	125	125	110
X-ray current/mA	20	100	80	80	80	20
X-ray milli-second/ms	20	20	25	13	25	20
Gantry rotation/deg	200	200	200	360	200	360
Number of projections	360	360	360	655	360	655
Fan type	Full	Full	Full	Half	Full	Half
Bow-tie filter	Full	Full	Full	Half	Full	Half

1.2 CTDI模体和设置

本工作采用德国PTW头部和体部一体式CTDI模体(匀质丙烯酸材料),体模直径32.0 cm,头模直径16.0 cm,均在中心位置以及0、3、6、9点方向距模体边缘0.5 cm处设有直径0.9 cm、深度10.0 cm的电离室插孔和配套的丙烯酸插件,用于没有放置电离室时的填充物质。在使用体模时,利用激光灯将嵌套的体、头模定位线对齐以保证实验可重复性。两台加速器均装有相同的影像引导放射治疗碳纤维治疗床。为保证模体摆位与床板相对位置的可重复性并减少床体厚度对射线衰减的不确定影响,治疗床的左右坐标锁定为0时以激光灯辅助将模体中线设置于治疗床正中;在local bar的辅助下将模体后缘置于床进出方向H3位置前缘,随后将local bar撤除以消除散射影响;随后仅通过升降、进出移动治疗床将

CTDI模体中心置于加速器等中心,完成摆位。

1.3 剂量装置和计算方法

为了验证标称管电压(kVp)的准确性,实验利用德国PTW DIAVOLT-MULTI管电压计在SDD=100 cm的条件下,测量两台CBCT的实际kVp,包括在full Bow-tie filter下测量100和125 kV;half Bow-tie filter下测量110和125 kV;无Bow-tie filter下测量100、110和125 kV。

CTDI_w实验采用德国PTW TW30009 CT电离室和PTW UNIDOS weblin静电计。其中CT电离室于2016年8月由德国实验室刻度,可溯源至德国国家实验室(PTB, Braunschweig)。N_k系数为 8.484×10^7 Gy·cm/C;参照IEC61267标准,RQT9和RQT8分别对应120和100 kV(半价层分别为8.4和6.9 mm铝);K_Q修正因子均为1.00,不确定度均为3%。按照说明书要求,实验采用的极化

电压为-100 V,并做实时温度和气压修正。

由于机械构造和射线特征等原因,传统诊断扇形束CT剂量指数CTDI不适于描述CBCT剂量^[13],而加权CT剂量指数CTDI_w更为合适。其定义如下^[14]:

$$CTDI_w = \frac{1}{3}gD_1 + \frac{2}{3}g\left[\frac{1}{4}g\sum_{i=2}^5D_i\right]$$

(1)

其中, D_i 为各点测得的空气比释动能值(单位:mGy), $i=1$ 为中心点测量值, $i=2\sim 5$ 分别代表外周4点测量值。虽然CTDI_w不是实际患者体内的吸收剂量,但其国际通用的测量标准更便于多中心、多机器间的剂量学比较^[15]。本文中所有CTDI_w值均归一到每100 mAs以便于不同扫描参数间的比较。

1.4 统计学方法

利用SPSS 21.0版软件对数据进行正态性检验,对

于正态分布数据采用独立样本 t 检验,反之则采用Mann-Whitney非参数统计。利用Levene's检验数据方差齐性以选择合适的独立样本 t 检验结果。 $P<0.05$ 为统计学有显著意义。

2 结果

2.1 标称管电压与测量值一致性

表2列出新旧两台CBCT在3种Bow-tie滤线器模式下实测管电压与标称管电压的差异,涵盖了6个标准扫描模式下所有的参数组合,以及没有滤线器下的3档管电压结果。新旧CBCT实测管电压均高于标称值,其中新CBCT平均偏高(2.5 ± 0.7) kVp,旧CBCT平均偏高(2.9 ± 0.8) kVp,较标称kVp的相对偏差范围1.30%~3.12%。

表2 新旧两台瓦里安CBCT测量管电压与标称管电压对比
Tab.2 Comparison of measured kVp and nominal kVp of an old and a new Varian CBCT

	Bow-tie filter	Half		Full		None		
	Nominal kVp	110	125	100	125	100	110	125
New	Measured	112.7	128.5	102.0	128.1	101.3	112.4	127.7
	Difference*	2.7 (2.5%)	3.5 (2.8%)	2.0 (2.0%)	3.1 (2.5%)	1.3 (1.3%)	2.4 (2.2%)	2.7 (2.2%)
Old	Measured	113.3	128.6	102.4	128.9	101.5	112.9	127.9
	Difference*	3.3 (3.0%)	3.6 (2.9%)	2.4 (2.4%)	3.9 (3.1%)	1.5 (1.5%)	2.9 (2.6%)	2.9 (2.3%)
P (Old vs. Nominal)				0.650				
P (New vs. Old)				0.952				
P (New vs. Nominal)				0.695				

kVp: Tube voltage; * Relative to nominal kVp.

2.2 CTDI_w系统间稳定性

表3展示了新旧两套CBCT系统间6个标准扫描参数CTDI_w的一致性及偏差分析结果。其中,旧CBCT的CTDI_w值一致高于新CBCT。相对于两台机器均值的偏差幅度4.90%~11.46%,平均偏高8.73%±2.95%。

3 讨论

表2的数据表明,使用1年和7年的瓦里安CBCT实测球管电压与标称电压均存在差异,且一致偏高,但统计学不显著(P 值分别为0.695和0.650);新系统的偏差幅度小于旧系统,但新旧系统差异间也无统计学意义($P=0.952$), $P>0.05$ 可能与样本量过小有关。此外,同一机器的球管在不同的电压设置下与标称值的差异幅度各不相同。相同电压设置下,不同的Bow-tie滤线器设置也会影响实测kVp与标称值

的差异幅度。在相同的滤线器设置下,管电压越高,实测值与标称kVp的绝对差异越大。

由表3数据可知,新旧CBCT在相同扫描参数下的CTDI_w值偏差明显,绝对值差异幅度在0.11~0.24 mGy/100 mAs之间,与两台机器均值的相对偏差幅度为4.90%~11.46%。其中最大绝对偏差和相对偏差值出现在不同的扫描参数组,原因是作为相对偏差分母的“低剂量胸”参数的绝对CTDI_w值较小。可能是由于样本量小的原因,差异不具有统计学意义($P=0.324$)。但值得注意的是,旧CBCT的6组扫描参数实测CTDI_w均高于新CBCT,部分原因可能与表2中提示的更高实测kVp值有关,这与文献[16-17]报道的CBCT剂量与kVp指数正相关性一致。

由于对每100 mAs做了归一处理,“标准头、低剂量头和高质量头”3套参数的实测CTDI_w值几乎无差异(新

表3 新旧两台瓦里安CBCT实测CTDI_w值及偏差分析
(mGy/100 mAs)

Tab.3 CTDI_w values and deviations of the new and the old Varian CBCT (mGy/100 mAs)

Parameter	New CBCT	Old CBCT	Deviation*
Standard dose head	2.19	2.30	0.11 (4.90%)
Low dose head	2.19	2.37	0.18 (7.89%)
High-quality head	2.18	2.31	0.13 (5.79%)
Pelvis	1.99	2.23	0.24 (11.37%)
Pelvis spot light (Full-fan bow-tie filter)	1.72	1.92	0.20 (10.99%)
Low-dose thorax	1.48	1.66	0.18 (11.46%)
P (New vs. Old)	0.324		

CTDI_w: Weighed CT dose index; * Relative to the mean CTDI_w of two CBCT.

CBCT差异 ≤ 0.01 mGy/100 mAs,旧CBCT ≤ 0.07 mGy/100 mAs),与头部标称CTDI_w一致性吻合。两台机器骨盆Spot Light模式的CTDI_w值均大幅低于普通模式(幅度:新CBCT为0.27 mGy/100 mAs或13.57%,旧CBCT为0.31 mGy/100 mAs或13.90%),说明通过牺牲成像范围(FOV)可以换取更低的辐射剂量。对于仅需要中心部分解剖结构作为配准参考的患者来说应该予以优先选用。6套标准扫描参数中,“低剂量肺”的CTDI_w最低,在与普通“骨盆”模式FOV相同的Half fan扫描下,“低剂量肺”射线需要穿透组织的密度更低,因此需要的kVp值较低,对于体型较小的患者也可以用此模式降低辐射剂量。

4 结论

当前的质控标准更多关注CBCT的图像质量和机械精度,尚缺乏对成像系统剂量学稳定性的重视。本工作发现,瓦里安CBCT的剂量学稳定性较好,但球管电压的偏差有随着使用年限增加的趋势,相同型号、相同扫描参数的机器间CTDI_w值也不尽相同。CBCT的剂量学一致性应该作为质量控制和工作保证的一部分进行监测。

【参考文献】

- [1] TSAI C L, WU J K, CHAO H L, et al. Treatment and dosimetric advantages between VMAT, IMRT, and helical tomotherapy in prostate cancer[J]. Med Dosim, 2011, 36(3): 264-271.
- [2] BALIGA S, GARG M K, FOX J, et al. Fractionated stereotactic radiation therapy for brain metastases: a systematic review with tumor

control probability modeling [J]. Br J Radiol, 2017, 90(1070): 20160666. DOI: 10.1259/bjr.20160666.

- [3] ANDERSON N J, WADA M, SCHNEIDER-KOLSKY M, et al. Dose-volume response in acute dysphagia toxicity: validating QUANTEC recommendations into clinical practice for head and neck radiotherapy [J]. Acta Oncol, 2014, 53(10): 1305-1311.
- [4] VAN KRANEN S, VAN BEEK S, RASCH C, et al. Setup uncertainties of anatomical sub-regions in head-and-neck cancer patients after offline CBCT guidance[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 73(5): 1566-1573.
- [5] YANG Y, SCHREIBMANN E, LI T F, et al. Evaluation of on-board kV cone beam CT (CBCT)-based dose calculation[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(3): 685-705.
- [6] GENDRIN C, FURTADO H, WEBER C, et al. Monitoring tumor motion by real time 2D/3D registration during radiotherapy [J]. Radiother Oncol, 2012, 102(2): 274-280.
- [7] GUAN H Q, DONG H. Dose calculation accuracy using cone-beam CT (CBCT) for pelvic adaptive radiotherapy[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(20): 6239-6250.
- [8] PEARCE M S, SALOTTI J A, LITTLE M P, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study [J]. Lancet, 2012, 380 (9840): 499-505.
- [9] LECHUGA L, WEIDLICH G A. Cone beam CT vs. fan beam CT: a comparison of image quality and dose delivered between two differing CT imaging modalities[J]. Cureus, 2016, 8(9): e778.
- [10] DENG J, CHEN Z, ROBERTS K B, et al. Kilovoltage imaging doses in the radiotherapy of pediatric cancer patients[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 82(5): 1680-1688.
- [11] 刘卓伦, 张艺宝, 岳海振, 等. 医用直线加速器中心轴绝对剂量输出长期稳定性对比分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(1): 1-5.
- [12] LIU Z L, ZHANG Y B, YUE H Z, et al. Comparative analysis on long-term stability of absolute dose output at central axis of medical linear accelerators [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(1): 1-5.
- [13] STANLEY D N, PAPANIKOLAOU N, GUTIERREZ A N. An evaluation of the stability of image-quality parameters of Varian on-board imaging (OBI) and EPID imaging systems[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(2): 5088.
- [14] WENG N, GUAN H, HAMMOUD R, et al. Dose delivered from Varian's CBCT to patients receiving IMRT for prostate cancer[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(8): 2267-2276.
- [15] SONG W Y, KAMATH S, OZAWA S, et al. A dose comparison study between XVI® and OBI® CBCT systems[J]. Med Phys, 2008, 35(2): 480-486.
- [16] KAN M W, LEUNG L H, WONG W, et al. Radiation dose from cone beam computed tomography for image-guided radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 70(1): 272-279.
- [17] ZHANG Y, FENG Y, ZHANG Y, et al. Is it the time for personalized imaging protocols in cancer radiation therapy?[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 91(3): 659-660.
- [18] ZHANG Y B, YAN Y L, NATH R, et al. Personalized estimation of dose to red bone marrow and the associated leukaemia risk attributable to pelvic kilo-voltage cone beam computed tomography scans in image-guided radiotherapy[J]. Phys Med Biol, 2012, 57(14): 4599-4612.

(编辑:陈丽霞)