

快速容积旋转调强治疗系统的验收测试

高兴旺¹, Wang Yang², 梁志强³, 周凌宏⁴, 邓小武⁵

1. 中国人民解放军第四五八医院肿瘤科放疗中心, 广东 广州 510602; 2. 澳大利亚艾康肿瘤放射治疗中心, 澳大利亚 悉尼 2250;
3. 中国人民解放军第四五八医院药剂科, 广东 广州 510602; 4. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515; 5. 中山大学
肿瘤防治中心放疗科, 广东 广州 510060

【摘要】目的:检验新型快速容积旋转调强(VMAT)治疗系统的计划剂量计算和执行精度,为系统投入临床应用提供质量保证。**方法:**根据美国医学物理师协会第142号工作组报告中的要求,检测加速器机械和剂量学精度,并基于仿真人体不均质模型设置8个包括标准方野、楔形野、多叶准直器菱形野、不规则野、组合野等射野,以及斜入射、切线照射、共面和非共面照射等照射条件对测试例进行多点剂量验证。针对VMAT的特点特别设置固定方野、适形射野、静态和动态调强射野的旋转照射测试计划,对系统进行端到端的验证测试,最后采用实际VMAT治疗计划检验系统的执行精度。**结果:**加速器的机架、准直器和床旋转等中心误差 ≤ 1.5 mm,所有旋转运动的角度刻度误差 $\leq 0.5^\circ$,多叶准直器到位误差 ≤ 1.0 mm,光野射野重合度误差 ≤ 1.0 mm。8个测试例中多点剂量验证的误差为 $-2.57\% \sim 2.30\%$,各旋转照射验证测试的剂量误差为 $-1.83\% \sim 1.19\%$ 。实际VMAT治疗计划验证的 $\gamma(3.00\%, 3\text{ mm})$ 通过率优于95.00%。**结论:**所设置的验收测试能保证快速VMAT治疗系统机械和剂量学精度达到临床要求,可作为同类系统临床前质量保证的验证方法。

【关键词】放射治疗;容积旋转调强;加速器;验收测试;质量保证;质量控制

【中图分类号】R312;R815.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)06-0541-07

Acceptance test for volumetric modulated arc therapy system

GAO Xing-wang¹, WANG Yang², LIANG Zhi-qiang³, ZHOU Ling-hong⁴, DENG Xiao-wu⁵

1. Radiation Oncology Center, 458th Hospital of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou 510602, China; 2. ICON-Radiation Oncology Centre, Sydney 2250, Australia; 3. Department of Pharmacy, 458th Hospital of Chinese People's Liberation Army, Guangzhou 510602, China; 4. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 5. Department of Radiotherapy, Cancer Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060, China

Abstract: Objective To provide quality assurance for the volumetric modulated arc therapy (VMAT) system in clinical application by testing the accuracy of VMAT delivery and treatment planning system (TPS) calculation. **Methods** Based on the protocol TG-142 of American Association of Physicists in Medicine, the mechanical accuracy and beam quality of accelerator were detected. Base on the heterogeneity phantom, different fields and irradiation conditions, including standard square field, wedge field, multi-leaf collimator (MLC) diamond field, irregular field, integrated field, oblique incidence, tangential irradiation, coplanar and non coplanar irradiation, were designed to perform point dose verification for test cases. Based on the characteristics of VMAT, rotational radiotherapy plans of fixed square field, conformal field, step and dynamic intensity modulated fields were respectively designed to perform the end to end test for system. Finally, practical VMAT treatment plans were used to validate the accuracy of VMAT delivery. **Results** The rotation isocenter off-set errors of gantry, collimator and couch were within 1.5 mm, with the angle calibration error less than 0.5° . The off-set error of MLC was within 1.0 mm. The light field showed good coincidence and the coincidence error was within 1.0 mm. The point dose measured in 8 cases and rotational radiotherapy tests were compared with TPS calculated values, and the deviation errors were respectively $-2.57\% \sim 2.30\%$ and $-1.83\% \sim 1.19\%$. The gamma pass rates (3.00%, 3 mm) of practical VMAT plans were better than 95.00%. **Conclusion** The proposed acceptance test can be applied as validation method for the quality assurance of VMAT system because it can ensure the accuracy of VMAT delivery and TPS calculation, meeting the clinical criterion.

Key words: radiotherapy; volumetric modulated arc therapy; accelerator; acceptance test; quality assurance; quality control

【收稿日期】2016-04-27

【基金项目】国家自然科学基金(81571771);广东省科技计划项目(2015B020214002)

【作者简介】高兴旺(1978-),男,硕士,医学物理师,研究方向:肿瘤放射治疗物理学, Tel: 020-61283613, E-mail: gxw2002@126.com; Wang Yang (1955-),男,博士,主任物理师,研究方向:肿瘤放射治疗物理学, E-mail: Yang.wang@radiotherapy.com.au

【通信作者】邓小武(1962-),男,研究员,研究方向:肿瘤放射治疗物理学, Tel: 020-87343036, E-mail: dengxw@mail.sysu.edu.cn

前言

随着国内开展旋转调强放疗技术的单位逐渐增多,放射治疗物理师在新加速器投入临床使用前的验收测试等质控工作中也面临着更多挑战。容积旋转调强(VMAT)技术是基于适形调强放疗,在治疗实施过程中通过加速器机架的连续旋转、可变剂量率和连续可变子野,对患者进行单弧或多弧调强照射的一项放射治疗技术。在治疗时间和机器跳数方面,VMAT治疗较其他治疗方式具有更多优势和更高效率^[1-3]。但是与常规调强放疗相比,VMAT动态治疗技术为了在临床中取得成功高效的实施,需要对加速器机械运动和束流控制等机器参数采用更严格的要求,从而保证加速器质量、减小多叶准直器(MLC)叶片运动误差等因素对照射剂量准确性的影响^[4-6]。更新和丰富临床前的验收测试方法和内容,做好VMAT加速器临床前验收测试和计划验证等质量保证和质量控制工作,是保证VMAT治疗精准开展的前提^[2,5,7]。

本研究在保证加速器常规运行精度的前提下,通过优化加速器验收测试内容,针对最有可能影响VMAT治疗精度的机器参数,增设相应的检测项目。结合VMAT专用模体验证系统和有效的验证方法,对VMAT治疗计划系统(TPS)的剂量计算、加速器执行治疗计划的机械精度和输出剂量等特性进行检测,并设置多种条件的VMAT测试计划进行模拟运行验证,快速有效地完成VMAT的临床前验收测试。

1 材料与方法

1.1 加速器与治疗计划设备

验收测试的加速器(Synergy with Agility, Elekta AB)带有支持VMAT治疗的新型快速运动160叶MLC,叶片在等中心平面的投影宽度为0.5 cm。VMAT测试计划使用放射TPS(PinnacleSmartArc V9.6, Philips),在CT模拟定位机(Somatom, Siemens)输出图像上完成计划设计。

1.2 加速器机械和输出剂量特性检测

美国医学物理师协会(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)第142号工作组报告要求利用前指针、坐标纸和交叉丝灯光投影方法检查加速器机架、准直器、治疗床旋转的等中心精度,利用自显影型放射性铬胶片(EBT3, ISP)检测和分析加速器的光野-射野一致性和MLC叶片到位精度,利用三维射野剂量分析系统(Blue phantom II, IBA)检测射线能量、输出剂量平坦度和对称性等射野剂量特性参数的精度^[8]。

1.3 不同射野条件的点剂量测量验证

参照国际原子能机构(IAEA)中IAEA TRS-430和IAEA-TECDOC-1583报告的测试项目,使用仿人体胸部结构的非均质模体(Thorax Phantom 002LFC, CIRS)进行测试^[9-10]。并利用模体CT扫描图像,在TPS中设计测试计划。模体配有4种不同密度的等效组织插件(共10个),插件均可替换为带电离室的测量适配器(图1和表1)。利用CT模拟定位机的激光灯使模体中插件5的中心与CT扫描中心重合,然后将模体CT扫描图像导入TPS中,勾画出模体表面、各插件和肺组织的轮廓。设计8组不同照射条件的测试计划例,利用加速器对模体进行摆位并执行各测试例的照射,通过比较指型电离室(CC-13, IBA Dosimetry)和静电计(Unidose, PTW)在模体内的实测结果与TPS计算结果,验证输出剂量的准确性。测量时将测量点处的插件替换为带电离室的测量适配器进行测量。

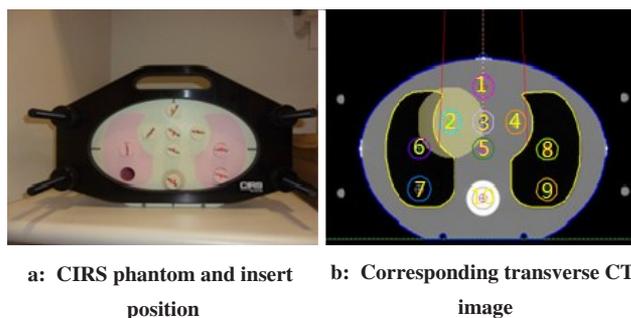


图1 CIRS模体、插件位置 and 对应CT断层图像

Fig.1 CIRS phantom, insert position and corresponding transverse CT image

表1 CIRS模体不同密度等效组织插件和对应的插孔位置
Tab.1 Inserts of different densities used in CIRS phantom and corresponding positions

| Insert position | Equivalent material | Density/(g · cm ⁻³) | Manufacturer code |
|-----------------|---------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | Plastic water | 1.039 | WDT3331 |
| 2 | Plastic water | 1.039 | WDT3331 |
| 3 | Plastic water | 1.039 | WDT3165 |
| 4 | Plastic water | 1.039 | WDT3331 |
| 5 | Plastic water | 1.039 | WDT3331 |
| 6 | Lung | 0.210 | LAA722 |
| 7 | Air | 0.000 | N/A |
| 8 | Lung | 0.210 | LAA734 |
| 9 | Lung | 0.210 | LAA734 |
| 10 | Bone | 1.600 | IBN289 |

在TPS中按各测试例的照射条件计算所有测量点的剂量,并比较各测量点的实际测量剂量与计算结果,从而确定照射剂量的精度。8个测试例均选取6 MV光子线,照射条件和测量方法如下:

(1)标准方野照射:设定标准射野为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,机架和准直器角度均为 0° 。源皮距为 100 cm ,模体中3号插件中心点即测量点3为处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy 。将此照射方案传至加速器进行照射,分别测出测量点1、3、5、9和10的实际剂量,并验证各点剂量实测结果与TPS计算结果的偏差。

(2)楔形野切线照射:机架和准直器角度均为 90° ,设定楔形射野为 $15\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,楔形角取 60° 。以测量点1为处方剂量点,并置于等中心处,处方剂量为 2.0 Gy 。在加速器中验证测量点1的实测剂量与TPS计算结果的偏差。

(3)MLC菱形野照射:对MLC叶片生成的菱形射野剂量精度进行测试。设定源皮距为 100 cm ,机架角度为 0° ,准直器角度为 45° ,铅门开至 $14\text{ cm}\times 14\text{ cm}$,并设置MLC生成 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的菱形照射野(图2)。以测量点3为处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy 。将此照射方案传至加速器进行照射,验证测量点3的实测剂量与TPS计算结果的偏差。

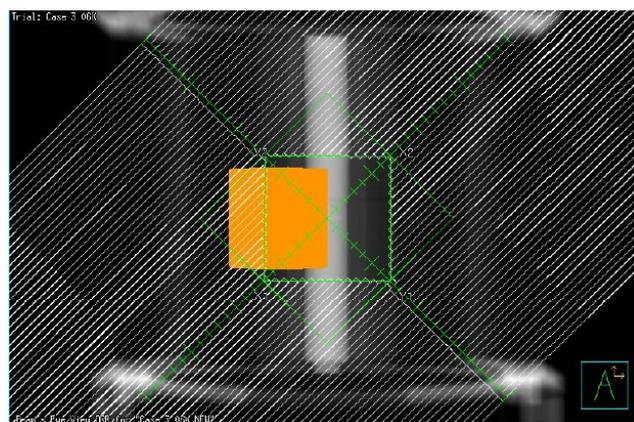


图2 射野方向观多叶准直器菱形射野设置

Fig.2 Beam-eye-view for multi-leaf collimator (MLC) diamond field setup

(4)等权重四野盒式照射:设准直器角度为 0° ,权重比例相等,机架角度分别为 0° 和 180° 、 270° 和 90° ,两组对穿照射的射野分别为F1和F2、F3和F4,两组射野尺寸分别为 $15\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 和 $15\text{ cm}\times 8\text{ cm}$ 。将CIRS模体中5号插件中心设为等中心点和处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy ,验证测量点5和点6的各单野和四野合成的剂量偏差。

(5)自动生成适形射野,经不均匀密度组织照

射:在模体中2号插件中心勾画一个包含部分肺组织的圆柱形虚拟靶区,直径为 8 cm ,长度为 10 cm 。设定靶区边界为 1 cm ,检验TPS是否能按给定边界条件自动生成该靶区的适形射野。设定模体中2号插件中心为照射等中心,处方剂量为 2.0 Gy ,机架和准直器角度均为 0° ,测量点2的实际剂量,从而检验TPS系统对组织不均匀校正的准确性。

(6)L形不规则野斜入射照射:设置 $20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的矩形射野,然后在该矩形射野内利用其中一个直角和相邻两条边,编辑形成 $12\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 的矩形遮挡,即将 $20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 矩形射野编辑形成L形不规则MLC射野。设机架角度为 45° ,准直器角度为 90° 。模体中5号插件中心为等中心点,3号插件中心点为处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy ,验证测量点3和点10的实测剂量。

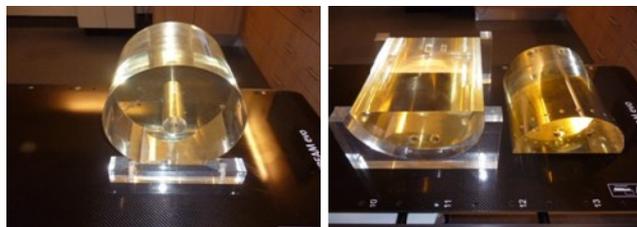
(7)等权重合成射野照射:设置权重比例相等的3个照射野,其中射野F1为对称矩形野,机架角度为 0° ,准直器角度为 0° ,射野尺寸为 $12\text{ cm}\times 10\text{ cm}$;射野F2和F3为对穿照射的 60° 楔形半束射野,机架角度分别为 90° 和 270° ,准直器角度分别为 90° 和 270° ,射野大小均为 $6\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。模体中3号插件中心为等中心照射点,测量点5为处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy ,验证测量点5的处方剂量偏差。

(8)等权重非共面野照射:设置等权重的3个照射野,其中射野F1和F2为共面矩形野,射野尺寸均为 $16\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 。F1机架角度为 90° ,准直器角度为 330° ;F2机架角度为 270° ,准直器角度为 30° ,治疗床旋转角度为 0° ;射野F3为非共面方野,尺寸为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$,机架角度为 30° ,准直器角度为 0° ,旋转治疗床置于 270° 位置。设置模体中5号插件中心为照射等中心,测量点5为处方剂量点,处方剂量为 2.0 Gy ,验证测量点5的实际照射剂量。

1.4 动态旋转照射的剂量测量验证

为了检验系统VMAT治疗的能力与精度,特别设置3组不同条件的动态旋转照射测试计划,并使用自制的专用圆柱形旋转照射模体(图3),测量和验证对该模体执行测试计划的实际剂量。旋转照射模体由聚甲基丙烯酸甲酯制成,为两个对称半圆形组成的圆柱型,直径为 24 cm ,长度为 30 cm ,相对电子密度为 1.14 ,中心留有电离室测量插孔,可将剂量胶片置于两个半圆之间,测量照射剂量分布。二维平面的剂量分布验证采用 γ 比对分析软件(ROMDOMS, Meng-Rad Pty Ltd, Australia),分析实际剂量分布的 γ (3.00% , 3 mm)通过率。

将上述旋转照射模体的CT扫描图像导入TPS,



a: RODOMS cylindrical phantom for ion chamber measurement
b: RODOMS cylindrical phantom for film measurement

图3 RODOMS圆柱形旋转调强验证模体(供电离室和胶片测量使用)
Fig.3 RODOMS cylindrical phantom for ion chamber and film measurement

设置模体中心为照射等中心点。以等中心点为靶区中心分别勾画3个直径分别为1.5、3.0和5.0 cm,长度均为10.0 cm的圆柱形计划靶区 PTV_{1.5}、PTV_{3.0}和 PTV_{5.0}。选取6 MV光子线,针对这3个靶区在TPS分别设计弧形旋转(Arc)、适形旋转(Conformal Arc)、静态调强(Step & Shoot IMRT)和动态旋转调强(Dynamic Arc,即VMAT)这4种类型的测试计划(共12个),射野参数设置详见表2。

验证测量包括绝对剂量和相对剂量验证,绝对剂量验证采用点剂量测量方法,使用CC-13电离室和

表2 动态旋转照射测试例的射野参数和照射条件设置
Tab.2 Beam setup details for rotational radiotherapy

| Type | PTV | Number of field | Gantry angle/° | Field size/cm | Prescribed dose |
|---------------|--------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|---|
| Dynamic Arc | PTV _{1.5} | 1 | 190-170 | Sliding | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{1.5} |
| Dynamic Arc | PTV _{3.0} | 1 | 190-170 | Sliding | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{3.0} |
| Dynamic Arc | PTV _{5.0} | 1 | 190-170 | Sliding | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{5.0} |
| Arc | PTV _{1.5} | 1 | 190-170 | 2.0×10.0 | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| Arc | PTV _{3.0} | 1 | 190-170 | 3.0×10.0 | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| Arc | PTV _{5.0} | 1 | 190-170 | 5.0×10.0 | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| Conformal Arc | PTV _{1.5} | 1 | 190-170 | Conform to PTV _{1.5} | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| Conformal Arc | PTV _{3.0} | 1 | 190-170 | Conform to PTV _{3.0} | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| Conformal Arc | PTV _{5.0} | 1 | 190-170 | Conform to PTV _{5.0} | 2.0 Gy point dose to isocentre |
| SS IMRT | PTV _{1.5} | 3 | 0, 120 and 240 | N/A | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{1.5} |
| SS IMRT | PTV _{3.0} | 3 | 0, 120 and 240 | N/A | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{3.0} |
| SS IMRT | PTV _{5.0} | 3 | 0, 120 and 240 | N/A | 2.0 Gy uniform dose to PTV _{5.0} |

SS IMRT: Step and shoot intensity modulated radiotherapy; PTV: Planning target volume

上述旋转照射模体对各测试计划的等中心点剂量进行测量;相对剂量验证采用胶片测量方法,利用放射性铬胶片测量模体内等中心处冠状面的二维剂量分布的γ通过率。

1.5 患者VMAT计划验证

选取两例患者的实际VMAT治疗计划,并移植到上述旋转照射模体上验证计划的执行精度,从而对以上临床前测试工作的有效性进行检验。两个检验例均为前列腺癌的6 MV光子线单弧VMAT治疗计划。

2 结果

2.1 加速器机械和输出剂量特性

机架、准直器、治疗床的机械旋转等中心精度均

优于1.5 mm,旋转角度的刻度误差均小于0.5°,静态开野的离轴剂量平坦度和对称性均符合3.00%以内的验收标准。在不同源片距下,光野-射野一致性误差值小于1.0 mm。使用胶片检验的MLC叶片到位精度,所有叶片的到位误差均小于1.0 mm。

2.2 不同射野条件的点剂量验证结果

各测试例所有测量点的实测剂量与计划计算值的误差均小于验收要求的通过标准,各测量点的剂量偏差为-2.57%~2.30%。单野照射测试例(测试例1~3和5~6)的剂量偏差为-2.57%~2.30%,多野照射测试例(测试例4和测试例7~8)的合成剂量偏差为-0.79%~0.03%,多野照射的合成剂量精度优于单野照射。详细测量结果见表3和表4。

表3 单射野照射测试例不同照射条件的点剂量测量结果(测试例1~3,5~6)

Tab.3 Point dose with single field irradiation for case 1-3, 5-6

| Case | Measurement point | MU | Calculated dose/Gy | Measured dose/Gy | Deviation/% | Criterion/% |
|------|-------------------|-------|--------------------|------------------|-------------|-------------|
| 1 | 1 | 206.2 | 2.410 | 2.424 | -0.69 | 2 |
| | 3 | 206.2 | 2.000 | 2.010 | -0.51 | 2 |
| | 5 | 206.2 | 1.730 | 1.728 | 0.10 | 2 |
| | 9 | 206.2 | 0.190 | 0.176 | 0.71 | 4 |
| | 10 | 206.2 | 1.250 | 1.284 | -1.69 | 3 |
| 2 | 1 | 779.2 | 2.000 | 2.026 | -1.26 | 3 |
| 3 | 3 | 203.3 | 2.000 | 1.955 | 2.30 | 3 |
| 5 | 2 | 181.5 | 2.000 | 2.027 | -1.32 | 2 |
| 6 | 3 | 189.9 | 2.000 | 1.994 | 0.31 | 3 |
| | 10 | 189.9 | 0.070 | 0.121 | -2.57 | 5 |

MU: Monitor unit

表4 多射野照射测试例的剂量偏差测量结果(测试例4, 测试例7~8)

Tab.4 Point dose with multi-field irradiation for case 4 and case 7-8

| Case | Measurement point | Field No. | Gantry/ $^{\circ}$ | Collimator/ $^{\circ}$ | Field size/cm | MU | Calculated dose/Gy | Mean dose /Gy | Deviation/% | Criterion/% |
|------|-------------------|------------------------|--------------------|------------------------|---------------|-------|--------------------|---------------|-------------|-------------|
| 4 | 5 | F1 | 0 | 0 | 15×10 | 48.8 | 0.500 | 0.503 | -0.69 | 2 |
| | | F2 | 180 | 0 | 15×10 | 53.6 | 0.500 | 0.502 | -0.42 | 3 |
| | | F3 | 270 | 0 | 15×8 | 49.3 | 0.500 | 0.491 | 1.77 | 3 |
| | | F4 | 90 | 0 | 15×8 | 49.5 | 0.500 | 0.504 | -0.75 | 3 |
| | | Four-field integrated | | | | | | 2.000 | 2.001 | -0.03 |
| 6 | 6 | F1 | 0 | 0 | 15×10 | 48.8 | 0.030 | 0.037 | -1.32 | 4 |
| | | F2 | 180 | 0 | 15×10 | 53.6 | 0.040 | 0.047 | -1.46 | 3 |
| | | F3 | 270 | 0 | 15×8 | 49.3 | 0.660 | 0.663 | -0.63 | 3 |
| | | F4 | 90 | 0 | 15×8 | 49.5 | 0.340 | 0.339 | 0.25 | 4 |
| | | Four-field integrated | | | | | | 1.070 | 1.086 | -0.79 |
| 7 | 5 | F1 | 0 | 0 | 12×10 | 70.1 | 0.667 | 0.669 | -0.28 | 2 |
| | | F2 | 90 | 90 | 6×10 | 123.3 | 0.667 | 0.674 | -0.97 | 4 |
| | | F3 | 270 | 270 | 6×10 | 123.0 | 0.667 | 0.672 | -0.81 | 4 |
| | | Three-field integrated | | | | | | 2.001 | 2.015 | -0.69 |
| 8 | 5 | F1 | 90 | 330 | 16×4 | 70.6 | 0.667 | 0.679 | -1.76 | 2 |
| | | F2 | 270 | 30 | 16×4 | 70.3 | 0.667 | 0.666 | 0.08 | 4 |
| | | F3 | 30 | 0 | 4×4 | 81.1 | 0.667 | 0.670 | -0.48 | 4 |
| | | Three-field integrated | | | | | | 2.001 | 2.016 | -0.73 |

* F3 was a non-coplanar beam with couch at 270° in case 8.

2.3 动态旋转照射的剂量偏差

旋转照射测试例的绝对剂量偏差均不大于2.00% (-1.83%~1.19%), 相对剂量验证的 γ 通过率均

在95.00%以上, 符合验收标准要求。表5为12个测试例的点剂量测量结果。

2.4 患者VMAT治疗计划检验

两位前列腺癌患者的6 MV光子线单弧VMAT治疗计划的检验结果显示靶区中心点的绝对剂量偏

差均小于3.00%, γ 通过率均大于95.00%,达到临床通过标准(表6)。

表5 动态旋转照射点剂量测量结果

Tab.5 Point dose measurement of dynamic rotational radiotherapy

| Type | Diameter PTV/cm | Calculated dose/cGy | Measured dose/cGy | Deviation/cGy |
|---------------|-----------------|---------------------|-------------------|---------------|
| Dynamic Arc | 1.5 | 202.8 | 202.7 | 0.03 |
| Dynamic Arc | 3.0 | 200.3 | 199.2 | 0.56 |
| Dynamic Arc | 5.0 | 201.6 | 199.2 | 1.19 |
| Arc | 1.5 | 200.0 | 202.2 | -1.08 |
| Arc | 3.0 | 200.0 | 200.4 | -0.20 |
| Arc | 5.0 | 200.0 | 199.8 | 0.11 |
| Conformal Arc | 1.5 | 200.0 | 203.7 | -1.83 |
| Conformal Arc | 3.0 | 200.0 | 199.8 | 0.08 |
| Conformal Arc | 5.0 | 200.0 | 198.6 | 0.72 |
| SS IMRT | 1.5 | 204.4 | 204.5 | -0.03 |
| SS IMRT | 3.0 | 215.9 | 215.5 | 0.18 |
| SS IMRT | 5.0 | 254.5 | 254.4 | 0.06 |

表6 实际VMAT治疗计划体模检验测量的剂量偏差结果

Tab.6 Dose deviation of practical VMAT treatment plan in phantom test measurement

| Plan | Energy/MV | Measured absolute dose/cGy | Planned absolute dose/cGy | Deviation/% | Gamma pass rate/% |
|--------|-----------|----------------------------|---------------------------|-------------|-------------------|
| Plan 1 | 6 | 222.82 | 226.04 | -1.4 | 98 |
| Plan 2 | 6 | 225.88 | 230.92 | -2.2 | 97 |

VMAT: Volumetric modulated arc therapy

3 结论

放射治疗系统的临床前测试是在设备通过验收后到设备投入临床使用前这一阶段内对系统进行的一系列临床认可测试,目的是获取系统运动精度数据,了解系统执行精准放疗技术时的剂量偏差水平,为建立相关临床应用和质量控制规程提供依据。测试的主要内容包含治疗加速器机械系统的几何精度及各种条件下的剂量输出特性参数的检验,TPS剂量学数据采集和建模精度的验证,以及各种复杂治疗计划从计算到照射实施的端到端测试。这些测试既能反映系统在简单照射条件下的运行稳定性,也能反映各种复合条件下的实际照射精度。需要针对系统的机械和剂量输出特性的特点设计专门的测试内容,因为影响精确放疗系统精度的特性参数可能多达数千项,但很多项目之间是相互关联和制约,测试所有参数既不可能也不必要。科学合理地对检测内容可以最大限度地避免重复操作,同时也能保证

系统的运行精度满足临床要求。

随着调强放射治疗、VMAT治疗和立体定向放射治疗等精确放疗技术在临床上的应用日益广泛,放射治疗的直线加速器也增加了各种辅助设施,如MLC和在线影像装置等,结构的复杂性大大增加。精确放疗尤其是动态的快速VMAT治疗等技术要求对系统的剂量计算、机械运动、输出剂量等特性进行严格精准的控制,以确保精确放疗计划的实施精度能够达到临床要求。AAPM为此专门修订了精确放射治疗加速器的质量保证规范,并发布新的TG-142号工作组报告。但是对于快速VMAT的新型治疗系统的全面验收与临床前测试要求,目前各国均未有统一的规范要求,各使用单位报道的测试方式大多依据TG-142号报告对治疗加速器进行检测,对TPS的剂量学模型在均质模体中进行检验后就直接应用于临床治疗^[11]。

Aljarrah等^[12]报导在采用非均质模体对肺部调强放射治疗计划进行验证研究中,11例计划验证的结

果中有9例未能达到剂量偏差小于5.00%的临床要求,使用均匀的固体水体模进行调强放射治疗验证可能并不足够。Pasler等^[13]发现在进行VMAT治疗时,设置不同的治疗机架旋转速度会影响计划的剂量分布质量,而且动态旋转照射的VMAT执行剂量验证结果差于固定野照射的调强放射治疗,这说明动态的旋转照射可能会在某种程度上降低计划执行的精度,有必要在临床前测试中获取动态旋转照射的剂量学数据。本研究参照AAPM TG-142和TG-119报告的相关检测项目和要求,针对VMAT治疗的动态MLC运动及旋转照射特点,采取更严格的不均匀仿真人体模型,针对系统加速器的机械控制和剂量输出特性,设计从简单到复杂的测试例,进行较为全面的测试。同时特别增加12个不同照射条件的旋转照射测试例进行端到端的验证,并采用实际VMAT治疗的患者计划,对系统的临床前测试结果进行最终的检验^[14]。测试结果表明所测试的新型VMAT治疗系统的机械和剂量学均具有良好的运行精度,最终的实际治疗计划验证检验显示采取 $\gamma(3.00\%, 3\text{ mm})$ 标准的VMAT计划的剂量分布通过率达95%以上,这说明临床前测试可以保证这两个检验例的VMAT治疗剂量精确性满足临床治疗要求。

患者VMAT治疗剂量的验证方法多采用探测器阵列在模体内测量的方式进行^[15-17],也有报道通过加速器的运行日志文件进行剂量重建验证^[18]。但是由于系统的临床前测试不足等原因,仍然有相当一部分患者的治疗计划剂量验证结果未能通过临床治疗标准。全面的临床前测试的结果往往能帮助物理师确认导致计划不能通过的偏差来源,如动态射野或旋转照射的精度不足,或不均匀组织校正计算的不足等。

尽管本研究的VMAT系统临床前测试取得较好的验证精度,并通过了两例实际治疗计划的检验。但是这些测试是否已经足够,是否可以保证复杂的VMAT治疗计划的执行精度或者发现影响治疗剂量精度的误差,还需要积累更多病例的验证结果。其他放疗单位亦可根据自身的系统设备条件和检测工具,设计适合临床前测试程序和方法,获取系统全面的运行精度数据,提高VMAT治疗的质量保证水平。

【参考文献】

- [1] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. *Med Phys*, 2008, 35(1): 310-317.
- [2] BEDFORD J L, WARRINGTON A P. Commissioning of volumetric modulated arc therapy (VMAT)[J]. *Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 73(2): 537-545.
- [3] YU C X. Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy[J]. *Phys Med Biol*, 1995, 40(9): 1435-1449.
- [4] GOLBY C, ATHERTON S, ROWBOTTOM C, et al. Commissioning of item part values (IPVs) in order to improve the efficiency of VMAT delivery on an Elekta synergy linac[J]. *Med Phys*, 2009, 36(6): 2553.
- [5] 罗广文, 张焜毅. Elekta加速器VMAT治疗工作特性研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2012, 36(1): 22-24.
LUO G W, ZHANG K Y. Investigation of Elekta linac characteristics for VMAT[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2012, 36(1): 22-24.
- [6] 王清鑫, 戴建荣, 张可, 等. 容积调强旋转放疗的计划验证通过率对多叶准直器位置误差的灵敏度[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2013, 33(4): 388-391.
WANG Q X, DAI J R, ZHANG K, et al. The sensitivity of patient-specific VMAT QA to MLC positioning errors[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2013, 33(4): 388-391.
- [7] 邓小武, 黄劲敏, 钟宁山, 等. 调强放射治疗的物理剂量验证[J]. *癌症(英文版)*, 2001, 20(10): 1092-1094.
DENG X W, HUANG S M, ZHONG N S, et al. Doseimetry verification and quality assurance test of IMRT [J]. *Chinese Journal of Cancer*, 2001, 20(10): 1092-1094.
- [8] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators [J]. *Med Phys*, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [9] International Atomic Energy Agency. Commissioning and quality assurance of computerized planning system for radiation treatment of cancer[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004.
- [10] International Atomic Energy Agency. Commissioning of radiotherapy treatment planning systems: testing for typical external beam treatment techniques[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011.
- [11] 陈利, 陈立新, 黄劲敏, 等. 放射治疗计划系统剂量跳数计算的独立验证[J]. *癌症(英文版)*, 2010, 29(2): 234-239.
CHEN L, CHEN L X, HUANG S M, et al. Independent verification of monitor unit calculation for radiation treatment planning system[J]. *Chinese Journal of Cancer*, 2010, 29(2): 234-239.
- [12] ALJARRAH K, PAWLICKI K, TYAGI N, et al. Evaluation of IMRT QA point measurement processes using a commercial heterogeneous phantom[J]. *J Cancer Sci Ther*, 2010, 2(3): 63-69.
- [13] PASLER M, WIRTZ H, LUTTERBACH J. Impact of gantry rotation time on plan quality and dosimetric verification-volumetric modulated arc therapy (VMAT) vs.intensity modulated radiotherapy (IMRT)[J]. *Strahlenther Onkol*, 2011, 187(12): 812-819.
- [14] EZZELL G A, BURMEISTER J W, DOGAN N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM ask group 119[J]. *Med Phys*, 2009, 36(11): 5359-5373.
- [15] 李兵兵, 刘苓苓, 费振乐. Octavius 4D验证系统用于VMAT剂量验证的研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(3): 323-326.
LI B B, LIU L L, FEI Z L. Application of octavius 4D system in volumetric modulated arc therapy dose verification [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2015, 24(3): 323-326.
- [16] 陆军, 胡彩容, 蔡勇君, 等. 三维剂量验证系统在容积旋转调强中的应用[J]. *中华放射医学与防护杂志* 2013, 33(1): 58-61.
LU J, HU C R, CAI Y J, et al. Application of 3D dose verification system in VMAT [J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2013, 33(1): 58-61.
- [17] 石锦平, 陈立新, 谢秋英, 等. 容积调强弧形治疗冠矢状面剂量验证的初步探讨[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2012, 21(4): 377-380.
SHI J P, CHEN L X, XIE Q Y, et al. The elementary discussion of volumetric modulated arc therapy using the orthogonal plane dose verification [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2012, 21(4): 377-380.
- [18] 马阳光, 张可, 戴建荣, 等. 利用加速器日志文件验证容积旋转调强放疗计划的可行性[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2012, 32(3): 285-288.
MA Y G, ZHANG K, DAI J R, et al. Verification of volumetric-modulated arc therapy plan by log-file analysis of linear accelerator [J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2012, 32(3): 285-288.

(编辑:谭斯允)