·综述·

医用直线加速器产品的准直器技术综述

郭召[1,2]

（1.西安大医集团股份有限公司研发中心，西安 710018；2.西安交通大学机械工程学院，西安 710049）

【摘要】 高精度准直器是医用直线加速器实施精准放射治疗的核心部件，其性能直接影响治疗精准度。随着治疗精准度要求的不断提升，高性能直线加速器产品的准直器设计也在不断迭代创新，新型准直器的开发成为放疗设备创新的关键环节。本文对市面上广泛应用的几类医用直线加速器的准直器进行介绍，对比分析了不同准直器的性能及结构特点，总结了准直器设计制造的关键技术点，对医用直线加速器产品的准直器发展进行了展望，旨在为国产医用直线加速器的研发提供一定参考。

【关键词】 多叶光栅；锥形孔准直器；射野成形；放射治疗

【中图分类号】 TH77 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202505015

Overview of collimator technology for medical linear accelerator products

Guo Zhao[1,2]

(*1.Research and Development Center*, *OUR United Corporation*, *Xi'an 710018*, *China*;
2. School of Mechanical Engineering, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an 710049*, *China*)

【Abstract】 The high-precision collimator is the core component of a medical linear accelerator (linac) for delivering precise radiotherapy, and its performance directly impacts treatment precision. As the requirements for treatment precision continue to increase, the collimator design in high-performance linac products has been continuously iterated and innovated. The development of novel collimators has become a key link in radiotherapy product innovation. This article introduces several types of collimators widely used in medical linacs on the market, analyzes and compares the performance and structural characteristics of different collimators, summarizes the key technical points in collimator design and manufacturing, and provides an outlook on the development of collimators for medical linac products. This holds significant reference value for the research and development of domestically produced medical linear accelerators.

【Key words】 Multi-leaf collimator (MLC); Cone beam collimator; Beam shaping; Radiotherapy

医用直线加速器是治疗癌症的主要装备之一，准直器作为医用直线加速器核心部件，通常包含初级准直器与次级准直器，其中次级准直器直接参与照射野形状精准调控，对治疗精度产生关键影响，是实现精准放疗的核心执行单元。早期的医用直线加速器只配置光阑，仅能形成方野，因此只能开展普放治疗。为了提升适形精度，医务工作者采用低熔点铅依据患者照射野形状制成适形挡块作为辅助准直器。随后为了提升工作效率，市场上推出了手动多叶光栅，可以根据患者照射野形状快速手动调整叶片位置形成所需照射野形状。到20世纪90年代，数控技术及精密制造技术的快速发展推动了多叶光栅的电动化。电动多叶光栅（dynamic multi-leaf collimator, D-MLC）的出现推动了精准放射治疗

基金项目：陕西省重点研发计划（2025SF-YBXM-473）；西安英才计划菁英创新人才（XAYC250054）

第一作者：郭召，男，博士研究生，高级工程师，研究方向：大型精密复杂机电系统设计及大型放疗设备开发

时代的到来，并逐渐演变出多种不同规格形式的多叶光栅，在临床中发挥着重要作用，尤其是调强放射治疗（intensity modulated radiation therapy, IMRT）和容积旋转调强放射治疗（volumetric modulated arc therapy, VMAT）[1]。与此同时，为满足立体定向放射外科（stereotactic radiosurgery, SRS）、立体定向放射治疗（stereotactic radiotherapy, SRT）、体部立体定向放射治疗（stereotactic body radiation therapy, SBRT）、立体定向消融体部放射治疗（stereotactic ablative body radiation therapy, SABR）等治疗技术对小半影和高精度的需求，锥形孔准直器技术也获得了快速发展，成为准直器技术的另一个重要分支。锥形孔准直器通过锥孔全聚焦设计，实现小野剂量精确投照，有效降低半影，在立体定向放射治疗中发挥着重要作用，配置多叶光栅的医用直线加速器也选择配置锥形孔准直器作为附件用于开展立体定向放射治疗[2]。同时，多叶准直器技术也在向着更高照射野精度、更小投影宽度（分辨率）、更小半影、更优适形度、更高可靠性及更强剂量调制能力的方向发展。总之，准直器的技术进步推动着放射治疗精准度的不断提升。现有的研究多针对某一款准直器的性能进行测试研究，缺少对医用直线加速器准直器的系统论述，本文对医用直线加速器的准直器技术进行介绍，分析不同准直器的性能及结构特点，总结准直器设计制造的关键技术点，以期为相关研究人员提供参考。

1 多叶光栅准直器

1.1 微型多叶光栅

早期的直线加速器准直器比较简单，只有一对光阑，没有多叶光栅。为了在老一代直线加速器产品上开展精准放疗，市场上推出了外挂式微型多叶光栅，可以作为附件安装在加速器机头上对光阑形成的方野进一步适形以获得更加精确的照射野，图1展示了几种外挂式微型多叶光栅的外观和结构。国外常见的外挂式微型多叶光栅是BrainLam M^{3}微型多叶光栅，最大照射野100 mm × 100 mm，叶片在等中心处的投影宽度为2 mm[3-4]。国内主要的外挂式多叶光栅是苏州雷泰医疗科技有限公司生产的TiGRT系列，最大照射野100 mm × 100 mm，叶片在等中心处的投影宽度为2 mm[5]。微型多叶光栅的分辨率更高，可以进一步提高照射野精度，为追求更高的SRS治疗精度，部分已配备内置多叶光栅的直线加速器也会选配外挂式微型多叶光栅作为补充。

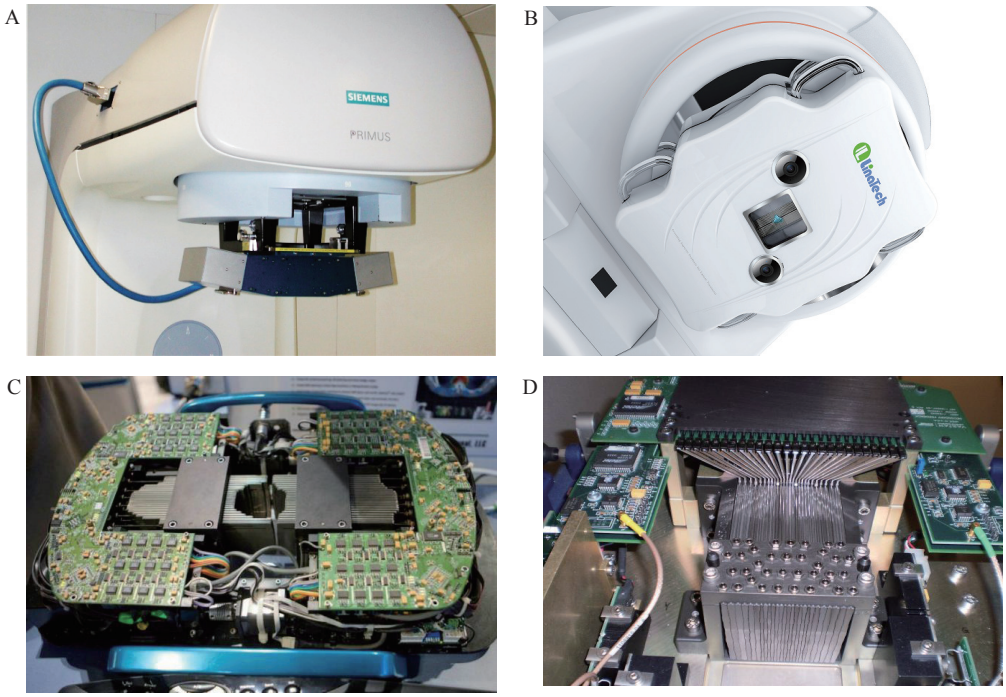


图1 几种外挂式微型多叶光栅准直器 A为BrainLam M^{3}微型多叶光栅；B为雷泰医疗的外挂式多叶光栅；C、D为外挂式微型多叶光栅的内部结构

在立体定向放射治疗中，与常规光栅相比，微型多叶光栅在分辨率上更有优势，同时相对锥形孔准直器，效率更高。如图2所示，M6型射波刀（CyberKnife）扩展增加了微型多叶光栅InCise，包含41对叶片，最大照射野115 mm×100 mm，叶片在等中心处的投影宽度为3.85 mm［源轴距（source–axis distance, SAD）=800 mm］，叶片高度90 mm，叶间最大漏辐射<0.5%，平均漏辐射<0.3%[6–8]。

配置微型多叶光栅后，射波刀治疗大体积肿瘤的效率得到提升，因此配置微型多叶光栅也成为专用立体定向放疗设备扩展其功能的一种趋势。随着临床对治疗精度要求的提升，加之电动多叶光栅技术的成熟，新一代的直线加速器都配置了内置的电动多叶光栅系统，可开展精准放疗，适形度、分辨率大幅提升，因此对外挂式微型多叶光栅的需求逐步降低。

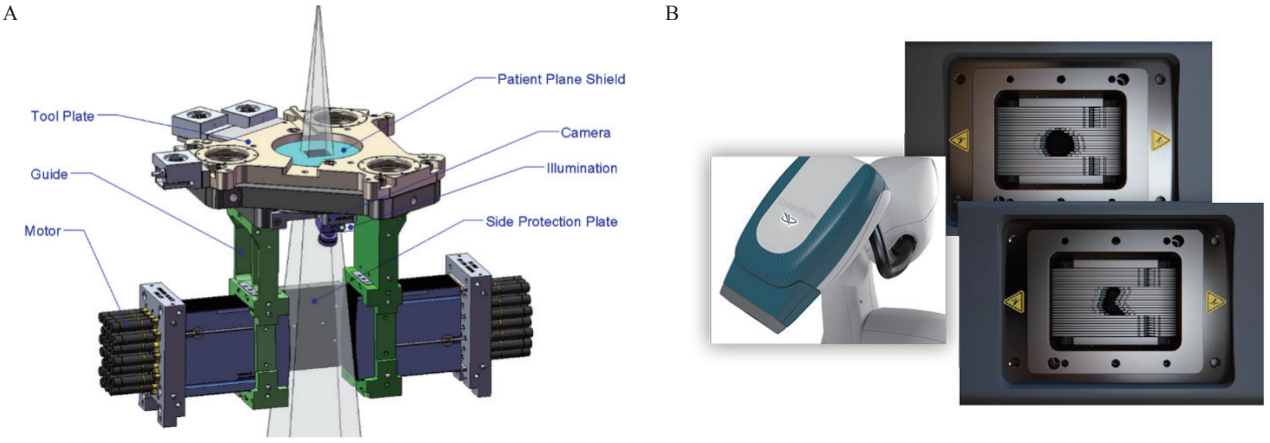


图2 射波刀的微型多叶光栅InCise™ A为射波刀微型多叶光栅的结构；B为射波刀微型多叶光栅成野示意

1.2 单层多叶光栅

随着临床应用中对治疗精度要求的提升，各厂商将多叶光栅内置化，将光阑和电动多叶光栅整合形成新的准直系统，使直线加速器的性能及精度得到大幅提升。新的准直系统包含了光阑和多叶光栅。光阑通常分为两组，一组和叶片运动方向相同，用于遮挡叶片间的漏辐射；一组和叶片运动方向垂直，用于遮挡叶片端部闭合缝隙处的漏辐射，光阑和多叶光栅配合，形成复杂照射野，降低了照射野外漏辐射。目前市面上直线加速器产品普遍采用光阑和单层多叶光栅组合的准直器形式，典型的单层多叶光栅有医科达（Elekta）的MLCi2[9–10]和Agility160[11–12]，瓦里安（Varian）的Millennium120[13–14]和HD120[15–16]。MLCi2由40对叶片组成，每片投影宽度10 mm；Agility160由80对叶片组成，每片投影宽度5 mm，其结构如图3所示。Millennium120由60对叶片组成，中间40对每片投影宽度5 mm，两侧各10对，每片投影宽度10 mm。HD120由60对叶片组成，中间40对每片投影宽度2.5 mm，两侧各10对，每片投影宽度5 mm，其结构如图4所示。国内厂家近几年推出的新型直线加速器产品均采用了与上述接近的架构设计，例如，西安大医和上海联影的电动多叶光栅均采用了60对叶片的光栅结构，中间40对每片投影宽度5 mm，两侧各10对，每片投影宽度10 mm。综上，单层多叶光栅发展较早，叶片投影宽度不断精细化，目前多数集中在5 mm，架构基本定型。

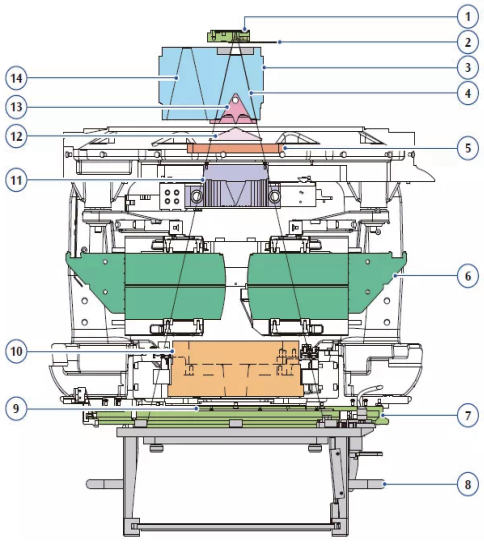


图3 医科达Agility160多叶光栅准直器结构

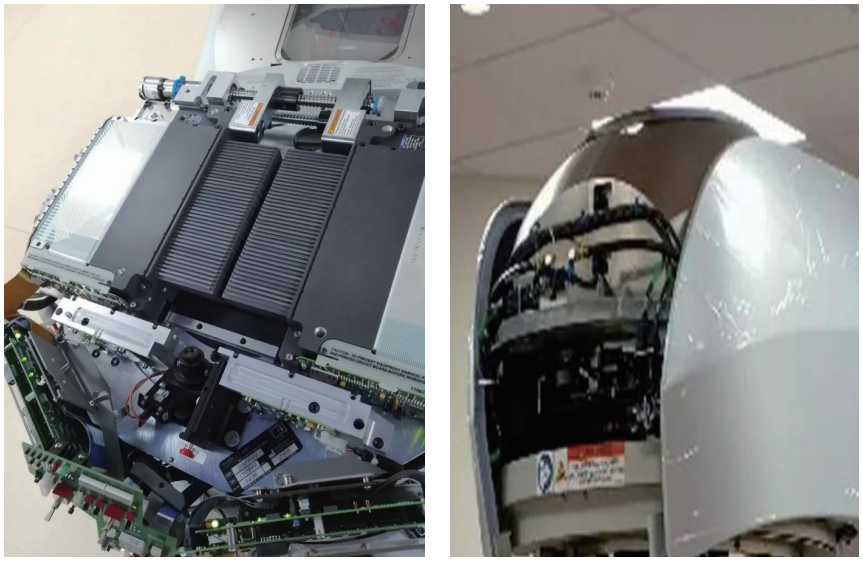


图 4 瓦里安 HD120 多叶光栅准直器结构

1.3 双层多叶光栅

1.3.1 单聚焦双层多叶光栅

图 5 展示了单聚焦双层多叶光栅的架构，目前市面上主流的单聚焦双层多叶光栅是瓦里安医疗系统公司配置在 Halcyon/Ethos 产品上的光栅系统[17-18]，叶片采用平行交错排列设计，上层（近端层）多叶光栅由 29 对叶片组成，下层（远端层）多叶光栅由 28 对叶片组成，每个叶片的投影宽度 10 mm，上下两层叶片交错排列，使其在等中心处的有效投影宽度达到 5 mm，等中心处最大照射野 28 cm × 28 cm，叶片的运行速度 50 mm/s，加速度达到 200 mm/s^2，这种设计的主要优势是叶片的透射和漏辐射更低，叶片的调制速度更快。单聚焦双层多叶光栅从架构上对直线加速器传统准直系统进行了简化，大幅减少了零件种类及数量，使整体结构更简洁，成本更低，更易维护，有利于整机可靠性的提升，这也为多叶光栅准直器的发展及临床应用提供了新的思路。国产的直线加速器如新华 XHARX6 和东软 NeuRT Aurora 均采用了类似架构，等中心处最大照射野 30 cm × 30 cm。

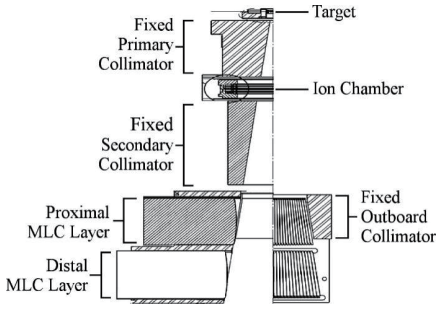


图 5 单聚焦双层多叶光栅架构

1.3.2 双聚焦双层多叶光栅

ViewRay 公司的 MRIdian 放射治疗系统是一款 0.35T 核磁成像引导的直线加速器系统，配置了双聚焦双层多叶光栅[19-21]，单层叶片在等中心处投影宽度 8.3 mm，双层多叶光栅交错叠加的分辨率为 4.15 mm，叶片在等中心处的投影平均速度为 20 mm/s。图 6 是 ViewRay 的双聚焦双层多叶光栅示意图，叶片为圆弧形，叶片做圆弧运动成野，结构相对复杂，成本较高，但可以获得更低的半影，提升照射野精度，目前主要应用在 ViewRay 产品平台上。单聚焦和双聚焦的双层多叶光栅都采用了上下交错的布置方式，极大地减少了叶片间的漏辐射，降低了单层叶片之间的漏辐射要求。单聚焦的双层多叶光栅结构更简单，可以获得更快的速度和更优的调制能力，在直线加速器产品的应用上，相比双聚焦结构更有优势。



图 6 核磁加速器的双层多叶光栅

1.3.3 双层正交多叶光栅

双层多叶光栅的另一种布置形式是正交排布，即上下层叶片运动方向垂直。较早实现工程化应用的双层正交多叶光栅是 Acculeaf[22-23]，其最大照射

野为100 mm × 110 mm，作为微型光栅配套在直线加速器中应用。图7是Acculeaf多叶光栅成野示意图，如图所示，两层叶片正交运动，两个方向都可以提高靶区的适形度，双层叠加遮挡了叶片间的漏辐射。国内外专利文献中也有对双层正交多叶光栅的构思保护，但研发出工程样机并投入临床应用的较少。苏州雷泰医疗科技有限公司实现了该技术的工程化应用，开发了具有自主知识产权的双层正交多叶光栅系统[24-25]，图8展示了该双层正交多叶光栅的结构，每层51对叶片，共204个叶片，最大照射野40 cm × 40 cm，上层光栅最小投影宽度6 mm，最高速度60 mm/s，下层光栅最小投影宽度4 mm，最高速度50 mm/s。这种正交布置形式在凹多边形或岛状靶区的适形精度上有一定优势。

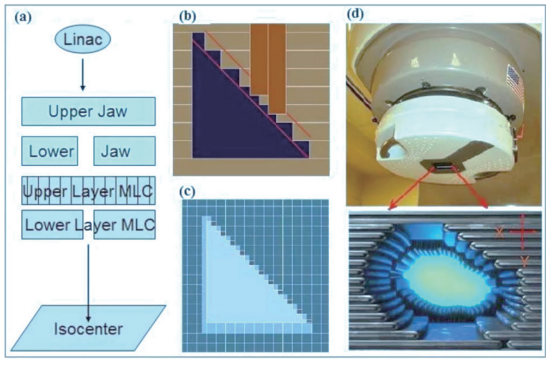


图7 Acculeaf多叶光栅

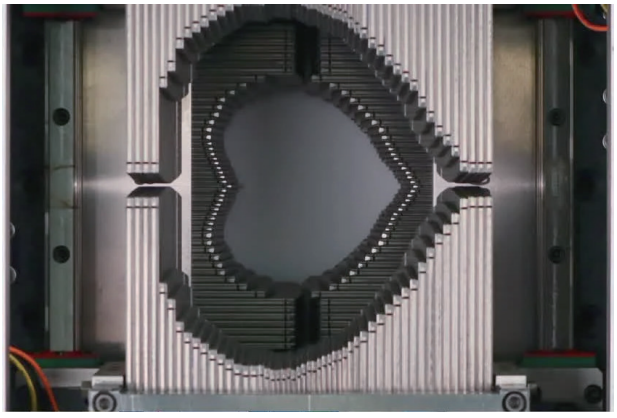


图8 雷泰医疗的双层正交多叶光栅

1.4 多叶光栅准直器性能对比

市面上主流的几款多叶光栅的性能对比见表1和表2。由表2可知，双层多叶光栅的最大叶间漏射率 <0.01%，远低于GB 9706.201—2020《医用电气设备 第2-1部分：能量为1 MeV至50 MeV电子加速器基本安全和基本性能专用要求》中0.375%的要求，在保护靶区外危及器官、减少正常组织照射方面更有优势。新一代的多叶光栅追求更高的速度，双层多叶光栅完全通过叶片运动形成所需照射野，照射野形成响应速度相比传统的单层多叶光栅更快，光栅的调制能力更强，为计划的高效执行及优化提供了基础。

表1 单层多叶光栅性能对比

项目	Millennium120	HD120	Agility160	MLCi/MLCi2
叶片投影宽度（mm）	5.0/10.0	2.5/5.0	5.0	10.0
最大成野尺寸（mm）	400 × 400	220 × 400	400 × 400	400 × 400
叶片高度（mm）	67	69	90	75
叶片速度（mm/s）	25	25	25	20
最大叶间漏射率（%）	<2.5	<2.5	<0.5	<1.0

表2 双层多叶光栅性能对比

项目	ViewRay MRIdian	Halcyon	雷泰	Acculeaf
叶片投影宽度（mm）	4.15	5.00	5.00	3.10/5.30
最大成野尺寸（mm）	274 × 241	280 × 280	400 × 400	100 × 110
叶片高度（mm）	55	77	—	—
叶片速度（mm/s）	20	50	50	20
叶片数量	叶片总数138片；上层34对，下层35对	叶片总数114片；上层29对，下层28对	叶片总数204片；上层51对，下层51对	叶片总数96片；上层24对，下层24对
最大叶间漏射率（%）	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2 锥形孔准直器

在加速器上开展立体定向放射治疗时，通过采用锥形孔准直器可降低半影，提高照射野精度。配置锥形孔准直器的直线加速器产品主要有 X–刀、射波刀（CyberKnife）、RayerKnife 及 ZAP–X。

2.1 X–刀准直器

早期的直线加速器产品为了提高治疗头部肿瘤的精准度，在加速器辐射头的端部安装专用的立体定向锥形孔准直器[26–27]，对光栅形成的照射野进一步束形，形成精确小野，开展 SRS 治疗。如图 9 所示是安装在加速器治疗头的锥形孔准直器，这是对医用直线加速器的一种功能扩展，临床应用中操作相对复杂、效率低，随着专用立体定向放射治疗设备的发展，这种应用逐步被替代。

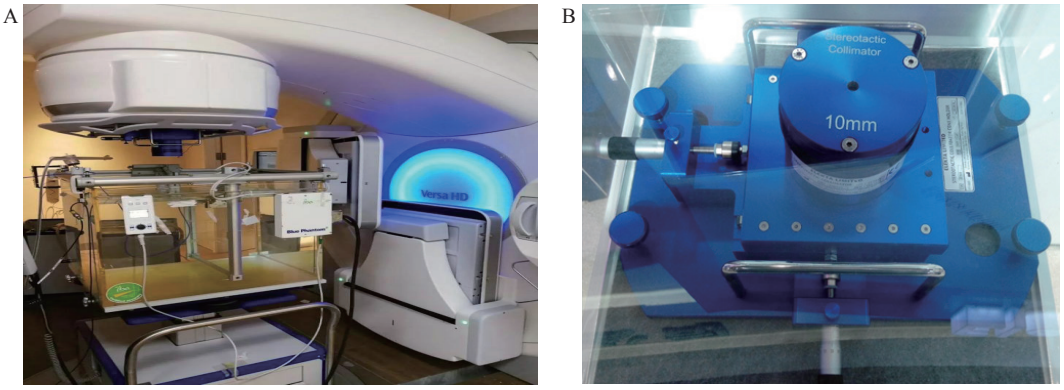


图 9 直线加速器上安装的 SRS 锥形孔准直器 A 为锥形孔准直器安装示意；B 为锥形孔准直器附件

注：SRS 为立体定向放射外科。

2.2 CyberKnife 准直器

最新的射波刀（CyberKnife）可以搭载 3 种类型的准直系统，并且可以自动进行切换，满足不同的治疗需求，如图 10 所示是搭载在 CyberKnife 上的 3 种准直系统。第一代准直系统 Fixed 由 12 个锥形孔准直器组成（照射野规格：5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm、15.0 mm、20.0 mm、25.0 mm、30.0 mm、35.0 mm、40.0 mm、50.0 mm、60.0 mm）[28–29]，见图 11；第二代准直系统 Iris 是一个照射野可自动切换的锥形孔准直器（照射野调整范围 ϕ 5 ~ ϕ 60 mm）[30]；第三代准直系统 InCise 是一个小型 MLC 准直器（最大照射野 115 mm × 100 mm）[31]。灵活精确的准直系统、精准的图像引导及运动管理技术、高精度的运动控制技术使得 CyberKnife 成为开展立体定向放射治疗的重要手段之一。

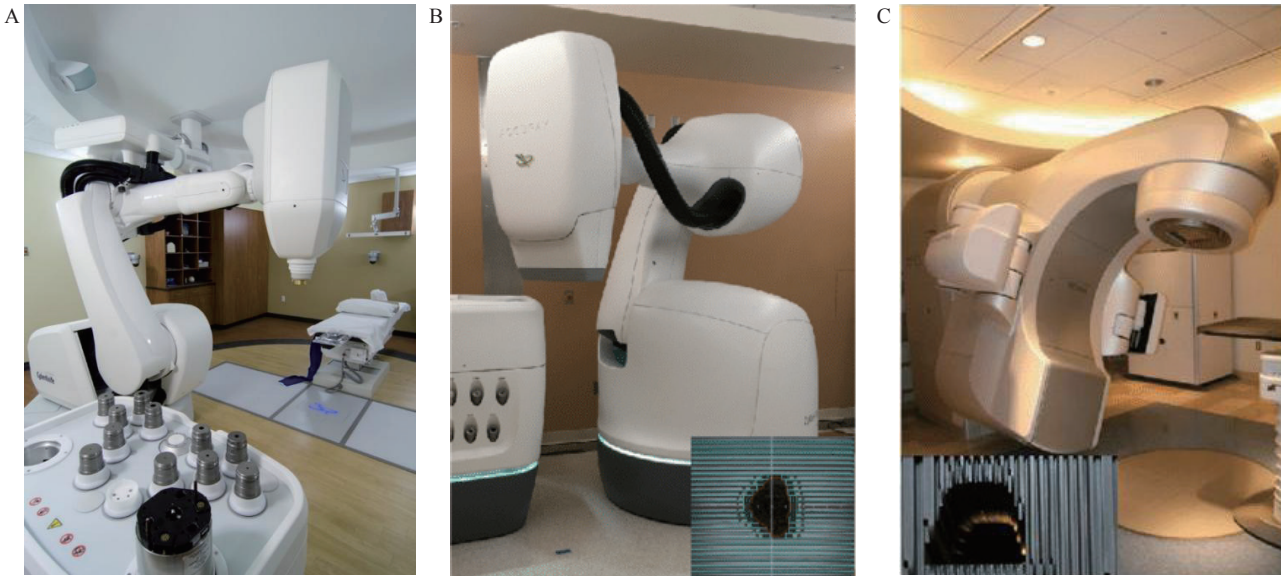


图 10 射波刀的系列准直器 A 为锥形孔准直器；B 为 Iris 准直器；C 为 InCise 准直器

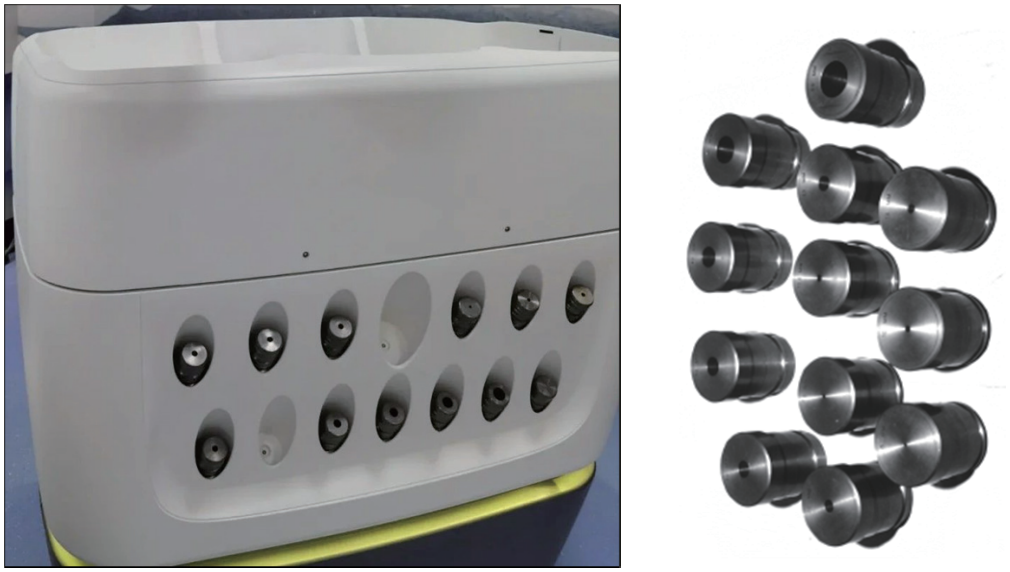


图11 射波刀的Fixed锥形孔准直器

Fixed和Iris都属于锥孔形准直器，其中Iris是一款可以实现照射野自动连续切换的准直系统，可优先选择5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm、15.0 mm、20.0 mm、25.0 mm、30.0 mm、35.0 mm、40.0 mm、50.0 mm和60.0 mm这12种规格，如图12所示是Iris准直器的结构，由上下两层可调结构组成，每层包含6组三棱柱结构，上下两层错开30° 相位，形成一个12棱边的近似圆形结构。Iris可以获得和Fixed相近的照射野精度，两种准直器的半影比较如表3所示，Iris可形成与Fixed相同直径的近圆形照射野，二者半影接近，Fixed优于Iris[32]。

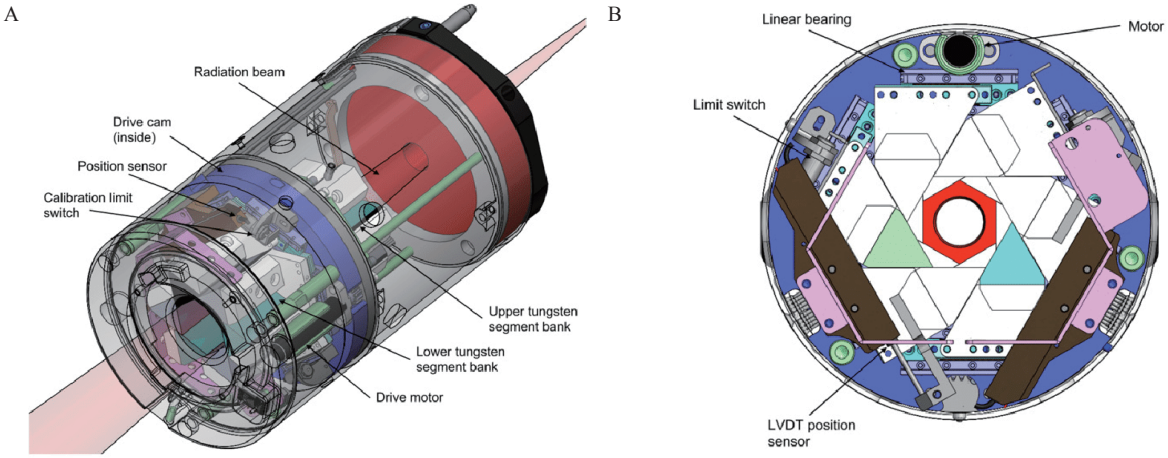


图12 射波刀的Iris锥形孔准直器 A为Iris准直器整体结构示意；B为Iris准直器成野示意

表3 Fixed和Iris锥形孔准直器的半影比较（mm）

项目	成野规格（mm）											
	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	50.0	60.0
Fixed准直器半影	2.0	2.4	2.6	2.6	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	3.5
Iris准直器半影	2.2	2.4	2.6	2.8	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	4.5	3.0	4.0

2.3 RayerKnife准直器

在2023年“第二届中国放射外科论坛”上，江苏瑞尔医疗介绍了一款基于多关节机器人平台的立体定向放射治疗系统RayerKnife。RayerKnife

是对标 CyberKnife开发的一款立体定向放射治疗设备，配备12组锥形孔准直器，一次可安装3组不同规格的准直器并在治疗过程中进行自动切换，提高了计划设计及执行的灵活性，兼顾了计划质量和执行效率。12组锥形孔准直器的成野规格为5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm、15.0 mm、20.0 mm、25.0 mm、30.0 mm、35.0 mm、40.0 mm、50.0 mm和60.0 mm，结构如图13所示。各规格准直器的半影数据如表4所示，照射野性能指标不低于CyberKnife。



图13 RayerKnife的锥形孔准直器

表4 RayerKnife锥形孔准直器半影

项目	成野规格（mm）											
	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	50.0	60.0
RayerKnife准直器半影（mm）	1.8	1.9	2.1	2.2	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.1	3.5

2.4 ZAP–X准直器

ZAP–X是一款专用于头部SRS治疗的放射外科产品，采用了3MV的加速器系统，最大剂量率为1500 cGy/min，SAD为450 mm，见图14。ZAP–X通过有8组锥形孔的圆盘型准直器形成所需照射野，成野规格4.0 mm、5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm、15.0 mm、20.0 mm和25.0 mm，漏辐射<0.01%。在源皮距（source–surface distance, SSD）=45 cm的5 cm和10 cm深度下，测量了4.0 mm、5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm、15.0 mm、20.0 mm和25.0 mm所有准直器尺寸的光束半影，见表5[33–34]。

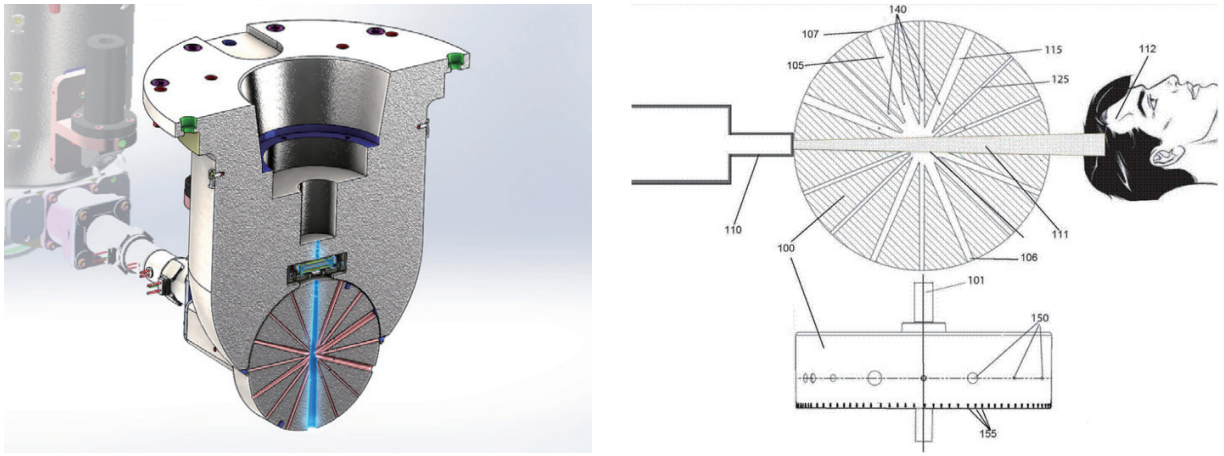


图14 ZAP–X准直器

表5 ZAP–X准直器半影（mm）

半影测量位置	成野规格（mm）							
	4.0	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	25.0
左侧5 cm	1.77	1.88	1.94	2.00	2.06	2.11	2.19	2.27
左侧10 cm	2.00	2.12	2.21	2.29	2.35	2.43	2.54	2.64
右侧5 cm	1.78	1.85	1.93	1.99	2.08	2.11	2.19	2.27
右侧10 cm	2.02	2.11	2.19	2.28	2.39	2.44	2.53	2.69
平均10 cm	2.01	2.11	2.2	2.28	2.37	2.43	2.53	2.66

2.5 锥形孔准直器性能对比

放射治疗设备配置锥形孔准直器主要是为了提高照射野精度，尤其是可获得更小的半影，以提高靶区外剂量跌落速度，提高治疗的精准度。市面上应用广泛的几类锥形孔准直器的半影对比见表6。在大致接近的SAD范围内，加速器的射线源尺寸相对于伽玛射线源更小，在相同或近似大小的照射野下，其半影更小。对于加速器产品，射线源尺寸接近，对较大的照射野，SAD对半影的影响较小，如表6所示，在 ϕ 20.0 mm和 ϕ 25.0 mm两组照射野尺寸下，SAD=450 mm和SAD=800 mm测试的半影接近。

表6 放射治疗设备锥形孔准直器的半影对比（mm）

照射野尺寸	Fixed	Iris	RayerKnife	ZAP-X
	SAD=800 mm	SAD=800 mm	SAD=800 mm	SAD=450 mm
4.0	—	—	—	2.01
5.0	2.0	2.2	1.8	2.11
6.0	—	—	—	—
7.5	2.4	2.4	1.9	2.2
8.0	—	—	—	—
9.0	—	—	—	—
10.0	2.6	2.6	2.1	2.28
12.0	—	—	—	—
12.5	2.6	2.8	2.2	2.37
15.0	2.8	2.8	2.2	2.43
16.0	—	—	—	—
18.0	—	—	—	—
20.0	2.8	2.8	2.4	2.53
25.0	3.0	3.0	2.5	2.66
30.0	3.0	3.0	2.6	—
35.0	3.0	3.0	2.7	—
40.0	3.0	4.5	2.8	—
50.0	3.5	3.0	3.1	—
60.0	3.5	4.0	3.5	—

注：SAD为源轴距。

3 二元光栅准直器

3.1 TomoTherapy的二元光栅准直器

TomoTherapy螺旋断层放疗系统是美国TOMO公司开发的一种直线加速器系统，其照射方式不同于常规加速器，其光栅准直器采用64片二元气动MLC（运动速度2 500 mm/s，只有开、关两种状态），叶片厚100 mm，等中心宽度6.25 mm，见图15。通过开关时间来调制子野强度，一个旋转周期内有51个投影，在每个投影中又能快速地产生不均匀强度。TomoTherapy的照射野有1.0 cm × 40.0 cm、2.5 cm × 40.0 cm、5.0 cm × 40.0 cm 3种规格的固定照射野和1.0 ~ 2.5 cm × 40.0 cm、1.0 ~ 5.0 cm × 40.0 cm 2种可调照射野，最大治疗野为40 cm × 135 cm[35-37]，见表7。

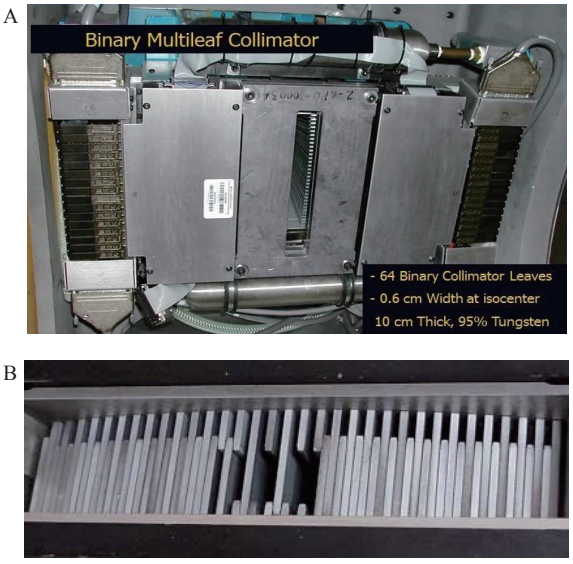


图15 TomoTherapy的二元光栅准直器 A为二元光栅准直器结构外观；B为二元光栅准直器叶片成野示意

表7 TomoTherapy二元光栅准直器的主要技术指标

技术参数	技术指标
叶片数量	64片（32对）
叶片投影宽度	6.25 mm
叶片高度	100 mm
叶片运行速度	2 500 mm/s
叶片切换时间	20 ms
最大照射野	40 cm × 135 cm

3.2 RefleXion X1的二元光栅准直器

RefleXion X1是美国RefleXion公司研制的一款正电子发射断层显像正电子发射断层显像（positron emission tomography, PET）引导的加速器放射治疗系统，采用了二元多叶光栅准直器（binary multileaf collimator），MLC以100次/s的速度转换，实现与直线加速器脉冲频率的同步对准，其在整机系统中的安装位置如图16所示[38-39]。

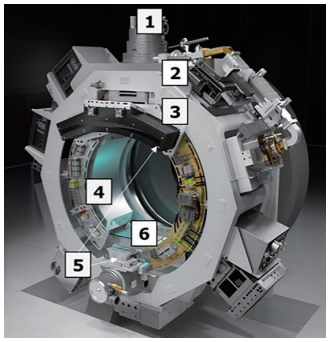


图 16 RefleXion X1 的二元光栅准直器

注：1 为直线加速器；2 为初级准直器；3 为二元多叶光栅；4 为正电子发射断层显像探测器；5 为锥形束计算机断层扫描成像装置；6 为兆伏级探测器。

4 准直器设计制造的关键技术

4.1 物理设计

物理设计主要关注照射野精度、半影大小及漏辐射，这些性能指标主要受光路设计、准直器整体布局、准直器结构的影响。将需要在等中心获得的物理指标转化为准直器的结构设计指标，通过理论计算及仿真模拟进一步转化为具体的结构尺寸，例如光栅叶片的端面形状、截面形状、叶片高度，锥形孔形状等。其中叶片端部的形状设计是重点，其形状对半影的影响较大，不同的曲率设计、分段优化设计目的都是最大化地减少半影。

4.2 可靠性设计

准直器是放疗设备中运动最为频繁的部件，失效率相对较高，其可靠性设计是保证产品整机可靠性的基础。在准直器的概念构思阶段就要考虑可靠性设计，在满足功能性能的基础上，选择简化的概念结构，采用已成熟的技术及零部件。现有光栅结构中，丝杆丝母的损耗是最大的，通过材质的改良、加工工艺的优化可以降低其磨损量，提高使用寿命及可靠性。

4.3 可维护性设计

在直线加速器的应用过程中，准直器的维护保养是最为频繁的，开展可维护性设计才能提高维修效率，降低维修成本。可维护性设计要充分考虑可测试性，能快速地隔离故障，准确定位故障源，提高维修效率。新一代的准直器也开展预测性维修，在使用过程中对器件的电压、电流等参数进行采集，对故障进行预警，在失效前发出维修提示，保证设备的开机率。

5 小结与展望

高精度准直器是医用直线加速器实施精准放射治疗的核心部件，其性能影响治疗精准度。随着治疗精准度要求的不断提升，高性能直线加速器产品的准直器设计也不断迭代创新，高性能新型准直器的开发成为放疗设备创新的关键环节。叶片速度提升，可以提高剂量调制能力，获得更优的靶区剂量分布，叶片运行的高速化成为光栅准直器的重要方向。双层多叶光栅用叶片替代了光阑，简化了准直器的整体结构，成野速度更快，叶间漏辐射大幅降低，将成为新一代加速器产品的标准配置。随着基于 X 射线的立体定向照射技术及装备的发展，锥形孔准直器也将伴随更多新型立体定向放射治疗设备的应用而得到更广泛的使用，特别是在追求极致小野剂量学和超低半影的 SRS、SRT、SBRT 和 SABR 应用中，通过多叶光栅准直器和锥形孔准直器的集成，构成复合型准直器，在兼顾高效的同时保证精准也是发展方向之一。多叶光栅是医用直线加速器中运动最为频繁的部件，国产部件在可靠性方面和进口品牌相比仍存在差距，需要在实际应用中总结经验，形成完善的故障处理经验。产品化迭代、数字化监测技术的应用、开展故障预警及预测性维护也是提升可靠性的新思路。随着对放射治疗精准度要求的持续提升，各种新型的准直器不断追求更好的照射野精度、适形度、低漏射率、靶区保护能力及剂量调整能力，以满足临床应用需求。

[参 考 文 献]

[1] 郭召. 动态多叶光栅准直器的技术现状及发展趋势[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(1): 154–158.
[2] 郭召. 立体定向放射治疗设备的技术现状及发展趋势[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(9): 144–149, 161.
[3] Clark B G, Teke T, Otto K. Penumbra evaluation of the varian millennium and BrainLAB M 3 multileaf collimators[J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2006, 66(4): S71–S75.
[4] 宋一昕. 微型多叶光栅剂量学特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
[5] 刘丰华, 戴国胜, 何自怀. 医用外置多叶光栅的性能和特点[J]. 中国医疗器械信息, 2018, 24(11): 55–57.
[6] 谢陈晨, 孟璐珈, 蒋元林. 射波刀设备的精度和误差分析

研究［J］. 中国设备工程, 2023(3): 131–133.
［7］ 胡立宏, 程瑞, 张倩, 等. 射波刀技术现状与发展及其临床应用［J］. 医疗卫生装备, 2015, 36(3): 110–112, 115.
［8］ Fürweger C, Prins P, Coskan H, et al. Characteristics and performance of the first commercial multileaf collimator for a robotic radiosurgery system［J］. Med Phys, 2016, 43(5): 2063.
［9］ Lafond C, Chajon E, Devillers A, et al. Impact of MLC leaf width on volumetric–modulated arc therapy planning for head and neck cancers［J］. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(6): 40–52.
［10］ Ouardy K E, Zerfaoui M, Herrassi Y, et al. Validation of monaco TPS for an ELEKTA synergy MLCi2: using gamma index for eElekta full package beams［J］. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(8): 7685–7689.
［11］ Cranmer–Sargison G, Liu P Z Y, Weston S, et al. Small field dosimetric characterization of a new 160–leaf MLC［J］. Phys Med Biol, 2013, 58(20): 7343–7354.
［12］ Meyers S M, Balderson M J, Létourneau D. Evaluation of Elekta Agility multi–leaf collimator performance using statistical process control tools［J］. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(7): 100–108.
［13］ Yang R, Lamey M, Bartha L, et al. Automated conversion of Millennium–120 VMAT plans to HDMLC geometry: software development and treatment of first patients［J］. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(6): e13598.
［14］ 余权达, 郑雪. 瓦里安医用直线加速器多叶光栅故障分析和维修［J］. 中国医疗设备, 2021, 36(9): 179–183.
［15］ Bergman A M, Gete E, Duzenli C, et al. Monte Carlo modeling of HD120 multileaf collimator on Varian TrueBeam linear accelerator for verification of 6X and 6X FFF VMAT SABR treatment plans［J］. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(3): 4686.
［16］ 邓永锦, 欧阳斌, 王振宇, 等. Varian Novalis Tx医用直线加速器HD120 MLC漏透射特性的测定及其临床影响研究［J］. 中国医疗设备, 2018, 33(10): 49–53.
［17］ Lim T Y, Dragojević I, Hoffman D, et al. Characterization of the Halcyon™ multileaf collimator system［J］. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(4): 106–114.
［18］ Kim M M, Bollinger D, Kennedy C, et al. Dosimetric characterization of the dual layer MLC system for an O–ring linear accelerator［J］. Technology in Cancer Research & Treatment, 2019, 18: 1533033819883641.
［19］ Zhang K, Tian Y, Li M, et al. Performance of a multileaf collimator system for a 1.5T MR–linac［J］. Med Phys, 2021, 48(2): 546–555.
［20］ Cai B, Li H, Yang D, et al. Performance of a multi leaf collimator system for MR–guided radiation therapy［J］. Med Phys, 2017, 44(12): 6504–6514.
［21］ Price A T, Knutson N C, Kim T, et al. Commissioning a secondary dose calculation software for a 0.35 T MR–linac［J］. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(3): e13452.
［22］ Davies G A, Clowes P, McQuaid D, et al. An experimental comparison of conventional two–bank and novel four–bank dynamic MLC tracking［J］. Phys Med Biol, 2013, 58(5): 1635–1648.
［23］ Kunieda E, Kawaguchi O, Saitoh H, et al. Measurement of beam–axis displacement from the isocenter during three–dimensional conformal radiosurgery with a micro–multileaf collimator［J］. Radiother Oncol, 2004, 70(1): 45–48.
［24］ 陈高翔, 解传滨, 戴相昆, 等. 基于正交双层光栅的调强放射治疗临床应用［J］. 中国医疗设备, 2021, 36(4): 81–85.
［25］ Wang Q, Li Q, Wang Z, et al. Characterization of a novel VenusX orthogonal dual–layer multileaf collimator［J］. J Appl Clin Med Phys, 2024, 25(5): e14357.
［26］ Zhang M, Fan Q, Lei Y, et al. Assessment of an Elekta Versa HD linear accelerator for stereotactic radiosurgery with circular cone collimators［J］. J Xray Sci Technol, 2020, 28(1): 71–82.
［27］ 陈超敏, 于晓宝, 周凌宏, 等. X–刀系统准直器的设计与性能［J］. 立体定向和功能性神经外科杂志, 1997(1): 47–49.
［28］ Abakay C D, Kiray Z, Çetintas S, et al. PO–1997 Dosimetric comparison of multileaf and fixed cone collimator plans with cyberknife［J］. Radiotherapy and Oncology, 2023, 182(S1): S1770–S1771.
［29］ 房爱玲. Cyberknife的系统构成及临床应用［J］. 医疗卫生装备, 2009, 30(4): 104–105, 107.
［30］ 宋会民. VSI射波刀圆形和Iris准直器的物理特性对比与分析［D］. 北京: 清华大学, 2016.
［31］ Biasi G, Petasecca M, Guatelli S, et al. CyberKnife® fixed cone and Iris™ defined small radiation fields: assessment with a high–resolution solid–state detector array［J］. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(5): 547–557.
［32］ Neupane T, Galanakou P, Shang C, et al. A novel Monte Carlo (MC) dose model for small MLC fields of the cyberknife® M 6TM radiosurgery system using the EGSnrc［J］. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2023, 24(4): e13880.
［33］ Weidlich G A, Chung W, Kolli S, et al. Characterization of the ZAP–X® peripheral dose fall–off［J］. Cureus, 2021, 13(3): e13972.
［34］ Weidlich G A, Schneider M B, Adler J R. Characterization of a novel revolving radiation collimator［J］. Cureus, 2018, 10(2): e2146.
［35］ 张金葆, 卢爱国. 螺旋断层放疗系统多叶准直器叶片的性能分析［J］. 医疗卫生装备, 2010, 31(10): 128–129.
［36］ 戴相昆, 徐寿平, 王运来, 等. HI–ART螺旋断层治疗机多叶准直器机械性能测试［J］. 中国医学物理学杂志, 2009, 26(4): 1265–1267, 1284.
［37］ Sarkar V, Lin L, Shi C, et al. Quality assurance of the multileaf collimator with helical tomotherapy: design and implementation［J］. Med Phys, 2007, 34(7): 2949–2956.
［38］ Oderinde O M, Shirvani S M, Olcott P D, et al. The technical design and concept of a PET/CT linac for biology–guided radiotherapy［J］. Clin Transl Radiat Oncol, 2021, 29: 106–112.
［39］ Han B, Capaldi D, Kovalchuk N, et al. Beam commissioning of the first clinical biology–guided radiotherapy system［J］. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(6): e13607.