

小野剂量学临床实践指南

Clinical guidelines for small static field dosimetry

国家癌症中心/国家肿瘤质控中心
2021-12-19 发布

目 次

前言	I
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	1
4 小野概念和剂量学特性	1
4.1 小野概念	1
4.2 小野的射线质	5
5 小野参考吸收剂量的测定	6
5.1 机器特定参考射野	6
5.2 参考吸收剂量测量的探测器和设备	7
5.3 测量参考条件	13
5.4 参考吸收剂量的测定公式	14
5.5 假想参考野射线质的确定	19
5.6 使用等效水模体确定加速器参考吸收剂量	23
5.7 影响量修正	24
6 小野相对剂量测量实践规程	25
6.1 总则	25
6.2 小野和非特定参考射野相对剂量测量的仪器	25
6.3 测量前加速器的质控	34
6.4 三维水箱设置	37
6.5 噪声的来源与抑制	38
6.6 探测器位置的确定	38
6.7 SSD 或 SAD 的确定	42

6.8	预测试	42
6.9	截面剂量分布测量	43
6.10	模体内射野输出因子的确定	45
7	小野剂量测量临床实例	56
7.1	射野输出因子实例	56
7.2	PDD/TPR 实例.....	56
7.3	截面剂量曲线测量实例	59
附录 A	64
附录 B	67
图 1	小野侧向带电粒子平衡缺失示意图.....	2
图 2	高能光子束的水中吸收剂量与碰撞比释动能之比随射野半径的变化关系	3
图 3	部分源遮挡效应示意图.....	4
图 4	半影重叠引起的射野展宽效应对小野射束侧向剖面剂量曲线的影响.....	4
图 5	体积平均效应示意图.....	5
图 6	测量 $TPR_{20,10}(S)$ 的实验装置设置	21
图 7	测量 $\%dd(10, s)$ 的实验装置设置.....	23
图 8	在 10 cm×10 cm 参考射野条件下, 基于蒙卡计算的 PMMA 和固体水模体剂量转换因子示例 ..	24
图 9	临床摆位精度示意图.....	40
图 10	用于测量截面剂量分布曲线时电离室的可用方向.....	44
图 11	用于测量截面剂量分布曲线时固态探测器(半导体探测器、非晶硅)的可用方向.....	44
图 12	实例 3 1 cm×1 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	57
图 13	实例 4 2 cm×2 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	57
图 14	实例 5 3 cm×3 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	57
图 15	实例 6 4 cm×4 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	58
图 16	实例 7 5 cm×5 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	58
图 17	实例 8 10 cm×10 cm 射野的百分深度剂量(源皮距 1000 mm)	58
图 18	实例 10 1 cm×1 cm 射野左右方向截面剂量曲线(源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	59
图 19	实例 11 1 cm×1 cm 射野左右方向截面剂量曲线(源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	60

图 20	实例 12	2 cm×2 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	60
图 21	实例 13	2 cm×2 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	60
图 22	实例 14	3 cm×3 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	61
图 23	实例 15	3 cm×3 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	61
图 24	实例 16	4 cm×4 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	61
图 25	实例 17	4 cm×4 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	62
图 26	实例 18	5 cm×5 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	62
图 27	实例 18	5 cm×5 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	62
图 28	实例 19	10 cm×10 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)	63
图 29	实例 20	10 cm×10 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)	63
表 1	常见治疗机的 msr 野		7
表 2	机器特定参考射野剂量测量的电离室规格表		8
表 3	msr 野 ($f_{msr} \geq 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 剂量测量用圆柱形电离室的特征		9
表 4	msr 野 ($f_{msr} < 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 剂量测量用电离室的特征		11
表 5	常见水模体替代材料的成分、平均密度、平均原子序数、平均激发能、 $(Z/A)_{med}$ 和 $Z_{eq, plastic}$		12
表 6	测定高能光子束吸收剂量的参考条件		13
表 7	使用赛博刀测定高能光子束水吸收剂量的参考条件		13
表 8	使用伽马刀测定高能光子束水吸收剂量的参考条件		14
表 9	测定伽马刀吸收剂量的参考条件		14
表 10	FFF 射束参考射野 10 cm×10 cm 的加速器、赛博刀和 Tomo 电离室射线质转换因子 $k_{Q,Q_0}^{f_{ref}}$		16
表 11	伽马刀两种机型 Perfexion 和 4C 的机器特定参考射野的射线质修正因子 $k_{Q_{msr}, Q_0}^{f_{msr}, f_{ref}}$		17
表 12	WFF 加速器参考射野 (10 cm×10 cm) 电离室射线质转换因子 $k_{Q,Q_0}^{f_{ref}}$		18
表 13	WFF 射束, 边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效方形 MSR 野		19
表 14	6~7 MV FFF 射束, 边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效方形 MSR 野		20
表 15	10 MV FFF 射束, 边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效 MSR 野		20
表 16	在 高能光子发生器中测量光子束射线质 $TPR_{20,10}(S)$ 的参考条件		21

表 17	测定医用直线加速器中高能光子束射线质指数 $\%dd(10, S)_x$ 的参考条件	22
表 18	适用于小野相对剂量测量的探测器特性	26
表 19	小野使用的硅半导体、金刚石探测器、液体电离室、有机闪烁体探测器的技术规格	32
表 20	固体水材料的物理特性	33
表 21	直线加速器 MLC 质控项目及方法	36
表 22	测量小野光子束相对剂量时，探测器与射束中心轴的相对位置	39
表 23	伽马刀 PERFEXION 机型不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	47
表 24	赛博刀不同射野大小的射野输出修正因子 $K_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	48
表 25	Tomo 治疗机不同射野大小的射野输出修正因子 $K_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	50
表 26	6 MV WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (参考深度 10 cm) .	52
表 27	10 MV-WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (参考深度 10 cm)	54
表 28	实例 1 经射野输出修正因子修正后的小野射野输出因子实例	56
表 29	实例 2 小野百分深度剂量测量中探测器扫描设置	56
表 30	实例 9 截面剂量曲线测量中扫描探测器设置	59
表 A.1	指南中使用的符号及其定义	64
表 A.2	本实践指南中涉及的专有名词	65
表 B.1	AAPM TG 142 号报告加速器质控要求	67

前 言

本指南按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本指南由国家肿瘤质控中心提出。

本指南由国家肿瘤质控中心归口。

本指南项目申请单位四川大学华西医院感谢放疗质控专家委员会委员及主审在指南审定过程中提供的专家意见（名单在下方列出，其中委员排名不分先后）；感谢张新高级工程师 [瓦里安医疗器械贸易（北京）有限公司] 和何海青编辑（《中华放射肿瘤学杂志》编辑部）对指南稿件编排规范给予的专业意见；感谢指南起草小组成员及四川大学华西医院物理师白龙、李长虎、宋莹、王强和中山大学肿瘤防治中心杨鑫在指南起草过程中付出的努力；感谢放疗质控专家委员会秘书处在指南征集、修订、印刷发布过程中的付出；感谢维斯安（上海）医疗器械有限公司给予指南印刷工作的支持。

本指南主要起草人：

柏 森：四川大学华西医院

戴建荣：中国医学科学院肿瘤医院

邱 杰：北京协和医院

吴 昊：北京大学肿瘤医院

黄晓延：中山大学肿瘤防治中心

胡伟刚：复旦大学附属肿瘤医院

李光俊：四川大学华西医院

王雪桃：四川大学华西医院

张英杰：四川大学华西医院

李明辉：中国医学科学院肿瘤医院

杨 波：北京协和医院

本指南审定人：

尹 勇（主审）：山东省肿瘤医院

于 洪：辽宁省肿瘤医院

王 平：天津市肿瘤医院
王小虎：中国科学院近代物理研究所/兰州重离子医院
王若峥：新疆医科大学附属肿瘤医院
王建华：河南省肿瘤医院
王绿化：中国医学科学院肿瘤医院深圳医院
邓小武：中山大学肿瘤防治中心
卢 冰：贵州医科大学附属医院/贵州省肿瘤医院
兰胜民：山西省肿瘤医院
曲宝林：解放军总医院第一医学中心
朱小东：广西医科大学附属肿瘤医院/广西医科大学附属武鸣医院
朱广迎：中日友好医院
朱 远：中国科学院大学附属肿瘤医院（浙江省肿瘤医院）
刘士新：吉林省肿瘤医院
刘孟忠：中山大学肿瘤防治中心
许 青：复旦大学附属肿瘤医院
折 虹：宁夏医科大学总医院肿瘤医院
李 光：中国医科大学附属第一医院
李宝生：山东省肿瘤医院
李晔雄：中国医学科学院肿瘤医院
吴永忠：重庆大学附属肿瘤医院
吴君心：福建省肿瘤医院
何 侠：江苏省肿瘤医院
张大昕：哈尔滨医科大学附属第一医院
张福泉：北京协和医院
陈 凡：青海大学附属医院/青海大学附属肿瘤医院
陈 明：中山大学肿瘤防治中心
郁志龙：内蒙古医科大学附属医院
金 晶：中国医学科学院肿瘤医院深圳医院/中国医学科学院肿瘤医院
郎锦义：四川省肿瘤医院•电子科技大学医学院附属肿瘤医院

夏云飞：中山大学肿瘤医院

夏廷毅：空军特色医学中心

钱立庭：中国科学技术大学附属第一医院

郭小毛：复旦大学附属肿瘤医院

席许平：湖南省肿瘤医院

韩 春：河北医科大学第四医院

谢丛华：武汉大学中南医院

潘建基：福建省肿瘤医院

引 言

本指南主要参考国际原子能机构 IAEA TRS483 号报告，同时参考英国医学物理与工程学会 IPEM103 号报告及美国医学物理师协会 AAPM TG106、TG142 号报告。

随着放射治疗技术的发展，立体定向放射治疗、立体定向放射外科手术以及调强放射治疗等精确放疗技术逐渐广泛应用于临床，这些技术中较多地使用了小照射野。小照射野可以在一些专用机器上实现，也可以在直线加速器上配置专用的 SRS 锥形筒或高分辨率的多叶准直器来实现。相比于常规射野，小野的应用增加了临床剂量的不确定度，而且剂量误差较常规射束大。

为了确保小野剂量学和探测器标准化使用，IAEA 和 AAPM 合作制定了适用于静态小野参考剂量和相对剂量国际实践规程 IAEA TRS483 号报告，其内容具有系统性和国际统一性等特点。

本指南目标是在 IAEA TRS483 号报告等参考文献的基础上，结合国内临床需求以及加速器特点等因素，建立国内小野剂量学临床实践操作指南，帮助国内放疗单位能够安全可靠、快速准确地开展与小野相关的放射治疗技术，并在日后的临床实践中不断完善小野剂量学相关标准。

小野剂量学临床实践指南

1 范围

本指南供已开展或即将开展小野技术的放疗中心使用，适用于标称能量上限为 10 MV 的外照射静态小野光子束的剂量测量，包括有均整（with flattening filter, WFF）和无均整（flattening filter free, FFF）模式剂量测定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

- GB/T 17857-1999 医用放射学术语（放射治疗、核医学和辐射剂量学设备）
- GB/T 19046-2013 医用电子加速器验收试验和周期检验规程
- GB 15213-2016 医用电子加速器性能和试验方法
- NCC/T-RT 001-2017 放射治疗质量控制基本指南

3 术语和定义

GB/T 17857-1999、GB 15213-2016 界定的术语和定义适用于本文件。

本指南中使用的术语、符号及定义见附录 A。

4 小野概念和剂量学特性

4.1 小野概念

至少满足以下三个物理条件之一的外照射光子束，被认定为小野：

- 不满足中心轴侧向带电粒子平衡（lateral charged particle equilibrium, LCPE）条件；
- 在射束轴方向上，初级光子源被准直装置部分遮挡；
- 探测器尺寸与射野相当或比射野大。

其中前两个条件与射束的特性有关，第三个条件与给定的探测器有关。以上 3 个条件均导致射野半影和探测器所处的区域部分重叠。

4.1.1 不满足中心轴侧向带电粒子平衡条件

由光子产生的次级电子具有一定的射程，当射束的半径小于次级电子的最大射程时，进入感兴趣区的次级电子数和逃出感兴趣区的次级电子数不一致，感兴趣区内沉积的能量小于比释动能，从而发生侧向带电粒子失衡。当射束半径等于次级电子的最大射程时，比释动能和吸收剂量相等，满足侧向电子平衡条件，此时射束半径表示为 r_{LCPE} 。图 1 为常规射野满足侧向电子平衡条件和小野不满足侧向电子平衡条件的示意图。

由于次级电子的最大射程和射束能量有关，所以 r_{LCPE} 也会随着射束能量的增加而增加。图 2 所示为不同能量光子束的 r_{LCPE} 。

r_{LCPE} （单位：cm）和常规光子束射线质的关系可表示为式（1）或（2）的形式：

$$r_{LCPE} = 8.369 \times TPR_{20,10}(10) - 4.382 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$r_{LCPE} = 77.97 \times 10^{-3} \times \%dd(10, 10)_x - 4.112 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中：

$TPR_{20,10}(10)$ ——10 cm×10 cm 射野、源轴距为 100 cm，20 cm 水深处与 10 cm 水深处的组织模体比

$\%dd(10, 10)_x$ ——10 cm×10 cm 射野、源皮距为 100 cm，水深为 10 cm 处的百分深度剂量

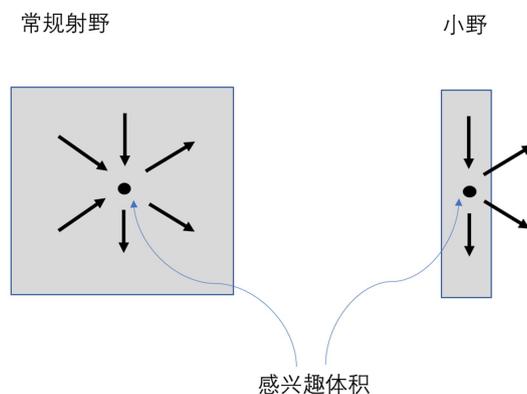


图 1 小野侧向带电粒子平衡缺失示意图

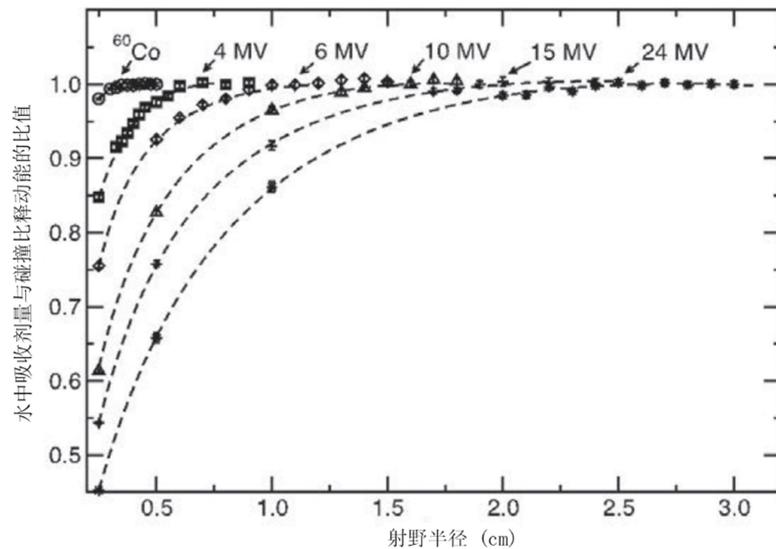


图 2 高能光子束的水中吸收剂量与碰撞比释动能之比随射野半径的变化关系

4.1.2 在射束轴方向上，初级光子源被准直装置部分遮挡

初级光子源具有一定大小，钨门、MLC、圆形准直器或可调式三级准直器开口很小时初级光子源会被部分遮挡。当射野大小等于或小于初级光子源尺寸时，在射束轴方向上的准直装置部分遮挡初级光子源的现象称为源部分遮挡效应（partial source occultation, PSO）。现代直线加速器的初级光子源尺寸通常不大于 5 mm，发生源部分遮挡效应时射野尺寸一般要小于出现侧向电子失衡时的射野尺寸。图 3 所示为光子源未被准直器遮挡和被部位遮挡时的情形，右图中为了形成小射野，准直器开口较小，光子源被准直器部分遮挡，源的边缘形成的几何半影增大，超过了准直器射野尺寸的大小，使得半影区变宽。

照射野大小通常由 50%等剂量线确定的半高宽（full width at half maximum, FWHM）决定，在宽束情况下，由准直器开口定义的几何野大小在等中心深度处与由 FWHM 定义的照射野大小相一致，但在小野情况下，因为部分源遮挡效应和 LCPE 的缺失，导致中心轴输出剂量大幅减少，FWHM 出现在剖面剂量曲线更低的位置，如图 4 所示，由 FWHM 定义的照射野比由准直器设置的几何野宽。

4.1.3 探测器尺寸与射野相当或比射野大

探测器产生的信号与其灵敏体积内沉积的平均吸收剂量成比例，该信号受到探测器体积（体积平均效应）内吸收剂量分布均匀性的影响。电离室内的剂量沉积是整个探测器灵敏体积内剂量的平均值，当

探测器大小与射野大小相当或比射野大时，穿过电离室的带电粒子的通量发生梯度变化，体积平均效应明显，导致测量结果不准确。图 5 描述了小野情况下探测器的体积平均效应。

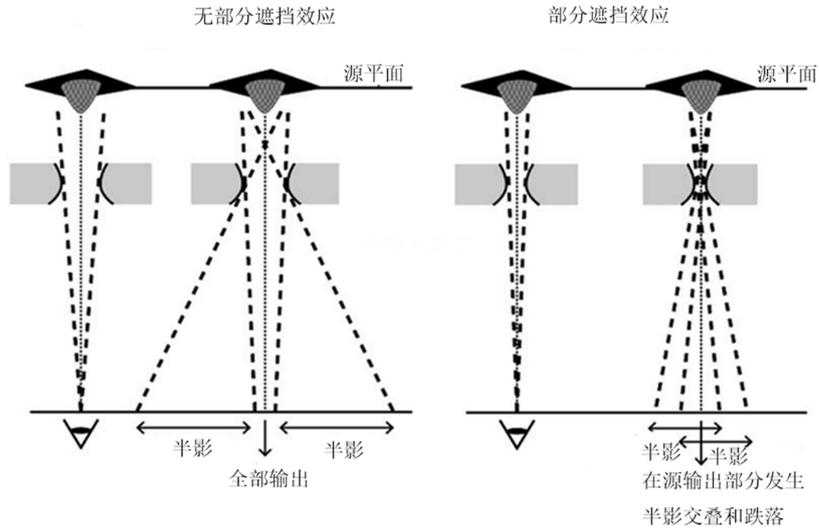
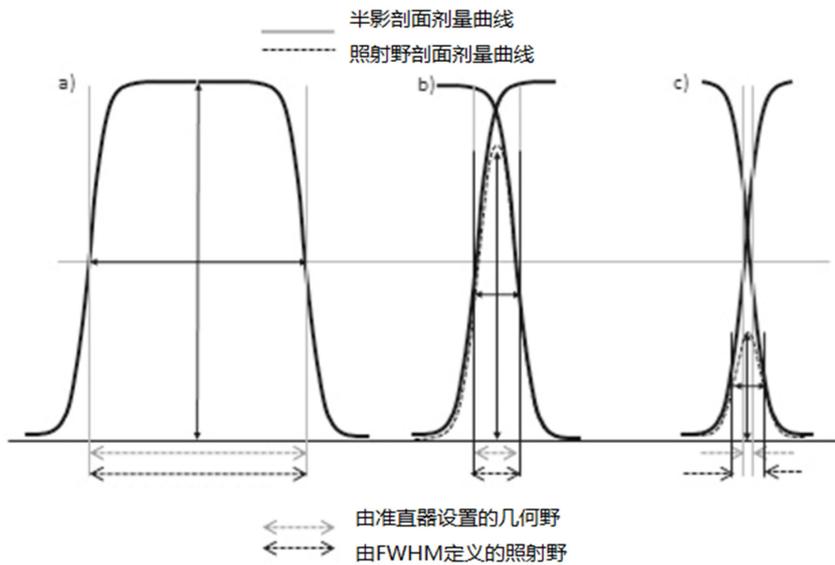


图 3 部分源遮挡效应示意图



a) 为对半影不重叠的宽野，由 FWHM 定义的照射野大小与由准直器设置的几何野大小一致；b) 为半影开始重叠时，照射野开始逐渐大于几何野；c) 为对半影重叠的小野，照射野明显大于几何野。

图 4 半影重叠引起的射野展宽效应对小野射束侧向剖面剂量曲线的影响

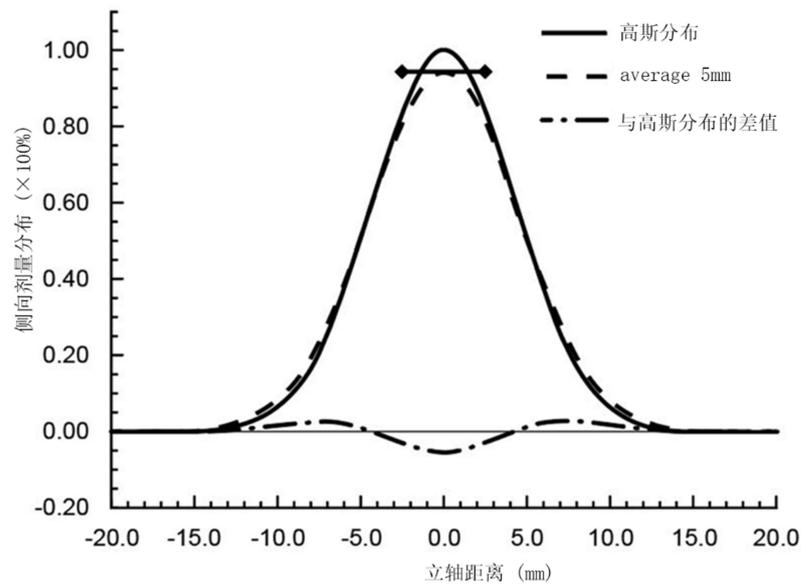


图5 体积平均效应示意图

在小野中，除体积平均效应外，探测器的扰动效应也不容忽视。由于探测器材质一般情况下都与测量介质（例如水）不同，因此探测器放入测量介质中收集到的粒子注量，不同于测量介质中不存在探测器时的粒子注量。这种由于探测器的材质与测量介质不同而导致探测器收集到的粒子注量（与无探测器时相比）发生变化的情况称为注量扰动效应。一般情况下，探测器材料的密度与测量介质不一致，是导致粒子注量发生变化的主要原因。当剂量梯度较大并且不存在 LCPE 条件时，通量扰动的情況就更为复杂，体积平均效应的修正也存在较大的不确定性。为尽量避免体积平均效应和降低扰动影响，探测器边缘到射野边界的距离应至少等于 r_{LCPE} 。

4.2 小野的射线质

4.2.1 小野能谱的硬化

小野的准直器不仅遮挡初级光子源，也遮挡初级光子源与准直系统相互作用产生的散射光子。对中心轴剂量来说，来自初级准直器、均整过滤器和机头其他组件到达小野中心轴的低能散射光子减少；而对离轴剂量来说，来自治疗头的散射增大。另一方面，随着射野的减小，模体的散射也减少，在大部分深度，模体的散射减少的影响比治疗头的散射增加的影响要大，最终的结果是射束轴方向任何点的光子的平均能量随着射野的减小而增高（硬化），并且随着光子能量的增加硬化的程度更明显。

4.2.2 小野射线质的表示

射线质指数有两种表示方式。第一种：10 cm×10 cm 射野、源轴距为 100 cm，20 cm 水深处与 10 cm 水深处的组织模体比，标记为 $TPR_{20,10}$ 。第二种：10 cm×10 cm 射野、源皮距为 100 cm，水深为 10 cm 处的百分深度剂量，标记为 $\%dd(10, 10)_x$ 。

射野大小对光子通量谱影响较大，但在水中产生的带电粒子谱受射野的影响较小。对 6 MV 光子束而言，在 10 cm 深度处，当射野大小从 10 cm×10 cm 减小到 0.3 cm×0.3 cm 的方野或半径为 0.3 cm 的圆形野时，水与空气的阻止本领比减少幅度不超过 0.5%，即使深度从最大剂量点下降到 30 cm 时变化也不超过 1%。因此，对常规加速器来说，射野大小对水与空气的阻止本领比的微小影响意味着当使用电离室测量小野剂量时宽束的射线质指数仍然适用于小野。但有些外照射放疗设备（比如伽马刀、赛博刀、Tomo 等）无法产生常规参考射野（10 cm×10 cm），其射线质的确定可通过测量 $TPR_{20,10}(S)$ 或 $\%dd(10, S)_x$ 的值推导出假想参考野（10 cm×10 cm）的射线质指数 $TPR_{20,10}(10)$ 或 $\%dd(10, 10)_x$ 。 $TPR_{20,10}(S)$ 是射野大小为 S cm×S cm、源皮距为 100 cm、水深为 20 g/cm² 和 10 g/cm² 时的吸收剂量比。使用一系列大小为 S 的射野获得非常规机器的 $TPR_{20,10}(S)$ 测量值并且将其与常规机器给出的数值比较，再将数据外推。具体步骤见 5.5 节。

5 小野参考吸收剂量的测定

5.1 机器特定参考射野

有些外照射放疗设备（比如伽马刀、赛博刀、Tomo 等）无法产生常规参考射野（10 cm×10 cm），对这些设备，应引入机器特定参考射野（machine specific reference, msr）。为了满足侧向电子平衡条件，msr 野的大小应尽可能接近常规参考射野，通常情况下将能够产生的最大射野作为 msr 野。

由于有些放射治疗设备只能产生矩形或圆形射野，无法形成方形 msr 野，其等效方形 msr 野定义为在中心轴上相同测量深度处产生与圆形野或矩形野相同散射剂量的方形射野。

对于可形成 10 cm×10 cm 参考射野的常规治疗机，其 msr 野就是 10 cm×10 cm 参考射野。表 1 汇总了常见治疗机的 msr 野。

表 1 常见治疗机的 msr 野

机器类型	msr 野
赛博刀	固定准直器开口，直径大小为 6 cm
Tomo	射野大小为 5 cm×5 cm
伽马刀	直径大小为 1.6 cm 或 1.8 cm 的准直器头盔
Brainlab micor MLC 插件	例如，9.8 cm×9.8 cm 或 9.6 cm×10.4 cm
SRS 锥形插件	能够实现并且最接近 10 cm×10 cm 的等效方野

5.2 参考吸收剂量测量的探测器和设备

5.2.1 总则

msr 野和常规参考射野的剂量测量参考条件有所区别，这可能会在一些设备的选择上有一些限制，但是适用于 msr 野的剂量测量设备应最大限度地与常规参考射野所使用的设备保持一致。可用于 msr 野剂量测量的仪器包括但不局限于小尺寸电离室和模体。本指南中，建议用水模体中的电离室测量结果确定临床使用的放疗设备的参考吸收剂量。

电离室剂量测量系统包括：

- 一个或多个电离室，包括与它连接的电缆和连接器。建议选择针对特定目标（射线类型、射线质等）专门设计的电离室；
- 根据需要可配一个或多个具备防水适配器的模体；
- 测量装置（静电计），需要分别校准每档的电荷或电流值；
- 一个或多个专门针对所选电离室稳定性的检定装置；
- 温度计和气压计。

5.2.2 电离室

用于水模体中光子束测量的理想电离室，应具有水等效性，不会对辐射注量产生扰动影响，同时具备良好的剂量率和方向性响应，灵敏度高（信噪比好，合理的采样时间），稳定性好（短期和长期），水吸收剂量线性响应，能量依赖性低，低漏电以及杆效应可以忽略等特点。目前，指型电离室被认为最近似满足这些特性，性能稳定、使用简便，适用于在水或固体模体的 msr 野测量参考剂量。

用于 msr 野剂量测量的电离室尺寸需要满足探测器的外界与射野边界（50%吸收剂量线）的距离至少为 r_{LCPE} 。电离室的空腔构造要尽可能地均匀以保证空腔范围内的辐射通量分布基本是均匀的；选择不密封的空腔可以快速地达到环境温度、气压的平衡；具有防水功能的电离室可以直接在水里测量。

电离室是高精度的测量设备，在使用之前应该充分测试其性能。表 2 列出了用于 msr 野测量的电离室应该满足的一些性能指标。表 3 和表 4 分别列出了市场上适用于 $\geq 6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 和 $< 6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 的 msr 野测量的电离室型号和规格参数。每种电离室的性能需根据表 2 中的指标进行验证。以 $6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 作为分界是从 Farmer 型电离室的尺寸和本指南使用的最高射束能量的 r_{LCPE} 两个方面来考虑。

表 2 机器特定参考射野剂量测量的电离室规格表

参数	规格
电离室预热	监测电离室累积剂量响应： 1.在 5 分钟内达到平衡； 2.初始状态与平衡状态下电离室示值符合度在 0.5%内
漏电流	小于电离室示值的 0.1%
极化效应	1.漏信号小于电离室示值的 0.4%； 2.在 ^{60}Co 和 10 MV 光子之间，极化效应差异小于 0.3%
复合校正	1.修正因子与剂量呈线性关系； 2.极化电压约 300 V 时，初始复合低于 0.2%； 3.对于脉冲束， $1/M_Q$ (电荷示数)与 $1/V$ （极化电压）呈线性关系； 4.对于连续束， $1/M_Q$ 与 $1/V^2$ 呈线性关系； 5.正反向极化电压的初始复合校正参数差异小于 0.1%
电离室长期稳定性	大于 5 年的修正因子变化小于 0.3%
电离室材料	电离室壁材料不受温度和湿度的影响

常规加速器的 msr 野 $> 6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ ，分有均整 WFF 和无均整 FFF 两种模式。对于 WFF 射束，电离室空腔体积介于 0.3 cm^3 和 1 cm^3 之间（通常为 0.6 cm^3 ），这个体积既有较高的测量灵敏度，又能有效测量点剂量，同时具有良好的信噪比和可忽略的漏电效应。典型的 Farmer 型电离室空腔呈柱状，内径 6.4 mm，长度 24 mm，能满足上述要求。对于 FFF 射束，由于横向剂量分布不均匀，建议参考电离室的长

度稍短于典型 Farmer 型电离室，此类电离室的体积在 0.1 cm^3 到 0.3 cm^3 之间。如果仍使用 Farmer 型电离室，则需要非均匀修正，否则，对于 6 MV 的 FFF 射束非均匀剂量分布的测量误差可达 1.5%。

用于 msr 野剂量测量的电离室尺寸需要满足探测器的外界与射野边界的距离至少为 r_{LCPE} 。当 msr 野 $< 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 时，常规参考电离室就显得太大，电离室的体积平均效应导致射束中心轴上的吸收剂量被低估。对于等效方野 $< 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的射野而言，最大的电离室长度被限制在 7 mm 左右，此时电离室的体积小于 0.3 cm^3 。原则上，这个标准可以表示为射野大小和能量的函数。当电离室长度为 7 mm 时，对 10 MV、6 MV 光子束和钴 60 γ 射线，等效方野大小至少为边长 4 cm、3 cm 和 2 cm 才满足 LCPE 条件。

表 3 msr 野 ($f_{\text{msr}} \geq 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 剂量测量用圆柱形电离室的特征

电离室	空腔体积 (cm^3)	空腔长度 (mm)	空腔半径 (mm)	室壁材料	壁厚(g/cm^3)	中心极	防水情况
Capintec PR-06C/G Farmer	0.33	22.0	3.2	C-552 ^a	0.050	C-552 ^a	N
Exradin A2 Spokas	1.0	11.4	4.8	C-552 ^a	0.176	C-552 ^a	Y
Exradin A12 Farmer	0.3	24.2	3.1	C-552 ^a	0.088	C-552 ^a	Y
Exradin A12S	0.6	11.6	3.1	C-552 ^a	0.088	C-552 ^a	Y
Exradin A19	0.6	25.0	3.1	C-552 ^a	0.088	C-552 ^a	Y
FZH TK 01	0.6	12.0	3.5	Delrinc	0.071	— ^b	Y
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0.6	23.0	3.1	Delrin ^c	0.056	铝	Y
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0.6	23.0	3.1	石墨	0.072	铝	Y
NE 2505/3, 3A Farmer	0.6	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2571 Farmer	0.33	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2611	0.33	9.2	3.7	石墨	0.090	铝(环)	N
PTW 23331 rigid	1.0	22.0	4.0	PMMA ^{d, e}	0.060	铝	N
PTW 23332 rigid	0.3	18.0	2.5	PMMA ^{d, e}	0.054	铝	N
NE 2505/3, 3A Farmer	0.6	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N

表3 msr 野 ($fmsr \geq 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 剂量测量用圆柱形电离室的特征 (续)

电离室	空腔体积 (cm^3)	空腔长度 (mm)	空腔半径 (mm)	室壁材料	壁厚(g/cm^3)	中心极	防水情况
NE 2571 Farmer	0.33	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2611	0.33	9.2	3.7	石墨	0.090	铝(环)	N
PTW 23331 rigid	1.0	22.0	4.0	PMMA ^{d, e}	0.060	铝	N
PTW 23332 rigid	0.3	18.0	2.5	PMMA ^{d, e}	0.054	铝	N
NE 2505/3, 3A Farmer	0.6	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2571 Farmer	0.33	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2611	0.33	9.2	3.7	石墨	0.090	铝(环)	N
PTW 23331 rigid	1.0	22.0	4.0	PMMA ^{d, e}	0.060	铝	N
PTW 23332 rigid	0.3	18.0	2.5	PMMA ^{d, e}	0.054	铝	N
NE 2505/3, 3A Farmer	0.6	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2571 Farmer	0.33	24.0	3.2	石墨	0.065	铝	N
NE 2611	0.33	9.2	3.7	石墨	0.090	铝(环)	N
Victoreen 30-361	0.4	22.3	2.4	PMMA ^d	0.144	— ^b	N
IBA FC-65P Farmer	0.65	23.1	3.1	Delrin ^c	0.057	铝	Y
IBA FC-65G Farmer	0.65	23.1	3.1	石墨	0.073	铝	Y
IBA FC-23C Farmer	0.23	8.8	3.1	C-552 ^a	0.070	C-552 ^a	Y
IBA CC13	0.25	10.0	3.0	C-552 ^a	0.070	C-552 ^a	Y

^a 空气等效导电塑料, 该塑料由聚偏氟乙烯, 碳, 二氧化硅等材料制成

^b —表示无相关信息

^c 聚甲醛, Delrin 是商品名

^d 聚甲基丙烯酸甲酯, 又称丙烯酸, 商品名为合成树脂 (lucite), 树脂玻璃 (plexiglas) 或有机玻璃 (perspex)

^e 电离室内含有由石墨组成的导电涂层, 石墨层厚度和密度会在说明书中详细描述

表4 f_{msr} 野 ($f_{msr} < 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 剂量测量用电离室的特征

电离室	空腔体积 (cm^3)	空腔长度 (mm)	空腔半径 (mm)	室壁材料	壁厚 (g/cm^3)	中心极	防水 情况
Capintec PR-05P mini ^a	0.07	5.5	2.0	C-552	0.220	C-552	N
Exradin A1 mini Shonka (2 mm cap)	0.057	5.7	2.0	C-552	0.176	C-552	Y
Exradin A1SL mini Shonka slimline ^a	0.057	5.7	2.1	C-552	0.176	C-552	Y
Exradin A14 micro Shonka ^a	0.016	2.0	2.0	C-552	0.176	C-552	Y
Exradin A14SL micro Shonka slimline ^a	0.016	2.1	2.1	C-552	0.194	C-552	Y
Exradin A14P micro planar ^a	0.002	1.0	2.0	C-552	0.176	C-552	Y
Exradin A16 micro ^a	0.007	1.7	1.2	C-552	0.088	C-552	Y
Exradin A18 thimble	0.125	4.9	2.5	C-552	0.176	C-552	Y
IBA CC01 ^a	0.01	3.6	1.0	C-552	0.088	钢	Y
IBA CC04 ^a	0.04	3.6	2.0	C-552	0.070	C-552	Y
IBA CC08	0.08	4.0	3.0	C-552	0.070	C-552	Y
IBA CC13	0.13	5.8	3.0	C-552	0.070	C-552	Y
IBA CC13-S	0.13	5.8	3.0	PEEK/C-552	0.154	C-552	Y
Nuclear Assoc 30-750	0.03	3.6	2.0	C-552	0.068	C-552	Y
Nuclear Assoc 30-749	0.08	4.0	3.0	C-552	0.068	C-552	Y
Nuclear Assoc 30-744	0.13	5.8	3.0	C-552	0.068	C-552	Y
PTW 31010 Semiflex	0.125	6.5	2.8	PMMA ^{b,c}	0.078	铝	Y
PTW 31014 PinPoint ^a	0.015	5.0	1.0	PMMA ^c	0.085	铝	Y
PTW 31015 PinPoint	0.030	5.0	1.45	PMMA ^c	0.085	铝	Y
PTW 31016 PinPoint 3D ^a	0.016	2.9	1.45	PMMA ^c	0.085	铝	Y
Victoreen Radocon II 555	0.1	4.3	2.5	Delrind	0.529	— ^e	N

^a 不满足表2的要求但是已被证明适用于测量伽马刀参考剂量的电离室

^b 聚甲基丙烯酸甲酯 (C5H8O2), 又叫丙烯酸, 商品名为有机玻璃

^c 与大多数室壁由不导电塑料制成的电离室相似, 其内壁涂有导电的石墨层, 石墨层的厚度和密度可查询说明书

^d 聚甲醛, Delrin 是商品名

^e 无相关信息

5.2.3 模体

建议将水作为测量光子吸收剂量和辐射质的参考介质，也可以使用水等效材料的固体模体，使用固体模体的基本要求是将探测器测量点准确放置在射束中轴线水等效深度 $Z_{eq, plastic}$ 处。理想情况下，固体材料水等效的要求是其吸收和散射特性与水一致。目前制造商提供的固体水在材料和几何加工精度方面都能满足放射治疗剂量学的要求。表 5 列出了常用水模体的元素组成（依据权重计算）、标称密度、平均原子序数、平均激发能和水深为 10 cm 时的等效深度等数据。在使用固体水时需要确定等价于水模参考深度的塑料模体深度和模体剂量转换因子。

在测量深度处，模体在射野的四条边方向上至少要比射野大 5 cm，同时最大剂量深度到模体底部的距离至少为 5 cm。

表 5 常见水模体替代材料的成分、平均密度、平均原子序数、平均激发能、 $(Z/A)_{med}$ 和 $Z_{eq, plastic}$

材料	液态水 ^a	ABS ^b	塑料水 ^c	PMMA ^{a,d}	聚乙烯 ^a	RW-1 ^a	RW-2 ^a	RW-3	PMI-45 ^{a,e}	WT1 ^a	虚拟水 ^f
H	0.1119	0.0540	0.0925	0.0805	0.0774	0.1320	0.0700	0.0759	0.0809	0.0810	0.0770
C		0.8777	0.6282	0.5998	0.9226	0.7940	0.8300	0.9041	0.6722	0.6720	0.6870
N		0.0682	0.0100						0.0240	0.0240	0.0227
O	0.8881		0.1794	0.3196		0.0380	0.0400	0.0080	0.1984	0.1990	0.1886
Mg						0.0090					
Cl			0.0096						0.0013	0.0010	0.0013
Ca			0.0795			0.0270			0.0232	0.0230	0.0231
Ti							0.0600	0.0120			
Br			0.0003								
密度	0.998	1.066	1.030	1.190	1.060	0.970	1.110	1.045	1.030	1.020	1.030
Z^g	6.60	5.56	6.62	5.85	5.29	5.29	6.25	5.48	5.96	5.95	5.97
I (eV)	78.0	70.0	69.9	74.0	68.7	59.8	71.3	67.1	68.7	68.6	69.2
$(Z/A)_{med}$	0.5551	0.5262	0.5446	0.5394	0.5377	0.5345	0.5316	0.5364	0.5365	0.5395	0.5375
$Z_{eq, plastic}$	-	9.88	9.88	8.63	9.72	10.13	9.39	9.88	9.97	10.07	10.01

注：由于厂家给出的密度具有较大的偏差，建议用户实验测量确定模体的密度，并以水作为基准

^a 丙烯晴丁二烯苯乙烯 (ABS)

^b Nuclear associates (纽约, NY)

^c 聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethylmethacrylate), 又称做压克力 (acrylic)、亚克力或有机玻璃 lucite

^d Gammex/Sun Nuclear (米德尔顿, WI)

^e Med-Cal 公司

^f 平均原子序数

^g 塑料等效深度, $Z_{ref} = 10$ cm, 如果 $Z_{ref} \neq 10$ cm, 此列数值需乘以 $Z_{ref}/10$ cm

5.3 测量参考条件

表 6、7、8、9 分别列出了常规加速器、赛博刀、tomo 和伽马刀测量高能光子束吸收剂量的参考条件。

表 6 测定高能光子束吸收剂量的参考条件

影响量	参考值或参考特性
模体材料	水
模体形状与大小	至少为 30 cm × 30 cm × 30 cm
电离室类型	圆柱形
测量深度 Z_{ref}	10 g/cm ²
电离室的参考点	电离室空腔的几何中心位于中心轴
电离室参考点的位置	测量深度
SSD/SDD	100 cm 或最接近它并且可供使用的距离 ^a
射野大小	10 cm × 10 cm ^b 或 msr 野 ^c 的大小
^a 必须使用 SAD 测定参考吸收剂量时，应使用加速器上的源轴距，即使它不等于 100 cm ^b 使用 SSD 摆位时，射野尺寸定义在模体表面；使用 SAD 摆位时，射野尺寸定义在探测器平面，并且使它在模体的参考深度位于机器等中心 ^c msr 等效方野的大小 S 尽可能地接近 10 cm，但应不小于 4 cm 或不大于 12 cm。矩形野的边长比应尽可能地接近 1	

表 7 使用赛博刀测定高能光子束水吸收剂量的参考条件

影响因子	参考值或参考特性
模体材料	水
模体形状或大小	至少为 30 cm × 30 cm × 30 cm
电离室类型	圆柱形
测量深度 Z_{ref}	10 g/cm ²
电离室的参考点	电离室空腔的几何中心位于中心轴
电离室参考点的位置	测量深度 Z_{ref}
SDD	80 cm
射野形状和大小	可供使用的最大圆形野、固定准直器的开口大小（直径 6 cm）

表 8 使用伽马刀测定高能光子束水吸收剂量的参考条件

影响因子	参考值或参考特性
模体材料	水
模体形状或大小	至少为 30 cm × 30 cm × 30 cm
电离室类型	圆柱形
测量深度 z_{ref}	10 g/cm ²
电离室的参考点	电离室空腔的几何中心位于中心轴
电离室参考点的位置	测量深度 Z_{ref}
SSD/SDD	85 cm ^a
射野形状和大小	矩形野 (5 cm × 10 cm、TomoTherapy HiArt)
^a 使用临床实践中常用的参考 SSD 或 SDD	

表 9 测定伽马刀吸收剂量的参考条件

影响量	参考值或参考特性
模体材料	水或塑料 (聚苯乙烯、ABS、固体水等) ^a
模体形状或大小	半球顶端的圆柱, 直径 16 cm
电离室类型	微型电离室、圆柱形
测量深度 Z_{ref}	半球中心 ^b
电离室的参考点	电离室空腔的几何中心位于中心轴
电离室参考点的位置	半球中心
SSD	32 cm
射野大小	可供使用的最大圆形野 (直径 1.6 cm 或 1.8 cm) ^c
^a 已经报道过不同的设计类型, 在伽马刀系统中, 更建议使用的类型是充水型半球或紧凑聚乙烯圆柱 ^b 聚乙烯模体, 厚度为 8 cm, PMMA, 厚度为 7 cm ^c 伽马刀治疗机的最大射野依赖于它的型号, 标准型 (伽马刀 4 或 4C) 直径为 1.8 cm, Perfedon 型 (PFX) 直径 1.6 cm; 旋转型伽马治疗机, 最大的射野直径为 1.8 cm. 使用放射源均处于工作状态时的射野确定出 msr 野	

5.4 参考吸收剂量的测定公式

- a) 如果标准实验室能提供在 msr 野射线质下的电离室校准系数, 水模体中参考深度处的吸收剂量由公式 (3) 计算:

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_{msr}}^{f_{msr}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ ——msr 野射线质条件下, 修正气压、温度、复合效应、极化效应等影响量后的剂量仪读数。

$N_{D,w,Q_{msr}}^{f_{msr}}$ ——在标准实验室中, msr 野射线质下校准并以水吸收剂量形式表示的电离室校准系数。

- b) 大多数情况下, 电离室的校准系数是在射线质为 Q_0 的参考野 (10 cm×10 cm) 下获得的, 此时 msr 野的吸收剂量由公式 (4) 计算:

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ ——msr 野射线质条件下, 修正气压、温度、复合效应、极化效应等影响量后的剂量仪读数。

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ ——在标准实验室中对射线质为 Q_0 的常规参考射野 (10 cm×10 cm) 校准并以水吸收剂量形式表示的电离室校准系数。

$k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ ——电离室在射线质为 Q_0 的常规参考射野和射线质为 Q_{msr} 的 msr 野中的电离室响应差异转换因子。

理想情况下, $k_{Q_{msr},Q_0}^{f_{msr},f_{ref}}$ 应由实验室测量, 但只有少数实验室具备这样的能力。考虑到同种型号治疗机物理特性的一致性, 可以使用实验室测量或 Monte Carlo 计算的通用射线质修正因子。表 10、11 列出了伽马刀、赛博刀和 Tomo 与部分电离室组合的通用射线质校准因子。

- c) 当无法获得通用的射线质修正因子时, 使用公式 (5) 计算 msr 野的吸收剂量:

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ ——msr 野射线质条件下, 修正气压、温度、复合效应、极化效应等影响量后的剂量仪读数。

$N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}}$ ——在标准实验室中对射线质为 Q_0 的常规参考射野 (10 cm×10 cm) 校准并以水吸收剂量形式表示的电离室校准系数。

$k_{Q,Q_0}^{f_{ref}}$ ——射线质转换因子, 用于修正射线质为 Q_0 的标准放疗设备与射线质为 Q 的待测放疗设备在常规参考射野下的电离室响应差异。

$k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}}$ ——射野输出修正因子, 用于修正待测量设备在常规参考射野下与 msr 野下的电离室响应差异。

WFF 射束有平坦的剖面剂量曲线, 多数情况下, 对于本实践规程建议使用的电离室类型而言,

$k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}}$ 等于 1。这时式 (5) 可以写成

$$D_{w,Q_{msr}}^{f_{msr}} = M_{Q_{msr}}^{f_{msr}} N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} \dots\dots\dots (6)$$

表 10 FFF 射束参考射野 10 cm×10 cm 的加速器、赛博刀和 Tomo 电离室射线质转换因子 $k_{Q,Q_0}^{f_{ref}}$

电离室	TPR _{20,10} (10)=	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75	Cyber 刀	Tomo
	%dd(10,10) _x =	63.8	65.6	68.2	71.7	76.1		
Capintec PR-06C/G Farmer	0.996	0.995	0.992	0.988	0.981	1.000	0.996	
Exradin A2 Spokas	0.996	0.996	0.993	0.989	0.983	0.997	0.996	
Exradin A12 Farmer	0.998	0.997	0.994	0.991	0.984	1.004	0.998	
Exradin A12S	0.994	0.993	0.989	0.984	0.977	0.993	0.994	
Exradin A19	0.995	0.995	0.991	0.987	0.981	1.002	0.995	
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0.995	0.994	0.991	0.986	0.979	1.000	0.995	
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0.997	0.996	0.993	0.990	0.983	1.002	0.997	
NE 2505/3, 3A Farmer	0.996	0.996	0.993	0.990	0.985	1.003	0.996	
NE 2571 Farmer	0.996	0.995	0.993	0.990	0.985	1.003	0.996	
NE 2611	0.994	0.992	0.989	0.985	0.979	0.993	0.993	
PTW 23331 rigid	0.995	0.993	0.990	0.985	0.980	0.998	0.994	
PTW 23332 rigid	0.995	0.993	0.988	0.983	0.976	0.995	0.994	
PTW 23333 (3 mm cap)	0.995	0.993	0.990	0.985	0.978	0.998	0.995	
PTW 30001 Farmer	0.995	0.994	0.990	0.986	0.979	0.999	0.995	
PTW 30010 Farmer	0.995	0.994	0.990	0.986	0.979	0.999	0.995	
PTW 30002/30011 Farmer	0.995	0.994	0.992	0.988	0.982	1.001	0.995	
PTW 30004/30012 Farmer	0.997	0.996	0.994	0.990	0.984	1.003	0.997	
PTW 30006/30013 Farmer	0.995	0.994	0.990	0.985	0.978	0.999	0.995	
PTW 31003/31013 Semiflex	0.995	0.993	0.990	0.985	0.978	0.996	0.994	
SNC 100700-0 Farmer	0.996	0.995	0.992	0.987	0.979	1.002	0.996	

加速器射线质以 TPR_{20,10}(10)或%dd(10,10)_x 表示，赛博刀和 Tomo 列表为电离室通用射线质转换因子

表 11 伽马刀两种机型 Perfexion 和 4C 的机器特定参考射野的射线质修正因子 $k_{Q_{msr}, Q_0}^{f_{msr}, f_{ref}}$

电离室类型	Perfexion			4C		
	f _{msr} =16 mm			f _{msr} =18 mm		
	固体水	ABS	水	固体水	ABS	水
PTWT31010	1.0037	1.0146	1.0001	0.9958	0.9990	0.9924
PTWT31016	1.0040	1.0110	0.9991	1.0014	1.0025	0.9964
ExradinA1SL	1.0046	1.0138	1.0006	1.0009	1.0014	0.9967
ExradinA14SL	1.0154	1.0194	1.0112	1.0116	1.0060	1.0058
1.0104ExradinA16	1.0167	1.0295	1.0127	1.0163	1.0217	1.0104
IBA CC01	1.0213	1.0292	1.0169	1.0203	1.0208	1.0157
IBA CC04	1.0107	1.0117	1.0062	1.0086	1.0049	1.0040
CapintecPR05-P4.7	1.0059	1.0070	1.0010	1.0007	0.9960	0.9951
CapintecPR05-P7.6	1.0025	1.0126	0.9976	0.9885	0.9972	0.9844
修正因子包含其向水吸收剂量的转换						

表 12 给出了使用 WFF 射束时常见电离室的射线质转换因子 $k_{Q_0}^{f_{ref}}$ 的值。对于常规加速器，其 msr 野即为常规参考射野（10 cm×10 cm），式（6）中的 f_{msr}、Q_{msr} 可写成 f_{ref} 和 Q，此时式（6）变成 IAEA TRS 398 报告给出的测定高能光子束水吸收剂量的公式。对那些无法建立常规参考射野的治疗机，如若仍想使用表 12 提供的 $k_{Q_0}^{f_{ref}}$ 值，需要先确定该机器假想参考野（10 cm×10 cm）的射线质，关于假想参考野射线质的确定见 5.5 节。

对于伽马刀，其射线质与标准实验室校准电离室时使用的标准射线一致，都是钴 ⁶⁰ γ 射线，但需要注意的是，伽马刀通常是在塑料模体（固体水）中测定参考剂量，修正因子应包含其向水吸收剂量的转换。

表 11 给出了伽马刀 Perfexion 和 4C 型的 $k_{Q_{msr}, Q}^{f_{msr}, f_{ref}}$ 值。

表 12 WFF 加速器参考射野(10 cm×10 cm)电离室射线质转换因子 k_{Q,Q_0}^{ref}

电离室	TPR _{20,10} (10) =	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75
	%dd(10,10) _x =	63.4	65.2	67.6	70.5	73.9
Capintec PR-06C/G Farmer	0.997	0.994	0.991	0.988	0.982	
Exradin A2 Spokas	0.998	0.997	0.995	0.992	0.988	
Exradin A12 Farmer	0.998	0.996	0.993	0.990	0.984	
Exradin A12S	0.996	0.994	0.991	0.987	0.981	
Exradin A19	0.996	0.993	0.990	0.985	0.980	
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	0.996	0.993	0.990	0.985	0.979	
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	0.997	0.995	0.992	0.989	0.983	
NE 2505/3, 3A Farmer	0.996	0.994	0.992	0.989	0.984	
NE 2571 Farmer	0.997	0.994	0.992	0.989	0.984	
NE 2611	0.996	0.993	0.991	0.988	0.984	
PTW 23331 rigid	0.996	0.992	0.989	0.985	0.980	
PTW 23332 rigid	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	
PTW 23333 (3 mm cap)	0.996	0.993	0.989	0.985	0.979	
PTW 30001 Farmer	0.996	0.993	0.989	0.985	0.979	
PTW 30010 Farmer	0.996	0.993	0.989	0.985	0.979	
PTW 30002/30011 Farmer	0.996	0.993	0.991	0.987	0.982	
PTW 30004/30012 Farmer	0.998	0.995	0.993	0.989	0.984	
PTW 30006/30013 Farmer	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	
PTW 31003/31013 Semiflex	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	
SNC 100700-0 Farmer	0.997	0.994	0.991	0.986	0.979	
SNC 100700-1 Farmer	0.998	0.996	0.994	0.99	0.984	
Victoreen Radocon III 555	0.993	0.989	0.985	0.979	0.973	
Victoreen 30-348	0.995	0.991	0.988	0.982	0.976	
Victoreen 30-351	0.995	0.991	0.988	0.983	0.977	
Victoreen 30-349	0.995	0.991	0.988	0.983	0.978	
Victoreen 30-361	0.995	0.991	0.988	0.983	0.977	
IBA FC-65P (Wellhöfer IC 69) Farmer	0.997	0.994	0.992	0.986	0.979	
IBA FC-65G (Wellhöfer IC 70) Farmer	0.998	0.997	0.994	0.989	0.983	

5.5 假想参考野射线质的确定

5.5.1 等效方形 msr 野的大小

对于 WFF 射束，射野呈现比较均匀的侧向剖面剂量曲线，等效方形 msr 野的大小与能量无关。表 13 给出了部分矩形野和圆形野的等效方形 msr 野的大小。对于 FFF 射束，散射光子对射野中心剂量的贡献是射野大小和能量的函数，表 14 和表 15 给出了平均能量为 6~7 MV 和 10 MV 的 FFF 光子束的等效方形 msr 野的大小。对于赛博刀，它的侧向剖面剂量曲线有着陡峭的剂量梯度，直径为 6 cm 的 msr 野的等效均匀方形 msr 野的大小为 5 cm，因此表格里的数据不适用于赛博刀。

表 13 WFF 射束，边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效方形 MSR 野

单位为厘米

边长		Y									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
X	12	12	11.5	10.9	10.3	9.6	8.9	8.1	7.2	6.2	5.1
	11		11.0	10.5	9.9	9.3	8.6	7.8	7.0	6.0	5.0
	10			10.0	9.5	8.9	8.3	7.5	6.8	5.9	4.8
	9				9.0	8.5	7.9	7.2	6.5	5.7	4.7
	8					8.0	7.5	6.9	6.2	5.4	4.5
	7						7.0	6.5	5.9	5.1	4.3
	6							6.0	5.5	4.8	4.1
	5								5.0	4.5	3.8
	4									4.0	3.4
	3										3.0
直径 ϕ		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
		10.7	9.8	8.9	8.0	7.1	6.2	5.4	4.5	3.6	2.7

表 14 6~7 MV FFF 射束, 边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效方形 MSR 野

单位为厘米

边长		Y									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
X	12	11.2	10.8	10.3	9.8	9.2	8.5	7.8	7.0	6.0	5.0
	11		10.4	9.9	9.4	8.9	8.3	7.6	6.8	5.9	4.9
	10			9.5	9.1	8.6	8	7.3	6.6	5.7	4.8
	9				8.7	8.2	7.6	7	6.3	5.5	4.6
	8					7.8	7.3	6.7	6.1	5.3	4.5
	7						6.8	6.3	5.8	5.1	4.3
	6							5.9	5.4	4.8	4.0
	5								4.9	4.4	3.8
	4									4.0	3.4
3										3.0	
半径 ϕ		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
		10.2	9.4	8.6	7.8	7.0	6.1	5.3	4.4	3.5	2.7
注: 这些值不适用于赛博刀光束。赛博刀横向光束轮廓梯度更大, 直径 6cm 的 msr 场等效均方 msr 场为 5.0cm											

表 15 10 MV FFF 射束, 边长为 X、Y 的矩形野和直径为 ϕ 的圆形野对应的等效 MSR 野

单位为厘米

边长		Y									
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
X	12	10.5	10.2	9.8	9.3	8.8	8.2	7.5	6.7	5.9	4.9
	11		9.8	9.5	9.0	8.5	8.0	7.3	6.6	5.7	4.8
	10			9.1	8.7	8.2	7.7	7.1	6.4	5.6	4.7
	9				8.3	7.9	7.4	6.8	6.2	5.4	4.5
	8					7.5	7.1	6.6	5.9	5.2	4.4
	7						6.7	6.2	5.7	5.0	4.2
	6							5.8	5.3	4.7	4.0
	5								4.9	4.4	3.7
	4									3.9	3.4
3										3.0	
半径 ϕ		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
		9.7	9.0	8.3	7.6	6.8	6.0	5.2	4.4	3.5	2.7

5.5.2 测定 $TPR_{20,10}(10)$

传统参考射野 (10 cm × 10 cm) 的射线质指数 $TPR_{20,10}(10)$ 可由 $TPR_{20,10}(s)$ 的测量值通过下式推导:

$$TPR_{20,10}(10) = \frac{TPR(S) + c(10 - S)}{1 + c(10 - S)} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

S ——等效方形野边长, 单位为 cm。

C ——常数, 值为 $(16.15 \pm 0.12) \times 10^{-3}$, 在 $4 \leq S \leq 10$ 时有效。

$TPR_{20,10}(10)$ 的测量参考条件如表 16 所示, 图 6 为测量示意图。SDD 为常量 100 cm 或尽可能与之接近, 电离室参考点分别位于水面下 10 g/cm²、20 g/cm² 深度处, 射野在电离室参考点平面的面积与边长为 S 的方野面积等效。可使用圆柱形电离室或平行板电离室。

表 16 在 高能光子发生器中测量光子束射线质 $TPR_{20,10}(S)$ 的参考条件

影响因素	参考值或参考特征
模体材质	水
电离室类型	具有足够侧向建成区 ^a 的圆柱或平行板电离室
测量深度	20 g/cm ² 和 10 g/cm ²
电离室的参考点	腔体中心处的中轴上 (圆柱形电离室) 或入口窗内表面的中心 (平行板电离室)
电离室参考点的位置	对于圆柱形或平行板电离室, 在测量深度
电离室杆的方向	垂直于射束轴
SDD	100 cm 或在 msr 射野时最接近 100 cm
SDD 的射野形状和大小	10 cm × 10 cm 或 msr 射野 (最接近 10 cm × 0 cm ^b)
^a 建议电离室最大尺寸 < 射野最小边减去两倍 r_{LCPB} , 或探测器体积外侧边缘与最近射野边缘至少相距 r_{LCPB} ^b 建议等效的方形 msr 射野大小 S 尽可能地接近 10 cm, 且不小于 4 cm, 不大于 12 cm。矩形射野的长宽比 (最大尺寸 / 最小尺寸) 将尽可能的统一	

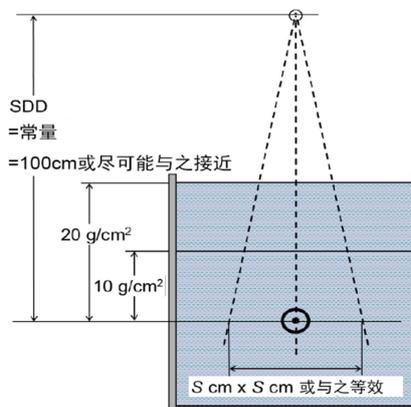


图 6 测量 $TPR_{20,10}(S)$ 的实验装置设置

5.5.3 测定%dd(10, 10)

传统参考射野（10 cm×10 cm）的射线质指数%dd(10, 10)可由%dd(10, S)的测量值通过下式推导：

$$\%dd(10,10) = \frac{\%dd(10,S) + 80c(10 - S)}{1 + c(10 - S)} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

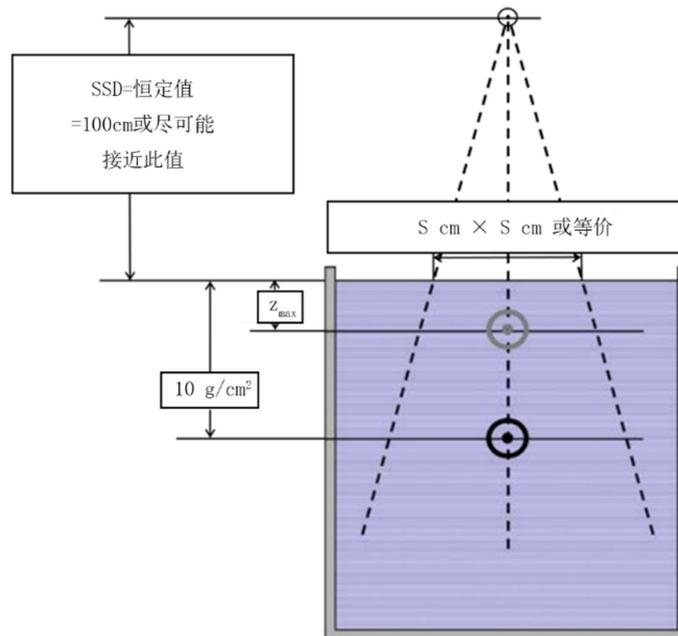
S ——等效方形野边长，单位为 cm。

C ——常数，值为 $(53.4 \pm 1.1) \times 10^{-3}$ ，在 $4 \leq S \leq 12$ 时有效。

%dd(10, 10)的测量参考条件如表 17 所示，图 7 为测量示意图。SSD 恒定为 100 cm 或尽可能与之接近，测量深度为 Z_{max} 和 10 g/cm²。射野在模体表面的面积与边长为 S 的方野面积等效。可使用圆柱形电离室或平行板电离室。当使用圆柱形电离室时需考虑电离室的有效测量点，将空腔中心向射线入射方向偏移 0.6r，其中 r 为电离室的内半径。

表 17 测定医用直线加速器中高能光子束射线质指数%dd(10, S)_x的参考条件

影响量	参考值或参考特征
体模材料	水
电离室类型	圆柱形或平板型，尺寸大小足以对给定能量的射线提供最大剂量建成 ^a
测量深度	10 g/cm ² and Z _{max}
电离室参考点	圆柱形电离室位于P _{eff} ^b ；平板型电离室位于入口窗口的内表面中心
电离室参考点的位置	对于圆柱形或平板型电离室，在测量深度
电离室中心轴方向	垂直于射野中心轴
SSD	100 cm，对于 msr 射野，尽量接近 100 cm
SSD 在源皮距的射野面积和形状	10 cm×10 cm，对于 msr 射野，尽量接近 10 cm×10 cm ^c
^a 建议电离室的最大尺寸小于射野直径减去两倍的r _{LCP E} ，或电离室外缘至少距离最近的射野边缘r _{LCP E} 距离 ^b 圆柱形电离室（P _{eff} ）的有效测量点位于从电离室中心轴向光子源方向上 0.6 倍空腔半径处 ^c 建议等效的矩形 msr 射野大小 S 尽可能接近 10 cm，必须在 4~12 cm 范围内。矩形射野（最大尺寸/最小尺寸）的长宽比应尽可能接近 1	

图7 测量 $D_{W,Q_{msr}}^{f_{msr}}(10, s)$ 的实验装置设置

5.6 使用等效水模体确定加速器参考吸收剂量

当使用电离室在塑料水模体中测量加速器 msr 野的参考吸收剂量时,其读数转换为吸收剂量计算公式如下:

$$D_{W,Q_{msr}}^{f_{msr}}(Z_{ref}) = M_{plastic,Q_{msr}}^{f_{msr}}(Z_{eq,plastic}) N_{D,w,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q,Q_0}^{f_{ref}} k_{Q_{msr},Q}^{f_{msr},f_{ref}} k_{Q_{msr}}^{f_w,plastic} \dots (9)$$

式中:

$M_{plastic,Q_{msr}}^{f_{msr}}(Z_{eq,plastic})$ ——经影响量修正后的塑料水模体中的电离室读数。

$k_{Q_{msr}}^{f_w,plastic}$ ——模体剂量转换因子。

塑料水模体中的深度 $Z_{eq,plastic}$ 等效于水中的参考深度 Z_{ref} ,需根据电子密度进行比例换算,通常将等效点定义为二者光子注量相同的点。光子与物质相互作用中康普顿效应占主要份额的前提下,为确保光子注量的等效性,保持SDD不变的同时,需要根据电子密度对所有维度(深度,射野大小,模体尺寸)进行等比例缩放。实际上,对于与水电子密度类似的模体,缩放效应(即模体尺寸和射野尺寸)可以忽略不计,而对其校正会导致SDD改变。

模体剂量转换因子 $k_{Q_{msr}}^{f_w,plastic}$ 可以通过实验确定,其值为水模体中深度 Z_{ref} 处与等效水模体中深度 $Z_{eq,plastic}$ 处、经影响因素修正的电离室读数的比值。其理论计算比较复杂,需要用到蒙卡计算或者剂量

标定法则。对于宽射束，固体水和 PMMA 的 $k_{Q_{msr}}^{fw,plastic}$ 值是射线质 $TPR_{20,10}(10)$ 和 $\%dd(10,10)_x$ 的函数。图 8 中可见， $k_{Q_{msr}}^{fw,plastic}$ 的值对于 PMMA 近似在 0.960 到 0.980 之间，对于固体水近似在 0.997 到 1.010 之间。

对于 PMMA 模体，虽然有较大的深度比例校正， $k_{Q_{msr}}^{fw,plastic}$ 的蒙卡计算值和实验值的误差在 0.2% 之内。值得注意的是固体水的蒙卡计算值和实验值差别较大，平均差别 0.3%（蒙卡更大），说明不同模体间的水等效性的差异。这与塑料材质制造中出现的非均质有关。水等效材料的 CT 扫描影像或放射影像可以对这些模体的剂量学 QA 提供帮助。

5.7 影响量修正

电离室读数需要对影响量进行修正，包括空气密度、湿度、电离室极性修正、复合效应修正等。这些影响量的修正与 IAEA TRS 398 报告给出的电离室影响量修正是一致的，本节不再说明。

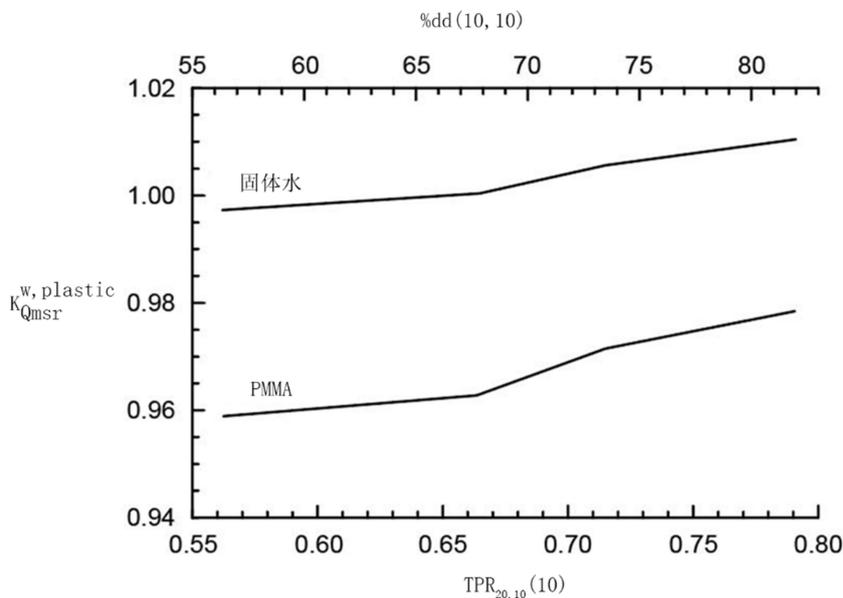


图 8 在 10 cm×10 cm 参考射野条件下，基于蒙卡计算的 PMMA 和固体水模体剂量转换因子示例 [$\%dd(10,10)_x$ 和 $TPR_{20,10}(10)$ 是近似值]

6 小野相对剂量测量实践规程

6.1 总则

在临床使用中为完整地表述小野的剂量学特性，不仅需要在参考条件下测定射束的绝对剂量，同时也要测定射野输出因子、中心轴百分深度剂量分布（PDD）、组织模体比（TPR）或组织最大比（TMR）和侧向剖面剂量曲线等相对剂量。本实践规程提供了测量射野输出因子和侧向剖面剂量曲线的操作指南。

射野输出因子定义为在给定深度处任何非参考射野的吸收剂量与参考射野的吸收剂量之比。在宽束条件下，探测器剂量学特性受射野大小的影响较小，射野输出因子可直接由探测器读数的比值获得。然而，在小野条件下，探测器的剂量学特性随射野大小变化较明显，探测器读数的比值需要乘以输出修正因子才能得到正确的射野输出因子。

截面剂量曲线定义为模体中垂直于射束轴、平行于模体表面、参考深度的水吸收剂量分布。测量截面剂量时，曲线的形状特别是半影区形状与探测器灵敏体积直接相关，探测器的体积平均效应会模糊曲线的形状，在小野情况下，这种模糊效应会更突出。小野探测器扰动因子对射野的大小具有非常强的依赖性，测量半影时出现的小误差将导致剂量出现较大的偏差。

6.2 小野和非特定参考射野相对剂量测量的仪器

6.2.1 小野相对剂量测量探测器的一般特性

在无确切证据情况下，认为用于大野剂量测量的探测器并不适用于小野测量。例如，电离室通常不适合测量高剂量梯度的区域，而且，在不满足侧向带电粒子平衡的条件下，体积平均效应和扰动效应也限制了电离室在小野测量中的使用。表 18 总结了适用于小野相对剂量测量的探测器的一般特性。

理想的小野探测器测得的是测量点的辐射注量，探测器本身是水等效的，并且具有线性响应特性，即它的响应不依赖于能量和吸收剂量（注量）率。尽管水热量计是最好的水等效仪器，并且其响应也不依赖于能量和剂量率的变化，但它不适用于日常测量。在相对剂量学中，最常用的是电离室，但为了提高信噪比，电离室的尺寸又不能设计得太小。每一个电离室都有相对应的射野尺寸测量下限，低于此值后，体积平均效应将不可忽略。在对低于上述下限值的射野测量时，仅液体电离室和固体电离室适用，但是对于更小尺寸的射野，使用这些电离室时也存在扰动效应。

表 18 适用于小野相对剂量测量的探测器特性

探测器属性	要求	备注
稳定性	对累计吸收剂量达数百 kGy 的多次照射，探测器短期响应应优于 0.1%	稳定性校准可定期进行，以保证探测器性能稳定，不需要频繁校准
剂量线性	在至少三个数量级的吸收剂量范围内（例如，0.01~10 Gy），剂量线性应优于 0.1%	
剂量率线性	临床直线加速器通常使用的剂量率范围为 0.1~0.4 Gy/s，在此范围内，探测器剂量率线性应优于 0.1%	该剂量率范围适用于常见的 WWF 和 FFF 射束
剂量/脉冲线性	在修正电离复合效应后，探测器的响应随剂量/脉冲变化的稳定性应优于 0.1%	典型的剂量/脉冲工作条件为 0.2~2 mGy/脉冲
能量依赖性	小野 MV 级放射治疗探测器有效能量范围为 ^{60}Co γ 射线-10 MV 光子线	理想探测器的响应不依赖于能量，即在感兴趣的能量范围内，对水的宏观相互作用系数（光子线的 μ_{en}/ρ ，电子线的 S/ρ ）比率恒定
空间分辨率	在选择探测器空间分辨率时，通常需要在高信噪比和小野探测器尺寸之间进行权衡	对空间分辨率的要求应由测量位置的剂量梯度决定
探测器大小	选择探测器尺寸时，必须使得探测器的体积平均效应不超过 5%	
方向性	理想探测器的响应应不依赖于探测器相对于射束的方向，在探测器轴线与射束中心轴线夹角小于 60° 时，探测器响应变化应小于 0.5%	探测器的响应通常不是各向同性的。为减小该效应的影响，应考虑引入角度修正系数，或者比较常见的是固定射束方向（例如从未端或边缘投射）
本底信号	任何形式的信号泄露均可能增加本底信号强度，因此信号泄露强度应低于探测器每 Gy 响应强度三个数量级	探测器的零剂量读数会影响设备的低剂量限值和信噪比
环境因子	整体工作条件的修正应使所有环境因素的影响降低到 0.3% 以下	理想情况下测量结果应不依赖于温度、气压、湿度的变化，或者对影响因素进行了精确的修正
注：以上特性基于如下假定，泄露信号可以忽略不计，并且进行了恰当的极性和复合效应修正		

在小野相对剂量测量中，射野中心轴深度剂量曲线、组织模体比、组织最大比、截面剂量曲线和射野输出因子等参数通常是以射野大小和射野形状为变量的函数。对特定的测量应根据被测量参数特点选

择最适合的探测器。由于不存在理想探测器，建议采用两种或三种不同类型的探测器进行测量，重复测量可使测量结果具有更高的可信度并确保不会产生显著的测量误差。

在测量射野输出因子时，体积平均效应是选择探测器的限制因素，因此，应使得放置探测器区域的辐射注量尽量均匀。影响输出因子测量的其他因素还包括探测器响应对射野大小的依赖性[由探测器的能量依赖性、吸收剂量（注量）率依赖性，水等效和整体扰动所引起]。

在测量截面剂量分布时，探测器的空间分辨率、方向响应、能量响应以及对剂量率的依赖性都是需要考虑的重要因素。体积平均效应和探测器的扰动对测量射野半影有影响。不均匀的方向响应可能导致测量的截面剂量曲线变形。探测器对剂量率的依赖性可能导致截面剂量曲线中部分区域剂量值被高估几个百分点。因此，若未对剂量率进行修正，则不适合使用对剂量率依赖较高的探测器。这一点对FFF射束尤为重要，因为它的剂量率或脉冲剂量远远高于WFF射束。此外，由于低能光子线对吸收剂量的贡献使得在使用某些探测器时也可能存在问题。例如，在测量深度剂量曲线时，低能散射光子的影响随着深度增加而增大，从而使得探测器失去了水等效特性，这会导致某些具有能量依赖性的探测器（如半导体探测器）出现过响应。相反地，对于很小尺寸的射野，射野中心轴上没有来自模体内散射的光子，射束能谱硬化的影响超过光子散射而占主导，这会导致出现与上述例子相反的现象。

注量扰动、探测器尺寸大小的影响和位置的不确定性是所有剂量系统在测量光子小野时遇到的重要问题。探测器的组成成分也十分重要，如果探测器中使用了高Z的物质，就会改变次级电子的能量注量。这样的探测器（如中心电极为金属的电离室）响应可能会随射野大小的变化而变化。在大野条件下校准后，若在小野中使用则需考虑它们的能量响应，因为在大野和小野中所探测到的光子和电子的能谱是不同的。修正不仅取决于探测器的敏感介质，还应考虑探测器的构造和周边材料等细节。

为实现小野精确测量，在测量之前，应至少在两个旋转方向上对探测器进行X射线透视，以发现潜在的问题，并评估该探测器的构造和对称性。通过这样的方式也可以确定探测器的敏感体积，因为实际的敏感体积可能与外部标记或制造商提供的信息存在差异，而这在很大程度上会影响小野剂量测量。必要时，可以通过测量角度响应来确定任何不对称问题，从而考虑如何修正。

现有多种类型探测器用于小野相对剂量测量，但需要强调的是，没有任何一种探测器具备所有理想探测器的特性。因此，与参考射野剂量测量不同，在此不可能推荐特定类型的探测器用于特定的相对剂量测量。探测器种类很广泛，目前文献报道的有经典电离室、小型电离室、微型电离室、液体电离室、半导体探测器、金刚石探测器、塑料有机闪烁体探测器、辐射自显影胶片、金属氧化物半导体探测器、场效应晶体管、热释光剂量仪、光释光探测器、玻璃棒状光致发光探测器和丙氨酸探测器。下面将对上述探测器进行简要概述。

- a) 经典电离室，体积为 $0.3\sim 0.6\text{ cm}^3$ ，由于其尺寸太大，并且会低估小野中心轴水吸收剂量，因此它不适用于小野相对剂量测量。该探测器体积平均效应很大，因此也应尽量避免用于截面剂量曲线的测量。
- b) 小型电离室（迷你型电离室，针状电离室，体积为 $0.01\sim 0.3\text{ cm}^3$ ，该探测器适用于测量大于 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的射野。它对低能光子线具有较好的能量响应和均匀的方向响应，也不依赖剂量率，但需检查并修正电离室电缆和杆效应。同样也建议检查并修正极化效应。
- c) 微型电离室，体积为 $0.002\sim 0.01\text{ cm}^3$ ，具有较小的测量体积，体积平均效应不显著，但该探测器敏感性较低，在使用上有一定的局限性。微型电离室对水吸收剂量响应较低，意味着，若不对其进行修正，信号丢失则会十分显著，这对低吸收剂量的区域尤为明显。建议在大野中使用微型电离室时也需注意，随着电离室电缆被辐照面积的增大，可能会导致信号增加。
- d) 液体电离室，电离室内填充绝缘电解质而非空气，由于液体密度更高，该电离室体积信号与同体积的空腔电离室相比显著增大，因此，小的液体电离室特别适合于小野剂量测量。此外，液体电离室几乎水等效，与空腔电离室相比，电离室扰动效应降低。液体电离室需要 800 V 及更高的偏压。由于复合效应的影响，它的响应具有剂量率依赖性，建议在用于截面剂量曲线测量前修正此效应，同时也需要检查电缆和杆效应，因为部分电缆辐照可能导致读数显著增加。同样，这类电离室对温度也有明显的依赖性，因此必须进行温度修正。PTW31018 是唯一商业化的液体电离室，然而这款电离室现已不再商售。
- e) 半导体探测器，通常具有很小的灵敏体积（通常小于 0.2 mm^3 ），因此其体积平均效应很小。但由于内部构造和探测器材料的影响，该探测器在不同角度的测量响应变化约 3% 。因此，建议只采用使其对称轴和射束中心轴平行的方式放置。由于硅和水在 keV 级能量上具有不同的质能吸收系数，低能光子会使半导体探测器出现过响应现象。但在小野中，散射辐射降低，低能光子的贡献也相当低。应当小心选择合适的半导体探测器。非屏蔽型半导体探测器（适用于电子的半导体探测器）比屏蔽型半导体探测器（适用于光子束的半导体探测器）更适合用于小野剂量测量。但由于它与水的物理密度不同，当它用于小于 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的射野时需要修正输出因子。屏蔽型半导体探测器含有一些高密度材料（如钨），对能量有一定补偿作用，可以吸收部分低能散射光子。但由于钨具有高的质能吸收系数，在低能光子束中会增加硅中次级电子注量，这会导致半导体探测器过响应，屏蔽型半导体探测器的响应并不完全独立于射野大小和测量深度。低能散射光子的贡献随着深度的增加而增加，导致屏蔽型半导体探测器过响应。然而，有些半导体探测器在更大的深度却表现出欠响应，这是由于其响应对剂量

率的依赖性。在小野的测量中，推荐使用非屏蔽型半导体探测器。在极小的射野测量中应使用立体定向半导体探测器。半导体探测器寿命有限，并且敏感性与累积吸收剂量有关，因此，建议定期验证其相对响应。

- f) 金刚石探测器，由于金刚石对水的阻止本领和质能吸收系数比率相对恒定，因此金刚石探测器具有较高的敏感性，并且其响应对能量几乎不具依赖性。该探测器也有均匀的方向响应，天然金刚石探测器的一边很短 ($< 0.5 \text{ mm}$)，但它的横向尺寸由于金刚石选择过程不同而有所变化。该探测器对剂量率的依赖性很显著，必须修正，还需要进行大量的预照射。应小心确保其偏置电压设置正确，以免损坏该探测器。天然金刚石探测器现在已不再商售，已被人工化学气相沉积制备 (CVD) 的金刚石探测器所取代。后者不需要偏置电压，现已证明这种人工制备的金刚石探测器很适合用于小野剂量测量，但由于其与水的物理密度差异，当射野小于 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 时，需使用输出因子修正。
- g) 塑料有机闪烁体探测器，其原理基于在照射期间闪烁体产生的光，然后将产生的光通过光纤传送到辐射室外的光电倍增管。在治疗范围内，闪烁体探测器对水吸收剂量响应通常表现为线性。各种研究表明，在小野测量中，塑料有机闪烁体探测器的扰动修正因子基本是接近一致的。该探测器在电子密度和原子组成方面几乎水等效。通常，在临床使用射束能量范围内 (包括 keV 区域)，该探测器对水的质能阻止本领和质能吸收系数对比差异在 $\pm 2\%$ 以内。闪烁体探测器响应几乎不依赖于能量，可直接用于相对剂量测量。塑料有机闪烁体探测器可制造得很小 (大约 1 mm^3 甚至更小)，并且其敏感性符合临床剂量测量要求。使用塑料闪烁体探测器时，最复杂的是要修正产生于光纤中的切伦科夫辐射。在不同的修正方法中，光谱过滤法和空核纤维的应用被证明是最成功的方法。塑料闪烁体的信噪比通常很低，并且其响应随累积剂量增加而降低。但由于其空间分辨率高，能量依赖性变化小，尺寸小，塑料闪烁体探测器可用于小野剂量学。
- h) 胶片剂量仪和辐射自显影胶片，由于其在二维平面上具有优越的空间分辨率，在小野剂量学中颇具吸引力，但使用时需小心谨慎。胶片的吸收剂量范围有限，并且具有能量依赖性和方向依赖性。由于其对低能光子的高敏感性，它们在射野外对水低吸收剂量水平表现出过响应。应用胶片精确剂量测量的关键在于仔细控制胶片的处理过程和读出过程，使用辐射自显影胶片便可很好的解决这一问题，这种胶片自显影，不需要化学处理就可以获得吸收剂量分布图。辐射自显影胶片对周围环境光线不敏感，不需要暗室操作，但它对紫外辐射很敏感。对 MV 级射束，辐射自显影胶片几乎组织等效，且表现出低能量依赖性。然而在 KV 级 X 射线范围，辐

射自显影胶片根据其组成成分不同，表现出不同程度的能量依赖。辐射自显影胶片具有防水性能。辐射自显影胶片能用相匹配的（平板）扫描仪读出，读出过程需对水吸收剂量精确校准，包括非均匀性空间响应校准，扫描仪的响应校准和胶片信号方向依赖性校准。胶片信号在辐照之后的几小时内持续产生，因此胶片应在照射后用和校准胶片同样的时间间隔扫描。有些文章报导了胶片的一些其他缺点，包括胶片暗化，温度敏感性响应等。相比于普通胶片，辐射自显影胶片的优点为空间分辨率高，防水，对光不敏感，不需要胶片的化学处理。推荐使用辐射自显影胶片测量小野横向剂量分布，半影和输出因子，在这些测量中，射线质的成分可能发生变化，这会影响输出因子的测量。

- i) 电子射野成像系统(electronic portal image device, EPID)，直线加速器上配备的 MV 级高速动态非晶硅平板探测器电子射野成像系统，可获取低剂量、高分辨率的二维影像，可用于治疗前/治疗中的二维影像采集、进行患者影像引导定位和靶区追踪、可作为平面剂量系统进行 IMRT 和 VMAT 的计划验证(portal dosimetry)，以及代替胶片完成设备质控的部分工作。EPID 可在机器手臂的精准操控下在三维方向上移动，可自动收回和展开，具有亚毫米的定位精度。目前 EPID 能够在亚毫米精度探测到影像离散信号的改变，基于辐射胶片的加速器 QA 影像也可通过 EPID 装置获得，因此 EPID 在一定程度上可替代胶片用于加速器等中心、钨门和 MLC 的 QA 检测，以实现小野治疗的几何精度的快速验证。需要注意，使用 EPID 进行几何精度 QA 时，要求测量精度能够达到或小于容差范围，并能够分析所有 MLC 叶片。在小野技术的剂量验证中，EPID 也是可靠的剂量验证工具。目前，有相关软件可转换 EPID MV 影像获得检测平面的剂量，与 TPS 计算的等中心及附近关键感兴趣区域的理论剂量比对，以验证等中心和感兴趣区域的剂量是否准确。需要指出的是，每台加速器 EPID 设备本身需定期进行 QA。在使用 EPID 进行几何和剂量的 QA 测量时，需明确确定测试内容的细节，如剂量率、能量、校准距离等参数。

- j) 其他探测器：MOSFET，TLD，OSLD，光致发光玻璃剂量仪（PRL），丙氨酸探测器。

金属氧化物场效应晶体管 MOSFET，通常用于体内剂量测量，由于其体积较小，它具有较高的空间分辨率。但 MOSFET 探测器表现出能量和方向依赖性，信噪比差，重复性差，寿命相对短。总之，相关报道不推荐它用于小野剂量测量。

热释光剂量仪 TLD，很适合用于吸收剂量核准和体内剂量测量。由于其组织等效性，最常用的医用 TLD 为 LiF:Mg, Ti, LiF:Mg, Cu, P 和 Li2B4O7:Mn。TLD 可制成各种形状（例如，粉末状、芯片状、微芯片状、棒状，带状）。LiF:Mg, Ti 是最常用的 TLD 材料之一，其在一定吸收剂量范围内呈线性响应，

也可能使吸收剂量增加 1~2 Gy(超线性行为)。由 TLD 读数得出水吸收剂量时,若测量时使用的射线质与校准时不同,则需进行非线性修正和其他修正,比如衰减和能量修正。为了准确测量小野剂量,并使其不确定性低于 2%或更低,需仔细地处理和控制在数据读出过程。现已证明,在小野测量中应用 TLD 需要细微的修正。

光释光探测器 OSLD,与 TLDs 原理相似,不过它使用激光激发而非热能,使其以冷光的形式释放捕获的能量。典型的 OSLD 为小芯片状(约 1 mm^3)、棒状、纳米点状掺杂碳的铝氧化物($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$),它们能够与光纤和激光读出系统配合用于在线读出,也可以与 TLD 一样作为离线剂量测量装置。OSLD 在很广的剂量率范围内和放射治疗中水的吸收剂量范围内表现出很高的敏感性。OSLD 表现出和 TLD 相似的线性,能量和剂量率依赖性。目前,某些机构可以很精确的使用 OSLD 剂量计。

光致发光玻璃剂量计(PRL),是一种累积型固体剂量计,它使用辐射光致发光现象来测量吸收剂量。它所用的材料是磷酸盐玻璃,形状为小玻璃棒状(例如,直径 1.5 mm,长度 8~12 mm)。当磷酸盐玻璃暴露在辐射中,银离子成为稳定的发光中心,信号由脉冲紫外激光激发读出,其读出面积小于剂量计大小。例如,在标准读取模式中,读出面积直径为 1.5 mm,长度为 6 mm;在高吸收剂量模式中,读出面积直径为 1.5 mm,长度为 0.6 mm。这在小野剂量测量中,使用起来非常方便。通常使用光电倍增管记录玻璃剂量计发出的橙色荧光,RPL 信号在读数期间不会被擦除,因此这种剂量计能够重复多次分析处理,并且测量数据可多次重复。据报道,光致发光玻璃剂量计有足够高的可重复性,在治疗吸收剂量范围内具有线性响应,空间分辨率好,从 keV 到 MeV 能量范围内具有平坦的能量响应,以及低的衰减性能。RPL 玻璃剂量计系统现已商售,已有作者报道将它用于小野剂量测量。

丙氨酸探测器,由于其接近水等效,常被认为是适合的剂量计,但可用于放射治疗辐射水平的丙氨酸芯片很大(例如典型尺寸为直径 5 mm,厚度 2.5 mm),因此容易出现较大的体积平均效应。当然,丙氨酸也可制成更小的芯片[例如,来自英国国家物理实验室(NPL)的直径 2.5 mm,常规长度 2.5 mm 的芯片,直径 1 mm,长度 3 mm 的迷你芯片]。使用丙氨酸剂量计的另一个问题是它的敏感性相对低,要获得低于 0.5%的重复性结果需要累计测量超过 10 Gy 的吸收剂量。但它的优点是密度和宏观相互作用系数与水很接近,所以其唯一的物质扰动为体积平均效应,这也可依据截面剂量分布进行计算。尽管在一般的医院没有配备这些必需的仪器,但一些标准实验室和大学可以提供相应的数据读取服务。表 19 列出了制造商提供的半导体探测器、金刚石探测器、液体电离室和塑料有机闪烁体探测器的规格参数。需要注意,本节讨论的“扫描半导体探测器”,与用在体内剂量测量的半导体探测器构造不同。

表 19 小野使用的硅半导体、金刚石探测器、液体电离室、有机闪烁体探测器的技术规格

探测器	灵敏体积 cm ³	灵敏体积形状 ^a	灵敏体积直径或边长 mm	灵敏体积厚度	参考点 ^b (至平坦面或定点, mm) ^c	防水情况
IBA PFD3G半导体	0.19	圆盘形	2.0	0.06	<0.9	Y
IBA EFD3G半导体	0.19	圆盘形	2.0	0.06	<0.9	N
IBA SFD半导体	0.017	圆盘形	0.6	0.06	<0.9	N
PTW 31018液体电离室 ^d	1.70	圆盘形	2.5	0.35	1.0	Y
PTW 60008半导体 ^d	0.03	圆盘形	1.13	0.03	2.0°	Y
PTW 60012半导体 ^d	0.03	圆盘形	1.13	0.03	0.8°	N
PTW 60016半导体	0.03	圆盘形	1.13	0.03	2.4°	Y
PTW 60017半导体	0.03	圆盘形	1.13	0.03	1.3°	N
PTW 60018半导体	0.30	圆盘形	1.13	0.25	1.3°	N
PTW 60003 金刚石	1~6	不固定	<4	0.1~0.4	1.0°	N
PTW 60019 CVD金刚石 ^d	0.004	圆盘形	2.2	0.001	1.0°	N
Sun Nuclear EDGE 探测器	0.019	正方形	0.8	0.03	0.3	Y
Exradin W1 (标准成像板)	2.40	圆柱形	1.0	3.0	1.5°	N

注：厂家声称的特性

^a “圆盘形”指探测器的直径大于厚度，“圆柱形”指探测器的直径小于厚度

^b 参考点位于探测器的平坦面，杆的方向与射线中心轴平行

^c PTW 探测器的说明，此数据指水等效厚度，而非几何厚度

^d 不再商售

^e 当从顶端照射时，位于有机闪烁体探测器的体积中心

综上所述，液体电离室、半导体探测器、金刚石探测器、塑料有机闪烁体探测器、辐射自显影胶片、TLD 和 OSL 剂量计适合于光子束小野相对剂量测量，建议临床测量中根据特定的测量目的和探测器的性能选择合适的探测器。

6.2.2 探测器的响应和修正

由于存在有效尺寸，探测器测量的是灵敏体积内平均响应，其灵敏体积大小会对所测截面的剂量分布产生一定影响，可使剂量分布的空间分辨率降低（信号被模糊），从而导致剂量分布的高梯度区展宽。

半导体探测器的有效尺寸通常小于 1 mm，可准确测量半影区中的每一个点。当探测器体积较大时，由于平均体积效应的影响，导致在靠近半影区的高端部分欠响应，而在半影区低端则会出现过响应，最终使半影区展宽。

在小野测量中，如果没有小体积探测器，可以采用反卷积方法解决半影展宽的问题。但是，反卷积方法由于其计算量较大，在临床测量中应尽量避免。

6.2.3 小野相对剂量测量的模体

- a) 水模体：水是最常用和最便捷的测量模体，注意在测量前需将水放置一段时间与室温平衡，从而减少电离室的热响应造成的误差。由于射束扫描通常需要数天甚至更长的时间，为抑制水藻生成可往水中添加少量的洗涤剂或氯气。另外，扫描期间水箱中的水会蒸发，因此，建议扫描期间定期检查水面的位置。水质应选择蒸馏水，若不具备条件可选纯净水。
- b) 固态模体：对于点剂量和非扫描数据（如输出因子、表面剂量、漏射/传输、楔形因子和托盘因子等），可通过水箱进行测量，但使用固体水等效模体（简称固体水）更为方便，同时应注意固体水的电子密度、阻止本领比（S）和能量吸收系数（ μ_{en}/ρ ）与水的差异，必要时应做额外修正。表 20 给出了部分材料的物理特性修正值。固体水必须含有与探测器形状相匹配的空腔，保证探测器能与其紧密贴合，可以使用 kV 级射线来进行拍片以验证其位置。测量前探测器需在固体水中放置一段时间，以使腔内的温度达到热平衡，并且应通过 CT 值来检测模体电子密度的不均匀性和伪影。

表 20 固体水材料的物理特性

材料, 厂商	颜色	密度 kg/m ³	$(\mu_{en}/\rho)_{med}^{water}$			
			6 MV	10MV	15 MV	18 MV
Polystyrene, NA, RPD	不透光	1050	1.035	1.037	1.049	1.059
Acrylic/PMMA, RPD	透明	1185	1.031	1.033	1.040	1.044
Solid water, RMI	褐色	1030	1.032	1.039	1.049	1.052
Plastic water, CIRS	淡紫色	1012	1.032	1.031	1.030	1.030
White water-RW-3, NA	白色	1045	1.035	1.036	1.049	1.056

6.2.4 建成帽

测量空气中准直器因子或机头散射因子时需使用建成帽或微型模体。制造商提供的建成帽在其额定的能量下并不能完全地消除电子污染。AAPM TG-74 推荐了一种微型模体，只要射野将其完全覆盖住，它就能建立电子平衡，同时还可消除电子污染。

对于小野，如果必须使用完全水等效的微型模体，可以使用扩展距离的方法（例如源到电离室的距离 300 cm）测量准直器因子（Sc）。AAPM TG-74 建议使用金属材质的微型模体在等中心处测量 Sc。因为它尺寸较小，在应用中能够提供更加合适的修正因子。在 Sc 测量中，选足够厚的建成帽非常重要，AAPM TG-74 报告对此有更为详细的描述和建议。

6.3 测量前加速器的质控

6.3.1 加速器验收测试

在小野剂量测量前，首先需要对加速器进行验收测试，以保证加速器处于正常工作状态并满足小野剂量测量的精度要求。对于加速器的验收测试(acceptance test)，厂家通常会给出验收操作指导手册，并在手册中给出剂量、机械精度等各项测试指标的允许范围。验收测试和临床试运行(commissioning)中加速器性能测试，包括射束性能稳定性的剂量学测量、机械功能和精度等都可作为加速器质控的基准值。治疗设备的各项测试指标的可接受容差，必须根据临床治疗的剂量学意义来判断。对于提供小野技术的治疗设备，多项测试指标的精度要求更为严格。此外，小野的剂量精度不仅取决于加速器的性能，还依赖于治疗流程中的所有环节。附录 B 给出了 AAPM TG142 号报告对加速器的验收和质控要求。

对于小野治疗技术，在加速器验收以及验收后为确保加速器性能一致性的日常 QA 中，采用的质控方法需要考虑与小野相关的射野定义和设置等问题。为了方便后续的日常质控工作，在机器验收时，需要结合实际临床需求，做好小野的射野大小定义和允许误差等。

AAPM-TG142 报告对所有治疗类型（IMRT、non-IMRT 和 SRS/SRT）直线加速器的准直器和机架旋转中心的容差均建议为 ± 1 mm；而对于机械和辐射等中心一致性的容差，建议 IMRT 和非 IMRT 技术为 ± 2 mm，SRS/SBRT 技术为 ± 1 mm。辐射等中心与机械等中心的一致性在厂家产品的规格表、厂家统一的用户验收手册、招标文件、应标文件、合同、国家相关标准等文件中都有体现，为取得最小的偏差，建议制造商、安装工程师与医院充分协商，在安装、调试、验收的每个环节，医院物理师都能提前介入。

6.3.1.1 源焦点大小与位置

某些 TPS 对小野建模需要小野光束源的尺寸信息，一些现代直线加速器的焦点特征可以在文献中找到。有研究对瓦里安直线加速器的源特征进行了两年的测试，发现相同设计的加速器焦点特征的稳定性很高，而不同设计机型的焦点特征差距较大，即机型的设计是决定焦点特征的最关键因素。

在一些直线加速器中，焦点的尺寸和/或位置随着射线能量的不同而变化，并且可能随着时间和机架旋转而改变。经常使用小射野时，最好定期（每年）对源进行稳定性检查。使用现有设备和工具，有多种方法用来测量确定焦点的特征，如窄准直器法（slit collimator method）、解卷积技术（deconvolution technique）、输出因子分析法（analysis of output factors）、栅野法（grid field method）等。

6.3.1.2 准直器的校准与质控

在小野测量之前，需要对用于定义射野的准直器系统（用于立体定向手术的特殊准直器、用于 IMRT 的标准的准直器和 MLCs）进行精确的检查和校准，要求允许偏离基线校准容差为 ± 1 mm。AAPM TG142 号报告对调强放疗中非对称准直器到位精度要求为 1 mm。如果小野数据采集的目的是为了导入或配置治疗计划系统中的加速器模型或机器跳数核查软件，则在测量前首先需要进行准直器的校准验证，建议准直器的校准应该在小野时进行。虽然对于大野，在测量截面剂量曲线前检查准直器形成的光野大小与辐射野的可重合性即可。但是对于小野的截面剂量曲线测量，一侧准直器的到位误差不能由对侧准直器相同大小相反方向的到位误差进行补偿。因此，所有方向的准直器都应该在零位进行验证。由此，在试运行时需要建立机械轴（机架和准直器旋转轴）和辐射束轴的相互关系。相对于大野，小野的辐射束轴与准直器旋转轴一致性的容差应更加严格。对于大野，如果用光野校准准直器位置，零位的校准应始终与辐射野保持一致，以避免光源位置和准直器表面反射，对射野边缘产生不确定性。对于小野，用半宽高（FWHM）定义射野大小，可用于试运行后的日常 QA 中，应注意，这并不代表“校准野大小”。对于日常 QA 中的小野剂量测量，应使用相同的测量仪器和适用于小野半影特性的测量仪器，否则其辐射野半宽高位置将会发生改变。

6.3.1.3 MLC 的校准与质控

利用栅栏野（picket fence）测试，能定性评估 MLC 位置精确度，建议每周通过胶片或 EPID 进行检测，而月检测建议增加不同机架角下的叶片到位精度测试，以考虑重力对叶片支架系统的影响。对于某些常规加速器，单个 MLC 叶片的重复性可以保持在 0.2 mm 以内，单侧 MLC 组与准直器旋转轴的偏差

保持在 0.25 mm 以内。叶片弧形端面效应可能对 IMRT 的小射野、非对称的小子野的半影以及射野尺寸校准有影响。表 21 列出了直线加速器 MLC 的质控项目及方法。

表 21 直线加速器 MLC 质控项目及方法

项目	容差
周检（IMRT 设备）	
定性检查(如：分野匹配，即“picket fence”，栅栏野)	目检可识别的偏差，如叶片间透射的增加
月检	
叶片设置与辐射野偏差（两个不同大小的射野）（非 IMRT 设备）	2 mm
运动速度（IMRT）	叶片速度误差<0.5 cm/s
叶片位置精确度（IMRT）	四个主要机架角度下，IMRT 野的叶片位移偏差为 1 mm
年检	
MLC 穿透因子（叶片下和叶片间的平均值），所有能量检测	相对基准值 $\pm 0.5\%$
叶片位置的重复性	± 1.0 mm
MLC 星型野	≤ 1.0 mm 半径
光野和辐射野的一致性（所有能量）	± 2.0 mm
静态调强测试	统计叶片到位精度，最大误差均方根<0.35 cm，95%的叶片偏差直方图<0.35 cm
动态调强(四个机架角)测试	统计叶片到位精度，最大误差均方根<0.35 cm，95%的叶片偏差直方图<0.35 cm

IMRT 治疗剂量不确定的主要因素之一是由叶片位置不准确引起的，包括叶片位置误差的影响、相对叶片之间间隙宽度（是 IMRT 剂量递送最敏感参数）以及叶片间隙位置。首先应该了解 MLC 叶片的位置误差来源，并选择合适的频率实施 QA 测试，在其对剂量产生偏差影响之前检测到这些机械问题。对于 IMRT，叶片会影响到靶区内的剂量，需要更严格的检测标准，相应的还有叶片相对位置间隙宽度的精确测试。

对于 DMLC，MLC 保持其特定叶片速度也是重要的参数。应注意由于 MLC 运行速度降低而增加的阻滞情况，可能会影响到治疗期间的叶片间隙宽度。可根据制造商提供的软件或工作日志文件来评估 MLC 的运行速度。阻滞可能表明污垢或油脂积聚，需要清理受影响叶片的侧面或更换电机。

由 MLC 和直线加速器控制系统之间的通信延迟造成的延迟效应也可能引起叶片位置误差。高剂量率模式下小 MU 和 DMLC 模式下阻滞将影响叶片预期位置，应该避免在维修模式下使用高剂量率以及动态模式下改变剂量率。

6.3.1.4 SRS 锥形筒的质控

与常规准直器及多叶准直器不同，锥形限束筒的质控有其特殊性，主要原因有以下几方面：①安装方式均为外置式，需要在使用时由操作人员现场安装，安装细节需要精确质控；②圆形射野大小已由厂家在制造过程中精确设定，“一筒一值”无法对其射野尺寸进行现场校准或调整；③部分限束筒形成的射野极小（7.5 mm、5 mm、4 mm 量级），常规工具和方法难以准确测量；④传统射野定义方式在小圆野的情况下不完全适用。因此，锥形限束筒在验收检测及日常使用中需要针对上述特点进行质控。

- a) 安装过程中的质控：锥形限束筒在安装过程中利用挡铅托盘或者楔形插槽外挂固定在机头上。由于上述装置在一定程度上存在可变量，因此建议在验收检测完成后在加速器机头相应位置作出标记以确保安装的精确可重复。安装完毕后还需要通过测量确保限束筒的中心与机械中心及束轴一致，具体测量方法可采用 Winston-Lutz 测试或 Star-Shot。
- b) 射野大小的确认：锥形限束筒所形成射野大小虽然已由制造商在制造过程中精确设定，但在现场可采用如下几种方法进行测量。其一，直接几何测量法，通过获取限束筒靠近等中心一侧的孔直径及其端面与等中心的距离可计算出等中心处形成射野的直径（如，Novalis 配套 Brainlab 标称的 30 mm 限束筒，物理直径 22 mm，下端面距离等中心 266.75 mm，其等中心射野直径为 $22 / (1000 - 266.75) / 1000 = 30$ mm；其二，EPID 测量法，利用 Portal Dosimetry 功能对安装并调整好的限束筒拍片获取其 50%等剂量线的直径（针对极小直径的筒可将 EPID 的位置展开至 180 cm 处充分利用瓦里安 aS1000 或 aS1200 的高分辨率——分别为 0.39 mm 和 0.34 mm 进行测量）；其三，扫描水箱测量法，主要利用半导体或宝石探测器针对较大孔径限束筒进行常规测量。
- c) 基于治疗计划系统的质控：锥形限束筒质控的核心是测量结果与计划系统计算结果的一致性验证，主要内容包括绝对剂量验证和剂量分布验证，对比计划系统计算输出结果与实际测量结果。

6.4 三维水箱设置

三维水箱需要进行周期性的质量保证或至少在使用之前进行检查，以确保每个臂的自由运动以及 x 、 y 、 z 轴和对角线的运动控制。做长距离运动时，需要检查其精度和线性。在进行射束数据的验收采集之前，应先检查水箱的物理环境如泄漏、开裂和机械稳定性；同时也需要检查连接电缆的质量，如漏电流和重复性。对于小野数据的采集，可能需要用户将新的附件（探测器、电缆、连接器、适配器）连接到现有的水箱，用户需要验证各部件之间是否能相互匹配，以提高采集数据的可靠性。

6.5 噪声的来源与抑制

信噪比与采集数据的质量息息相关，噪声的来源很多，数据采集者应根据情况采用相应的措施保持高的信噪比。

当扫描速度过快时，扫描臂的移动引起水面的波动，从而导致采集的数据存在扫描噪声。当使用小体积电离室采集小野数据时尤其应当关注扫描速度，小体积电离室收集信号能力较弱，较慢的扫描速度有助于抑制电离室信号的随机噪声。

射频干扰噪声，也称作电磁噪声，是由外部干扰源通过电磁感应，静电耦合或传导影响电路。当整个测量系统进行了射频屏蔽时，探测器信号将不会受到射频的干扰：即电离室或半导体的外壳、电缆外部编织屏蔽、连接适配器、静电计连接器以及静电计底盘都完好无损。简单的导电屏蔽测试可通过在干燥环境中，在部件附近挥动手臂实现。另外，对部件进行触摸，测量响应的改变可能表示连接存在问题。

在小野或射野边缘外进行采集数据时，漏电流的信号可能会超过测量信号，应引起重视。漏电流噪声通常取决于电缆的质量和现场操作、射束中电缆的长度和连接器。大多数制造商提供的电缆泄漏水平维持在 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ A。一些静电计具有去除本底的功能以抵消漏电流，如果具备该功能，应当在测量前消除漏电流信号。

严重扭曲和弯曲电缆可能会导致严重的电缆噪声，扫描之前应当对电缆逐步检查，确保没有扭曲、打结和外皮破损等现象存在，尤其注意淹没到水中的电缆。

6.6 探测器位置的确定

在小范围内精确地、可重复地测量小野截面剂量曲线，不仅需要探测器在其大小和组成方面符合要求，而且还需要对加速器及探测器进行更严格的 QA，包括验证钨门和准直器位置，射束和水模体的对齐情况，扫描系统与射束的相对位置，探测器与静电计等功能是否正常等。测量截面剂量曲线和射野输出因子时，需要在三维水箱中精确地摆放探测器。对于使用非防水的间接探测器进行输出因子的测量时，在固体水等效塑料模体中进行测量可能更方便。

6.6.1 探测器方向

探测器放置方向对测量截面剂量曲线的形状或射野输出因子有一定的影响。一般而言，应该尽量保证垂直于扫描方向的探测器灵敏体积截面最小。有些情况，例如，探测器结构及中心杆位置的不对称性等需要特殊考虑。

一些专门为小野相对剂量测量设计的微电离室，由于其体积很小，对杆和电缆的照射尤其敏感，为了尽量减小这种影响，应将电离室以平行于束轴方向的方式摆放，以确保其能够被均匀地照射。在满足电离室移动的情况下尽可能的减少受照电缆的长度。避免将电离室杆的方向垂直于射束方向而与扫描方向平行。

扫描型半导体探测器比电离室有更强的信号采集能力和更高的空间分辨率，被广泛应用于截面剂量曲线的测量。屏蔽型和非屏蔽型半导体探测器都有圆盘形的有效体积，对于直径大于侧向厚度的半导体，建议半导体有效体积的圆形截面与光束轴平行，以便更好地利用探测器的空间分辨率。但是应当注意这种方式可能会由于PN结或侧向材料分配不均匀产生不对称的截面剂量曲线。表22所示为测量小野光子束相对剂量时，探测器与射束中心轴的相对位置。

表 22 测量小野光子束相对剂量时，探测器与射束中心轴的相对位置

探测器类型	探测器参考位置	截面剂量分布	射野输出因子
微型圆柱形电离室	中心轴	平行或垂直	垂直
液体电离室	中心轴	垂直	平行
屏蔽型硅半导体	中心轴	平行	平行
非屏蔽型硅半导体	中心轴	平行	平行
金刚石探测器	中心轴	平行	平行
辐射显色胶片	胶片表面	垂直	垂直

6.6.2 探测器的参考点

探测器参考点应放置在参考深度。探测器的参考点取决于探测器相对于射束轴的方向。圆柱电离室在垂直方向(探测器的主轴垂直于射束轴)，参考点在电离室轴上的电离室空腔的体积中心(中心轴上的位置通常由制造商指定，从电离室的末端计算)，有时有基准标记指示。对于圆柱形电离室在平行方向(探测器的主轴与射束轴平行)，则参考点在电离室空腔的尖端。对于固体探测器，探测器杆平行于射束轴时，探测器的参考点通常由制造商使用圆圈标记。对于垂直方向(探测器的主轴与射束轴垂直)，参考点为探测器的中心。

6.6.3 探测器位置确定

小野剂量测量的关键，是将探测器位置与射束中心精确地对齐，射束中心由截面剂量曲线的最大位置和陡峭的梯度确定。图 9 为测量小野输出因子，激光束或模拟灯光野出现 1 mm 误差的示意图。相比于射野宽度为 5 mm 的射束中心轴出现 1 mm 偏差的激光线(实竖线)，可能会对测量的最大值产生一个不可忽略的低估。在激光束或模拟光野初始对准后，需要在测量深度处对测量截面剂量曲线进一步细化校准。

6.6.3.1 实时移动扫描探测器位置确定

实时移动扫描探测器位置，可以利用扫描系统实现探测器与射束中心轴的对准。应在低速条件下进行移动扫描，并根据射野大小选择合适的步长(最小射野的步长为 0.1 mm)，同时应注意扫描系统滞后的潜在影响。假设测量的截面曲线是对称的，可以根据 50%截面剂量曲线的中心或截面剂量曲线的最大位置校准探测器位置，即半高宽 (FWHM) 方法。鉴于准直器位置微小变化，会导致射野中心位置剂量发生较大的变化，每次移动准直器位置或者重新设置射野大小后，都要重新进行校准探测器位置程序和半高宽 (FWHM) 测试。探测器位置校准必须在两个正交方向上进行，考虑到微小偏差的可能性，可应用迭代过程来确定射野的中心。

注意，要测量沿射束轴方向上的深度剂量分布，必须在不同的深度测量射野中心，即模体中心和移动扫描探测器应始终与射束中心轴 (CAX 校正) 精确对准。

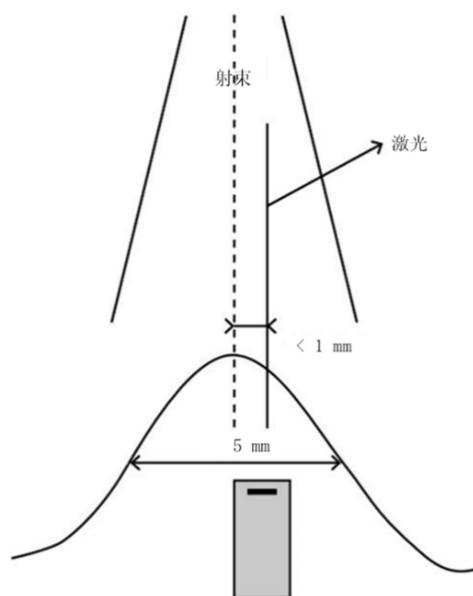


图 9 临床摆位精度示意图

6.6.3.2 探测器侧向位置离线确定

探测器位置离线确定的主要问题是，不能即刻观察到辐射信号对确定探测器位置的作用，因此，探测器本身不能用来探测射野的中心。对于基于 MLC 的加速器，每次移动准直器重新设置射野后，需要重新进行校准探测器位置程序和半高宽（FWHM）测试。下面介绍三种离线确定探测器位置的方法。

- a) 使用附加装置确定探测器位置：使用扫描模体在扫描臂上的附加装置，用离线检测器去替代实时扫描探测器。要求对实时探测器和离线检测器支架加工非常精确，确保两个检测器的参考点精确定位在同一位置。通常，辅助部件(例如，电离室定位销)可以方便地将探测器插入到支撑件中，从而达到探测器位置精度要求。
- b) 使用胶片确定探测器位置：使用胶片确定探测器位置特别适用于固体水等效模体。在确定 SDD 条件下，以插入体模板的方式初步确定探测器的侧向位置，然后基于激光灯或模拟光野使其与射束轴对齐。将胶片夹在已插入探测器的体模板下方，以便测定体模的侧向偏移量。为了增强对比度，可在参考点的位置插入由高原子序数材料或高原子序数材料构成的虚拟探测器。重复该过程直到处于允许的容差范围之内。然后插入探测器并且在包含探测器的体模板的顶部添加一定数量的体模板从而使探测器的参考点处于测量深度。在增加或者减少体模板时，需充分保证体模板的侧向位置准确。除了以上步骤外，在每次照射时，要在包含探测器的模体后方插入一张显色胶片，从而使探测器轮廓能在曝光的胶片上清晰呈现。基于测量的截面剂量曲线和探测器相对于射束的位置，对每个探测器回顾性进行体积平均效应修正，理想情况下，应有一为此目的而特殊设计的插板，每次照射时就不需要移去包含探测器的体模板。
- c) 使用 EPID 确定探测器位置：使用 EPID 确定探测器位置适用于水模体和固体水等效模体。在确定 SDD 条件下，以插入水模体的方式初步确定探测器的横向位置，然后基于激光灯和模拟光野使其与射束轴对齐。使用位于模体后方的 EPID 获取图像以便量化探测器在扫描系统或固体模体上侧向偏移的大小。为增强对比度，可以在参考点的位置插入由高原子序数材料或高原子序数材料构成的虚拟探测器。重复该过程直到处于允许的容差范围之内。然后将探测器插入到扫描系统的探测器支架上并且移动到水模体或固体模体上事先确定的测量点。在包含探测器的体模板的顶部或者前面添加一定数量的体模板从而使电离室的参考点位于测量深度。在移去或增加体模板时，需充分保证体模板的侧向位置准确。EPID 图像通常没有足够的分辨率对每个探测器做平均体积修正。

6.7 SSD 或 SAD 的确定

射野输出因子、截面剂量曲线和参考射野吸收剂量的测量，均使用相同源皮距（SSD）或源轴距（SAD）。实际上，对于相对剂量测量，SSD 或 SAD 的精确度并不是非常重要，满足参考射野吸收剂量测量容差要求即可。

6.8 预测试

6.8.1 空气中预扫描

在首次使用新水箱以及每次加速器年度输出校准前应对测量系统进行预测试。连接好所有部件后，水箱中不加水，将射野探测器放置在等中心，将参考探测器放置在适当位置，以免与射野探测器相互干扰。扫描过程如果需要使用平衡帽则在空气中预扫描时安装平衡帽。在空气中进行 5 cm×5 cm 辐射野的扫描，扫描范围从-10 cm 到 10 cm（总共 20 cm）。有些扫描仪器会在参考通道没有信号的情况下停止扫描，为保证预扫描顺利进行，需要根据说明书对扫描仪器的静电计控制器的设置进行必要的调整。

重复扫描，当探测器到达十字线时关闭射束。保存扫描，通过扫描仪器软件或导出的数据表格进行分析：

- a) 噪声：在截面剂量分布平坦区域（profile 的斜率等于零）计算标准差，为出束时噪声标准差。
- b) 信噪比：在截面剂量分布的平坦区域，标准偏差与平均值的比值。
- c) 时间常数：扫描测量值从关闭射束下降到无辐射值所需的时间。这与系统响应时间有关，包括任何残余的探测器电流。
- d) 漏电流：在非辐射平坦区域，计算非辐射的平均值和标准差。
- e) 静电计增益：如果静电计没有增益/量程的自动切换，非辐射区域标准偏差应近似等于上述平坦辐射区域标准差。非辐射平均值即为静电计的增益，应从所有测量中减掉（在相同增益下）。
- f) 极性：如果静电计是双极性，可能有负值或负平均值。这是正常现象，平均值负号应该保留，减去一个负值则实际上是增加一个正值。
- g) 无效值：如果非照射值（本底）为零且从不变化，可能在数据采集过程中存在零点抑制，这将会导致半影区和尾部区域的测量错误。

6.8.2 水中预扫描

当探测器和电缆浸没在水箱中, 电缆外壳的破裂或探测器的任何漏电都可能导致扫描装置电路参数的变化, 并可能使测量结果发生改变。在不清楚连接器是否防水的情况下请勿将之放到水里。将探测器和电缆放到水中后, 最好在进行测试之前等待半小时或更长时间。重复与空气中预扫描相同的测试, 并确保上述参数接近一致, 噪声的标准差不应增加。再在所需的最大扫描深度重复之前的测试, 此时的信噪比是最低的, 该信噪比大于或等于已知的系统灵敏度。

6.8.3 饱和测试

5 cm×5 cm 照射野, 分别以最大和中等剂量率重复上述空气中预扫描程序, 对比截面剂量分布。

6.8.4 腔外体积

扫描探测器体积很小, 在这个体积之外, 连接器及电缆受到散射或原辐射(初级辐射)的照射后产生的电离, 会对扫描信号产生贡献, 这种效应称为腔外效应(extracamerall effect)。引起腔外效应的这部分体积不是恒定的, 因为其并非来源于具有较高收集效率的电离室。在饱和测试之后, 把扫描探测器从支架上取下, 并将其置于静电计附近。记录最大剂量率下射束开启和关闭时探测器的响应。探测器响应的任何变化是由腔外体积(气腔外部的体积/杂散体积)引起的。假设探测器体积明显小于腔外体积, 通过该响应与截面剂量曲线尾部信号判断腔外效应的影响。

6.8.5 能量响应测试

当使用半导体探测器进行 PDD 测量时, 应先将半导体探测器和大体积电离室进行基本的比对, 测量大照射野(40 cm×40 cm) 6 MV 光子束的 PDD, 对比分析获得半导体探测器的能量响应。假设电离室已经通过了其他所有测试, 大体积电离室(如 0.6 cm³) 扫描不受杆效应影响, 比较两者 Z_{max} 深度之后的 PDD 曲线, 若半导体探测器测得的 PDD 曲线较电离室 PDD 下降缓慢, 则表明能量响应发生改变。

6.9 截面剂量分布测量

测量截面剂量分布时探测器摆位如 6.6 节所述。准直类型与临床治疗中所用的准直类型相同, 例如, 锥形筒、准直器或多野准直器等。

设置扫描速度和步长, 应考虑以下三个问题: ①水面的波动最小(可通过室内摄像系统对准水面进行检查); ②对于小野, 在射束区域扫描速度采用最小值; ③步长选择应保证整个射束剖面有足够多的测量点(常规步长为 0.1 mm)。

建议使用参考探测器以修正在测量期间机器输出的瞬时变化,但是使用参考探测器时不能对射野探测器造成影响。常规截面剂量分布测量可将参考探测器放在射野边角区域,而小野需要使用穿透型的探测器放置在加速器机头下方,或者是使用大面积厚壁平板电离室放置在模体内射野探测器后方。

为减小探测器小信号的腔外效应,探测器的放置方向需谨慎选择。图 10 和图 11 为电离室和固态探测器(如半导体探测器和金刚石探测器)的放置方向方位图,箭头表示电离室在纸平面上的扫描方向,而空心圆和叉圆表示垂直于纸面的扫描方向。需注意,因为电缆中产生的切伦科夫辐射,有机闪烁体探测器需按图 11 (b) 方法放置。测量中最好能使用至少两种不同类型的探测器,并对不同类型探测器测得的结果进行比较,以确保射束截面剂量分布曲线测量的可靠性。

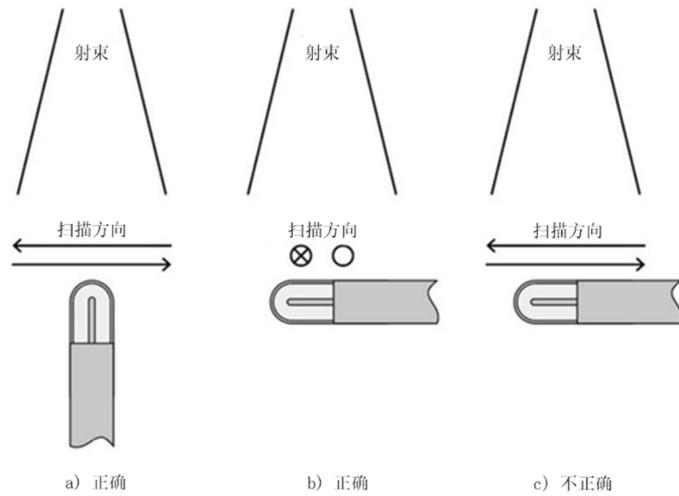


图 10 用于测量截面剂量分布曲线时电离室的可用方向

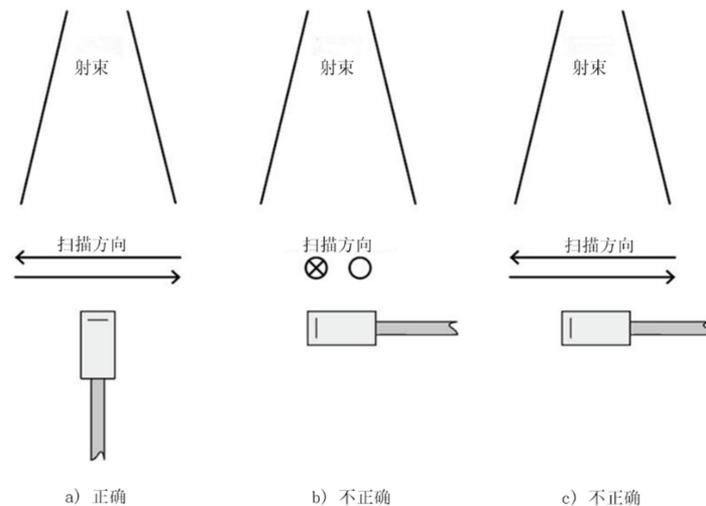


图 11 用于测量截面剂量分布曲线时固态探测器(半导体探测器、非晶硅)的可用方向

6.10 模体内射野输出因子的确定

6.10.1 参考条件

对临床射野 f_{clin} ，模体内射野输出因子测量的参考深度与使用机器特定射野 f_{msr} 进行测量的深度相同，高能光子的测量参考深度 Z_{ref} 为 10 g/cm^2 。注意，该实践规程不包含空气中射野输出因子的测定。

6.10.2 小野等效方形野大小的确定

为了给每个小野选择合适的输出修正因子，需要在枪靶方向和左右方向定义小野的半高宽 (FWHM)。

对枪靶方向和左右方向 FWHM 不对称的矩形小野，其等效方形野大小可由下式给出

$$S_{clin} = \sqrt{AB} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

A 和 B 分别对应枪靶方向和左右方向射野宽度，即在测量深度处的 FWHM

当 A/B 的值超出 0.7~1.4 范围（小野等效方形野边长 $< 0.6 \text{ cm}$ ）时，输出修正因子的不确定性将变大。

对 FWHM 为 r 的圆形小野

$$S_{clin} = r\sqrt{\pi} = 1.77r \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

r 为圆形野半径，为测量深度处，50%最大剂量水平半径的平均值

注意，小野等效方野 msr 的确定是基于相同的射野面积，而大野是基于相同光子散射贡献。

对临床剂量学而言，常常使用与 msr 野参考剂量有关的射野输出因子，这些因子也被称为总散射因子或相对剂量因子，定义为在给定深度处任何非参考野的吸收剂量与参考野的吸收剂量之比。对于传统的宽束而言，它可通过探测器的比值得到并且独立于射野的大小。然而，在小野剂量学中，射野输出因子不再等于探测器读数的比值，大多数情况下，探测器读数的比值需要乘以射野输出修正因子才能得到正确的射野输出因子。

射野输出因子用公式表示如下：

$$\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} = \frac{M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}}{M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}} k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}$ 和 $M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ 分别为临床射野和 msr 野的探测器读数（已修正）；

$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ 为探测器的输出修正因子。

在宽束中，半导体探测器表现出明显的能量依赖性，比如非屏蔽型二极管就表现出随射野大小的变化而出现的过线性响应和欠线性响应现象。而在小野中使用体积偏大的电离室探测器又会因体积平均效应使测量结果有较大的偏差。一种测量射野输出因子的方法是：在宽束中使用电离室测量直到体积平均效应出现，而在小野中，使用小型探测器（例如，二极管、金刚石探测器、液体电离室或有机闪烁体探测器）测量，小型探测器测量的输出因子应归一到能使用电离室时的最小野。在本实践规程中这种方法称为中间射野法，有时也称为“菊花链”法。

如果射野输出因子由中间射野法得到，即同时使用两个探测器测量射野输出因子，一个是电离室探测器，另一个是小野探测器（比如半导体探测器），选择一个尽可能小但对于电离室仍满足侧向电子平衡条件（探测器的外界到射野边界最小距离为 r_{LCPE} ），同时对于小野探测器又能减小能量依赖性的中间射野，则射野输出因子如下：

$$\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} = \left[\frac{M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}}{M_{Q_{int}}^{f_{int}}} k_{Q_{clin}, Q_{int}}^{f_{clin}, f_{int}} \right]_{det} \left[\frac{M_{Q_{int}}^{f_{int}}}{M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}} k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{int}, f_{msr}} \right]_{IC} \dots\dots (13)$$

式中：

$M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}$ 、 $M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ 和 $M_{Q_{int}}^{f_{int}}$ 分别为临床射野、msr野和中间射野的探测器读数（已修正）；

$k_{Q_{clin}, Q_{int}}^{f_{clin}, f_{int}}$ 和 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{int}, f_{msr}}$ 为探测器的输出修正因子。

“det”和“IC”分别表示小野探测器和电离室探测器，对电离室探测器，因中间射野仍满足侧向电子平衡条件， $\left[k_{Q_{int}, Q_{ref}}^{f_{int}, f_{ref}} \right]_{IC} = 1$ ，而 $\left[k_{Q_{clin}, Q_{int}}^{f_{clin}, f_{int}} \right]_{det}$ 可由式（14）计算：

$$\left[k_{Q_{clin}, Q_{int}}^{f_{clin}, f_{int}} \right]_{det} = \frac{\left[k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} \right]_{det}}{\left[k_{Q_{int}, Q_{msr}}^{f_{int}, f_{msr}} \right]_{det}} \dots\dots\dots (14)$$

而 $\left[k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} \right]_{det}$ 和 $\left[k_{Q_{int}, Q_{msr}}^{f_{int}, f_{msr}} \right]_{det}$ 的值可从 6.10.4 节查询。

6.10.3 注意事项

虽然射野输出因子的测定属于相对剂量测量，但电离室读数的修正仍然是非常重要的，因为通常整个测量过程时间比较长，温度、气压等可能发生变化，并且复合效应修正因子和极性修正因子与射野大小有关。另外还需注意的是，许多固体探测器也表现出对温度的依赖性，复合效应（或剂量率依赖性）也可能十分显著，并随射野输出改变而变化。

整个测量序列包括参考射野和非参考射野的测量,即参考射野的测量是在每个非参考射野测量前或者测量后完成的。整个过程非常耗时,而且并非都是实际临床情况。在两个参考射野的测量之间穿插不同大小的非参考射野的测量,需要保证射束的稳定性,从而能够修正射束的漂移,确保参考射野的测量读数不超出可接受的容差范围。

在临床治疗中,照射野序列可以用不同方式实现准直器的设置(从小射野开始或从大射野开始)。如果准直器控制系统允许,应该由以下两种测量方式得到的平均值作为治疗计划系统的射野输出因子:①准直器开到较大的射野,然后回到指定的射野;②准直器开到较小的射野,然后再回到指定的射野。这样做,可以由平均效应减小准直器的滞后影响。

6.10.4 射野输出修正因子表

表 23 至表 27 分别给出了伽马刀、赛博刀、Tomo 以及能量为 6 MV 和 10 MV 的 WFF 和 FFF 直线加速器的探测器射野输出修正因子。

表 23 伽马刀 PERFEXION 机型不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin},Q_{msr}}^{f_{clin},f_{msr}}$

型号	类别	4 mm Ø	8 mm Ø	16 mm Ø
PTW T31006	电离室	— ^a	1.025	1.000
PTW T31014	电离室	— ^a	1.030	1.000
PTW T31015	电离室	— ^a	— ^a	1.000
PTW T31016	电离室 (PinPoint 3D)	— ^a	1.032	1.000
PTW T60008	二极管 (光子/屏蔽)	0.951	0.971	1.000
PTW T60012	二极管 (电子/非屏蔽)	0.965	0.996	1.000
PTW T60016	二极管 (光子/屏蔽)	0.958	0.981	1.000
PTW T60017	二极管 (电子/非屏蔽)	0.961	0.997	1.000
PTW T60003	钻石探测器 (天然)	— ^a	1.006	1.000
PTW T60019	钻石探测器 (合成)	0.993	1.005	1.000
^a 较大的校正系数使该腔室不适合使用此准直器进行输出测量				

表 24 赛博刀不同射野大小的射野输出修正因子 $K_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$

测量设备	射野圆直径					
	5.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
电离室						
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.010
Exradin A16 micro	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003	1.007
IBA/Wellhöfer CC01	1.000	1.001	1.001	1.001	1.001	1.002
IBA/Wellhäfer CC04	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003	1.009
PTW 31002 Flexible1	1.000	1.001	1.002	1.004	1.009	1.022
PTW 31010 Semiflex	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003	1.008
PTW 31014 PinPoint1	1.000	1.000	1.001	1.002	1.004	1.008
PTW 31016 PinPoint 3D	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.004
固体探测器						
IBA PFD3G shielded diode	1.000	0.999	0.998	0.996	0.993	0.989
IBA EFD3G unshielded diode	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.000
IBA SFD unshielded diode (stereotactic)	1.001	1.002	1.003	1.003	1.004	1.003
PTW 60008 shielded diode	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.991
PTW 60012 unshielded diode	1.001	1.001	1.002	1.001	1.001	0.999
PTW 60016 shielded diode	1.000	0.999	0.998	0.996	0.993	0.987
PTW 60017 unshielded diode	1.000	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997
PTW60018 unshielded diode (stereotactic)	1.000	1.001	1.000	1.000	0.998	0.995
PTW 60003 natural diamond	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998
Exradin A16 micro	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.998
IBA/Wellhöfer CC01	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998	0.995
PTW 31016 PinPoint3D	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 24 赛博刀不同射野大小的射野输出修正因子 $K_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (续)

测量设备	射野圆直径 (cm)					
	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5
电离室						
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.026	1.06	1.047	—	—	—
Exradin A16 micro	1.014	1.021	1.032	1.050	—	—
IBA/Wellhöfer CC01	1.003	1.005	1.009	1.016	1.031	1.043
IBA/Wellhäfer CC04	1.009	1.020	1.035	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15	1.027	—	—	—	—	—
PTW 31002 Flexible1	—	—	—	—	—	—
PTW 31010 Semiflex	1.022	1.043	—	—	—	—
PTW 31014 PinPoint1	1.019	1.032	1.044	—	—	—
PTW 31016 PinPoint 3D	1.011	1.021	1.031	1.046	—	—
固体探测器						
IBA PFD3G shielded diode	0.983	0.978	0.974	0.969	0.963	0.959
IBA EFD3G unshielded diode	0.997	0.994	0.991	0.987	0.981	0.978
IBA SFD unshielded diode (stereotactic)	1.000	0.996	0.991	0.983	0.972	0.965
PTW 60008 shielded diode	0.981	0.972	0.962	0.951	—	—
PTW 60012 unshielded diode	0.994	0.989	0.984	0.977	0.968	0.962
PTW 60016 shielded diode	0.978	0.969	0.962	0.953	—	—
PTW 60017 unshielded diode	0.992	0.987	0.981	0.975	0.966	0.960
PTW60018 unshielded diode (stereotactic)	0.990	0.984	0.979	0.973	0.965	0.961
PTW 60003 natural diamond	1.000	1.001	1.003	1.009	1.023	1.037
Exradin A14SL micro Shonka slimline	0.995	0.991	0.988	0.984	0.978	0.975
Exradin A16 micro	0.998	0.998	0.999	1.002	1.010	1.019
IBA/Wellhöfer CC01	0.989	0.982	0.975	0.966	0.954	1.001
PTW 31016 PinPoint3D	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
注：其中 msr 射野直径为 6 厘米，参考深度为 1.5 厘米						

表 25 Tomo 治疗机不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$

探测器	等效方野尺寸 (cm), S _{clin}					
	5.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
Exradin A16 micro 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.002	1.003	1.004	1.005	1.005	1.006
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.009
PTW 31002 Flexible 电离室	1.000	1.001	1.001	1.004	1.009	1.023
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.008
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.000	1.000	1.001	1.001	1.004	1.009
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	0.999	0.998	0.997	0.995	0.992	0.986
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.005	1.007	1.008	1.009	1.009	1.009
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.009	1.013	1.015	1.017	1.018	1.019
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	0.999	0.998	0.995	0.990
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.005	1.008	1.009	1.010	1.010	1.008
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	1.000	0.999	0.998	0.995	0.991	0.984
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	1.004	1.005	1.006	1.006	1.006	1.003
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.004	1.005	1.005	1.005	1.004	1.001
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
PTW 60019 人工金刚石	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997
PTW 31018 液体电离室	0.997	0.995	0.994	0.994	0.993	0.992
Sun Nuclear EDGE 探测器	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998	0.994
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 25 Tomo 治疗机不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (续)

探测器	等效方野大小, S_{clin} cm						
	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.010	1.027	—	—	—	—	—
Exradin A16 micro 电离室	1.008	1.017	1.027	1.043	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.007	1.01	1.014	1.024	1.044	—	—
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.009	1.022	1.041	—	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.030	—	—	—	—	—	—
PTW 31002 Flexible 电离室	—	—	—	—	—	—	—
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.025	—	—	—	—	—	—
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.023	1.041	—	—	—	—	—
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.013	1.025	1.039	—	—	—	—
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	0.976	0.968	0.961	0.952	—	—	—
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.006	1.002	0.997	0.991	0.982	0.976	0.969
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.017	1.012	1.006	0.995	0.978	0.966	0.951
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	0.977	0.962	—	—	—	—	—
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.003	0.996	0.988	0.978	0.963	0.953	—
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	0.970	0.956	—	—	—	—	—
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	0.997	0.989	0.981	0.971	0.956	—	—
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	0.993	0.985	0.977	0.968	0.955	—	—
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.001	1.003	1.009	1.026	1.045	—
PTW 60019 人工金刚石	0.993	0.989	0.984	0.977	0.968	0.962	0.955
PTW 31018 液体电离室	0.991	0.991	0.992	0.994	1.003	1.015	1.038
Sun Nuclear EDGE 探测器	0.986	0.976	0.966	0.951	—	—	—
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

注: msr 射野尺寸: 5cm×10cm, 标准深度: 10cm

表 26 6 MV WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$

(参考深度 10 cm)

探测器	等效方野大小 (cm), S_{clin}					
	8.0	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0
Exradin A14SL micro Shonka slimline 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
Exradin A16 micro 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.002	1.004	1.007	1.008	1.008	1.009
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.009
PTW 31002 Flexible 电离室	1.000	1.000	1.001	1.004	1.009	1.023
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.008
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.000	1.000	1.000	1.002	1.004	1.009
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.004
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	0.998	0.995	0.992	0.986
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.005	1.009	1.014	1.016	1.016	1.015
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.008	1.017	1.025	1.029	1.031	1.032
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	1.000	0.998	0.995	0.990
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.005	1.010	1.015	1.017	1.017	1.016
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	0.999	0.995	0.991	0.984
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	1.004	1.007	1.010	1.011	1.011	1.008
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.004	1.007	1.010	1.011	1.009	1.006
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
PTW 60019 人工金刚石	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997
PTW 31018 液体电离室	0.997	0.994	0.991	0.989	0.988	0.988
Sun Nuclear EDGE 探测器	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998	0.994
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 26 6 MV WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (续)

(参考深度 10 cm)

探测器	等效方野大小 (cm), S_{clin}						
	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
Exradin A14SL micro Shonka slimline 电离室	1.010	1.027	—	—	—	—	—
Exradin A16 micro 电离室	1.008	1.017	1.027	1.043	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.011	1.013	1.018	1.027	1.047	—	—
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.009	1.022	1.041	—	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.030	—	—	—	—	—	—
PTW 31002 Flexible 电离室	—	—	—	—	—	—	—
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.025	—	—	—	—	—	—
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.023	1.041	—	—	—	—	—
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.013	1.025	1.039	—	—	—	—
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	0.976	0.968	0.961	0.952	—	—	—
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.012	1.008	1.004	0.998	0.988	0.983	0.976
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.030	1.025	1.018	1.007	0.990	0.978	0.963
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	0.977	0.962	—	—	—	—	—
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.010	1.003	0.996	0.985	0.970	0.960	—
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	0.970	0.956	—	—	—	—	—
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	1.002	0.994	0.986	0.976	0.961	0.952	—
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	0.998	0.990	0.983	0.973	0.960	0.952	—
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.001	1.003	1.009	1.026	1.045	—
PTW 60019 人工金刚石	0.993	0.989	0.984	0.977	0.968	0.962	0.955
PTW 31018 液体电离室	0.987	0.987	0.987	0.990	0.999	1.011	1.033
Sun Nuclear EDGE 探测器	0.986	0.976	0.966	0.951	—	—	—
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 27 10 MV-WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (参考深度 10 cm)

探测器	等效方野大小, S_{clin} (cm)					
	8.0	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
Exradin A16 micro 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.003
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.001	1.003	1.004	1.005	1.005	1.006
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.009
PTW 31002 Flexible 电离室	1.000	1.000	1.001	1.004	1.009	1.023
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.008
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.000	1.000	1.000	1.002	1.004	1.009
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.004
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	0.998	0.995	0.992	0.986
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.003	1.005	1.008	1.009	1.009	1.008
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.005	1.010	1.015	1.018	1.018	1.018
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	1.000	0.998	0.995	0.990
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.003	1.006	1.009	1.010	1.010	1.008
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	1.000	1.000	0.999	0.995	0.991	0.984
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	1.002	1.004	1.006	1.006	1.005	1.003
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.002	1.004	1.006	1.006	1.004	1.000
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
PTW 60019 人工金刚石	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997
PTW 31018 液体电离室	0.998	0.996	0.994	0.994	0.993	0.993
Sun Nuclear EDGE 探测器	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998	0.994
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 27 10 MV-WFF 射束和 FFF 射束不同射野大小的射野输出修正因子 $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ (参考深度 10 cm) (续)

探测器	等效方野大小, S_{clin} (cm)						
	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
Exradin A14SL micro Shonka slimline	1.010	1.027	—	—	—	—	—
Exradin A16 micro 电离室	1.008	1.017	1.027	1.043	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC01 电离室	1.007	1.009	1.014	1.023	1.043	—	—
IBA/Wellhöfer CC04 电离室	1.009	1.022	1.041	—	—	—	—
IBA/Wellhöfer CC13/IC10/IC15 电离室	1.030	—	—	—	—	—	—
PTW 31002 Flexible 电离室	—	—	—	—	—	—	—
PTW 31010 Semiflex 电离室	1.025	—	—	—	—	—	—
PTW 31014 PinPoint 电离室	1.023	1.041	—	—	—	—	—
PTW 31016 PinPoint 3D 电离室	1.013	1.025	1.039	—	—	—	—
IBA PFD3G 屏蔽型半导体探测器	0.976	0.968	0.961	0.952	—	—	—
IBA EFD3G 非屏蔽型半导体探测器	1.005	1.000	0.996	0.989	0.980	0.974	0.967
IBA SFD 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	1.015	1.010	1.003	0.992	0.974	0.962	—
PTW 60008 屏蔽型半导体探测器	0.977	0.962	—	—	—	—	—
PTW 60012 非屏蔽型半导体探测器	1.002	0.994	0.986	0.976	0.960	0.951	—
PTW 60016 屏蔽型半导体探测器	0.970	0.956	—	—	—	—	—
PTW 60017 非屏蔽型半导体探测器	0.996	0.988	0.980	0.969	0.954	—	—
PTW 60018 非屏蔽型半导体探测器(立体定向类)	0.992	0.984	0.976	0.966	0.953	—	—
PTW 60003 天然金刚石探测器	1.000	1.001	1.003	1.009	1.026	1.045	—
PTW 60019 人工金刚石	0.993	0.989	0.984	0.977	0.968	0.962	0.955
PTW 31018 液体电离室	0.992	0.992	0.993	0.995	1.005	1.017	1.039
Sun Nuclear EDGE 探测器	0.986	0.976	0.966	0.951	—	—	—
Standard Imaging W1 塑料有机闪烁体探测器	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

7 小野剂量测量临床实例

7.1 射野输出因子实例

本实践指南提供的射野输出因子实例都是针对瓦里安 EDGE 直线加速器，按照本实践指南的规范要求，按标准瓦里安 Eclipse 计划系统建模的数据采集要求所测得射野输出因子，测量条件为能量 6 MV 均整模式 X 射线，源皮距 95 cm，水下 5 cm 深度处。在以下所有小野剂量测量前，均完成了加速器质控、三维水箱质控以及预测试，尤其是测量探测器的射野中心位置检测。三家放疗中心分别使用了 IBA EFD，PTW 60019 和 SNC EDGE 三种不同的探测器，按照表 26 中提供的射野输出修正因子进行修正，最后得出小野的射野输出因子，见表 28。

表 28 实例 1 经射野输出修正因子修正后的小野射野输出因子实例

方野大小 (cm)	1	2	3	4	5	10
蒙卡计算	0.744	0.849	0.881	0.905	0.930	1.000
IBA EFD	0.730	0.846	0.880	0.905	0.928	1.000
PTW 60019	0.730	0.843	0.879	0.903	0.925	1.000
SNC EDGE	0.739	0.843	0.878	0.903	0.926	1.000

7.2 PDD/TPR 实例

本实践指南提供的百分深度剂量测量实例都是针对瓦里安 EDGE 直线加速器按照本实践指南的规范要求，在标准瓦里安 Eclipse 计划系统建模的数据采集要求所测得百分深度剂量，测量条件为源皮距 100 cm，从大于 30 cm 的深度开始测量。三家放疗中心分别使用了 IBA Razor，PTW60016，和 SNC EDGE 三种不同的射野探头进行小野测量，小野测量未使用参考探头且需采用步进模式扫描，使用由钨门准直器形成的射野，测量得出百分深度剂量。

百分深度剂量测量中，对于小野，尤其是 2 cm×2 cm 以下的射野，应选择步进模式进行测量，特别是在 D_{max} 附近及建成区，选用更小的步进，以达到最优测量效果。水箱探测器扫描设置见表 29。图 12-17 为三家放疗中心提交的 1 cm×1 cm 到 10 cm×10 cm 射野的百分深度剂量曲线。

表 29 实例 2 小野百分深度剂量测量中探测器扫描设置

射野大小 (cm)	1	2	3	4	5	10
测量条件	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s 或 连续: 3 mm/s	连续: 5 mm/s	连续: 5 mm/s	连续: 5 mm/s

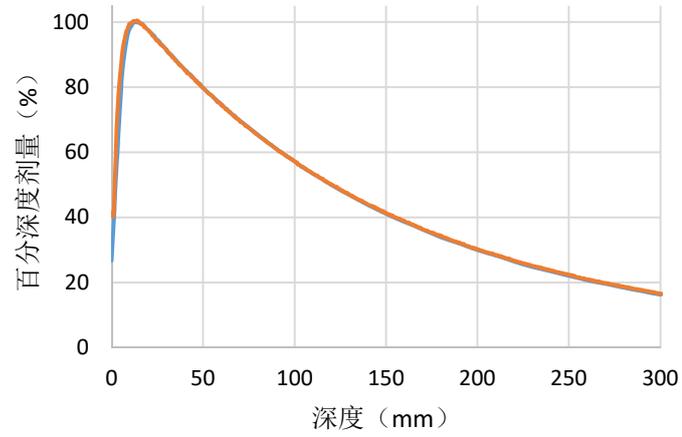


图 12 实例 3 1 cm×1 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

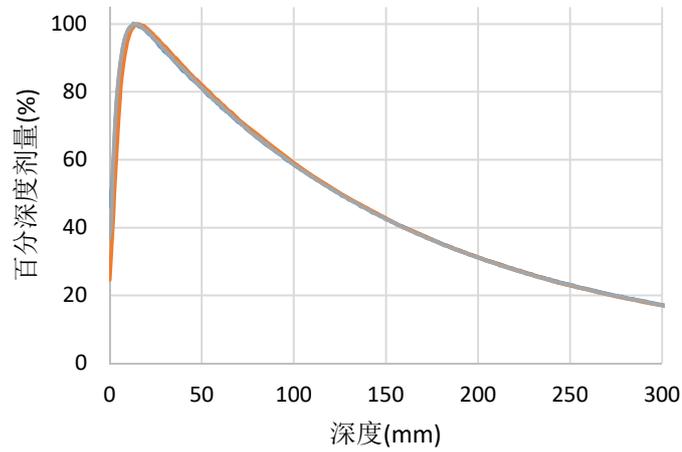


图 13 实例 4 2 cm×2 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

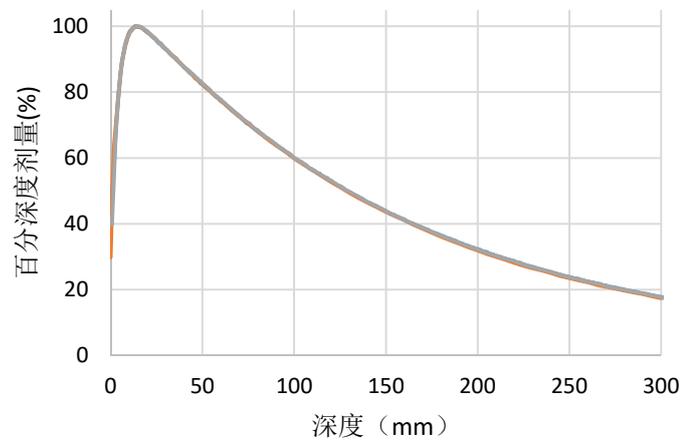


图 14 实例 5 3 cm×3 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

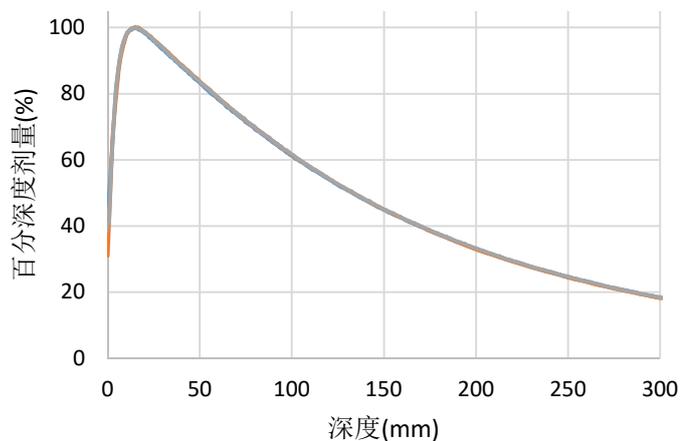


图 15 实例 6 4 cm×4 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

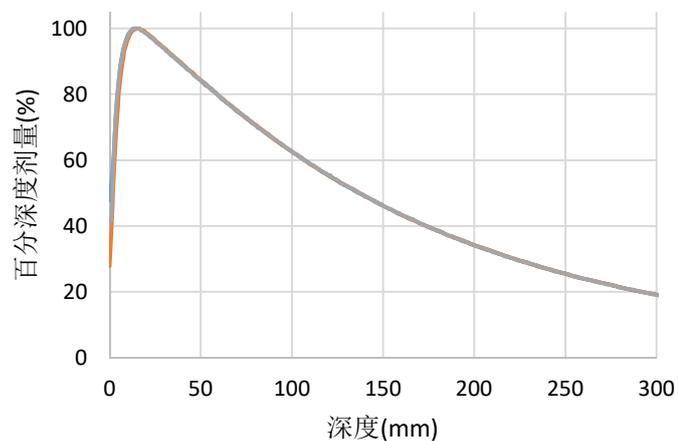


图 16 实例 7 5 cm×5 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

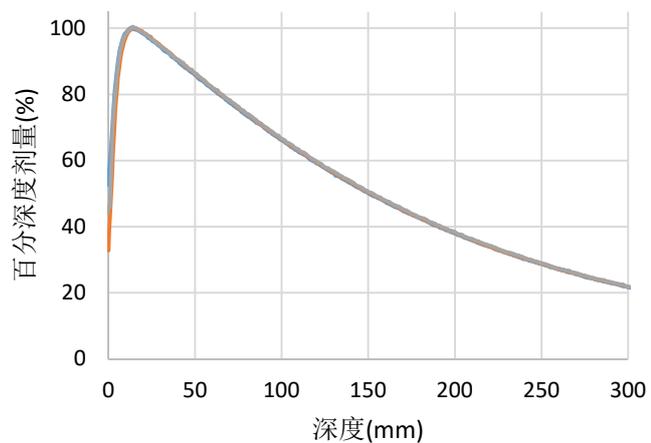


图 17 实例 8 10 cm×10 cm 射野的百分深度剂量（源皮距 1000 mm）

7.3 截面剂量曲线测量实例

本实践指南提供的截面剂量曲线的实例都是针对瓦里安 EDGE 直线加速器按照本实践指南的规范要求，在标准瓦里安 Eclipse 计划系统建模的数据采集要求所测得截面剂量曲线，测量条件为源皮距 100 cm，列举了水下 5 cm 和 10 cm 深度处的截面剂量曲线。三家放疗中心分别使用了 PFD3G, PTW60016 和 SNC EDGE 三种不同的射野探头进行小野测量，小野测量时未使用参考探头且需采用步进模式扫描，使用由钨门准直器形成的射野，测量得出截面剂量曲线。水箱扫描探测器设置见表 30。图 18-29 为三家放疗中心的测量结果，每条线分别代表每个中心的测量结果。

表 30 实例 9 截面剂量曲线测量中扫描探测器设置

射野大小 cm	1	2	3	4	5	10
中心 3	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s	步进: 0.5 mm 驻留: 1 s 或 连续: 3 mm/s	连续: 3 mm/s	连续: 3 mm/s	连续: 5 mm/s

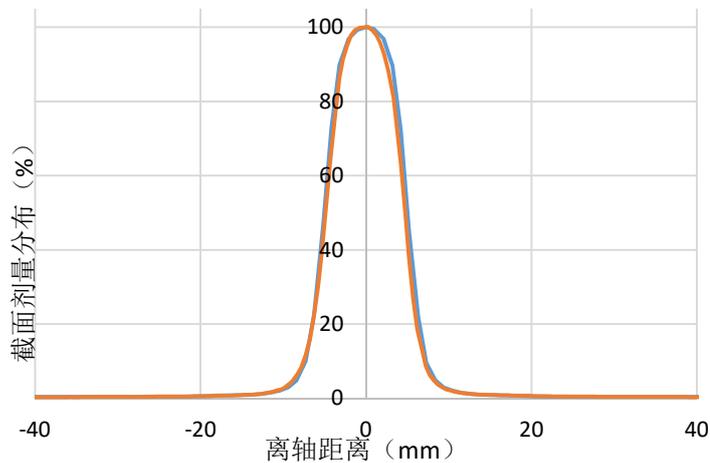


图 18 实例 10 1 cm×1 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 50 mm）

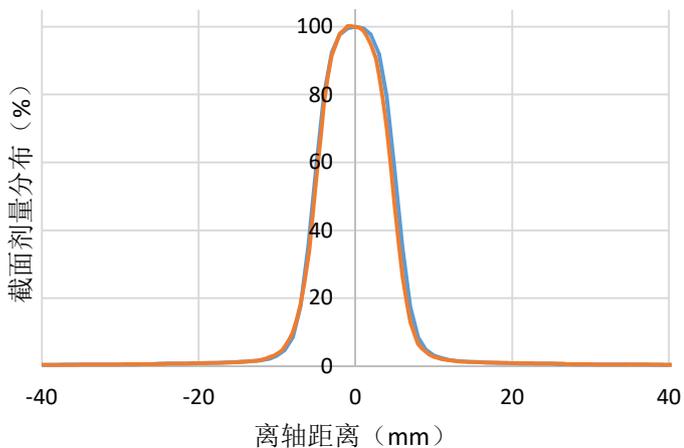


图 19 实例 11 1 cm×1 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)

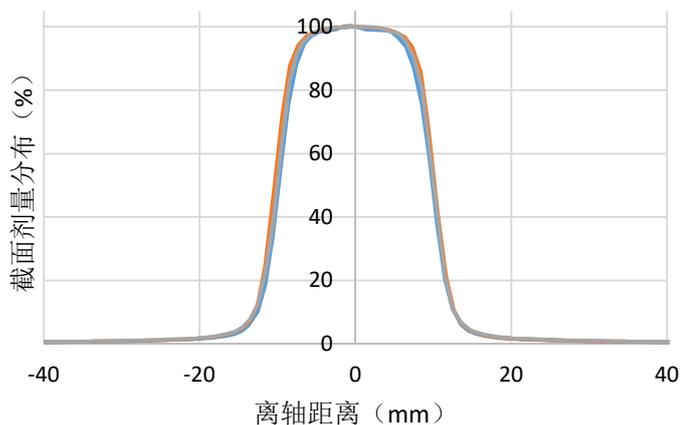


图 20 实例 12 2 cm×2 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)

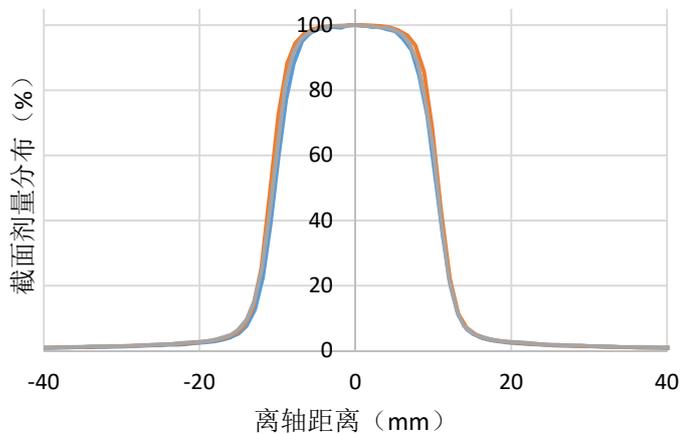


图 21 实例 13 2 cm×2 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)

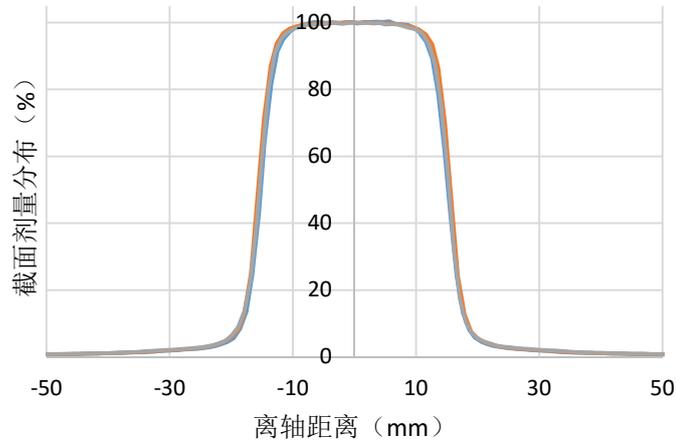


图 22 实例 14 3 cm×3 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 50 mm）

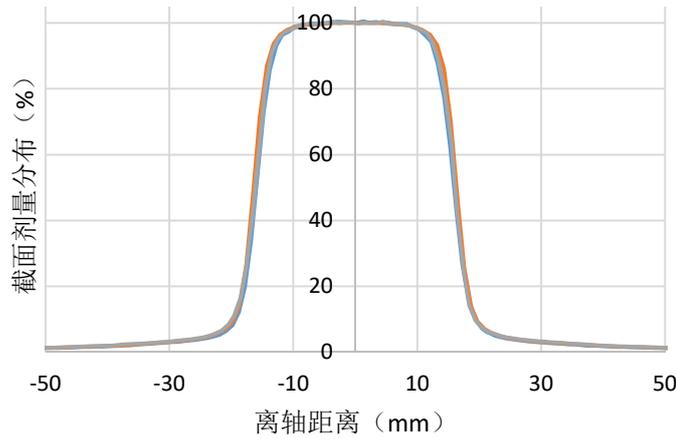


图 23 实例 15 3 cm×3 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 100 mm）

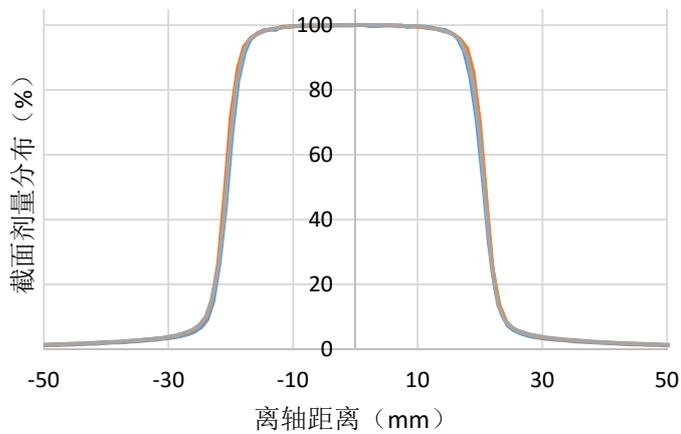


图 24 实例 16 4 cm×4 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 50 mm）

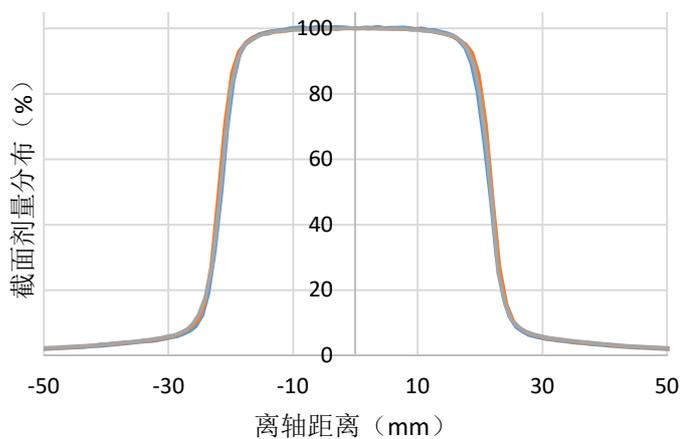


图 25 实例 17 4 cm×4 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)

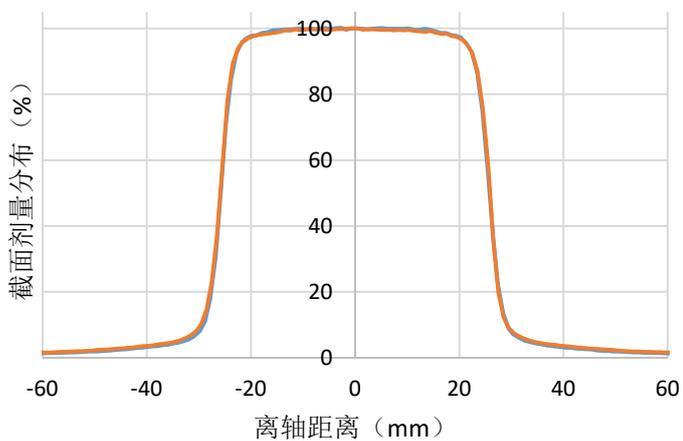


图 26 实例 18 5 cm×5 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 50 mm)

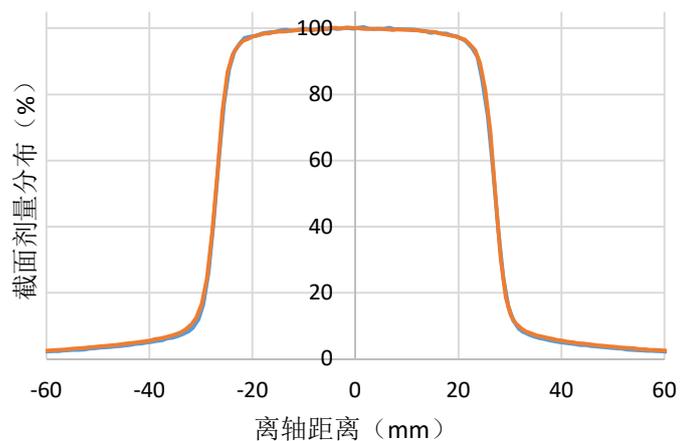


图 27 实例 18 5 cm×5 cm 射野左右方向截面剂量曲线 (源皮距 1000 mm, 深度 100 mm)

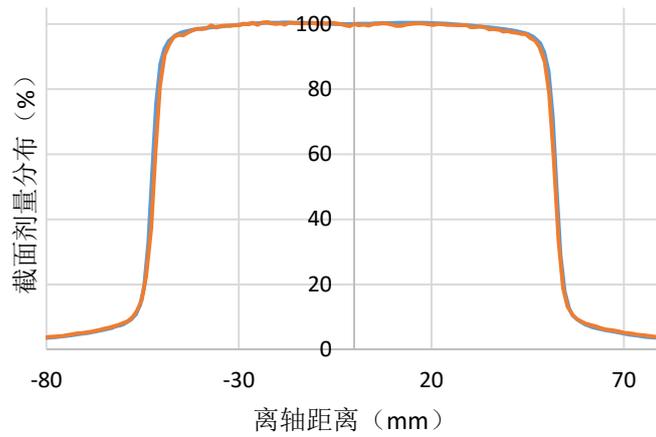


图 28 实例 19 10 cm×10 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 50 mm）

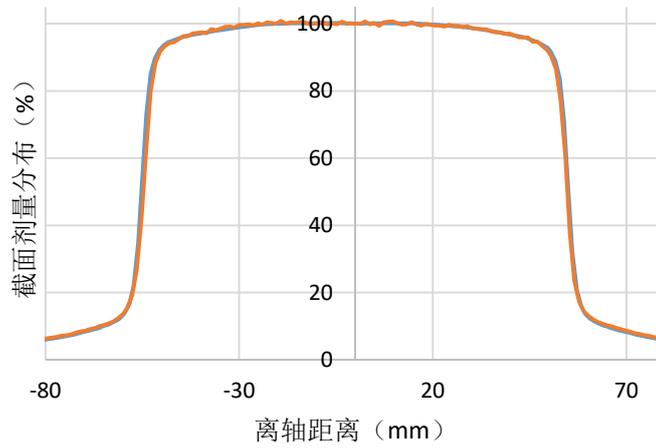


图 29 实例 20 10 cm×10 cm 射野左右方向截面剂量曲线（源皮距 1000 mm，深度 100 mm）

附录 A

(资料性附录)

指南中的符号及定义

表 A.1 所示为指南中使用的术语、符号及定义（参考 IAEA TRS483 报告）。表 A.2 所示为本实践指南中涉及的专有名词。

表 A.1 指南中使用的符号及其定义

符号	定义
$\%dd(10, 10)$	射野10 cm×10 cm、SSD=100 cm、水模深度为10 cm处百分深度剂量
$\%dd(10, 10)_x$	射野10 cm×10 cm、SSD=100 cm、仅存在光子束（除去电子污染的影响）、水模深度为10 cm处百分深度剂量
$\%dd(10, S)_x$	等效方野S cm×S cm、SSD=100 cm、仅存在光子束（除去电子污染的影响）、水模深度为10 cm处百分深度剂量
$D_{w, Q}$	射线质为Q、水模内参考深度为 Z_{ref} 处水吸收剂量
f_{msr}	机器特定参考射野
f_{ref}	根据实践规程，标准实验室使用水模深度为10 cm处常规参考射野（10 cm×10 cm、SSD=100 cm）校准参考剂量
f_{clin}	临床射野
$k_{Q_1, Q_2}^{f_1, f_2}$	校准因子的一般形式，考虑到电离室在射野 f_1 、射线质 Q_1 和射野 f_2 、射线质 Q_2 中的响应差异；当 f_1 与 f_2 表示相同的射野时，上标“ f_1, f_2 ”使用 f_1 代替
$k_{Q_{msr}}^{w, plastic}$	模体剂量转换因子，在等效水模体替代水模体中测量
M_Q	射线质为Q [单位：C或计量仪读数 (rdg)] 时剂量仪读数，已对除射线质外的所有其他影响量做修正
M_Q^f	射线质为Q、射野为f的剂量仪读数，已对除射线质外的所有其他影响量做修正
$M_{plastic, Q}^f$	射线质为Q、射野为f、使用等效水模替代水模体时的剂量仪读数，已对除射线质外的所有其他影响量做修正
$M_{w, Q}^f$	同 M_Q^f ，体现水模体和等效水模替代水模体的测量差别时使用
$N_{D, w, Q_0}^{f_{ref}}$	射线质为 Q_0 、常规参考射野、以水吸收剂量形式表示的电离室校准系数
$N_{D, w, Q_{msr}}^{f_{ref}}$	射线质为 Q_{msr} 、常规参考射野、以水吸收剂量形式表示的电离室校准系数

表 A.1 指南中使用的符号及其定义 (续)

符号	定义
$\Omega_{Q_{clin}, Q}^{f_{clin}, f_{ref}}$	临床射野 f_{clin} 相对于常规参考射野 (10 cm×10 cm) 的射野输出因子
$\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$	临床射野 f_{clin} 相对于机器特定射野 f_{msr} 的射野输出因子
OAR(x, y)	离轴比, 测量深度处侧向剖面剂量分布, 在射束中心轴处归一
Q	表示射线质的一般符号, 下标“0”, 即 Q_0 , 表示使用参考射线质校准电离室或剂量仪
Q_{msr}	机器特定参考射野的射线质
Q_{clin}	临床射野的射线质
r_{LCPE}	侧向带电粒子平衡射程
$TPR_{20, 10}(10)$	射野10 cm×10 cm、SSD=100 cm、水深为20 cm、10 cm处组织模体比
$TPR_{20, 10}(S)$	等效射野S cm×S cm、SSD=100 cm、水深为20 cm、10 cm处组织模体比
w(x, y)	权重函数, 定量地表示探测器灵敏体积沿坐标轴方向的扩展情况, 作为侧向坐标x和y的函数
Z_{max}	最大剂量深度 (单位: g/cm ²)
Z_{ref}	水模体参考测量深度 (单位: g/cm ²)
$Z_{eq, plastic}$	等效水模替代水模体的深度, 等价于水模体参考深度, 根据电子密度比标定

表 A.2 本实践指南中涉及的专有名词

缩写	全称	意义
AAPM	American Association of Physicists in Medicine	美国医学物理师协会
CPE	charged particle equilibrium	带电粒子平衡
DAP	dose-area product	剂量面积乘积
FFF	flattening filter free (beam)	无均整(射束)
FWHM	full width at half maximum	半高宽
IAEA	International Atomic Energy Agency	国际原子能机构
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements	国际辐射单位与测量委员会

表 A.2 本实践指南中涉及的专有名词（续）

缩写	全称	意义
IMRT	intensity-modulated radiotherapy	调强放疗
IPEM	Institute of Physics and Engineering in Medicine	医学物理与工程学会（英国）
IPSM	Institute of Physical Sciences in Medicine	医学物理科学学会（德国）
LAC	large area parallel plane ionization chamber	大面积平板电离室
LCPE	lateral charged particle equilibrium	侧向带电粒子平衡
MLC	multileaf collimator	多叶准直器
MOSFET	metal oxide semiconductor field-effect transistor	金属氧化物半导体场效应晶体管
msr	machine specific reference	机器特定参考射野
NPL	National Physical Laboratory	国家物理实验室（英国）
NPSF	normalized peak scatter factor	归一化的峰值散射因子
PDD	percentage depth dose	百分深度剂量
PMMA	Polymethylmethacrylate	聚甲基丙烯酸甲酯
PSDL	primary standards dosimetry labor	初级标准剂量实验室
SAD	source-to-axis distance	源轴距
SDD	source-to-detector distance	源到探测器的距离
SRS	stereotactic radiosurgery	立体定向放射外科
SSD	source-to-surface distance	源皮距
SSDL	secondary standards dosimetry laboratory	次级标准剂量实验室
TCPE	transient charged particle equilibrium	瞬态电子平衡
TMR	tissue maximum ratio	组织最大剂量比
TPR	tissue phantom ratio	组织模体比
WFF	with flattening filter (beam)	均整模式（射束）

附 录 B

(规范性附录)

医用电子直线加速器质量控制要求

医用电子直线加速器是放疗的主要设备，需做好质量控制工作，以保证放疗精确实施，因此医用电子直线加速器的质量控制是整个放疗流程质量保证的重要组成部分。美国医学物理学会第 142 号报告规定了医用电子直线加速器的质量控制要求，表 B.1 列出了各质控项目和具体要求。

表 B.1 AAPM TG 142 号报告加速器质控要求

剂量检测		AAPM 142
X-ray flatness	X 射线平坦度	±1% from baseline
X-ray symmetry	X 射线对称性	±1% from baseline
SRS arc rotation mode (range: 0.5–10 MU/deg)	SRS 弧旋转模式 (范围: 0.5–10 MU/度)	Monitor units set vs delivered: 1.0 MU or 2%; Gantry arc set vs delivered: 1.0° or 2% (均以较高者为准); 对 SRS/SBRT
X-ray output calibration (TG-51)	X 射线输出量校准 (IAEA-277)	±1% (绝对)
Spot check of field size dependent output factors for x ray (two or more FSs)	抽查 X 射线射野大小相关的输出因子	射野大小 < 4cm × 4cm 时为 2%; 射野大小 ≥ 4 cm × 4 cm 时为 1%。 (相对基准值)
X-ray beam quality (PDD10 or TMR10 20)	X 射线束质量 (PDD10 或 TMR10 20)	±1%
X-ray monitor unit linearity (output constancy)	X 射线 MU 线性度 (输出恒定性)	±5% (2–4 MU); ±2% ≥ 5 MU
X-ray output constancy vs gantry angle	不同机架角度下的 X 射线输出恒定性	±1% from Baseline
X-ray output constancy vs dose rate	不同剂量率下的 X 射线输出恒定性	±2% from Baseline
Arc mode (expected MU, degrees)	弧型模式 (MU 和度数的期望值)	±1%
PDD or TMR and OAF constancy	PDD 或 TMR 和 OAF 的稳定性	1% (TBI) or 1 mm PDD shift (TSET) from baseline
机械设备检查		
Collimator rotation isocenter	准直器旋转等中点	1 mm
Collimator size indicator	准直器到位指示器	±1 mm
Collimator angle indicators	准直器旋转角度	±1.0°
Jaws Asymmetric Mode Position Readout	不对称的钨门到位指示器	1 mm
Jaws Symmetric Mode Position Readout	对称的钨门到位指示器	2 mm
Gantry angle indicators	机架角度容差	1.0°
Gantry rotation isocenter	机架旋转等中心	±1 mm

表 B.1 AAPM TG 142 号报告加速器质控要求（续）

Couch		AAPM 142
Couch rotation isocenter	床旋转等中心	±1 mm
Table travel maximum range movement in all directions	床的最大运动范围	±2 mm
Table angle	床的角度	1°
Table top sag	床面下沉	±2 mm
Treatment couch position indicators	治疗床到位指示器	2 mm
Coincidence of radiation and mechanical isocenter	辐射和机械等中心的一致性	±1 mm (SRS, SBRT); 2 mm (IMRT)
Stereotactic accessories, lockouts, etc.	立体定向附件、锁定装置等	Functional
Light/radiation field coincidence (symmetric)	光野和辐射野的一致性（对称）	每一侧 2 mm 或 1%
Light/radiation field coincidence (asymmetric)	光野和辐射野的一致性（不对称）	每一侧 1 mm 或 1%
Distance check device for lasers compared with front pointer	激光与前指针的距离检查装置	1 mm
Localizing lasers	激光器定位	<±1 mm
Crosshair Alignment and Jaw Parallelism (Spec @ 100cm TSD)		
Crosshair Run-Out	十字线中心偏离（TSD=100 cm）	1 mm
EPID		
Positioning/repositioning	定位/重新定位	≤1 mm
Imaging and treatment coordinate coincidence	影像和治疗坐标的一致性	≤1 mm
Scaling	缩放比例	≤2 mm
Spatial resolution	空间分辨率	Baseline
Contrast	对比度	Baseline
Uniformity and noise	均匀性和噪声	Baseline
Full range of travel SDD (MV)	整个 SDD 移动范围	±5 mm
Imaging dose	成像剂量	Baseline

国家癌症中心/国家肿瘤质控中心指南
小野剂量学临床实践指南
NCC/T-RT 001-2021

*

开本 880×1230 1/16 字数 40 千字
2021 年 12 月第一版 2021 年 12 月第一次印刷



NCC/T-RT 001-2021