

The Modern Physics
of Radiation Oncology

编著 © 李 玉 / 徐慧军

现代肿瘤放射物理学

中国原子能出版社

◎该书在内容上着眼于国际范围和最新进展，同时从现阶段肿瘤放疗物理技术人员的实际需求和实用角度出发，系统梳理和讲解肿瘤放射物理的新理论、新技术、新方法和大家所关注的热点。

◎内容覆盖放射物理基础知识、放疗与测量设备技术原理、QA 和 QC、影像引导技术、辐射防护以及 4D 图像引导、MC 剂量计算、实时追踪等新技术，有助于拓宽读者的视野和知识范围。

◎涵盖剂量测量基本原理、探测器特性、测量仪器的使用和 QA 等，以帮助读者正确应用手中的测量设备和做好数据采集工作。

◎回顾放疗技术的历史发展，同时对当今前沿技术细细分析，希望能推动我国放疗设备的创新和发展。回顾和分析多国报道的放疗事故，以助于我们从中吸取教训，谨慎操作。

◎在结构体系上，既有理论基础，又有目前的新理论和前沿性研究，适合于物理师、技师、放疗医生等人员阅读。

The Modern Physics of Radiation Oncology

现代肿瘤放射物理学

ISBN 978-7-5022-6641-7



定价：398.00元

The Modern Physics
of Radiation Oncology
现代肿瘤放射物理学

编著 © 李 玉 徐慧军

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代肿瘤放射物理学 / 李玉, 徐慧军编著. -- 北京 :
中国原子能出版社, 2015.5
ISBN 978-7-5022-6641-7

I. ①现… II. ①李… ②徐… III. ①肿瘤-放射治
疗学 IV. ①R730.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 109758 号

内容简介

此书历时 3 年, 汇近 10 年肿瘤放射物理新技术, 查阅整理数百篇文献, 引学术之权威, 析专业之难点, 聚焦现阶段之热点, 从实用、新颖、全面、前沿等方面考虑编写而成。在内容上着眼于肿瘤放射物理最新进展, 同时从现阶段肿瘤放疗物理技术人员的需求和实用角度出发, 系统梳理和讲解肿瘤放射物理的新理论、新技术、新方法和大家所关注的热点, 以期填补国内这方面的空白。本书不仅适用于放疗物理技术人员作为继续教育的教材, 也适用于临床肿瘤医师作为了解放疗物理与技术的参考。

现代肿瘤放射物理学

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 肖萍

装帧设计 睿珩文化

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印刷 北京新华印刷有限公司

经销 新华书店

开本 889 mm × 1194 mm 1/16

印张 70

字数 1906 千字

版次 2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-6641-7 定价 398.00 元

网址 : <http://www.aep.com.cn>

E-mail : atomep123@126.com

发行电话 : 010-68452845

版权所有 侵权必究

主编简介



李玉 主任医师，硕士生导师，医学硕士。中国人民解放军第302医院肿瘤放射治疗中心主任，亚太区肝脏肿瘤射波刀治疗与示范中心主任，中国抗癌协会临床肿瘤学协作专业委员会 CSCO 靶向治疗专家委员会委员，全军肿瘤放射学会副主任委员，全军肿瘤放射治疗腹部肿瘤综合治疗专业学会主任委员，中国生物医学工程学会精确放疗技术委员会副主任委员，中国肿瘤微创治疗技术创新战略联盟门脉高压专业

委员会常委，北京肿瘤放射治疗学会委员。从事肿瘤工作28年，肿瘤介入工作23年。1996年在全国率先引进和使用三维适形放疗（俗称X刀），2010年引进和系统使用国内首台G4系统射波刀，擅长肿瘤放疗、血管介入和非血管介入治疗、靶向治疗、化疗等，尤其在肿瘤精确放疗与血管介入、非血管介入综合治疗肿瘤方面有较深的造诣。在国内外首先提出肝脏肿瘤流程质量控制、开展单针双金标技术，以及首先提出并利用射波刀技术开展巨块肿瘤分靶区、分段放疗并取得较好的临床效果，是采用先进射波刀技术开创肿瘤放疗新领域的开拓者。2004年、2009年和2010年分别编写（主编）专著《肿瘤立体定向放疗与介入治疗》《肝胆胰恶性肿瘤微创综合治疗新技术》《三维适形与调强放射治疗的基础和临床》，2000年、2002年分别编写（副主编）专著《现代肿瘤放射治疗学》和《系统解剖学彩色图谱》，发表国内外学术论文80余篇。



徐慧军 解放军第302医院肿瘤放射治疗中心放疗室副主任，物理师，2005年毕业于安徽大学物理学院，2014年毕业于清华大学生物医学工程专业，硕士学位。军事医学计量科学技术委员会放疗设备质量安全控制专业委员会委员，全军物理工程技术委员会委员。自2005年至今先后在中国人民

解放军第105医院、广东省阳江市人民医院、中国人民解放军第302医院工作，一直从事放疗物理师工作，发表学术论文30余篇，主编专著1部，参编专著1部，参与科研课题6项。

编著者名单

主 编

李 玉 徐慧军

副主编

梁 军 康静波 曲宝林 王宁 费振乐

编 者 (以姓氏笔画为序)

王 伟 中国人民解放军海军总医院

张素静 中国人民解放军第 302 医院

王运来 中国人民解放军总医院

张富利 中国人民解放军北京军区总医院

王连元 中国人民解放军总医院

周付根 北京航空航天大学图像中心

王 宁 中国人民解放军沈阳军区总医院

赵庆军 中国人民解放军总后勤部卫生部药品仪器检验所

曲宝林 中国人民解放军总医院

费振乐 中国人民解放军第 105 医院

刘 博 北京航空航天大学图像中心

徐寿平 中国人民解放军总医院

刘小亮 中国人民解放军第 302 医院

徐慧军 中国人民解放军第 302 医院

李 玉 中国人民解放军第 302 医院

康静波 中国人民解放军海军总医院

李 兵 中国人民解放军南京军区南京总医院

梁 军 中国人民解放军第四军医大学唐都医院

李 悦 中国人民解放军总医院

解传斌 中国人民解放军总医院

张厚才 中国人民解放军第 302 医院

鞠忠建 中国人民解放军总医院

前言

从早期的深部 X 射线治疗, 20 世纪 50 年代 ^{60}Co 治疗, 60 年代加速器治疗, 到 20 世纪末调强放疗 (IMRT), 至今肿瘤放射治疗已超过 100 年历史, 并已成为肿瘤治疗的三大手段之一。目前 4D 定位、功能和分子成像、多模态图像融合、4D 计划、实时追踪、IGRT、SBRT 等技术的临床应用, 使放射治疗进入了一个崭新的高精确时代。

放疗设备和技术飞速发展, 技术和系统组成日益复杂, 对放疗的安全性和精确性的要求也不断提高, 因为对物理技术人员和放疗医生的要求也越来越高, 需要我们不断地更新知识和技术。

1895 年发现 X 射线, 1899 年第一次用电离辐射治疗癌症, 1902 年发明辐射计, 1906 年提出放射生物学原则, 1915 年出现机械旋转聚焦照射, 1922 年出现名噪一时的射束选择器, 1934 年探索出分次治疗模式, 1926 年电离室发明, 1928 年剂量单位确定, 1951 年立体定向放射原理提出, 1959 年开展适形放射治疗, 20 世纪 50 年代末开始利用影像引导摆位, 1962 年国际度量衡局开始提供国际标准仪器的校准, 1971 年 MLC 问世, 20 世纪 70 年代 IMRT 概念提出等, 每一次创新性的技术进步, 都对放疗产生深远影响。历史匆匆过去, 前人的探索和积淀, 一代代人的不懈努力, 铸现代放疗之辉煌。

诊断、定位、靶区勾画、摆位、治疗等过程中影像技术的综合应用以及动态肿瘤追踪技术的运用, 使靶区照射更加准确, 同时也大大缩小了 PTV 的外扩范围, 可减少正常组织的受照体积。kV/MV/ 超声等成像系统有机整合到加速器系统中, 使患者摆位从外部标记逐渐转换到以脊柱、颅骨、金标、肿瘤等作为参考内标记, 照射更加精确和直观。从 CRT、3DCRT, 到 IMRT、IGRT、SBRT 等, 目标始终未变, 即提高照射安全性、精度和有效性, 在最大限度杀灭肿瘤的同时, 尽可能地保护正常组织。加速器射束校准从基于空气比释动能测量 (如: IAEA 277 和 AAPM TG 21) 发展到更易操作和更加准确的基于水中吸收剂量测量 (如: IAEA 398 和 AAPM TG 51)。剂量计算的金标准——蒙特卡罗 (MC) 算法, 已逐渐成为商用治疗计划系统

的标准配置；其在非均匀组织（如肺癌）计算中发挥着重要作用。立体定向技术的扩展及其更深入的应用，低剂量常规分割向高剂量低分割模式的转变，生物学效应和正常组织耐受剂量也随之发生改变。质量保证 (QA) 测量设备日益复杂和多元化，治疗设备 QA 项目和允许值在变化，正确运用和准确分析需要有足够的知识储备，同时也应做好测量设备自身的 QA 工作。这一系列的提升和改变，要求临床工作者及时更新知识，以应对技术的发展，更好地服务于患者。

此书历时 3 年，汇近 10 年肿瘤放射物理新技术，查阅整理数百篇文献，引学术之权威，析专业之难点，聚焦现阶段之热点，从实用、新颖、全面、前沿等方面考虑编写而成。全书共 20 章，覆盖原子粒物理基础、电离辐射物理量与单位、X 射线产生技术与基本原理、辐射与物质的相互作用、外照射光子束剂量学、辐射探测器、剂量测量与校准、外照射放射治疗、试运转、治疗计划系统与计划评估、质量保证与质量控制、影像在放射治疗中角色、立体定向放射治疗、电子束放射治疗、近距离放射治疗、质子放射治疗、放射生物学、辐射防护等。书中列出了放射物理计算中常用的基本单位和公式，为我们日常的规范应用和计算提供便利。讲解常规放疗和特殊治疗设备的基本原理、技术特点以及验收测试程序，以助于我们更好地了解和应用这些设备。在剂量测量方面做了大篇幅论述，涵盖基本测量原理、探测器特性、测量仪器的使用和质量保证等，以帮助读者正确应用手中的测量设备和做好数据采集工作。搜集整理了 IAEA、AAPM、DIN、国家质量监督检验检疫总局等组织机构发布的剂量校准报告，并对其深入解读和剖析并举例说明。试运转是设备临床应用前一项很重要的工作，文中列举了 TPS、加速器数据、IMRT 等的试运转方法和程序，以指导实际操作。对大家目前所关注的热点如 MC、独立计算和检查、流程质控、4D 实时追踪、小野剂量测量、治疗中的实时验证、低分割照射生物学等，我们搜集和整理了国内最新和权威资料，以飨读者。IAEA、纽约时报等回顾和报道了多个国家发生的放疗事故，触目惊心。发布这些事故，目的是警示我们勿犯错，日常操作谨慎再谨慎。QA 和 QC 是放疗永恒的话题，书中详细论述了多种放疗设备的 QA 和 QC 程序和指标，并对 QA 工具的使用和特性做了描述，以助于我们正确和顺利开展 QA 工作。放疗设备技术特点各异、开展的放疗技术种类繁多、患者个体差异、不同类型和阶段的 QA 等，使得放疗流程日益复杂，因此需要对流程中的各个环节进行 QA 和 QC，才能确保整个治疗过程安全和准确。放疗如同一把无形的“刀”，做到精准、锋利、自如、安全、有效，是件困难的事，需要一个团队齐心协力，物理技术人员

在其中发挥着至关重要的作用。射线是把双刃剑，杀灭肿瘤的同时也会对正常组织造成损伤，因此在最大限度杀灭肿瘤的同时要最大程度地保护正常组织。X射线等可以穿过屏蔽墙到达工作人员及公众，同时也会对环境造成影响，因此我们要做好防护设计，在实际可控范围内和辐射防护原则下，将辐射降低到合理范围内，尽可能地降低职业暴露剂量和公众受到的剂量。

2008年，世界卫生组织（WHO）公布目前全球肿瘤的5年生存率约为55%，其中放疗贡献率为23%，手术为25%，化疗为7%，可见放疗位置之重要。国际抗癌联盟将每年的2月4日定为世界癌症日，可见目前形势之严峻。2013年初，全国肿瘤登记中心发布的《2012中国肿瘤登记年报》显示，每年新发癌症病例大约312万，因为癌症死亡的人数超过200万，这意味着每1分钟有6人被确诊为癌症，癌症已经成为我国城乡居民的第一位死亡原因。2014年，国家癌症中心全国肿瘤防治研究办公室发布我国2003-2005年以人群为基础的癌症生存数据，我国年龄标准化后的全部癌症5年生存率为30.9%，农村患者全部癌症的生存率为21.8%，相比发达国家全部癌症的5年生存率（如美国约为70%），说明我国肿瘤治疗水平还亟待提高。缩小差距，要靠我们放疗从业人员的共同努力，在这一过程中，物理工程技术人员是不可或缺的中坚力量。2014年世界卫生组织发布的《世界癌症报告》指出，中国的癌症发病率几乎占了全球的一半，高居榜首。数字惨淡无声，现实差距巨大，引人深思。同时可预见，任务之艰巨，道路之漫长。放疗尽管有众多优点，但不可避免的事实是放疗只是一种局部治疗手段，有它的局限性。肿瘤治疗的现况用结核病专家 Trudeau 那句铭言描述更为贴切，“有时，去治愈；常常，去帮助；总是，去安慰”，同时，这句铭言提醒我们“敬畏生命”。

对为本书材料编辑付出辛勤劳动的专家学者们深表敬意，并希望本书的出版能够推动肿瘤放射物理的发展，为放射治疗从业人员提供有益的指导和帮助。限于编者的知识水平，同时由于文中数字、图表、公式繁多，虽经数次校对，书中不足、描述不准和错误之处仍在所难免，衷心希望广大专家学者不吝指正，以便此书进一步修订和完善。

中国人民解放军第三〇二医院肿瘤放射治疗中心

李 玉 徐慧军

2015年1月于北京

The Modern Physics of Radiation Oncology

现代肿瘤放射物理学

目录

第一章 原子物理基础

1

1.1 原子核的基本特性.....	1
1.2 原子结构.....	1
1.2.1 原子结构的基本定义.....	1
1.2.2 原子的卢瑟福模型.....	3
1.2.3 氢原子的波尔模型.....	3
1.2.4 多电子原子.....	4
1.2.5 原子核结构.....	5
1.2.6 原子光谱.....	5
1.2.7 原子核的稳定性.....	6
1.3 中子.....	7
1.4 质量和能量的关系.....	8
1.5 自然界的四种基本力.....	8
1.6 基本物理常数与关系式.....	9
1.7 核结合能：质量亏损.....	10
1.8 反物质.....	10
1.9 核子和粒子的特性.....	11
1.10 放射性现象.....	12
1.11 放射性衰变的计算.....	12
1.12 活度.....	13
1.13 半衰期.....	14
1.14 平均寿命.....	15
1.15 衰变方式.....	15
1.15.1 α 衰变.....	16
1.15.2 电磁衰变.....	16
1.15.3 β 衰变.....	16

1.16 衰变示意图.....	18
1.17 放射性平衡.....	20
1.17.1 长期平衡.....	20
1.17.2 瞬间平衡.....	20
1.18 放射性核素的产生.....	21
1.18.1 裂变副产物.....	21
1.18.2 中子活化.....	22
1.18.3 粒子加速器.....	23
2.1 物理量与单位.....	25
2.2 电离辐射.....	26
2.3 标量辐射物理量.....	26
2.3.1 粒子数和辐射能.....	26
2.3.2 通量和能量通量.....	27
2.3.3 注量和能量注量.....	27
2.3.4 注量率和能量注量率.....	28
2.3.5 粒子辐射和能量辐射.....	28
2.4 矢量辐射物理量.....	29
2.4.1 矢量粒子辐射和矢量能量辐射.....	29
2.4.2 矢量注量率和矢量能量注量率.....	29
2.4.3 矢量注量和矢量能量注量.....	29
2.5 相互作用系数及相关的物理量.....	30
2.5.1 反应截面.....	30
2.5.2 质量衰减系数.....	31
2.5.3 能量转移系数.....	31
2.5.4 质能转移系数.....	32
2.5.5 线性阻止本领.....	32
2.5.6 质量阻止本领.....	33
2.5.7 质量散射本领.....	33
2.5.8 线性能量转移.....	33
2.5.9 辐射化学产额.....	34
2.5.10 气体中电离产额.....	34
2.5.11 在气体中形成每个离子对所消耗的平均能量.....	34

2.6 能量转换.....	35
2.6.1 比释动能.....	35
2.6.2 比释动能率.....	36
2.6.3 照射量.....	36
2.6.4 照射量率.....	38
2.6.5 比转换能.....	38
2.6.6 比转换能率.....	38
2.7 能量的沉积.....	39
2.7.1 能量沉积.....	39
2.7.2 授予能.....	39
2.7.3 线性能量.....	39
2.7.4 比能.....	40
2.7.5 吸收剂量.....	40
2.7.6 吸收剂量率.....	41
2.8 放射性.....	41
2.8.1 衰变常数.....	42
2.8.2 活度.....	42
2.8.3 空气比释动能率常数.....	42
2.9 带电粒子平衡.....	42
2.10 剂量建成与皮肤保护.....	42
2.11 空气中吸收剂量.....	44
2.12 根据照射量计算介质中的剂量.....	45
2.13 自由空间中的剂量.....	46

3.1 简介.....	49
3.2 X 射线管.....	49
3.3 治疗用 X 射线管.....	52
3.4 X 射线影像.....	52
3.4.1 X 射线影像的形成.....	52
3.4.2 胶片和屏.....	53
3.4.3 透光率与阻光率.....	54
3.4.4 光学密度.....	54
3.5 X 射线发生器.....	54
3.6 数字 X 射线影像.....	55

3.7 X 射线产生微观物理学.....	55
3.7.1 特征 X 射线.....	55
3.7.2 韧致辐射.....	56
3.8 X 射线光谱.....	57
3.9 X 射线产生效率.....	59
3.10 韧致辐射的方向依赖性.....	59
3.11 X 射线衰减.....	60
3.11.1 射束散射和平方反比定律.....	60
3.11.2 物质引起的衰减.....	61
3.12 半价层.....	62
3.13 质量衰减系数.....	63
3.14 伦琴和 X 射线的发现.....	63
4.1 辐射的分类与特性.....	67
4.1.1 电磁辐射.....	67
4.1.2 粒子辐射.....	68
4.1.3 电离性能.....	68
4.2 光子与物质之作用.....	69
4.2.1 相干散射.....	69
4.2.2 光电效应.....	70
4.2.3 康普顿散射.....	70
4.2.4 电子对产生.....	72
4.2.5 光致核反应.....	73
4.2.6 总质量吸收系数.....	73
4.3 带电粒子与物质的相互作用.....	73
4.3.1 电子与物质的相互作用.....	74
4.3.2 电子与轨道电子的相互作用.....	75
4.3.3 电子与原子的相互作用.....	75
4.3.4 辐射能量损失率和射程.....	76
4.3.5 阻止本领.....	77
4.3.6 射程.....	78
4.3.7 产生离子对所需的平均能量.....	79
4.3.8 重带电粒子作用和布喇格峰.....	80
4.4 中子与物质的相互作用.....	80

4.5 光子相互作用实例：5.0 MeV 的光子在水中的历程	81
4.6 蒙特卡罗算法	82
4.7 微观生物损伤	83
5.1 等剂量图	87
5.2 皮肤轮廓	89
5.2.1 等剂量线平移法	90
5.2.2 有效 SSD 法	90
5.2.3 组织空气比法	91
5.3 平行对穿野	92
5.3.1 等剂量分布叠加	93
5.3.2 射束权重	93
5.4 楔形板	94
5.4.1 楔形野	96
5.4.2 楔形板穿射因子	97
5.4.3 楔形板置入时剂量率的计算	97
5.5 多射束	97
5.6 剂量体积说明与报告	99
5.7 患者剂量分布评估	100
5.8 弧形或旋转照射	103
5.9 表面剂量	104
5.10 组织填充物	105
5.11 射束扰流板	106
5.12 组织补偿器	106
5.13 组织非均匀性	107
5.14 射野衔接	110
5.15 患者定位和固定装置	113
5.16 剂量组成	116
5.17 百分深度剂量	117
5.18 d_m 对射野大小和 SSD 的依赖性	120
5.19 组织空气比	120
5.20 反向散射因子和峰值散射因子	121
5.21 组织模体比和组织最大剂量比	121
5.22 等效方野	122
5.23 线性插值法	123

5.24 时间和 MU 数设定	124
5.25 归一化条件	125
5.26 机头散射和模体散射	126
5.27 剂量率的计算	127
5.27.1 百分深度剂量计算	127
5.27.2 等中心条件下的计算	128
5.27.3 任意距离处的剂量率	129
5.27.4 PDD 和 TMR 的等效计算	131
5.28 射野形成的方法	131
5.28.1 非对称钨门	132
5.28.2 挡块	132
5.28.3 多叶准直器	134
5.29 对称钨门形成的中心轴射野的剂量率计算	135
5.29.1 挡块射野等效方形野的近似计算方法	137
5.29.2 Clarkson 积分法	139
5.30 不规则射野中心轴以外点的剂量率计算	142
5.31 非对称钨门的剂量率计算	143
5.32 挡块区的剂量	144
6.1 引言	147
6.2 模体	147
6.3 气体电离探测器	149
6.3.1 电离室	150
6.3.2 辐射监测电离室	156
6.3.3 电荷的收集与测量	156
6.3.4 正比计数器	158
6.3.5 盖革米勒计数器	158
6.3.6 中子环境测量仪	160
6.4 固体探测器	160
6.4.1 热释光剂量仪	160
6.4.2 胶片	164
6.4.3 二极管	166
6.4.4 MOSFETs	167
6.4.5 聚合物凝胶	168
6.4.6 金刚石探测器	168
6.4.7 闪烁探测器	168

6.5 液态剂量计.....	168
6.5.1 热量计.....	168
6.5.2 化学剂量计.....	169
6.6 探测器阵列.....	169
6.7 个人剂量仪.....	169
6.7.1 胶片剂量计.....	169
6.7.2 热释光剂量计.....	170
6.7.3 辐射光致发光玻璃剂量计.....	170
6.7.4 光释光系统.....	170
6.7.5 直读式个人监测仪.....	171
6.8 个人剂量计的校准.....	171
6.9 辐射环境测量仪的校准.....	172
6.10 治疗水平电离室剂量计检定规程.....	172
6.11 参考剂量仪校准的基本标准.....	173
6.11.1 空气比释动能的基本标准.....	173
6.11.2 水吸收剂量的基本标准.....	175
6.12 参考剂量仪校准工具.....	177
6.12.1 X 射线校准实验室.....	177
6.12.2 X 射线设备和射束特性.....	179
6.12.3 准直器.....	181
6.12.4 ^{60}Co 设备及射束特性.....	181
6.12.5 输出率的长期稳定性.....	182
6.13 参考剂量仪校准设备.....	182
6.13.1 次级标准剂量计及其特点.....	182
6.13.2 辅助设备.....	185

7.1 早期的辐射剂量测量.....	191
7.2 MV 级剂量测量的辐射胶片.....	195
7.2.1 卤化银胶片的特性.....	195
7.2.2 点光密度计.....	197
7.2.3 常用胶片和模体的剂量测量特点.....	199
7.2.4 胶片校准.....	200
7.2.5 RIT113 放疗胶片剂量验证系统.....	201
7.3 二极管测量外照射患者的体内剂量.....	201
7.3.1 硅二极管用作辐射探测器的物理原理.....	202
7.3.2 二极管结构特征对体内剂量测量的影响.....	203
7.3.3 晶粒所致依赖.....	204

7.3.4 探测器结构引起的依赖.....	206
7.3.5 验收测试.....	207
7.3.6 校准.....	208
7.3.7 修正因子.....	210
7.3.8 二极管体内剂量测量系统的持续 QA.....	211
7.3.9 标准治疗距离其他体内二极管测量的应用.....	211
7.3.10 TBI 二极管体内剂量测量.....	212
7.3.11 TSET 体内剂量测量.....	212
7.4 IMRT 剂量测量工具和技术.....	212
7.4.1 剂量计.....	212
7.4.2 二维剂量测量.....	217
7.4.3 剂量分布的对比和评估.....	221
7.4.4 模体与测量工具.....	226
7.5 MV 级光子束小野测量.....	228
7.5.1 横向电子失衡.....	229
7.5.2 小光野的特征.....	230
7.5.3 小野测量的设备和方法.....	234
7.5.4 参考剂量测量.....	240
7.5.5 相对剂量测量.....	244
7.6 电离辐射剂量测量的测量质量保证.....	250
7.6.1 不确定度的评估方法.....	251
7.6.2 设备控制系统.....	254
7.6.3 实际应用和建议.....	255
7.6.4 测量提供商的实际考虑.....	256
7.6.5 环境因素和设备控制.....	258
7.6.6 生产商和校准实验室之间的相互影响.....	259
7.6.7 辐射源包装问题.....	259

8.1 引言.....	263
8.2 归一化条件.....	263
8.2.1 ^{60}Co 的归一化条件.....	263
8.2.2 直线加速器的归一化条件.....	263
8.3 光子束校准步骤.....	264
8.4 电离室校准.....	264
8.5 射线质.....	265
8.6 校准条件.....	267
8.7 射束校准稳定性检查.....	268