

RADIOTHERAPY EQUIPMENTS

放射治疗设备学

主 编 / 宫良平



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

放射治疗设备学

RADIOTHERAPY EQUIPMENTS

主 编 宫良平



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

图书在版编目(CIP)数据

放射治疗设备学/官良平主编. —北京:人民军医出版社,2010.8

ISBN 978-7-5091-3891-5

I. ①放… II. ①官… III. ①放射治疗仪器—基本知识 IV. ①TH774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 160300 号

策划编辑:黄建松 文字编辑:刘新瑞 责任审读:黄栩兵

出版人:齐学进

出版发行:人民军医出版社

经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱

邮编:100036

质量反馈电话:(010)51927290;(010)51927283

邮购电话:(010)51927252

策划编辑电话:(010)51927300—8057

网址:www.pmmp.com.cn

印刷:三河市祥达印装厂 装订:京兰装订有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:17.75 字数:425 千字

版、印次:2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0001~2000

定价:45.00 元

版权所有 侵权必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换



内容提要

作者在全面研究国外主要放射治疗设备生产厂家的图纸、资料的基础上,根据自己多年的临床实践、知识积累和教学经验,参考部分相关专业文献,系统介绍了放射物理学基础知识、全面论述了各种放射治疗设备的结构特点、发展历史与临床应用情况、各种放疗配套设备的临床应用与结构特点、放疗室的结构与功能要求等,书中重点论述了当前和今后主流放射治疗设备——医用电子直线加速器的专业知识,并对行波加速器和驻波加速器的整机特点和各个工作系统同步展开介绍。本书内容深入浅出,全面详细,重点突出,可作为生物医学工程专业的教材选用,也可作为放疗设备的维修工程师、放射物理师、放疗技师以及放疗设备的科研生产人员的参考用书。

序

放射治疗设备是运用放射束线对患者进行诊断和治疗的设备。它是继影像设备之后发展速度最快的现代高科技医疗设备,是继手术治疗和化疗之后的又一治疗肿瘤的手段。因其在治疗过程中无创伤、无痛苦,所以受到广大患者的欢迎。

随着科学技术的日益进步和发展,加速器技术的发展十分迅速。人们已将加速器技术用于许多医用加速器,包括电子、质子和重离子加速器,能量可以从几个百万电子伏特到几百个百万电子伏特,有直线型和回旋型等,它们广泛地运用于疾病的诊断和治疗。在一些发达国家已经形成了一个包括各种医疗设备在内的现代生物医学工程新兴产业,而放射治疗设备就是其中一种重要的医疗设备。应该承认,我国的放射治疗情况和世界上一些先进发达的国家还有很大的差距,因此也有很大的发展空间。在北美地区有 1 900 个放射性治疗中心,有 2 458 座放射治疗设备,每百万人口就有 8.2 台放射治疗设备(指加速器和钴源);而南亚地区人口要比北美多 4 倍,却只有 220 个放射治疗中心,332 座放射治疗设备,每百万人口仅 0.3 台放射治疗设备。

宫良平教授编著的《放射治疗设备学》一书全面和深刻地论述了放射治疗设备的工作原理、设备类型、结构特点和发展趋势,对于从事放射治疗的工作人员,尤其是对于数以千计的临床工程师和相关的工程技术人员是非常有用的。

本书作者长期以来一直从事大型放射治疗设备的技术应用和管理维护工作,熟悉目前世界上最先进的放射治疗设备的机型和结构原理,收集了大量的国内外技术资料,并在山东大学开设放射治疗设备学课程,此书就是在上述基础上编著而成的。这是一本内容新颖,很有实用价值的教科书,可供生物医学工程专业的大学本科生(专业课)、研究生阅读参考,也是从事放射治疗设备生产研究和工程技术人员,医院中使用和维护放射治疗设备的临床工程师、放射物理师及相关技术管理人员重要的实用参考书。

中国科学院原子能研究院
中国科学院院士



前言

放射治疗设备是继医学影像设备之后发展速度最快的现代大型高科技医疗装备,是继手术治疗和化疗(药物治疗)之后的新型肿瘤治疗手段,其最大特点是治疗过程中无创伤、无痛苦,所以受到医疗界和患者的广泛欢迎。就其科技含量、设备价值和发展速度来讲,以医用电子直线加速器为典型代表的现代大型放射治疗设备的结构非常复杂,它涵盖了许多重要的现代科技成果,是价格最为昂贵的现代医疗设备。虽然放射治疗技术近年来发展速度很快,但在现代大型医疗设备中,放射治疗设备的临床开发应用时间相对比较晚,人们对它还比较陌生。从这一个角度来讲,在现代医疗领域,大型放射治疗设备是一个新的“知识增长点”。本书的出版发行,可以为各高校的生物医学工程专业提供一本最新的专业教材,有益于促进和进一步完善这一边缘学科的教学,同时我们也希望能对从事放疗设备工作的工程技术人员及相关的医务人员的工作有所裨益。

本书分为两篇 13 章。其中,第一篇是基础知识部分,综合介绍了放射治疗设备的发展历史及类型、放射物理学的基本概念和相关知识、各种放疗设备综述、放疗配套产品以及放疗室的结构要求和功能设计等知识;第二篇专题分析介绍现代医用电子直线加速器,内容涵盖了行波医用电子直线加速器与驻波医用电子直线加速器的整机结构原理及各个工作系统的结构特点、工作原理和分析比较。在本书的编写过程中,作者始终坚持深入浅出的原则,在能够阐明现有设备结构与工作原理的前提下,尽量将复杂的、必要的相关知识通俗化、简明化。此外,作者也尽量从临床实用出发,理论联系实际,将所学知识点与临床应用相结合,让读者既要知其然,也要知其所以然,以便读者既能全面理解和掌握现有知识结构,也能举一反三,开拓思路,有利于在今后的实际工作中开展创新型工作。

值此付梓之际,特别感谢中国科学院院士、中国科学院原子能研究院王乃彦教授,特别感谢中国原子能科学研究院核技术应用研究所王国宝所长,特别感谢人民军医出版社相关编辑出版工作人员,也特别感谢长期支持帮助我的领导和同事。本书出版后,希望各位同道多提宝贵意见,以便再版时斧正。

宫良平
山东大学齐鲁医院

目 录

第一篇 基础知识

第 1 章 绪论	(3)
第一节 放射治疗设备的发展历史	(3)
一、放射线的发现与医学应用	(3)
二、千伏级 X 线治疗设备阶段	(3)
三、兆伏级 X 线治疗设备阶段	(4)
四、从普通放射治疗到精确放射治疗的发展	(5)
五、中国放射治疗设备的临床应用和设备发展历史	(5)
六、放射治疗设备的发展趋势	(6)
第二节 放射源、放射线的概念、类型及特点	(6)
一、基本概念	(6)
二、放射源的类型	(7)
三、放射线的类型	(8)
四、各种射线的特点	(10)
第三节 医用加速器在放疗设备中的地位	(12)
第 2 章 放射物理学要点	(13)
第一节 放射物理学基础	(13)
一、原子结构与放射性核素	(13)
二、人工射线装置的放射性原理	(15)
三、粒子辐射对物质的作用原理	(16)
四、光子辐射对物质的作用原理	(17)
第二节 电离辐射的能量	(20)
一、电离辐射的能谱概念	(20)
二、放射性核素的辐射能量	(20)
三、中低能 X 线的辐射能量	(20)
四、高能 X 线的辐射能量	(22)
五、高能电子束的辐射能量	(24)
第三节 常用电离辐射量与单位	(26)
一、放射性活度	(27)
二、照射量	(27)

三、吸收剂量	(28)
四、比释动能	(29)
五、当量剂量	(29)
六、照射量、吸收剂量、比释动能之间的关系	(30)
第四节 临床剂量学简介	(30)
一、基本概念	(30)
二、基本原则	(31)
三、主要内容	(32)
第五节 吸收剂量的测量与校准	(35)
一、基本测量方法	(35)
二、IAEA 校准方法	(36)
第六节 放射卫生防护常识	(41)
一、重要性	(41)
二、基本原则	(41)
三、基本措施	(42)
四、基本标准简介	(42)
第3章 各种放射治疗设备简介	(44)
第一节 医用加速器	(44)
一、概述	(44)
二、医用电子直线加速器	(48)
三、医用电子感应加速器	(48)
四、医用回旋加速器	(49)
五、医用质子加速器	(54)
六、新型医用电子直线加速器	(56)
第二节 其他体外放射治疗设备	(61)
一、千伏级 X 线治疗机	(61)
二、 ^{60}Co 治疗机	(63)
三、 γ -刀系统	(67)
四、X-刀系统	(68)
第三节 体内放射治疗设备	(69)
一、近距离后装治疗机的基本结构	(69)
二、近距离后装治疗机的工作原理	(72)
第4章 放疗配套设备	(73)
第一节 模拟定位系统	(73)
一、模拟定位机	(73)
二、CT 模拟机与模拟机 CT	(74)
第二节 治疗计划系统	(75)
一、硬件配置	(75)
二、软件功能	(76)

第三节 射野挡铅制作设备	(77)
一、射野挡铅与组织补偿	(77)
二、挡铅制作设备	(77)
第四节 体位固定设备	(79)
一、体位固定的临床意义	(79)
二、体位固定设备的类型	(79)
第五节 放疗验证与剂量检测设备	(81)
一、放疗验证设备	(82)
二、剂量检测设备	(85)
第5章 放疗室的结构与功能设计	(89)
第一节 基本结构与屏蔽设计	(89)
第二节 功能要求	(91)
第三节 辐射监测与验收	(92)
一、加速器辐射头及准直器的泄漏辐射	(92)
二、治疗室外 X 线泄漏	(93)
三、治疗室外中子辐射泄漏	(93)
四、辐射头附近的感生放射性辐射水平	(93)

第二篇 医用电子直线加速器

第6章 概论	(97)
一、基本功能	(97)
二、主要指标	(97)
第7章 基本结构与工作原理	(99)
第一节 结构类型	(99)
一、结构综述	(99)
二、行波加速器的外形结构	(100)
三、驻波加速器的外形结构	(101)
第二节 结构原理	(102)
一、行波加速器内部结构原理	(102)
二、驻波加速器内部结构原理	(102)
第三节 基本工作原理	(104)
第四节 行波与驻波加速器的结构比较	(104)
第8章 加速管系统	(106)
第一节 加速管的理论模型	(106)
一、行波加速管的基本理论模型	(106)
二、驻波加速管的基本理论模型	(106)
第二节 行波加速管	(108)
一、行波电场的建立	(108)

二、行波加速管工作原理	(109)
三、行波加速管的基本结构	(115)
四、行波加速管的基本特性	(117)
第三节 驻波加速管	(122)
一、驻波电场的建立	(122)
二、驻波加速管的工作原理	(126)
三、驻波加速管的基本结构	(128)
四、驻波加速管的基本特性	(131)
第四节 加速管的工作特性	(134)
一、负载特性	(134)
二、功率特性	(136)
三、频率特性	(138)
第五节 加速管的能量转换方式	(139)
一、行波加速管的能量转换	(139)
二、驻波加速管的能量转换	(139)
第六节 行波管与驻波管的特性比较	(141)
一、结构特点与微波功率的利用效率	(141)
二、能量增益的比较	(141)
三、建场时间与微波脉冲宽度	(142)
四、对微波工作频率的要求	(142)
五、能谱分布特点	(143)
第9章 微波系统	(144)
第一节 微波基础知识	(144)
一、微波概述	(144)
二、微波原理与微波源	(145)
三、微波传输方式与传输特点	(147)
第二节 磁控管	(154)
一、磁控管的基本结构	(154)
二、磁控管工作原理	(156)
三、磁控管的工作特性	(161)
四、磁控管的负载特性	(164)
五、磁控管灯丝的供电特点	(166)
第三节 速调管	(167)
一、速调管的基本结构	(167)
二、速调管工作原理	(169)
三、速调管的射频驱动器	(170)
四、速调管的性能指标	(171)
第四节 微波传输器件	(172)
一、直通波导管与弯曲波导管	(172)

二、定向耦合器	(173)
三、模式转换波导管	(177)
四、波导接口	(178)
五、波导窗	(179)
六、微波移相器	(180)
七、微波隔离器与环流器	(181)
八、微波衰减器与吸收负载	(185)
第五节 医用加速器的微波传输系统	(187)
一、行波医用加速器的微波传输系统	(187)
二、驻波医用加速器的微波传输系统	(189)
第六节 微波频率自动控制系统	(191)
一、微波频率控制系统概述	(191)
二、行波双腔自动稳频系统	(192)
三、行波控相自动稳频系统	(194)
四、驻波锁相自动频率控制系统	(198)
第七节 波导管充气系统	(200)
第 10 章 电子发射系统	(202)
第一节 电子发射系统概述	(202)
第二节 电子枪的基本结构与特点	(204)
一、二极电子枪的基本结构	(204)
二、三极(栅控)电子枪的基本结构	(206)
第三节 电子枪的基本控制原理	(207)
一、二极电子枪的基本控制原理	(207)
二、三极(栅控)电子枪的基本控制原理	(208)
第 11 章 高压脉冲调制系统	(210)
第一节 高压脉冲调制系统概述	(210)
第二节 独立式高压脉冲调制系统	(211)
一、基本电路原理	(211)
二、高压充电储能原理	(213)
三、高压放电负脉冲原理	(216)
四、基本功能控制原理	(219)
第三节 机载式高压脉冲调制系统	(223)
一、基本电路原理	(223)
二、高压充电储能原理	(223)
三、高压放电负脉冲原理	(225)
四、基本功能控制原理	(225)
第四节 高压脉冲调制系统的关键器件	(227)
一、高压脉冲形成网络	(227)
二、高压开关器件(氢闸流管)	(231)

三、充电电感(充电变压器)	(236)
四、充电二极管	(237)
五、脉冲变压器	(237)
第 12 章 真空系统	(239)
第一节 真空概述	(239)
第二节 溅射离子泵	(241)
一、溅射离子泵的基本结构	(241)
二、溅射离子泵的工作原理	(242)
三、溅射离子泵的高压电源	(246)
四、真空度的计量单位	(247)
五、医用加速器的真空测量	(248)
第三节 真空检漏	(249)
一、真空漏气	(249)
二、真空检漏方法	(249)
三、氦质谱真空检漏仪简介	(250)
第 13 章 其他系统	(252)
第一节 束流控制系统	(252)
一、聚焦系统	(252)
二、导向系统	(253)
三、偏转系统	(254)
第二节 辐射系统	(257)
一、靶窗转换机构	(257)
二、射线的均匀性处理	(258)
三、输出剂量的测量与控制	(260)
四、射线准直器	(262)
第三节 温度自动控制系统	(263)
第四节 机械系统	(264)
第五节 电气控制系统	(265)
第六节 运动控制系统	(270)

第一篇

基础知识

第1章 绪论

第一节 放射治疗设备的发展历史

放射治疗技术是通过人工射线或天然射线对肿瘤病人或其他病灶实施无创性治疗的现代放射治疗手段。人工射线是由各类人工射线装置或设备产生的放射线；天然射线是由天然放射性核素发出的放射线。放射治疗设备是伴随着放射线的发现与应用研究而逐步发展起来的现代医学治疗装备。

一、放射线的发现与医学应用

1895年,德国科学家伦琴(William Conrad Roentgen)发现了X线。

1896年,法国科学家贝克勒尔(Becquerel)发现了放射性核素镭(^{226}Ra)。

1898年,法国物理学家居里(Pierre Curie)夫妇成功地分离出了放射性核素镭(^{226}Ra),并首次提出了“放射性”的概念,为放射诊断学和放射治疗学奠定了基础。

1899年,在瑞典的斯德哥尔摩,医生们首次应用电离辐射治疗皮肤癌病人。

1905年,居里夫人与其他科学家一起发明了将核素镭(^{226}Ra)用铂金封装成管状线源的放射源,用于治疗皮肤癌和宫颈癌,开发出近距离敷贴治疗和腔内放射治疗的新技术。

1906年,人们发现,放射性核素产生的电离辐射仅对部分病种和病例有效,也发现了一些经过放射治疗后的放射损伤。当时,没有可靠的放射治疗设备,基本是手工操作,由于放射性核素随时都有放射性,因此对工作人员具有很大的辐射损伤和潜在的误照危险,并且也不知道怎样测量电离辐射的质和量,对放射治疗的机制也不是很清楚,所以,放射治疗技术一度步入低潮。

二、千伏级X线治疗设备阶段

虽然采用天然放射源进行放射治疗遇到挫折,但学者们并没有放弃对放射治疗技术和放射治疗设备的研究与探讨。随着对放射物理学和放射治疗机制等科学技术的持续研究,人们认识到,由于天然放射源存在能量低、放射性不易控制等诸多缺点,只能用于部分皮肤癌等表浅部位病灶的放射治疗,对较深部位的肿瘤则无能为力。因此,学者们逐步将视野与精力转入了对人工射线装置和放射治疗设备的研究与研制阶段。

1910年,美国人Coolidge研制成功钨丝热阴极X线管。

1913年,Coolidge研制成功140千伏(kV)级X线机。

1920年, Coolidge又研制成功200千伏(kV)级X线机。

X线管和X线机的发明,开创了放射诊断和放射治疗技术的新纪元。其中,影像诊断设备X线机至今仍在广泛应用。

随着时间的推移和技术的进步,之后又逐步推出了更高能量的X线治疗机。

显然,加在X线管上的电压越高,X线的能量就越高,辐射就越深。因此,人们就用X线管的管电压来表示X线的输出能量。根据不同的能量范围,可将其分为以下三种类型。

1. 接触X线治疗机(10~60kV)。
2. 浅部X线治疗机(60~160kV)。
3. 深部X线治疗机(160~400kV)。

后来还出现过800 kV和1 000 kV的X线治疗机,但由于技术和安全等原因而没有在临床上得到推广应用。

由于千伏(kV)级X线治疗机具有辐射可控性等优点,保障了工作人员的辐射安全性,因而受到设备操作人员的欢迎。

但理论和实践都表明,千伏(kV)级X线治疗机输出的X线的能量仍然太低,其最大剂量分布在皮肤下较浅部位,当治疗较深部位肿瘤时,在肿瘤尚未得到足够剂量时,皮肤反应已经非常严重。但受材料和安全技术等因素的制约,其管电压不可能继续提高,因此,千伏级X线治疗机后来逐步走入低谷,直至淘汰,目前已经很难见到。

三、兆伏级X线治疗设备阶段

如前所述,以X线管为核心部件的X线治疗机,只能提供千伏(kV)级X线,适合于表浅组织的肿瘤放射治疗。因此,要对体内深部肿瘤实施无创性放射治疗,只能依靠开发新的人工射线装置或放射治疗设备。

事实上,兆伏(MV)级以上的射线装置,首先是原子能研究或者说核能研究领域的产物,在医学上的应用只是其众多应用领域的一个分支而已。

1931—1937年,美国、法国和英国等国家,曾先后将输出能量为1~2.5 MeV的电子静电加速器应用于临床放射治疗。但由于这类装置的输出能量仍然较低,而且体积庞大,不适合于医院环境的应用,从而没有得到进一步的发展与应用。

1940—1949年,美国、德国、日本、前苏联和瑞士等国家,曾先后将电子感应加速器应用于临床放射治疗。但由于这类装置运行时电磁铁的噪声很大,而且输出射线的剂量率不稳定,辐射性能较差,因此也没有得到进一步的发展。

1950年,加拿大科学家利用反应堆生产的人工放射性核素⁶⁰钴(⁶⁰Co),研制生产出外照射⁶⁰钴治疗机。这种装置可以发射1.17 MeV和1.33 MeV两种 γ 射线,其深度剂量分布与2.5 MeV的电子加速器相当。由于这种装置结构简单、成本较低、运行维护方便,因此,在发展中国家和我国至今仍有生产,主要在中小医院应用。

为了开发更高能量并且适合于医用的放射治疗设备,在20世纪50年代至20世纪70年代,许多国家先后研究开发了各种不同类型的医用加速器,主要类型包括:电子回旋加速器、电子直线加速器、质子加速器和其他重离子加速器等。由于医用电子直线加速器可以输出不同能量的X线和电子射线,输出能量可以从几个兆电子伏到几十兆电子伏,基本可以满足临床需求,且其相对成本较低,因而得到了迅速发展。其他几类医用加速器,虽然性能也比较优越,

但由于结构更加复杂庞大、成本太高等原因,致使它们的发展速度比较缓慢,真正投入临床应用的很少。

目前,医用电子直线加速器是放射治疗领域的主流产品,是放射治疗的核心设备。

能够提供医用电子直线加速器的国外公司目前主要有3家:美国瓦立安公司(Varian)、瑞典医科达公司(Elekta)、德国西门子公司(Siemens)。国内医用加速器的生产企业中,原来的北京医疗器械研究所已经被医科达公司兼并,成为外资企业;目前,位于山东省淄博市的新华医疗器械公司是国内主要的医用加速器研究和生产企业。

四、从普通放射治疗到精确放射治疗的发展

与以往手术治疗不同的是,放射治疗属于无创治疗,因此,照射部位、照射角度以及照射野形状的选择和病灶的定位就显得非常重要。

普通放射治疗的常规定位方法是在模拟定位机上通过X线透视的方法确定病灶部位、形状和照射角度等,并在人体表面画上标记,然后在放射治疗机上实施放射治疗。显然,这种定位方法的位置误差较大,有时会影响疗效。因此,在研究开发各种放射治疗设备的同时,尤其是在确立了医用电子直线加速器在放射治疗领域的主导地位之后,如何提高并确认病灶的定位精度,自然就成了放射治疗设备研究的主攻方向。

1949年,瑞典的Leksell首次提出了立体定向放射外科理论,开创了精确放射治疗的先河。

1959年,日本的Takahashi提出了“适形”放射治疗原理,首创多叶准直器。

1968年,瑞典的Elekta公司推出了以 ^{60}Co 为辐射源的专门用于脑部肿瘤治疗的立体定向放射外科治疗装置,该装置是利用201颗 ^{60}Co 辐射源发出的 γ 射线,经准直孔聚焦到脑部肿瘤进行精确放射治疗。治疗效果可与手术切除相媲美,故这种放射治疗装置被称为 γ -刀系统,是脑部肿瘤的专用精确放射治疗设备,至今临床上仍在应用。

1974年,美国的Larsson等人提出了用医用电子直线加速器代替 ^{60}Co 做立体定向放射治疗的建议,开创了以医用电子直线加速器为辐射源的精确放射治疗新起点。

1977年,美国的Bjargard和Kijewski等提出了“调强适形”放射治疗原理。

1984年,出现了以医用电子直线加速器为辐射源,采用非共面弧形旋转放射治疗的头部专用立体定向放射治疗装置,可以达到毫米级甚至更高的立体定向定位精度。由于医用电子直线加速器发出的是X线,并且专门用于头部精确放射治疗,也可以达到类似于手术切除的治疗效果,故被称为头部X-刀,简称“头-刀”。

1994年,瑞典Lax等开发了专门用于体部精确放射治疗的立体定向定位系统,被称为体部X-刀,简称“体-刀”。

2003年之后,美国瓦立安公司(Varian)、瑞典医科达公司(Elekta)和德国西门子公司(Siemens)等先后开发并推出了以医用电子直线加速器为核心的“调强适形”放射治疗设备(intensity modulated radiation therapy, IMRT)和“影像引导”放射治疗设备(image guide radiation therapy, IGRT)。标志着放射治疗设备已经进入了一个以“调强适形”和“影像引导”为核心技术内容的精确放射治疗新阶段。

五、中国放射治疗设备的临床应用和设备发展历史

中国的放射治疗开始于20世纪30年代。当时,只有北京协和医院和上海比镭医院可