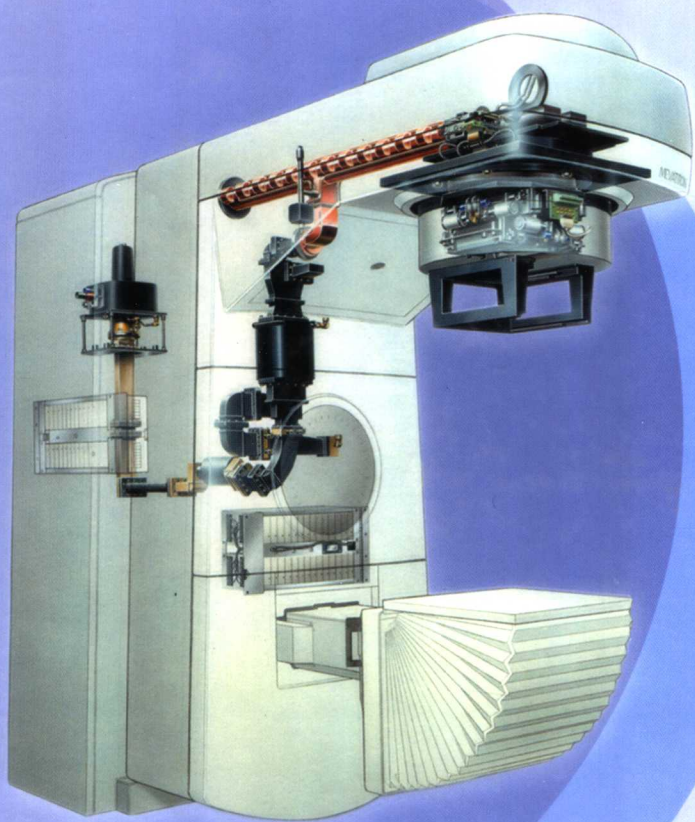





医用加速器

◎ 主编 顾本广



 科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

医用加速器

主 编 顾本广

副主编 林郁正 赖启基 赵洪斌

科学出版社

北 京

内 容 简 介

医用加速器是放射治疗的主要装置,本书是由全国多所大学、研究所、医院、生产单位从事医用加速器研制、生产、使用的数十名专家编写的。全书共分两篇 22 章,第一篇有 17 章,系统介绍医用电子加速器,包括电子直线加速器和电子回旋加速器的加速原理,束流传输系统、微波系统、稳频系统、温控系统、充气系统、电子枪系统、真空系统、辐射系统、剂量监测系统、机械系统、定位系统、高压脉冲调制器、控制系统、网络系统等各分部系统,以及治疗室辐射防护规划设计、性能检验、维护维修等;第二篇介绍医用质子加速器、医用重离子加速器、中子治疗加速器以及用于生产放射性核素的医用回旋加速器等,最后一章介绍一些专用的特种医用加速器。全书反映了放射治疗技术与医用加速器的最新进展。

本书是按卫生部医学考试中心制订的《全国医用加速器技术人员上岗考试大纲》的要求编写的,被国家医学考试中心和中华医学会继续教育部指定为医院技师、工程师及有关工程技术人员上岗培训专用教材。

本书亦可作为科研院所研究人员、工厂技术人员、大学有关专业大学生与研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

医用加速器/顾本广主编. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-012257-7

I. 医… II. 顾… III. 医用加速器 IV. TH789

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 085873 号

责任编辑:胡 凯 李 锋/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003 年 10 月第一次印刷 印张:55

印数:1—3 500 字数:1 277 000

定价: 110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

编 著 人 员

主 编：顾本广

副主编：林郁正 赖启基 赵洪斌

编 委：（按姓氏拼音排序）

李秀清 梁岫如 秦国勇 史 荣 唐金媛 童德春 王克礼 王连元

王小韵 闫俊奇 袁增慰

编著人员：（排名不分先后）

黄斐增	北京大学技术物理系	副教授
林郁正	清华大学工程物理系	教授
童德春	清华大学工程物理系	教授
王克礼	清华大学工程物理系	教授
张化一	清华大学工程物理系	教授
赖启基	南京大学物理系	教授
赵明华	南京大学物理系	副教授
丁小平	南京大学物理系	副教授
陈春根	上海大学	讲师
郁庆长	中国科学院高能物理所	研究员
刘世杰	中国科学院高能物理所	研究员
唐锦华	中国科学院高能物理所	研究员
李镇淮	中国科学院电子所	研究员
王义芳	中国科学院兰州近代物理所	研究员
靳根明	中国科学院兰州近代物理所	研究员
李 强	中国科学院兰州近代物理所	研究员
李振国	中国原子能研究院	研究员
朱惜安	北京机械工业自动化研究所	研究员
田中青	中国计量科学院	研究员
刘明远	北京医院	主任医师
朱庙生	北京医院	主任技师
刘原照	北京医院	副主任医师
肖泽久	北京大学人民医院	研究员
袁增慰	中国医学科学院肿瘤医院	研究员
韩树奎	北京肿瘤医院	主任技师
王连元	解放军总医院	主任技师
王所亭	解放军总医院	高级工程师

吴毅	北京市卫生防疫站	主任技师
顾本广	北京医疗器械研究所	研究员
赵洪斌	北京医疗器械研究所	研究员
周平	北京医疗器械研究所	研究员
高雨业	北京医疗器械研究所	研究员
徐庆旭	北京医疗器械研究所	副研究员
刘周明	北京医疗器械研究所	研究员
曲桂红	北京医疗器械研究所	副研究员
林小奇	北京医疗器械研究所	高级工程师
闫俊奇	北京医疗器械研究所	高级工程师
史荣	北京大恒公司	高级工程师
丘学军	北京大恒公司	研究员
李秀清	山东新华公司	高级工程师
杨海峰	山东新华公司	工程师
尹振宇	山东新华公司	工程师
张永源	广东威达公司	高级工程师
杜刚	北京瑞明公司	工程师

序 一

物理学作为研究物质运动基本规律的科学已成为现代生命科学和医学发展的重要基础。物理学对于提高人类生活质量的贡献,在医学中表现最为明显。正是物理学与生物学、化学的结合推动了现代医学的进步。

许多诺贝尔物理奖的成果在医学的常规诊断与治疗中发挥着巨大的作用,如 X 射线、X-CT、MR、超声、激光、超导、正电子等,其中最典型的例子是 1901 年第一个诺贝尔物理奖获得者伦琴于 1895 年发现的 X 射线。X 射线的发现导致了放射诊断和放射治疗两大学科的产生,这对医学发展起了无法估量的影响。正是由于放射治疗和诊断的需要,使各种医用加速器走进了医院。

加速器本来是物理研究的工具,以往仅在国家实验室和大学中可以看到,现在几乎各个大型综合医院及一些专科医院都装备了医用电子直线加速器。有的医院或诊疗中心还装备了电子回旋加速器、质子回旋加速器、质子同步加速器、质子直线加速器甚至高能量的重离子加速器等。医用加速器技术也已成为历届国际加速器会议的一个重要的热门专题。

随着这些复杂的医用加速器的使用,医院技术人员迫切需要一本有关医用加速器的参考书,这本《医用加速器》正是适应这个需要而出版的。参与编写本书的人员都是在国内长期从事医用加速器研制开发、生产制造和临床使用的第一线人员,这本书不仅是医院技术人员的参考读物,而且也将会受到研究所和大学的欢迎,因此乐为之序。

我衷心希望这本书的出版不仅能为我国放射医疗保健事业的发展做出一点贡献,还能为我国医用加速器的发展起一些推动的作用。

陈佳洱

中国物理学会理事长
中国科学院院士
2003 年 2 月

序 二

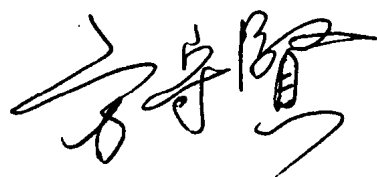
带电粒子加速器是一种技术复杂的精密装置,它是多种学科的综合体,集众多领先技术于一身,从这本书各章内容即可看出,它涉及核物理、放射物理、加速器物理、束流物理、微波、超高真空、剂量、辐射防护、精密加工、高压、脉冲、自动控制、计算机、网络、电子学等多种学科和技术。

带电粒子加速器是核物理、粒子物理实验研究的重要工具。最近 20 多年来,又发展成为众多学科,如凝聚态物理、化学、生物、材料、医学等的主要研究工具。学科的需求成为加速器发展的主要动力,而加速器的进展又大大推动了这些学科的发展。

加速器发展的成果,也被广泛地应用于国民经济领域的各个方面。早期发展起来的低能量的加速器已在工业、农业、环境、医学等方面发挥了积极的作用,越来越多的人认识到它的重要性。特别是低能医用加速器已成为必不可缺的医疗工具。不论是用加速器生产短寿命同位素,还是用它来产生 X 射线、中子、质子、重离子,都成为对付肿瘤的重要手段。事实上,在各种加速器中,医用加速器的数量最多,全世界每天有数千台医用加速器在各国医院中为患者服务。

目前国内约有 600 多台医用电子直线加速器在使用,其中一半以上是国产加速器,医用电子回旋加速器也已安装使用。用于肿瘤治疗的医用质子加速器正在筹建之中,用于生产正电子放射性核素的医用回旋加速器也有多台在医院中工作。加速器发展的动力已不再单纯来自于以高能物理为代表的基础研究,而且还来自于诸多应用方面的强烈需要。正是这两股力量,把加速器及其技术的发展推向更高的水平。

参与本书编写的有全国多所大学、研究所、医院、工厂有关专业专家。本书反映了我国在医用加速器研究、生产、使用方面的成果和经验,它的出版必将进一步促进我国医用加速器事业的发展。



粒子加速器学会理事长

中国科学院院士

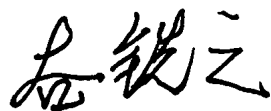
2003 年 2 月

序 三

中华放射肿瘤学会在2001年对放射治疗人员及设备进行了第4次调查,到2001年底全国共有放疗单位715个、医生5113人、物理师619人、技术员2465人、工程师932人,其中工程技术人员占3397人。以上调查说明了一个问题,即我国放疗机构中,临床医疗人员占第一位,工程技术人员已占第二位。

肿瘤放射治疗是由放射肿瘤医师、放射物理师、放射治疗技师等人员利用先进放射治疗技术和装置协同完成的,该队伍成员的技术素质有重要作用。目前已出版有《肿瘤放射治疗学》、《肿瘤放射物理学》及《肿瘤放射生物学》几本专著,而广大在放疗单位工作的工程技术人员至今没有一本合适的参考书。

由粒子加速器学会与医疗装备协会共同组织全国力量编写的《医用加速器》一书不仅有深入浅出的理论分析,而且有实用的检验、维修维护方法,是一本适合中国国情、有中国自己研究成果和经验的专著,不仅可用作放射治疗工程技术人员培训和进修的参考教材,它的出版还将使我国放射治疗专业参考书进一步齐备,对我国放射治疗事业的发展将起到积极的促进作用。



中华医学会放射肿瘤学会名誉主任委员
2003年1月

前 言

医用加速器是指专门用于临床医学的加速器,是加速器中与人民生命健康有直接关系的一种,其主要用途为对恶性肿瘤进行放射治疗。

放射治疗在对恶性肿瘤治疗中占有重要的地位,虽然每年不断有新的治疗方法出现,但放射治疗的地位始终没有降低,约有 70% 的肿瘤患者需要接受放射治疗。放射治疗是人类在 20 世纪的一项重大发明,我国已故著名肿瘤学家吴恒兴教授在生前曾预言,即使进入 21 世纪后,放射治疗在肿瘤治疗中仍将起到重要作用。

据我国“九五期间全国医疗照射水平调查研究”统计,我国每年需要接受放射治疗的肿瘤患者为 140 万人,而实际接受放射治疗的患者只有约 50 万人,由于设备的缺乏,许多患者得不到应有的治疗机会。国际上将每百万人口拥有的医用加速器数作为表征一个国家的卫生事业水平重要指标之一,美国等发达国家每百万人口达到 10 台以上,我国医用加速器增加很快,总数虽已达 600 余台,但每百万人口仅约为 0.45 台,远不如发达国家。

放射治疗技术的发展与加速器技术的发展密切相关,在过去一个世纪中,不断有新的技术与装置出现,也不断有一些退出,例如深部 X 射线治疗机、医用电子静电加速器、医用电子感应加速器等在历史上都曾发挥过作用,现在都不再生产,有一些如 π^- 介子,虽然曾被人们寄以希望并有了试验装置,但因无明显优越性而未生产。

当前医用加速器的代表是医用电子直线加速器,医用电子直线加速器不仅是加速器中台数最多的一种,也是各种放射治疗装置中台数最多的一种,医用电子直线加速器是最主要的放射治疗装置。为此,本书重点介绍医用电子直线加速器,兼顾其他台数较少的加速器,而对历史上曾经出现过但现在医院已不再采用的加速器不作专门讨论。

本书共分两篇 22 章。第一篇,共 17 章,第一章为全书的绪论,第二章至第十七章介绍医用电子加速器,其中第二章为医用电子直线加速器加速原理;第三章至第十四章分别介绍医用电子加速器各分部系统,如束流传输系统,微波系统,稳频、温控、充气系统,电子枪,真空系统,辐射系统,剂量监测系统,机械系统,定位系统,脉冲高压调制器,控制系统,网络系统等;第十五章介绍医用电子回旋加速器加速原理;第十六章介绍医用电子加速器的辐射防护设计;第十七章介绍医用电子加速器的性能检验、安全要求及维护保养。第二篇共 5 章,其中第十八章至第二十一章介绍医用质子、重离子加速器,包括用于中子治疗的质子直线加速器和专门用于生产核医学诊断装置所需放射性核素的医用回旋加速器,第二十二章介绍各种专用及特种医用加速器。

从事放射治疗事业的人员是由放射肿瘤临床医师、放射物理学人员和医用加速器进行操作、维护保养的技术人员组成的,目前临床方面已有《肿瘤放射治疗学》,物理方面已有《肿瘤放射物理学》两书出版,而对于像医用加速器这样的复杂物理装置尚无专门书籍介绍,给医院技术人员进修带来困难。为此,卫生部于 2001 年报请国家继续教育委员会批准举办全国医用加速器工程技术人员培训班,作为专业人员必须进修的课程,通过考核后授予学

分,本书将作为培训班的主要教材。

本书所用名词术语一律采用国家标准 GB/T17857-1999《医用放射学术语(放射治疗、核医学和辐射剂量学设备)》中规定的标准术语。本书所用量和单位一律采用国家标准 GB 3100~3102-1993《量和单位》中规定的国际标准单位。

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对常规放射治疗用医用电子加速器的性能和试验方法及安全要求颁布了国际标准(international standard),中国国家质量监督检验检疫总局也颁布了相应的中国国家标准(GB),本书在介绍各部分系统时,相应地对有关标准要求作了介绍。随着科学技术的进步,各种标准都在不断修订补充,并且书中不可能完全按标准原文陈述,因此在应用所介绍标准的条文、数据、图表时,应以最新颁布的标准原文为准。

参加本书编写的是直接从事医用加速器研制、开发、运行、维护、使用的专家,来自全国各大学、研究所、生产单位和医院,由顾本广进行总的编审和统稿。

由于医用加速器涉及的学科非常广泛,编者水平有限,错误在所难免,尚希方家不吝指正。

本书从策划阶段就得到中国科学院陈佳洱院士、方守贤院士,中国医学科学院肿瘤医院谷铎之教授、殷蔚伯教授的大力支持与鼓励,并得到中国物理学会粒子加速器分会、中国医疗设备协会和国家科学技术学术著作出版基金委员会的支持,仅此表示感谢。

本书在编辑出版过程中,秘书组刘璟怡、宋琳和邓世林等同志做了大量图文编辑、校对等工作,在此表示感谢。



2003年1月

目 录

第一篇 医用电子加速器	1
第一章 绪论	3
第一节 电离辐射的特性	3
第二节 放射治疗的原理	11
第三节 放射治疗的分类	21
第四节 放射治疗对辐射性能的要求	25
第五节 远距离放射治疗技术	34
第六节 医用加速器在肿瘤治疗中的地位	39
第七节 放射治疗技术及医用加速器的发展历史	41
参考文献	44
第二章 电子直线加速器的加速原理	46
第一节 加速电场及电子能量的获得	46
第二节 行波加速原理——纵向运动及相运动	49
第三节 电子在行波电磁场中的横向运动	58
第四节 行波加速管结构——盘荷波导	62
第五节 驻波加速原理	69
第六节 驻波加速管结构	73
第七节 电子在驻波电场中的纵向运动及横向运动	83
第八节 电子直线加速器的工作特性	89
第九节 行波与驻波结构的比较	103
参考文献	110
第三章 束流传输系统	111
第一节 聚焦系统	111
第二节 导向系统	120
第三节 偏转系统	122
参考文献	130
第四章 微波系统	132
第一节 磁控管振荡器	132
第二节 速调管放大器	143
第三节 微波传输线	147
第四节 微波传输元件	161
参考文献	173
第五章 稳频、温控及充气系统	174

第一节 自动稳频系统	174
第二节 自动温控系统	196
第三节 波导充气系统	201
第六章 电子枪	205
第一节 工作原理	205
第二节 阴极	219
第三节 电子枪的应用与维护	230
参考文献	237
第七章 真空系统	238
第一节 真空概述	238
第二节 真空获得	243
第三节 真空测量	258
第四节 真空检漏	267
参考文献	275
第八章 辐射系统	276
第一节 辐射产生系统	276
第二节 辐射准直系统	287
第三节 辐射分布系统	300
参考文献	319
第九章 剂量监测系统	321
第一节 电离室	321
第二节 剂量监测电路	326
第三节 剂量监测计数 <i>MU</i> 的校准	332
参考文献	340
第十章 机械系统	341
第一节 机架	342
第二节 辐射头	352
第三节 治疗床	359
第四节 光距尺	363
第五节 治疗附件	364
参考文献	365
第十一章 定位系统	366
第一节 X射线模拟机	367
第二节 CT模拟机	390
第三节 端口影像系统	413
参考文献	425
第十二章 高压脉冲调制器	427
第一节 参数、负载与电路	427

第二节	开关器件	432
第三节	传输线和脉冲形成网络	438
第四节	充电电路和放电电路	446
第五节	反峰电路、阻尼电路、瞬时匹配电路和低 Q 电路	451
第六节	脉冲变压器	458
第七节	控制与保护电路	466
参考文献		468
第十三章	控制系统	469
第一节	控制程序	469
第二节	控制电路	476
第三节	运动控制系统	486
第四节	安全联锁	496
第五节	地线及干扰屏蔽	504
第六节	故障诊断和维修	510
参考文献		517
第十四章	网络系统	518
第一节	计算机网络与分类	518
第二节	局域网的相关概念	522
第三节	PACS 系统	527
第四节	DICOM	532
第五节	DICOM 在放射治疗中的应用	540
第六节	医用电子直线加速器维修与维护的远程连接	555
参考文献		557
第十五章	医用电子回旋加速器	558
第一节	引言	558
第二节	电子回旋加速器原理	559
第三节	医用电子回旋加速器结构	569
第四节	束流的调整特性	576
第五节	电子束扫描调强分布系统	580
参考文献		582
第十六章	辐射防护及治疗室规划设计	583
第一节	辐射防护基础知识	583
第二节	医用电子直线加速器治疗室的辐射屏蔽设计	588
第三节	医用电子加速器的潜在照射及辐射安全	607
第四节	医用电子直线加速器的非辐射危害和防护	608
第五节	医用电子加速器治疗室的验收和监测	610
参考文献		611
第十七章	性能试验、安全与维护	612

第一节	性能试验方法	612
第二节	安全要求	637
第三节	维护与维修	663
参考文献	.....	670
第二篇 医用质子及重离子加速器	.....	671
第十八章 医用回旋加速器	.....	673
第一节	工作原理	674
第二节	结构特点	685
第三节	放射性核素生产	700
第四节	运行与维护	711
参考文献	.....	714
第十九章 医用质子加速器	.....	715
第一节	质子治疗原理	715
第二节	质子治疗装置及其性能要求	720
第三节	质子治疗回旋加速器	727
第四节	质子治疗同步加速器	729
第五节	质子治疗直线加速器	734
第六节	质子束流输运系统和机械系统	737
第七节	束流配送系统	740
第八节	质子剂量测量	751
参考文献	.....	759
第二十章 医用重离子加速器	.....	761
第一节	重离子治癌原理	761
第二节	医用重离子加速器方案	772
第三节	重离子束治疗系统	792
参考文献	.....	801
第二十一章 中子治疗加速器	.....	802
第一节	中子治疗原理	802
第二节	中子源和中子治疗类型	813
第三节	快中子束治癌	817
第四节	质子直线加速器快中子治癌装置	831
参考文献	.....	838
第二十二章 专用及特种医用加速器	.....	840
第一节	术中放射治疗加速器	840
第二节	影像导引放射治疗加速器	847
第三节	断层治疗电子直线加速器(tomotherapy)	860

第一篇 医用电子加速器

第一章 绪 论

第一节 电离辐射的特性

一、辐射的分类

放射治疗是从 1895 年伦琴(W. Roentgen)发现 X 射线(X ray)后开始的。X 射线的发现同时开启了放射治疗与放射诊断两个医学学科。

放射治疗是由一种或多种电离辐射的治疗方式组成的医学治疗。

放射治疗与所用电离辐射的种类、性能有密切的关系。

辐射(radiation)是以波或粒子形式穿过空间或物质介质的发射能量(transmitting energy)的传播。

辐射的种类很多,依据不同情况,可以有不同的分类方法。

(一) 按存在形式分类

按存在形式,辐射可分为电磁辐射与粒子辐射两大类。

1. 电磁辐射

电磁辐射是以电磁波形式存在的辐射,如 X 辐射、 γ 辐射等。

X 辐射是带电粒子通过原子核或其他带电粒子的电场时,由于受电场作用而发生速度改变,带电粒子的一部分动能转变为具有连续能谱的电磁辐射,称为轫致辐射(bremsstrahlung)或 X 辐射。

γ 辐射是放射性核素衰变发出的辐射。 γ 辐射的能量取决于原子核能态之间的能量差,不具有连续能谱,但 X 辐射与 γ 辐射本质相同,都是电磁辐射。

1905 年,爱因斯坦(A. Einstein)根据普朗克(M. Planck)的光子学说解释光电效应时提出电磁辐射能量 ϵ 与电磁辐射频率 ν 成正比:

$$\epsilon = h\nu \quad (1-1)$$

h 为普朗克常数, $h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 或 $4.1356 \times 10^{-21} (\text{MeV})\cdot\text{s}$; ν 为电磁辐射的频率,单位为赫兹(Hz), $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$ 。

在粒子加速器中,能量常用电子伏(eV)为单位,1eV 代表电荷为 e 的粒子在通过 1V 电势差所获的能量。电子伏与焦耳(J)的关系为

$$1\text{eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$$

电子具有负电荷,数值为 e ,电荷的单位为库仑(C)。

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$