

■ 主 编 杨绍洲 张 锦 牟强善



# 医用直线加速器 原理与质量控制

YIYONG ZHIXIAN JIASUQI  
YUANLI YU ZHILIANG KONGZHI



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

# 医用直线加速器原理与质量控制

YIYONG ZHIXIAN JIASUQI YUANLI YU ZHILIANG KONGZHI

主 编 杨绍洲 张 锦 牟强善



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

---

## 内 容 提 要

---

本书系统介绍了电子直线加速器的基本原理及重要部件,重点阐述了医用直线加速器的系统结构、典型电路、射束产生和监测、机器安装、维修保养及应用质量保证等内容。本书内容深入浅出、图文并茂,既体现了知识的完整性,又注重了知识的实用性。本书可作为高等院校临床医学工程(维修)专业或医疗设备维修培训班的专业教材,可供医用直线加速器维修工程师、放射物理师,肿瘤放射治疗医师、放射治疗技师等人员阅读参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

医用直线加速器原理与质量控制 / 杨绍洲,张锦,牟强善主编. —北京:人民军医出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5091-8901-6

I. ①医… II. ①杨… ②张… ③牟… III. ①医用直线加速器—质量控制—教材  
IV. ①TH774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 053949 号

---

策划编辑:李 玫 文字编辑:张 娟 责任审读:王三荣

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)51927300-8226

网址:[www.pmmp.com.cn](http://www.pmmp.com.cn)

---

印、装:京南印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:20 字数:484千字

版、印次:2016年4月第1版第1次印刷

印数:0001—2020

定价:48.00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

# 编者名单

---

- |     |     |                 |
|-----|-----|-----------------|
| 主 编 | 杨绍洲 | 南方医科大学中西医结合医院   |
|     | 张 锦 | 山西医学科学院山西大医院    |
|     | 牟强善 | 山东省日照市东港区人民医院   |
| 副主编 | 张福勇 | 山东省泰安市中心医院      |
|     | 贾 星 | 大同大学附属医院        |
|     | 王胜军 | 南方医科大学南方医院      |
|     | 李 扬 | 山东省日照市人民医院      |
|     | 牟岩平 | 山东省海阳市人民医院      |
|     | 周丽华 | 深圳市龙岗中心医院       |
| 编 委 | 白小寿 | 内蒙古第一机械集团有限公司医院 |
|     | 曾开奇 | 深圳市龙华新区中心医院     |
|     | 陈天宝 | 中国医学装备协会        |
|     | 董明军 | 新疆自治区沙湾县人民医院    |
|     | 范 杰 | 中国测试技术研究院辐射研究所  |
|     | 侯明扬 | 南方医科大南方医院       |
|     | 黄 浩 | 昆山国力真空电器有限公司    |
|     | 及树理 | 赤峰市医院           |
|     | 姜宇翔 | 安徽省涡阳县人民医院      |
|     | 焦恒来 | 中国人民解放军第 322 医院 |
|     | 金 涛 | 江苏省连云港市第一医院     |
|     | 赖金滔 | 南方医科大学中西医结合医院   |
|     | 梁伟玲 | 广东省惠州市中心人民医院    |
|     | 林建斌 | 广东省惠州市中心人民医院    |
|     | 刘 冰 | 山西医学科学院山西大医院    |
|     | 刘海全 | 北京新世纪妇儿医院       |
|     | 刘 鑫 | 山西医学科学院山西大医院    |
|     | 刘彦伟 | 山东省泰安市中心医院      |
|     | 毛亚杰 | 山西医学科学院山西大医院    |

祁增凌 广东省中山市人民医院  
钱琳琳 山东省泰安市中心医院  
阮长胜 山西省大同市第四人民医院  
田永利 河南省郑州市中心医院  
王 飞 安徽省蚌埠医学院第一附属医院  
王树涛 赤峰市医院  
王秀容 广东省中山市第二人民医院  
王延江 河南省南阳医学高等专科学校第一附属医院  
王耀飞 山西医学科学院山西大医院  
吴惠武 广东省惠州市中心人民医院  
吴浙君 浙江省杭州市余杭区第五人民医院  
闫 锋 北京众泰合经贸有限公司  
尹述含 浙江大学医学院附属口腔医院  
杨爱建 江苏省南通市肿瘤医院  
杨罗宽 四川大学华西医院  
赵运立 山东省东营市人民医院  
钟承双 广东省茂名市中医院  
周晓东 山东省安丘市中医院

# 前 言

---

安全性和有效性是医疗器械的最基本质量特性。《医疗器械使用质量监督管理办法》等法规的相继出台,进一步强调和规范加速器使用环节的安全与质量管理。放射治疗具有疗程长、精度要求高的特点,这要求加速器故障率低、维修速度快。但另一方面,加速器本身结构复杂,涉及高能辐射、高压元器件、真空、微波、水路和气路等,机械运动维度多,是最容易发生故障的医疗设备之一。可以说,放射治疗效果的好坏与加速器的状态完好与否关系密切。

2004年《医用电子直线加速器》一书出版发行。该书系统介绍了医用加速器的基本原理及重要部件,重点阐述了加速器的系统结构、典型电路、射束产生和监测、机器安装、维修保养及应用质量保证等内容,深受同行的欢迎。

考虑到现在加速器技术发展情况和医院临床工程师的实际需要,我们组织同行把实践中总结出来的维护维修与管理经验整理成书,与同行们共享。希望本书能够帮助工程师及早发现和排除故障隐患,提高维修速度,降低机器的故障率和停机时间,延长设备使用寿命,节约维修费用,确保机器性能符合治疗要求,提高治疗质量,更好地服务患者。

本书按照目前常见的机型分章节,力求讲解过程成体系、讲明白、有用处,理论与实践相结合,深入浅出、通俗易懂。虽然有的机型已经不再生产,但考虑到设备还将在医院运行较长的一段时间,厂家的售后服务可能随时停止,更需要医院工程师自己维护,所以,我们仍把这些设备纳入介绍范围。本书没有把各种型号设备的共性部分抽取出来单独描述,而是由作者根据自己的理解进行阐述,可能有些重复,但这样可让读者体会到不同作者对加速器的理解和分析。

加速器质量控制是指确保机器处于完好状态需要采取的技术措施,本书把维护保养、维修、校准和性能检测都归入质量控制的范畴。第一部分为BJ-6B医用直线加速器原理、故障维修与参数;第二部分为新华XHA-600直线加速器工作原理与故障维修;第三部分是Varian 23EX加速器工作原理与维修;第四部分是医用加速器的应用管理相关内容,讲解加速器建设项目的审批和加速器机房的防护设计与建设的流程和注意事项。

本书借鉴了医科达北研(北京)医疗器械有限公司(原北京医疗器械研究所)、山东新华医疗器械股份有限公司和瓦里安医疗设备有限公司等众多厂家的技术资料,参考了国内很多网站很多业内资深专家的网帖内容。山西医学科学院山西大医院毛亚杰、北京众泰合经贸有限公司闫锋和焦圣华、昆山国力真空电器有限公司黄浩等多位工程师为书稿整理作出重要贡献。新华医疗放疗产品事业部各位领导及技术员提供了大力技术支持。本书还得到广东省科技计划项目(2015A030401038)的资助。在此一并表示诚挚的感谢。

本书适合医用加速器维修工程师参考,也可作为加速器技术维修培训班或高等院校临床工程专业的教材,亦可作为放射物理师、放射治疗技师和医学工程专业学生的参考读物。

希望本书能对本行业新人有所帮助,能与各位临床工程师以及前辈、同行和朋友广泛交流。由于水平有限,恳请各位同行和朋友对书中错误批评指正。

杨绍洲

南方医科大学中西医结合医院

2016年3月

# 目 录

---

## 第一篇 BJ-6B 型医用直线加速器工作原理、故障维修与参数调整

第 1 章 医用电子直线加速器概述	(3)
第一节 医用电子直线加速器的基本组成及其作用	(3)
第二节 常规放射治疗对医用直线加速器的基本要求	(11)
第三节 医用直线加速器的基本操作程序和工作原理	(13)
第 2 章 控制系统	(15)
第一节 概述	(15)
第二节 控制程序	(15)
第三节 控制电路	(22)
第四节 运动控制系统	(31)
第五节 安全联锁	(38)
第六节 剂量监测系统	(47)
第七节 自动稳频及温控系统	(62)
第八节 温控系统	(68)
第九节 地线及干扰屏蔽	(73)
第 3 章 BJ-6B 型医用直线加速器常见故障与排除	(79)
第 4 章 BJ-6B 型医用直线加速器的质控	(82)

## 第二篇 XHA-600 型医用直线加速器工作原理与故障维修

第 5 章 医用直线加速器工作原理	(87)
第一节 医用直线加速器概述	(87)
第二节 医用直线加速器电子加速原理	(89)
第三节 束流传输系统	(95)
第 6 章 真空系统	(99)
第一节 真空概述	(99)
第二节 真空技术中的基本概念	(101)
第三节 真空的获得	(103)

第四节	真空检漏	(107)
<b>第 7 章</b>	<b>微波系统</b>	(110)
第一节	微波基础知识	(110)
第二节	无源微波传输元器件的作用	(112)
第三节	XHA-600C 型医用直线加速器的微波传输系统	(114)
<b>第 8 章</b>	<b>机械系统</b>	(116)
第一节	XHA-600 型医用直线加速器机械系统概述	(116)
第二节	等中心	(117)
第三节	机架	(118)
第四节	辐照头	(120)
第五节	治疗附件	(123)
第六节	治疗床	(125)
第七节	XHA-600 型医用直线加速器治疗床的整机组装及其设计验证记录	(130)
第八节	新华床的整机组装综合调试验收	(134)
<b>第 9 章</b>	<b>辐射系统</b>	(136)
第一节	规则野准直系统	(136)
第二节	辐射分布系统	(137)
<b>第 10 章</b>	<b>脉冲调制器</b>	(140)
第一节	脉冲调制器的原理与基本结构	(140)
第二节	脉冲调制器常见电路原理分析	(143)
第三节	脉冲调制器联锁电路调试	(147)
<b>第 11 章</b>	<b>加速器的性能检测</b>	(149)
第一节	加速器性能测量前的验证工作	(149)
第二节	加速器的性能检测	(151)
第三节	临床剂量学概念	(170)
<b>第 12 章</b>	<b>AFC 自动稳频系统</b>	(171)
第一节	XHA-600 型医用直线加速器的 AFC 自动稳频系统概述	(171)
第二节	XHA-600 型医用直线加速器的 AFC 自动稳频系统的调试	(176)
第三节	AFC 自动稳频系统常见故障分析	(180)
<b>第 13 章</b>	<b>控制保护系统</b>	(182)
第一节	XHA-600 型医用直线加速器的控制系统概述	(182)
第二节	XHA-600 型医用直线加速器的计算机控制电路结构	(183)
<b>第 14 章</b>	<b>XH-2000 型手控器</b>	(189)
第一节	XH-2000 型手控器的应用、组成与使用方法	(189)
第二节	XH-2000 型手控器的电路原理	(189)

第 15 章 电路图及故障分析 .....	(197)
第一节 常见故障 .....	(197)
第二节 不出束故障判断 .....	(198)
第三节 出束不稳定故障判断 .....	(201)
第四节 加速管故障判断 .....	(202)
第五节 微波系统故障判断 .....	(209)
第六节 常见故障举例 .....	(219)

### 第三篇 Varian 23EX 型高能医用直线加速器工作原理与维修

第 16 章 医用加速器的进展 .....	(225)
第 17 章 Varian 23EX 加速器的结构原理 .....	(227)
第一节 Varian 23EX 加速器的基本结构 .....	(227)
第二节 驻波加速原理 .....	(230)
第三节 速调管 .....	(231)
第四节 加速器的自动频率控制系统 .....	(234)
第 18 章 脉冲调制器 .....	(236)
第 19 章 电子枪 .....	(243)
第一节 电子枪的工作原理 .....	(243)
第二节 三极电子枪 .....	(243)
第 20 章 束流输运系统 .....	(249)
第一节 聚焦系统 .....	(249)
第二节 偏转系统 .....	(250)
第三节 导向系统 .....	(252)
第 21 章 加速器的辐射头 .....	(254)
第一节 辐射产生系统 .....	(254)
第二节 准直器的结构 .....	(261)
第三节 剂量的监测系统 .....	(263)
第 22 章 控制系统 .....	(270)
第一节 加速器的基本控制方案 .....	(270)
第二节 能量模式控制 .....	(272)
第三节 联锁系统 .....	(275)
第四节 真空系统 .....	(279)
第五节 温度控制系统 .....	(282)
第六节 手控盒 .....	(283)
第七节 23EX 型加速器近十年停机情况的分析 .....	(284)

第 23 章 多叶准直器 ..... (287)

    第一节 多叶准直系统的组成 ..... (287)

    第二节 HD120 多叶准直系统的维修 ..... (294)

### 第四篇 医用加速器的应用管理

第 24 章 医用加速器建设项目的审批 ..... (301)

第 25 章 加速器机房的防护设计与建设 ..... (308)

参考文献 ..... (310)

# 第一篇

---

## BJ-6B 型医用直线加速器工作原理、 故障维修与参数调整



# 第 1 章

## 医用电子直线加速器概述

医用电子直线加速器是一种为放射治疗提供符合临床治疗要求的 X 射线或电子束辐射的医用治疗装置。医用表示设备是用于人体肿瘤治疗的,因此有特殊的性能要求和更严格的安全性要求;电子表示被加速的粒子是电子,而非质子或其他重离子;直线表示电子束在加速过程中的运动轨迹是一条直线。

医用电子直线加速器产生的 X 射线或电子束辐射均为低 LET 辐射。

LET 定义为入射粒子径迹在单位长度( $dl$ )上粒子与生物组织物质碰撞引起的能量( $dE$ )损失,即传能线密度。

本文以医科达北研所(原北京医疗器械研究所,简称北研所)BJ-6B 型医用直线加速器为基础,讲述其工作原理、故障维修与常规质控。

### 第一节 医用电子直线加速器的基本组成及其作用

#### 一、医用电子直线加速器分类

按输出能量高低,医用电子直线加速器一般分为低能、中能和高能三种类型,见表 1-1。

表 1-1 三种类型医用电子直线加速器的比较

类别	输出能量范围(光子)	输出射线类型	加速管安装方式
低能	4~10MV,一般为 6MV	一般为一档 X 射线	多数为竖向垂直安置,无对中和偏转系统
中能	4~15MV,可提供双挡 X 射线,低能量挡一般为 6MV	双光子+多挡电子线输出	加速管横置,有对中和偏转系统
高能	4~25MV,可提供多挡 X 射线,低能量挡一般为 6MV	多挡光子+多挡电子线输出	加速管横置,有对中和偏转系统

按医用电子直线加速管工作原理区分,医用电子直线加速器可分为行波型和驻波型两大类。

图 1-1 为某医院放疗中心使用的北研所 BJ-6B 型医用直线加速器外观图。

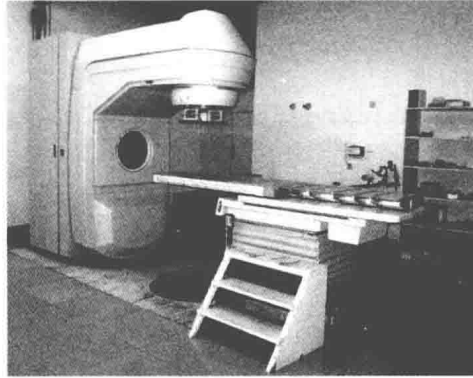


图 1-1 BJ-6B 型医用直线加速器

## 二、BJ-6B 型医用直线加速器的系统组成和作用

### (一)BJ-6B 型医用直线加速器的系统组成

1. 按部套件位置划分 见表 1-2。

表 1-2 按部套件位置划分

机房名称	系统组成	设备部件名称
治疗室	主机架	底座框架
		固定机座
		旋转机架
		辐射头
	治疗床	
控制室	操作台	操作台电源
		STD 工业控制计算机
		键盘、显示器
		操作台主控系统
设备室	高压调制器	
	水冷温控机组	
	三相稳压器	
	三相调压器	

2. 按功能系统划分 见表 1-3。

表 1-3 按功能系统划分

序号	系统名称	序号	系统名称
1	机械和光学系统	5	冷却水温度控制系统
2	辐射及剂量监测系统	6	充气及气压保护系统
3	微波功率系统	7	真空系统
4	电控系统		

## (二)BJ-6B型医用直线加速器各组成部分的作用

1. 机械系统 机械系统主要包括主机架(底座+旋转支臂)、辐射头(治疗头)和治疗床(患者支撑系统)。

(1)主机架组件:机架主要由三部分组成:长方形的底座框架、固定机座和旋转机架。包括底座框架、配重、固定机座、机座顶柜、支臂、微波系统、加速管及防护室、辐射头。

①底座框架:底座框架是固定机座和治疗床的安装基础和水平基准。设备安装完毕后,底座框架掩盖在治疗室地板之下。

②固定机座:固定机座安装在长方形底座框架上,作为旋转机架的支撑。旋转机架与固定机座之间通过旋转轴承联接。在固定机座上安装有旋转机架的驱动电机、链条、齿轮等,可以驱动旋转机架做 $\pm 180^\circ$ 范围内的顺、逆时针转动。

固定机座外围安装了金属外壳,形成机柜。机柜内安装有以下部件:机架传动组件、自动充气组件、变频调速电源、磁控管灯丝电源、运动控制系统低压电源机箱、运动控制系统机箱。

③旋转机架:旋转机架的支臂上安装了加速管和辐射头,加速管产生的X线辐射通过辐射头向外辐射。随着旋转机架的旋转,X线辐射的方向也随之改变。

(2)辐射头:辐射头主要包含以下组件:均整过滤器组件、电离室、 $60^\circ$ 楔形过滤器组件、可旋转光阑系统、光野灯组件、附件盘及附件。

①电机驱动的均整过滤器上装有辐射野均整块。

②平板型电离室安装在均整过滤器下面。

③由电机驱动的可旋转光阑系统包括二组可移动光阑,电机通过链条驱动光阑开合以提供所需要的矩形野。

④ $60^\circ$ 楔形过滤器安装在辐射头中一个由电机驱动的滑轨上。通过电机的驱动,可以将 $60^\circ$ 楔块从辐射野中移进或移出,这一功能是由计算机控制自动完成的。通过设置平野和楔形野的剂量比,可以得到 $0^\circ\sim 60^\circ$ 连续可变的楔形剂量分布。

⑤模拟灯安装在辐射头框架的一侧。从这个光源中发射出的一束光经反光镜镜面反射形成模拟光野以指示实际辐射野的大小。光距尺组件安装在支臂上,它在患者皮肤表面用光线投射出一个距离标尺,与模拟灯投射的十字线共同指示辐射源到患者皮肤表面的距离。

附件盘安装在辐射头下端面上,其上留有影子盘、前指针等机械安装位置。

除此以外,旋转机架上还安装了以下部件:加速管、真空电源、电子枪灯丝电源、脉冲变压器、磁控管及微波传输组件、磁控管频率自动控制系统(AFC)、刻度盘及数字显示窗,整个旋转机架上罩有玻璃钢外壳。

(3)治疗床:患者躺卧在治疗床上接受放射治疗。治疗床的机械运动有5个方面:床公转、床升降、床面纵向移动、床面横向移动、床面自转。

①床面:床面由多个可拆卸的长方形和直角形模块拼接而成,可满足特殊临床要求。床箱体两侧各有2个功能相同的操作键,控制床横、纵向运动的电动或锁定方式与手动方式的切换。另外,在床箱体两侧还分别安有一个紧急按钮。

②手控盒:手控盒引线从床箱体中引出,通过手控盒可控制所有运动部件的运动,完成患者摆位。

治疗床的主要作用:为其他系统或部件的承载者;形成符合临床要求的辐射场;患者支撑和体位固定;通过机械运动部件的运动和位置锁定完成患者治疗摆位。

医用电子直线加速器中用于患者治疗摆位的机械运动主要有旋转支臂的旋转、辐射头旋转和次级准直器(上、下光阑)的开合、治疗床公转和治疗床面的升降及横、纵向直线运动。

2. 光学指示系统 光学指示系统主要包括光野指示装置(模拟灯)和距离指示装置(光距尺)。为方便操作员对患者进行治疗摆位,光野指示装置给出了光学模拟的辐射场中心和其形状的指示。距离指示装置给出了沿辐射场中心轴线,从辐射线源点到患者治疗入射表面的垂直距离。

3. 治疗附件 治疗附件一般包括前(后)指针、影子盘、楔形板和限光筒。

(1)前(后)指针:前(后)指针为可插拔的机械式指示装置,用于指示辐射场中心轴和加速器等中心点位置。

(2)影子盘:在 X 射线治疗时,用于承载并固定各种形状铅挡块,从而形成各种异形辐射野治疗的装置。

(3)楔形板:在 X 射线治疗时,用于在辐射场深度方向产生规定楔形角等剂量分布的辐射场,通常有三种方式产生楔形分布。方法一:采用预先做好的外挂式楔形板,一般厂家随机提供  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  四块;方法二:一楔多用,即在辐射头内安装一块可移动的  $60^\circ$  楔形块,通过平野( $0^\circ$ )和楔野( $60^\circ$ )权重的不同组合,可以产生  $0^\circ \sim 60^\circ$  任意楔形角度的分布;方法三:动态楔形,即利用辐射头次级准直器(上、下光阑)在辐射期间的运动,产生  $0^\circ \sim 60^\circ$  任意楔形角度的分布。

(4)限光筒:在电子束治疗时,用于产生一定大小的规则辐射野的装置。规则辐射野一般是指矩形或圆形。

4. 加速管和束流输运系统 加速管和束流输运系统主要包括电子枪、加速管腔链、输入(出)耦合器、真空泵组件、偏转盒和引出窗、聚焦线圈、对中线圈和偏转线圈(或称偏转磁铁)等。

(1)电子枪:电子枪产生初始电子束流并将其注入到加速管。一般有两种形式:二极和三极电子枪。

(2)加速管腔链:加速管腔链利用在腔链轴向方向建立起来的高频高梯度微波电场,持续加速电子枪发射的电子束流,在加速管腔链末端获得高动能的电子束流。

根据结构和工作原理不同,加速管腔链可分为行波型和驻波型两大类。无论哪种类型,加速管腔链本质上都是一种换能器,即将高功率微波能量转化为被加速电子束流的动能。

(3)输入(出)耦合器:输入耦合器是将在波导中高压条件下传输的高功率微波馈入到高真空条件下的加速管腔链中;输出耦合器是将加速管腔链中“剩余”的微波功率馈出到高压条件下的传输波导中,输出耦合器只在行波型加速管腔链中需要。

(4)真空泵组件:在真空电源驱动下,通过管路与加速管腔链联结在一起的真空泵持续排出加速管腔链中不断产生的气体分子,维持加速管腔链中的高真空工作条件。

(5)偏转盒和引出窗:对加速管横置的医用直线加速器(一般为中高能机),需要将加速终了的电子束流偏转  $90^\circ$  或  $270^\circ$ 。偏转盒为被偏转的电子束流提供了高真空条件下的运动空间。对可提供电子束治疗的医用电子直线加速器(一般为中高能机),引出窗提供了高能电子束流从高真空区域进入大气环境下治疗区域的窗口。

(6)聚焦线圈:对大多数加速管横置的医用直线加速器(一般为中高能机),需要在加速管腔链上套装聚焦线圈,利用其产生的磁场力,约束电子束流在加速过程中,在横向上始终靠近