

现代放射线医疗仪器



浙江科学技术出版社

责任编辑 李卓凡

封面设计 丁振华

现代放射线医疗仪器

宗贤钧 编著

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本: 850×1168 1/32 印张10.75 字数270,000

1985年3月第 一 版

1985年3月第一次印刷

印数: 1—5,000

统一书号: 15221·80

定 价: 1.70 元

内 容 提 要

本书阐述了现代放射线医疗仪器的原理、结构、设计、使用和维修等方面的知识。全书共分十三章，内容包括四个部分：一、医用X线机，包括X线影像增强电视系统和新型X线平板影像增强透视系统；二、X线电子计算机断层扫描装置，即CT，包括国产XDN-1型头部CT装置；三、放射线同位素扫描设备，包括同位素闪烁扫描机、 γ -闪烁照相机；四、放射线治疗设备，包括电子直线加速器治疗机。书后并附有国外有关设备规格、技术数据表。

本书是国内第一部全面系统地介绍放射线医疗仪器的书籍，内容新颖，图文并茂，可作大专院校生物医学工程专业师生及研究生的教学参考书，对从事生物医学仪器、射线仪器的科研、生产、工程技术人员和临床医生都有参考价值。

前 言

生命科学和工程技术相互渗透是现代科学技术发展的重要特点。生物医学工程学正是具有这种特点的新兴边缘学科。现代生物医学仪器则是研究生物医学的基本设备。例如,本世纪七十年代产生的现代放射线医疗仪器—X线计算机断层扫描装置(CT设备),应用电子计算机和图象处理技术,在诊断和治疗疾病上显示出强大的生命力,得到医学界广泛的重视和推广。当前,工业发达的国家都在大力发展现代放射线医疗仪器,并以此标志本国医疗技术的现代水平。我国有关技术的发展也出现了可喜的局面。为了适应我国放射线医疗仪器现代化的需要,尽快培养有关方面的技术人才,作者根据多年教学和实践经验,编著了“现代放射线医疗仪器”一书。

本书讲述了现代放射线医疗仪器的原理、结构、设计、应用及维修知识。全书共分四篇、十三章。着重介绍了先进的X线影象增强电视系统和新型X线平板影象增强透视系统,国产XDN-1型头部CT装置,同位素闪烁扫描机, γ -闪烁照相机,电子直线加速器治疗机等内容。

本书是国内第一部全面系统地介绍放射线医疗仪器的书籍,可作大专院校生物医学工程专业师生和研究生的教学参考书。对从事生物医学仪器的科研、工程技术、生产人员以及医学临床医生都有一定的参考价值。

在撰写、修改、审定本书的过程中,承蒙浙江大学副校长吕维雪教授,中国生物医学工程学会副秘书长、华中工学院胡良俊副教授,山西省医药研究所雷成斌高级工程师的热情指导和帮助,

并得到各有关方面的大力支持，特此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中如有错误之处，深望广大读者批评指正。

宗贤钧

1984年于浙江大学

目 录

前 言

第一篇 医用 X 线机

第一章 医用 X 线机的物理基础	(1)
§ 1.1 X 线的产生及其性质	(2)
§ 1.2 X 线的强度与硬度	(7)
§ 1.3 X 线机的分类及其结构	(8)
§ 1.4 X 线管的分类及其结构	(9)
§ 1.5 旋转阳极 X 线管	(11)
§ 1.6 X 线管管套	(13)
§ 1.7 X 线管的特性参数	(14)
第二章 X 线机的基本电路	(19)
§ 2.1 X 线管对 X 线机电路的基本要求	(19)
§ 2.2 X 线机的基本电路	(20)
§ 2.3 高压电路	(22)
§ 2.4 管电压的调节	(24)
§ 2.5 管电流的调节	(28)
§ 2.6 控制电路	(28)
第三章 X 线机的机械结构	(36)
§ 3.1 诊断床	(36)
§ 3.2 诊断床的传动系统	(40)
§ 3.3 天轨吊架系统	(46)
§ 3.4 断层床	(48)
第四章 X 线诊断技术设备	(54)

§ 4.1	滤线器	(54)
§ 4.2	荧光屏和增感屏	(55)
§ 4.3	X线影象增强器	(57)
§ 4.4	影象增强器各种组件的特点及其设计	(61)
§ 4.5	医用X线电视系统及间接摄影技术	(64)
§ 4.6	平板型X线影象增强透视系统 (简称PET 系统)	(69)
§ 4.7	静电X线摄影	(76)
§ 4.8	断层摄影	(78)
第五章	X线机的设计、调试和维修	(81)
§ 5.1	X线机的性能要求和调试	(81)
§ 5.2	X线机的设计原则	(90)
§ 5.3	X线机主电路的设计方法	(91)
§ 5.4	X线机主电路的设计步骤	(95)
§ 5.5	X线机的维修	(98)
第六章	XG1000 毫安医用诊断 X 线机	(104)
§ 6.1	机器的主要技术规格和性能	(104)
§ 6.2	总控制室	(107)
§ 6.3	心血管检查室	(115)
§ 6.4	造影检查及一般摄影室	(124)
§ 6.5	多轨迹断层摄影室	(127)
第二篇 X 线电子计算机断层扫描装置		
第七章	X线电子计算机断层摄影(CT)	(131)
§ 7.1	X线CT摄影与X线摄影的比较	(132)
§ 7.2	CT 的原理	(134)
§ 7.3	CT 图象重建原理	(136)
§ 7.4	图象重建的联立方程法	(136)
§ 7.5	图象重建的求和法	(138)
§ 7.6	图象重建的迭代法	(140)

§ 7.7	富氏变换重建法	(141)
§ 7.8	图象重建的褶积-反投影法	(149)
§ 7.9	CT 扫描装置和测量过程	(155)
§ 7.10	CT扫描方式	(161)
§ 7.11	CT 补偿装置和相对吸收系数标尺	(163)
§ 7.12	CT 中的电子计算机	(169)
§ 7.13	窗口技术	(174)
§ 7.14	CT 的图象质量	(175)
第八章	XDN-1 型头部 CT 装置	(179)
§ 8.1	XDN-1 型 CT 的组成及其性能	(179)
§ 8.2	中央控制台	(182)
§ 8.3	X线数据采样系统	(185)
§ 8.4	计算机系统	(192)
§ 8.5	图象处理过程	(197)
§ 8.6	CT 软件概述	(205)
第九章	CT 的临床应用和选购	(209)
§ 9.1	CT 的临床应用	(209)
§ 9.2	CT 扫描的选择	(213)
§ 9.3	CT 图象的选择	(214)
§ 9.4	CT 系统结构的选择	(217)
§ 9.5	CT 计算机的选择	(218)
§ 9.6	购买 CT 后的支援问题	(220)

第三篇 放射线同位素扫描装置

第十章	同位素闪烁扫描机	(222)
§ 10.1	同位素闪烁扫描机的工作原理及其组成	(222)
§ 10.2	探测器	(222)
§ 10.3	准直器	(223)
§ 10.4	闪烁体	(227)
§ 10.5	光电倍增管	(231)

§ 10.6	探测器的基本电路	(233)
§ 10.7	信息传输与数据处理系统	(235)
§ 10.8	显示系统	(240)
§ 10.9	SMC-4 型同位素扫描机的特点和技术指标	(243)
§ 10.10	SMC-4 型扫描机的工作原理	(247)
§ 10.11	SMC-4 型扫描机的结构	(248)
第十一章	γ-闪烁照相机	(259)
§ 11.1	γ-闪烁照相机的工作原理及其组成	(259)
§ 11.2	γ-闪烁照相机的成象原理	(260)
§ 11.3	γ-闪烁照相机的位置计算	(269)
§ 11.4	权电阻矩阵的调试	(276)

第四篇 放射线治疗装置

第十二章	放射线治疗机	(279)
§ 12.1	放射线治疗机的发展	(279)
§ 12.2	几种实用的放射线治疗机	(280)
第十三章	医用加速器	(288)
§ 13.1	加速器的分类及其结构	(288)
§ 13.2	电子直线加速器的原理及其结构	(290)
§ 13.3	DZY-10 型医用电子直线加速器	(294)
§ 13.4	DZY-10 型加速器的特点	(299)
§ 13.5	加速器的治疗操作	(302)
§ 13.6	使用加速器的安全防护	(304)
§ 13.7	电子直线加速器的发展趋势	(307)

附录

附一	国外几种诊断床(台)的规格	(308)
附二	X线机常见故障检修表	(313)
附三	国外CT装置的主要技术数据表	(324)
附四	国外典型直线加速器技术数据表	(332)

第一篇 医用X线机

第一章 医用X线机的物理基础

X线又叫伦琴射线，俗名X光，在1895年由德国物理学家伦琴首先发现。目前，利用X线已成为医学诊断和治疗疾病的主要手段之一，X线机也成为医学上常用的主要设备。

X线机发展经历了三个阶段。二十世纪五十年代以前，X线机的结构简单，X线成象的空间分辨率较低；五十年代以后，X线机设备发展很快，普遍采用影象增强电视系统后，提高了分辨率和清晰度，减少了病人受照剂量，改善了防护条件，还可随病人的体形自动调节亮度和放大图象，详尽地进行透视。随着X线造影检查技术的迅速发展，出现了脑、心血管、消化道快速动态摄影的高千伏、高毫安的X线发生装置，心血管X线诊断装置，颅脑X线机，软组织钼靶X线机等专用X线机。由X线干片摄影发展而来的X线电子静电摄影，可将骨骼和软组织同时清晰地摄影在塑料板上，分辨率高，摄影时间短，费用低；七十年代英国工程师豪恩斯菲尔德(G·N·Hounsfield)利用扫描检测原理，将X线机与计算机相结合，发明了可以测定多种病变，分辨率很高的X线计算机断层扫描装置。X线计算机断层扫描装置的机器结构、成象原理、信息传递和处理，以及诊断方法都与传统的X线机不同。它的出现是X线诊断技术上的一次重大革命，使医用X线机成为具有现代化多学科综合性技术的生物医学工程设备。

§ 1.1 X线的产生及其性质

一、X线的产生 当物体被高速的电子轰击时，就会产生X线。X线管是产生X线的主要设备，由真空玻璃管内的阳极和阴极组成。于阴极端的钨制灯丝通以低电压，灯丝加热发射自由电子，当X线管两端通以高压后，自由电子群在电场的作用下高速向阳极端钨靶运动，并撞击阳极靶面。当受阻而突然停止运动时，便产生X线（图1.1）。

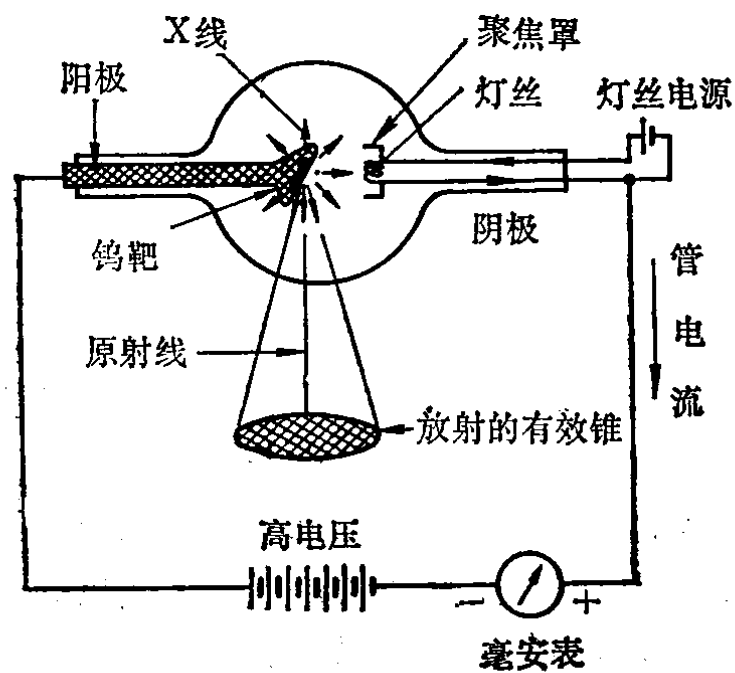


图1.1 X线管及其工作原理示意图

X线管放射的X线组成很复杂，是一束波长不等的混合线谱，从最长

波长到最短波长是连续的，通常称为连续线谱(图1.2)。在连续线谱上重合着一些突出的峰值，通常称为特征线谱。因此，X线管发射的X线包括连续放射线和特征放射线两种射线。

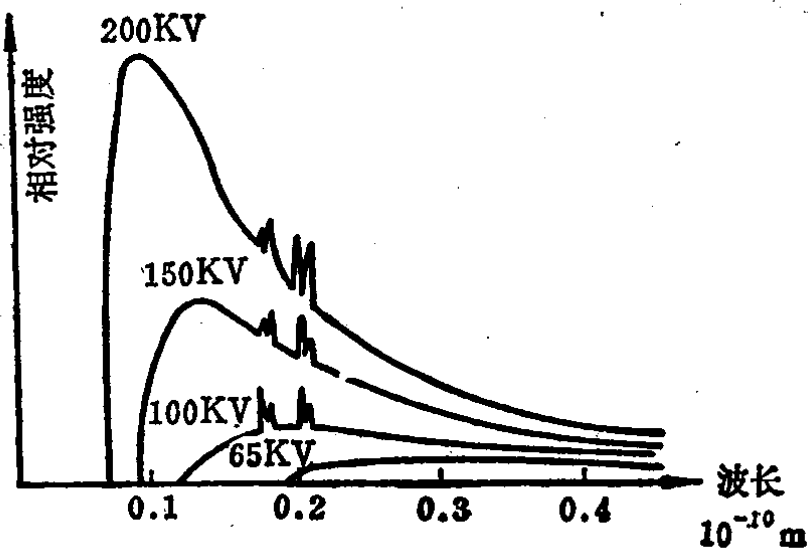


图1.2 钨的X线谱

1. 连续放射:

高速运行的阴极电子撞击阳极靶面与原子核相互作用时放射出X线的现象，称为连续放射。每一个运动的电子突然受阻停下时，其动能的大部分转变为热能，仅小部分转变为一个或几个X线光子（或量子）。由于各电子在阳靶上受阻的情况不同，电子动能转变的X线能量就不同，所放出X线的频率也不同，因此产生的X线谱是连续的。在X线管中，阴极电子向阳极运动的动能，决定于加在X线管两端的电压。电压愈高，电子的动能愈大，其最短波长就愈短。X线谱的最短波长，可以根据量子理论计算。

假设X线管两端的电压为V，电子的电量为e。当电子由阴极到达阳极时，电场对电子所做的功Ve，变成了电子的动能。如果在电子受到阳极原子的阻挡时，将全部动能都转变为光子能量，那么光子就有最短的波长

$$\frac{1}{2}mv^2 = V \cdot e = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

或
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{Ve} \quad (1.1)$$

(1.1) 式中m为电子质量；v为电子速度；e为电子电量；V为管电压；c为光速；h为普朗克常数；将h、c、e取相应单位制代入(1.1)式，并用厘米表示波长的单位，管电压的单位用千伏表示，得

$$\lambda_{\min} = \frac{12.42}{V} \times 10^{-8}$$

由此可见，X线的最短波长与管电压成反比。

图1.2示出X线管阳极靶面为钨，两端的电压分别为65、100、150、200千伏时X线的相对强度分布曲线。由曲线可见：每一数值的管电压都对应绘出一条最短波长，电压愈高，波长愈短，相对强度愈大。波长的相对强度随管电压的增加而向短波方向移动。

大部分X线机采用交流电源供电，加于X线管的电压峰值只

处在交流波形中的瞬时，即峰电压在整个交流周波中只占一小部分，这样，仅有小部分电子得到最大的动能，与阳极钨靶撞击而产生波长较短的X线；其他阳极电子则得到较小的动能，产生波长较长的X线。同时，另有一些高速电子只从核旁经过，并不直接与阳极物质的原子核相撞，它们在核内正电场的作用下失去部分能量，直接以光子的形式放射出去。电子愈趋近核，失去的能量就愈多，所放射的X线波长就愈短。所以X线管放射的X线是一束波长不等的混合线谱。

当阴极电子愈多时，即管电流愈大时，连续放射的总能量也愈大；当管电压增加时，虽阴极电子数目未变，但每个电子所获得的动能变大，因而波长短的X线增多，总能量增加。此外，构成阳极物质的原子序数愈高，阴极电子撞击核轨道电子的机会愈多，连续放射的总能量也会增加。因此，连续放射的总量与下列三个因素有关：

- (1) 放射量与X线管的管电流成正比；
- (2) 放射量与X线管的管电压的平方成正比；
- (3) 放射量与阳极物质的原子序数成正比。

X线管不能长时间连续使用并需要冷却，其根本原因是当高速的阴极电子撞击阳极时，仅有小部分能量变为X线。大部分低能量的电子与阳极相撞增加了原子热运动，约99.8%能量变为热能，使阳极靶面的温度上升。

2. 特征放射：高速运行的阴极电子撞击阳极靶面，与原子相互作用时放射出X线的现象，称为特征放射（或标识放射）。它与X线管的管电流、阴极电子的速度无关，完全决定于构成阳极的物质。

我们知道所有物质均由原子组成，原子又由原子核及电子组成，电子按一定轨道绕核运动。物质的原子结构不同，电子轨道层次的多少也不同，即能级不同。有的电子轨道多（最多的有七层），有的电子轨道少（最少的有一层）。同一轨道上电子数也

不一样。加速的阴极电子在撞击阳极靶面时，有机会与阳极物质中某些原子相互作用，将能量传递给它们的电子，这些电子被激发到高一层的能级上，使原子呈不稳定状态；换句话说，就是把原子的内层电子打到外层或者甚至把它打到原子外面，使原子电离；从而在原子的内电子层中留下“空位”。此时，外层的电子立即落到内层填补空位，原子的能量重新减少，多余的能量就作为X线量子发射出来，这种X线称为特征放射线。特征放射线反映了物质原子结构

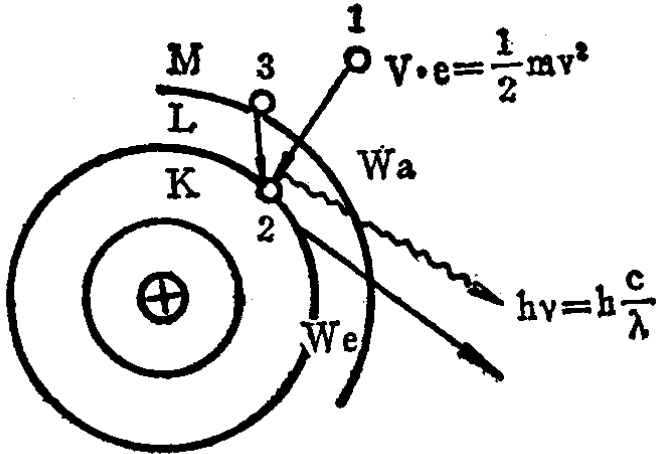


图1.3 特征放射示意图

1. 阴极电子 2. L层电子 3. M层电子

情况，图 1.3 表示阴极电子 1 高速撞击在阳极靶面钨原子的 L 层轨道的电子 2 上，使 L 层轨道电子逸出，而显空位，由 M 层轨道电子 3 来补充。如 L 层轨道电子的能量为 W_e ，M 层轨道电子的能量为 W_a ，于是

$$W_a - W_e = h\nu$$

以电磁波形式放射出来。钨的特征射线波长很长，不能通过 X 线管管壁，在医用 X 线中无使用价值。

二、X 线的性质

1. X 线的一般性质：X 线是一种放射性射线，是肉眼不能见到的极短电磁波。它具有可见光的性质，如直线传播、反射、折射、散射和绕射等；遵循可见光的一般规律，以光速前进；波长较短，一般在 $(0.01 \sim 100) \times 10^{-8}$ 厘米之间；在电场和磁场中由于不带电而不发生偏转。

2. X 线在医学上的特殊性：

(1) 具有一次射线和二次射线：高速运动的电子撞击在 X 线管阳极靶面上直接产生的 X 线叫做一次射线(或原发 X 线)。一

次射线遇到其他物体时再次产生的X线叫做二次射线，二次射线是不规则的，因而又叫做散射线。这种散射线在X线诊断上易使胶片影象模糊，不利于诊断，并可造成人体损害，需设法除掉。但在X线治疗中，能利用散射线增加组织中的放射量。

(2) 穿透作用：X线的光子能量大，波长短，穿透力强，能穿透一般光线所不能透过的物质。物理学实验证明，一定波长的X线穿过各种元素时所碰到的原子数一样时，元素的吸收系数约与其原子序数的四次方成正比，且分子的吸收系数等于所含原子的吸收系数的和，例如水分子由两个氢原子（原子序数为1）和一个氧原子（原子序数为8）所组成，它对X线的吸收系数即为 $2 \times 1^4 + 8^4 = 4098$ 。

X线的穿透力与物质的密度有关。容易穿透低原子序数的物质，如空气、木材、纸、水、脂肪组织等；不易穿透高原子序数的物质，如铁、铜、铅、钙、骨骼等。肌肉组织的主要成分是碳、氢和氧等较轻的原子，对X线的吸收与水差不多，其吸收系数为4098。骨的主要成分是 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ，它的吸收系数为 $3 \times 20^4 + 2 \times 15^4 + 8 \times 8^4 = 614000$ 。两者吸收系数的比值是

$$\frac{\text{骨}}{\text{肌肉}} = \frac{614000}{4098} = 152$$

医学上正是应用了X线对人体各部分穿透力不同的特性，对人体的病变进行透视或摄影的。

(3) 荧光作用：X线照射在铂氰化钡、氯化铯、硫化镉、钨酸钙等晶体上，即激发产生可见的荧光。照射停止，荧光即消失。荧光的亮度与X线的强弱有关。利用这一特性可以进行X线透视检查及制作增感屏。

(4) 感光作用：X线照射在胶片上能使溴化银药膜起光化作用，使胶片感光。因此可以利用X线进行摄影。

(5) 电离作用：X线可使气体分子游离而产生电离电流。电离作用在X线的治疗和测量方面有重要的意义。

(6) 生物作用: X线能对组织产生破坏作用。可以利用X线对肿瘤病人进行治疗。但X线同时能使正常的组织发生红斑、脱皮、坏死的生物效应,造成造血系统的白血病和生殖系统的不育症。

§ 1.2 X线的强度与硬度

一、X线的强度

X线强度是指单位时间内通过与射线方向垂直的单位面积的辐射能量,表示X线的量,以I表示。

$$I = \sum N_i h\nu_i = N_1 h\nu_1 + N_2 h\nu_2 + N_3 h\nu_3 + \dots \quad (1.2)$$

I的物理意义为1秒钟内通过垂直于射线方向1平方厘米面积的 N_1 个具有 $h\nu_1$ 能量的光子的总能量和 N_2 个具有 $h\nu_2$ 能量的光子的总能量以及 N_3 个具有 $h\nu_3$ 能量的光子总能量之总和。由(1.2)式可知,增加管电流可以增加X线的光子量,即增大N值;增加管电压,可以增加每个光子的能量,即增加 $h\nu$ 值,从而增加强度。通常管电压不变,用管电流来调节X线的强度。因此在一定的管电压下,可用管电流的毫安数来表示X线的强度。诊断上常以X线管的管电流(mA)与X线照射时间(s)的乘积来表示X线的辐射量,即mA·s(毫安秒)。

二、X线的硬度 X线硬度是指X线穿透物质本领的大小,表示X线的质量。X线硬度决定于每个光子能量的大小,与光子的数目无关。加于X线管的电压愈高,电子到达阳极靶时速度愈大,能量愈大,转化为光能的能量愈多,产生的X线波长就愈短,则X线的硬度就愈大。X线常按X线的硬度分为极软、软、硬和极硬四类,它们的管电压、波长和用途列于表1.1中。

表1.1 X线分类和用途

名 称	管 电 压 (千 伏)	最 短 波 长 (10^{-8} 厘米)	用 途
极软X线	5 ~ 20	2.5 ~ 0.62	软组织摄影、表面治疗
软 X 线	20 ~ 100	0.62 ~ 0.12	透视和摄影
硬 X 线	100 ~ 250	0.12 ~ 0.05	较深组织治疗
极硬X线	250以上	0.05以下	深部组织治疗

§ 1.3 X线机的分类及其结构

一、X 线机的分类 医用X线机按其用途可分为诊断X线机和治疗X线机两大类。

1. 诊断X线机：诊断X线机按其通过X线管电流的大小，可分为大、中、小三种类型。管电流在1000毫安以上者为大型；在100~1000毫安者为中型；在100毫安以下者为小型。按机器结构的繁简程度又可分为携带式、移动式和固定式等。大型机器结构较复杂，设备完整，有多种用途，除透视、胃肠摄影、滤线器摄影、断层摄影以外，还能进行记波摄影、立体摄影和快速摄影，还能附带影象增强、X线电视、电影、录象等装置进行特殊诊断。

2. 治疗X线机：治疗X线机按治疗的范围可分为接触治疗机和深部治疗机两种。接触治疗机指管电流最大为10~20毫安、管电压最高为60~70千伏的一种低电压、近距离、有效照射面积小的治疗机。它能在几十分钟内连续工作，放射率很高，但X线穿透力低，只能治疗皮肤表面及体腔浅层疾病，机械结构多为移动式。深部治疗机指管电流最大为10~30毫安，管电压最高为125~250千伏的一种高电压、远距离、有效照射面积能以遮线筒的变换而改变的治疗机。管电压有较大幅度的选择，X线管有循