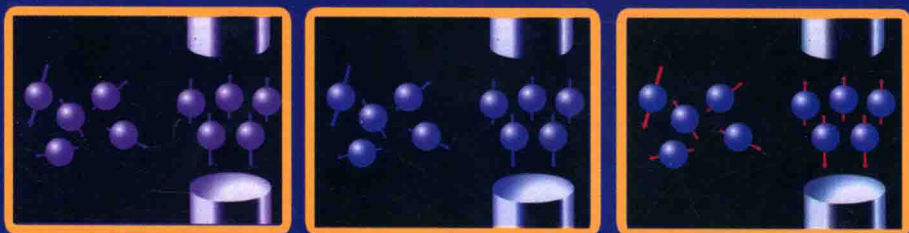


MRI JISHU YU SHIYAN

MRI技术与实验

● 主 编 张卫萍 谢寰彤 甘 泉
副主编 葛 军 王晶晶 张艳辉

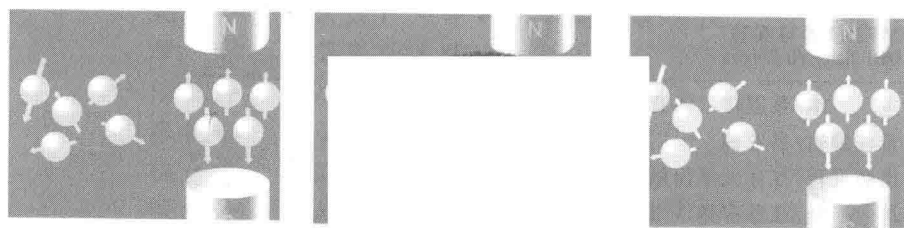


MRI JISHU YU SHIYAN

MRI技术与实验

● 主 编 张卫萍 谢寰彤 甘 泉

副主编 葛 军 王晶晶 张艳辉



 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

MRI 技术与实验 / 张卫萍, 谢寰彤, 甘泉主编. —
镇江: 江苏大学出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-5684-0840-0

I. ①M… II. ①张… ②谢… ③甘… III. ①核磁共振成像—实验 IV. ①R445.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 105254 号

MRI 技术与实验
MRI Jishu Yu Shiyan

主 编/张卫萍 谢寰彤 甘 泉

责任编辑/吕亚楠

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编:212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press.ujs.edu.cn>

排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司

印 刷/镇江文苑制版印刷有限责任公司

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/12.5 插 页/2 面

字 数/230 千字

版 次/2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0840-0

定 价/58.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

《MRI 技术与实验》

编委会

主 编 张卫萍 谢寰彤 甘 泉
副主编 葛 军 王晶晶 张艳辉
编 委 (以姓氏笔画为序)

王 林	南京中大医院
王晶晶	苏州卫生职业技术学院
王灌忠	苏州大学附属第二医院
甘 泉	江苏大学临床医学院
田 俊	南京医科大学第二附属医院
史 跃	中国人民解放军第九七医院
白树勤	山西医科大学
刘广月	南京大学医学院附属鼓楼医院
李大鹏	江苏省人民医院
李国昭	南京中大医院
吴前芝	南京第一人民医院
吴虹桥	南京医科大学常州市妇幼保健院
辛 春	江苏医药学院
张卫萍	江西医学高等专科学校
张艳辉	商丘医学高等专科学校
陈大龙	中国人民解放军第八二医院
陈新沛	江苏省徐州市第一人民医院
周学军	南通大学附属医院
周 鹏	江西医学高等专科学校
周 鑫	江西医学高等专科学校
赵 天	江苏大学附属医院
顾小荣	江苏省肿瘤医院
徐道民	江苏省中医院
高亚枫	苏州大学第一附属医院
葛 军	南京邮电大学
谢寰彤	江苏大学上海 MR 研究所
谭 文	江西医学高等专科学校

前 言

在现代医疗技术不断发展中，MRI 设备成为具有发展前途的设备之一，是临床诊疗、医学科研不可缺少的关键性诊断设备。该设备由于成像过程复杂、原理理解较有难度，为了满足医院在职人员及医学院医学人才教学知识与能力培养提高的需要，我们编写了本书，对 MRI 知识进行了梳理。本书包括 MRI 技术概述、磁共振成像设备、磁共振成像基础知识、MRI 脉冲序列、MRI 辅助与特殊技术、MRI 检查技术、MRI 技术实验、磁共振成像伪影观察实验、小动物三维磁共振成像实验、医学电子工程基础实验等内容，图文并茂、内容丰富，有助于读者明确知识原理，理解实验的关键问题，可供医学影像、临床医学、生物医学工程专业的学生和在职人员等参考使用。

本书邀请了医学高等院校的教授、博士及医院专家、MRI 设备相关企业专家参与编写，在此一并表示感谢。

编 者

目 录

第 1 章 MRI 技术概述

- 1.1 MRI 技术发展历史 / 001
- 1.2 MRI 技术特点 / 003

第 2 章 磁共振成像设备

- 2.1 磁体系统结构及其特性 / 009
- 2.2 梯度磁场系统结构及其特性 / 015
- 2.3 射频系统结构及其特性 / 021
- 2.4 计算机与辅助系统结构及其特性 / 027

第 3 章 磁共振成像基础知识

- 3.1 磁共振成像的物理学基础 / 031
- 3.2 磁共振成像基础 / 036
- 3.3 磁共振信号空间定位 / 044
- 3.4 磁共振图像的重建 / 053
- 3.5 影响磁共振成像的因素 / 054

第 4 章 MRI 脉冲序列

- 4.1 脉冲序列特性与分类 / 060
- 4.2 脉冲序列主要成像参数 / 061
- 4.3 MRI 基本脉冲序列 / 062
- 4.4 MRI 图像的质量保证 / 072

第 5 章 MRI 辅助与特殊技术

- 5.1 MR 辅助成像技术 / 075
- 5.2 MR 特殊成像技术 / 076

第 6 章 MRI 检查技术

- 6.1 MRI 检查概述 / 084
- 6.2 头颅 MRI 检查技术 / 086
- 6.3 胸部 MRI 检查技术 / 088
- 6.4 腹部 MRI 检查技术 / 089
- 6.5 颈椎（颈髓）MRI 检查技术 / 091
- 6.6 胸椎（胸髓）MRI 检查技术 / 092
- 6.7 腰椎（腰髓）MRI 检查技术 / 093
- 6.8 盆腔 MRI 检查技术 / 093
- 6.9 前列腺 MRI 检查技术 / 094
- 6.10 子宫 MRI 检查技术 / 095
- 6.11 骨与关节 MRI 检查技术 / 096
- 6.12 乳腺 MRI 检查技术 / 099

第 7 章 MRI 技术实验

- 7.1 概 述 / 100
- 7.2 磁共振成像实验 / 101
- 7.3 观察磁共振信号实验 / 105
- 7.4 射频脉冲与相位实验 / 108
- 7.5 弛豫时间的测量实验 / 112
- 7.6 SE 序列实验 / 119
- 7.7 IR 序列实验 / 121
- 7.8 一维、二维磁共振成像实验 / 123
- 7.9 三维磁共振成像实验 / 130
- 7.10 T_1 加权和 T_2 加权实验 / 136

第 8 章 磁共振成像伪影观察实验

- 8.1 混叠伪影观察实验 / 137
- 8.2 拉链伪影观察实验 / 139
- 8.3 化学位移伪影观察实验 / 140
- 8.4 磁共振波谱成像观察实验 / 142

第 9 章 小动物三维磁共振成像实验

- 9.1 磁共振对比剂 / 147
- 9.2 肿瘤药物及纳米材料仿真实验 / 148
- 9.3 小动物三维磁共振成像及老鼠脑功能成像实验 / 150

第 10 章 医学电子工程基础实验

- 10.1 磁共振实验装置 / 154
- 10.2 数字信号源模块性能检测及 DDS 控制实验 / 163
- 10.3 模拟正交相位检波器频率带宽测量实验 / 164
- 10.4 脉冲调制模块性能检测实验 / 166
- 10.5 序列控制模块性能检测实验 / 166
- 10.6 AD9850/AD9854 DDS 射频源发生器性能检测实验 / 168
- 10.7 调制器性能检测实验 / 171
- 10.8 前置放大器及射频开关测量实验 / 173
- 10.9 矢量网络分析仪检测射频线圈实验 / 175
- 10.10 梯度功放电路性能检测及调节实验 / 178
- 10.11 抗混叠滤波器测量实验 / 180
- 10.12 涡流观察及抗涡流技术实验 / 183
- 10.13 序列控制台编程实验 / 184

参考文献 /189

第1章 MRI 技术概述

核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 成像, 现称为磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI), 是利用生物内特定原子磁性核在磁场中表现出磁共振作用而产生信号, 经计算机空间编码、重建而获得图像的一种技术。

1.1 MRI 技术发展历史

1924 年, 泡利 (Wolfgang Pauli) 提出了原子核具有自旋角动量和磁矩; 1946 年美国物理学家, 斯坦福大学布洛赫 (F. Bloch) (见图 1-1) 和哈佛大学珀塞尔 (E. Purcell) (见图 1-2) 分别应用共振吸收法和核感应法实现了核磁共振, 提高了核磁矩测量精度, 并因此获 1952 年诺贝尔物理学奖。磁共振已在众多领域有十分广泛的应用。



图 1-1 布洛赫 (F. Bloch, 1905—1983) 图 1-2 珀塞尔 (E. Purcell, 1912—1997)

1972 年, 美国纽约州立大学达曼迪恩 (R. Damadian) 提出了利用 NMR 原理测定活体组织的纵向弛豫时间 (T_1) 和横向弛豫时间 (T_2) 值的差别来鉴别正常组织和异常组织, 并因此而取得了专利。1973 年, 美国纽约州立大

学石溪分校的教授劳特伯 (P. C. Lauterbur) (见图 1-3) 提出了磁共振成像 (MRI) 的方法, 即把磁共振原理同空间编码技术结合起来, 用一定的方法使空间各点磁场强度有规律地变化, 磁共振信号中的不同频率分量即可同一定的空间位置对应, 通过一定的数学变换即可实现磁共振成像, 并在随后成功研制磁共振成像的实验样机, P. C. Lauterbur 和 Mansfied (见图 1-4) 也因此获得 2003 年诺贝尔生理学或医学奖。20 世纪 80 年代, MRI 样机试制成功; 1984 年, 美国仪器与药物管理局 (FDA) 批准 MRI 在临床试用。

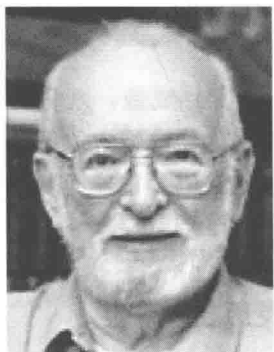


图 1-3 劳特伯 (P. C. Lauterbur)



图 1-4 曼斯菲尔德 (Mansfied)

早期磁共振主要对测量磁矩、核自旋等结构和性质进行研究, 并对分子组成和结构、生物组织与活体组织及其病理、医学影像等方面进行分析, 可观察动态过程、化学反应、生化过程。图 1-5 为现代 MR 成像设备, 其磁体从低磁场强度开放和高磁场强度性能两方面改进, 低磁场永磁开放型达 0.4 T, 为单柱、双柱非对称型, 超导型由 1.5 T 到 3.0 T, 有研究型 7 T, 超导液氮消耗已几乎为零。世界上第一张 MRI 图像如图 1-6 所示。



图 1-5 现代 MR 成像设备

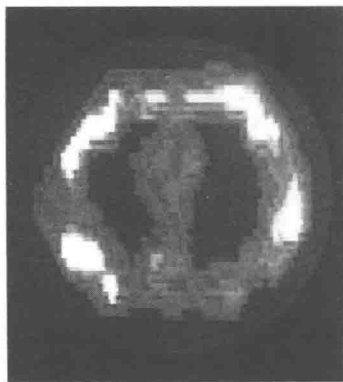


图 1-6 世界上第一张 MRI 图像

1.2 MRI 技术特点

MRI 与其他医学影像检查技术相比,具有以下显著特点:

① 以射频脉冲作为成像的能量源,而不使用电离辐射,因而对人体安全、无创。

② 图像对脑和软组织分辨力极佳,能清楚地显示脑灰质、脑白质、肌肉、肌腱、脂肪等软组织及软骨结构,解剖结构和病变显示清楚、逼真。

③ 多方位成像,能对被检查部位进行轴位、冠状位、矢状位及任何倾斜方位的层面成像且不必变动被检者体位,便于再现体内解剖结构和病变的空间位置及相互关系。

④ 多参数成像,在影像上取得组织之间、组织与病变之间在 T_1 , T_2 , T_2^* 和 PD (质子密度) 上的信号对比成像,对显示解剖结构和病变敏感。除能进行形态学研究外, MRI 还能进行功能、组织化学和生物化学方面的研究。

1.2.1 多参数成像

MRI 的信号是多种组织特征参数的可变函数,它反映的是病理、生理及代谢的基础。MRI 的信号强度与组织的弛豫时间、氢质子 N (H) 的密度、液体的流动、化学位移及磁化率有关,其中弛豫时间 (T_1 , T_2) 对图像的对比起重要作用,如图1-7所示。弛豫时间是区分正常组织与异常组织的重要诊断基础。

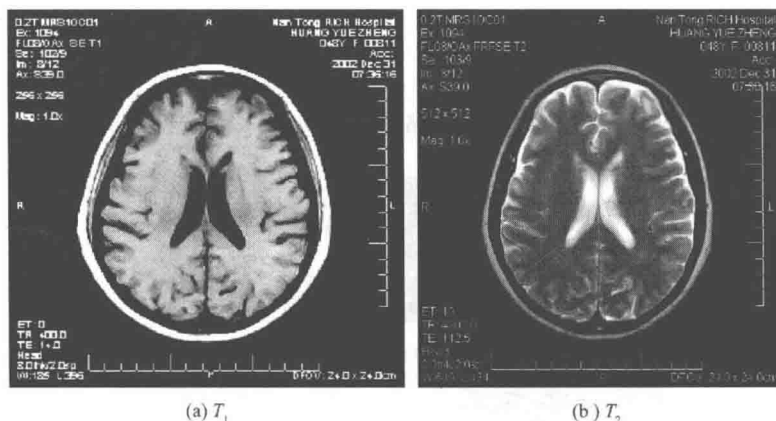


图 1-7 MRI (T_1 , T_2 图像对比)

MRI 诊断中影响对比度的主要参数: T_1 对比 T_1 加权像的对比度主要取决于不同组织时间常数 T_1 ; T_2 对比 T_2 加权像的对比度主要取决于不同组织

时间常数 T_2 。质子密度 $N(H)$ 对比：主要来源于不同组织的时间常数 T_2 。 T_2^* 对比： T_2^* 加权像主要来源于组织磁化率的差异。相位对比：以相位关系表示图像的以显示流体对比或流体与静态组织的对比。弥散对比：主要取决于细胞分子的热运动。磁化传递对比：主要取决于分子大小的相对比率。流动静止对比：流动增强效应与静态饱和之间的对比。流速对比：流动速度对应信号强度产生的图像对比。

1.2.2 多方位成像

多方位成像不用旋转被检体，而是利用 G_x 、 G_y 和 G_z 三个梯度或三者的任意组合来确定层面，无机械运动。MRI 可以获得人体横断位、冠状位、矢状位及任何方位断面的图像，有利于病变的三维定位及解剖结构的完整，如图 1-8 所示。

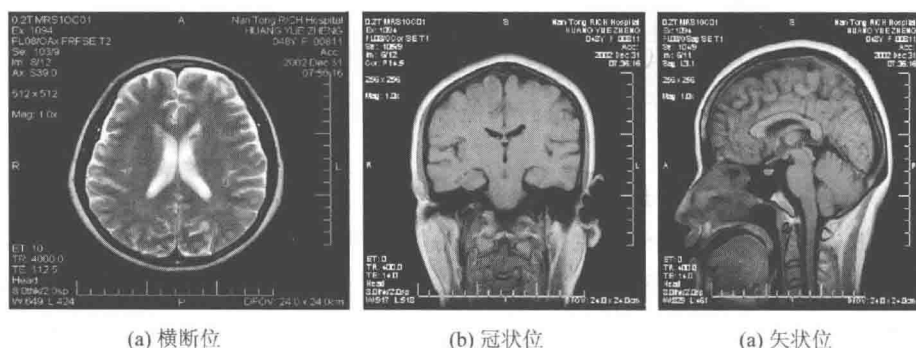


图 1-8 多方位成像

1.2.3 大视野 (FOV) 像

MRI 在人体横断面、冠状面、矢状面和斜面等方向可重建大视野的图像 (见图 1-9)，便于观察和定位病变的部位，对临床术前定位具有重要意义。

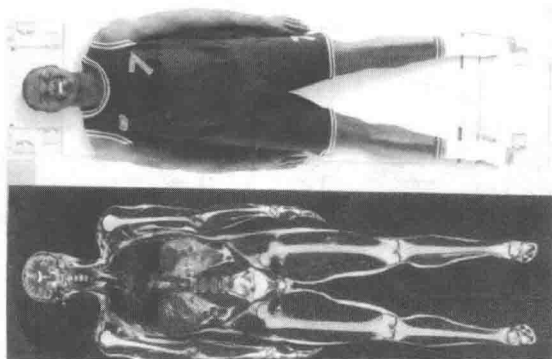


图 1-9 大视野 (FOV) 像

1.2.4 组织特性成像

组织特性成像（见图 1-10）使用特殊的脉冲序列特异地显示水、脂肪、软骨及静态和流体组织，如水成像技术用于显示静态液，黑水技术可以区分结合水与自由水，脂肪激发技术可以专门用于显示脂肪，水激发及脂肪抑制技术可以用于关节软骨的显示，TOF（时间飞跃法）、PC（相位对比）可以用于流体的显示。此外还可以采用不同的脉冲序列特异性地显示某种病理组织，监测病理演变过程。

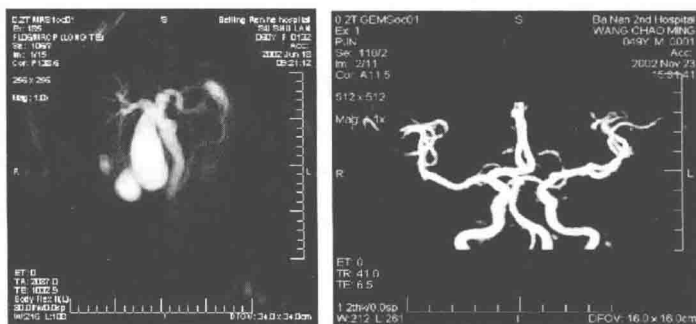


图 1-10 组织特性成像（MRCP）

1.2.5 人体能量代谢研究

任何生物组织在发生结构变化之前，首先要经过复杂的化学变化，然后才能发生功能改变和组织学异常，如图 1-11 所示。常规影像学检查一般只提供解剖学资料，没有组织特征和功能信息可利用。MRI 弥补了以往检查的不足，使疾病检测深入到分子生物和组织学水平。弛豫时间 T_1 和 T_2 及其加权像本身就反映质子群周围的化学环境，即生理和生化信息的空间分布。磁共振波谱（MRS）的研究亦可观察组织器官的能量代谢情况，是唯一能对组织代谢生化环境及化合物进行定量分析的无创伤性的检查方法。



图 1-11 生物组织结构

1.2.6 无电离辐射

MRI 系统的激励源为短波或超短波段的电磁波，波长在 1 m 以上（小于 300 MHz），至今没有发现有电离辐射损伤。

1.2.7 无骨和气体伪影干扰

各种投射性成像技术往往因气体和骨骼的重叠而形成伪影，给一些部位的病变诊断带来困难，而 MRI 则无此类伪影。

1.2.8 心血管系统成像不需要对比剂

采用 MRI 技术可以测定血流，利用 TOF 效应和相位对比的敏感性无须对比剂成像。

1.2.9 磁共振成像的局限性

- ① 空间分辨力较低：略比 CT 低。
- ② 成像速度较慢： $T_1=15\sim30\text{ s}$ ； $T_2=25\sim35\text{ s}$ 。
- ③ 具有较严格的禁忌证：起搏器、假牙、绝育环、监护仪器金属。
- ④ 对于不含或含有少量氢质子的组织结构显示不佳：如骨骼、钙化灶在 MRI 影像上呈低信号或无信号，不利于这些结构与相应病变的显示。
- ⑤ 血管的显示限度：主要对小血管显影，此外，血管显示也受血管走行、血流方向及血液状态（如层流、涡流、湍流等）的干扰而产生伪影，造成假阳性、假阴性结果。
- ⑥ 图像易受多种伪影影响：射频、磁场、化学位移、静电导致磁共振图像产生伪影的因素较其他成像装置多。
- ⑦ MRI 系统庞大，运行费用和检查费用高，设备价格相对昂贵。

1.2.10 MRI 与 CT 性能、应用价值的比较

MRI 与 CT 的性能比较见表 1-1，MRI 与 CT 的应用价值比较见表 1-2。

表 1-1 MRI 与 CT 的性能比较

性能特点	MRI	CT
信息载体	NMR 信号（吸收的射频能量）	透过组织的 X 射线
体内信息源	质子密度、 T_1 弛豫、 T_2 弛豫、流动、化学位移、扩散、灌注、局域氧合、局域含铁及膜的通透性等	X 射线的减弱程度或透射 X 射线的强度分布
采用的电磁波	射频波（无线电波）	连续 X 射线（窄束）
电磁波频率	特定磁场下氢质子的拉莫尔频率（一般小于 100 MHz）	$3\times10^{10}\sim3\times10^{14}\text{ MHz}$
电磁波波长	3 m 以上（米波段）	约 10^{-10} m
使用的磁场	静磁场和梯度磁场的叠加	无
探测器及方法	接收线圈中的感应电流	碘化钠（NaI）、BGQ（ $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ）、氙（Xe）等

续表

性能特点	MRI	CT
断层方向	任意	一般与体轴垂直
扫描机构	电子	机械
数据采集方式	多方向或单方向投影	多方向投影
测量值	多参数成像, 但不同机器所测参数 值难以比较	仅与线衰减系数对应
图像重建方法	以二维傅里叶变换成像法为主	反投影法、二维傅里叶变换重建 法、卷积反投影法、迭代法等
有无电离辐射	仅有射频辐射, 约 10^{-7} eV, 十分 安全	有 X 射线辐射, 约 10^4 eV, 可能 引起生物效应
空间分辨率	已与 CT 接近	高
像素尺寸	已达 0.4 mm	0.4 mm 以下
层面厚度	三维成像可达 1 mm 以下	螺旋 CT 已达 0.5 mm
每层面成像时间	因扫描序列而异 (EPI 序列已达 30 ms)	1 s 左右 (螺旋扫描可进一步缩 短, 电子束 CT 已达数十毫秒)
实时成像功能	已达到	已达到

表 1-2 MRI 与 CT 的应用价值比较

应用范围	MRI	CT	备注
软组织对比度	高	低	MRI 可行乳腺成像
半月板、肌腱、软骨 及椎间盘	不使用造影剂、清晰	须使用造影剂、不 清晰	
脊髓显示	清晰	困难	
白质和灰质	极明显	一般明显	
出血	可显示	高度敏感	
钙化灶	不敏感	敏感	
骨皮质病变	不敏感	敏感	
骨伪影	无	有	
心血管	不使用造影剂, 可区 别心肌、心脏轮廓和 大血管	须使用造影剂, 且只 能显示心肌和心脏 轮廓	MRI 可行无创伤血 管造影



续表

应用范围	MRI	CT	备注
胎儿及孕妇检查	可进行（妊娠三月内慎用）	一般不进行	MRI 可展示胎儿及母体子宫、胎盘等结构
水的显示	极明显	明显	MRI 可行水成像、扩散成像和灌注成像
生化及代谢测定	能	不能	需 MRI/MRS 一体化系统、MRI 需高场强系统
化学位移成像	能	不能	需 MRI/MRS 一体化系统
造影剂类型	顺磁性物质	碘剂	

第2章 磁共振成像设备

MR 设备由磁体系统、梯度磁场系统、射频系统、计算机与辅助系统四大系统组成。磁体分为永磁型、常导型、超导型、混合型四种。MR 设备是通过信号产生、接收转换、图像数据采集、图像重建和显示完成 MRI 有机组合的。按磁体产生静磁场强度的大小,分为低场($0.1 \sim 0.5 \text{ T}$)、中场($0.6 \sim 1 \text{ T}$)、高场($1.5 \sim 2.0 \text{ T}$)、超高场(3 T) MR 设备。根据成像范围,MR 设备分为局部型和全身型;根据不同的用途,MR 设备分为专用型和通用型;根据磁体的外形,MR 设备分为开放型、封闭型、特殊型。MR 设备如图 2-1 所示。

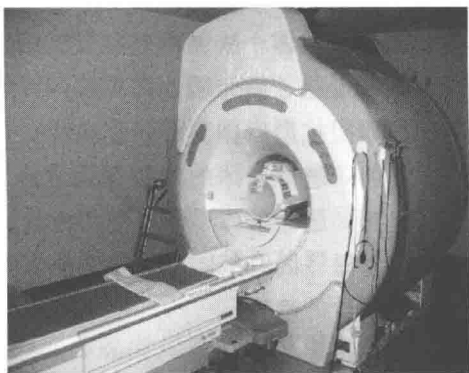


图 2-1 MR 设备

2.1 磁体系统结构及其特性

MR 设备提供满足特定要求的静磁场,使人体内氢质子磁化,产生静态磁化矢量,磁体系统除了磁体之外还包括匀场线圈、梯度线圈、射频发射和接收体线圈的内置体线圈等组件。磁场强度又称静磁场,在一定范围内,静磁场强度越强;则氢质子所产生的磁矩越大,信号越强,图像的信噪比(SNR)也越高。

2.1.1 磁体种类

(1) 永磁型(Permanent Magnet)磁体

永磁型磁体材料主要有铝镍钴、铁氧体和稀土钴三种类型;由多块材料拼