

磁共振成像和超声成像及其医学应用

陶 笃 纯

(深圳安科高技术有限公司、深圳 518067)

简要地介绍了作为现代医学成像技术的两大分支——磁共振成像和超声成像的基本物理原理、相应技术和在医学方面的应用,同时对它们最新发展也作了评述. 企图通过这两个实例说明,古老的物理原理同现代技术相结合,会获得新的生命力并具有巨大的实用价值.

关键词 磁共振,超声,医学成像

Abstract

This paper introduces briefly the basic physics principles of magnetic resonance imaging and ultrasound imaging, the two main branches in modern medical imaging technology, their manufacturing technology and applications in medicine, as well as the latest progress of these technologies, are also related. The author intends to demonstrate, through two examples, that the classical physics principles combined with modern technology will have great vitality and provide vast potential applications.

Key words magnetic resonance, ultrasound, medical imaging

X射线成像、超声成像、磁共振成像和核医学成像一起构成了现代医学成像技术的四大支柱。本文介绍其中之二,即磁共振成像和超声成像。这两种目前在医学界广泛应用的成像方法,都是经典的物理原理同现代技术,特别是电子及计算机技术紧密结合的产物。由于当代电子及计算机技术的飞速发展,使古老的磁共振原理和声学原理获得了新的生命力,在医学方面找到了巨大的实用价值。

一、磁共振成像(MRI)

1. MRI的发展简史和基本原理

核磁共振(NMR)现象是1946年美国哈佛大学教授 E. M. Purcell 和斯坦福大学教授 F. Bloch 两人发现的。他们二位因此于1952年获得了诺贝尔物理学奖。核磁共振的基本原理是:当处于静磁场中的物体受到射频电磁波的辐照时,如果射频电磁波的频率与静磁场强度

的关系满足拉莫尔方程,则组成该物体成分中的特定原子核会吸收电磁波能量而发生“共振。”当射频电磁波的激发停止后,吸收了能量的原子核又会把这部分能量以电磁波的形式释放出来,即发射所谓核磁共振信号。这种核磁共振信号携带了物质内部结构的信息,通过测量和分析这种信号,可以获得物质的物理和化学信息,从而在物理、化学、生物、医学等方面具有重要的应用价值。

1972年美国医生 R. Damadian 提出了利用核磁共振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 的方法以及将其用于医学诊断的设想。1973年美国纽约州立大学石溪分校教授 P. C. Lauterbur 提出了磁共振成像(MRI)的方法,即把核磁共振原理同空间编码技术结合起来,用一定方法使空间各点磁场强度有规律地变化,核磁共振信号中的不同频率分量即可同一定的空间位置相对应,通过某种数学变换(投影重建或二维傅里叶变

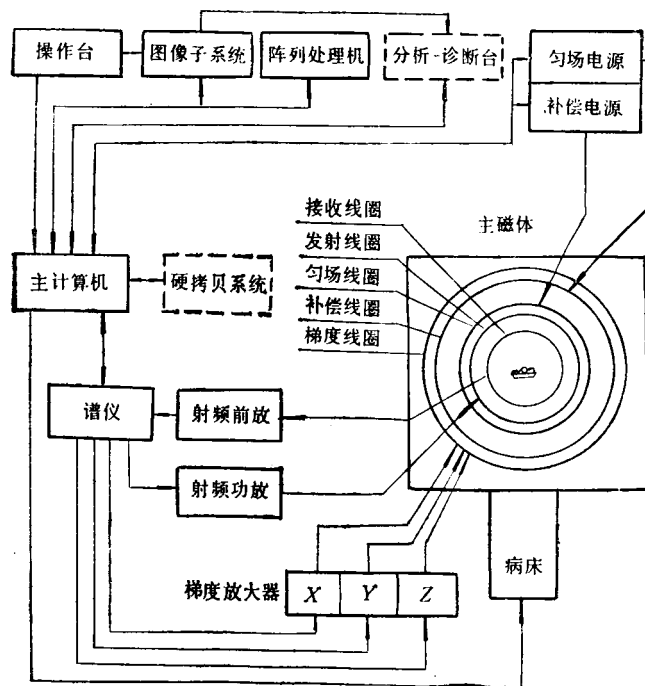


图1 磁共振成像系统示意框图

换),即可实现磁共振成像。当用于医学方面时;以这种方法可以利用氢原子核辐射的磁共振信号得到受检人体各个部位任意方向的断层图像,从而发现病变并将其精确定位。

经过大约10年的研究和发展,MRI经历了实验室研究、样机试制和工程化阶段,技术日渐成熟,于80年代初进入商品化阶段。今天,总体而言,MRI在技术方面已达到基本成熟阶段,但还在孕育着新的突破;在临床应用方面,则处于迅速推广的阶段,到92年底全世界MRI系统的总装机量超过6000台这一数据就是明证。普遍认为,MRI目前已成为一种最为重要的数字放射学方法,其优越性正越来越明显地显示出来,具有极为广阔的发展前景。

2. MRI 技术简介

从技术观点看,MRI系统是一种以计算机为核心的机电一体化设备,它由磁体、梯度线圈、射频发射/接收线圈、梯度放大器、射频功率放大器、MRI谱仪、主计算机、阵列处理机、图像显示系统、操作台、病床等主要部件组成,其框图见图1。这是一种集多种学科之大成的复杂高技术产品,尽管它所涉及的物理原理并没

有超过经典物理原理的基本范畴。

在一台MRI系统中,磁体的作用是为待检查物体中的特定原子核(一般为 ^1H)提供产生核磁共振的必要条件,即一定强度的磁场。按照产生磁场的机理,磁体可分成两大类型:电磁体和永磁体。所谓电磁体,即用通电螺旋管线圈产生磁场。根据通电线圈的材质不同,电磁体又可分成两种。采用普通铜导线的,是普通的电磁体;采用超导材料导线的,在足够的低温下,导线电阻可趋于零,即呈现超导态,故而相应磁体便称之为超导磁体。所谓永磁体,就是用充上磁的磁性材料制成的磁体,在相当长的时间里它一直保持磁性。

梯度线圈的作用,是在特定方向上产生与主磁场相同或相反方向的附加磁场,起到对于成像而言有特殊重要意义的空间编码作用。

射频线圈从作用方面可以分成两大类:发射线圈和接收线圈。用发射线圈来产生激励核磁共振的电磁波脉冲,而接收线圈则用于接收同样是以电磁波形式出现的磁共振信号。这两种线圈有时合二为一,同时具备收发功能,有时是分开的。对接收线圈而言,往往根据使用部

位的特点做成各种不同形式,以求得到最佳的成像效果。最常用的是头部线圈和体部线圈,后来又出现了许多种用于检查人体特定部位(如颈、脊柱、肩关节、乳房、五官等)的特殊接收线圈,通常称之为表面线圈。

MRI 谱仪是 MRI 系统的一个核心部件,它具有两个主要功能:(1)产生射频脉冲和梯度脉冲的波形及时序的所谓脉冲序列;(2)对经过前置放大的接收到的 MRI 信号进行采样、A/D 变换、正交解调等处理后,以数字形式送入计算机,作进一步的处理。

射频功率放大器的功能是把规定波形的射频脉冲进行功率放大,耦合到射频发射线圈,发射激励待查物体中的原子核磁矩让其矢量改变方向的电磁场能量。

梯度放大器实质上是一种电流放大器,它根据 MRI 检查所用脉冲序列规定的形状,把梯度脉冲放大到一定程度,使梯度线圈中能产生足够强度的梯度磁场,满足选片和空间编码的需要。由于变化的磁场会在构成磁体的一些金属材料中感应产生涡电流,从而阻碍磁场的变化,使梯度脉冲难以达到理论设计的形状。在梯度放大器中,一般都有一套专门设计的涡流补偿电路,目的在于补偿掉涡流对磁场变化的抵抗作用。

MRI 系统的主计算机一般采用小型机或者工作站,它是整个 MRI 系统的中央控制器,指挥系统中的各个部件协调动作,完成指定的扫描或其他任务。它同时又是一个数据处理部件,通常完成数字化了的 MRI 信号的预处理、数据传送及缓存等功能。大量的高速运算,譬如为重建 MRI 图像要做的二维 FFT(快速傅里叶变换)计算,通常是用阵列处理器(AP)以并行计算方式完成的。

MRI 系统一般还有一个图像系统,完成对重建所得的 MRI 图像的显示、分析、测量等功能,以满足医生观察、诊断和分析之需要。

计算机实际上是靠一套复杂的软件起着整个 MRI 系统的指挥、调度、计算、处理等关键作用。软件的人机界面以交互的方式通过操作台

与操作人员打交道,接受其指令,在人的控制下让 MRI 系统实现其各种功能,同时向人提供图像、数据等重要信息。

病床的作用只是载着病人将其送入磁体腔内,让病人受检查部位的中心置于磁体的中心位置。操作员可通过机/电系统控制病床的升、降、进、退,运动自如。

以原子/量子物理和波谱学为背景的 MRI 物理基础结合一定的信号处理技术,是 MRI 技术的核心。

3. MRI 的临床应用

到目前为止, MRI 已广泛地应用于医学临床。用 MRI,可以得到人体各部位不同方向截面的断层图像,通过不同组织形态上的变化以及在质子密度,纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 方面的差异,分辨组织处于正常还是异常状态,从而给医生提供临床诊断的依据。人体不同的组织,或者同一组织处于不同的生理生化状态,有不同的理化特性。这种差异在很大程度上体现在表征氢原子核的磁化矢量在经受射频电磁波激励而改变其取向之后恢复到原始状态的速度的两种弛豫时间(T_1 和 T_2)的大小上。因为弛豫时间取决于氢原子核所处的周围环境及相互关系,而这些因素则同组织的状态正常与否关系极大。根据临床的需要,利用 MRI 技术,可以用不同类型的脉冲序列或者同一脉冲序列的不同参数,得到分别强调质子密度或者 T_1 或者 T_2 的 MRI 图像,达到鉴别诊断的目的。

MRI 对于中枢神经系统、脑部、心脏、肝、胆、盆腔、肌肉骨骼组织的病变均有很好的诊断效果,特别是早期发现癌症、肿瘤的有力武器。MRI 的临床应用范围正随着 MRI 技术的不断发展而逐步拓宽。

4. MRI 的发展方向

尽管 MRI 在理论方面应该说是比较成熟的,但在技术方面则还不能说已经达到了成熟完美的程度。

MRI 的未来发展大致可以归结为以下几个方面:

(1) 快速扫描

用经典的 MRI 成像方法扫描病人的时间一般为几分钟甚至十几分钟。在这样长的时间里,无法保证许多受检的人体器官不运动(如胃、肠的蠕动,吞噬动作、呼吸、心跳等),因而会造成 MRI 图像上相应的模糊或产生所谓运动伪影。近年来,出现了许多缩短扫描时间的方法,最有名的是所谓 FSE(快速自旋回波)和 EPI(回波平面成像)。用 EPI 技术,可以在若干毫秒里得到一幅 MRI 图像,使因器官运动对图像造成的影响可以忽略不计。这种方法投入实用之后,将大大扩展 MRI 的应用领域。

(2) MRI 血流成像

利用血液在血管中流动造成的流空效应以及对磁共振信号产生的相位变化,可以从物理上和技术上采取一系列措施,使 MR 图像上把血管的形态鲜明地呈现出来,而把其他组织的影像尽可能地抑制掉,让医生的注意力集中在血管方面,诊断血管的疾患。测量血管中血液的流向和流速也可以做到。这种方法的优点是简便易行,不需注射造影剂。

(3) MR 波谱分析

MR 最初的应用是做物质的理化分析。在医学应用方面,目前在发展利用高磁场实现人体局部组织的波谱分析的技术,从而增加帮助诊断的信息。利用 MR 波谱分析方法,可以得到反映人体新陈代谢中产生的各种不同物质如三磷酸腺苷(ATP),二磷酸腺苷(ADP),磷酸肌苷(PC₂)等及其相对含量的信息,非常有助于医生判断这块人体组织所处的状态是否正常,并使 MRI 的应用不断深入,直至研究生命过程的奥秘。

(4) 脑功能成像

随着快速成像和血流成像技术的发展,近年来人们利用 MRI 来研究脑的功能。在外加视觉、听觉或触觉刺激的同时,对脑部进行快速的 MRI 扫描,可以发现人脑的某些局部有较强的血液灌注,从而对脑功能研究提供有力的物理佐证。

二、超声成像

1. 超声成像的基本原理

声学是一门比磁共振古老得多的学科,在上一世纪,由于瑞利等科学家的努力,已经形成了其基本理论体系。迄今为止,在理论上的进一步发展并不很多。然而,从本世纪中叶开始,古老的声学与近代的电子技术和计算机技术相结合,使其重新焕发了青春,在许多方面获得了新生和广泛的应用。医学超声成像就是其中的一个重要分支。

超声一般是指频率在 20kHz 以上的声波,用于医学成像的超声波频率范围通常在 1MHz 到十几个 MHz。人体超声成像主要是基于超声波在人体内不同组织或器官的分界面上,或者同一器官组织内部声特性阻抗变化的界面上产生反射的物理特性。医用超声诊断设备利用超声换能器向人体脉冲式地发射超声波,并接收由人体组织反射回来的超声回波,超声回波的幅度和频率携带了有关人体组织的信息,对其加以检测、处理后,可以二维图像的方式显示出来,为医生提供诊断疾病的依据。这就是医用超声成像最基本的物理原理。

之所以能用超声脉冲反射的方法来进行人体检查,还由于以下物理基础:

(1) 超声波在人体内部的传播速度是比较慢的(约 1540m/s),在发射了长度一般为几个微秒的超声脉冲之后,利用发下一个脉冲之前超声波在人体内传播(包括反射)的大约数百微秒的时间,来得及用来接收、放大和处理超声回波信号;

(2) 超声波在人体中传播的过程中,遇到因声特性阻抗(组织密度 ρ 与声速 C 之乘积)不同而形成的组织的不均匀界面时,就会产生反射。但人体内大部分软组织的声学特性阻抗的差异并不很大,故只有小部分声能被反射回来,而大部分声能会透过界面继续向前传输,当碰到下一个界面时,又发生小部分的反射,仍有大部分声能透过第二个界面继续向前传播。因而

超声波在人体中的穿透距离可以达到数十厘米,从而满足人体检查的要求。回波信号的幅度由反射界面两侧声特性阻抗变化的大小所决定。

(3) 人体中除少量空腔性脏器和一部分骨骼之外,大多数是含水量较大的软组织,故超声波在人体中的传播速度基本上和在水中的传播速度相近,即约 1540m/s,且在不同软组织中声速变化不大,所以可以据此速度较为精确地测距。

(4) 由于多普勒效应,当入射超声波在人体中传播时遇到运动物体时,反射回来的超声波即会在频率上发生频移,回波频移的正负和大小代表反射体相对于入射声波运动的方向和速度的大小。因而,用超声检查法还可得到人体内感兴趣的运动(心脏瓣膜,血流等)的方向和速度信息。

(5) 为保证超声波有一定的探测深度,所发射的声功率应达到一定水平。但由于声波的生物效应,发射的声功率不宜过大,如果声强超过一定阈值,会对人体产生某种损害。根据对超声生物效应的研究,国际组织及我国有关部门对允许使用的超声功率定出了标准,只要不超出标准规定的上限,利用超声波来检查人体是不会造成危害的。

最基本的超声成像需要有一个二维的平面显示,一维代表声波的传播和反射的方向,另一维则是代表超声波束在人体中的扫描方向。这两维构成了一个超声波束的扫描平面,在平面上每一点显示的亮度即为回波强度,反映要检查的人体脏器的断层图像。一般将这种显示方式称之为 B 型显示。

2. 超声成像技术简介

超声成像设备有许多不同的种类,结构不尽相同,但归结起来,大致是由图 2 所示的几个部分组成的,其中各部分的功能简介如下:

(1) 换能器

换能器是超声成像设备的关键部件,它的功能是完成电-声和声-电的转换。设备所产生的发射电脉冲激励换能器中的压电晶片基元,

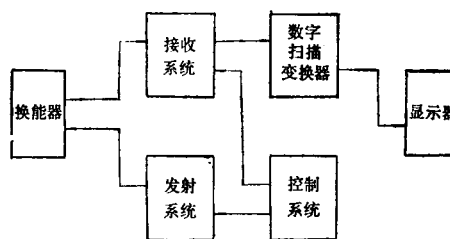


图 2 超声成像设备示意框图

使它产生超声脉冲,向被检查的人体脏器发射出去;换能器中的压电晶体又把接收到的超声回波脉冲转换成电信号,供给设备中的接收电路,进行放大、处理直至显示。

换能器是一种结构相当复杂的电-声/声-电转换系统,按不同用途的需要,分成许多种不同类型,如线阵、凸阵、机械扇扫、相控阵电子扇扫、环阵等。

(2) 发射系统

发射系统的主要功能是产生一个有一定功率的电脉冲,用以激发换能器中的压电晶体,让其产生发射用的超声脉冲,同时通过一定的控制线路来控制发射脉冲的时间和波形。

(3) 接收系统

接收系统由一系列放大器、检波电路和处理电路组成,其作用是把接收到的超声回波进行放大、检波和作某些其他处理,为图像显示及后处理作准备。对一些有较多功能的超声成像系统,在接收系统后面包括一系列信号处理电路,完成诸如 FFT、彩色多普勒信号处理等功能。

(4) 控制系统

控制系统可以说是一台超声成像设备的指挥中心,由振荡器、存贮器、CPU 和一系列逻辑电路等部分组成,它的作用是产生一系列控制整个设备的各个子系统协调工作的时序脉冲。

(5) 数字扫描变换器

数字扫描变换器的主要功能是让来自接收系统的信号具有合适的显示格式,并完成图像的后处理,使对所显示的图像能进行测量,计算和完成多种方式的显示。

(6) 显示系统

显示系统一般包括扫描信号发生器、偏转电流放大器、同步电路、消隐电路、视频放大器等部分,其作用是为超声成像设备的显示器提供光栅扫描信号,使显示屏上形成同超声波的发射和接收严格同步的扫描光栅,保证所显示的超声回波亮度矩阵代表实际的超声探查到的人体脏器断面。

3. 超声成像的临床应用

经过几十年的发展,超声成像系统已广泛地用于医学临床,成为医生检查人体内部脏器的有力武器。根据不同的需要,分成心脏科、腹部、泌尿科、妇产科甚至眼科等专用超声成像设备,也有能配多种不同探头,功能齐全的“全身型”医用超声设备。超声成像系统能为医生诊断疾病提供许多有用信息,一般来说能够(1)显示、测量脏器或者病变的大小、范围和性质;(2)显示病变与周围组织或脏器间的关系;(3)带多普勒或彩色多普勒功能的超声成像系统可显示并测量在心脏或血管中血流的方向及速度;(4)对超声图像可进行照相、录像或其他方式的存储、传输;(5)提供许多其他有效信息,如心功能计算结果,胎儿生长测量计算结果等,这些都是根据测量结果用软件计算出来的。

由于超声波在声学特性阻抗发生大的变化的界面上会发生强烈的反射,所以超声波透过骨组织的能力很差。这就给超声成像设备用于颅脑检查带来了困难。

4. 超声成像的发展方向

虽然超声成像技术已经在医院里被广泛使用,但是超声成像技术仍在不断发展。超声成像技术的进步可以归结为以下三个方面:

(1) 提高超声图像质量并扩展超声成像设备的功能

为改善超声图像的质量,增加相控阵及线阵探头的阵元数目能带来较好的效果。过去,超声成像系统都采用模拟信号接收前端,而近年来则出现了数字信号接收前端,使图像分辨力大大提高,动态范围大幅度增加。

全程实时动态聚焦技术可使声束聚焦点与

物理

声波的传播同步,从而获得近、中、远场都很清晰的图像,改变了过去用多段聚焦技术在焦区外超声图像不够清晰的缺陷。

近年提出的动态频率扫描技术采用多频发射、动态频率滤波以及探头多层匹配等措施,使人体超声图像从远场到近场都比较满意。

从扩展超声成像系统功能的角度看,高存储容量的电影回放功能是一个新的进步,采用它可以使医生以较慢的速度或逐帧回放变化较快的心脏活动图像,仔细观察,帮助诊断。

(2) 开发多种多样的特殊探头

由于医学超声成像技术的发展,其临床应用范围也迅速扩展,随之适合于人体各部位检查的各种各样的特殊超声探头也在逐渐开发出来。根据探头的用途分为食道探头、阴道探头、直肠探头、膀胱探头、手术内窥探头、浅表血管探头、微型血管内探头等。按扫描方式分,新型探头可分为双平面或单平面的相控阵,凸阵或线阵等。另外,应该特别提出的是,由于介入式诊断及治疗的需要,近年来各式各样的超声穿刺探头也得到了长足的发展。

探头是超声成像设备的核心部件之一,所以探头技术的进步又会反过来促进整个设备水平的进一步提高。

(3) 新的超声成像技术的出现

在彩色超声多普勒血流成像技术日臻完善的同时,由于其物理基础,它的一些限制也暴露了出来。因为采用多普勒原理,只能检测出超声波束方向上的血流分量,而对垂直于波束方向的血流分量则无能为力。近年来出现了一种称为 CVI (彩色速度成像)的成像方法,对血管中不同的两处的血流回波信号,进行相关处理,算出血流在这两点之间运动所需的时间,除以两点间的距离之后,得到血流速度。用这种方法可以测出近于与波束方向垂直的方向上的血流速度分量。

因为计算机技术的迅速发展,计算机的处理能力和处理速度大大提高,从而使三维超声成像成为可能。目前它还在非实时成像阶段,

(下转第 306 页)