

核磁共振脑成像技术

师 玉 荣

(中国海洋大学物理系 青岛 266000)



人类对自己大脑的认识相对其他器官来说非常少,一个重要的原因是大脑功能的复杂性;另一个重要的原因是大脑隐藏在封闭的头颅里,我们很难直接观察到它。但是近几年新发展起来的功能性核磁共振脑成像技术,在无创伤的情况下,不仅能对大脑成像,还能辨别大脑进行思维时激活的区域,该技术被称为“人类思维的阅读器”,有人把它形象地描述为对人脑活动“拍电影”。核磁共振脑成像技术为人脑功能研究打开了一扇大门。下面介绍这种技术的理论基础及生理学基础。

一、物理学理论基础

核磁共振脑成像是把核磁共振成像应用到脑研究中发展起来的,所以首先来介绍核磁共振成像。

1. 核磁共振现象

核磁共振现象是核磁共振成像的理论基础。核磁共振是自旋的原子核在磁场中与电磁波相互作用的一种物理现象,1946年瑞士科学家布洛赫和美国科学家珀塞尔各自独立发现了核磁共振现象,因此他们共获1952年诺贝尔物理学奖。下面借助经典理论来介绍核磁共振现象。

原子核由质子和中子组成,它们都具有磁矩,若质子的磁矩为 m ,中子具有质子磁矩的 $1/3$ 。在原子核中当质子或中子成对存在时,成对的磁矩会彼此抵消,所以除质子和中子都为偶数的原子核外,质子和中子都为奇数、或者其一为奇数的原子核具有磁矩,如 ^1H 、 ^{14}N 、 ^{31}P 、 ^{13}C 、 ^{23}Na 等的原子核具有磁矩。

无外磁场时,原子核磁矩的方向是随机的,总体看没有磁矩。当存在外磁场 B_0 时,原子核磁矩将受到磁场对它的力矩的作用,在这个作用下磁矩将绕磁场的方向作旋进,像离轴旋转的陀螺一样在自旋的同时还会绕 B_0 进动,这种运动称做拉莫进动。磁矩与 B_0 有一夹角,进动频率 $\omega = \gamma B$ (γ 为旋磁比,是每个自旋原子核固有的物理量)。磁矩与 B_0 的夹角存在小于 90° 和大于 90° 两种情况,大多数磁

矩处于夹角小于 90° 的情况,因为这种情况下能量低,少数处于夹角大于 90° 的情况,这种情况下能量高。设 B_0 方向为 Z 方向,这样原子核的磁矩 M 有两个分量 M_{xy} 和 M_z ,因为 M_{xy} 的相位是随机的,所以磁矩的总体水平分量是 0 ;而与 B_0 的夹角小于 90° 的磁矩占大多数,所以总磁矩方向平行 B_0 。设磁化强度矢量为 M_0 。若按照拉莫进动频率向样品辐射电磁波,将引起质子的同相进动,称为相干,此时 M_0 在水平方向的分量不再为 0 ,净磁化矢量偏离 Z 方向,同时与 B_0 夹角小于 90° 的磁矩向夹角大的状态跃迁,这样总磁矩 Z 方向的分量会越来越小,而水平方向的分量越来越大,净磁化矢量偏离 B_0 的角度也越大。净磁化矢量偏离 B_0 的角度与辐射脉冲的强度、持续时间有关,使净磁化矢量偏离 Z 轴 90° 的脉冲称 90° 脉冲,偏离 180° 的称 180° 脉冲。磁矩的水平分量在磁场中旋转时会感应产生电磁信号,在接受线圈中感应出随时间变化的电压信号,对这个信号进行傅立叶变换可知频谱宽度与 T_2 近似反比关系,频谱越宽, T_2 越长。射频场消失后,原子核的磁矩在 B_0 的作用下开始重新排列,质子的相干性逐渐消失,横向分量逐渐减小,导致辐射信号振幅下降,这个衰减的正弦信号称为自由感应信号, M_{xy} 呈指数规律很快衰减到 0 (式①),时间常数为 T_2 , M_z 缓慢地增长到初值 (式②),时间常数为 T_1 ,这个过程称为核磁弛豫。

$$M_{xy} = M_{xy\max} e^{-t/T_2} \quad ①$$

$$M_z = M_0 (1 - e^{-t/T_1}) \quad ②$$

T_2 的弛豫机制是能量可逆性地转移到其他正在共振的质子上,磁场的非均匀性会加速分相,把在实验中测到的有效值偏离 T_2 记为 T_2^* ,如果磁场的非均匀性引起的横向磁化强度衰减的时间常数为 T_2' ,则:

$$1/T_2^* = 1/T_2 + 1/T_2' \quad ③$$

由这个式子可以看出 T_2' 对测量值的影响很大; T_1 的弛豫机制是能量不可逆行地散在周围组织“晶格”中, 化为热量或诱发分子运动。

2. 核磁共振成像技术

核磁共振成像是利用原子核在磁场内共振产生信号、重建像面的一种技术。不同的物质其化学环境不同, 将造成两个时间常数的差异, 人体各组织都有其特有的 T_1 和 T_2 , 这种组织间弛豫时间的差异是核磁共振成像的基础, 利用人体某一点信号的 T_1 或 T_2 来确定该点为何组织, 从而区别各种组织成像; 通过测量 T_1 成的像作为 T_1 加权图像, 通过测量 T_2' 成的像作为 T_2' 加权图像。

为了产生一幅核磁共振图像, 不仅要获得被成像层面每个体素的信号, 而且要获得这些信号的位置信息。使产生的图像的每个像素与这个解剖层面的每个体素正确无误地一一对应, 赋予空间位置信息的方法称为空间编码。在核磁共振成像中, 所获取的信号是“空间频率”的函数, 磁共振成像的空间编码技术建立在拉莫方程 ($\omega = \gamma B$) 的基础上, 由拉莫方程我们知道如果空间各体素的磁场强度不同, 不同体素中的质子就有不同的共振频率, 这样就可以区分开空间不同位置的信息。

二、生理学基础

血红蛋白的两种不同形式——氧合血红蛋白、脱氧血红蛋白的磁性不同, 前者是抗磁性的, 后者是顺磁性的。因为脱氧血红蛋白中原血红素的铁是高自旋的二价铁状态 (Fe^{2+}), 它的外层有 6 个电子, 其中 4 个不成对的电子有非常大的磁矩, 因此脱氧血红蛋白显示顺磁特性, 其磁化率是 10^{-1} 的数量级; 氧合血红蛋白被氧化, 每个铁原子与氧分子有一个化合键, 不成对电子部分地到达氧分子, 原血红素的铁呈低自旋状态, 氧合血红蛋白没有磁矩, 是抗磁性的, 其磁化率的数量级是 -10^{-6} 。

因为顺磁性物质磁化率大, 所以血液中的顺磁性的物质浓度的变化能影响核磁共振信号。1991 年, 毕利维奥 (Belliveau) 等就曾用向人体内注射顺磁性物质的方法产生第一幅 T_1 加权的核磁共振脑图像。在 1990 年, 奥格瓦 (Ogawa) 观察到大脑中的血管随着血氧浓度的降低而核磁共振图像变化的现象, 他意识到这是由于氧合血红蛋白与脱氧血红蛋白在磁场中的行为不同造成的; 然后特纳 (Turner) 用回波平面成像观察到动物呼吸氮气时脱氧血红蛋白

的时间过程; 克昂 (Kwong) 等人也观察到在人屏气 (保持吸气或呼气) 时人脑内相似的变化过程。1992 年, 克昂让参观他的实验室的特纳作为被试者, 当给予光刺激时克昂注意到当闪光出现时核磁共振信号增强, 而停止时信号强度恢复正常。通过深入的研究克昂把这些信号变化与实时的血红蛋白的脱氧和氧化联系起来, 克昂、特纳、他们的合作者和哈佛医科学校, 就用这个发现产生了第一个不用对比剂和注射同位素的大脑皮层活动的动力学图。特纳解释说脱氧血红蛋白是身体自身存在的对比剂, 原因是当大脑受到视觉刺激, 运动感知或认知活动时, 神经兴奋水平增强, 局部脑血流量、血流容积、和血氧消耗均增加, 但增加比例不同。特纳的这种观点可由 1986 年, 弗克斯 (Fox) 和他的同事们用正电子断层成像做视觉和感觉皮层的实验来证实, 刺激导致局部脑血流量的大量增加, 但氧耗量只有很少的增加, 葡萄糖使用的增加与局部脑血流量持平。这表明因神经原的激活的额外的代谢主要需要由糖原酵解作用来提供, 氧供应大于氧耗, 这样导致激活功能区的静脉血氧浓度升高, 血红蛋白在氧浓度高的地方容易与氧结合, 这样脱氧血红蛋白的浓度就会降低, 氧合血红蛋白的浓度升高, 而血液的磁特性强烈地依靠血红蛋白是否与氧结合, 所以脱氧血红蛋白的浓度变化形成一个微观磁场梯度, 这个微观磁场梯度降低了组织—血液磁化率的差异, 或者降低了包含血红蛋白的红细胞与周围血浆的磁化率的差别, 从而降低了磁场的均匀性, 由式③可知这样就降低相干损失, 使 T_2 变长, 所以使 T_2' 加权像信号增强。1990 年, 奥格瓦首先报道了这种 T_2' 更长的效应, 称之为血氧水平依赖。这样当大脑进行某种思维活动时, 相应的区域就会被激活, 用核磁共振成像得到激活状态图像, 用激活状态图像减去静息状态图像得到激活区域, 然后把得到的激活区域叠加到结构图上就可以确定激活的区域。这就是核磁共振脑成像。

脑功能成像技术出现后, 为脑的研究提供了更先进、更精确的技术手段, 从而成为脑科学研究的前沿。一、二十年的时间里在脑研究许多领域里都取得了丰富的研究成果, 我国近几年也开始进行相关的研究, 如在脑科学、心理学、针灸方面的研究中, 开始应用脑成像手段。我们相信核磁共振脑成像将在脑功能的研究中发挥更大的作用。