

# 关于发展磁共振成像技术的几个问题

## SOME PROBLEMS ON THE DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC RESONANCE IMAGING TECHNOLOGY

蒋 明

磁共振成像 (MRI) 又称核磁共振 (NMR) 成像。这项技术的发展起步于 70 年代初, 医用磁共振成像仪于 1981 年开始进入市场。由于它在检测早期肿瘤和心血管疾病的预兆方面显示出了极大的优越性, 因而一开始就受到医疗卫生部门和社会的关注。

这种设备已由美、英、联邦德国和日本等国的数家公司生产多年, 基本设计已经稳定, 产量逐年上升。1986 和 1987 年每年投放市场均超过 300 台, 年收入在 22 亿元\* 以上。预计 1990 年这项产品的年收入将达 52 亿元。

目前, 用于磁共振成像仪的超导磁体已经成为超导技术的主要商业产品, 年收入已达 5.6 亿元, 约为现阶段整个超导工业年收入的 50%。

我国医疗卫生部门对开发磁共振成像技术应用的呼声很高。据悉, 有关方面正着手组织力量在我国发展这项高技术。为此, 本文拟就与之有关的几个问题进行讨论。

### 基本原理和临床应用

质子数或中子数为奇数, 或两者均为奇数的原子核 (例如:  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$ , 以及  $^{31}\text{P}$  等) 具有内在的角动量, 即自旋。由于原子核带有电荷, 其自旋运动将产生一个小的磁矩。在通常情况下, 磁矩的方向是杂乱无章的, 因此整块物质显示不出磁性。但是, 当存在足够强的外磁场时, 核磁矩的方向会发生重排。相对于外磁场, 核磁矩有两种取

向。这两种状态的原子核在能量上是不同的, 其中一种能量略低 ( $E_1$ ), 另一种能量略高 ( $E_2$ ), 两者之间的能量差为  $\Delta E = E_2 - E_1$ 。当能量为  $\Delta E$  的射频波投射到原子核上时, 则能量状态为  $E_1$  的原子核可以激发至能量较高的  $E_2$  状态。当射频能源断开后, 则激发至  $E_2$  状态的原子核会自发地跃迁到能量较低的  $E_1$  状态, 并将原来吸收的能量 ( $\Delta E$ ) 释放出来。这个过程称为弛豫过程。如果重复施加射频能量, 则原子核就会发生共振, 即原子核通过吸收和发射能量  $\Delta E$  在  $E_1$  和  $E_2$  两个能量状态上交替变化。因此, 可以根据核磁矩共振密度的分布和弛豫时间来了解物质的组织结构。

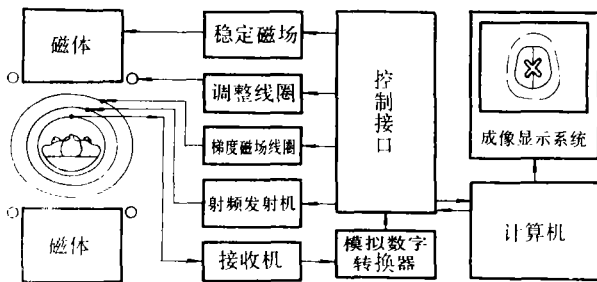
1973 年, 美国纽约州立大学石溪分校波尔·劳特伯 (Pawl Lauterbur) 发表了世界上第一幅磁共振成像图 (两试管水的成像), 并曾预言, 这项技术可用于人体组织的结构和恶性肿瘤的成像。磁共振成像是根据人体内各种组织的  $^1\text{H}$  原子核的共振密度分布及弛豫时间, 获得含  $^1\text{H}$  物质的断层图象。如果在静态磁场上加上一个三维梯度磁场进行扫描, 则磁共振讯号将是三维空间的解析讯号, 经计算机分析处理后即得立体的断层图像。可见, MRI 是一种与 X 射线 CT 扫描根本不同的成像技术。后者是依靠 X 射线在物质中的线性减弱而产生成像, 它反映的是相邻组织的电子密度及比重的差别。而 MRI 所反映的则是相邻组织之间的物理化学差别。

\* 本文全部采用人民币单位, 有关数据按国家现行汇率计算得到。

磁共振成像仪由六个基本单元组成。

(1) 大孔径超导磁体，其孔内可容纳整个人体，并环绕其周围形成高度均匀的磁场；(2) 能提供三维梯度磁场的线圈；(3) 射频发射机，发射具有一定能量的无线电波以激发成像原子核；(4) 射频接收机，接收受激原子核在弛豫过程中发射的电磁波；(5) 计算机系统，控制仪器运行、储存和处理由探测到的共振射频信号产生的成像；(6) 显示系统。

MRI 的最先进的临床应用在于早期诊断和监视中枢神经系统的疾病。与 X 射线 CT 扫描相比，这项技术在估价小脑和脑干的损伤及探测髓鞘脱失方面显示出极大的优越性。同时，它在展示梗塞和局部贫血的心肌组织，测定新陈代谢（例如血色沉着）和发炎性的（例如慢性活动性肝炎）肝病，估价孕妇和儿童的骨盆疾病，研究、了解肌肉和肌腱以及韧带损伤，跟踪在辐射治疗和化疗之中和以后的恶性疾病过程，探测早期癌症，以及估价动脉硬化化的血管疾病的范围等方面也都是很有效的。此外，作为一种研究工具，MRI 具有振奋人心的应用。



磁共振成像仪结构示意图

磁共振成像是一种崭新的优秀成像手段，由于一系列原因而引起了医疗卫生部门的广泛兴趣。第一，它使用的是无线电波和磁场，而不是致电离辐射，因而没有伴随 X 射线 CT 扫描产生的那种 X 射线辐照危险；第二，具有极高的空间分辨能力（在垂直深度 25 厘米处，其分辨元仍可达  $2 \times 2.5$  毫米），并能从几个面获得信息。这项技术利用不同物质在密度和分子环境上的差别提供良好的组织对比，因而不需要使用任何对人体有害的对比剂；第三，由于骨骼不干扰 MRI 讯号，医生借助它可以观察到癫痫病灶、脑干和脊髓，这些是利用其他非侵入成像手段很难看到的；最后，由于 MRI 对细胞的基本物理和化学特性的变化很灵敏，它为早期诊断疾病提供了可能。

这项技术的不足之处有两点：一是诊断时间较长，一般需要 15 分钟左右才能完成对一个患者的检查；二是售价、安装和运行费用太高。

## MRI 工业的发展和现状

MRI 工业的发展从一开始竞争就比较剧烈，并具有国际性质。自 1976 年起，就有分别属于美、英、日、法、联邦德国和荷兰等国的至少 23 家公司先后参加了这场角逐。它们投入了相当数额的资金，或由公司本身自行研究、开发这项技术，或利用高等学校的研究成果，或直接从其他公司引进全套技术，都力求在较短时间里将产品推向市场，以在竞争中取得有利地位。

各公司发展 MRI 技术大致有以下四个基本步骤：1. 制定计划，安排资金、技术力量、设备和材料，研制实验样机；2. 在实验室内进行无生命物体、动物和人体的成像研究，完善硬件和成像技术；3. 与医疗单位合作，进行临床应用研究；4. 设计和制造商业样机，将产品正式投放市场。

表 1 1984 年 8 月前 MRI 扫描仪销售情况

| 公 司 名 称                       | 累计出售台数 |      |
|-------------------------------|--------|------|
|                               | 世界市场   | 美国市场 |
| 坦克尼卡 (Technicare Corp)        | 44     | 36   |
| 匹克 (Piker Internatinal)       | 28     | 12   |
| 戴索尼克斯 (Diasonics Inc)         | 23     | 19   |
| 西门子 (Siemens Medical Systems) | 19     | 10   |
| 福纳 (Fonar Corp.)              | 9      | 6    |
| 飞利浦 (Philips Medical Systems) | 5      | 1    |
| 白克 (Bruker Instruments)       | 4      | 2    |
| 依尔新特 (Elscent Ltd.)           | 4      | 2    |
| 通用电器 (General Electric Co.)   | 4      | 3    |
| M & D (M & D Technology Ltd.) | 2      | 0    |
| 雷诺奈克 (Nalorac Cryogenics)     | 2      | 2    |
| 东芝 (Toshiba Corp)             | 1      | 0    |
| 合 计                           | 145    | 93   |

经过几年的角逐之后，参与竞争的 20 多家公司在技术水平上出现了明显差别。1983 年 10 月的统计表明，处于领先地位的公司有 8 家，它们完成了实验样机，进行了大量的临床应用试验，并生产出了性能良好的商业样机，产品正式投放市场；处于中等发展水平的有 3 家，它们完成了实验样机的研制及少数临床应用试验，但商业样机的制造仍不是

很有效；其余的 10 多家公司则仍处在研制实验样机的初级发展阶段。

1978~1980 年的三年间，平均每年有 1 台商业样机投入试用。从 1981 年开始，产品正式批量进入市场。至 1984 年 8 月，全世界累计销售 MRI 整机 145 台，其中美国市场为 93 台，约占总数的 64% (表 1)。表中前面 8 家公司均在技术上处于领先地位，它们共出售整机 136 台，占总数的 94%。处于中级发展阶段的 3 家公司也都在市场上出售了产品。但处于初级发展阶段的 10 余家公司中只有雷诺奈克 (Nalorac) 公司一家在市场上投放了正式产品。

1984 年底，流动 MRI 系统投入实用，其全部设备安装在一个大型拖车内，可用汽车牵引移动，具有安装简便的优点。

随着 MRI 工业的发展，公司之间出现了纵向联系和专业分工。Oxford、Intermagnets General、GA Technologies 3 家公司承担超导磁体的生产，其中 Oxford 公司每年提供的磁共振成像仪用的超导磁体为需求总量的一半以上。戴索尼克斯、坦克尼卡、通用电气等公司承担 MRI 整机的生产，其中戴索尼克斯公司现在每年在市场上出售的整机在 100 台以上，而该公司在 1984 年 8 月前累计出售的整机仅 23 台。

虽然 MRI 成像仪临床应用效果比 X 射线 CT 扫描仪优越得多，但它的市场发展速度远不如 X 射线 CT 扫描仪快。以美国为例，X 射线 CT 扫描仪从 1973 年开始进入市场至 1977 年的五年间，发展到了 921 台。而磁共振成像仪从 1981~1985 年的五年间仅发展到 225 台，约为 X 射线 CT 扫描仪的 25%。即使 MRI 整机进入市场之后，美国的 X 射线 CT 扫描仪的数量仍在增加，1985 年已达 2 000 余台，凡 300 张病床以上的医院均拥有这种设备。

根据 1981~1984 年的增长速率，美国的一份国会报告曾经预测，1986 和 1987 年磁共振成像仪在国际市场的销售量分别可达 400 和 650 台。然而，实际上这两年中每一年的销售量仅 300 余台，比人们预料的少得多。

磁共振成像仪的市场发展速率比较慢，其原因是多方面的，但其中重要原因之一是这种设备的售价、安装和运行费用太高。用户主要集中在一些发达国家。据不完全统计，目前世界上大约有 1 000 台左右的 MRI 整机，其中约有一半是分布在美国的医院和研究机构内。

MRI 技术在国际上已经发展了 10 多年，无论

是整机还是超导磁体，其技术均已经很成熟。许多公司的生产潜力很大，但是市场的实际需求有限，因而竞争相当激烈。美国瓦里安 (Varian) 公司具有多年生产核磁共振谱仪历史，在对市场、技术难度和经济效益等作了全面分析后，迄今一直放弃发展 MRI 技术。在目前这种情况下，我国着手发展这项技术，即使与外国公司合作，要想在三五年内将产品打入国际市场，是需要经过相当的努力才能实现的。

## 磁共振成像仪的费用问题

超导磁共振成像仪的售价、安装和运行管理费用见表 2 和表 3。表 2 中运行费用项目包括电、制冷、工资、维修保养以及管理等方面的费用。其中工资部分已按我国的标准作了调整，但液氮的费用仍按美国市场的价格计算 (我国的液氮价格要比美国的高许多倍)。现在市场上出售的磁共振成像仪，其液氮的消耗量一般为 0.3 升 / 小时。如果每台仪器每天工作 10 小时，全年运行 250 天，那么液氮的年消耗量为 750 升。安装费用是取的平均值。

表 2 超导磁共振成像仪的费用估计

| 超导磁体的磁场强度(特斯拉) | 0.5 | 1.5 |
|----------------|-----|-----|
| 平均售价(万元 / 台)   | 592 | 740 |
| 安装费用(万元 / 台)   | 240 | 240 |
| 年运行费用(万元 / 台)  | 115 | 123 |

数据表明，如果我国每年添置 20 台磁共振成像仪，则意味着医疗卫生部门每年需要拿出 2 亿元作为购买和安装费用。当发展到 100 台时，仅运行和管理费用每年就得 12 000 万元以上，而液氮的年用量则达 75 吨。当满负荷工作时，这 100 台设备每年能做 50 万人次成像检查，仅为我国总人口的万分之五。根据财政预算，国家在最近几年用于科技教育文化卫生的费用约为每年 450~500 亿元。显然，每年能否从中拿出 1~2 亿元用于 MRI 技术的开发应用，必须深入研究。

表 3 中年度总投资包括设备购置和安装费用两项。其数据是按设备的有效使用期为五年，利息 10% 推算的。诊断费用是用年度总费用除以全年诊断人次数 (假定仪器每年完成 5 000 人次的检查) 得出的。

数据表明，患者进行一次 MRI 检查，至少应

交付 589~742 元的诊断费, 约为现在我国城市的中等收入家庭人均年生活费用。上述数据还是偏低的, 目前美国许多医院 MRI 的收费标准是每次 600~800 美元。按我国人民的现在收入水平, MRI 的诊断费用实在太高, 对于多数患者来说, 是难以自理的。

表 3 MRI 的诊断费用

| 超导磁体的磁场强度(特斯拉) | 0.5   | 1.5   |
|----------------|-------|-------|
| 年度总投资(万元/台)    | 179.5 | 229.4 |
| 运用管理(万元/台)     | 115.0 | 123.4 |
| 年度总费用(万元/台)    | 294.5 | 352.8 |
| 诊断费用(元/人次)     | 589   | 742   |

MRI 在检测早期肿瘤和心血管疾病的预兆方面有很大的优越性。从维护我国人民的健康来说需要发展这项技术。但实际上产品销售量能以多快的速度发展, 关键取决于国家的财力和人民收入水平的提高程度。

### 发展 MRI 技术的几个关键因素

根据国际上数家公司多年来发展 MRI 技术的经验, 专家们认为, 一个较小的或原来不具备核磁共振光谱技术的公司, 要想迅速发展这项技术, 并将产品打入国际市场, 关键取决于它的投资数额、科研和技术水平、销售产品和与高等学校或医学研究中心进行科研协作的能力。

发展 MRI 技术, 首先得有充足的资金。12 家公司的统计表明, MRI 技术的研究和产品开发费用(不包括扩大生产和超导磁体的研制以及基建等费用)至少需要 2 200~3 700 万元。至 1983 年 10 月, 投资总额在 1 850 万元以下的 4 家公司均仍处在研制实验样机的初级发展阶段。相反, 投资总额在 3 700 万元以上的 6 家公司, 除两家处于中等发展水平外, 其余 4 家当时均处于领先地位。另外 2 家投资总额为 2 200~3 700 万元的公司也都完成了商业样机的制造, 步入了 MRI 技术的先进行列。

MRI 是一项综合性强的高技术。它的发展需要一支由在物理、化学、工程和计算机科学等方面具有丰富创造力的专家组成的研究和产品开发队伍。原来从事过核磁共振光谱技术开发的专家尤为重要。福纳和 M & D 公司就曾经是环绕一批具有革

新精神的科学家和他们的技术而建立的。坦克尼卡等好几家公司, 为了提高研究和产品开发能力, 曾经吸收了一批早年在英格兰从事过核磁共振光谱技术的专家。

对于持续发展 MRI 技术, 另一个重要的因素是必须拥有世界第一流的市场和销售实力。具有销售网的较大的公司常常保持着市场竞争的极大优势, 而那些缺少销售组织系统和专门技能的小厂商往往处于不利地位。市场和销售的敏锐性可能是厂商在日益发展的市场竞争中取得胜利的決定因素。

与高等学校和医学研究单位的科研协作是发展 MRI 工业的基础。据 1983 年的统计, 凡当时处于领先地位或中等发展水平的公司均与数个高等学校或(和)医学中心建立了密切的协作关系。例如, 西门子公司曾与 6 所大学和科研单位协作; 而与坦克尼卡公司有协作关系的大学和研究所则有 17 所之多。这种协作关系不仅在产品开发过程中需要, 而且在产品投放市场后也仍然需要。因为只有质量不断提高的产品才能在市场上赢得胜利。然而, 这就需要不断地发展有关产品的基础和应用研究。即使全套技术由其他公司引进, 这种协作关系也是不可缺少的。匹克和戴索尼克斯两家公司均于 1981 年买入了有关 MRI 的全套技术, 但仍然分别与 10 所和 3 所大学或(和)研究单位紧密协作。它们两年之后都生产出了商业样机, 1984 年 8 月以前在市场上出售的整机分别达 28 台和 23 台, 成为当时 MRI 市场竞争中仅次于坦克尼卡公司的主要对手。

在国际上 MRI 技术已经很成熟, 生产厂家很多, 但市场对产品的需求发展不快, 因而竞争十分激烈。在国内则由于国家在近期内用于医疗卫生事业的费用不可能增加很多, 因而, 对 MRI 产品的购买能力有限。同时, MRI 技术有一定难度, 需要投资几千万元。在这种情况下, 我国着手发展这项技术, 其困难程度是不能低估的。

### 致 谢

本文的探讨由纽约州立大学石溪分校 CEEC 基金会支持, 提供方树泉奖金, 在聂华桐和王福炎两位教授的帮助下写成, 谨此向杨振宁教授、方树泉先生、聂华桐教授和王福炎教授致以谢意。

本文作者蒋明(Jiang Ming)系北京大学赴美国纽约州立大学石溪分校访问学者。