

TOMOGRAPHIC FUNDAMENTALS WITH APPLICATIONS TO CROSSWELL SEISMICS

层析基础及其 在井间地震中的应用

吴律 著

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

(京)

0.8

TOMOGRAPHIC FUNDAMENTALS WITH APPLICATIONS TO CROSSWELL SEISMICS

层析基础及其在井间 地震中的应用

吴 律 著

SY17/19

石 油 工 业 出 版 社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书系统地介绍层析成像理论、方法和技术。重点介绍层析成像在井间地震中的应用。全书共分十章,第一章至第三章介绍了层析的物理原理、数学理论基础和基本算法,第四章至第六章详细讨论地震波射线理论与波动理论层析以及实验室模拟井间数据层析成像。第七章至第九章为井间层析应用和井间反射波成像以及井间波场分离。最后,第十章介绍井间地震波场数值模拟。

本书可供从事应用地球物理的工程技术人员、地球物理工作者和从事医学层析与工业层析的人员以及高等学校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

层析基础及其在井间地震中的应用/吴律著.
北京:石油工业出版社,1997.8
ISBN 7-5021-1937-X
I. 层…
II. 吴…
III. 油气勘探:地震勘探-地震数据-分析,层析法
IV. F618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 01630 号

*

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开 20 $\frac{1}{4}$ 印张 506 千字 印 1-1200
1997 年 8 月北京第 1 版 1997 年 8 月北京第 1 次印刷
ISBN7-5021-1937-X/TE·1628
定价:30.00 元

前 言

70 年代, 层析成象 (CT) 在诊断医学中获得辉煌成就, 建立了严密的理论和成熟的反投影成象算法, 研制了实用、高效的 CT 仪。这一重大科学技术成果迅速推广到许多领域, 上至射电天文学下至地球物理勘探。

80 年代初, G.McMachen 提出井间地震波层析, 将层析成象用于开发地震。利用井间地震为精细油藏描述提供基础资料; 利用井间地震研究岩石物性参数, 如孔隙度、渗透率和饱和度; 利用井间地震监测稠油热采, 提高采收率; 利用井间地震与井间电磁波研究剩余油分布。

近几年, 层析方法在地面地震三维叠前深度偏移和静校正中又得到应用。

就地震资料数字处理方法而言, 层析成象是 70 年代偏移成象之后最重要的成象方法。地震层析有极大的潜在能力, 但在实用中有些问题尚需研究。

我们将 X 射线层析与地震层析做粗略对比, 问题是明显的。

(1) 诊断医学中 X 射线层析, 有专门的 CT 仪, 射线管和探测器安装在一个环形装置中, 可以从 0° 旋转到 180° , 能够得到完全投影角的数据。在计算机上用反投影重建算法得到人体内部清晰的、精细的图象。地震层析是在一口井中激发地震波, 在另一口井中接收, 投影角是有限的。理论证明, 用有限投影角 (或称有限观测角) 数据重建图象, 不仅图象模糊, 甚至有可能得不到可供分析解释的图象。

(2) CT 装置的 X 射线管和检测器的空间位置是非常精确的, 井间地震在井中激发、井中接收, 不可避免地存在空间位置的误差。

(3) X 射线层析是用 X 射线成象, 可以忽略散射现象。而井间地震得到的记录, 波型多、波场比较复杂, 有纵波、横波以及它们的转换波。同一类地震波又有多种波, 如纵波有直达波、透射波和反射波等。管波的干扰也很严重, 各种波有时交错出现, 难以分辨。所以波场分离与识别是一个极其重要的问题。

(4) 在 X 射线层析中, 可以精确地测定 X 射线的衰减量, 井间地震用旅行时重建图象。如何精确地提取初至波和续至波是一个研究课题。此外, 还有其它问题, 不一一列举。在所有的中, 有限投影角成象和波场分离与识别是最突出的, 也是最关键的问题。

经过十余年的研究, 井间地震取得了重大进展。本书前三章是关于层析的物理原理、数学理论基础和层析成象的基本算法。这些内容是各种层析成象的共同基础。第四章、第六章和第七章研究井间层析数值模拟、物理模拟和在实际中的应用。重点讨论了有限观测角数据的成象问题。其中井间曲线反射波与透射波同时成象是用多个参数同时层析成象。迄今为止, 无论是医学层析还是工业层析, 都是用一个发射源, 测定一种信息, 用它反投影重建图象。最典型的是超声波层析, 一个探头发射超声波, 一个探头接收透射波信息。利用透射波来重建图象; 或者一个探头发射超声波, 用同一个探头 (或另用探头) 接收反射波信息, 利用反射波来重建图象。两者均存在“盲区”, 即所谓“有限观测角”, 使得重建图象质量下降。本书研究了一个发射源在接收多种类型信息的情况下, 用多种地震波信息同时重建图象。

书中反映我们研究的另一个重点是波场分离与识别。第八章、第九章和第十章都涉及了这个问题。如果波型识别错了，一切宣告失败。在波场分离与识别的基础上，如何拾取足够精度的初至波和续至波的旅行时，这是我们多年来不间断研究的问题。

关于波动理论层析，用了第五章一章的篇幅。这是考虑到反传播理论在井间地震和地面地震资料数字处理方面都有应用的现实性。

在撰写这本书的过程中，得到了 CT 理论与应用研究会理事长邱佩璋教授、副理事长罗承忠教授的支持与帮助，还得到了张兆田、宋炜、陈铿、张瑞斌、蒋振武、蔡志光、王守东、李远钦、魏修成、王润秋、张采令和穆惠琴等同志的帮助。在此一并表示谢意。

由于作者水平有限，书中有错误和不妥之处，敬请指正。

作 者

1996 年 10 月

目 录

绪论	(1)
第一章 层析的物理原理	(5)
第一节 X 射线层析	(5)
第二节 核磁共振 (NMR) 成象	(7)
第三节 超声波层析	(13)
第二章 层析的数学理论基础	(15)
第一节 二维 Radon 变换	(15)
第二节 R^n 空间上的 Radon 变换	(17)
第三节 Radon 变换与 Fourier 变换的关系	(19)
第四节 二维 Radon 反变换	(23)
第五节 R^n 空间 Radon 逆变换	(27)
第三章 层析成象的基本算法	(32)
第一节 滤波反投影重建方法	(32)
第二节 Fourier 重建方法	(40)
第三节 代数重建方法	(44)
第四节 共轭梯度方法	(54)
第五节 投影方法	(58)
第六节 SVD 方法	(61)
第七节 级数展开方法	(63)
第四章 地震层析方法的数字模拟	(66)
第一节 射线追踪	(66)
第二节 有限观测角	(82)
第三节 直射射线层析	(95)
第四节 曲射线层析	(104)
第五节 地震井间曲射线反射 + 透射层析方法 (CCRTT)	(111)
第六节 Π 方法	(117)
第七节 井间折射波层析	(121)
第五章 衍射层析及数字模拟研究	(132)
第一节 衍射投影定理与滤波反传播方法	(132)
第二节 关于 Born 近似和 Rytov 近似的讨论	(139)
第三节 Born 近似与 Rytov 近似数值试验	(150)
第四节 井间波动方程反演成象方法	(161)
第六章 实验室模拟井间数据层析成象	(168)
第一节 引言	(168)
第二节 固体物理模型层析成象	(169)

第三节	水槽中观测的模拟井间数据层析成像·····	(175)
第七章	井间层析野外试验及应用·····	(184)
第一节	地震用于油藏监测的岩石物理基础·····	(184)
第二节	井间地震资料采集·····	(187)
第三节	油田井间地震试验·····	(189)
第四节	井间地震在 EOR 中的试验 ·····	(196)
第八章	井间反射波成象与井间偏移·····	(199)
第一节	引言·····	(199)
第二节	井间反射波叠加成象·····	(203)
第三节	井间 DLCDP 方法 ·····	(207)
第四节	井间偏移·····	(214)
第九章	波场分离与波至拾取·····	(237)
第一节	引言·····	(237)
第二节	变速波场分离方法·····	(238)
第三节	变速与常速在不同空间波场分离的分析对比·····	(243)
第四节	地震波旅行时拾取·····	(259)
第十章	井间地震波场数值模拟·····	(269)
第一节	井间地震声波方程数值模拟·····	(269)
第二节	井间弹性波波场数值模拟·····	(286)
参考文献	·····	(313)

绪 论

层析成象是在物体外部发射物理信号，接收穿过物体且携带物体内部信息，利用计算机图象重建方法，重现物体内部二维或三维清晰图象。该技术最大的特点是在不损坏物体的条件下，探知物体内部结构的几何形态与物理参数（如密度等）的分布。层析成象与空间技术、遗传工程、新粒子发现等列为 70 年代国际上重大科技进展。

目前，层析成象有 X 射线层析、核磁共振（NMR）层析、正电子发射断层成象、微波层析、超声波层析、地震层析等等，而且还在继续发展中。

层析成象首先在诊断医学中得到应用，然后逐步推广到非医学领域，诸如石油地震勘探、油气开发、地球物理学、射电天文学、超声学、微波、雷达、结晶学、电子显微技术等。

一、层析成象经过了漫长的研究过程

1885 年，W. Rontgen 发现 X 射线，不久建立诊断医学中的 X 射线摄影术，开创了技术与医学相结合的新纪元，为人类健康做出了巨大的贡献。但是 X 射线摄影术有一些缺点：

(1) 影象重叠。X 射线装置是把三维物体显示在二维的胶片或荧光屏上，使得深度方向的信息重叠。

(2) 分辨率低，图象模糊等等。

在 20 世纪之初，许多放射学家和医生开始了传统的层析技术研究，包括：

(1) 线性层析技术（或称线性断层扫描）。X 射线管和摄影胶片在病人两侧反向同步运动。

(2) 多向层析技术。X 射线管和摄影胶片围绕要成象的部位按椭圆、正弦曲线等作相对运动。

(3) 轴向断层扫描。病人坐在一把特殊的转椅上，胶片平放在病人旁边的一张转动的水平桌上。这张桌子被安置在比所希望的焦点平面略微低一点的地方。X 射线束倾斜地穿过病人并射到胶片上，X 射线管的位置在透视过程中保持不动。病人与胶片都以相同的方向、相同的速度旋转。G. T. Herman 指出，轴向断层扫描与现代的层析成象是很密切的。

现代层析与传统层析的不同点，在于使用了 Oldendorf 实验装置和电子计算机以及图象重建算法。层析理论、方法和技术的建立是放射学家、医生、数学家、物理学家以及其他许多领域的专家学者长期努力做出的贡献。

数学家 N. H. Able 在上世纪末就解决了对称图象的重建问题。J. Radon 的研究表明：平面上点函数满足适当的正则条件，沿任意直线积分，由这些积分值可以确定线函数。学术界公认 Radon 1917 年发表的“论如何根据某些流形上的积分来确定函数”是层析理论的数学基础。

直到 1956 年 R. N. Bracewell 才应用了图象重建理论：他用条状金属构成特殊辐射源，得到了射电天文日冕图象。在他的论文“无线电天文学中的带积分法”一文中研究了二维 Fourier 变换图象重建问题。

1961 年，W. H. Oldendorf 完成了“旋转—平移”图象重建的试验，被称为 CT 扫描仪

的先驱性实验。

物理学家 A. M. Cormack 研究了根据物体外的测量数据确定 γ 射线吸收系数和正电子散射物质在传播介质中的分布问题以及由已知平面区域上的函数沿所有与该区相交直线上的积分确定此函数。1963 年和 1964 年他发表了“用线性积分表示函数及其在放射学中的一些应用 (I、II)”，奠定了诊断医学图象重建的理论基础。

1968 年, D. J. Derositer 等人讨论了电子显微照相三维构造的图象重建方法。

英国 EMI (电器乐器) 公司中心研究实验室的 G. Hounsfield 自 1967 年起进行了 X 射线断层图象重建过程中的一系列实验, 1970 年研制出世界上第一台 X 射线颅脑 CT 扫描仪, 其中图象重建是用的代数迭代方法, 1972 年申请到专利。J. Ambrose 医生对病态颅脑标本做了研究, 得到结论: CT 技术可以将脑组织中的灰色物质从白色物质中区分出来, 从而确诊脑肿瘤。1971 年, Atkison Morley 安装使用 X 射线头颅扫描仪。1974 年, Ledly 研制成功全身 CT 扫描仪安装在 Georgetown 大学医疗中心。

1979 年, G. N. Hounsfield 和 A. M. Cormack 共同获得 1979 年度生理、医学诺贝尔奖金。

X 射线 CT 在世界范围内得到普遍应用, 并且不断改进, 现在从第一代 CT 仪发展到第五代 CT 仪。

X 射线 CT 的应用促进了各种物理发射源 CT 装置的诞生, 如正电子 CT、超声 CT、核磁共振 CT 等。

二、医学层析

从 1921 年焦平面传统层析专利 (A—E—M Bocage) 到 1972 年 Hounsfield 的第一台 CT 机问世, 经过了半个世纪。而从第一代 CT 仪到第五代 CT 仪不到 20 年 (将在第一章中详细介绍)。

第二代与第三代 CT 仪已在我国县级以上医院安装使用, 能满足一般临床要求。第五代 CT 仪或称高速 CT 仪已从实验室走向临床使用阶段, 在心脏摄影、心血管、血流量测定、动态研究、心肌梗塞、心包疾病等方面得到应用。用于心脏成象时, 一次扫描仅需 50s, 同时可得两张相邻部位的图象。

核磁共振成象迅速崛起, 有学者认为它可以提供被测物体的信息最多。核磁共振成象技术不断发展, 磁场强度从 0.064T 到 0.5T, 磁场用永久磁体、电阻和超导磁体。核磁共振除了做解剖性检查之外, 还可对人体内氢、氟、钠、磷等元素的核磁共振信号进行检测, 揭示人体内新陈代谢生理、生化过程。正电子发射断层成象, 利用了正电子产生湮灭效应这一现象。通过对人体注射带有正电子同位素标记的化合物, 探测湮灭效应可产生的 γ 光子, 得到人体内同位素的分布信息, 然后由计算机按照成象算法, 得到人体内标记的化合物的三维图象。它不但可以诊断人体器质性病变, 还可以诊断功能性病变, 对精神病、痴呆诊断有突出的作用。利用正电子断层成象在肿瘤代谢、药物动力学、免疫调节等方面的研究都是 X 射线 CT 和核磁共振成象所不具备的功能。有学者指出, 正电子层析是研究人体内部相互作用动力学最有效的方法, 并可研究脑功能定位问题。

层析成象在医学中的应用发展日新月异, 方兴未艾, 这里就不详述了。

三、工业层析

(1) 层析成象从医学领域渗透到许多工业部门, 现在已有工业专用 CT 仪。在航空工业中, 以线形加速器作为线源的高能源 X 射线 CT 机对火箭、导弹的固体燃料内部作穴陷检

查,对喷嘴式引擎的涡轮叶片进行检查。

在原子能工业方面,用 X 射线 CT 仪对原子能发电的冷却系统管道作非破坏性检查,此外 CT 技术在冷却系统管道中双相流的分析也得到应用。

在材料工业中,CT 仪用于对扇形陶瓷材料作质量检查。

在军事工业中,层析成象用于对炮弹、火炮等做质量检查。中国科学院高能物理所研制成 ICT—BO1 型机,空间分辨率为 0.25mm,密度分辨率为 1%。该机用于钢铁、军工、汽车、航天、海关和考古等领域的质量检测、控制等方面。

(2) 超声层析,除了在医学中广泛应用之外,在工业无损探伤方面用途也很广。可用于钢铁、材料工业中,能测量材料弹性性质,并提供材料试样的生命力和可用期的数据。超声层析作无损探伤是成本最低的手段之一。

(3) 在石油开发中的应用。有作者认为最适合做岩心分析的是第二、第三和第四代 CT 扫描仪。第二代扫描仪效率比较低,切片厚度大(10mm 厚),探测器的孔径大,数据采集的速度低,分辨率不如第三、第四代扫描仪。但它的价格低廉,维修费用低,性能和分辨率还能改善。第三、第四代扫描仪质量好,计算能力强,但价格和维修费用比较高。最近国内生产出一种便携式工业 CT 扫描机,比较适合岩心测定,还可做油管损伤检测。

CT 扫描仪是用于岩心测定和油藏工程研究的新的精度工具。利用 CT 扫描仪在提高采收率(EOR)方面开展的研究,主要是岩石学和储层分析,有如下几方面:

①层析成象数据可以和密度测井或光电测井对比。因为层析测量精度高,可以促进密度测井质量的提高。

②计算体积压缩系数和泊松比。把岩心样品置于静水压力下,再加上单轴应力,直到使样品破碎。在加压过程中用 CT 扫描仪测量,绘制相应图件,计算出样品的体积系数和泊松比。

③研究致密含气砂岩在蒸汽驱期间的相对渗透率,可以与电阻率测井和声波测井资料一起综合应用。

④利用层析图象确定岩心矿物成分。

⑤确定岩心的裂缝、裂缝类型,观察开启裂缝、闭合裂缝和泥浆侵蚀程度。

⑥实验室驱替实验,模拟二次及三次采油期间动态。包括观测低速水驱和高速水驱的驱替过程;多孔介质中原油饱和度分布和水驱残余油饱和度;泡沫控制 CO₂ 流动过程;研究岩心残余油饱和状态下的蒸汽、水和聚合物驱的相对渗透率以及对含重油的岩心在驱替过程中用 CT 机测定粘性指数。

CT 扫描仪在实验室内研究的内容是多方面的,上面只列举了几个主要的项目。

核磁共振成象也被用于石油开发。中国石油天然气总公司渗流力学研究所安装一台 4.7T 的 47/40 型超导核磁共振成象系统,研究均匀地层与非均匀地层模型的油水渗透现象,研究在水驱替、聚合物驱替、复合化学剂驱替过程中油的动态变化。

四、地球物理层析

1. 井间地震

当今世界各国原油开采仅能从地下采出 20%~30%,大部分石油仍埋藏在地下。在稠油开发中,使用了注蒸汽、注热水和火烧油层的热采方法。如何确定油层中的高温区和它的前缘位置,这是一个非常重要的问题。斯坦福大学 Amos Nur 等人的室内试验表明,在常压下岩样温度升高 100℃,地震波纵波速度降低 20%左右。用现代地震数字化技术,测定地震

波速度的精度可以达到几个百分点，完全可以通过地震波速度的下降判断蒸汽驱的运移空间位置。1983年，G. McMachan 提出井间地震波层析，很快得到推广，井间层析逐渐成了热门研究课题。许多大学和石油公司纷纷进行井间层析研究，石油公司设立大宗预算。许多石油公司研究井中震源，出现井下空气枪、电弧放电、重锤、压电陶瓷弯曲棒式可控震源等几十种。在权威性的勘探地球物理学家大型国际会议上，井间地震层析论文占有相当的数量。许多学者研究出新的层析算法，包括射线理论层析和波动理论层析。其中有的算法为医学层析及其他领域中的层析方法所采用。

地震散射理论反传播算法，推动了地震波传播理论的研究。井间层析在研究过程中遇到了困难，射线理论的分辨率受到震源频率的限制，在勘探对象与波长相比拟时，应使用散射理论。然而，Born 近似和 Rytov 近似都是一阶近似。在目标体与围岩速度差比较大的复杂介质体中，这两种近似均归于失败。于是，人们探讨新的思路，企图找到一种方法既利用散射理论优点又能利用射线理论优点，改进的方法之一是在进行偏移之后用射线理论层析。但未能达到理想效果，迄今仍在探索过程中。

井间反射叠加成象是在井间层析方法进入生产实验之后才出现的，它把地面反射成象叠加技术引入到井间地震中来。它不要求完全观测角，可大大减少工作量，并且分辨率得到很大提高。井间超多道叠加剖面的分辨率可与声波测井资料相对比。

井间层析与井间反射叠加法的联合应用给石油天然气开发带来新的活力。根据层析理论，要求完全观测角，这个要求条件推动了井间层析技术的建立。在此基础上又发展了井间反射波叠加方法，这样井间地震发展成一种完全独立的方法，它与 VSP、地面地震并列。井间地震因为井间距离从几十米到几百米，地震波非常丰富，包括直达波、折射波、槽波、纵波及其转换波、横波及其转换波、管波、管波—横波、横波—管波。

井间地震实验与理论研究必然丰富地震波理论，同时也由于井中激发和井中接收，井间距离短给波型的识别带来新的问题。

充分利用井间地震波可以解决更多的问题，这是毫无疑问的。为了利用丰富的地震波信息，必须研究其机制及在井间记录上怎样识别与拾取它们。

井间电磁波层析早于地震层析。井间电磁波在金属矿和工程地质中有许多成功的例子。在油气勘探开发中，电磁波在碎屑岩中衰减很快，井间电磁波层析进展缓慢。

2. 在地震学中的应用

(1) 对地震台观测的纵波和横波数据利用层析方法可以得到全球地震波速结构图。

(2) 利用面波相速度或群速度作三维地震速度分布图。

(3) 利用面波资料，用频散反演方法求上地幔的各向异性，利用震级残差求地幔范围内的 Q 值三维分布，等等。

第一章 层析的物理原理

层析研究发展迅速，从长波长地震波到波长比较短的超声波、微波以至波长以埃为单位的 X 射线与 γ 射线，都有层析装置。根据成象的物理量分类有：X 射线透射层析、正电子发射层析、正电子透射层析、单光子发射层析、 π 子层析、 α 粒子层析、康普顿相互作用层析、核磁共振层析、微波层析、超声层析、声波层析、地震波层析、电磁波层析、电阻率层析等，其中 X 射线层析、核磁共振层析和超声层析发展快、用途广。现比较详细地介绍它们的物理原理。

第一节 X 射线层析

X 射线是一种波长很短的电磁波，波长在 0.005 到 1.4Å（埃）之间。X 射线也能发生反射、衍射、折射、干涉、偏振等现象。

虽然 X 射线波长很短，但穿透能力很强。它能透过一般光线不能透过的物体，使胶片感光，气体电离。

波长不同的 X 射线，衰减程度也不一样。实验表明，物质的衰减系数与 X 射线波长的三次方成正比。软 X 射线比硬 X 射线衰减得快。

当 X 射线的波长一定时，它穿过每种元素所遇到的原子数相同，则这种元素的衰减系数大约与它的原子序数的四次方成正比且分子的衰减系数等于各原子衰减系数之和。

X 射线穿过物体后，它的强度减弱，这是由两种过程产生的，一种是射线被物体吸收，另一种是被散射，散射改变 X 射线的方向，于是原方向上的强度降低。在 X 射线层析中，一般忽略散射因素。但有的文献也考虑到散射对图象重建的影响。

假设一物体是均匀的，X 射线管发出单色 X 射线穿过物体，已知初始强度为 I_0 ，经过 x 距离后探测管得到的强度为 I ， μ 是衰减系数，有以下关系

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1-1-1)$$

若物体由多层介质组成，设每层是均匀的。各层衰减系数为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ ，相应的厚度分别为 $x_1, x_2, \dots, x_N$ ，X 射线穿过 N 层后，有类似式 (1-1-1) 的关系

$$I = I_0 e^{-\sum_j \mu_j x_j} \quad (1-1-2)$$

式中， $j=1, 2, \dots, N$ 。

对于非均匀的物体，在一个断层平面上引入坐标系 (x, y) ，沿某一射束路径 L 的衰减系数 $\mu = \mu(x, y)$ ，则

$$I = I_0 e^{-\int_L \mu(x, y) ds}$$

或

$$\int_L \mu(x, y) ds = -\ln \frac{I_0}{I} \quad (1-1-3)$$

其中线积分沿射束路径 L 计算。对于一条射线，有以下关系（图 1-1-1）

$$Q(p, \theta) = \int_L \mu(x, y) ds \quad (1-1-4)$$

在式 (1-1-4) 中，若固定方向，即 θ 一定，改变 p 大小，平移 X 射线发射源 A 和检测器 B ，得到一组积分值。然后改变方向，旋转一个 θ 角，再改变 p 值，又得到一组积分值。这样每旋转一次增加 1° ，从 0° 到 180° （图 1-1-2）。

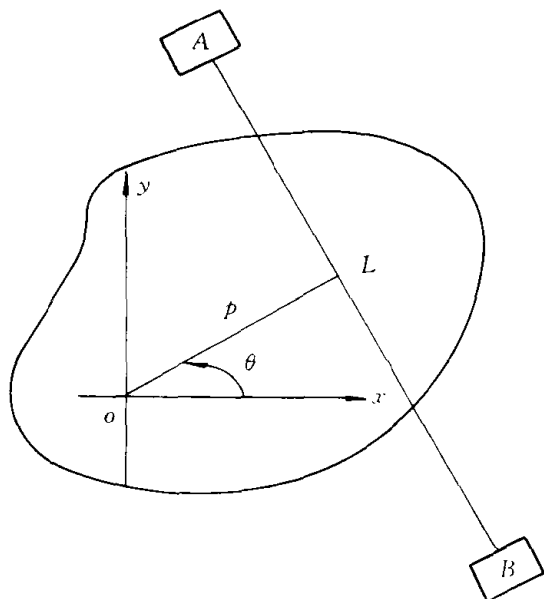


图 1-1-1 非均匀介质
A—X 射线发射源；B—检测器

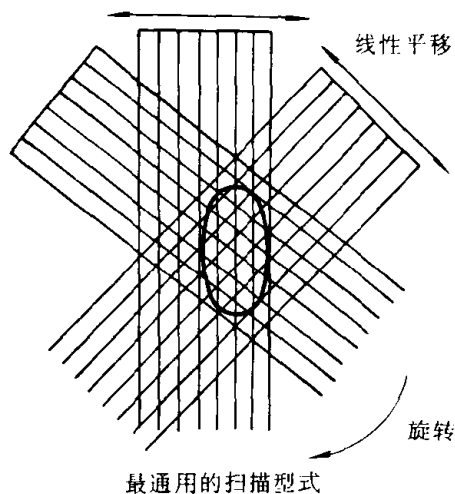


图 1-1-2 图象重显 (RT 或 CT) 断层扫描

世界上第一台颅脑 CT 扫描机^①用的是旋转平移装置。它的诞生与 1961 年完成的著名的 Oldendorf 旋转平移实验有关（图 1-1-3）。许多著作都记载了这个实验。W. H. Oldendorf 用碘 131 作射线源，以 NaI 晶体构成的光量子倍增器作为检测器，检测的信号经过滤波记录下来。被测样品是 $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$ 塑料块，内嵌铁钉和明矾钉子。把样品放在一只玩具平车上，用时钟的动力使它沿一短轨道以每小时 8cm 的速度作直线运动，这就等于完成式 (1-1-4) 中对 p 值大小的改变。再把这些部件都安装在一个留声机转盘上，旋转速度为 16r/min，就可实现式 (1-1-4) 中角度 θ 的变化。 γ 射线束通过唱盘的中心。这个系统运转时， γ 射线通过试样过程中的强度由运动状态中的钉子所调制。钉子不在旋转中心，以两倍旋转速率调制射束。由于线性位移速度比旋转速度低，用一个低通滤波器能够将二倍频率分离，只保留线性位移对射线强度的调制。如果用一个高通滤波器就只保留旋转的调制。穿

① 本书中多用“层析”一词，但涉及到装置则常采用“CT”。

过试样的射线被检测器接收记录下来。

由于这个物理实验对 CT 装置的诞生具有极大的启示性意义，Oldendorf 与 CT 装置的发明人 Hounsfield 同获 Lasker 奖金。

现在，CT 扫描机的物理装置不断改进，已有五代产品。第一代 CT 扫描机是平移旋转式，X 射线管发出笔式射线束，单个探测器检测，先做线性平移扫描，检测 256 次。旋转 1° ，再做一次平移线性扫描和检测，总共旋转 180° 约检测 46000 个数据，约需 3min 左右。

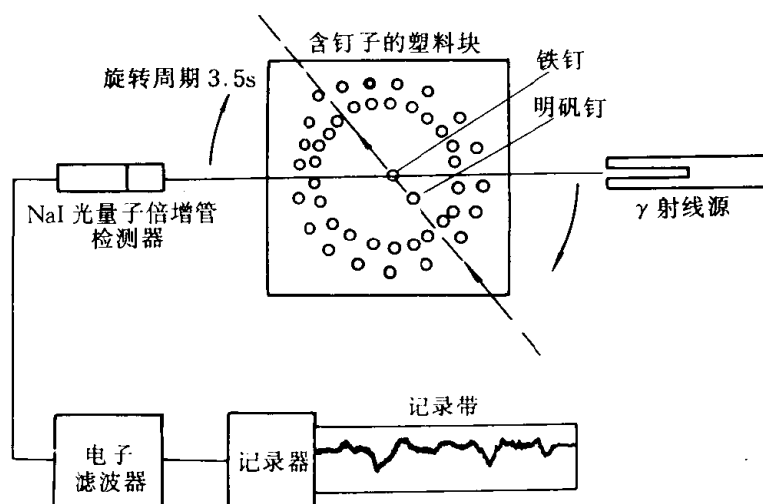


图 1-1-3 Oldendorf 旋转平移实验

第二代 CT 扫描机仍然是平移旋转装置，X 射线管发出扇形射线束，用 30 个或更多探测器检测。每次旋转 $3^\circ \sim 10^\circ$ ，大大降低扫描时间，只需 20s。

第三代 CT 扫描机装置，取消平行移动检测，改为旋转加旋转，X 射线球管和数百个探测器固定成弧形，它们围绕被测物体的轴心同步旋转，全身型扫描 CT 用高压氙电离探测室探测器。可以降低成象中的伪影。

第四代 CT 扫描机是螺旋型扫描，采用滑环技术，取消了以往缠绕于旋转机架上的各种电缆，代之以集流滑环，加快扫描速度，特别是在连续动态扫描中发挥了极大的作用。当进行连续扫描时，伴随床体的连续运动，扫描光束即在人体上形成螺旋轨迹，是螺旋型扫描。

第五代 CT 扫描机采用半圆环阳极靶面的大型 X 射线管，通过磁偏转技术控制电子束对阳极作快速扫描轰击，从而得到围绕人体的 X 射线束，这一新技术取代了传统的机械旋转式扫描，实现了 5ms 的超高速扫描，可做电影动态摄影、三维图象重建等等。

以上反映出物理实验、X 射线发射管和检测器的改进对 CT 扫描机的不断发展起着十分重要的作用。

第二节 核磁共振 (NMR) 成象

核磁共振成象又称磁共振成象。1896 年，P. Zeeman (塞曼) 观测到光在强磁场中谱分裂，称 Zeeman 效应，导致 NMR 波谱学的建立。1944 年，E. K. Завоиский 发现核磁共振现象。NMR 层析是核磁共振在成象中的应用。

一、核磁共振基本概念

原子中电子的轨道磁距和自旋磁距合成原子的总磁距。原子核也有磁距，电子的总磁距不为零时，原子的磁距主要决定于电子的总磁距，而当电子的总磁距为零时，原子的磁距就决定于核磁距。因为原子核的磁距比电子的磁距要小三个数量级。

实验证明，当质子和中子呈偶数的原子核的自旋量子数等于零时，不发生核磁共振，只

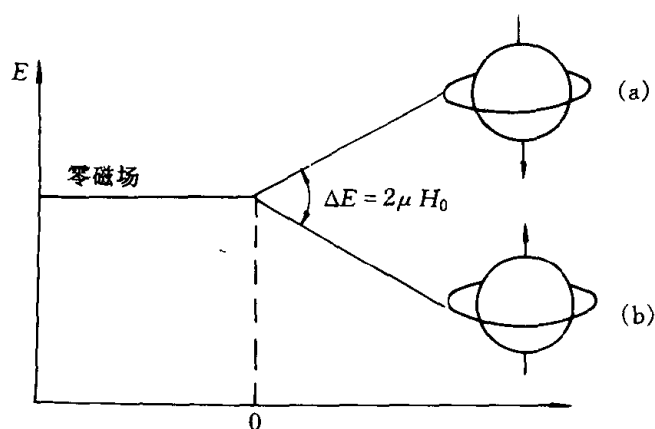
有自旋量子数为奇数的原子核才发生核磁共振。人们主要研究自旋量子数 $I = \frac{1}{2}$ 的核磁共振。

在医学中用 NMR 成像仪研究人体细胞中的 ^1H , ^{13}C , ^{19}F 等的共振成像。在石油开发中, 利用 NMR 成像仪研究岩石孔隙中油水渗过过程。

一般地说, 样品(材料)在外磁场作用前, 磁距的分布是不规则的, 几率均等, 宏观上不呈现磁性, 总磁距 (M) 等于零。当样品在相当强的外磁场(在核磁共振研究中称为主磁场, 用 B_0 表示)作用下, 例如人体进入磁体空腔或岩石标本放入磁体空腔, 样品内的磁距重新取向, 大多数磁距顺 B_0 方向排列, 少数磁距逆 B_0 方向排列。前者处于低能态, 后者则处于高能态。

核在自旋的同时, 围绕以外磁场 (B_0) 方向为轴线回旋, 此种回旋运动称为进动或称 Larmor 进动。核进动与外磁场 B_0 的关系为

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \gamma B_0 \quad (1-2-1)$$



式中, ω_0 为自旋核的角速度; ν_0 为进动频率或称 Larmor 频率; γ 为磁化比, 是各种核的特征常数。

对于自旋氢核而言, 与 B_0 同方向, 能量较低, $m = +\frac{1}{2}$; 与 B_0 逆方向, 能量较高, $m = -\frac{1}{2}$ 。它们的能量差(参见图 1-2-1)

$$\Delta E = \frac{\mu B_0}{I} \quad (1-2-2)$$

图 1-2-1 原子核在磁场中的能级差
与外加磁场方向相反的质子 (a) 的能量比;
与外加磁场方向一致的质子 (b) 的能量高

式中, μ 为核自旋磁距。

$$\Delta E = 2\mu B_0 \quad (1-2-3)$$

因为氢核 $I = \frac{1}{2}$ 。

在外加磁场 B_0 上再加一个与 B_0 方向成某个角度的交变磁场。调整频率到一个量子能量等于核在磁场中二邻近能量级差, 核从外加电磁波吸收能量从低能态 $m = +\frac{1}{2}$ 迁跃到高能态 $m = -\frac{1}{2}$, 此时产生核磁共振, 称磁共振现象。

$$\Delta E = 2\mu B_0 = h\nu_0 \quad (1-2-4)$$

$$\nu_0 = 2\mu B_0 / h \quad (1-2-5)$$

式中, h 为普朗克常数; ν_0 又称共振频率。

在产生共振时吸收能量与磁场的关系呈共振曲线, 有一个共振峰值。

二、弛豫过程

取直角坐标系, B_0 平行 z 轴方向, 样品在 B_0 中平衡的磁化强度矢量记为 M_0 , 在某时刻与 B_0 方向成某个角度叠加射频脉冲磁场。使 M_0 偏离 B_0 方向, 记为 M 。图 1-2-2 说明磁化强度矢量 M_0 与 M 的关系。记 $M = \{M_x, M_y, M_z\}$ 。射频脉冲停止, 弛豫过程开始, 经过一段时间 M 回复到 M_0 的状态。

从 $M = \{M_x, M_y, M_z\}$ 回复到 $M_0 = M_z$, 宏观上可从两个方面分析。

(1) z 方向。磁性系统在平衡状态, $M = \{M_x, M_y, M_z\}$ 中 $M_x = 0, M_y = 0, M_0 = M_z$ 。在受外界影响的情况下, 系统出现不平衡状态。经过一段时间的弛豫作用后, 系统在新的条件下达到并维持一种新的平衡态。自旋系统的能量要发生变化, 能量转移到周围固体晶格或液体的溶剂分子, 变成热运动。在 z 方向上达到平衡的时间称为自旋—晶格时间, 或称纵向弛豫时间, 用 T_1 表示。

(2) xy 平面内的情况。 M_x, M_y 两者反映各个小磁距绕 B_0 进动的相位关系。在磁性系统处于平衡态时, $M_x = 0, M_y = 0$ 。即是磁距在 xy 平面内的取向是无规则的。在某一时刻, 磁性系统处于非平衡状态, $M_x \neq 0, M_y \neq 0$ 。它们反映各小磁距进动的相位有某种程度的聚焦。当射频磁场 B_1 停止, 经过一段时间, 这种聚焦完全分散开, 磁性系统又达到平衡。这种相位分布变化不影响自旋系统的能量, 系统的能量不发生变化, 这是横向弛豫的特点。横向弛豫时间用 T_2 表示。

简言之, 核磁共振中的弛豫是磁性系统由非平衡状态回复到平衡状态的过程。纵向弛豫和横向弛豫的物理机制是不相同的。下面是 Bloch 公式, 表示宏观弛豫的规律。

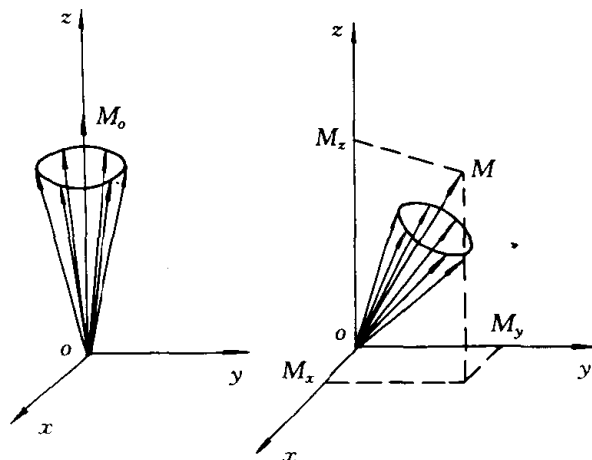


图 1-2-2 磁化强度 M_0 与 M

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{-1}{T_1}(M_z - M_0) \quad (1-2-6a)$$

$$\frac{dM_x}{dt} = \frac{-M_x}{T_2} \quad (1-2-6b)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \frac{-M_y}{T_2} \quad (1-2-6c)$$

式中, $\frac{dM_z}{dt}, \frac{dM_x}{dt}, \frac{dM_y}{dt}$ 表示磁化强度的变化率。

图 1-2-3 描述了在平稳磁场 B_0 上的叠加射频脉冲 B_1 , 磁化强度矢量 M 与 B_0 之间的

位移角连续增加的情况。图上表示了 15° 和 90° 的射频脉冲。 90° 脉冲恰好使磁化矢量在 xy 平面上旋转。

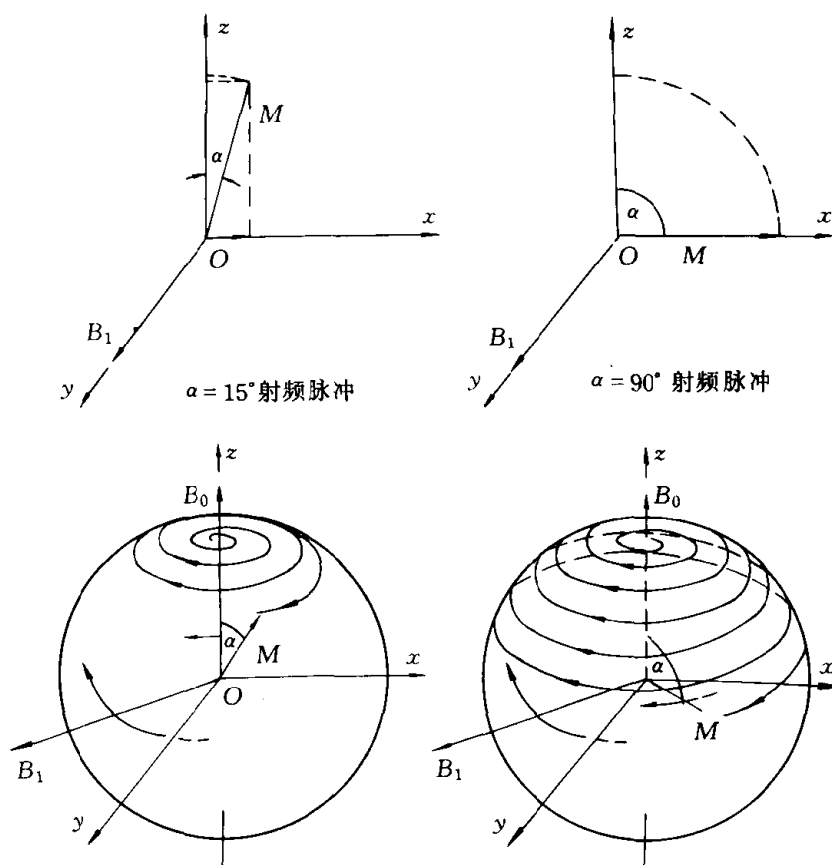


图 1-2-3 进动的运动 (α 为进动的角度)

当射频脉冲停止后, M 在弛豫过程中是不断转动的, 见图 1-2-4 (a)、(b)。在与 B_0 垂直的 xy 平面上, 转动半径 M_{xy} 逐渐缩小 (T_2 弛豫时间), 而在与 B_0 平行的 z 轴上 M_z 逐渐增长 (T_1 弛豫时间)。磁化强度 M 在回复到 M_0 的过程中, 产生一个小的自由感应电动势, 或称自由感应信号 (FID), 可以用线圈接收。图 1-2-4 (c) 表示横向的衰减, 图 1-2-4 (d) 表示纵向衰减示意图。

三、梯度磁场

为了进行成像, 还要用辅助的梯度磁场对样品不同部位旋进的质子进行空间编码。

梯度磁场 G_I (i) 用线圈构成, 放在主磁场内, G_I (i) 按坐标轴分为 G_z , G_x 和 G_y , 它们的强度按梯度增加, 但与主磁场强度相比, 要小得多。

G_z 在 z 轴方向上作样品层面厚度选择, 使样品内某一层面的质子共振, 而其它部分因不满足 Larmor 关系, 即不发生质子共振。

G_x 是在 x 轴方向上, 不同空间位置的质子经历不同的磁场强度, 它们具有不同的共振频率, 共振曲线的频率与 x 轴上的点相对应, G_x 亦为“频率编码”梯度磁场, 同 X 射线 CT 装置类似, 沿 x 轴方向的梯度磁场围绕被测样品旋转 180° , 然后将所得数据做反投影, 重建图象。

G_y 是 y 轴方向上的梯度磁场, 逐级地改变相应区域质子自旋的相位, G_y 称“相位编码”的梯度磁场, 这种方法通常称为二维 Fourier 图象重建法, 这是与 X 射线 CT 不同的、