

地面核磁共振

找水

潘玉玲 张昌达 等编著

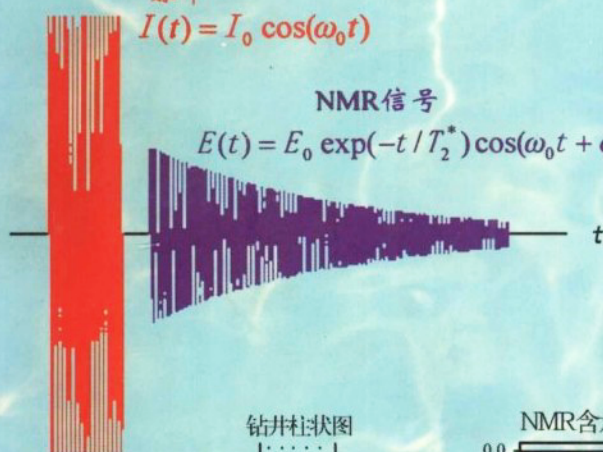
理论和方法

脉冲

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t)$$

NMR信号

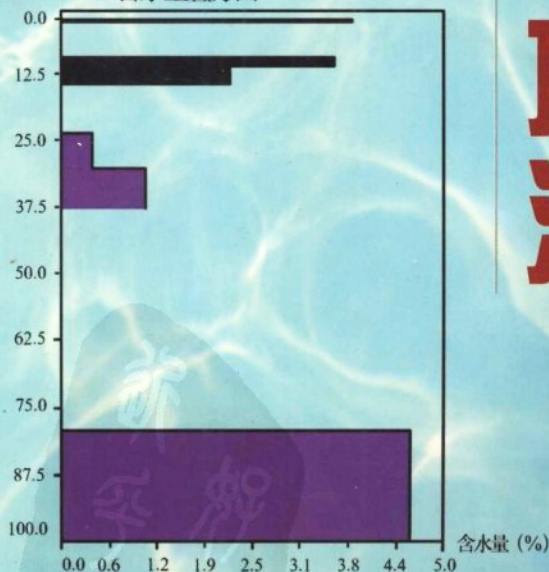
$$E(t) = E_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$



钻井柱状图



NMR含水量直方图



中国地质大学出版社

PDG

中国地质大学(武汉)“211工程”建设项目 资助出版
国土资源部科技司重点科研项目

地面核磁共振找水理论和方法

潘玉玲 张昌达 等编著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

作为作者多年研究成果的总结,本书系统地论述了核磁共振理论及其找水原理和方法技术,阐明了核磁共振信号的数据采集、预处理和反演解释的全过程,分析了影响核磁共振找水信号强弱的主要因素以及如何区分、认识核磁共振找水信号的异常,介绍了在中国不同水文地质条件下新方法的应用情况和国外的部分实例,总结分析了我国核磁共振找水效果和扩大应用的可能途径。

本书内容丰富,理论深度、知识广度适宜,可供从事水文地质、工程地质、水利和电力、环境工程、地球物理勘查等工作的科技人员及本科生、研究生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

地面核磁共振找水理论和方法/潘玉玲,张昌达等编著. —武汉:中国地质大学出版社, 2000. 8

ISBN 7-5625-1551-4

I. 地…

Ⅱ. ①潘…②张…

Ⅲ. 地面核磁共振找水-理论-方法

Ⅳ. P631.2

地面核磁共振找水理论和方法

潘玉玲 张昌达等编著

责任编辑:明厚利 高勇群

责任校对:熊华珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

E-mail: cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本:787 mm×1092 mm 1/16

字数:240千字 印张:9.25 插页:1

版次:2000年8月第1版

印次:2000年8月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—600册

ISBN7-5625-1551-4/P·534

定价:20.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

开展核磁共振新技术，开拓地面核
磁共振方法找水的新领域，为探查
地下水资源做出更大贡献！

王光松
2000年4月

序 言

水是人类生存的最基本条件。专家们指出^①,在食物、能源、水源中,水资源的危机最大。

世界水资源形势。地球上水资源丰富,但 97% 在海洋,是不能直接饮用的咸水;与人类生产、生活息息相关的淡水,只占全部水资源的 3%。而这 3% 的淡水中,高山积雪和南北极的冰雪又占去 70%,其余的大部分是土壤中的水分或者是地下深处蓄水层中的水。地球上江河湖泊的水量以及地下较浅可开采的那部分地下水总共只占世界淡水总量的不足 1%。

专家们估计,地球上易于开采的可供人类使用的淡水量每年约为 9 万亿立方米,再加上水坝和水库拦住和蓄存的 3.5 万亿立方米。这 12.5 万亿立方米的水,目前人类大约使用了其中的一半。为满足需求,在 20 世纪内,人类大幅度增加水的提取量。从 20 世纪初到 20 世纪末,全球淡水消耗量增长了 10 倍,大大高于人口的增长速度。

由于用水量的剧增,以致一些大江大河在流向下游时水量骤减,结果使下游的用户缺水。此外,由于污染,许多地表水无法使用,人们转而大量开采地下水。在 80~90 年代,全球地下水开采量为每年 5 500 亿立方米,其中开采量每年大于 100 亿立方米的有 10 个国家。由于对地下水的过量开采,导致了許多地方地下水资源正面临枯竭。

随着人类社会的进步和经济的发展以及世界人口的增加,对淡水的用量激增,加之水资源浪费与污染等,使淡水越来越难以满足需要。目前,占世界人口总数 40% 的 80 个国家受到缺水威胁,每年有许多人死于缺水。据统计,世界约有 15 亿人缺少饮用水,其中 26 个国家 2.32 亿人饮用水紧缺,中近东地区尤为突出。

1999 年 2 月 8 日至 12 日,联合国教科文组织和世界气象组织在日内瓦召开解决世界水资源危机的国际会议。会议警告说,从中东地区到美国的各个国家可能在未来的 25 年中面临缺水问题。据目前的估计,到 2025 年,约有 34 个国家严重缺水,世界 2/3 的人口面临中等程度到严重程度的缺水问题。

中国水资源形势严峻。虽然我国水的总量丰富,但人均占有量少,而且时空分布不合理:南多北少,东多西少。

从总量上看,中国是一个水资源大国,整个大陆每年平均降水量约为 6.19 万亿立方米,但其中约 55% 消耗于陆面蒸发,只有 45% 转化为径流和地下水,而实际利用率不到 10% (约 5 000 亿立方米)。全国河川年平均径流总量 2.7 万亿立方米,地下水资源量为每年 8 700 亿立方米。

我国水资源总量为 2.8 万亿立方米,居世界第 6 位。但人均占有量仅为 2 300 立方米,不足世界人均值的 1/4,世界排名第 121 位,被列为世界上 13 个人均水资源缺乏的国家之一。不仅如此,中国属于季风气候区,水资源的时空分布极不均匀,呈南多北少、东多西少之势。全国有 18 个省(区、市)人均占有水资源量低于全国平均水平。到目前为止,农、林业缺水 300 亿立方米左右,城市缺水 60 亿立方米。全国有 300 多个城市缺水,其中 188 个城市严重缺水。预计到 21 世纪 30 年代前后,中国人口达到 16 亿时,缺水总量为 2 300 亿立方米。至 21 世纪中期,

^① 田雪莲,水资源:让世界不轻松,国土资源报,第三版,1999 年 3 月 23 日

全国总的供水量将从过去的 5 000 多亿立方米增长到 8 000 亿立方米左右,即增长 60%,占我国可利用水资源总量的 28% 以上,很有可能发生更大范围的水危机。

用高新技术勘查地下水。国土资源有关专家指出,目前解决我国水资源问题的关键在于减少浪费、防治污染和加强管理。缓解缺水矛盾,一是要开源,二是要节流。

国土资源部副部长蒋承崧在“新一轮国土资源大调查科学技术座谈会”上指出:依靠科技进步,运用新思想、新理论、新技术、新方法,搞好国土资源的综合调查,为促进国民经济和社会可持续发展做贡献。《新一轮国土资源大调查纲要》也指出了要开展西北、西南缺水区的地下水勘查,引进和推广核磁共振(NMR)直接找水的新方法、新技术,缓解供需矛盾。

核磁共振技术是当前世界上的尖端技术,用该技术找水是核磁共振技术应用的新领域,开创了应用地球物理方法直接找水的先河。

自 1946 年帕塞尔(E M Purcell)和布洛赫(F Bloch)同时发现在物质中的核磁共振现象以来,到现在仅有几十年的历史。但随着科学技术的发展,核磁共振现象已由理论研究、试验进入了应用与开发阶段,它广泛应用于物理学、化学、生物学、医学等领域,在地学方面也得到了广泛的应用(质子磁力仪、NMR 波谱仪、岩心测试仪以及 NMR 测井工作)。用该技术探查地下水是核磁共振技术在地学中应用的新领域,为勘查地下水增添了新手段,填补了应用地球物理方法直接找水的空白。

地面核磁共振找水方法的形成与发展仅有 20 多年的历史。这种方法的创意,是在大约 30 年前提出的(Varian, 1962; Barringer and White, 1968),但从那时起直到 70 年代末,没有任何有关核磁共振找水的报道。1965 年夏,中国的张昌达、崔岫峰等人利用核磁共振技术进行过找水试验。由于当时技术条件的限制,未能收到核磁共振信号,但当时采用的技术方案还是正确的。

从 1978 年起,前苏联科学院西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所(ICKC)以 A G Semenov 为首的一批科学家开始了利用核磁共振技术进行找水的全面研究。仅用 3 年时间就研制成功了世界上第一台核磁共振层析找水仪(Hydroscope),并在前苏联和英国申请了专利。在其后的 10 年间,进行了仪器改进和解释方法的研究。他们的试验研究遍及前苏联的大部分国土,北到极地附近的新地岛,南到中亚的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、乌克兰及西部的波罗的海沿岸的立陶宛和白俄罗斯。根据在中亚地区等已知 400 多个水文钻上的对比试验,总结和研制出了一套正反演数学模型、计算机处理解释程序和水文地质解释方法。与此同时,在澳大利亚、以色列、美国、法国、中国等国家先后也进行了大量试验,试验表明核磁共振方法是目前世界上唯一的直接找水的地球物理新方法。1991 年俄罗斯创建了“水文地质层析成像公司”,利用他们研制的第二代找水仪开展水文、工程地质和环境方面的商务活动。在不同水文地质条件下进行了现场作业,不仅检验了核磁共振找水仪的性能,完善了解释方法,而且取得了世界领先水平的研究成果。1992 年,ICKC 在法国成功地演示了核磁共振找水方法。1994 年法国购买了俄罗斯找水仪专利并开始研制地面核磁感应系统(Nuclear Magnetic Induction System,缩写为 NUMIS)。

法国地调局(BRGM)与俄罗斯科学院新西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所(ICKC)合作,由法国 IRIS 公司制造,于 1996 年生产出 6 台 NUMIS 系统。

法国 IRIS 公司研制的 NUMIS 系统是俄罗斯 Hydroscope 的改进型,仪器原理没有改变,但在制造工艺、重量和抗干扰能力方面有许多改进。到目前为止,拥有核磁共振找水仪的国家有俄罗斯、法国、中国和德国。

我国有从事核磁共振找水技术研究的基础和实力。国土资源部信息研究院崔霖沛高级工程师最早系统地介绍了国外 NMR 找水方法。1992~1993 年中国地质大学(武汉)核磁共振找水科研组对该方法进行了国内外调研,1994 年与莫斯科国立大学建立了校际科研合作关系。1995 年底,由原地质矿产部科技司与勘查技术院出资,中国地质大学、航空物探和遥感中心(简称航遥中心)组团专访新西伯利亚化学动力学和燃烧研究所、莫斯科水文地质层析成像公司,确认了核磁共振找水方法的效果。1995~1996 年航遥中心、中国地质大学完成了“核磁共振找水方法效果的预研究”项目。1997 年底中国地质大学(武汉)以“211 工程建设”经费引进了法国 IRIS 公司研制的 NUMIS 系统。这是我国的第一台 NUMIS 系统。经过一年多的实践,用该系统在缺水地区找到了地下水,填补了我国用地球物理方法直接找水的空白。从此,我国成为世界上拥有核磁共振找水装备并成功地用于找水的少数国家之一,使我国步入了用高新技术直接找水的世界先进行列。

与其他地球物理找水方法相比,核磁共振找水方法主要具有以下优点:一是能够直接找水,特别是找淡水。在该方法的探测深度范围内,有水就有核磁共振信号显示,反之则没有响应。可以利用这一优点来识别间接找水的电阻率法找水时遇到的非水低阻异常。如一些岩溶发育区,特别是西南岩溶石山缺水地区,当溶洞被泥质充填或含水时,电阻率法测量结果均显示为低阻异常,是泥是水难以区分。核磁共振方法不受泥质充填物干扰,是水就有核磁共振信号。此外,淡水的电阻率往往与其赋存空间介质的电阻率无明显差异。在这种情况下,电阻率法找水是无能为力的,而核磁共振方法却可直接探测出淡水。二是信息量丰富,具有量化的特点。核磁共振方法可将核磁共振信号解释为某些水文地质参数和含水层的几何参数,在探测深度范围内,可以给出定量解释结果,不打钻就可以确定出含水层的深度、厚度、含水率,并可提供含水层平均孔隙度的信息。三是经济、快速。完成一个核磁共振测深点的费用仅为一个水文地质勘探钻孔费用的 1/10,可以快速地提供井位及划定找水远景区。

但是,由于核磁共振找水仪的接收灵敏度高,能够接收纳伏级的信号,所以易受电磁噪声干扰,这是该方法的一大缺点。目前,通过改变天线形状和增加信号叠加次数的方法来提高信噪比。

本书是中国地质大学(武汉)“211 工程”建设的众多成果之一,是中国地质大学(武汉)NMR 找水科研组多年研究成果的总结,是我国利用高新技术——核磁共振技术探查地下水资源的第一部专著。我们在本书中努力做到理论与实践相结合,力求系统地论述核磁共振理论及其找水原理、方法技术,以及核磁共振信号的数据采集、预处理和反演解释的全过程,做到内容丰实,理论深度、知识广度适宜,便于学习原理新颖的核磁共振找水方法。与此同时,书中介绍了部分研究成果——影响核磁共振找水信号强弱的主要因素,以便区分、认识核磁共振找水信号的异常。最后介绍了在中国不同水文地质条件下新方法的应用效果和国外的部分实例,从中外找水成功实例的对比中,总结分析了我国 NMR 找水效果和扩大应用的途径,从中可以更好地理解地面核磁共振找水方法是如何解决各类水文地质问题的。

我们认为,NUMIS 系统的科学开发和利用,不仅为我国新一轮水资源大调查提供了新的理论和手段,同时也可以促进 21 世纪人才培养和学科发展。1992 年,中国地质大学应用地球物理系部分教师组成了 NMR 找水科研组,其中张昌达、潘玉玲、董浩斌、鲁永康、黄鹰、庞晓辉进行过核磁共振找水仪的模拟实验研究;1994 年潘玉玲教授专访莫斯科国立大学,1995 年底刘天佑教授专访 ICKC 和莫斯科水文地质层析公司;1998 年严冬有潘玉玲、袁照令、万乐、李振宇、张兵、李大明、顾涛、沈博、曲赞、胡祥云、张胜业、刘天佑、许顺芳、尹成勇等参加了 NMR

找水仪的验收试验和后来的找水实践。

在核磁共振找水方法的研究和引进 NUMIS 系统及总结编写本书的过程中,一直得到学校领导、科研处、“211 工程”办公室、设备处的大力关心和支持,特别是得到学校“211 工程”中“地学探测技术与地质工程”重点学科群负责人王家映教授的直接关心与帮助;也得到了国土资源部科技司、勘查技术院领导的支持和校内外同行专家在技术上的帮助。在此谨向上述各位领导和专家表示敬意和感谢。

我们感谢崔霖沛高级工程师的帮助。

感谢曾在本校任教的中国科学院院士刘光鼎先生为本书题词。

我们很难忘却在那严冬酷暑的季节里,为了寻找地下水征战在大江南北的情形,特别是在与找水英雄李国安为首的给水工程团合作期间,学习到他们的敬业精神,对英雄部队给予我们工作上的大力支持表示感谢。

我们感谢中国地质大学(武汉)地球物理系关心和支持我们工作的所有教职员工。

我们感谢中国体视学学会、《CT 理论与应用研究》编辑部、亚洲 CT 科技十大进展组委会对我们科研成果的高度评价:

潘玉玲、万乐、李振宇、张昌达、袁照令等完成的《核磁共振技术应用的新领域——探查地下水》科研成果被评为 1999 年亚洲 CT/MR/ST/ICT 科技十大进展成果之一,该成果为亚洲领先水平。

中国地质大学(武汉)核磁共振找水科研组的有关成员参与了本专著的编写工作:序言,潘玉玲、张昌达;第一章,张昌达;第二章,董浩斌;第三章,潘玉玲;第四章,袁照令;第五章,万乐;第六章第一节,李振宇;第六章第二节,潘玉玲;结束语,潘玉玲。潘玉玲、张昌达统编全书并最终定稿。

参加本书绘图工作的有方敏、潘利、何建华等。在此表示感谢。

由于水平有限,书中有不当之处,请读者批评指正。

潘玉玲 张昌达

2000 年 4 月于武汉

目 录

第一章 核磁共振(NMR)理论概述和 NMR 勘探地下水的原理	(1)
第一节 核磁共振(NMR)理论概述	(1)
一、原子核的磁性和核磁共振	(1)
(一) 原子核的磁性	(1)
(二) 核磁共振	(3)
二、磁矩在磁场中的运动	(5)
(一) 拉摩尔进动	(5)
(二) 旋转坐标系	(6)
(三) 旋转磁场和扳倒角	(7)
三、弛豫作用	(10)
(一) 磁化强度和氢核的顺磁性	(10)
(二) 自旋-晶格弛豫	(12)
(三) 自旋-自旋弛豫	(13)
四、Bloch 方程	(17)
(一) Bloch 方程	(17)
(二) 在恒定磁场和交变磁场作用下 M 的运动	(17)
第二节 NMR 技术勘探地下水的原理	(19)
一、NMR 在地球物理学方面的应用	(19)
二、NMR 找水方法的前期探索	(20)
三、在地磁场和交变磁场作用下地下含水层的 NMR 响应	(21)
(一) 地面 NMR 找水方法的工作原理	(22)
(二) 早期在俄罗斯的试验工作	(24)
四、多孔介质中液体的弛豫现象	(27)
(一) 弛豫与孔隙大小的关系	(27)
(二) 估算渗透率的一种方法	(29)
(三) 弛豫时间与含水地层类型的经验关系	(30)
第一章参考文献	(30)
第二章 核磁共振找水仪	(32)
第一节 预极化方式	(32)
一、预极化磁场的作用	(32)
二、自由感应衰减信号	(33)
三、同步极化	(33)
第二节 质子磁力仪的基本原理	(34)
一、质子磁力仪的结构	(34)

二、探头的结构	(35)
三、抗干扰的措施	(35)
四、探头的信号幅度及其影响因素	(36)
第三节 地面核磁共振找水仪	(37)
一、核磁共振找水仪与质子磁力仪的对比	(37)
二、NMR 找水仪的组成	(38)
(一)发射单元	(38)
(二)接收单元	(39)
第四节 NUMIS 工作过程和维护	(40)
一、工作过程	(40)
(一)选择激发(发射)频率	(40)
(二)选择回线(发射/接收天线)的形状	(41)
(三)选择采集参数	(41)
(四)测量 NMR 信号	(41)
(五)信号的处理及定量解释	(42)
二、仪器的维护	(42)
(一)要配备训练有素的专业人员	(42)
(二)保持良好的工作环境	(42)
(三)特殊部件的注意事项	(42)
(四)DC/DC 的格式化	(42)
(五)检查仪器注意事项	(42)
第二章参考文献	(43)
第三章 影响核磁共振找水信号的因素研究	(44)
第一节 导电性对 NMR 信号影响的特点	(44)
一、正演计算的理论基础	(45)
(一)正演计算的数学模型	(45)
(二)水平含水层上方 NMR 信号的计算	(45)
二、导电性对 NMR 信号振幅和相位的影响	(50)
(一)均匀半空间中一个含水层的 NMR 信号的振幅和相位曲线	(50)
(二)层状大地中两个水平含水层时的 NMR 信号的振幅曲线	(50)
(三)导电性对 NMR 信号影响的几点认识	(54)
第二节 地磁场强度和倾角变化对 NMR 信号的影响	(55)
一、地磁场强度变化对 NMR 信号的影响	(55)
二、地磁场倾角变化对 NMR 信号的影响	(55)
三、局部磁性不均匀对 NMR 信号衰减时间的影响	(56)
第三节 含水岩石类型和含水层赋存状态对 NMR 信号的影响	(58)
一、含水岩石类型	(58)
(一)含水岩层平均孔隙度与 NMR 信号衰减时间的关系	(58)

(二) T_2^* 值对 NMR 信号振幅的影响	(58)
二、含水层赋存状态及其含水量与 NMR 信号的关系	(59)
(一) 含水层深度对 NMR 信号的影响	(59)
(二) 含水量与 NMR 信号的关系	(61)
第四节 电磁噪声对 NMR 信号的影响	(61)
一、研究方法	(61)
二、电磁噪声对 NMR 信号解释结果的影响	(63)
第五节 人为技术因素对 NMR 信号的影响	(63)
一、天线形状和大小	(64)
(一) 天线形状变化对 NMR 信号的影响	(64)
(二) 天线大小对 NMR 信号的影响	(64)
二、激发脉冲矩大小和个数	(65)
(一) 含水层的 NMR 信号与脉冲矩大小的关系	(65)
(二) 激发脉冲矩个数对 NMR 信号的影响	(66)
三、人为技术因素对 NMR 信号影响讨论的几点认识	(69)
第三章参考文献	(70)
第四章 NMR 信号的采集	(71)
第一节 施工前的准备工作	(71)
一、收集地质和地球物理资料	(71)
(一) 区域性水文地质调查	(71)
(二) 勘探阶段确定出水井位	(73)
二、了解工作区的地球物理环境——电磁干扰源的分布情况	(73)
三、仪器设备的准备	(73)
(一) 发送机电容器的连接	(73)
(二) DC/DC 变换器的电容器格式化	(75)
第二节 NMR 信号的采集过程	(75)
一、激发频率的选择	(75)
(一) 地磁场的测量	(75)
(二) 激发频率的确定	(76)
二、线圈形状的选择和敷设	(77)
(一) 优化线圈形状	(77)
(二) 线圈的敷设	(78)
三、仪器连接	(78)
四、测量参数的选择	(78)
(一) 测量范围	(79)
(二) 记录长度	(79)
(三) 脉冲持续时间	(79)
(四) 脉冲矩的个数	(79)

(五)叠加次数	(79)
五、测量步骤	(79)
(一)必须注意的安全事项	(79)
(二)测量步骤	(80)
(三)数据采集	(80)
(四)文件储存	(81)
(五)NMR 信号采集中容易出现的问题	(81)
第三节 采集高质量信号的技术保障	(82)
(一)避开电磁干扰源	(82)
(二)了解工作地区地层电阻率分布特征	(82)
(三)正确连接仪器各部分	(82)
(四)经常性的仪器维护	(82)
(五)改变线圈形状	(82)
(六)适当增大叠加次数	(82)
(七)地磁场强度测量准确	(82)
(八)对测量质量的监控	(82)
第四章参考文献	(83)
第五章 NMR 信号的预处理和反演解释	(85)
第一节 NMR 信号的预处理	(85)
一、零时外延	(85)
二、化为标准观测值	(86)
三、噪声滤波	(86)
(一)傅里叶滤波	(87)
(二)多项式圆滑	(87)
四、提供反演解释用的原始数据形式	(88)
第二节 NMR 信号的反演解释	(89)
一、反问题的求解过程	(89)
(一)选择反问题的求解方法	(89)
(二)NUMIS 系统的反演解释过程	(91)
二、地面 NMR 找水方法的成果图	(93)
三、由地面 NMR 资料求取水文地质参数的探讨	(96)
四、提高 NMR 找水方法资料解释可靠性的研究	(96)
(一)资料的综合研究	(96)
(二)加强 NMR 信号的正演研究	(97)
(三)培养高素质人才,获取高水平的研究成果	(97)
第五章参考文献	(97)
第六章 地面核磁共振找水方法的应用	(98)
第一节 地面核磁共振找水方法与传统的物探找水方法的对比研究	(98)

一、地下水类型及其地质、地球物理特点概述	(98)
(一) 探查基岩裂隙水	(99)
(二) 探查山前冲洪积扇区地下水	(103)
(三) 探查平原区地下水	(103)
(四) 探查黄土区地下水	(105)
二、地面核磁共振找水方法与传统找水方法对比	(105)
第二节 地面核磁共振找水方法的应用	(107)
一、地面 NMR 找水仪的标定和理论简化模型的试验评价	(108)
二、地面 NMR 方法探查岩溶水的几则实例	(109)
(一) 为岩溶石山地区找水是改善生态环境和解决脱贫的关键	(109)
(二) 岩溶发育区常用找水的电阻率方法遇到的地质干扰	(109)
(三) 在湖北“非含水区”探查到水质良好的岩溶水(实例 1、2)	(110)
(四) 在法国 St. Cyr - en - Val 试验地探查岩溶水(实例 3)	(115)
(五) 在以色列中部工业区探查区域性喀斯特白云岩中的地下水(实例 4)	(115)
三、用地面 NMR 方法探查其他类型的基岩裂隙水	(118)
(一) 在中国湖北孝感探查基岩裂隙水(实例 5)	(118)
(二) 在南加利福尼亚沙漠区探查砂岩裂隙水(实例 6)	(119)
四、用地面 NMR 方法在火成岩地区探查地下水	(119)
(一) 在中国北方某地风化花岗岩地区找到了地下水(实例 7)	(121)
(二) 在沙特阿拉伯应用地面 NMR 方法探测破碎花岗岩中的含水层(实例 8)	
.....	(121)
(三) 在葡萄牙摩拉地区应用地面 NMR 方法探测变质火山岩中的含水层的	
试验结果(实例 9)	(123)
(四) 在西班牙应用地面 NMR 方法对硬岩(花岗岩)地区地下水量化的试验	
结果(实例 10)	(125)
五、用地面 NMR 方法进行区域性水文地质填图和对地下水资源进行评价	(127)
(一) 在哈萨克斯坦用 Hydroscope 找水仪确定找水远景区(实例 11)	(127)
(二) 在西班牙国家公园的水文地质调查任务和工作结论(实例 12)	(127)
六、地面核磁共振方法探查孔隙水的应用与研究	(129)
(一) 在中国河南验收 NUMIS 系统(实例 13)	(129)
(二) 在中国广西南丹县八圩乡用地面 NMR 方法探测水源地(实例 14)	(130)
七、地面 NMR 和 TDEM 测深相结合评价水质(实例 15)	(130)
八、地面 NMR 方法在中国辽宁大连海滨地下挡水坝勘察中的应用试验(实例 16)	
.....	(133)
第六章参考文献	(133)
结束语	(135)

第一章 核磁共振(NMR)理论概述和 NMR 勘探地下水的原理

在本章中我们介绍为了掌握 NMR 找水方法所必需的基本理论,而不求其系统与完整。重点介绍了核磁共振和弛豫的概念、描述磁矩在恒定磁场和交变磁场作用下的行为的 Bloch 方程、地下含水层的 NMR 响应、岩石中液体的弛豫现象等。基本上采用经典理论,在涉及量子力学的时候,只介绍一些大家所知的基本概念和简单的原理。作者还强调从发展的过程中了解一门科学技术,争取内容生动一些,促使学术思想活跃一些,并力求针对性强,联系实际,内容新颖。

第一节 核磁共振(NMR)理论概述

一、原子核的磁性和核磁共振

(一) 原子核的磁性

原子核由质子和中子组成,质子和中子统称为核子。质子和中子的质量基本相等。质子带正电荷 e , 电子的电荷为 $-e$, 中子基本上不带电荷,是中性的。

原子核的质量用质量数 A 表示, A 等于核中质子数 Z 和中子数 N 之和,即 $A=Z+N$, 一般情况下 $N \geq Z$, Z 等于元素在周期表中的原子序数。

具有一定质量数 A 和质子数 Z 的原子核称为核素,某种元素 X 的核素可用符号 ${}_Z^AX$ 表示。例如,氢核(质子) ${}_1^1\text{H}$, 氧核 ${}_8^{16}\text{O}$, 碳核 ${}_6^{12}\text{C}$ 等^{[1]、[2]、[5]、[6]}。

关于原子核的磁性,从20世纪20年代起,科学家们就不断地进行研究。1924年, W Pauli 为了解释原子光谱的超精细结构,首先提出某些原子核应具有固有的动量矩和固有的磁矩。这种假定存在的磁矩与轨道电子的相互作用的结果,就产生了超精细结构。光谱学技术的成就和对谱线的解释,可以确定许多原子核的自旋和磁矩,但是准确度不高^[7]。

具有磁矩的原子在不均匀的磁场中受到力的作用,原子束将发生偏转,并且发现原子磁矩的分量不是连续的,而是取分立的数值。I I Rabi 等大力改进了粒子束方法,引入共振方法,他们使粒子束首先通过不均匀磁场,然后再通过均匀的磁场,同时用一射频场照射均匀磁场中的粒子,在某一确定的频率处,粒子束吸收能量。I I Rabi 等用的是银原子束,通过观察代表核磁矩不同能量状态的粒子流变化的方法来检测跃迁。实际上这是人们第一次观测到核磁共振。

许多原子核具有固有的动量矩或自旋。决定这个动量矩数值的是分量 $I\hbar/(2\pi)$, 其中 I 是核自旋量子数,取整数或半整数,遵循一定规律,以后还要讲到, $\hbar$ 是普朗克常数。

$$\hbar = (6.626\,176 \pm 0.000\,036) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$\hbar/(2\pi) = (1.054\,588\,7 \pm 0.000\,005\,7) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

大家知道,具有矩为 $\frac{1}{2} \left(\frac{\hbar}{2\pi} \right)$ 的电子,其磁矩几乎准确地等于一个玻尔磁子 $\mu_B = \frac{eh/(2\pi)}{2m_e}$,

式中 e 是电子电荷, m_e 是电子的质量。 $\mu_B = (9.274\,078 \pm 0.000\,036) \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。如果认为电子的磁矩是由于电荷转动引起的有效电流产生的,那么,简单的经典计算表明,实际上磁矩应具有玻尔磁子量级的数值。因此,可以预期原子核的自旋应伴有磁矩,其量级的数值应为 $\frac{eh/(2\pi)}{2m_p}$, 对应地称之为核磁子 μ_N , m_p 是质子的质量。这一假设基本上是正确的,不过磁矩的数值并不是核磁子的整数倍。还应指出,由于质子的质量是电子质量的 1 836 倍,因此,核磁矩比电子的磁矩要小很多。还要强调指出,原子核的特性并不遵循经典理论,例如,中子几乎不带电荷,但中子有磁矩,而且是负的。对中子而言,自旋量子数 $I=1/2$, 磁矩 $\mu = -1.913\,15 \mu_N$ 。质子的自旋量子数 $I=1/2$, 磁矩 $\mu_p = 2.792\,85 \mu_N$ 。

在上述 I I Rabi 等的实验中,分子束经受交变电磁场作用,在某一特定频率处,藉助能量子的吸收或受激发射过程而引起分子的量子能级间的跃迁。如果核自旋量子数等于 I , 那么,每个能级在恒定磁场中将分裂为 $(2I+1)$ 个间隔相等的子能级。

许多原子核具有自旋动量矩 P , 按量子力学计算,原子核的自旋动量矩的数值为:

$$|P| = [I(I+1)]^{1/2} h / (2\pi) \quad (1.1-1)$$

式中 I 为原子核的自旋量子数,它表示原子核的固有特性,不同的原子核有不同的 I 值。 I 值只能取零、半整数和整数,而不能取其他数值。它与原子核的质量数 A 和质子数 Z 的奇偶有关。

如果质量数 A 是奇数,则核自旋量子数 I 是半整数: $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ 例如,对于只有一个质子的氢核 ^1H 来说, $I=1/2$;

如果质量数 A 和质子数 Z 都是偶数,则核自旋量子数 I 是零,例如,对于氧核 ^{16}O , $I=0$;

如果质量数 A 是偶数而质子数 Z 是奇数,则核自旋量子数 I 是整数,例如,对于氮核 ^{14}N , $I=1$ 。

原子核自旋动量矩的方向是量子化的,在空间某个方向(z 轴)的投影只能取一些不连续的数值。

$$P_z = mh / (2\pi) \quad (1.1-2)$$

式中 $m = I, I-1, \dots, -I$, m 称为原子核自旋磁量子数。因为 m 只能取 $2I+1$ 个数值,故 P_z 也只能取 $2I+1$ 个数值,这说明 P 在空间只有 $2I+1$ 个取向。

原子核自旋磁量子数 m 的最大值为 I , 因此原子核自旋动量矩在 z 轴方向投影的最大值为:

$$P_{z, \max} = Ih / (2\pi) \quad (1.1-3)$$

通常把这个原子核自旋动量矩投影的最大值称为核自旋。只有一个质子的氢核的自旋量子数 $I=1/2$, 它在空间只有两个取向,一个与 z 轴平行,另一个与 z 轴反平行。

原子核有自旋动量矩,也应有相应的磁偶极矩 μ , μ 和 P 有如下关系:

$$\mu = \gamma P \quad (1.1-4)$$

式中 γ 为磁旋比,按上式, $\gamma = \frac{\mu}{Ih/(2\pi)}$ 。质子的磁旋比为:

$$\gamma_p = (2.675\,221\,28 \pm 0.000\,000\,81) \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^2 / (\text{J} \cdot \text{s})$$

注意, $1 \text{ A} \cdot \text{m}^2 / (\text{J} \cdot \text{s}) = 1 \text{ T}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

核磁矩 μ 与自旋动量矩 P 既有以上关系, μ 的长度 $|\mu|$, μ 在 z 轴上的投影 μ_z 和最大投影 $\mu_{z, \max}$ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} |\mu| &= \gamma |P| = [I(I+1)]^{1/2} \gamma h / (2\pi) \\ \mu_z &= \gamma P_z = \gamma m h / (2\pi) \\ \mu_{z \max} &= \gamma I h / (2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (1.1-5)$$

以上三个量也可用核的 g 因子表示:

$$\left. \begin{aligned} |\mu| &= g \mu_N [I(I+1)]^{1/2} \\ \mu_z &= m g \mu_N \\ \mu_{z \max} &= I g \mu_N \end{aligned} \right\} \quad (1.1-6)$$

通常把原子核磁矩 z 分量的最大值 $\mu_{z \max}$ 称为原子核磁矩。如果以核磁子 μ_N 为单位, 原子核磁矩的数值就等于 $I \cdot g$ 。质子的朗德因子 $g_P = \frac{\gamma_P h / (2\pi)}{\mu_N} = 5.58569$ 。

氢核即质子的磁矩为:

$$\begin{aligned} \mu_P &= I g_P \mu_N = 2.79285 \mu_N \\ &= (1.41060761 \pm 0.00000047) \times 10^{-26} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(二) 核磁共振

如果核磁矩的一个确定分量之最大值等于 μ , 则在恒定磁场 B 中最高和最低子能级之间的间隔是 $2\mu B$; 粗略地说, 这两个能级对应于核磁矩在磁场方向上和与磁场相反的方向上的投影。因此, 相邻子能级的间距为 $\mu B/I$ 。 $\mu B/I$ 常写成 $g \mu_N B$, μ_N 是核磁子, $g = \mu / (I \mu_N)$ 叫分裂因子, 或称为朗德因子、核的 g 因子, 记作 g_N 。若要能量量子引起相邻能级之间的跃迁, 电磁场的频率 f 必须满足以下关系式

$$hf = \frac{\mu B}{I} = g \mu_N B \quad (1.1-7)$$

因此, 可以引起子能级间跃迁的电磁场量子的频率等于 $\mu B / (I h) = g \mu_N B / h$ 。

因此我们说, 核磁共振(NMR)是一种量子效应。当具有非零的磁矩的原子核置于恒定的外磁场中时, 能量简并解除, 分裂为一系列子能级。如有交变电磁场作用, 则可发生共振吸收, 共振频率随外部恒定场而变化, 并且对不同的磁性核具有不同的共振频率, 即吸收是有选择性的。

科学家们力图用固体或液体进行核磁共振研究, 而不是用原子或分子束, 但直到1945年底才获得成功^{[8]、[9]、[10]}。

位于美国东海岸的麻省理工学院的 E M Purcell、H C Torrey 和 R V Pound 小组用富含质子的石蜡作样品, 观测到了射频能量的共振吸收, 求得质子的核磁矩为 $2.75 \mu_N$, 而用分子束法求得的是 $2.7896 \mu_N$, 结果相当地吻合。使用的恒定磁场为 7100 Gs , 共振频率为 29.8 MHz 。在1946年《物理学评论》上报导了 E M Purcell 等的实验结果, 题目是:《固体中核磁矩的共振吸收》(Phys. Rev., 1946, 69:37)。美国西海岸斯坦福大学的 F Bloch、W W Hansen 和 M Packard 小组用富含质子的水作样品, 置于强的恒定磁场中产生一个小的顺磁磁化, 在垂直于此磁场的方向上施加一交变磁场, 而在另一垂直方向上的检查线圈接收感应信号, 改变磁场 B 的大小, 得到相应的共振频率 f , B/f 比值是相同的, 与 Rabi 等在1939年用粒子束得到的质子的 g 值结果相符。在1946年同一卷《物理学评论》上报导了 F Bloch 等的实验结果, 题目是:《核感应》(Phys. Rev., 1946, 69:127)。

F Bloch 小组和 E M Purcell 小组, 几乎同时而独立的发现, 是 NMR 发展中的里程碑, 从此, NMR 在理论、实验技术和仪器装备各方面获得了蓬勃的发展。F Bloch 和 E M Purcell 获得1952年诺贝尔物理学奖。NMR 技术在物理学、化学、生物学、医学、石油、化工等工业领域以

及地学(主要是地球物理学)中均得到了广泛的应用,而且其理论与技术还在不断蓬勃地发展之中。关于在地球物理学中的应用,我们将在第二节中较详细地叙述。

在磁共振技术中,通常要应用一个恒定磁场,在恒定磁场 B_0 中,核自旋角动量矢量可在不同的量子态中。在每一状态下,自旋矢量有不同的取向,使其平行于场的分量取值为 $mh/(2\pi)$, $m = -I \dots +I$, 每一步为 1。因此,对于 $I = 3/2$, m 取 $-3/2, -1/2, +1/2, +3/2$ 。数字 m 可用作区分不同量子状态及其能量的标记。对于只有一个质子的氢核, $I = 1/2, m = \pm 1/2$, 故只有两个能级, $I = 3/2$ 和 $I = 1/2$ 的能级见图 1-1-1 和图 1-1-2。

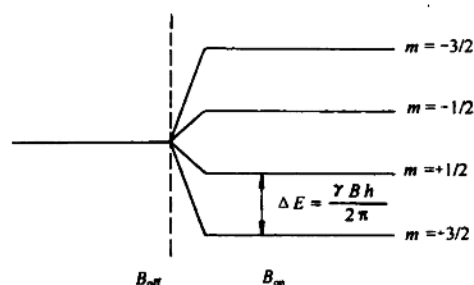


图 1-1-1 核自旋 $I=3/2$ 在磁场中的能级

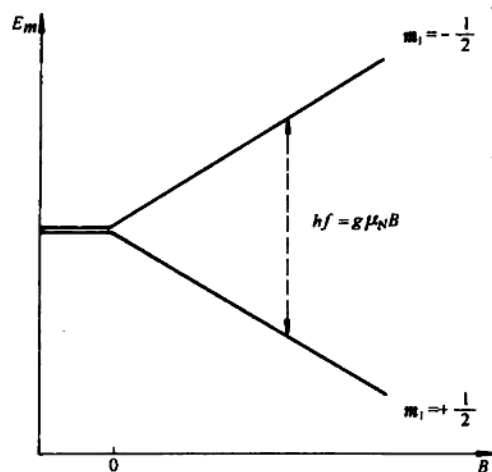


图 1-1-2 氢核(质子) $I=1/2$ 在磁场中的能级

由经典电磁学理论可知,在磁场 B 中的一个磁矩 μ 的能量为 $-\mu \cdot B$, 因此第 m 态的能量为:

$$E_m = -B\gamma m\hbar/(2\pi) \quad (1.1-8)$$

式中 γ 为磁旋比, $\gamma = ge/(2m_p)$ 。能级之间的跃迁,需遵守选择定则 $\Delta m = \pm 1$, 即只能在相邻能级之间跃迁。相邻能级之间的能量差为:

$$\Delta E = B\gamma\hbar/(2\pi) \quad (1.1-9)$$

爱因斯坦关系式告诉我们,当外加的电磁辐射圆频率 $\omega (= 2\pi f)$ 满足

$$\Delta E = hf = \hbar\omega/(2\pi) \quad (1.1-10)$$

时,会产生能级之间的跃迁,即发生共振。很显然,共振的条件是:

$$\omega = \gamma B \quad (1.1-11)$$

可见磁旋比 γ 是一个很重要的常数,不同的核子,有不同的 γ 值,见表 1-1-1。

还要注意, (1.1-11) 式中,没有包括量子理论中的一个重要物理量普朗克常数,说明这个结果与经典景象密切相关。我们将看到,由经典描述也可得到同样的结果(见本节二中的 (1.1-16) 式)。研究两个公式(经典的和量子理论的)可加深对问题的理解。

现在核磁共振波谱仪中使用强磁铁,磁场可高达十几特斯拉(几十万高斯),对 ^1H 来说,共振频率达到几百兆赫兹(MHz),甚至接近 1 000 MHz。作为对比,地磁场约为 0.5 Gs, 质子共振频率约为 2 kHz。共振频率低,灵敏度低,共振信号微弱,需用高科技方法才能拾取到有用信号。