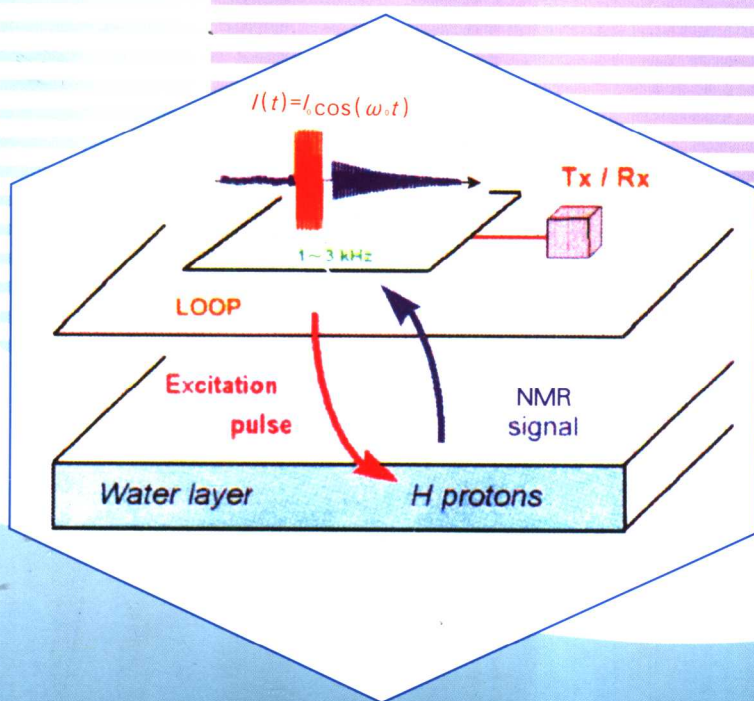


资助出版

中国地质大学(武汉)“211”工程学术著作出版基金

李振宇 唐辉明 潘玉玲 编著



国家自然科学基金项目:利用 NMR 研究三峡库区典型滑坡地下水变化特征及稳定性(40072085)

国家 863 计划项目:考古地球物理综合探测技术(2002AA132012)

资助出版

中国地质大学(武汉)“211”工程学术著作出版基金

地面核磁共振方法 在地质工程中的应用

李振宇 唐辉明 潘玉玲 编著

中国地质大学出版社

内容简介

本专著是近几年来地面核磁共振(SNMR)方法科研组研究工作成果的总结,系统地论述了核磁共振的基础理论、地面核磁共振方法的原理及数据采集、处理和解释的方法、技术;同时,通过应用实例分析,例如,利用这种新方法在探测地下水资源、三峡库区滑坡稳定性监测、秦始皇陵考古和堤坝无损探测以及地下水污染监测等成果,展示了 SNMR 方法的应用效果;从国内外应用新方法的成功实例对比中,总结了经验,并指出了扩大应用 SNMR 方法的研究方向和发展前景。

本著作理论与实践紧密结合,内容丰实、条理清晰;理论深度、广度适宜,便于读者学习、研究原理新颖的 SNMR 方法。

本著作谨献给从事地质工程工作的同行们。同时,可以作为高等院校本科生、研究生的教材或参考书,也可以供科研单位的同行们在工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

地面核磁共振方法在地质工程中的应用/李振宇,唐辉明,潘玉玲编著. —武汉:中国地质大学出版社,2006. 12

ISBN 7 - 5625 - 2107 - 7

I. 地…

II. ①李…②唐…③潘…

III. 地面-核磁共振-地质工程-应用

IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 072529 号

地面核磁共振方法在地质工程中的应用

李振宇 唐辉明 潘玉玲 编著

责任编辑:王凤林

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail: cbb @ cug. edu. cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:240 千字 印张:9.375 彩页:16

版次:2006 年 12 月第 1 版

印次:2006 年 12 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 7 - 5625 - 2107 - 7/P · 677

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

核磁共振技术是当前世界上的尖端技术,地面核磁共振方法是目前直接探查地下水的地球物理新方法。这种方法为解决一系列地质工程问题提供了崭新的技术和手段。

在我国,利用新方法在探测地下水资源、三峡库区滑坡稳定性监测和秦始皇陵考古无损探测以及地下水污染监测等工作中,显示出地面核磁共振方法的特色突出,应用效果明显,在地质工程工作中,有着广阔的应用前景和发展空间。

希望继续努力,积极扩大新方法的应用,不断总结经验,提升地质工程的技术水平,为我国国民经济的发展做出更大的贡献。

中国工程院院士: 刘彦润

2006年5月5日于武汉

前言

水是生命之源,是一切生物和人类赖以生存和发展的基础。水是自然环境的重要组成部分,水环境是生态系统中最为活跃的子系统。同样,地质环境是自然环境的重要组成部分,故水环境与地质环境关系密切,即地质环境给水环境乃至水资源以形成条件和储存空间以及运移通道。地质工程的工作任务之一就是研究和解决与地质环境和水环境有关的一系列工程问题。水既造福于人类,又是产生地质灾害的重要因素。

近年来,水环境乃至水资源呈现日趋恶化的趋势

地球上水资源中有 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却只占全部水资源的 3%。

随着人类社会的进步和经济的发展,世界人口增加对淡水用量的激增,加之水资源浪费与污染等,淡水越来越难以满足需要。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,使下游的用户缺水。此外,许多地表水由于污染无法使用,人们转而大量开采地下水。在 20 世纪 80~90 年代,全球地下水开采量为每年 $5\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中开采量每年大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有 10 个国家。由于对地下水的过量开采,导致了许多地方地下水资源正在面临枯竭。

我国水环境和水资源形势严峻

我国水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居世界第 6 位。但人均占有量仅 $2\,300 \text{ m}^3$,不足世界人均值的 1/4,被列为世界 13 个人均水资源缺乏的国家之一。不仅如此,我国属于季风气候,水资源的时空分布极不均匀,呈现南多北少、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。

近年来,我国城市地下水污染状况日趋严重,从我国 118 个大中城市的地下水监测资料分析表明,我国城市地下水已普遍受到污染。其中地下水受到较重污染的城市占 64%;轻污染的城市约占 33%。因污染给我国水资源每年造成的经济损失约 377 亿元,其中地下水污染占 1/2 左右。

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance,缩写为 NMR)技术是当前世界上的尖端技术,地面核磁共振(SNMR)方法是直接探查地下水的地球物理新方法,是 NMR 技术在地学中应用的新领域,开创了应用地球物理方法直接找水的先河,为解决一系列地质工程问题提供了崭新的技术和手段。

自从中国地质大学(武汉)1997 年年底引进了中国第一套核磁共振找水仪器——核磁感应系统(Nuclear Magnetic Induction System,缩写为 NUMIS)以来,结合我国实际,利用并开发了 SNMR 方法,充分发挥了新方法的优势,研究并总结出一套探查地下水和解决与水环境有关的一系列水文地质和工程地质问题的模式,取得了可喜的科研成果,直接支援了国家经济建设。

利用 SNMR 方法探测地下水的水源地和圈定淡水远景区

利用 SNMR 方法先后在湖北、湖南、河北、福建、内蒙古、新疆等 12 省(区)开展了找水工

作,在复杂的水文地质条件下探查到了地下水,在前人认为是无水区或常规物探找水方法难以奏效的地方找到了地下水的水源地。例如,在我国岩溶石山地区探查到地下水;在风化的花岗岩中找到了地下水;为长江三峡水电站输送电网的变电站(湖北和湖南)提供了水源地;为开发利用地下热水资源(福建省安溪县)提供了后备基地;为某油田圈定了地下淡水资源远景区等。

可见,SNMR方法已在我国地下水资源的勘查中取得了明显的地质效果。

利用 SNMR 方法研究滑坡中地下水变化特征及滑坡稳定性

滑坡灾害给人民生命财产及工程建设带来极大的危害,因此对滑坡的探测与研究是国家政府部门和科学工作者共同关注的问题。特别是三峡水库蓄水后,由于地下水位的抬高,崩、滑体中的软弱层遇水易软化、崩解;当水库运行时,库水位的变动可以产生巨大的动水压力,而导致崩塌或滑坡;特别是对地下水位在滑动面附近的滑坡将影响更大。基于以上原因,研究影响滑坡的最重要因子——地下水及其与滑坡变形的关系和定量表现具有十分重要的意义。

在国家自然科学基金资助下,2001年开始,中国地质大学(武汉)首次利用 SNMR 方法对滑坡问题进行研究,并在湖北省巴东县赵树岭滑坡进行了3年的监测(丰水期和枯水期)。赵树岭滑坡是三峡库区典型的大型滑坡,其稳定性直接关系到巴东县城的安全、三峡水库的安全运行和长江航运的畅通。为了正确评价赵树岭滑坡的稳定性,必须确定出滑坡的岩土体结构和地下水特征,建立符合实际的滑坡模型。我们采用了法国生产的核磁感应系统 NUMIS 对该滑坡进行了3年的监测研究,取得了较好的应用效果,实践证明了 SNMR 方法对滑坡监测的有效性和可行性,扩大了核磁共振技术应用的领域,提供了一种研究滑坡的新方法,为减少地质灾害损失、促进人与自然和谐发展作出了贡献。

SNMR 方法在秦始皇陵考古中的作用

我国是世界闻名古国,古文物众多,考古及文物保护任务繁重。考古地球物理在我国的发展,与考古和文物保护任务密切相关。

秦始皇陵考古是中国现代考古史乃至世界考古史的重大事件和重大成就。40年来,兵马俑、铜车马、石铠甲、百戏俑等多次重大的考古发现轰动全国、震惊世界。秦始皇陵的考古调查、发掘和研究成果,补充和改写了中国历史,为中国考古学、中国古代帝陵制度、中国科技史、中国艺术史等学科的研究提供了许多重要的实物资料。

利用 SNMR 方法进行考古,是2003年 NMR 技术应用的新进展,为考古无损探测提供了新技术和新手段。与其他考古物探方法资料相结合,在确定地宫就在封土堆下、地宫的完好性(没有进水)和排水渠依然在起作用方面,突出了 SNMR 方法的特点和贡献。同时,利用 SNMR 方法直接找水的特点,在区分电阻率法的异常、佐证自然电场法异常性质方面,取得了最佳的效果。电阻率方法与 SNMR 方法相结合,可以促使考古无损探测取得更好的考古效果。

SNMR 方法在环境质量检测——地下水污染监测方面的试验研究

近年来,我国城市地下水污染状况日趋严重,地下水污染的主要原因是各种污染源向地下渗漏引起的,其渗漏污染大户有垃圾填埋场、石油加油站及各类输(储)油管(罐)和各种农业污水沟塘等。

面对城市地下水污染状况日趋严重的情况下,应采用新方法和新技术加强对地下水污染的检测(监测)工作。SNMR 方法直接探查地下水并检测地下水污染是 NMR 技术应用的新领域,是最近出现的直接测定物质成分进行无损探测的地球物理新方法。

SNMR 方法具有直接找水、解释结果具有量化的特点,不打钻便可以提供含水层的特性信息,为探测地下水及其污染程度提供了新参数。以其直接找水的特点判断其他物探方法异常性质,以其提供的地下水的核磁共振响应参数,获取与质子所处的物理和化学环境有关的信息,判断地下水的污染程度,因此,SNMR 方法在地下水污染的监测工作中应该大有作为。

2000 年,潘玉玲、张昌达等编著的《地面核磁共振找水理论和方法》专著是中国地质大学(武汉)“211 工程”建设中众多成果中的一个,该专著对我国利用地面核磁共振方法探测地下水和人才培养起到积极作用。在其后的几年里,对 SNMR 方法的应用理论研究更加深入,对方法应用的适用性的理解和把握更加准确,因此,扩大了 SNMR 方法的应用领域,成为解决地质工程问题的无损探测的新手段,大大提升了地质工程的技术水平。在这种情况下,SNMR 方法的研究者们决心撰写《地面核磁共振方法在地质工程中的应用》专著。

本专著是近几年来研究工作的总结和提高,尽量做到理论与实践结合,力求内容丰富、条理清晰;比较系统地论述了 NMR 基础理论、SNMR 方法的原理及数据采集、处理和解释的方法、技术;理论深度、广度适宜,便于读者学习、研究原理新颖的 SNMR 找水方法;同时,通过国内外应用实例分析,展示了 SNMR 方法的应用效果;从中外找水成功实例对比中,总结了经验,并指出扩大应用 SNMR 方法的研究方向和发展前景。

中国地质大学(武汉)核磁共振科研组的有关成员参与了本专著的编写工作。编写内容,由作者们共同讨论和多次研究,分工编写,由李振宇博士统编。

在开展 SNMR 方法工作和本著作编写过程中,得到领导关心、同事支持和友人相助,在此表示最真诚的感谢!

感谢中国地质大学(武汉)校、院、系领导的关怀和大力支持。

感谢核磁共振科研组的同事们的相互支持和通力合作。

感谢张昌达教授、刘士毅高级工程师的大力支持和帮助。

感谢参加核磁共振科研和生产实践的博士、硕士研究生的支持。

感谢法国 IRIS 公司总裁 Jeen BERNARD 先生的及时信息交流。

感谢关心和支持本专著出版的所有同事、朋友的大力支持和帮助。

由于水平有限,有不当之处,请读者批评指正。

作者

2006 年 4 月 27 日

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 地面核磁共振发展简史	(1)
一、核磁共振现象的发现	(1)
二、核磁共振技术的应用和发展	(1)
三、核磁共振技术在地学领域的应用概况	(2)
四、地面核磁共振方法探测地下水的发展与应用	(2)
第二节 地面核磁共振方法特点	(4)
第三节 本书的内容概要	(5)
主要参考文献	(6)
第二章 地面核磁共振方法的理论基础和方法原理	(7)
第一节 原子核的特性	(7)
一、原子核的质量和电荷	(7)
二、原子核的动量矩	(7)
三、原子核的磁矩	(9)
四、原子核的能级	(10)
第二节 核磁共振原理	(13)
一、稳定磁场的作用	(13)
二、弛豫作用	(15)
三、交变磁场的作用	(21)
第三节 地面核磁共振方法探测地下水的原理	(24)
第四节 地面核磁共振方法测量参数和反演得到的水文地质参数	(26)
一、NMR 信号初始振幅 E_0	(26)
二、NMR 信号平均衰减时间 T_2^*	(26)
三、NMR 信号纵向弛豫时间 T_1	(28)
四、NMR 信号初始相位 φ_0	(29)
主要参考文献	(29)
第三章 地面核磁共振仪器	(30)
第一节 地面核磁共振仪器发展概况	(30)
一、前苏联科学家最早研制出核磁共振层析找水仪	(30)
二、法国成为研制 MRS 仪器的第二个国家	(30)
三、中国引进和成功地利用核磁共振找水仪器	(30)

第二节 地面核磁共振系列仪器设备性能及原理	(31)
一、地面核磁感应系统的原理及其组成	(31)
二、地面核磁共振仪器组成部件和其他设备	(32)
三、地面核磁共振仪器的主要技术指标	(33)
第三节 地面核磁共振仪器的使用和维护	(35)
一、选择激发频率	(35)
二、线圈形状的选择和敷设	(36)
三、仪器各部分的连接	(37)
四、测量之前选择有关的技术参数	(38)
五、测量步骤	(39)
六、SNMR 方法数据的预处理	(41)
七、SNMR 方法数据反演解释	(42)
八、地面核磁共振仪器的维护	(46)
主要参考文献	(47)
第四章 利用地面核磁共振方法研究滑坡中地下水特征与滑坡稳定性	(48)
第一节 概 述	(48)
一、问题的提出	(48)
二、滑坡的地球物理特征与传统地球物理探测方法	(49)
三、利用 SNMR 方法研究滑坡的意义	(49)
第二节 利用地面核磁共振方法研究滑坡中地下水特征与滑坡稳定性的可行性	(50)
一、滑坡稳定性与地下水的关系	(50)
二、SNMR 方法研究滑坡的特殊性与特殊要求	(51)
三、SNMR 方法研究滑坡中地下水时间和空间分布特征的可行性	(52)
四、求取与滑坡稳定性分析有关的参数	(52)
五、基于 SNMR 方法数据建立滑坡模型的可行性	(54)
六、基于 SNMR 方法的地球物理方法探测滑坡的工作模式探讨	(54)
第三节 研究滑坡的地面核磁共振方法的有关技术探讨	(56)
一、概述	(56)
二、研究滑坡的 SNMR 方法的有关技术	(57)
三、测区的干扰类型及特征	(57)
四、压制电磁噪声干扰的方法研究	(59)
五、SNMR 方法研究滑坡的反演方法	(62)
六、高密度电阻率法及其在滑坡研究中的作用	(63)
第四节 地面核磁共振方法研究赵树岭滑坡中地下水分布特征	(67)
一、概 述	(67)
二、赵树岭滑坡 SNMR 方法工作成果	(68)
三、赵树岭滑坡中地下水空间分布特征	(72)
四、赵树岭滑坡中地下水随时间变化的特征	(74)

第五节 地面核磁共振方法研究赵树岭滑坡的稳定性	(75)
一、引 言	(75)
二、基于地面核磁共振方法的滑坡稳定性分析	(76)
三、赵树岭滑坡的稳定性预测	(78)
四、利用 SNMR 方法对滑坡稳定性研究工作的几点认识	(88)
主要参考文献	(89)
第五章 地面核磁共振方法在水文地质工作中的应用	(92)
第一节 地面核磁共振方法野外施工前的准备	(92)
第二节 基于地面核磁共振方法的地下水探测工作模式	(93)
一、建立工作模式的原则	(93)
二、基于 SNMR 方法的地下水探测工作模式	(95)
第三节 我国应用地面核磁共振方法探测地下水的实例	(95)
一、找到了优质的岩溶水	(97)
二、在风化的花岗岩中找到了地下水	(98)
三、为长江三峡水电站输送电网的一些变电站解决水源地	(98)
四、为开发利用地下热水资源提供后备基地	(101)
五、在干旱地区探查地下水	(102)
第四节 区域性水文地质调查工作模式和应用效果	(104)
一、地下淡水普查的地球物理方法工作模式概述	(105)
二、基于物探方法的工作模式普查地下淡水资源	(105)
第五节 国外应用地面核磁共振方法探测地下水	(108)
一、俄罗斯已将 SNMR 方法作为常规的物探找水方法	(108)
二、法国使用系列核磁共振找水仪器探查地下水	(110)
主要参考文献	(113)
第六章 地面核磁共振方法在考古工作中的应用	(114)
第一节 概 述	(114)
一、秦始皇陵以往考古工作概况及其文物遗址考古现状	(114)
二、秦始皇陵考古与勘查的意义	(116)
三、综合物探方法工作布置与工作方法	(117)
第二节 秦始皇陵工区概况和地面核磁共振方法的工作布置	(119)
一、工区概况	(119)
二、秦始皇陵工区 SNMR 方法工作布置	(121)
第三节 地面核磁共振方法的资料反演解释与探测成果	(122)
一、SNMR 方法资料的预处理	(123)
二、SNMR 方法资料反演解释方法	(123)
三、SNMR 方法的主要探测成果	(123)
第四节 物探方法在秦始皇陵考古探查工作中的作用	(127)

一、SNMR 方法的作用	(127)
二、对物探方法在秦始皇陵地宫探测成果的新认识	(127)
主要参考文献	(130)

第七章 地面核磁共振方法在堤坝安全检测和环境污染监测中的应用 (131)

第一节 地面核磁共振方法在堤坝安全检测中的应用	(131)
一、我国堤坝现状	(131)
二、SNMR 方法检测堤坝隐患的可行性	(131)
三、应用实例	(132)
第二节 地面核磁共振方法在地下水污染监测中的应用	(134)
一、SNMR 方法探查地下水污染的理论依据	(134)
二、应用实例	(134)
三、SNMR 方法在地下水污染探测工作中的应用前景	(137)
第三节 关于应用地面核磁共振方法的建议	(137)
主要参考文献	(138)

第一章 绪 论

核磁共振,英文是 Nuclear Magnetic Resonance,简写为 NMR。

科学技术的迅速发展和进步,推动和促进了地球物理学方法和技术的不断发展和进步。核磁共振是物理学最新研究成果之一,NMR 技术是当今世界的尖端技术,将该技术应用到探测地下水信息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探测地下水的先河。

第一节 地面核磁共振发展简史

1946 年,F Bloch 小组和 E M Purcell 小组几乎同时而独立地发现了物质中的核磁共振现象,这是 NMR 技术发展中的里程碑,F Bloch 和 E M Purcell 因此获得 1952 年诺贝尔物理学奖。

一、核磁共振现象的发现

位于美国东海岸的麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology)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 $2.75\mu_N$ (μ_N 为核磁子),而用分子束法求得的是 $2.7896\mu_N$,结果相当吻合。使用的稳定磁场强度为 $7100 \times 10^{-4} \text{T}$,共振频率为 29.8MHz。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(Stanford University)的 F Bloch、W W Hansen 和 M Packard 小组用富含质子的水作样品,置于强的稳定磁场 B_0 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测线圈接收感应信号。改变磁场 B_0 的大小,得到相应的共振频率 f , B_0/f 比值是相同的,与 Rabi 等在 1939 年用粒子束得到的质子朗德因子 g 值相符。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)。

二、核磁共振技术的应用和发展

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、试验进入到应用与开发阶段,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 测井等)。

20 世纪 60 年代,科学家利用 NMR 技术,分析检测到了动物体内分布的氢、氮、磷的 NMR 信号,从而开始了对生物组织的化学分析研究工作。

1971 年,美国纽约州立大学的 R Damadian 在《科学》杂志上发表了“NMR 信号可以检测疾病”以及“癌组织中的 T_2 时间延长”等论文,为 NMR 成像技术在生物医学中的研究奠定了

理论基础。

1972年,美国纽约州立大学的化学家 P C Lauterbur 提出应用 NMR 信号可以建立图像,并将这种方法称为“共振摄影法”。

1973年, P C Lauterbur 教授又在《自然》杂志发表论文,为 NMR 成像技术的出现和发展拉开了序幕。与此同时,科学家又对实现 NMR 成像的各种具体方法进行了广泛的研究。NMR 的理论和技術还在不断完善和发展,其应用领域还在不断扩大。

三、核磁共振技术在地学领域的应用概况

当 NMR 技术在生物、化学、物理学和医学等领域得到广泛应用的同时,在地球科学领域中也得到有效的运用。其主要发展阶段和应用领域简述如下:

最早在 1954 年, M Packard (斯坦福大学 F Bloch 小组成员) 和 R H Varian 成功地观测到了地磁场中水中质子的自由核感应(称为自由感应衰减, Free Induction Decay, 缩写为 FID) 信号, 即 FID 信号, 此后 Varian 公司很快就研制出了准确度高、性能稳定的质子旋进磁力仪, 包括地面和航空质子磁力仪, 它被广泛地用于地质与矿产资源的勘查。直到如今, 这种类型的磁力仪仍是磁场测量的主要仪器。

NMR 技术在地球科学中的第二项应用是核磁共振测井及与之相关的随钻和室内 NMR 岩心分析测试。这种测井方法经过近 40 多年的发展, 目前能可靠地评价砂岩与复杂储层的渗透率和孔隙结构、可采储量、剩余油分布和流体的饱和度以及粘度等, 也是石油测井技术的一个新热点。

NMR 技术在地球科学中的第三项应用就是核磁共振找水。NMR 技术在地球物理学方面的最新应用是成功开发了地面核磁共振 (Surface Nuclear Magnetic Resonance 缩写为 SNMR) 找水方法。由 SNMR 方法测得的 FID 信号 (NMR 信号) 振幅和弛豫时间, 经过反演解释可以得到地下不同深度处各含水层的单位体积含水量 (有效孔隙度) 及渗透率等数据参数。SNMR 找水方法是地球物理方法中唯一直接勘查水资源的方法。这种高新技术在理论、技术、仪器、反演方法及具体应用等方面有较宽广的研究开发空间, 值得投入力量进行工作。本书的宗旨之一就是希望更多的地学工作者和研究人员来关心、研究这一科技含量高、应用前景好的地球物理新方法。

四、地面核磁共振方法探测地下水的发展与应用

应用 NMR 技术探查地下水, 使地学, 特别是使地球物理学的发展进入了一个新阶段。

1978 年, 前苏联科学院新西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所 (ICKC) 的一个科学家小组研制成一台 NMR 找水仪, 取名 Hydroscope, 这是世界上第一台在地磁场中用核磁共振方法探查地下水的专业仪器。他们应用这种仪器在前苏联各地、非洲、澳大利亚、欧洲的一些国家和地区以及在中国进行了试验和找水工作。1994 年法国地调局 (BRGM) 与 ICKC 合作, 由法国 IRIS 公司研制成核磁感应系统 (NUMIS) 的找水仪器。1999 年 NUMIS 升级为 NUMIS^{Plus}, 2003 年又研制成轻便型的 NUMIS^{Lite}。

(一) 中国学者曾进行过 NMR 技术找水的初步试验

1965 年夏, 中国张昌达、崔岫峰等曾进行过 NMR 技术找水的初步试验。他们在一个水库的下游进行现场测试, 采用交流极化方式, 即在敷设的大线圈内通交变电流, 交变电流的频

率等于质子在当地地磁场中旋进(共振)频率。由于当时技术条件限制,未接收到共振信号,但取得了一些经验,现在看来,他们采用的基本技术方案是正确的。

(二)利用核磁共振技术进行找水的首创国是前苏联

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。他们用了三年时间研制成了原型仪器,在其后十年间对仪器进行改进,开发出了世界上第一台在地磁场中测定 NMR 信号的仪器,称为核磁共振层析找水仪(Hydroscope),该仪器作为新方法探测地下水的重要手段,并于 1988 年在前苏联和英国申请了专利。在此期间他们进行了仪器改进和解释方法的研究,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。他们根据在中亚地区等已知 400 多个水文钻孔附近进行的对比试验结果,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,取得了世界领先水平的研究成果。与此同时,他们还在澳大利亚、以色列等国家(地区)先后也进行了找水实践和研究,证明了地面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,俄罗斯科学院西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所与俄罗斯“中央地质”生产地质联合体共同创办水文地质层析成像公司,开展水文、工程地质和生态学方面的业务活动,在各种水文地质条件地区进行了现场作业,例如,在葡萄牙、西班牙、沙特阿拉伯及中国辽宁、新疆等国家和地区的应用,进一步检验和证实了该方法的找水效果。

(三)法国研制新型的 NMR 找水仪

1992 年俄罗斯的 Hydroscope 找水仪在法国进行了成功演示试验。

1994 年法国地调局(BRGM)IRIS 公司购买了俄罗斯找水仪专利,并与 ICKC 合作,开始研究新型的 NMR 找水仪——核磁感应系统(Nuclear Magnetic Induction System,缩写为 NUMIS),从此,法国成为研制 NMR 找水仪的第二个国家,并于 1996 年春商品型 NMR 找水仪问世(生产出 6 套 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 NUMIS 系统重量、制造工艺和抗干扰能力等方面有许多改进。到目前为止,拥有 NUMIS 系统的国家有俄罗斯、法国、中国和德国。

1999 年 IRIS 公司将 NUMIS 系统(勘探深度为 100m)升级为 NUMIS^{Plus}(勘探深度为 150m)。拥有 NUMIS^{Plus}系统的国家有法国、中国、毛里塔尼亚和伊朗等国家和地区。

(四)我国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 探测地下水的信息。

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—1996 年航空物探和遥感中心(简称航遥中心)、中国地质大学完成了“核磁共振探测地下水信息方法效果的预研究”项目。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,确认了核磁共振方法探测地下水方法的应用效果。

到目前为止,我国拥有 NUMIS 系统三套、NUMIS^{Plus} 系统三套。

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。这是我国引进的第一套 NUMIS 系统。中国地质大学(武汉)NMR 科研组利用 SNMR 方法成功地在湖北、湖南、河北、福建、内蒙古、新疆等 12 省(地区)进行了找水实践,并在上述缺水地区找到了地下水,研究成果填补了我国用 NMR 技术直接找水的空白,使我国跃居使用核磁共振技术找水的世界先进国家行列。近年来,我们又首次将 NUMIS 系统用于滑坡监测、考古研究,开辟了 SNMR 方法应用的新领域。

第二节 地面核磁共振方法特点

地面核磁共振(SNMR)方法是探测地下水的地球物理新方法,也称之为磁共振测深(Magnetic Resonance Sounding,缩写为 MRS)。两种叫法是从不同方面给予定名的,前者从 NMR 技术应用空间和领域,很好区分了医学核磁共振成像(MRI)和核磁共振测井;后者从方法本身特点考虑,同时也避免了人们谈“核”色变之心理。新方法的两种表示,其实质是一样的。

SNMR 方法具有以下特点:

(一) SNMR 方法利用最先进的找水仪

SNMR 方法的找水仪是输出功率高、接收灵敏度高并由 PC 机控制的当今世界上最先进的直接探测地下水的地球物理仪器。

(二) 直接找水

在传统的物探找水的诸方法中,电法勘探在地下水勘查中几乎承担了 80% 的工作量,成为配合水文地质工作的主要手段。因此,现以直接找水的 SNMR 方法与间接找水的电阻率垂向电测深(VES)进行对比(表 1-1),以便突出 SNMR 方法的特点。

表 1-1 SNMR 与 VES 方法对比表

比较内容	SNMR 方法	VES 方法
原理(方法的物性前提)	原子核弛豫性质差异	导电性差异
场的激发方式	线圈中通入交变电流脉冲: $I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t)$	通过电极接地供入稳定或交变电流
加大深度的可变参数	改变激发脉冲矩 $q = I_0 t$, I_0 为脉冲电流幅值, t 为脉冲电流持续时间	改变供电电极距 ($AB/2$)
测量方式与测量参数	脉冲间歇期间用线圈接收 NMR 信号: E_0, φ_0, T_2^*	在供电期间测量电位差、电流,测得视电阻率 ρ_s
反演后可提供的参数	各含水层的单位体积含水量、深度和厚度以及提供平均孔隙度的信息	地下岩层的电阻率,即电性结构
找水时的主要干扰	电磁噪声、局部磁性不均匀	地形、局部电性不均匀体
工作人员	2 人,操作员、物探工程师	至少 5~6 人,劳动强度大

从表 1-1 可见, SNMR 方法与 VES 在方法原理、野外数据采集方式、反演后提供的参数、主要干扰等方面均有明显差别。SNMR 方法探测地下水方法原理决定了该方法能够直接找水, 特别是找淡水。在该方法的探测深度范围内, 地层中有自由水存在, 就有 NMR 信号响应, 反之, 就没有响应; SNMR 方法受地质因素影响小。所以, 可以利用上述优点来区分间接找水的电阻率法和电磁测深法视电阻率的异常性质。例如, 一些岩溶发育区, 特别是西南岩溶石山缺水地区, 当溶洞、裂隙被泥质充填或含水时, 视电阻率均显示为低阻异常, 是泥是水难以区分。SNMR 方法不受泥质充填物干扰, 是水就有 NMR 信号。此外, 当淡水电阻率与其赋存空间介质的电阻率无明显差异时, 在这种情况下, 电阻率法找水是无能为力的, 而 SNMR 方法却能够直接探测出淡水的存在。

由表 1-1 可见, SNMR 方法探测地下水时的测量参数有 NMR 信号初始振幅 E_0 、初始相位 φ_0 、平均衰减时间 T_2^* 。这些参数的变化直接反映出地下含水层的赋存状态和特征。

SNMR 方法的每个测深点都有一条 E_0 随 q 值变化而形成的测深曲线—— $E_0 - q$ 曲线(原始资料)。对该曲线进行解释后就可得到该测深点探测范围内的水文地质参数。每个测深点都有一条 φ_0 随 q 值变化而形成的 $\varphi_0 - q$ 曲线, NMR 信号的初始相位 φ_0 反映地下岩石的导电性。

每个激发脉冲矩 q 均可以得到一条 E_0 随时间按指数规律变化的衰减曲线—— $E_0 - t$ 曲线。由此曲线可以求出该 q 值探测深度内含水层的 T_2^* 。 T_2^* 值大小可给出含水层类型(平均孔隙度)的信息。

国内外的研究、统计规律表明, 自由水和束缚水的 T_2^* 值是不同的, 自由水的 T_2^* 变化范围为 $30\text{ms} < T_2^* < 1000\text{ms}$ 。而束缚水为 $T_2^* < 30\text{ms}$ 。由于 NMR 找水仪的交变电流脉冲的间歇时间是 30ms , 因此, NMR 找水仪接收不到束缚水的 NMR 信号。

(三) 反演解释具有量化的特点, 信息量丰富

对 SNMR 方法采集到的核磁共振信号反演解释后, 可以得到某些水文地质参数和含水层的几何参数。在该方法的探测深度范围内, 可以给出定量解释结果, 不打钻就可以确定出各含水层的深度、厚度、单位体积含水量, 并可提供含水层平均孔隙度的信息。

(四) 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 $1/10$ 。可以快速地提供出水井位及划定找水远景区。

(五) 缺点

前已述及, NUMIS 系统的探测深度为 100m , NUMIS^{Plus} 系统的探测深度为 150m , 它们尚不能用来探测埋藏深度大于 150m 的地下水; 此外, 由于核磁共振找水仪的接收灵敏度高(可以接收纳伏级的信号), 故易受电磁噪声干扰, 在电磁噪声干扰强的区段不能开展工作。

第三节 本书的内容概要

本书概要叙述了 SNMR 方法的发展历史、方法的基础和原理、仪器及其原理和特点。

在此基础上, 通过实例介绍了 SNMR 方法在地下水探测中的应用效果, 并根据探测地下水的实践经验和研究成果, 总结并建立了适合中国国情的地下水探测工作程序。

在探测地下水资源的过程中,我们注意到对与水环境有关的水文地质和工程地质问题的探索与研究,并取得了一定的研究成果。本书以三峡赵树岭滑坡的实际监测和方法技术研究为例,说明了 SNMR 方法在滑坡的探测和稳定性研究中的作用以及取得满意的地质效果,SNMR 方法的成功应用为滑坡的监测提供了新的技术和手段。

本书还以 SNMR 方法对秦始皇陵进行无损探测为例,说明新方法还能够在工程地质方面发挥作用,进一步扩大了 SNMR 方法的应用领域;同时,还介绍了 SNMR 方法在解决与水环境有关其他地质问题、环境污染探测方面问题取得的进展情况。

SNMR 方法应用了 NMR 技术,有广阔的应用领域,例如,可以在高速公路检测、堤坝渗漏检测、考古、环境污染监测以及生态学等诸多领域发挥新方法的特长。今后要加快工程 NMR 仪器研制工作和 SNMR 方法的理论研究,使 SNMR 方法在我国的现代化建设中发挥更大的作用。

主要参考文献

- 陈文升编著. 核磁共振地球物理仪器原理[M]. 北京:地质出版社,1992
- 李振宇,程业勋等. 用高新技术在我国西北地区探查地下水资源.《中国西部地区科技经济与社会发展论坛专辑(六)》[M],成都:四川科技出版社,2003
- 李振宇,潘玉玲等. 利用核磁共振方法研究水文地质问题及应用实例[J]. 水文地质工程地质,2003,30(4): 50~54
- 李振宇,张兵等. 地面核磁共振方法的效果研究[J]. 地球科学,2001,26(增刊):34~36
- 潘玉玲,张昌达等编著. 地面核磁共振找水理论和方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2000
- 潘玉玲,贺颖,李振宇,李国安,姜焕忠. 地面核磁共振找水方法在我国的应用效果[J]. 地质通报,2003,22(2):135~139
- 肖立志著. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998
- 杨福家. 原子物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002