地面核磁共振找水方法综述

李振宇 ,李俊丽 ,潘玉玲
(中国地质大学 ,湖北武汉 430074)

摘要:地面核磁共振(NMR)找水方法是目前世界上唯一直接找水的地球物理新方法。其基本原理是在地面上利用 NMR 找水仪 ,观测、研究地层中水质子产生的 NMR 信号的变化规律 ,不打钻就可以确定各含水层的深度、厚度、单位体积含水量和孔隙度信息。NUMIS 和 NUMIS$^+$ 输出功率高 ,接收灵敏度高并由 PC 机控制 ,是当今世界上最先进的直接探测地下水设备。我国应用 NMR 方法在前人认为是“无水区”、缺水区和常规物探找水方法难以奏效的地方找到了地下水。用 NMR 找水方法可以进行水文地质填图 ,快速圈定找水远景区、对地下水资源进行评价和确定出水井位。此外 ,MNR 还可在水环境监测、工程无损检测等方面发挥作用。

关键词:地面核磁共振;探查地下水;地面核磁感应系统;应用前景
中图分类号:P641.7 **文献标识码**:A

Summary of groundwater detection with surface nuclear magnetic resonance method

Li Zhenyu ,Li Junli , Pan Yuling
(China University of Geosciences , Wuhan 430074 , China)

Abstract: Nuclear magnetic resonance(NMR) is the only geophysical method currently used to detect groundwater directly. The basic principle of groundwater detection with NMR is to observe and analyze the NMR signals produced by hydrogen proton of formations to determine information such as depth , thickness ,water content per volume ,and mean pore size of aquifers without drilling. NUMIS and NUMIS$^+$ are instruments of high output power , high receiver sensitivity. They are controlled by PC and are the most advanced direct groundwater detection equipment. In China groundwater has been found with NMR method in areas previously known as lack of groundwater and areas where it has been difficult to find groundwater with traditional geophysical methods. NMR groundwater detection method can be used for hydrogeological mapping , fast detection of favorable groundwater prospects , evaluation of groundwater sources ,and determination of water well positions. Besides , it can play its role in monitoring of water environment and harmless detection of defects in engineering. The future efforts should be made in improving anti-interference ability of NMR equipment and increasing detection depth.

Key words: surface NMR method; groundwater detection; surface NUMIS; application prospects

自 1946 年 M. Purcell 和 F. Bloch 同时发现物质中的核磁共振现象以来仅有几十年的历史。随着科学技术的发展 ,核磁共振已由理论、试验进入应用与开发阶段 ,最先受益的是医学。核磁共振技术在地球科学方面的应用使地学 ,特别是地球物理学的发展进入了一个新阶段。本文着重阐述核磁共振技术在探测地下水方面的应用及其发展情况。

1 地面核磁共振找水方法原理及其发展情况

1.1 地面核磁共振找水方法原理[1]

地面 NMR 找水方法利用的是不同物质原子核弛豫性质差异产生的 NMR 效应 ,即水中氢核(质子)的弛豫特性差异。核磁共振是一个基于原子核特性的物理现象 ,系指具有核子顺磁性的物质选择性地吸收电磁能量[1]。从理论上讲 ,应用 NMR 技术的唯一条件是所研究物质的原子核磁矩不为零。水中氢核具有核子顺磁性 ,其磁矩不为零。氢核是地层中具有核子顺磁性物质中丰度最高、磁旋比最大的核子。在稳定地磁场的作用下 ,氢核象陀螺一样绕地磁场方向旋进 ,其旋进频率(拉摩尔频率)与地磁场强度和原子核的磁旋比有

收稿日期:2002 - 07 - 09。

第一作者简介:李振宇(1962 —) ,男 ,中国地质大学(武汉)地球物理系毕业 ,硕士 ,在读博士 ,主要从事工程地球物理和核磁共振找水等方面的工作。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关。

通常向铺在地面上的线圈(发射线圈)中供入频率为拉摩尔频率的交变电流,交变电流的包络线为矩形(见图 1a)。在地面交变电流形成的交变磁场激发下,地下水中氢核形成宏观磁矩。这一宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动,其旋进频率为氢核所特有。在切断激发电流脉冲后,用同一线圈(接收线圈)拾取由不同激发脉冲矩激发产生的 NMR 信号,该信号的包络线呈指数规律衰减(见图 1b),NMR 信号强弱或衰减快慢直接与水中质子的数量有关,即 NMR 信号的幅值与所探测空间内自由水含量成正比,由此,形成了地面核磁共振找水方法。

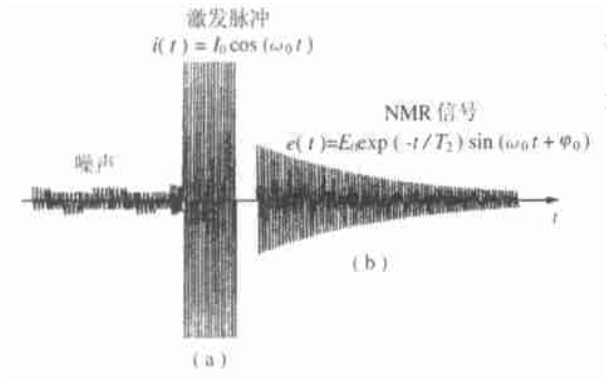


图 1 NMR 信号时序图

地面核磁共振找水方法,又称地面 NMR 测深,是在每个 NMR 测深点上由小到大(100 A·ms～9 000 A·ms 或者 100 A·ms～18 000 A·ms)依次改变激发脉冲矩 $q(q = I_0 \cdot t_p$,式中,I_0,t_p 分别为激发电流脉冲的幅值和持续时间),然后在地面上利用核磁共振找水仪观测、研究地层中水质子产生的核磁共振信号的变化规律,进而探测由浅到深的含水层的赋存状态。通过对每个 NMR 测深点原始资料进行解释,不打钻就可得到地下各含水层的水文地质参数:各含水层的深度、厚度、单位体积含水量和含水层类型(平均孔隙度和含水层的导电性),因此,地面核磁共振找水方法是目前世界上唯一的直接找水地球物理新方法。

1.2 地面核磁共振找水方法进展情况

1962 年,美国的 R. H. Varian 提出过用 NMR 技术普查地下水的构想,但以后未有商业仪器问世及有关的报导,他的研究仅集中于开发质子磁力仪和核磁共振波谱仪方面。

1965 年夏,中国的张昌达、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以交变电流,交变电流的频率等于质子在当地地磁场中的旋进(共振)频率。由于受当时技术条件的限制,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。

从 1978 年起,前苏联科学院(现俄罗斯科学院)西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所以 А Г. Ск Мс Ю в 教授为首的一批物理学家,开始了利用 NMR 技术进行找水方法的研究。他们用 3 年时间研制成了原型仪器,在其后 10 年间对仪器不断进行改进,开发出了在地磁场中测定 NMR 信号的仪器,称为核磁共振找水仪(Hydroscope)。

他们在开发、改进仪器的同时,对 NMR 找水的解释方法也进行了研究,并在前苏联境内的许多地区(俄罗斯、立陶宛、哈萨克斯坦、乌克兰以及北极圈附近)和美国、澳大利亚、以色列、法国、中国等国家进行了方法效果试验,其中在澳大利亚、以色列、法国境内的试验结果用英文公开发表。在前苏联境内的 5 个试验区和 400 个水文点上进行了 NMR 技术找水方法试验研究,取得了世界先进水平的研究成果。

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”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、中国新疆等国家和地区应用 NMR 方法寻找地下水,检验和证实了该方法的效果。

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 IRIS 公司购买了俄罗斯找水仪专利,并开始研究新型的 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 2 个国家。

中国原地矿部信息研究院崔霖沛高级工程师最先向国内介绍了前苏联的研究成果。1992 年底,中国地质大学(武汉)NMR 技术找水科研组对新方法进行了国内外调研,开始了用 NMR 技术找水的研究,并取得了可喜的研究成果。1997 年底,我国引进第一台地面 NMR 找水仪——核磁感应系统(NUMIS),并取得了明显的地质效果。1999 年,国内有关单位又引进 2 套 NUMIS 系统和 1 套 NUMIS$^+$。

目前,拥有 NMR 找水仪并成功地进行地下水

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

勘查的国家有俄罗斯、法国、中国和德国。

1.3　地面核磁感应系统的组成及其主要特点

目前世界上有两种类型的 NMR 找水仪:俄罗斯最先研制并一直在使用的 hydroscope;法国与俄罗斯合作研制,由法国 IRIS 公司生产的 NUMIS 和 NUMIS$^+$。

NUMIS 系统是 hydroscope 的改进型,仪器的原理没有改变,但在制造工艺和抗干扰能力方面均有提高。

商品型 NUMIS 系统于 1996 年春问世,在探查地下水方面效果十分明显,但其勘探深度仅在 100 m 左右,且整个系统重量达 300 kg。

为了加大勘探深度和方便仪器移动,1999 年将 NUMIS 改装升级为 NUMIS$^+$,它的组成(见图 2)及主要特点如下。

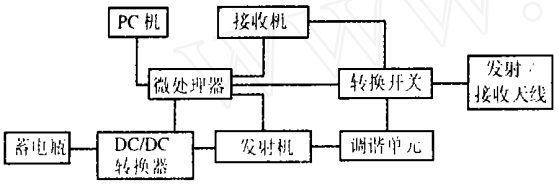


图 2　NUMIS$^+$ 组成原理框图

1) NUMIS 和 NUMIS$^+$ 均是输出功率高,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设备。但是 NUMIS$^+$ 系统具有更大的发射功率(瞬时最大输出功率为 450 A、4 000 V)。该设备每个部分的重量都在 25 kg 以内,便于一个人搬送。

2) PC 机控制整个系统及记录原始数据,进行数据处理、显示和存储,并进行后续资料解释(一维反演)。

3) DC/DC 电源转换器单元。DC/DC 转换器将 2 个蓄电瓶(12 V ×2,每个大于 60 Ah)提供的 24 V 电压转换为 400 V,供发送机的交变电流发生器使用。在 NUMIS$^+$ 系统中利用了 2 个并联的转换器,分别用于如下两种情形:如果探测深度为 150 m,要求用 2 个 DC/DC 转换器来激发边长为 150 m 的方形回线(回线总长度 600 m);如果探测深度为 100 m,则仅要求用 1 个 DC/DC 转换器来激发边长为 100 m 的方形回线(回线总长度 400 m)就足够了。

4) 天线(又称回线或线圈,每卷导线长 100 m,导线截面积为 10 mm^2)作为发射/接收天线。

5) 切换开关,它将外接天线在发射回路和接收回路之间进行切换。

6) 调谐单元。调谐单元是用电容量不同的电容器把发射天线的频率调谐到拉摩尔频率。NUMIS$^+$ 系统备有 2 个调谐单元:9～30 μF 以内电容量时,使用 1 个调谐单元;31～60 μF 以内电容量时,使用 2 个调谐单元,就是说,在磁纬度较低地区(地磁场低于 31 000 nT、使用边长 150 m 方形天线时或地磁场低于 37 000 nT、使用边长 100 m 方形天线时)必须使用 2 个调谐单元;在中、高磁纬度地区,使用 1 个调谐单元。

7) 发射/接收单元。发射/接收单元是 NUMIS$^+$ 系统的核心。在 PC 机的控制下,发射机将其产生的拉摩尔频率的电流脉冲供入天线,形成激发磁场;在发射脉冲间歇期间,接收机测量 NMR 信号,对其进行滤波、放大和数字转换模拟。接收机的灵敏度高,可以接收 nV 级的信号。

8) 微处理器。微处理器控制各个部分的协调工作,通过 RS－232 接口接收 PC 机送来的数据指令,并将所测得的数据传给 PC 机作进一步处理并显示。

9) 系统配备的主要软件。NUMIS 和 NUMIS$^+$ 系统的主要软件有:测试软件、数据采集控制软件和解释软件。在上述软件支持下,NMR 找水方法所测量的参数和反演解释所能获得的水文地质参数见表 1。

表 1　NUMIS 和 NUMIS$^+$ 系统的实测、解释参数

NMR 找水方法测量参数	反演解释得到的水文地质参数
信号初始振幅 E_0(nV)	含水量(有效孔隙度)
信号衰减时间 T_2^*(ms)	孔隙大小(渗透性)
信号的初始相位 φ_0(°)	含水层的导电性(电阻率)

2　NMR 方法在我国的应用

2.1　在复杂的水文地质条件下探查到了地下水

我们的创新之处在于将 NMR 方法与中国实际相结合,我们应用 NMR 找水方法在前人认为是“无水区”、缺水区或常规物探找水方法难以奏效的地方找到了地下水。以下是几个实例。

1) 在前人认为是非含水区的湖北永安地区,用 NMR 方法找到了优质的岩溶水[2]。有 3 口井日出水量在 5 000 t 以上,结束了当地居民祖祖辈辈吃浑水的日子,为农牧业和工业生产以及旅游业提供了充足的水源。同时,我们也积累了用 NMR 方法探查岩溶水的经验。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2) 与中国人民解放军北京军区给水工程团合作,在河北省花岗岩发育的康保地区,在风化的花岗岩中找到了地下水[1],日出水量达到了 84 t。在火成岩发育区使用 NMR 找水方法找到了地下水,前人尚无成功之举。

3) 在湖北省变质岩发育的孝感县某地,用 NMR 方法找到了基岩裂隙水[3],为三峡水电站输送电网的电站提供了生产、生活以及消防用水。

4) 在湖南省红层发育的长沙、益阳地区,勘查到了红层裂隙水,日出水量超过 80 t。

5) 主要用 NMR 方法在福建安溪县找到了地下热水的后备水源地。

6) 在塔河油田用 NMR 等方法快速圈定了地下淡水远景区,解决了油田职工生活和生产用水。

2.2 以理论研究成果指导找水实践,布钻成功率达 90 %以上[4]

我们已经完成了影响 NMR 找水信号主要因素(岩石导电性、地磁场强度、地磁场倾角、含水岩石类型和含水层赋存状态、电磁噪声等自然因素变化和人为技术因素变化诸如天线形状和大小、激发脉冲矩大小和个数等)的一维正演数值模拟的研究工作,对在均匀半空间和层状大地中含水层的 NMR 信号异常形态有了充分认识,并以此研究成果指导找水实践。同时,我们还不断完善 NMR 方法找水的解释技术。

2.3 找水工作程序

在理论研究和实际找水的实践中,逐渐形成了如下找水的工作程序:①利用 NMR 测深快速圈定找水远景区;②根据电阻率值的大小来区分水质(咸、淡水);③当确定出水井位时,如 NMR 测深点范围内有水,则要结合 ρ_s 异常特征选定井位;④在间接找水的视电阻率异常区段,可用 NMR 测深结果区分 ρ_s 异常性质,如有自由水存在,就会有 NMR 信号响应;⑤在圈定烃类(含有氢核)污染水的污染范围和程度时,应结合激发极化法异常特点;⑥可用 NMR 找水方法评价堤坝或工程地基中是否含有自由水,或用 NMR 找水方法区分 ρ_s 低阻异常(软泥或自由水)。

3 地面 NMR 找水方法的应用前景

我国是水资源缺乏的国家,急需用新方法新技术勘查地下水资源。国内 NMR 找水实践表明,NMR 找水方法有着广泛的发展前景,特别是对我国老少边穷地区地下水资源的探查将有很大的潜力可挖。

1) NMR 找水方法应成为水文地质调查的首选方法。将 NMR 找水方法应用于水文地质填图,快速圈定找水远景区、对地下水资源进行评价以及确定出水井位方面,可以发挥 NMR 找水方法具有直接找水、量化程度高、快速、经济等特点,有利于获得地下水资源三维分布的信息。

2) 在水环境监测上发挥作用。NMR 找水方法除了可以探查各种类型的地下水外,还可以与电阻率法、激发极化法等其他地球物理方法配合,根据地下水电阻率等物性参数的变化来区分淡水和咸水。此外,NMR 找水方法也可以用来圈定被含有氢核(烃类)污染物污染的水的范围和污染程度。

3) 在工程无损检测方面的应用。用 NMR 方法,通过剖面或面积性测量对工程地基和堤坝隐患进行无损检测,可以圈定地下水入侵范围、评价堤坝及其坝基有无地下水作用等。

4 结论

1) NMR 找水方法在探查 100～150 m 深度的地下水工作中取得了明显的地质效果,有广泛的发展前景。

2) 建议加速 NMR 找水仪器的国产化进程,筹措资金,研制 NMR 找水仪器系列,以解决与水环境有关的地质问题。提高 NMR 找水仪器的抗电磁干扰能力和加大方法的勘探深度是仪器研制的关键技术。

3) 进一步总结在我国应用 NMR 找水方法的规律,不断完善 NUMIS 系统资料解释方法,提高其资料解释的可靠性。

参 考 文 献

1 潘玉玲,张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法. 武汉:中国地质大学出版社,2000. 19～22

2 万乐,潘玉玲. 利用核磁共振方法探查岩溶水. CT 理论与应用研究,1999, 8(3) :15～19

3 潘玉玲,万乐,袁照令,等. 核磁共振找水方法现状和发展趋势. 地质科技情报,2000,19(1) :105～108

4 李振宇,张兵,潘玉玲. 地面核磁共振找水方法的应用效果研究. 地球科学,2001,26(增刊) :34～36

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net