核磁共振找水方法在河南某地区的试验结果

董浩斌 袁照令 李振宁 张 兵 潘玉玲 万 乐
(中国地质大学, 武汉 430074)

摘 要 利用核磁共振技术直接找水是一种新方法。本文论述该方法的原理、仪器装备, 并以 NUMIS 系统在河南某地试验结果为例, 说明本方法找水的有效性。

关键词 核磁共振, 地下水, 仪器, 试验结果。

0 前言

利用核磁共振(NMR)技术探测地下水是 NMR 应用的新领域, 是目前唯一的直接找水的新地球物理方法[1]。与探测地下水的传统地球物理方法相比, 本方法的主要优点是找水原理新颖、分辨力高、信息量丰富和解具有唯一性, 在探测地下淡水时更能显示出其优越性。

中国地质大学(武汉), 以潘玉玲教授为首的核磁共振找水科研组, 在多年研究核磁共振找水方法理论的基础上, 于 1997 年底引进了法国 IRIS 公司研制的地面核磁感应系统(NUMIS), 即核磁共振找水仪[2,3]。经专家组试验研究, 已取得了部分成果, 野外试验表明, NUMIS 系统可以用来进行区域性水文地质调查, 确定找水远景区; 圈定各种类型地下水在三维空间的分布, 为寻找工农业用水、生活用水水源、选定水井位置提供可靠信息。因此, NMR 找水方法是一种有发展前景的新方法, 它为我国探测地下水提供了新手段。使用该方法可以不打钻或少打钻, 就可以得知含水层信息, 经济快速。中国地质大学(武汉)引进 NUMIS 系统, 必将为我国探测地下水资源做出应有的贡献。

1 核磁共振技术直接找水原理

理论上, 应用核磁共振技术的唯一条件是所研究物质的原子核具有非零磁矩。核磁共振是一种量子效应, 系指具有核子顺磁性的物质选择性地吸收电磁能量。水(H_2O)中氢核(质子)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的物质中丰度最高的核子。在稳定地磁场 H_0 作用下, 具有一定磁矩的氢核绕外磁场进动, 进动频率由拉摩尔方程决定[4]

$$f_0 = \frac{\gamma H_0}{2\pi} \tag{1}$$

f_0 称为拉摩尔频率, 式中 γ 为旋磁比, 由下式计算

$$\gamma = g\beta / h \tag{2}$$

式中, g 为朗德或光谱分裂因子; β 为玻尔或核磁子; h 为普朗克常数(6.6262×10^{-34} J·S)。不同物质的原子核的旋磁比具有特定值, 例如, 一个电子的 g 为 2.0023, 而氢核的 g 为 5.5857; 自由电子和水中质子的 β 分别为 9.2740×10^{-24} A·m^2 和 5.5050×10^{-27} A·m^2。将水中质子

1998 年 6 月 5 日收稿。

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

的上述系数值代入(2)式, 并根据实测的地磁场强度 H_0, 就可以由式(1)求出水中质子的进动频率(拉摩尔频率)

$$\{f_0\}_{Hz} = 0.04258\{H_0\}_{nT} \tag{3}$$

(3)式的重要特点是进动频率与粒子磁矩和极化场方向的初始交角无关。

众所周知, 在稳定磁场作用下, 原子核处于一定的能级, 如果在适当频率的交变磁场作用下, 使原子核在能级间产生共振跃迁, 即产生核磁共振。所谓适当频率, 即为水中质子的进动频率 f_0。这样, 用一定方法, 向地下供入频率为 f_0 的交变电流, 在地中形成的交变电磁场激发下, 使地下水中氢核形成宏观磁矩, 该宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动, 其进动频率为氢核所特有。用线圈拾取宏观磁矩进动产生的电磁信号, 即可探测地下水的存在。核磁共振技术直接找水就在于拾取的 NMR 信号强弱直接与水中质子的数量有关, 即 NMR 信号幅值与所研究空间内的自由水含量成正比, 因此构成一种直接找水技术, 形成了一种新的找水方法。

2 NMR 技术直接找水的仪器

野外测试结果所用设备为法国 IRIS 公司生产的 NUMIS 系统, NUMIS 系统是前苏联研制的 NMR 找水仪"Hydroscope"的改进型, 在制造工艺、重量、抗干扰能力等方面均有所改进。

我校 1997 年底引进的 NUMIS 系统是 IRIS 公司 1997 年研制的新产品, 是在中国水文地质条件下通过验收的。图 1 是 NUMIS 系统组成原理框图, 主要由交变电流发生器、程控选频放大电路、测量电路等组成。DC/DC 变换器将+ 24 V 电瓶电压变成 400 V 电压供交变电流发生器使用, 切换开关将外接回线(发送/接收天线) 在发送回路和接收回路之间切换, 微处理器控制各部分的协调工作, 并通过 RS-232 接口接收 PC 计算机送来的数据指令, 并将所测得的数据传送给 PC 机进一步处理显示。

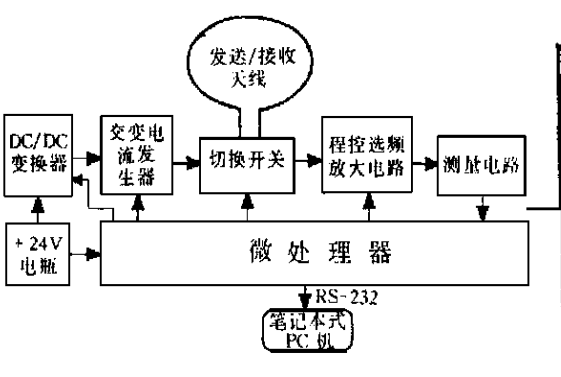


图 1 NUMIS 系统原理

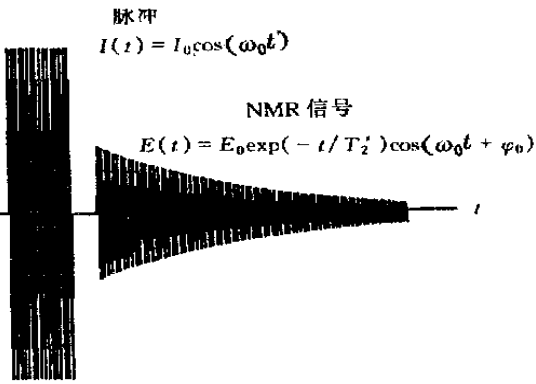


图 2 NMR 信号时序

图 2 为 NMR 信号时序, 流过天线的交变电流脉冲, 其包络线为矩形

$$I(t) = I_0\cos(\omega_0 t) \qquad 0 \leqslant t \leqslant \tau \tag{4}$$

式中, $\omega_0 = 2\pi f_0$, I_0、τ 分别为交变电流脉冲的幅度和持续时间, 电流频率 f_0 等于地磁场中质子的拉摩尔频率。

在接收线圈观测到的 NMR 信号用下式表示

$$E(t) = E_0(q)\sin(\omega_0 t + \varphi_0)\exp(-t/T_2^*) \tag{5}$$

其包络线呈指数规律随时间衰减, 信号角频率等于拉摩尔角频率 ω_0($\omega_0 = 2\pi f_0$), E_0 为信号初始振幅, q 为激发脉冲参数(也叫脉冲矩), $q = I_0 \cdot \tau$, I_0、τ 分别为激发电流脉冲的幅值和持续

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

时间, φ_0 为初始相位, 是天线中激发电流与测量到衰减电压之间的相位移。T_2^* 为自旋—自旋弛豫时间(或衰减时间), 微处理器把从测量电路输出的包络信号以数字形式记录下来。

笔记本式 PC 机用于数据处理、显示, PC 机和微处理器之间通过 RS-232 接口连接。

NUMIS 系统工作站的硬件组成如下:

—发送机((800×600×600) mm^3, 重量 70 kg) ;

—DC/DC 变换器((550×600×420) mm^3, 重量 40 kg) , 发送机的供电装置;

—回线(75 m×4, 4 卷线, 每卷 35 kg) ;

—汽车电瓶(12 V×2, 每个大于 60 Ah) , 直流电源;

—笔记本式 PC 机, IBM 兼容;

—质子磁力仪, 测量地磁场强度。

NUMIS 系统软件主要有数据采集控制软件、测试软件、解释软件, 主要完成数据采集控制、仪器测试、NMR 信号滤波、NMR 信号幅值、衰减时间、相位和频率计算, 可进行一维解释。该程序在 Windows95 平台上运行。

3　实测结果分析

NUMIS 系统提供的是一维反演程序, 即假定地磁场是均匀的, 地层是水平的, NMR 信号的初始幅值为[5]

$$E_0(q) = \int_0^L K(q, z)\, n(z)\, \mathrm{d}z \tag{6}$$

式中, $K(q, z) = \omega_0 M_0 \int_{xy} h_{1\perp} \sin(\frac{1}{2}\lambda h_{1\perp} q)\, \mathrm{d}x\, \mathrm{d}y$, $q = I_0 \cdot \tau$ 为激发脉冲矩, I_0、τ 分别为幅度和持续时间, M_0 为核子磁化强度, λ 是旋磁比, $h_{1\perp}(r, \rho(r), \alpha)$ 是由 $I = 1$ A 时, 在天线中形成的垂直于地磁场的磁场分量, $\rho(r)$ 是岩石电阻率, α 是地磁场的倾角, $L \approx 2D$, D 是圆天线直径, $n(z)$ 是含水量, 它是深度的函数, $0 \leqslant n(z) \leqslant 1$, $r = r(x, y, z)$。

显然, NMR 信号初始振幅与激发脉冲矩、天线直径大小、岩石电阻率、地磁场倾角、地层含水量大小等诸多的因素有关, 理论计算与实践表明, 当圆天线直径为 D 时, NMR 方法探测范围为 $2D$, 探测深度近似为 D。因此, 天线直径大小选择视含水层深度而定, 方法的分辨能力随着深度增大而降低。$E_0(q)$ 与地下含水层的含水量成正比, 含水层上覆岩石的电阻率过低, 使 NMR 信号幅值降低, 这是低阻岩层对电磁能量有所吸取的结果。

当地下存在若干不同深度含水层时, 通过求各子层 i 的贡献之和可以得出总的 $E_0(q)$

$$E_0(q) = \sum E_{0i}(q) \tag{7}$$

对野外实测结果进行反演计算, 输出如下结果。

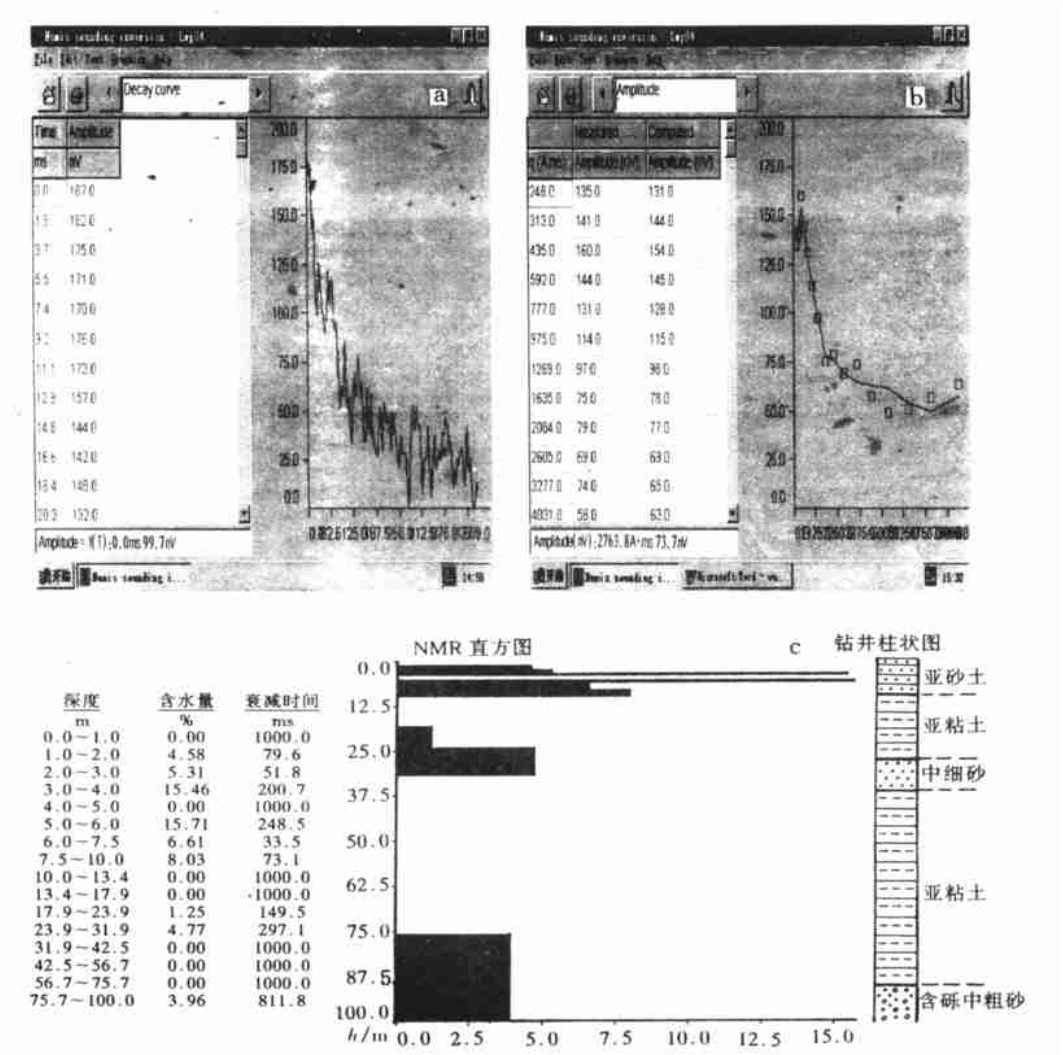
(1)计算与实测初始振幅 $E_0(q)$ 的拟合曲线(E_0-q 曲线);

(2)实测 $E_0(q)$ 衰减曲线(E_0-t 曲线) (全部脉冲矩激发后所产生的不同衰减曲线中 E_0 最大的曲线);

(3)不同深度含水层分布直方图。

时	间: 1998 年 3 月 8 日, 星期日	试 验 线 圈: 方形, 75 m × 75 m	
地	点: 河南省某地;	脉 冲 矩 个 数: 16	
天	气: 阴转小雨	信号叠加次数: 128	
信号记录长度: 500 ms		噪 声 水 平: 100~ 300 nV	

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



深度 m	含水量 %	衰减时间 ms
0.0～1.0	0.00	1000.0
1.0～2.0	4.58	79.6
2.0～3.0	5.31	51.8
3.0～4.0	15.46	200.7
4.0～5.0	0.00	1000.0
5.0～6.0	15.71	248.5
6.0～7.5	6.61	33.5
7.5～10.0	8.03	73.1
10.0～13.4	0.00	1000.0
13.4～17.9	0.00	1000.0
17.9～23.9	1.25	149.5
23.9～31.9	4.77	297.1
31.9～42.5	0.00	1000.0
42.5～56.7	0.00	1000.0
56.7～75.7	0.00	1000.0
75.7～100.0	3.96	811.8

图 3 NMR 试验结果

输出结果中含水层的深度、厚度、含水量, 在线圈直径为 100 m 时, 通常 74 m 以上分层是可靠的, 而对大于 74 m 以下深处的含水层, 只能做出定性判断是否有含水层存在。

NU MIS 系统验收试验是在湖北省、河南省某地进行的, 现仅以在河南省试验结果说明方法的效果。试验地点远离电磁干扰物(如电力线等) , 试验结果见图 3。图 3(a) 为某一脉冲矩激发下产生的 NMR 信号衰减曲线。每一个脉冲矩都对应着一条 NMR 信号衰减曲线, 这里所输出的 $E_0(q)- t$ 曲线是初始振幅最大的那条信号衰减曲线。图中示出的曲线有两个特点, 其一是初始振幅按指数规律衰减趋势明显, E_0 衰减快慢反映出含水层孔隙大小, 含水层孔隙越大则衰减越慢; 其二是曲线上叠加的干扰较明显, 但尚未影响曲线的基本形态, 干扰的主要成分可能与 50 Hz 的电干扰有关。信号衰减曲线的优劣反映出观测到的 NMR 信号的质量及干扰对信号的畸变程度。图 3(b) 是 $E_0- q$ 曲线, 显示的是 NMR 信号初始振幅随脉冲矩的变化, 图中小方框为实测值, 实线是计算结果。该图反映了计算曲线与实测曲线的拟合结果, 即可说明实测数据的质量, 也可表明反演结果的可信程度。图 3(c) 是解释结果。左边第 1 列数据分别为所分各层的起止深度, 第 2 列数据为各层所对应的含水率, 第 3 列为相应的衰减时

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

间。图中间部分是含水率随深度变化的直方图, 右边是距测点约 2 km 左右的一口钻井柱状图。将直方图与柱状图对比可见, 两者符合较好。试验地点附近多口钻井资料显示, 该地区潜水面深度一般为 4~ 9 m, 图中示出的 0~ 10 m 亚砂土地层中的水是地表潜水, 它的含水率高并且不连续, 可能在亚砂土层中还存在有厚度不大的非含水层。图中 17. 9~ 31. 9 m 的含水层和中细砂地层对应, 两者反映的深度和厚度符合。图中 75. 7~ 100 m 的含水层与含砾中粗砂地层对应, 但前者反映出的含水层顶板深度明显偏小, 这与分层和含水层上覆岩层导电性有关。反演结果中给出的该含水层, 对在 100 m 左右及以下的含砾中粗砂地层的存在做出了有益的提示。反演结果表明, 亚粘土层的含水性差, 为隔水层, 它的自由水含水率为零, 衰减时间为 1 000 ms(NUMIS 系统中为非含水层的显示)。

4　结论

1. NUMIS 系统的引进填补了我国利用核磁共振技术探明地下水资源分布手段的空白, 该系统性能稳定, 在野外恶劣条件下运行正常。

2. 实测资料的反演结果(直方图) 和钻孔资料对比, 符合较好; 核磁共振找水方法的工作结果直接反映了地层含水变化情况。

3. 试验结果表明 NMR 方法可以直接找水, 没有地质干扰, 但抗电磁干扰能力较弱, 有待进一步研究改进。

参　考　文　献

1　潘玉玲, 张昌达, 刘天佑. 一种新的找水方法——核磁共振找水. 物探化探译丛, 1995, (5) : 52—595

2　袁照令, 潘玉玲. 中国地质大学(武汉) 引进法国研制的核磁共振找水仪. 地质科技情报, 1998, (1) : 72

3　袁照令, 董浩斌. 核磁共振找水法试验成功. 长江日报头版, 1998-5-8

4　陈文升编著. 核磁共振地球物理仪器原理. 北京: 地质出版社, 1992

5　Legchnko A V. Some aspects of the performance of the Surface NMR Method. 66th SEG 1996, 936—939

THE TENTATIVE APPLICATION OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE TO WATER EXPLORATION IN A CERTAIN AREA OF HENAN PROVINCE

Dong Haobin, Yuan Zhaoling, Li Zhenning, Zhang Bing, Pan Yuling, Wan Le

(China Uinversity of Geoscienœs, Wuhan　430074)

Abstract　The application of nuclear magnetic resonance to direct water exporation is a new technique. The present paper deals with the principle and instrumental equipment of this technique and, with the test result of NUMIS system in a certain area of Henan Province as an example, illustrates the availability of this technique in water exploration.

Key words　nuclear magnetic resonance, groundwater, instrument, test result.

第一作者简介　董浩斌, 1964 年生, 1985 年毕业于中国地质大学应用地球物理系, 1996 年获华中理工大学工学硕士学位。现在中国地质大学(武汉) 任教, 副教授, 物探系实验中心主任。多年从事地球物理仪器及方法研究, 发表论文 20 余篇。

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