# 地面核磁共振-垂向电测深组合找水模式[y]

王 鹏, 李振宇

(中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 地面核磁共振方法具有直接找水、提供水文地质参数、受地形影响小、垂向分辨率高、经济快速等优点, 但它同时也具有易受电磁噪声干扰、横向分辨精度低、勘探深度小等缺点。垂向电测深方法具有技术成熟、不易受电磁噪声干扰、勘探深度大、横向分辨率高等优点, 但它同时也具有反演解释存在多解性、定量解释不足、垂向分辨率低等缺点。通过比较地面核磁共振方法与垂向电测深方法的优缺点得知, 2 种找水方法具有优势互补的特点, 合理配合使用上述 2 种找水方法, 可形成地面核磁共振-垂向电测深组合找水模式。该组合找水模式在找水实践工作中的有效性已得到充分验证。

**关键词:** 地面核磁共振方法; 垂向电测深方法; 组合找水模式

**中图分类号:** P631.221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7849(2006)03-0105-04

在地面核磁共振(surface nuclear magnetic resonance, 简称 SNMR) 找水方法引进中国之前, 所有的物探找水方法都属于间接找水。传统的物探找水方法以电法为主, 并以垂向电测深(vertical electric sounding, 简称 VES) 应用较为广泛, 该方法能探测地下电阻率沿垂向和横向的变化, 以低阻异常来圈定低阻体。由于数据反演存在多解性, 低阻体并不一定都为含水体, 因此单一的 VES 方法已难以解决复杂地电条件下的找水难题。SNMR 方法在引进之初就由于其能直接找水的优点而倍受关注, 用 SNMR 方法找水即可有效地解决了上述问题, 这是因为该方法接收的是水中氢质子的磁共振信号, 在 SNMR 方法的探测深度范围内, 若有地下水存在, 就有核磁共振信号响应。因此, 该方法在找水应用中取得了很好的效果。尽管如此, SNMR 方法也存在诸多缺陷, 如在找水工程中, SNMR 方法由于其体积勘探效应无法确定最佳井位, 需要采用其他物探方法资料进行综合研究, 以便准确确定出水井位。此外, SNMR 方法的仪器接收灵敏度高(接收纳伏级信号), 易受电磁噪声干扰而产生假异常, 因此在强电磁干扰地区应用 SNMR 方法常遇到困难。如何克服 SNMR 方法和 VES 方法在找水工作中的缺陷, 提高找水效果, 具有重要的实际意义。为此, 笔者拟构建地面核磁共振-垂向电测深组合找水模式。

## 1 SNMR 方法

### 1.1 原 理

核磁共振(NMR) 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]。理论上, 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, 且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, 氢核像陀螺一样绕地磁场方向旋进, 其旋进频率(拉摩尔圆角频率 $\omega_0$) 与地磁场强度($\vec{B}_0$) 及氢核的磁旋比($\gamma$) 有关:

$$\omega_0 = \gamma \vec{B}_0 \quad (1)$$

氢核在地磁场作用下, 处在一定的能级上。如果以具有的交变磁场($\vec{B}_1$) 对地下水中的质子进行激发, 则在原子核能级间产生跃迁, 即产生核磁共振。

在 SNMR 方法中, 通常向铺在地面上的线圈(发射或接收线圈) 中供入频率为拉摩尔频率的交变电流脉冲。在地下交变电流形成的交变磁场激发下, 地下水中的氢核形成宏观磁矩。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, 用同一线圈拾取由不同激发脉冲矩激发产生的 SNMR 信号, 该信号的包络线呈指数规律衰减。SNMR 信号的强弱或衰减快慢直接与水中质子的数量有关, 即 SNMR 信号的幅值与所探测空间内的自由水含量呈正比。

### 1.2 特 点

与传统的物探找水方法相比, SNMR 方法具有以下优点。①直接找水。在 SNMR 方法的探测范围内, 有水就有信号, 没水就没有信号。②所探测到的信息量丰富, 不打钻就可以提供有关的水文地质

y 收稿日期: 2005-10-14 编辑: 杨 勇

作者简介: 王 鹏(1982— ), 男, 现正攻读地球探测与信息技术专业硕士学位, 主要从事工程物探方面的研究工作。

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

参数。测量的参数有 SNMR 信号的初始振幅 $E_0$、平均弛豫时间 $T_2^*$、SNMR 信号的初始相位 $\varphi_0$。对原始资料解释后就可得到相应的水文地质参数, 如各含水层的深度、厚度、单位体积含水量和含水层类型(以平均孔隙度和含水层的导电性区分)。③受地形影响小。SNMR 属纯异常观测, 在其探测范围内只要有自由水存在就会产生 SNMR 信号。④垂向分辨率高。天线形状等决定探测的深度, 而按激发脉冲矩个数将地下划分为 $n$ 层($n$ 为激发脉冲矩个数), 使得垂向分辨率高。⑤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, 并可以快速提供井位及划定找水远景区。

SNMR 方法也存在一些不足之处: ①易受电磁噪声干扰。由于所接收的水的 SNMR 信号微弱, 所以仪器灵敏度很高(可接受纳伏级信号), 造成 NUMIS 系统的抗电磁干扰能力很低, 而现实中电磁波无处不在, 这就给 SNMR 方法的开展带来困难。②横向分辨精度尚显不足。SNMR 属于体积勘探, 一定范围内的自由水都会产生共振信号, 而这个范围由线圈大小和脉冲强度控制。若天线直径为 $D$, 则其探测范围是直径为 $2D$, 深度为 $D$ 的圆柱体。在横向 $X, Y \leqslant 2D$ 和垂向 $Z \leqslant D$(以天线中心点为原点)范围内的水都能产生信号。若 $D$ 值为 50 m 和 100 m, 那么只能确定直径为 100 m 和 200 m 的圆范围内是否存在水, 并不能更精确地划定最佳井位。③勘探深度小。NUMIS 系统的勘探深度为 100 m, 而其升级系统 NUMIS$^+$ 的最大勘探深度也只有 150 m。

由此可见, SNMR 方法具有直接找水、所探测到的信息量丰富、受地形影响小、垂向分辨率高、经济快速等优点, 但同时又存在易受电磁噪声干扰、横向分辨精度尚显不足和勘探深度小等缺点。

## 2 VES 方法

### 2.1 原 理

VES 方法是电法中的重要分支, 它以岩、矿石的导电性差异为物质基础, 观测和研究视电阻率的变化规律。

在地下岩石导电性分布不均匀(同时赋存有 2 种以上导电性不同的岩石)或地表起伏不平的情况下, 按式(2)计算所得的结果称之为视电阻率, 即

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \qquad (2)$$

式中: $\rho_s$ 为视电阻率; $\Delta U$ 为测量电极间的电位差(mV); $I$ 为供电回路中的电流(mA); $K$ 为装置系数(m)。

一般情况下, 视电阻率虽不是地下某一种岩石的真电阻率, 却是地下电性不均匀体在电场作用范围内的综合反映。电阻率法正是根据视电阻率的变化规律来探查和发现地下电性不均匀体的分布。一般含水层的电阻率比不含水围岩的要低, 常形成低阻异常。VES 方法正是通过研究和分析低阻异常的特点来达到找水目的。

### 2.2 特 点

相对一些找水新方法而言, VES 方法具有以下优点: ①技术成熟。该方法经过数十年的广泛应用与发展, 其技术较成熟, 且为广大物探工作者熟悉。②不易受电磁噪声干扰。VES 方法观测研究地下稳定电流场时, 电磁干扰小。③勘探深度可由供电极距控制。供电极距增大, 则勘探深度也增大, 例如石油电法勘探中的探测深度可达上千米, 这对于一般找水任务已经足够了。④横向分辨率高。横向分辨精度由测点间距控制, 能满足一般找水的定点精度的要求。

但它有如下缺点: ①易受地质因素干扰, 反演解释存在多解性。电阻率差异是 VES 方法的工作前提, 例如根据电阻率的变化, 以低阻推断地下含水层。但在实际工作中, 由于岩性的不同亦可形成低阻异常, 如在灰岩地区找水, 若层状灰岩中夹杂一层碳质页岩, 亦可形成低阻体, 可能造成视其为承压水的错误解释。②以定性解释为主, 定量解释尚显不足。只能给出电性层的分布, 不能提供更多的水文地质参数, 且受等值现象影响。③垂向分辨率不够。探测深度由供电极距控制, 但两者没有明确的对应关系, 不能准确确定钻井深度。

由此可知, 作为传统的地球物理找水方法, VES 方法具有技术成熟、不易受电磁噪声干扰、勘探深度大、横向分辨率高等优点, 但该方法也具有反演, 解释存在多解性、定量解释不足和垂向分辨率不够等缺点, 从而限制了该方法的应用。

## 3 SNMR-VES 组合找水模式

### 3.1 组合找水模式的可行性分析

由上述分析可知, 虽然 SNMR、VES 方法的工作原理、干扰源不同, 获取的水文地质信息量也存在很大差异, 但 SNMR 和 VES 2 种方法却能有效地结合起来, 优势互补地解决在找水工作中各自存在的问题, 形成一组找水模式, 2 种方法的结合点如下: ①SNMR 反演解释时所需要的测区或邻区电阻率的资料, 可由 VES 提供。②VES 可为 SNMR 识别电磁干扰假异常。当 SNMR 方法在强干扰区工

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

作时, 接收线圈在接收有用信号的同时也接收干扰信号, 产生假的含水层信息。实践表明, 在地下某一深度范围内, 当 SNMR 方法有含水特征显示, 且 VES 方法也出现异常时, 则可确认该异常是由地下含水层所致, 这一结论已被钻探资料所证实。综合视电阻率变化及当地水文地质情况, 可识别假含水层。③VES 为 SNMR 确定最佳井位提供信息。前已述及, SNMR 测深点的探测范围是一个圆柱体, 除层状孔隙水外, 布设钻孔要结合 VES 方法资料, 两者结合即可提供满足工程任务要求的井位。④SNMR 可以用来为 VES 识别异常性质。⑤SNMR 具有量化特点, 能决定钻井深度, 指导打钻工艺。SNMR 方法能提供探测深度内含水量的变化情况, 而 VES 能预测更深部的含水趋势, 若两者结合则能确定钻井深度。解释结果(含水量直方图)可指导钻井工艺。

由上述分析可知, SNMR 方法与 VES 方法能有效结合起来, 扬长避短, 弥补各自找水工作中存在的不足, 具有建立组合找水模式的可行性。

**3.2** 组合找水模式

(1) 利用 SNMR 方法快速圈定找水远景区、详查区或靶区。根据勘察工作任务, 结合仪器设备条件和经费的多少, SNMR、VES 方法的工作顺序可灵活掌握。若先开展 SNMR 方法, 则可在 SNMR 方法圈定的含水异常区内布置 VES 方法, 完成其相应工作。若先开展 VES 方法, 则可在 VES 方法得出的视电阻率异常的低阻区段, 用 SNMR 方法区分视电阻率异常性质, 即用 SNMR 方法区分储水构造内是否有水。

(2) 在区分电性存在差异的工区的水质(咸、淡水)时, 通常利用 VES 方法获取含水层的电阻率值, 并利用电阻率值的大小区分出咸水与淡水。

(3) 当 SNMR 测深点控制范围内有水时, 可结合异常的特征确定井位。

## 4　应用实例

基岩裂隙水是中国分布最为普遍的地下水类型之一, 基于其特殊的地质、地球物理特征, 用常规的地球物理找水方法往往难以取得较好的找水效果[2]。

中国地质大学(武汉) SNMR 找水科研组对湖北永安工区约 2 $km^2$ 范围进行了找水工作。为探查该区的地下水, 主要采用了 SNMR 方法(使用 NUMIS 系统), 同时辅以电阻率法。

**4.1** VES 方法的反演解释结果

由于该区缺少水文地质及物探的基础资料, 在用 NUMIS 系统找水前, 首先投入电阻率法进行普查, 以了解永安工区地下的电性结构特征。先后在 4 条剖面上完成了电阻率联合剖面法和 VES 方法(28 个测深点)。通过上述工作获得该区电性层分布及其变化的规律, 以圈定可能赋水区。

对 VES 反演解释结果对比后得出, 该工区地下存在 3~4 个电性层。图 1-A 是其中的一条 VES 剖面反演解释结果(工区内其他剖面上 VES 解释结果大体类同)。由图 1-A 可见, Ⅱ-1 地电断面的第二和第四电性层为相对低阻层, 是含水层还是低阻岩性层有待进一步识别和分析。

**4.2** SNMR 方法资料的解释结果

SNMR 测深点沿山间洼地以 200 m 点距布设, 共完成 12 个 SNMR 测深点。根据工区电磁干扰水平, 分别采用了大方(75 m × 75 m)、大圆(直径 $D$= 100 m)、圆"∞"字形天线($D$= 50 m)。

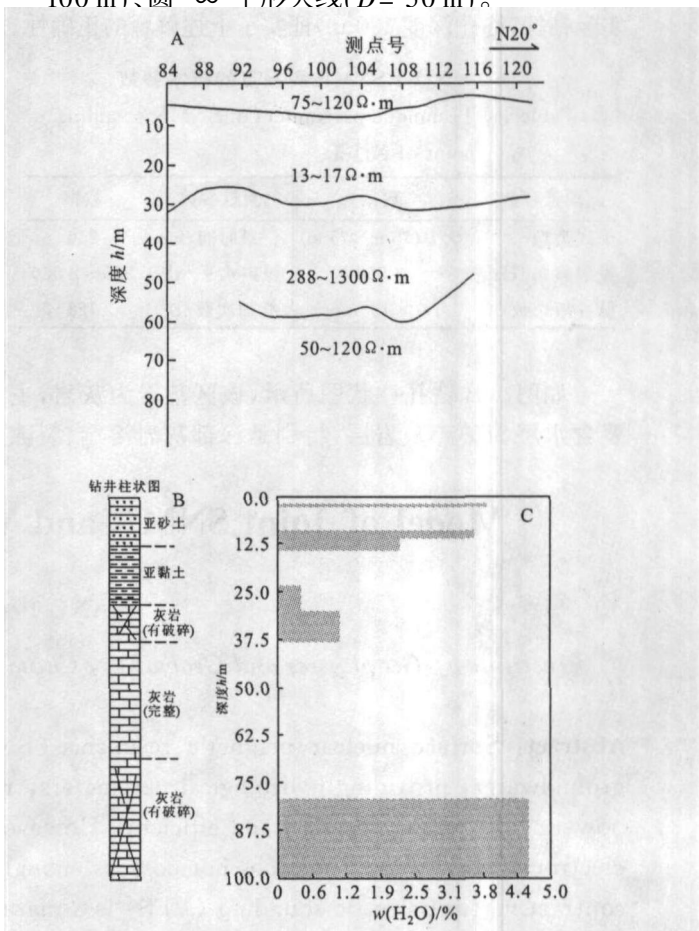



图 1　湖北永安工区 Ⅱ-1 剖面地电断面图和 SNMR 资料解释结果与钻孔资料对比图[2]

Fig. 1　Geoelectric sectional view of line Ⅱ-1 and contrast figure between SNMR data interpretation result and drill information in Yong'an work area, Hubei Province

A. 永安工区 Ⅱ-1 剖面地电断面图; B. 钻孔岩性柱状图; C. XJJ-3 SNMR 测深点含水量直方图

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

现仅选用其中一个 SNMR 测深点(编号为 XJJ-3, 其工作技术参数见表 1) 资料的解释结果与实际钻孔岩性资料进行对比。

由图 1-C 所示的 SNMR 测深点含水量直方图可知, 工区有 2 个主要含水层, 第 1 个含水层位于 24~ 38 m 深处, 含水层的 SNMR 信号平均衰减时间常数 $T_2^*$ = 110 ms; 第 2 个含水层位于 75~ 100 m, 其 $T_2^*$ = 230 ms。这 2 个含水层的 $T_2^*$ 值变化表明, 深处含水层的平均孔隙度变大, 意味着含水岩石更加破碎。2 个含水层的存在与 VES 方法反演结果基本吻合, 即 SNMR 方法确定的 2 个主要含水层位与 VES 方法得出的低阻层位大致相符(受第 1 个低阻层影响, VES 方法解释的含水层深度偏浅)。这样, 既确定了 VES 方法的低阻异常性质(含水), 又识别出 SNMR 方法的含水层异常。

依照 VES 方法的结果选取在最大出水量处打钻, 实际钻探(终孔深度 130 m) 证实了上述解释的正确性。

表 1 XJJ-3 SNMR 测深点的技术参数

Table 1 Technique parameters of SNMR sounding point of XJJ-3

| 测量参数 | 数据 | 测量参数 | 数据 |
|---|---|---|---|
| 天线类型 | 大方(75 m × 75 m) | 记录时间/ ms | 250 |
| 发射频率/ Hz | 2 090 | 噪声水平/ nV | 900~ 2 020 |
| 脉冲矩个数/ 个 | 16 | 叠加次数/ 次 | 128 |

如图 1-B 钻孔柱状图所示, 该区基岩为灰岩, 主要含水层为破碎灰岩层, 特别是深部灰岩溶洞、裂隙发育, 富水性强。打井结果显示, 3 口井的日出水量在5 000 t以上[3]。

## 5 结论与建议

SNMR 方法是目前唯一能直接找水的地球物理新方法, VES 方法是一种重要的传统找水方法。理论研究和找水实践表明, SNMR 找水方法与 VES 找水方法的配合使用可解决找水过程中遇到的一系列困难, 并取得更好的找水效果, 最终形成 SNMR-VES 组合找水模式。

今后需进一步加强以下几方面的研究: ①不断完善 SNMR-VES 组合找水模式。SNMR 作为一种新方法, 无论在其应用还是理论研究上都需要深入研究与实践, 如加大勘探深度、提高横向分辨率、提高抗电磁干扰能力、仪器国产化等; ②完善 2 种方法的综合解释方法, 探索联合反演程序, 不断提高找水的技术水平。

在本文的完成过程中, 潘玉玲教授、许顺芳副教授给予了细致耐心的指导, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 陈文升. 核磁共振地球物理仪器原理[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 13- 20.

[2] 潘玉玲, 张昌达. 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.

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

# Model of Joint SNMR and VES for Detecting Groundwater

WANG Peng, LI Zhen-yu

(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*)

**Abstract:** Surface nuclear magnetic resonance(SNMR) is resisting characterized by directly detecting groundwater, providing hydrological parameters, resisting influence of landforms, high vertical resolving power. It is also economical and efficient. However, it is considered that it is not excessively sensitive to electromagnetic wave, and does not possess enough transverse resolving power and depth of detecting. In contrast vertical electric sounding (VES) is a mature technology, with resisteace to the influence of electromagnetic waves, enough depth of detecting, high transverse resolving power. However, it may produce multi-results of invesion, imprecise interpretation results and insufficient vertical resolving power. The comparison of the characteristics of SNMR with VES, shows that two methods can produce better geologic results when working together. Hence, a SNMR-VES detection groundwater work model is formed. The validity of combined work model is demonstrated by groundwater detecting examples.

**Key words:** SNMR method; VES method; combined detection groundwater model

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