找矿找水

核磁共振技术在找水中的应用

尹成勇　　潘玉玲
（中国地质大学·武汉·430074）

【摘　要】本文介绍了核磁共振技术找地下水的原理，并举实例论证了核磁共振技术找地下水的效果。

【关键词】核磁共振　地下水　时间域电磁法

1　引言

利用核磁共振(NMR)技术探测地下水，是目前唯一的直接找水的新方法，与传统的地球物理勘探地下水的方法相比，具有高分辨力、高效率、信息量丰富和解唯一性等优点。这是一种很有发展前途的找水方法，特别是在探测地下淡水时更显示出其优越性。利用核磁共振找水仪可以高效率地进行区域水文地质调查，确定找水远景区，圈定地下水在三维空间内的分布，进而可靠地选定水井位置等。

2　核磁共振技术直接找水的原理

2.1　原理

核磁共振是一种量子效应，是指具有顺磁性的物质选择性地吸收电磁能量。水中氢核(质子)具有核子顺磁性，是地层中具有核子顺磁性的物质中丰度最高的核子。从理论上讲，应用核磁共振技术的唯一条件是所讨论的物质的原子核具有非零的磁矩。如果将旋转着的、磁矩为 M 的带电粒子置于近似均匀的地磁场 H_0 中，磁矩受扭矩作用趋向于平行外场，并绕外场而进动，进动频率由拉摩方程决定。经过推导可得水中质子的进动频率为

$$f_0 = 0.04258H_0(nT) \qquad (1)$$

(1)式表示进动频率与粒子磁矩和极化场方向的初始交角无关。

为了改变粒子的取向，可以施加一个与主要磁场 H_0 呈正交、具有共振频率 f_0 的小磁场 H_1，而 H_1 的旋转必须与磁矩绕 H_0 的进动同步，换言之，H_1 的旋转必须与绕 H_0 的拉摩进动共振。拉摩进动的形成取决于磁矩的符号，如图1所示。

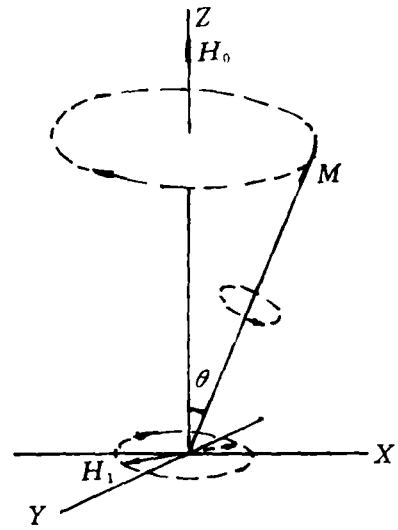


图1　拉摩进动

这样，用一定的方法使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。因为NMR信号的强弱直接与水中质子的数量有关，即信号的幅值与所研究空

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

间内的含水量成正比（结合水和吸附水除外），这样，就构成了一种直接找水技术。

2.2 装置形式

核磁共振找水仪是根据NMR技术找水方法原理制成的，找水仪包括发射和接收装置两大部分。随着科学技术的发展，发射装置的激发方式和接收装置的数据采集方式正在不断完善。目前，在实验室条件下，可以采用各种激发方式进行核磁共振实验，主要有连续波、脉冲波、自旋回波、预极化、双共振和成像等方式。在野外试验中，主要采用磁偶极方式，即使用正方形或圆形的不接地线圈，线圈大小视水的深度而定。线圈中通以具有一定宽度和强度的交变电流脉冲，使水中质子形成宏观磁矩。断电或在脉冲电流间歇期间用另一线圈或同一线圈作接收天线，测量NMR信号，NMR信号经选频放大后进入记录装置。可以采用各种弱信号处理技术，提高信噪比，突出有用信号。

前苏联地球物理学家们在澳大利亚进行新方法有效性试验时，使用的仪器装备包括控制单元、线框和四个12伏特汽车电瓶。线框做成环形，一般情况下直径为100m，绕在固定于汽车上的线架上，并与控制单元相连。测量过程包括的交替发送和收录循环由仪器内部软件控制。每个测点测量时间为40～150min，每点测量时间的长短视噪声水平和地下水容量而定。此外，核磁共振找水仪还设有外部计算机，适时处理NMR信号，以得到自由水含量随深度的分布情况。

2.3 测量参数及成果输出

对不同深度的n个含水层而言，NMR旋进信号幅值$E_0(q)$可由单个水层的贡献总和获得

$$E_0(q)=\sum_{i=1}^{n}E_{0i}(q) \qquad (2)$$

为了得到地下水沿深度的定量分布，提出了记录NMR旋进信号起始幅值E_0并研究E_0与激发参数q的关系（$q=It_p$，式中I为激发电流的幅值，单位为安培；t_p为脉冲宽度，单位为ms）。可由$E_0\sim q$关系曲线提取有关含水层参数的信息。

对于一层薄水层，自由感应衰减信号具有以下形式

$$E=E_0e^{-t/T^*}\sin(2\pi f_0 t) \qquad (3)$$

式中T^*为水中质子的自旋—自旋驰豫时间，t是切断激发电流起的时间；f_0为质子共振频率。找水仪测定（3）式的衰减信号，即可探测地下水存在与否。

通过观测质子的驰豫时间T^*，可以推测含水层的平均孔隙度，进而推算出含水量。表1是大量野外试验工作结果建立起来的驰豫时间与含水地层类型的关系。

表1　驰豫时间与含水地层类型关系

驰豫时间T^*(ms)	含水地层类型
<30	砂质粘土
30～60	粘土质砂、非常细的砂
60～120	细砂
120～180	中砂
180～300	粗砂和砾砂
300～600	砾石沉积
600～1500	地面水

3 实例

1992年8月在以色列中部人口稠密的工业区进行了核磁共振和时间域电磁（TDEM）法找水勘探工作。其中第16号测点位于海岸平原含水层的边缘。该区含水层中水量丰富，导水率高。地下水深度大约为40～50m。距测点1km处有一些钻井。TDEM发送线圈位于永久性灌溉农田里，距NMR测点数10m。该测点处地磁倾角为45°，共振频率$f_0=1879$Hz。

图2是第16号测点上的NMR、TDEM解释结果图。图中，Z_1为每层顶部的深度；Z_2为每层底部的深度；$V\Sigma$为累计自由水含量，由地表到每一层底部，柱的截面积为1m²；T为导水率系数，由地表到每一层底部的一个立柱；W为每层水的百分含量。

由图2可知，NMR柱状图显示有两个含

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

Z_1 (m)	Z_2 (m)	$V\Sigma$ (m^3)	T (m^3/24h)	W (%)	TDEM (Ω·m)
0.00	1.00	0.00	0	0	
1.00	2.00	0.00	0	0	2.4
2.00	3.00	0.00	0	0	
3.00	4.00	0.00	0	0	
4.00	5.00	0.00	0	0	
5.00	6.00	0.00	0	0	
6.00	7.00	0.00	0	0	
7.00	8.00	0.01	0	2	
8.00	9.00	0.01	0	0	
9.00	10.00	0.01	0	0	
10.00	12.00	0.07	2	4	
12.00	14.00	0.11	3	2	240
14.00	16.00	0.11	3	0	
16.00	18.00	0.17	3	4	
18.00	20.00	0.21	3	2	
20.00	22.00	0.25	4	2	
22.00	24.00	0.27	8	2	
24.00	28.00	0.31	8	2	
28.00	32.00	0.39	8	2	
32.00	36.00	0.51	9	4	
36.00	40.00	0.63	9	4	
40.00	46.00	0.63	9	0	
46.00	54.00	1.59	78	12	8.5
54.00	62.00	2.15	190	8	
62.00	74.00	2.99	358	8	
74.00	138.00	2.99	358	0	148

图2　以色列中部洛德市NMR、TDEM资料解释结果图

水层，上面一层的含水量较小，为1%～3%，水赋存于细裂隙的白垩和砂岩的小孔隙中；下面一层的含水量大，为7%～12%，水分布于区域性、裂隙发育的喀斯特白云岩中。下部含水层的导水率比上部的大，可供出大量的水。

TDEM法的电阻率断面图在下部含水层的深度和厚度方面与NMR资料解释的结果符合得很好。此外，低阻部分的电阻率值揭示，下部含水层中充满淡水或轻度矿化水，与实际地下水的咸度相符。至于在TDEM法的电阻率断面图的上部出现低阻层，这可用TDEM测点位于永久性灌溉农田内来解释。

4　结论

4.1　实践证明，NMR技术可以直接探测地下淡水，而TDEM法可以十分有效地探测地下咸水，综合利用这两种方法可以解决找地下水中的许多问题。同时，综合利用这两种方法也可以圈定污染水的范围，了解污染程度。NMR技术也可以用于解决工程地质问题和直接探查石油。

4.2　由于NMR信号比一般信号弱许多，通常获得的NMR振幅值为微伏级，所以我们今后应该对场的激发和接收方式进行深入研究，提高找水仪的信噪比，采取相应的弱信号处理技术，同时尽快完善NMR技术解释的理论和方法，以进一步提高核磁共振找水仪解决问题的能力。

4.3　值得指出的是，NMR找水技术研究在我国刚刚起步。中国地质大学自1992年成立以潘玉玲教授和张昌达为首的核磁共振找水技术科研小组以来，我们一直致力于NMR技术的原理、NMR信号的正演计算和找水仪的研制等方面的研究工作，并取得了一定的成果。我们将这一技术的国外最新研究成果和我们的科研成果介绍给大家，旨在推广这一新技术，开创我国找水事业的新局面！

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