Example 2

In St-Cyr-en-Val,France, karst water has been detected and satisfactory results obtained through practical measurements.The karst water is located in two layers.The first one is at 5-15 m depth,water content 6 %, T_2^*=120ms;and the second one at 28-51m depth,water content 11 %, T_2^*=230ms.

With NMR method of detecting groundwater can be obtained satisfactory geological results, therefore,the method has a good future.

地面核磁共振找水仪及其在水文地质调查工作中的应用研究

潘玉玲[1] Jean BERNARD[2]

1 中国地质大学地球物理系，武汉，430074，E-mail:fltang@cug.edu.cn

2 IRIS 公司，法国，奥尔良，6007-45060, E-mail:irisins@ibm.net）

摘要：本文概要介绍了地面核磁共振找水方法的原理和世界上最新的直接探查地下水的仪器设备——地面核磁感应系统的特点，并以实例说明了 NMR 找水方法的应用效果，提出了关于提高 NUMIS 系统抗干扰能力、完善解释方法、研制系列仪器等方面的建议。

1 地面核磁共振找水方法原理概述

地面核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance，缩写为 NMR）找水方法，又称地面 NMR 测深。该方法应用核磁感应系统（Nuclear Magnetic Induction System，缩写为 NUMIS）实现对地下水资源的探测。地面 NMR 找水方法利用了不同物质原子核弛豫性质差异产生的 NMR 效应。即利用了水中氢核（质子）的弛豫特性差异，在地面上利用核磁共振找水仪，观测、研究在地层中水质子产生的核磁共振信号的变化规律，进而探测地下水。

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（见图 1），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关。氢核在地磁场作用下，处在一定的能级上。如果以具有拉摩尔频率的交变磁场对地下水中的质子进行激发，则使原子核能级间产生跃迁，即产生核磁共振。为此，通常向铺在地面上的线圈中供入频率为拉摩尔频率的交变电流，在地中形成的交变磁场激发下，使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 NMR 信号，该信号的强弱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，因此构成了一种直接找水技术，形成了地面核磁共振找水方法（见图 2）。

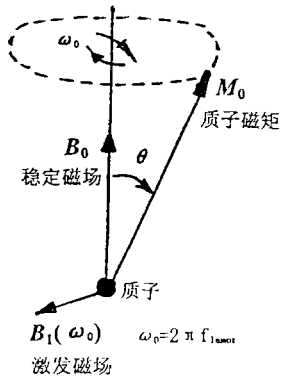


图 1 质子磁矩在磁场作用下的旋进运动[2]

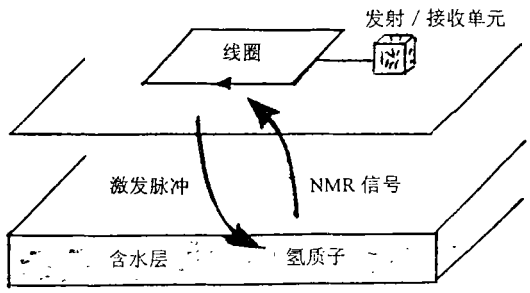


图 2 地面 NMR 找水方法原理示意图[2]

2 地面核磁感应系统的主要特点

地面核磁感应系统简称 NMR 找水仪。目前，世界上有两种类型的 NMR 找水仪：俄罗

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

斯研制并正在使用的地面层析找水仪（hydroscope）和俄罗斯与法国合作研制、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，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 100m 左右，且整个系统重量达 300kg。为了加大勘探深度和移动仪器方便，在 NUMIS 的基础上改装成为 NUMIS$^+$，其组成（见图 3）及主要特点是：

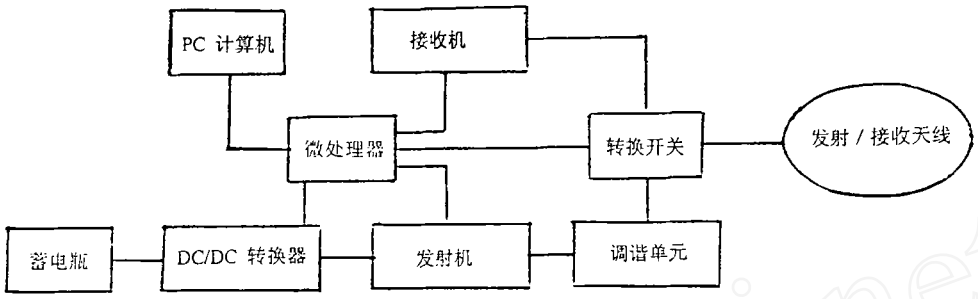


图 3 NUMIS$^+$组成示意图[2]

（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。而 NUMIS$^+$除了具有 NUMIS 全部功能外，是一套比 NUMIS 系统具有更大的发射功率（瞬时最大输出功率为 450A、4000V）、模块式的找水设备。该设备每个部分的重量都在 25kg 以内，便于一个人搬送。

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

（3） DC/DC 转换器单元（电源转换单元）DC/DC 转换器将 2 个蓄电瓶（12×2V，每个大于 6Ah）提供的 24V 电压转换为 400V，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，其分别用于：对于探测深度为 150m 的情况来说，要求用 2 个 DC/DC 转换器来激发边长为 150m 的方形回线（回线总长度 600m）；如果探测深度为 100m，则仅要求用 1 个 DC/DC 转换器来激发边长为 100m 的方形回线（回线总长度 400m）。

（4） 天线（又称回线或线圈，每卷导线长 100m，导线截面积为 10mm^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：9～30μF 以内电容量时，使用 1 个调谐单元：60μF 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 31000nT、使用边长 150m 方形天线时或地磁场低于 37000nT、使用边长 100m 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 计算机的控制下，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。

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

（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 计算机送来的数据指令，并将所测得的数据传给 PC 计算机进一步处理并显示。

（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、解释软件。在上述软件支持下，NMR 找水方法测量参数和反演解释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（度）	含水层的导电性（电阻率）

在实际的地面 NMR 找水方法工作中，是通过由小到大（100A·ms～18000 A·ms）改变激发脉冲矩（$q=I_0 \cdot t_p$，式中 I_0、t_p 分别为电流脉冲的幅值和持续时间）来探测由浅到深的含水层的赋存状态。由表 1 可见，NMR 找水方法测量的参数有：①NMR 信号初始振幅 E_0。E_0 值的大小与含水层的含水量成正比；②NMR 信号的衰减时间 T_2^*。每个脉冲矩均可以得到一条 NMR 信号振幅（E_0）随时间的衰减曲线（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^*为 20 ms<T_2^*<1000ms，而束缚水的为 $T_2^* \leq 20$ms。③每个 NMR 测深点都有一条 E_0～q、ϕ_0～q 曲线，对原始资料解释后就可得到相应的水文地质参数（或对水文地质参数做出评价）：含水层的深度、厚度、含水量和含水层类型（平均孔隙度和含水层的导电性）。

3 地面核磁感应系统的应用

（1） 应用范围:综观国内外应用 NMR 找水的实际情况，该方法可以解决大量的水文地质方面及与水环境有关的问题。

第一，在普查和勘探水文地质工作和找水中应用于：确定该方法探查深度(目前最大深度是200m)范围内各含水层的情况和特征、含水层岩石结构及其分布；定量评价含水层的渗透参数(如导水系数)、厚度、埋深、含水量、预计开采指标、钻孔出水量及上述参数在平面和断面上的变化情况；为水文地质详查工作和未来供水水源地位置划分出有远景区段；评价不同的含水层之间、地表水与地下水之间的水平和垂向的水交换情况，进行水均衡计算；对预测的水源地进行评价；确定水井位置；解决土壤改良和灌溉问题。

第二，在地下水开采过程中，估算地下水的水源地和水质的变化，评价开采储量和流入矿坑水量。第三，解决生态问题，即研究与解决与地下水污染有关的问题。第四，解决工程建筑方面的问题。目前，这方面的方法技术和装置正在完善之中，有发展前景。研制系列 NMR 找水仪，将为探查路基、建筑物地基的水文地质情况和圈定江河堤坝渗漏范围，有广泛的发展潜力。

（2） 应用实例:目前，世界上拥有 NUMIS 系统并成功地应用于地下水勘查的国家有俄罗斯、法国、中国和德国。在此仅举 2 例说明 NUMIS 系统的应用效果。

实例 1 :在中国湖北永安地区探查到岩溶水-中国的南方和北方分布着大片的岩溶(喀斯特)地貌。其中南方以贵州为中心的桂、滇、川、湘、鄂、粤、赣、渝等 9 省(区，市)相邻

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

地区的联片裸露的碳酸盐山区，称为岩溶石山地区。在这一地区面积约 54 万平方公里，居住着 1 亿多人口(其中贫困人口 3400 万)。中国的北方，以山西为中心的岩溶地区，面积约 47 万平方公里[3]。面对岩溶石山地区特殊的地质—生态环境和贫穷落后的情况，合理开发和利用该地区的水资源是改善这一地区生态环境和解决脱贫问题的关键。

湖北永安地区缺少水文地质及物探的基础资料，在开展 NUMIS 找水前，首先投入电阻率法，了解该农牧开发区的电性结构特征。工作结果表明，该工区存在 4 个电性层：第一电性层的电阻率 ρ =75～120Ω·m，第二、第三、第四电性层的电阻率依次在 13～17Ω·m、288～1300Ω·m、50～120Ω·m 范围内变化。在湖北永安Ⅰ工区完成的 3 个 NMR 测深点所用的技术资料见表 2，反演解释结果示于图 4。

表 2 NMR 测深点技术参数表[4]

测深点号	XJJ-3	XJ#1	XJI-1
天线类型	大方（边长 75m）	大圆(直径 100m)	圆“8”(直径 50m)
发射频率/Hz	2009	2100.9	2100.9
脉冲矩个数	16	16	16
测量范围/nV	8000	5000	4000
记录长度/ms	250	250	250
噪声水平/nV	900～1300～2020	570～700～1120	220～260～930
叠加次数	128	128	128

由图 4 可以看出：①Ⅰ区有 2 个主要含水层，其中第一含水层位于 23～42m 深处，在各个测深点上均有反映：其中位于已知民用井附近的 XJ#1 测深点，在 32～41.5m 深度段有一含水层，与已知民用井中水面深度(32m)符合甚好，其单位体积含水量为 2.2%。距 XJ#1 点 70m 处的 XJJ-3 点的第一含水层偏浅(24～32m)，但含水量增大为 5.6%。距已知民用井 200m 的 XJI—1 点的第一含水层位于 28～36.5m 深处，其含水量为 6.34%。

根据 XJJ-3、XJ#1 点的 NMR 资料解释结果都预示在 75.7～100m 甚至 100m 以下，有第二个含水层存在。而 XJI-1 点因利用圆“8”字天线，没有发现深部异常的能力，故第二含水层没有响应。②由图 4(e)、(f)、(g)的 T_2^*直方图可以看出含水岩石结构特点，第一含水层的 T_2^*在 40～192ms 范围内变化，表明组成含水层的岩石颗粒大小不一，40ms 者，颗粒较小，而 192ms 者则颗粒变大，即岩石平均孔隙度由小变大。而深部含水层的 T_2^*=218～230.6ms，表明第二含水层的岩石颗粒增大，是含水层平均孔隙度变大的反映。

图 4(a)、(b)、(c)与(d)对比表明，NMR 测深解释结果不仅与实际钻孔资料符合甚好。而且也查明了电阻率测深法引起低阻异常的原因:由图 4(h)可见，亚粘土和破碎含水灰岩均为低阻反映，而 NMR 测深解释的含水层与破碎灰岩相对应。本区深部灰岩更加破碎、溶洞、裂隙发育，为主要含水层。含水体属碳酸盐岩类岩层。水质很好，单井日出水量超过 1000 吨。这样，结束了当地居民祖祖辈辈喝浑水的日子，同时提供了农牧用水的水源地。

实例 2 在法国 St.Cyr-en-Val 试验地探查岩溶水:为评估 NUMIS 找水系统评价水源地的有效性，在法国的两个试验基地(St.Cyr-en-Val 和 Bazancourt)进行了实际测量，获得了满意的地质效果。St.Cyr-en-Val 试验基地有一孔深 97m 钻孔(268 号孔)，其精细地划定了岩性，其岩性柱状图见图 5(a)。由图 5(a)可见，在 28～52m、60～84m 深处有饱水岩溶化石灰岩层，被 8m 厚砂岩层隔开。钻孔距 NUMIS 系统观测站 600m，测定岩溶化灰岩的导水系数为 $0.28m^2/s$。

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

NUMIS 测量的解释结果指出两个独立的含水层(见图 5(b)、(c))：

——第一含水层深 5～15m，含水量 6%，NMR 信号衰减时间常数为 120ms。

——第二含水层深 28～55m，含水量 11%，NMR 信号衰减时间常数为 230ms。

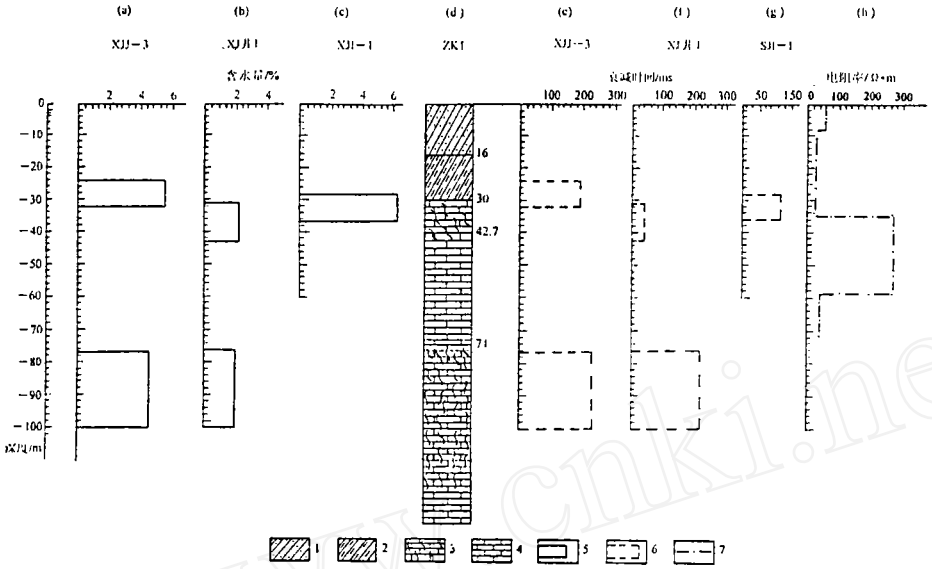


图 4　中国湖北永安 I 工区 NUMIS 测深反演解释结果与钻孔资料对比图[4]

1. 亚砂土，2. 亚粘土，3. 破碎灰岩，4. 完整灰岩，5. 含水量直方图，6. T_2^*直方图，7. 电阻率随深度变化曲线

（由中国地质大学潘玉玲编图）

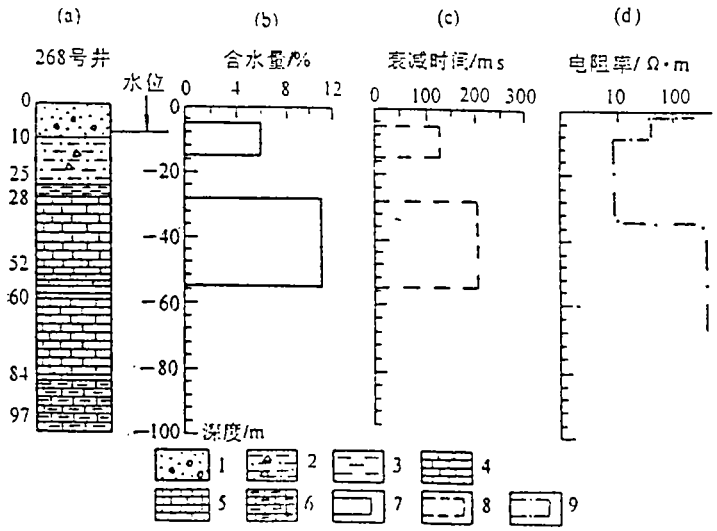


图 5 法国 St-Cyr-en-Val 测区解释结果[5]岩箸

1. 冲积层，2. 砂、砾石的粘土，3. 泥灰岩，4. 灰岩，5. 砂岩，6. 灰岩和粘土，7. 含水量直方图，8. 衰减时间直方图，9. 电阻率随深度变化图箸

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

NMR 测深解释结果得到的地下水位比钻孔揭示的要浅一些，这可能是由于浅表层为低阻层影响而导致的时空变化。NMR 信号的初始相位值表示浅层电阻率相当低，作为控制的电阻率测深也表明这一点，见图 5 (d)。低阻层导致激发电磁场穿透深度减小，也即探测深度减小。这就是未发现第二个岩溶化石灰岩含水层的原因。信号衰减时间常数值较大(120～230ms)，反映含水层孔隙相当大，由此可解释由钻孔得到的良好的导水系数。

4 结论和建议

（1）NMR 找水方法在探查 100m～200m 地下水工作中取得了明显的地质效果，有着广泛的发展前景；

（2）建议进一步提高 NUMIS 系统的抗电磁干扰能力，以扩展其应用领域[6]；

（3）进一步完善 NUMIS 系统资料解释方法，提高其资料解释的可靠性；

（4）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。

参考文献

[1]陈文升编著. 核磁共振地球物理仪器原理.地质出版社，1992，13～20

[2]Jean BERNARD 提供：法国 IRIS 公司技术资料：NUMIS^{plus}，1999,12

[3]田雪莲.岩溶石山地区：两院院士做“水”题. 中国国土资源报，1999，4，27，第三版篆

[4]潘玉玲，张昌达等编著. 地面核磁共振找水理论和方法.中国地质大学出版社，2000,108~113

[5]王艳君译，陈云升校. 对法国地下含水层的核磁共振研究. 译自 SEG65 届年会论文

[6]潘玉玲,万乐，袁照令，李振宇.核磁共振找水方法现状和发展趋势.地质科技情报，2000，105～108

作者简介：

潘玉玲，女，中国地质大学地球物理系教授，一直从事地面 NMR 找水方法的理论研究与实践。

Jean BERNARD，男，法国 IRIS 公司副总裁。

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