

地面核磁共振技术的新进展

葛秀珍 苑惠明 何雪洲

(中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所, 保定 071051)

摘要: 地面核磁共振技术是目前世界上仅有的可用于直接寻找地下水的技术。自从 20 世纪 80 年代俄罗斯开发成功该技术以来, 资料采集、处理、解释技术在不断的发展。本文在综述这些新发展后, 对该项技术在我国的应用进行了讨论。

关键词: 地面核磁共振 技术发展 寻找地下水 应用

前言

地面核磁共振(SNMR)技术又叫质子磁共振(PMR)或磁共振测深(MRS)技术, 该技术以利用核磁共振现象为基础, 研究地磁场中氢原子核(如水或烃中的氢核)自由旋进的电磁信号, 达到找水的目的。

20 世纪 70 年代末 80 年代初, 原苏联研究成功了能在地面探测这类信号的仪器 Hydroscope(找水仪), 并在原苏联和其它国家试验找水获得成功。自此以后, 世界上的有关科学家对发展 SNMR 找水技术投入了更多的工作。迄今为止, 全世界有 15 台 NUMIS, 中国有 5 台, 其中 3 台 NUMIS, 2 台 NUMIS+。我国已在湖北、福建、内蒙古、新疆等 12 省(地区)缺水地区找到了地下水, 研究成果填补了我国用 NMR 技术直接找水的空白, 使我国跃居使用核磁共振技术找水技术的世界先进国家行列。地调局水文方法所, 中国地质大学等单位利用这一技术在我国缺水地区找到了宝贵的地下水资源。本文介绍核磁共振技术近几年在国外的的发展, 并根据我国水文地质的实况, 提出了该项技术目前和将来在我国找水工作中的应用前景。

1 SNMR 技术的新进展

从理论方面讲, SNMR 找水技术除能提供何处有水, 有多少水的信息外, 还可以提供含水层的埋深、厚度、平均空隙度以及导水系数的资料; 但是, 由于 SNMR 技术的弱点是对环境的依赖性强, 而且在资料采集、处理、模拟和解释中的技术不到位, 时至 20 世纪 90 年代中期, 在大多数有较重环境电磁场干扰的地区得不到较好的效果, 或者根本无法使用。最近几年来, 科学家们从仪器、天线设置、模拟研究、SNMR 与其它物探方法综合利用和资料反演等方面做了许多研究, 并取得了一些可喜的成绩。

1.1 关于仪器改进

自 20 世纪 80 年代俄罗斯的 NMR 仪器成形至今,仪器经过了长期不断改进的历程。这些改进除来自仪器生产厂商外,还来自一些高水平的 SNMR 的实际工作者。如有的勘查人员提出了 NUMIS 的某些缺陷的改进方向。他们指出为了提高找水的精确度和加大测量深度的能力,不但需要把"死时间"(自反射尖脉冲结束时到 SNMR 信号开始探测之间)尽量减少到能观测微小孔隙中的水时为止,而且还需要更精确的电位差(包括虚实分量)的相位测量。只有用全部相位资料反演才会得到足够稳定的资料,这样才能获得大于二分之一集肤深度地下水的准确信息。特别是在使用"8"字形线圈(它能较大减少外部噪声干扰,但是却以牺牲对深度的灵敏度为代价)时,特别需要这样的改进。

1.2 关于野外天线设置的试验

高质量的野外记录是取得良好勘查成果的重要方面。影响 SNMR 测深资料的主要野外设置因素包括天线的布置、发射脉冲的数量、每个脉冲的迭加次数、每周的记录间隔以及总的记录时间等。下面仅就天线布置的改进做一简介。SNMR 使用的初期,一般将天线按边长为 75 米左右的矩形布置。为了减少来自输电线的干扰,97 年前后开发了一种"8"字形线圈,这种线圈的应用,较大地减少了噪声的干扰。后来在西班牙南部的野外试验中,发现不但线圈的形状和大小对压制干扰有影响,而且天线的方向对压制噪声也有很大影响^[5,8]。

1.3 电性地质材料 1D SNMR 测深的模型研究

SNMR 的理论主要是针对自由空间开发的。在这种情况下,交替激励场没有相位的变化;因此在确定有效分量的影响时不会有太大的困难。但是,在探测导电性地质材料时,激励场将会引起感应涡流,生成必须加以考虑的二次场。在现今的计算中,没考虑到椭圆偏振激励场的详细物理性质,只是做了线性偏振情况的外推,因此,只能得到一个近似的计算。Pierre Vallia 等在导电性地质材料的 1D SNMR 测深模型研究中,提出了一种特殊的形式体系,该体系允许将椭圆偏振场对质子磁距旋转的准确影响考虑在内。这样,就能对地下水产生的磁共振信号作正确的表达。另外,该体系也考虑到了导电性材料对返回地面接收器的 NMR 豫弛信号的影响,这样能起到改善提供的水力特性资料的作用。

1.4 SNMR 方法和其它物探方法的相结合

用 SNMR 方法和其它物探方法以及试验室测量相结合,描述含水层特征。在柏林附近的试验场地,作了 SNMR 与探地雷达(GPR)、普激发激化法(SIP)、2D 地电和折射地震找水试验。在试验室测量了岩芯样的空隙度、粒度大小分布和 NMR 衰减时,为了控制和解释野外资料还推导出了水力传导系数。SNMR 较好地探测出了含水层并确定了含水层的大致几何形态。由 SNMR 发现的含水层的含水量与岩芯样的单独测量十分一致。由衰减推导出来的水力传导系

数也在实验室的测量范围内。GPR 能很好地确定含水层的几何形态，将该资料与地电资料反演相结合，能够更好地得到含水层的电阻率分布。即使在良好的条件下，GPR 和地电方法在试验场地取得的估计水量远不如 SNMR 取得的可靠；其它物探资料取得的资料可用于 SNMR 资料的反演。通常情况下，当地层的电阻率低于 20 欧姆米时，感应电流产生的激励电场变化必须注意，在 SNMR 反演中必须考虑在内。

1.5 科学的利用 SNMR 和电阻率法

科学利用 SNMR 和电阻率法为提高在柬埔寨暹粒省找水区的成井率提供最佳方法组合。该地区的地层主要由砂和粘土组成，厚度在 20-100m 之间。将直流电法(1D VES 2D 电成像)、时间域电磁法(TDEM)测深和地面核磁共振(SNMR)用于初期的勘查。为了验证物探找水的效果，打了钻孔并且还做了电法测井和抽水试验。结果证实(1)电阻率方法(VES、2D 成像和 TEM)对该地极不均匀地层的地下水导电率很敏感。提出了测量的地下水导电率与含水层电阻率的初步联系。(2)SNMR 给出了 5-60m 深地层中出现地下水的准确信息。在 SNMR 测深资料(从野外资料估算的含水层导水系数)和水动力参数(从钻孔抽水试验得到的含水层局部导水系数以及钻孔的相对涌水量)间建立了初步的联系。(3)电阻率法和 SNMR 之间具有互补性。(4)在勘查范围内，使用物探成果后的成孔率从 56%提高到 90%。

通过技术和成本分析，为该地推荐了一种定井的物探方法的组合法，该组合法在计划范围内既可以提高成井率又可以节省经费。它的内容包括：(1)在成孔率低于 30%的地方，采用 SNMR、TDEM 和电法结合勘查。(2)成孔率在 30%-50%的地方，采用 SNMR 与 TDEM 相结合的方法。(3)成孔率在 50%以上的地区，电法(VES 和 2D 电成像)是找水规范化的方法。

1.6 SNMR 探测地下水的试验研究

西班牙南部一个重干扰区，测量到的 SNMR 信号是一种很弱的信号，一般只有几十纳伏，很容易受到工业或天然源的电磁干扰。而在该试验区，同时存在上述的两类干扰，其大小均超过 1500nv。在这些地方用传统的方法做的试验记录的意义不大；只有用大小、形状和方向最合适的天线、并用大迭加次数做的最完整的记录才能探测到来自富含水层信号的衰减图形。试验证明上述记录参数的适当设置可以减少随机干扰，但对于减少脉冲干扰效果不大，这需要其它的技术。可以利用 SNMR 测量中获得的噪声图形来设计减少噪声影响的数字率波器，并且应同时采用锐切除。在没有预先提供任何地质资料的情况下对取得的资料做了解释。尽管在该地存在较强的干扰，但是取得的反演成果还是提供了一个与含水量分布地质资料显著相关的信息。另一方面，确定的衰减时较差，好像受到了现存干扰的较大影响。

1.7 一些具有代表性的反演方法

1.7.1 利用以奇异值分析(SVD)和蒙特卡罗方法为基础的反演方法

在使用二次误差函数的情况下，SVD 能给出问题比较直接的解。两种方法给出的成果基

本相同。但是对于比较复杂的误差函数，SVD 方法却不适用(没有进一步的近似，如推测解的邻域内误差函数的线性化)；在假设研究空间不太大的情况下，可以选择蒙特卡罗方法。在一个有物理根据的反演(只准确知道信号的大小)中，已经证明这种方法的有用性。

1.7.2 线性编程方法

法国的 A.Guillen 等利用原来为重力和磁法开发的反演技术(线性编程,"理想物体"和"致密物体")对 SNMR 资料进行了研究。研究成果指出，线性编程方法不但可以得到解，而且还能研究解域，这就为参数可能的变化提供了一个较好想法。这种方法可以通过限制含水层顶、底板深度参数来描述地下水分布特征。另外，还可以提供诸如水的最小浓度、总水厚度和水量等地下水分布的其它特征。

为了对比不同方法在 SNMR 资料反演中的效果，上述研究利用了模拟和野外两种资料。利用线性编程方法取得的成果优于利用 Tikhonov 正则法新取得的成果。另外，这种方法可用于手提计算机，这就是说可以在野外做快速的解释。需指出的是这种方法还可能在非均匀层状 2D 或一般 3D 情况下具有开发应用前景。

1.7.3 SNMR 与 VES 资料联合反演方法

由于 SNMR 和 VES 资料解释的含水层结构之间存在相似性和一致性，所以我们利用石油工业常用的阿耳其定律对两种资料做了联合反演。反演中使用了模拟退火算法。由于这种算法对两种物探资料都可以使用超快数值解，所以这种被导随机搜索算法允许运行的速度比最小二乘法快。为了研究这种新算法的性能和证明它的有用性，已经将它用于一些不同的合成资料的反演。在德国著名的试验场地(在这里分别用 SNMR 和 VES 做过试验)的研究最终证明了联合反演对实测资料的有用性。

1.7.4 蒙特卡罗法

德国的 A.Guillen 等提出了一种用于研究与 SNMR 资料一致的解集的蒙特卡罗适应法。这种方法允许用统计法来描述含水层，为了回答与地下水开发有关的问题，还可以利用水的含量和衰减时来评价含水层水资源和生产的危险性。应用实例已经证明采用研究模型空间战略的用效性。希望在不久的将来可以利用反演结果和地质统计学来进行含水层和衰减时的 3D 模拟。

1.7.5 "水文核磁共振方法"

水文核磁共振方法适于普查、调查深度达 200m 的地下水的分布，该方法可以解决以下课题：

- (1)对用于农业、工业、民用的地下水资源、地下水储量的普查、勘查和评价。
- (2)在实施建筑物的各种技术方案，核电站的建立，废物埋藏等等条件下对地下水污染进行研究、填图和评价，并制定保护措施。
- (3)进行生态、水文地质和工程地质测量以便土壤改良、供水和工程施工。

1.7.6 借助核磁共振 x 射线断层摄像"验湿器"(也有译成"示水仪")调查地下水

该"验湿器"无须钻孔可以"目视"含水层的水的信息,是野外地球物理仪器最新水平的代表。该仪器可以提供有关岩层中不同深度的自由水的信息,确定含水层富水厚度和埋深,评价含水层的平均空隙度。从 1989 - 1999 年使用"验湿器"在俄罗斯及许多国家完成了 60 多次野外普查勘探工作。

1.8 关于提高 SNMR 测定参数精度的研究

俄罗斯的 M.D.Schirov 等利用简单的计算指出,不同含水层(其间存在高导夹层)的 SNMR 信号之间的相移可以对测量总信号曲线产生强烈的变形。变形的程度取决于相移的总量和单个影响的振幅比。但是,为了确定这种相位改变,SNMR 仪器就应该允许脉冲(q)值有足够跨度。事实上,如果该跨度不够,那么就得不到上部含水层的信号影响比下部含水层的影响得更小的 q 值。

2 SNMR 技术在我国的应用前景

虽然当前 SNMR 技术仅处于它的初级发展阶段,现代化的方法也仅处于该技术的 1D 应用初期;但即使是这样,从上面国外有关技术进展的介绍中可以看到,该技术已经为水文地质调查的应用提供了许多机会。实际上我国已经抓住了这一机会,中国地质大学和水文方法所已经将 SNMR 技术成功地用于寻找岩溶水、基岩裂隙水、第四纪含水层;并且还总结出了个别地区(如塔河油田)的优化找水物探方案。建议如下:

2.1 按照全国严重缺水地区的水文地质特点和地球物理条件进行大致的分类。在适合 SNMR 测深及其它物探方法工作的地区,首先开展最优化物探技术组合方案试验,然后利用最佳组合方法投入面上的工作,这样才有可能取得技术和经济效益的双赢。

2.2 加强资料解释工作的研究。从上述的介绍中可以看到,不同的反演技术具有不同的特点,可能对处理不同类型地质资料有益。NUMIS 仪器的资料反演用的是 Tikhonov 正则法,比较单一。如果在现有的技术条件下,针对我国实际,开发出适合不同水文地质和地球物理条件的资料解释应用软件,将会较大地提高 SNMR 测深的应用效率。

3 SNMR 技术将来可能的应用

SNMR 测深的原理是针对自由空间提出来的,数值模拟、材料采集和处理以及解释都是 1D 的,这里给我们的研究和开发提供了巨大的空间。我国已经具备了开发 SNMR 仪器到资料解释全过程的基本能力。我们已经失去了一些机会。如果我们能更好的组织策划,相信不久的将来就又能开发出适用于我国具体条件的 SNMR 仪器和技术应用系列。SNMR 技术目前是世界上仅有的直接找水的物探技术。随着该技术的发展完善,SNMR 有可能成为我国地下水勘查最重要的技术。并且它的应用有可能扩展到地质环境调查领域。