



项目批准号	40304009
申请代码	D0409
归口管理部门	
收件日期	

国家自然科学基金 资助项目结题报告

资助类别:	面上项目		
亚类说明:	青年科学基金项目		
附注说明:			
项目名称:	导电性对地面核磁共振测深响应影响理论研究		
负责人:	翁爱华	电话:	0431-8502362
电子邮件:	wengaihua@email.jlu.edu.cn		
依托单位:	吉林大学		
联系人:	温庆波	电话:	0431-5167419
资助金额:	22(万元)	累计拨款:	22.0000(万元)
执行年限:	2004.01-2006.12		

填表日期: 2007年1月16日

国家自然科学基金委员会制(2004年11月)



关于填报《国家自然科学基金资助项目结题报告》的说明

一. 国家自然科学基金资助项目结束后,项目负责人须按要求认真填报《国家自然科学基金资助项目结题报告》(简称《结题报告》),以此作为资助项目研究工作的重要档案,并作为项目验收和评估的主要依据。

二. 项目负责人及其合作者应认真阅读自然科学基金资助项目和财务管理的有关规定、办法(查阅 <http://www.nsf.gov.cn>),在项目研究工作的基础上,实事求是地撰写《结题报告》并提供必要的附件材料,保证填报内容真实、数据准确。

三. 项目依托单位按规定要求认真审查,确保材料齐全,在次年申请项目时将电子文档和一份纸质文档统一报送国家自然科学基金委员会。

四. 国家自然科学基金委员会负责跟踪和管理结题项目的成果,根据情况在2-3年后对项目执行情况进行评估。请项目负责人在结题后三年内继续提供项目研究后期正式发表或公布的成果,一并存档并作为项目管理和评估的依据。

五. 《结题报告》由报告正文、研究成果目录表、统计数据表、审核意见表、经费决算表和附件等部分组成,有关格式和撰写说明详见“《结题报告》报告正文撰写提纲”。

六. 研究结束后,项目(课题)负责人应会同依托单位财务部门清理账目,根据批准的预算经费,如实编报资助项目(课题)经费决算,逐项列出单项固定资产超过5万元的名称及使用情况说明,争取其他渠道经费情况等。须对项目经费的收、支、余情况作出总体的文字说明,当经费支出与经费预算相差较大时,需要着重说明;拨入经费与预算经费不相等时,需要特别说明。合作经费要按照合作单位经费实际开支内容并入《经费决算表》的各类开支科目。

经费决算表(重大项目除外)的书面材料由依托单位科研管理部门、财务部门审核签署意见后存档备查。

重大项目按照《国家自然科学基金项目资助经费管理办法》第二十一条编报决算,向自然科学基金会同时报送书面材料与电子文档。

国家自然科学基金强调科学道德和良好的学风,反对弄虚作假和浮躁作风,要求认真工作、填报材料实事求是。基础研究允许探索和失败,特别是面上项目,关键看工作状况和发展态势。如有这种情况,也请在报告中实事求是地反映出来。

国家自然科学基金资助项目《结题报告》撰写提纲与说明

基金资助项目《结题报告》总体结构上分为：1) 报告正文、2) 成果目录表、3) 成果数据统计表、4) 项目负责人签字及部门审核意见表、5) 附件材料，请项目负责人参照以下提纲及其说明认真撰写，并可根据需要自行增设栏目或补充必要的图表。

《结题报告》要求全面地反映资助项目的工作情况和研究进展，如实地体现资助项目的研究计划要点、执行情况、主要进展与成果、人才培养、合作交流、经费使用以及研究计划调整等情况，重点描述研究进展与重要的研究成果。请精心撰写并认真核对，确保“内容真实、数据准确”。

在撰写风格上请注意“重点突出，语言精练、准确”，做到“结构合理，层次分明，标题突出，条目清晰”，必要的地方可图表、图文并茂。

《结题报告》撰写完毕后，请删除不再需要保留的说明，如填表说明等，使最终的版面更加简洁、美观、大方。

一、报告正文。参照提纲格式自由撰写，并可以根据需要分解或增设栏目。要求层次分明、条目清晰、内容准确。主要栏目为：

- 1、摘要，关键词，abstract，keyword。以深入浅出的语言简明扼要地概括出项目的精华，如背景、方向、主要内容、重要结果、关键数据及其科学意义等。关键词和keyword各不超过5个，并用分号隔开。
- 2、研究计划要点及执行情况概述。是否按计划进行，哪些内容作了必要的调整和变动，哪些研究内容未按计划进行，原因何在。
- 3、研究工作主要进展和所取得的成果。本部分内容是《结题报告》的核心部分，也是基金资助项目中最有学术价值和可供其它研究者进一步研究的基础，要求项目负责人和承担者实事求是地认真撰写，包括代表性成果介绍，说明其水平和影响，并简要阐述其科学意义或应用前景等。视情提供必要的国内外动态和研究成果的比较，必要的参考文献出处等。

对重要的研究进展或成果，请尽可能“一事一议”，分段撰写，以便今后成果展示或管理汇报时可以整段地剪贴引用。

对在后面成果目录表及统计数据表中的一些内容，如国际学术奖、数据库、软件等，应在本部分中具体地描述。

最后，根据个人的实际贡献等，概述本项目研究人员的合作与分工，列出项目执行期间主要研究人员和中途调离、退出的研究人员的名单，并简要说明原因。

4、国内外学术合作交流与人才培养情况（如无，可以不写）。

组织国内外学术活动的情况，包括会议主题、内容、规模、时间、地点、效果等。

国际会议大会特邀报告及参加组委会情况等，请提供邀请信等必要的复印件。

研究生培养情况，列出研究生姓名、研究方向、论文题目、导师姓名、已答辩或预计答辩的年月。

促进研究成果的传播、应用情况，包括科普等。

5、存在的问题、建议及其他需要说明的情况。包括项目研究工作中的难点和经验，本项目研究是否达到预期目标，如未达到，请分析原因和可能的解决途径。今后进一步研究的建议和设想。

注：基础研究具有一定的探索性，研究过程中的结果、不成功的试验以及不理想的结果都可能具有参考价值，即使失败的经验也是有价值的。如有此类情况，请具体描述研究过程，列出试验条件、现象等要点，其目的是总结经验，使其他研究者少走弯路。

二、研究成果目录和数据统计表。

为了规范管理，获得准确的统计数据，如实反映自然科学基金资助项目的研究成果，要求数据必须准确并保证几个表的数据相对应、一致。

成果类型分为“获奖、专利、专著、期刊论文、会议论文、其他”六大类，请归类集中填写，逐类单独编号；未标注“国家自然科学基金资助及批准号”的论文排在相应类别的后面，无正式录用证明的论文暂不列入，表格不够可自行增加；成果名称栏目填写论文题目或专利或奖励名称；主要完成人根据作者或获奖人实际情况按顺序填写，并在论文通讯作者后加*标注；成果说明栏目分别按以下格式填写：

- 1) 期刊论文按“全部作者，论文题目，刊物名称·卷(期)·起止页码，年月(SCI, EI, ISTP, ISR 收录，如是该类杂志)”格式填写说明；
- 2) 会议论文按“国际 国内，特邀报告 口头报告 墙报展示，全部作者，论文题目，会议名称，时间，地点”格式填写说明；
- 3) 专著按“全部作者，书名、出版社，出版时间，字数，发行量”格式填写说明；
- 4) 专利按“获准专利国别，类别，专利号，获专利时间”格式填写说明；
- 5) 获奖按“颁奖单位，颁奖时间，奖励名称，等级”格式填写说明。
- 6) 其他，根据实际情况填写并做必要的说明。

是否标注“国家自然科学基金资助及项目编号”的情况，请根据实际情况在标注栏中说明；选项为①标注资助号，②未标资助号，③空白（表示什么也没标）。被SCI 或 EI、ISTP、ISR 收录的，除注明是否标注国家自然科学基金资助外，尚需加填SCI 或 EI 等缩写词；

三、附件材料，随纸制结题报告，提供所要求和其他必要的材料。

提供不超过6篇代表性论著的原件或复印件，其余论著提供首页和有标注国家自然科学基金项目资助页的复印件，研究生学位论文提供封面复印件。装订顺序须与研究论著目录中的排序一致；

已录用的稿件除首页和标注页之外，须附编辑部录用证明的复印件；

大会特邀报告须提供邀请函以及会议文集有关目录的复印件；

研究成果附件（科学技术鉴定证明书、奖励证书、专利证书的复印件），装订顺序须与研究成果目录中的排序一致。



项目摘要

中文摘要(500字以内):

导电性是影响地面核磁共振测深重要因素之一。通过我们的研究,给出了考虑导电性的地面核磁共振理论模拟公式。理论分析认为导电性分布的差异对地面核磁共振测深影响很大,层状导电模型是地面核磁共振测深模型较好的一级近似。在此基础上,在弱导电条件下对地面核磁共振成像的采用正则化反演技术,实现了地面核磁共振数据的成像。对对成像影响很大的正则化参数,通过改变正则化参数,认为当基于不同的模型约束进行反演得到的成像结果差别不大时所对应的正则化参数是最优正则化参数,找到了一条确定最优正则化参数的原则,解决了困扰目前地面核磁共振测深正则化反演的一个重要问题。考虑到导电条件以及噪音的影响,还引进了投影迭代反演算法,克服了反演中出现负含水量的问题,使基于弱导电模型的地面核磁共振测深成像更加合理。在强导电条件下,地面核磁响应初始理论振幅为复数。由于相位测量精度差,实际测量其强度。对于振幅强度,认识到其与含水量的非线性关系,提出采用广义线性迭代方法对地面核磁响应进行反演,并给出了含水量表示的振幅强度平方的二次型表达式,导出了反演过程中灵敏度矩阵元素表达式。结合奇异值分解和模型约束,实现了任意层状导电模型的地面核磁共振测深成像。

关键词(不超过5个,用分号分开):地面核磁共振;导电性;地下水勘探;非线性;广义迭代反演

Abstract(limited to 500 words):

Electrical conductivity is one of the most important factors that affect the application of surface nuclear magnetic resonance (NMR). Through our research, we have deduced a new forward formula which incorporates both the clockwise and counterclock polarization magnetic field. And with model simulating, it has found that distributions of electrical conductivity affect surface NMR responses significantly. And layered electrical conductivity distribution is the first level approximation of real hydrogeological model. In weak electrical conductivity environment, we inverse surface NMR data with regularization method, and the optimal regularization parameter can be determined when the discrepancy of the models inversed with different model constrains disappears. And projection iteration method has been adapted to surface NMR inversion to generate a reliable water content model. In strong electrical conductive earth, surface NMR responses appear as complex. And its intensity, which is a nonlinear function of water content distribution, is often measured. Basing our forward operator, we have developed a generalized linear iteration inversion method to infer water content distribution. And during the inversion, the intensity squares are inversed, which can be expressed as quadrature form of water content. Jacobian matrix elements can be evaluated at the beginning of the inversion through an analytical form which is a linear of water content and nonlinear of electrical conductivity distribution. With the help of model constrains, the new inversion can be applied to the surface NMR data of any layered electrical conductive earth.

Keywords(limited to 5 keywords, seperated by;):Surface nuclear magnetic resonance; electrical conductivity; groundwater exploration; non-linearity; generalized linear inversion



报告正文

一、研究计划要点及执行情况

本项目围绕“建立考虑导电性引起相移效应的地面核磁共振响应方程,在此基础上,给出克服地层导电性影响的地面核磁共振成像基本方程”这一研究目标,开展了如下的研究:

1. 分析地面核磁共振响应理论模型,建立考虑导电性影响的地面核磁共振响应方程;
2. 建立考虑导电性影响的地面核磁共振反演成像基本方程;
3. 数值实现上述分析研究工作,全面深入分析地面核磁共振的响应特征,着重讨论导电性、线圈结构等因素对该响应的影响作用规律。

围绕上述研究内容,按照制定的年度研究计划,

4. 2004. 1. 1 — 2004. 12. 31 导出层状导电介质回线源磁场的相移计算公式,建立考虑相移效应的地面核磁共振正演理论,给出相应的积分方程。深入讨论导电性对地面核磁共振响应的影响规律;
5. 2005. 1. 1 — 2005. 12. 31 在导电模型地面核磁共振响应积分方程的基础上,找出能克服导电性影响的成像方法,并给出相应的基本方程;
6. 2006. 1. 1 — 2006. 12. 31 对研究得到的理论公式及成像基本方程进行数值实现。综合研究过程中得到的理论模拟与数据处理标准程序,撰写研究总结报告。

项目组主要成员在项目负责人的带领下,协力攻关,经过三年的研究,较为圆满地完成了预期的研究任务,并取得了如下较为丰富的研究成果:

7. 建立导电条件下地面核磁共振响应相移计算方法及考虑该效应的地面核磁共振积分方程;
8. 给出导电条件下地面核磁共振的成像基本方程;
9. 将研究成果总结成文,公开和即将发表学术论文多篇。

二、研究工作主要进展和所取得的成果

项目主要围绕导电条件下地面核磁共振测深涉及的理论及其应用问题展开研究,所取得的研究成果概括起来主要有:(1)、导电条件下地面核磁共振正演理论研究,给出了考虑相位与极化方向差异的理论公式;(2)、讨论了导电性影响的规律;(3)、在相对高阻条件下,提出了采用投影迭代法反演核磁共振数据的技术;(4)、在导电条件下,考虑到相位测量精度问题,提出了利用振幅强度进行反演的技术思路,导出了具体的理论公式;(5)提出了基于奇异值分解和光滑模型约束的广义线性迭代反演技术解释地面核磁共振数据,并将其推广到任意层状导电介



质中。

2.1 正演理论

导电性对地面核磁共振深响应的影响非常重要。通过研究,已经从理论上初步获得了导电性对地面核磁共振响应影响的关键理论公式:

$$E_0(q) = \int_V K(q, \mathbf{r}) n_v(\mathbf{r}) dV, \quad (1)$$

$$K(q, \mathbf{r}) = -\frac{2\omega\zeta_N B_0}{I} e^{2i\zeta_r} |B_r^-| \sin(\gamma\tau_p |B_r^+|), \quad (2)$$

其中, $E_0(q)$ 为信号初始幅值, $n_v(\mathbf{r})$ 为空间点 \mathbf{r} 的含水性, q 为激发电流强度, $K(q, \mathbf{r})$ 为积分核, 联系含水量与观测的感应电动势强度。显然, 它相当于一个滤波器。

新的积分核与目前常用的积分核形式上是一样的, 但两者存在明显的不同,

(1) 式(2)中存在由于扩散造成的线圈的发射信号到接收点的相位延迟 $\zeta_r(\omega, \mathbf{r})$;

(2) 将对核磁响应有贡献的激发场的静磁场垂直分量分解为顺时针方向 B_r^+ 与反时针方向 B_r^- 。

这些差异实际是导电性影响的新成果。滞后 $\zeta_r(\omega, \mathbf{r})$ 的存在在原来的理论中没有提及, 因为早先假设的介质时不导电的绝缘体, 那里电磁波的趋肤深度远远大于激发线圈的尺寸。而导电性的存在, 尤其在低电阻率区, 这种假设不成立。

导电性造成空间场的椭圆极化, 使得在考虑场对核磁响应的贡献时需要同时考虑顺时针与反时针方向的两个分量, 而不是原来的线性极化中只要用原场强 1/2 的顺时针极化场。

2.2 导电性影响的规律

目前国内外关于地层导电性对地面核磁共振影响的理论研究主要针对均匀导电半空间模型和在导电半空间插入特殊电性层的简单三层模型进行, 对于较为复杂的多层导电模型, 则采用某种平均方法获得整个地电断面的导电均匀半空间等效模型, 并以此进行导电性影响讨论。

由于回线源在实际层状介质中和与其等效的导电均匀半空间中产生的磁场分布不一样, 在这两种模型上获得的地面核磁共振响应也必然不同。同时, 尽管等效导电半空间的电导率给定, 但与该等效模型的层状电阻率模型有很多, 且导电层相对含水层的空间配置关系对地面核磁共振的影响很大。这里, 我们以最简单的 2 层导电模型和与其等效的均匀导电半空间模型为例, 讨论这两种导电模型上地面核磁共振测深的差别, 为认识导电模型的差别对地面核磁共振的影响提供理论参考。

通过研究发现, 在勘探的有效深度范围内, 虽然 2 层模型和与其等效的均匀半空间导电模型在导电特性上一样, 但由于电阻率分布的差异, 导致介质中磁场的变化规律不同, 从而地面核磁共振的核函数分布规律出现较明显的差异。

假设采用重叠回线观测, 线圈直径 100m, 测点附近的地磁场强度为 50 000nT, 地磁倾角为 0°。相应地, 线圈中电流频率为约 2129Hz, 为质子的进动频率。同时, 还假设线圈的电流脉冲宽度 τ 为 40ms。

假设围岩背景的电导率为 $0.1\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。在当前情况下, 利用趋肤深度估计电磁波的穿透深度为 $\delta=503\sqrt{1/\sigma f}=34.5\text{m}$ 。一般认为勘探深度为线圈直径的 2 倍, 即 200m。考虑两者, 折中后认为当前导电情况下地面核磁共振的探测深度最大为 100m, 并设置为等效电导率的有效计算深度。假设具有该等效电导率值的层状介质为 2 层, 其覆盖层厚 30m, 电导率为 $0.02\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$, 则基



底电导率为 $0.134\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。假设含水层只有一层, 其厚度 10m, 含水量 30%, 但埋深分别在 20m 和 30m (见表 1)。

表 1 等效电导率模型
Table 1 Models used during our discussion

半空间模型	2 层电导率模型	含水层模型 I	含水层模型 II
	$\sigma=0.02\text{S}\cdot\text{m}^{-1}, h=30\text{m}$	$h=20\text{m}$ $h=10\text{m}, w=30\%$	$h=30\text{m}$ $h=10\text{m}, w=30\%$
$0.1\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	$\sigma=0.134\text{S}\cdot\text{m}^{-1}, h=70\text{m}$		

图 1 给出了 2 层导电模型和与其等效的导电半空间模型的垂直磁场 H_z 随深度 z 的变化情况。比较两种模型的计算结果可以看出, 在浅部, 由于等效模型的导电性 ($10\Omega\cdot\text{m}$) 相对 2 层模型 ($50\Omega\cdot\text{m}$) 好。因此, 相对 2 层模型, 等效模型的虚部相对较大。相反, 2 层模型的实部大于等效模型的实部。但在深部, 由于两种模型的导电性基本一样, 因此计算的结果也基本一致。

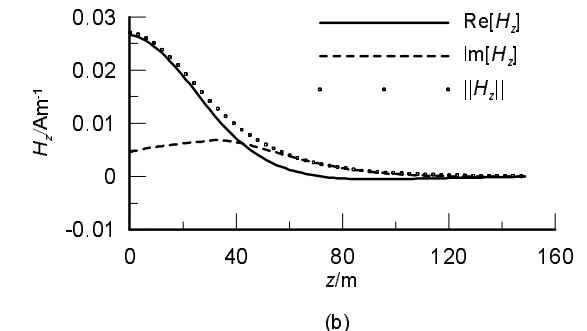
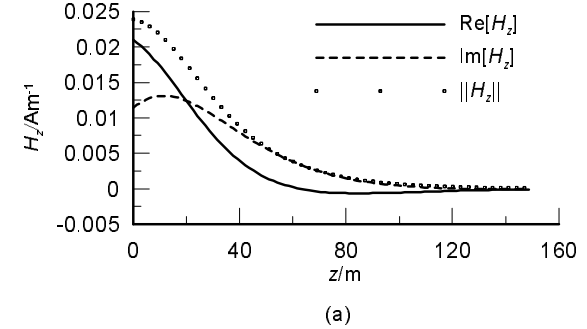


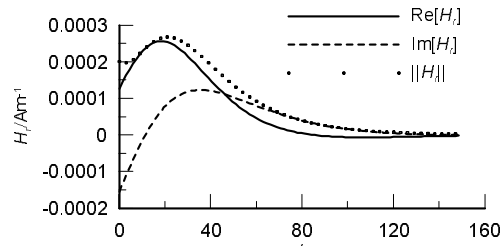
图 1 发射线圈中心处 H_z 随深度 z 的变化规律。线圈电流的频率为 2129Hz, 相当于质子的地磁场进动频率。(a) $10\Omega\cdot\text{m}$ 等效模型结果, (b) 2 层导电模型情况。

图 2 是水平径向磁场 H_r 随深度 z 的变化规律。由于在线圈正中心处 $H_r=0$, 因此计算时偏离中心 1m。从图可见, 在等效模型中 H_r 随深度变化连续, 但在 2 层模型中, 在深度 30m, 也就是电性界面附近, 出现虚部的不连续。同时, 比较两种模型的结果, H_r 的差异也是主要出现在浅部。在这个区间, 2 层模型的 H_r 垂直梯度变化较等效半空间模型的大。

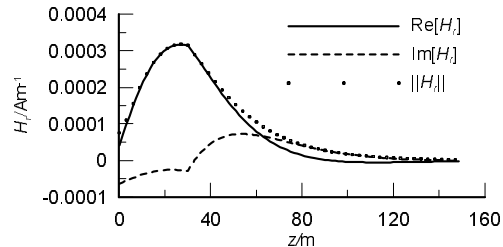
导电性对地面核磁共振测深的影响由磁场分布并通过积分核函数反映出来。对于一维层状模型, 对每一层, 其核函数是磁场的平均结果。但由于不同模型磁场的空间变化规律不同, 即使导电性可以等效, 但核函数却不一样。图 3 是基于均匀等效导电半空间, 对含水层模型 I 计算的核函数随深度 z 与脉冲强度 Q 的变化规律。图中最下边的为核函数的实部 $\text{Re}[A]$, 中部为其虚部 $\text{Im}[A]$, 而最上边是其模 $|A|$ 。讨论的核函数深度范围与非 0 含水量的含水层分布范围一致。因为该范围外的核函数不影响测量结果。从图可见, 在导电条件下, 由于表层的感应效应较大, 核函数的虚部强度较大, 甚至远比实部强。因此, 地面核磁共振信号由虚部控制, 此时显然不



能忽略导电性影响。同时，核函数随脉冲强度或者深度表现出一定的振荡特性，其虚部的横向振荡特征更明显。在深度方向，随深度增加，核函数总的规律呈减小趋势，并在深部趋于 0。

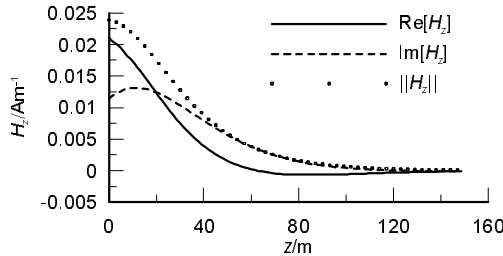


(a)

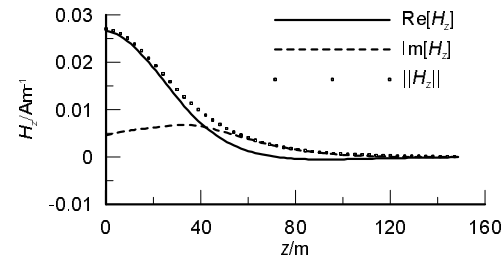


(b)

图 2 发射线圈中心 H_1 随深度 z 的变化规律。线圈电流的频率为 2129Hz。(a) 10Ω·m 等效模型结果，(b) 2 层导电模型情况。



(a)



(b)

图 3 等效导电模型核函数变化规律，横坐标 iQ 为脉冲强度序号，代表脉冲强度由最小的 120 Ams 变化到最大 9720Ams。纵坐标 iZ 表示剖分子层中心深度，这里深度由 10m 变化到 29m。



图 4 是与等效导电模型对应的 2 层模型在含水层深度范围 10~29m 内积分核函数的变化规律。从图可见，该导电模型的核函数变化规律基本与等效模型的一致。但与表层导电性较好的等效模型相比，在 2 层模型中，实部的强度比虚部大。而由于表层电阻率较高，二次场感应效应较小，导致在该深度范围内核函数的虚部比实部小。

两种等效导电模型上含水层模型 I 与 II 的地面核磁共振测深响应曲线见图 5。比较可见，无论是含水层模型 I 还是 II，它们在 2 层导电模型与其等效的导电模型上产生的地面核磁共振测深响应都有较大的差别，表现为导电性较好的等效导电模型的核磁感应电动势 e 相对较小，而相位 φ 相对较大。相对模型 I，模型 II 的这种感应电动势的差别在减小。

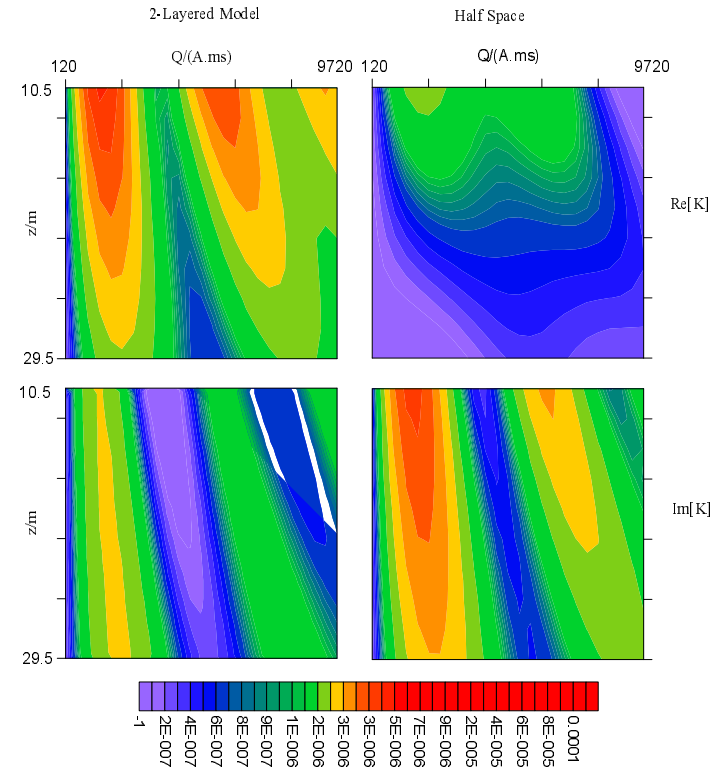
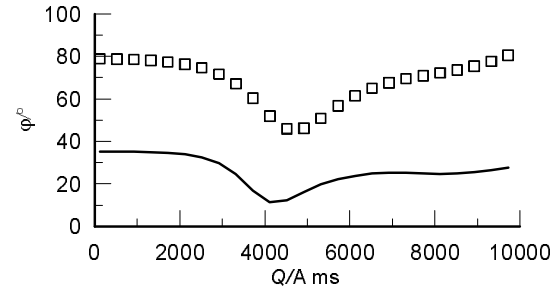
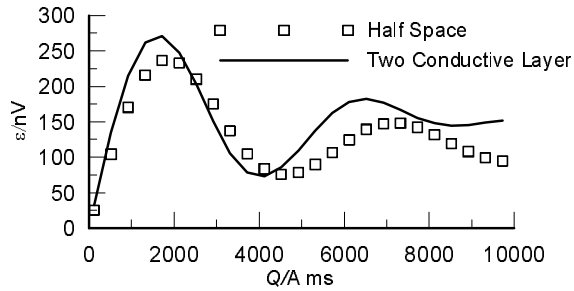
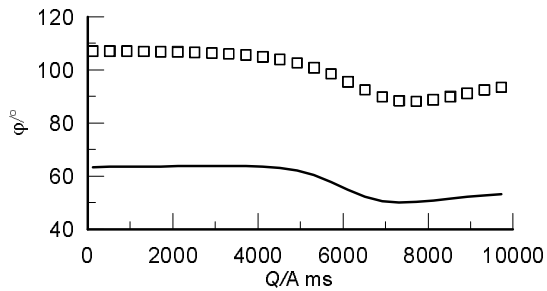
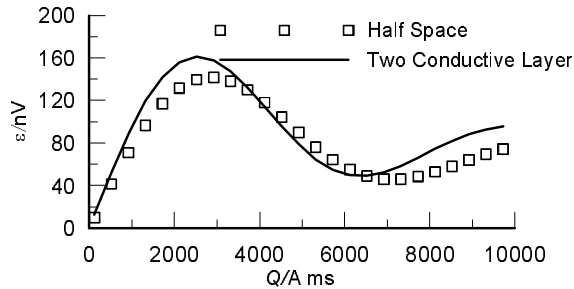


图 4 2 层导电模型核函数变化规律。图中参数含义同图 3。



(a)



(b)

图5 (a)含水层模型I与(b)含水层模型II的核磁共振响应

2.3 弱导电条件下的反演技术之一：正则化反演

在相对高阻情况下，地面核磁信号的初始幅度为含水量的线性函数，可以采用常规的正则化技术进行反演。但不同的模型约束对基于正则化反演技术的地面核磁共振测深数据反演的影响很大。我们利用理论数据讨论了平坦模型和光滑模型约束及与之相关的正则化参数对反演结果的影响规律。

具体的模型见表 2（含水率单位为单位含水率，表示为 p.u.）。模拟时，假设地磁强度为 50000nT，倾角 0°，线圈为圆回线，半径 50m，60 个电流脉冲强度激发，最大强度为 9000A.ms。为计算自由空间的积分核函数，假设大地电阻率为 $10^3\Omega\cdot m$ 。

表 2 两层含水层模型
Table 2 Water content distribution for synthetic data

层号	顶面埋深/m	层厚度/m	含水率/p.u
1	40	4	0.3
2	70	10	0.2

2.3.1 无噪音理论数据情况

根据上述模型计算的理论地面核磁响应如图 6 左上所示。采用 $\alpha=10^{-3}$ 、 $\alpha=10^{-3}$ 和 $\alpha=10^{-3}$ 三个不同的正则化参数与最小长度模型、最平坦模型和最光滑模型约束反演得到的含水量分布如图 6 中的其它子图所示。从图可见，对于理论无噪音数据，正则化参数越小，反演的含水量分布越接近表 2 中的理论模型。在相同的正则化参数时，对于无噪音数据，不同的模型约束，获得的含水量分布基本一致，因此模型约束在这种条件下，对反演的结果影响不大。

2.3.2 噪音数据的结果

为得到指定信噪比 SNR 的 0 均值随机正态噪音，给定数据的方差 σ_f^2 ，则噪音的方差 σ_n^2 可以由

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sigma_f^2}{\sigma_n^2}, \quad (3)$$

获得。对图 6 中理论曲线（图 7 左上中的“o”）叠加 SNR = 20 的随机噪音后得到图 7 左上中的“Δ”表示的数据。采用不同的正则化参数和模型约束条件，对该数据反演拟合，拟合得到的含水量分布如图 7 中的其它子图所示。

从图可见，对于较大的正则化参数，在小脉冲参数时曲线基本拟合，但在较大的脉冲强度时，拟合较差。表现在反演的含水量分布上，无论最小长度模型、最平坦模型和最光滑模型，在总体上反映出理论含水量的分布，但反演的含水量偏小，同时含水层的厚度变大，甚至上下含水段连成一体。同时，受噪音的影响，在浅部出现假的含水层。不同的模型约束反演得到的含水量模型有较大的差异，其中，最光滑模型效果最好，而平坦模型和最小长度模型约束反演的模型最差。

随着正则化参数的减小，模型约束在反演中的作用被逐渐弱化，数据的拟合误差作用被加强，反演的模型分辨率逐渐增大，并接近理论模型。同时，模型的约束方式对反演的结果影响逐渐消失。但无论如何，由于噪音的影响，在浅部还是出现局部假的含水量。

模拟表明，无论是高信噪比的数据，还是低信噪比数据，反演的含水量在小正则化参数时，对模型约束的依赖性不大，主要受正则化参数的影响。大正则化参数的反演分辨率低，而小正则化参数在保证数据拟合精度提高的同时，增加了模型的分辨率，能获得可靠的含水量分布。

2.3.3 最优正则化参数确定

在正则化反演中，正则化参数对反演的结果影响很大，而最优正则化参数不容易确定。通过噪音数据的反演结果可见，如果采用不同的正则化参数，同时采用最小模型、光滑模型与平坦模型约束进行反演，如果在给定的正则化时，这些不同的约束反演得到的模型基本一样，则可以采用当前的正则化参数作为最优的正则化参数，而将反演的模型作为最终的含水量分布模型。因此，我们提出了新的最优正则化参数确定方法。

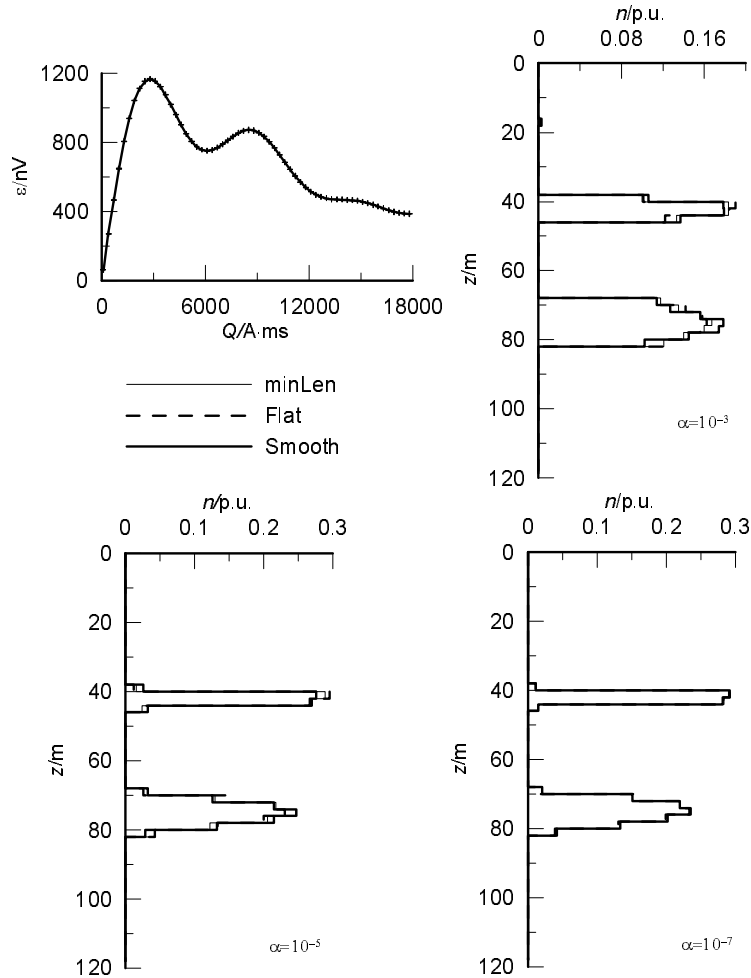


图6 表2中两层含水层模型的理论地面核磁共振响应在不同正则化参数和模型约束条件下反演的含水量分布。左上为理论响应及拟合结果；右上、左下和右下分别为 $\alpha=10^{-3}$ 、 $\alpha=10^{-5}$ 和 $\alpha=10^{-7}$ 时最小长度（minLen）、最平坦（Flat）和最光滑模型（Smooth）约束反演的含水量分布

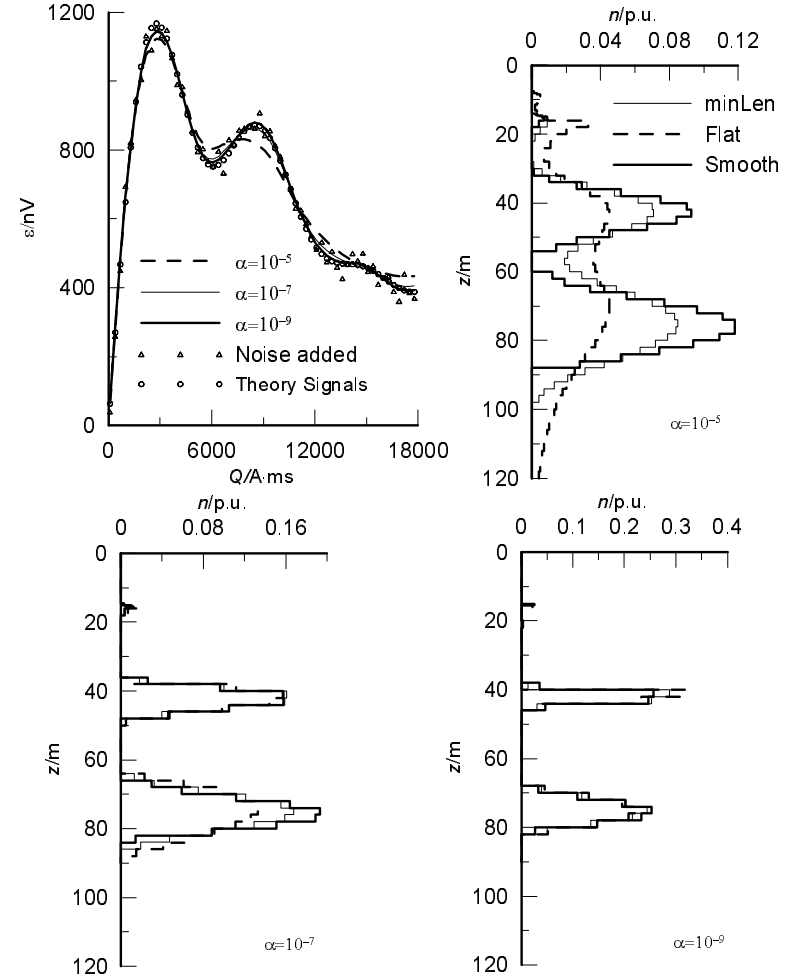


图7 叠加SNR=20随机噪音后表1模型的理论地面核磁共振信号反演得到的含水量分布

2.4 弱导电条件下的反演技术之二：投影迭代反演

但由于存在噪音和导电性的影响，常规的正则化参数反演可能出现负的不合理的含水量。为此我们引进了非负约束的投影迭代反演算法，提高了地面核磁共振的反演效果。

对于层状模型，由正演理论，在垂向上对含水层分为 N 层后，引入矩阵记法，地面核磁共振测深响应与模型各含水层的含水量 n_i 间有

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{K}\mathbf{n}, \tag{4}$$

满足

$$0 \leq n_i \leq 1, \quad i=1,2,\dots,N.$$

在上式中, \mathbf{K} 为积分核函数, \mathbf{n} 为各层含水量组成的矢量。而 E_0 为各个脉冲强度下的地面核磁共振信号振幅幅度矢量。

在自由空间中, 上述方程是线性优化问题。Legchenko 等采用正则化技术进行求解。这里采用基于正则化技术的投影迭代法求解, 其基本过程如下:

- (1). 利用正则化方法求解(1)式, 获得含水量分布的一个可能解;
- (2). 对每一个解分量, 判断是否非负。若否, 则删除对应于该分量的矩阵与右边向量的行与元素。转(1);
- (3). 输出反演结果。

图8是采用上述方法的一个理论模型反演结果。假设自由空间中埋深在40m的10m厚含水层的含水量为30%, 其产生的核磁感应电动势如图8a “+” 所示, 相应的反演获得的含水量分布如图8b的细实线, 图中粗实线为理论含水层模型。从图可见, 首先, 反演数据拟合非常好, 实际的均方相对误差达到 10^{-4} 。其次, 反演的含水层分布范围和总的含水量与理论模型基本一致, 只是含水量在某些局部深度上与理论模型有一定的差别。

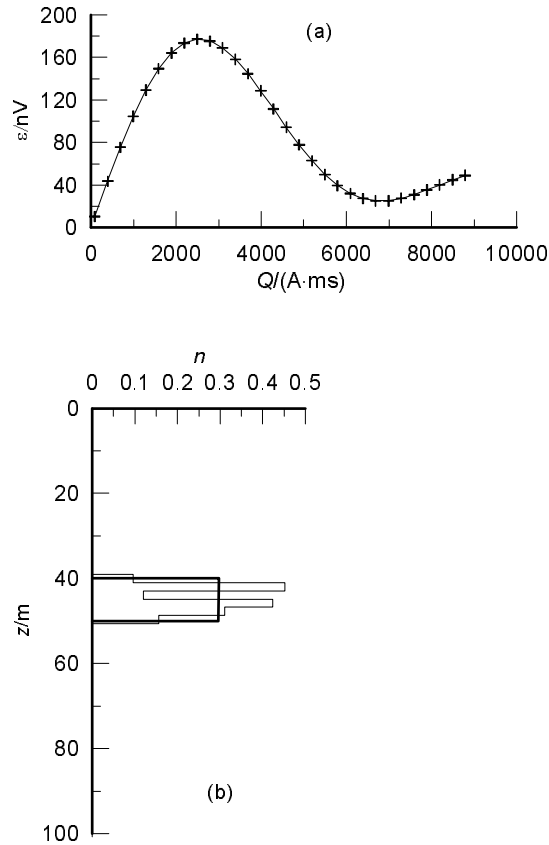


图8 理论模型的投影迭代反演结果

2.5 振幅强度反演技术

在导电性可以忽略时, 回线源在空间产生的磁场为实数, 则积分核 $K(Q,z)$ 为实数, 由 (1) 式得到的振幅响应为实数。但在导电条件下, 地下交变磁场将产生涡流, 激发二次磁场, 总磁场为复数, 导致积分核函数的虚部影响不能忽略, 此时核磁共振响应可以分解为

$$E_0 = \text{Re}[E_0] + i \text{Im}[E_0]. \quad (5)$$

显然, 此时核磁响应还出现了相位信息。

2.5.1 导电条件下地面核磁共振感应电动势

为了解核磁共振的反演问题 (5) 式, 需要计算灵敏度矩阵 \mathbf{J} 。由于地面核磁共振的特殊性, 在导电条件下, 其灵敏度矩阵可以通过显式表示出来。下面给出具体的过程。

将 (1) 式重写为

$$E_{0i} = \sum_{j=1}^M A_{ij} n_j, \quad (6)$$

其中 $A_{ij} = K(Q_i, z_j) f_j$ 。因为导电性导致的振幅复化是由于积分核函数 K_{ij} 从而 A_{ij} 为复数, 将其分解为实部与虚部

$$A_{ij} = A_{ij}^R + i A_{ij}^I. \quad (7)$$

这样, 核磁响应的实部 E_i^R 与虚部 E_i^I 为

$$E_i^R = \sum_{j=1}^M A_{ij}^R n_j, \quad (8)$$

$$E_i^I = \sum_{j=1}^M A_{ij}^I n_j. \quad (9)$$

显然, (8) 式实部的平方与含水率可以表示为

$$(E_{0i}^R)^2 = \mathbf{n}^T \mathbf{C}_i^R \mathbf{n}, \quad (10)$$

其中 $\mathbf{C}_i^R = (\mathbf{A}_i^R)^T \cdot \mathbf{A}_i^R$, \mathbf{A}_i^R 为矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行, 从而

$$[\mathbf{C}_i^R]_{jk} = A_{ij}^R \times A_{ik}^R. \quad (11)$$

同样, 对于振幅虚部的平方, 有

$$(E_{0i}^I)^2 = \mathbf{n}^T \mathbf{C}_i^I \mathbf{n}, \quad (12)$$

并且

$$[\mathbf{C}_i^I]_{jk} = A_{ij}^I \times A_{ik}^I. \quad (13)$$

将 (10) 式和 (12) 式代入有

$$|E_i|^2 = \mathbf{n}^T \mathbf{C}_i \mathbf{n}, \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{C}_i^R + \mathbf{C}_i^I. \quad (15)$$

由 (14) 式可见, 当导电性影响存在时, 振幅的平方是含水率的二次函数。对于每个振幅, 实际的响应是含水率的二次型。

2.5.2 非线性反演灵敏度元素计算

在导电条件下, 如果观测数据是核磁感应电动势的平方, 其正演公式为 (14) 式。灵敏度矩阵计算从 (14) 式, 经过简单的推导过程, 有

$$J_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial n_j} = 2 \sum_{k=1}^M n_k [C_{ij}]_k \quad (16)$$

在实际计算中，振幅直接由积分计算后直接求取，而偏导数(16)式的计算实际上是上述正演过程的逆，即给定背景模型的电阻率分布，对于特定的含水层垂向剖分和脉冲强度，我们可以计算得到积分核函数，进而获得对应的二次型(14)式，接着根据(16)式计算偏导数矩阵。

由于在反演过程中，假设电阻率模型是不变的，因此在反演过程中，(16)式只需要计算一次，从而大大提高反演速度。同时，灵敏度矩阵的元素是可解析计算的，在计算过程中没有任何近似，计算的精度非常高，而且避免了一般需要采用差分方法计算偏导数的缺点，进一步加速了迭代的收敛过程。下面的数值计算表明，一般迭代5次就保证收敛。

2.5.3 反演结果及讨论

在下面的讨论中，可以假设反演深度为线圈直径。如果整个断面由 2m 的等厚度子含水层组成。当采用 100m 直径的线圈时(文中都采用该直径线圈讨论)，反演的未知含水率个数为 50。非线性反演时，初始各个子层的含水率都是 0.5%。同时，还假设测点附近的地磁场强度为 50 000nT，地磁倾角为 0°。发射脉冲的宽度 τ 为 30ms。

(1) 不导电条件下反演结果

假设自由空间中埋深在 40m 的 10m 厚含水层的含水率为 30%，其核磁感应电动势如图 9a。对于这样的基本模型，采用线性正则化反演方法(LRI)与非线性反演方法(NLI)由观测的感应电动势获得的含水率分布如图 9b，图中粗实线为理论含水层模型，细实线为 LRI 结果，而虚线为 NLI 结果。从图可见，两种反演方法的数据拟合差都非常小，均方相对误差达到 10^{-4} 。但 LRI 虽然在含水率的确定分布范围上接近理论模型，可是含水率却变化较大。而 NLI 除了含水层底部的“拖尾”现象外，与理论模型较为一致。因此，采用 NLI 反演的含水率分布比采用自由空间为基础的 LRI 方法得到的结果更为合理。

错误! 不能通过编辑域代码创建对象。

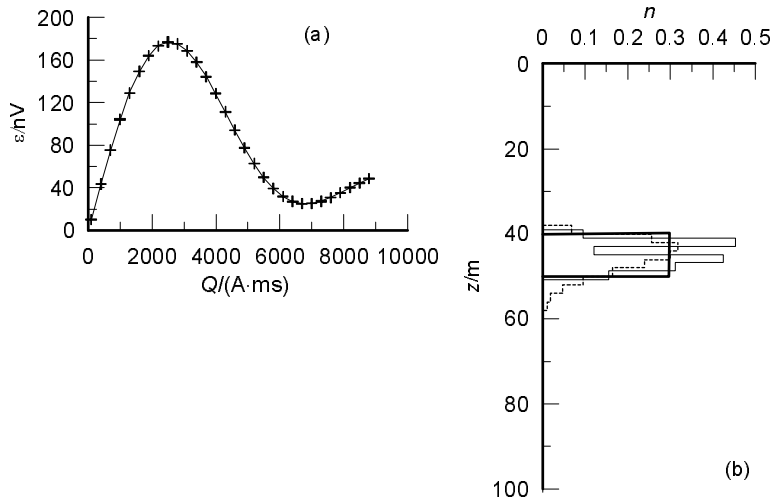


图9 不导电模型核磁信号的正则化反演和非线性反演结果

(2) 导电模型的反演结果

将图 9 中的含水层模型，置于 10Ω·m 的均匀导电半空间中，此时计算的核磁感应电动势如图 10a。利用自由空间背景电阻率模型的 LRI 反演结果如图 10b 的细实线。由于导电性影响，含水层出现在 50m 深度上，中心埋深在 65m 左右。虽然由于反演受正则化参数的影响，该含水层的分布范围(厚度)会受到影响，但中心位置不会有较大的变化。也就是说，此时 LRI 反演深

度相对误差达到 50%。

假设背景电阻率 10Ω·m 是已知的，采用考虑导电性的 NRI 反演技术对图 9a 中的核磁感应电动势进行反演，获得的含水率分布见图 10b (虚线)。从图可见，此时获得的含水层信息(埋深、厚度和含水率)与理论模型(粗实线)非常吻合，只是在较深部，反演结果出现假含水层，这可能是由于反演数据的最大脉冲强度不够大，或者导电性影响，数据无法反映该深度的含水层信息，造成反演的多解性。

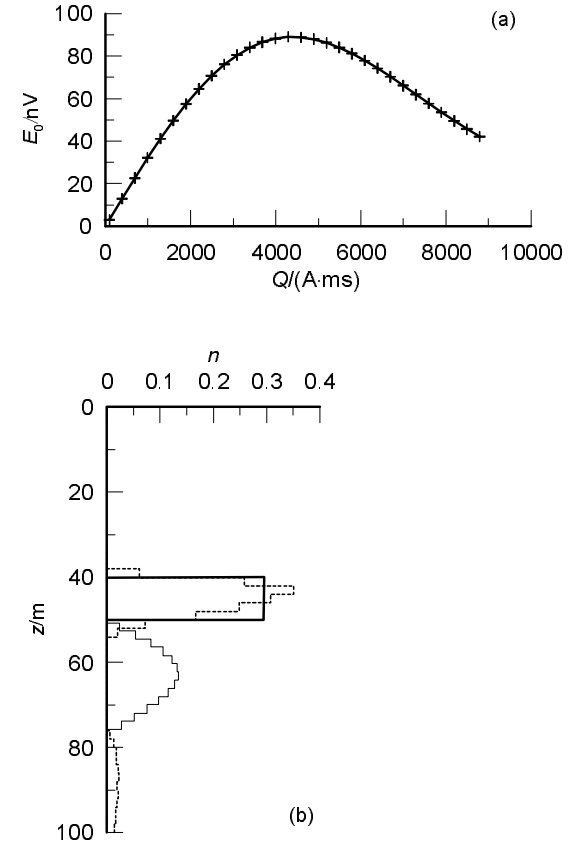


图10 均匀导电半空间的地面核磁LRI和NLI反演结果

为了模拟实际的地质情况，假设图 9 中的理论含水层(图 11b 粗实线)位于一个三层的 K 型电阻率断面中(图 11c)。此时，含水层与 100Ω·m 的高阻层对应，可以理解为实际的含水砂层，而 10Ω·m 低阻围岩相当于黏土层。图 11a 是该层状导电背景模型中地面核磁共振的感应电动势理论模拟结果。对该响应，利用 LRI 反演的含水层分布(图 11b 中的细实线)由于含水层上方低阻层的屏蔽作用而在深度上下移 15m，中心埋深在 60m 附近，中心埋深误差达到 37.5% 左右。而基于导电模型的 NLI 反演得到的含水率分布(图 11b 中虚线)与理论含水层的分布较为吻合。

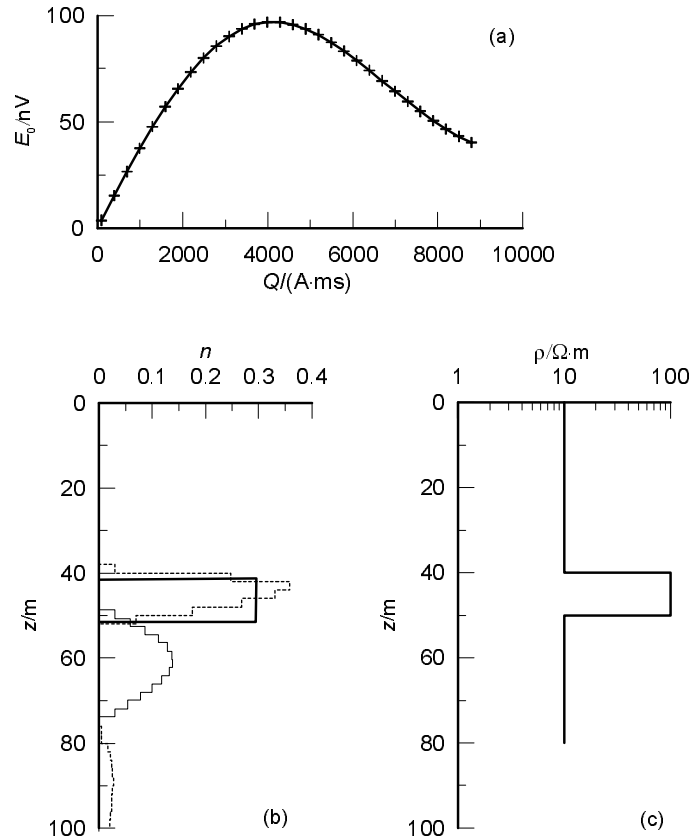


图11 层状导电模型核磁信号LRI和NLI反演结果

图 12 是实际数据的反演结果。测点在地中海岸边距离海岸几百米。地磁倾角 40° ，强度为 45300nT 。采用边长 75m 的方形回线测量，脉冲持续时间为 40ms 。瞬变电磁测深结果表明，在 $n \times 100\text{m}$ 的深度范围内地层电阻率大约为 $2\Omega \cdot \text{m}$ 。含水层是灰岩，埋深很浅，厚度估计很大。从图 12a 的观测数据可见，在小脉冲强度时，观测信号振幅趋于非 0 值，说明含水层的埋深非常浅。而相位非 0，且随脉冲强度的增加而增加，在最大脉冲参数时甚至达到 150° 。可见，测点附近导电性对核磁共振的影响是非常大的。

对观测到的核磁测深振幅曲线，分别用导电模型的 NLI 与自由空间的 LRI 反演拟合，拟合情况见图 12b，模型示于图 12c 中。导电模型反演结果表明，含水层的埋深仅 2m ，厚度 20m ，含水层浅部含水量大，达到 60% 。16m 后含水量减小。22m 深度以下地层基本不含水。这个结论与文献的基本一致。但采用自由空间反演的含水层埋深在 6m ，且含水量很小，最大 10% 。同时从拟合情况看，效果不理想，说明导电条件下，有时用自由空间模型无法对数据进行拟合。

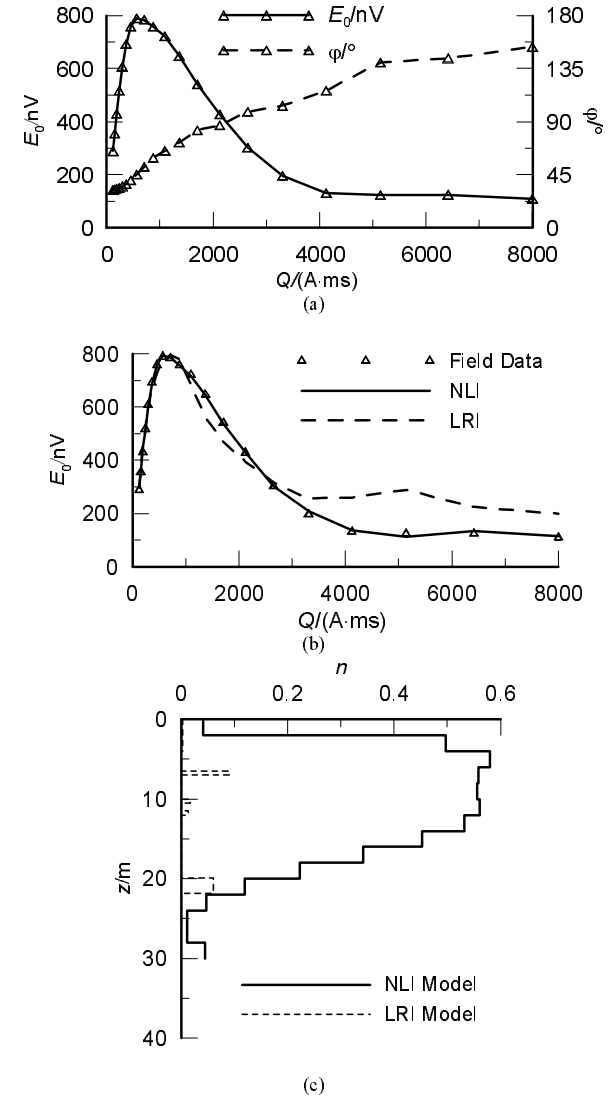


图12 实际核磁数据反演得到的含水量分布。(a) 为实际观测的振幅和相位数据，(b) 是NLI和LRI反演拟合情况，(c) 为反演含水率分布



2.6 任意层状导电介质中广义线性迭代反演技术

但事实上，导电模型中地面核磁共振感应振幅强度是含水量的非线性函数，最为精确的反演是广义最小二乘迭代法。然而采用最小二乘技术进行非线性问题的迭代反演需要确定合理的初始模型，在地下水文条件信息较少时，不容易获得合理的初始模型。

同时，地面核磁共振中，多采用等效的均匀半空间模型进行导电性影响讨论。但研究发现，均匀导电半空间模型和层状导电模型对地面核磁共振测深的影响明显不同，在反演中，采用正确的导电率分布模型是取得较好的地面核磁共振测深反演效果的重要因素。

为此，针对层状导电条件下的地面核磁共振响应强度数据反演，我们引进了针对模型属性约束的迭代反演技术-Occam 反演技术。理论数据和实际数据的反演结果表明：

- (1) 在导电条件下，基于地面核磁共振振幅绝对值（感应电动势），采用线性迭代反演方法能获得含水层的含水量及其分布较为合理的估计；
- (2) 采用 Occam 方法反演，给定地下非 0 的均匀含水量分布，就能获得含水层较为合理的估计，摆脱参数化反演对初始模型的依赖性；
- (3) 对于无噪音数据，光滑模型和平坦模型约束反演的结果都与理论模型基本一致。但对于噪音数据，采用平坦模型约束获得的含水量分布要比光滑模型约束得到的结果更合理、可靠；5.4 实际数据的反演结果表明，结合其它的电阻率测量技术获得的电阻率断面计算模型的灵敏度矩阵，能获得比常规反演方法更为可靠、精确的含水量分布。

2.6.1 层状介质磁场

地表水平圆回线源在层状导电介质中任意一点处产生的磁场具有柱对称性，是 (r, z) 的函数，在柱坐标系中，回线源产生的电磁场满足 Maxwell 方程，通过引入辅助函数，可求解出第 i 层中磁场垂向与径向分量。略去推导过程，有如下的积分表达式(Patra and Mallick, 1980):

$$H_{ri}(r, z) = \frac{Ia}{2} \int_0^{\infty} [a_i e^{-u_i z} - b_i e^{u_i z}] u_i J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \quad (17)$$

$$H_{zi}(r, z) = \frac{Ia}{2} \int_0^{\infty} [a_i e^{-u_i z} + b_i e^{u_i z}] \lambda J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) d\lambda \quad (18)$$

其中， I 为回线中电流强度， a 是线圈半径， $u_i^2 = \lambda^2 - k_i^2$ ， $k_i^2 = -i\omega\mu_0\sigma_i$ ， ω 是线圈中谐变电流频率， μ_0 为真空磁导率， σ_i 为第 i 层电导率。 $J_0(x), J_1(x)$ 为第一类的 0 阶与 1 阶 Bessel 函数。 a_i 与 b_i 是与整个地电断面电性参数有关的待定系数，可采用循环递推算方法进行快速求取(Weng et al., 2000)。通常采用数字滤波方法计算 Hankel 变换(Piao, 1990)，本文采用 Chave 提出采用直接数值积分的算法(Chave, 1983; Weng and Wang, 2003)

2.6.2 OCCAM'S 反演

设用地面核磁共振观测到 N 个感应电动势 $\mathbf{d} = \{d_i, i=1, \dots, N\}$ ，它可表示为相应的模型理论响应与观测误差的和，即

$$d_i = f(Q_i, \mathbf{n}) + \delta_i, i=1, \dots, N, \quad (19)$$

其中 δ_i 为方差为 σ_i 的 0 均值数据独立随机噪音， \mathbf{n} 为长度为 M 的未知的含水量分布矢量。反演时，要求模型含水量 \mathbf{n}^{est} 使下面的目标函数达到最小，即

$$\chi^2(\mathbf{n}^{est}, \mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - f_i[\mathbf{n}^{est}]}{\sigma_i} \right)^2. \quad (20)$$

为了克服反演过程由于初始模型不合适导致的迭代发散问题，Constable 等对上述问题的优化过程做了调整。假设迭代进行了 k 次，相应的模型为 \mathbf{n}^k ，构造如下的迭代格式

$$\mathbf{J}^k \mathbf{n}^{k+1} = \mathbf{d} - f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k, \quad (21)$$

其中 \mathbf{J}^k 为由第 k 次迭代得到的模型 \mathbf{n}^k 计算的灵敏度矩阵， \mathbf{n}^{k+1} 为需要估计的第 $k+1$ 次模型参数，



并且要求第 $k+1$ 次模型参数满足

$$\min : \Phi = \|\mathbf{Wn}^{k+1}\|, \quad (22)$$

其中矩阵 \mathbf{W} 被称为光滑算子。实际上，(21) 式与 (22) 式构成了一个模型约束优化问题，被称为 Occam 光滑模型反演。相对于常规的反演迭代技术，这里直接对模型参数本身，而不是其修正量进行的约束。该改进使得在实际工作中反演对初始模型参数的依赖性大大减小，通常选择均匀半空间模型作为初始模型。

在反演中，上述优化问题被等价成如下的线性方程组的求解

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}^k \\ \lambda \mathbf{W} \end{bmatrix} \mathbf{n}^{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} - f(\mathbf{n}^k) + \mathbf{J}^k \mathbf{n}^k \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

其中 λ 被称为正则化参数。该方程可以利用奇异值分解技术进行求解。

2.6.3 稳定算子

模型的光滑性可以用其 1 阶导数或者 2 阶导数描述，分别构成对模型的平坦度或者光滑度约束。相应的约束矩阵 \mathbf{W} 分别为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 1 & \dots & 0 \\ & & & \dots & & \\ & & & & & \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & \dots \end{bmatrix}_{(M-1) \times M} \quad (24)$$

和

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots \\ & & & \dots & & \\ & & & & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}_{(M-2) \times M}, \quad (25)$$

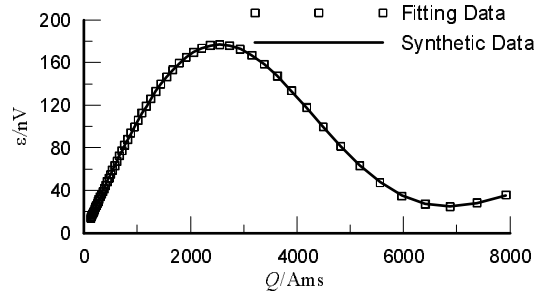
其中 M 为待反演的含水层层数。

2.6.4 理论数据反演结果

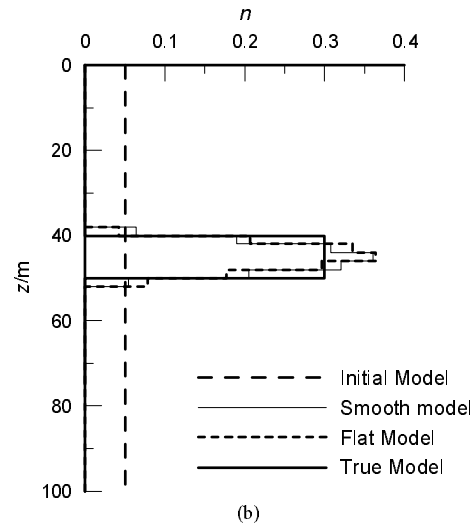
图 13 给出了模型约束对自由空间地面核磁共振数据反演结果的影响。含水层的含水量 30%，厚 10m，顶面埋在地下 40m 处（图 13b 中的粗实线）。该模型用半径 50m 回线激发，在 50000nT 强度、0° 倾角地磁场中产生的理论响应如图 1a 中的实线。对其分别采用 (24) 式与 (25) 式约束进行了反演。反演时，假设勘探深度为 100m，近似线圈的直径，将该深度剖分为 50 个 2m 厚的含水子层。同时假设半空间电阻率为 $10^6 \Omega \cdot m$ ，以此计算反演的灵敏度矩阵 (16) 式。两种约束条件下反演迭代进行了 4 次，数据拟合差都小于 5×10^{-3} ，拟合模型响应为图 1a 中的“+”。反演的模型见图 13b 中密虚线和细实线。从图可见，对于理论无噪音数据，无论是平坦约束还是光滑模型约束，反演的含水量分布与理论模型都非常的一致，在反演中采用平坦算子和光滑算子对计算结果影响不大。

为了检验模型约束反演对受导电影响的地面核磁共振测深数据反演能力，设计了如图 14b 中的理论含水量分布（左侧粗实线）和电阻率变化模型（右下侧粗实线），以模拟实际的地质情况。10m 厚的含水层埋在 60m 深的位置上。在电性上，它与 $1000 \Omega \cdot m$ 的高阻层对应，可以理解实际的含水砂层，而 $25 \Omega \cdot m$ 低阻围岩相当于黏土层。该模型的地面核磁共振响应如图 14a 实线所示。从图可见，对于 60m 深的含水层，在当前最大的激发电流脉冲强度条件下，测深曲线刚刚开始下降，也就是说为了完整探测如此深的含水层，还需要加大激发电流。

基于该无噪音的理论测深曲线，采用光滑模型和平坦模型约束反演的含水量分布如图 14b。反演时，模型剖分仍然为 2m 厚均匀子层，用图 14b 右下角的层状导电模型计算灵敏度矩阵 (16) 式。从图可见，两种模型约束反演得到的含水量分布与理论模型在含水层的几何参数以及含水量上都非常的一致。在迭代进行了 6 次后，数据完全拟合理论模型（图 14a），拟合非常差达到 2.5×10^{-3} 。



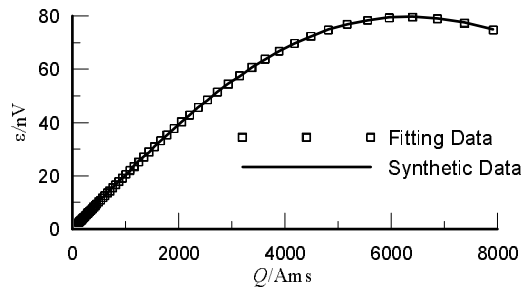
(a)



(b)

图13 地面核磁共振响应的光滑模型和平坦模型约束反演得到的含水量分布

(a) 理论曲线及拟合结果; (b) 理论模型及反演情况



(a)

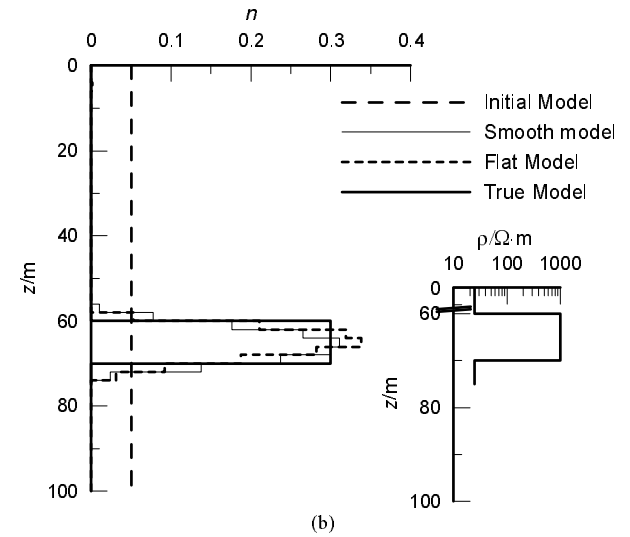
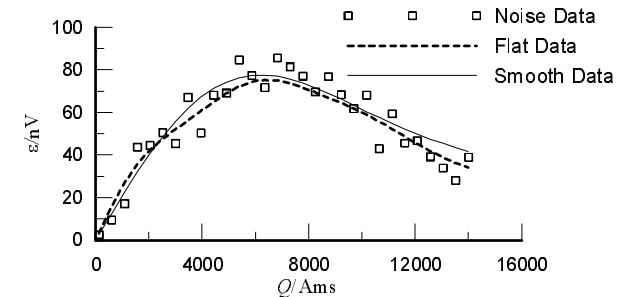


图14 层状导电模型地面核磁共振的含水量分布平坦模型与光滑模型反演结果

(a) 核磁响应及拟合情况; (b) 反演的含水量分布

在图 14 模型的基础上, 对其理论响应叠加信噪比 SNR=10 的随机噪音, 得到的复合数据如图 15a 中的“□”所示。对其分别采用了平坦模型和光滑模型反演拟合, 获得的含水量分布如图 15b 所示。从图 15a 可见, 由于增加了较大的噪音, 数据的拟合效果明显降低。实际上, 在平坦模型和光滑模型约束条件下, 反演都迭代了 9 次, 拟合差才达到 8×10^{-2} 。从图 15a 还可以看出, 在大脉冲强度时平坦模型约束反演拟合较好, 可以认为平坦模型对深部模型分辨较好。而光滑模型对小脉冲强度数据拟合效果很好, 对大脉冲强度数据则变差。

这种差异, 反映在图 15b 的反演含水量分布上, 光滑模型约束和平坦模型约束获得的主力含水层与理论模型基本一致。但光滑模型约束时, 反演的含水层厚度明显变大, 埋深相对变浅, 同时含水层中心的含水量因被反演均化到变厚的含水层中而减小。而平坦模型约束反演的主力含水层埋深和厚度与理论模型非常的吻合, 只是含水量相对变大。同时, 在小脉冲强度时, 信号受噪音的影响大, 导致反演在浅部出现一些含水量非常小的假的局部薄含水层。总之, 对于噪音数据, 模型约束反演基本可以获得含水量的分布规律, 但应用平坦模型约束比光滑模型约束, 获得的含水量分布更合理。



(a)

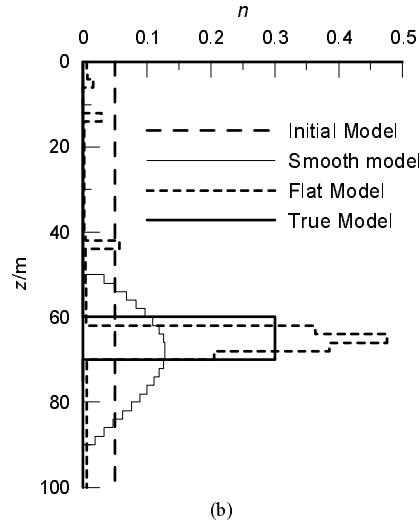


图15 图14模型响应叠加SNR=10的随机噪声后平坦模型和光滑模型约束反演结果

(a) 叠加噪音的复合数据及其拟合情况; (b) 反演的含水量分布

2.6.5 实际数据的反演结果

实际数据来自德国 Haldensleben 地区的一次地面核磁测深探测结果, 测点编号为 B8。测点在已知的水文钻孔附近, 其水文地质柱状图如图 16 下左所示, 地下水主要含在细-中粒砂岩中, 该含水层在 43m 左右的深度上被厚约 12m 的黏土质细砂岩分为上下含水段。其中上部含水段的潜水面深度在 20m 左右。

测量采用 IRIS 公司的 NUMIS 系统。发射线圈采用直径 100m 的圆环线, 电流持续时间为 40ms, 供电电流从 5A 增加到约 250A。当地的地磁场强度为 48771nT, 地磁倾角为 64°。观测的核磁感应测深结果如图 16 左上角的“+”所示。对该观测的响应, 采用了 NUMIS 系统提供的标准处理程序反演的结果如图 16 下中的虚线。

在井旁, 还做了电阻率对称四极测深, ρ_s 曲线如图 16 上右所示, 对该曲线, 采用参数化反演, 获得图 16 下右的两层电阻率断面。断面浅部的电阻率很高, 达到近 3000Ω·m, 反映了位于深度在 23m 的潜水面以上干砂层的分布范围, 深部约 70Ω·m 的电阻率是含水砂层的反映。

利用上面反演的电阻率断面, 计算了导电条件下地面核磁共振测深反演的灵敏度矩阵, 反演迭代进行了 2 次, 拟合差达到 10^{-2} 。具体的反演结果如图 16 下中的实线所示, 拟合的模型响应见图 16 上左的“Δ”所示。从图可见, 由观测的核磁感应响应采用模型约束迭代反演获得含水量的分布与实际的水文地质情况非常的一致。而采用标准的 NUMIS 处理软件, 只能获得上部含水段的顶界面和含水量, 深部的下含水段虽有反映, 但具体的位置非常不清楚, 和浅部含水段连成一体, 中间隔水层没有显示。

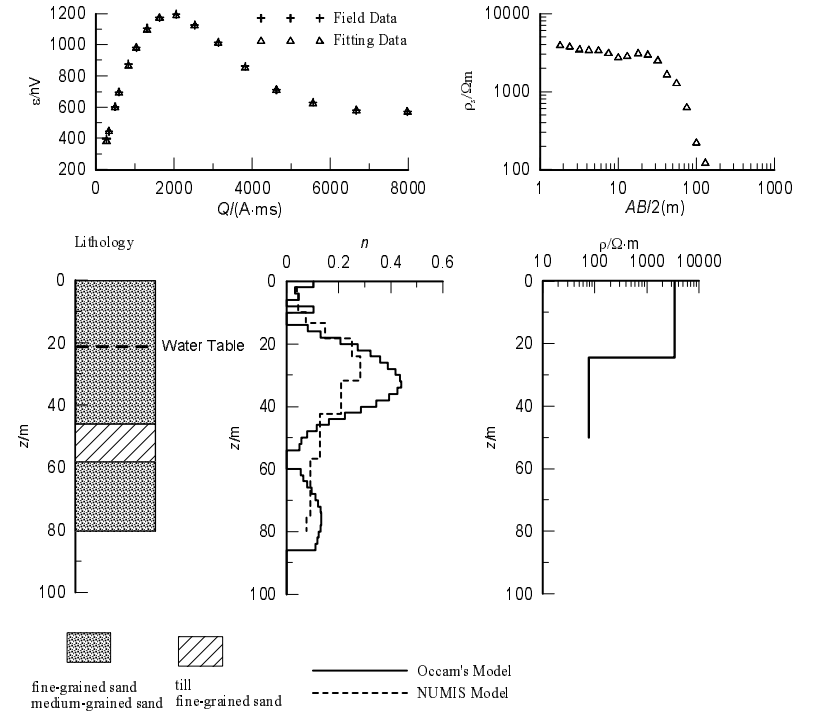


图16 考虑导电性的实际地面核磁信号非线性反演结果

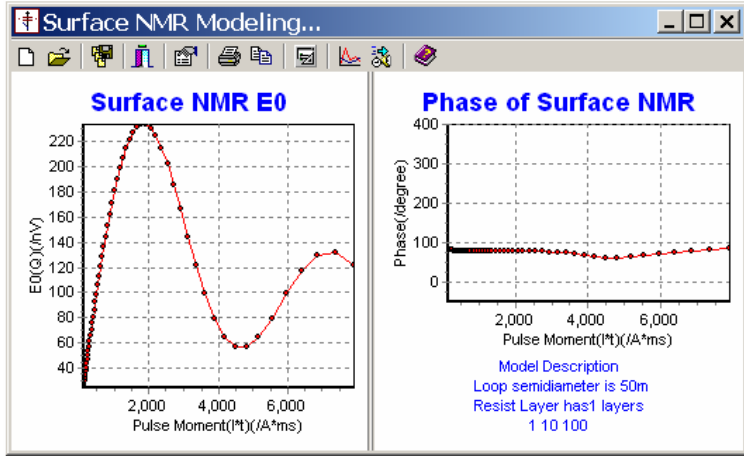
2.7 软件开发

在我们上述研究工作的基础上, 项目组将在研究过程中得到的理论及关键的算法都编制了相应的计算机程序。我们的软件, 不仅是用户正演模拟界面, 利用该程序, 可以实现绝大部分地面核磁共振测深的理论问题分析, 为从事地面核磁共振测深理论研究和分析的科技人员提供一个好的分析工具。

程序具体包括四个大的模块:

- (1) 任意层状介质回线源磁场的计算模块;
- (2) 地面核磁共振测深模拟积分模块;
- (3) 反演解释模块, 包括线性正则化反演、投影迭代反演、基于奇异值分解的广义线性反演和光滑模型的 Occam 反演;
- (4) 用户图形界面。

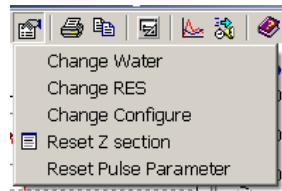
上述的模块, 绝大多数用C++编程, 非常易于移植。整个软件的源代码总约380k。具体为: 模块(1)约102k, 模块(2)在77k左右, 模块(3)为100k, 模块(4)约100k。系统整个系统最终以图形用户界面程序形式体现, 用于地面核磁共振测深分析的理论模拟、数据分析和结果反演解释。具体的程序界面如下:



该程序的使用非常的方便，研究人员只需要给定电阻率模型和含水量模型参数，利用该程序提供的辅助功能菜单，就可以进行地面核磁共振测深的理论研究与分析，完成上述4大模块的功能。

具体的该界面主要的辅助功能包括：

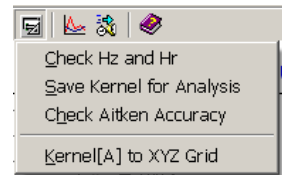
1. 参数调整和设置



利用该辅助功能，科研人员可以修改

- (1) 含水层模型
- (2) 导电性模型
- (3) 修改观测装置等参数
- (4) 指定激发脉冲电流强度参数，包括脉冲宽度和电流强度。

2. 磁场和核函数分析工具



利用该辅助功能，可以

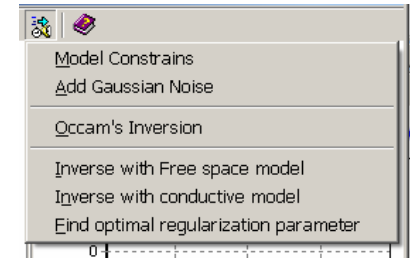
- (1) 检查、研究分析线圈激发磁场的空间分布规律
- (2) 保存当前模型的积分核函数，以便进行分析、检查
- (3) 保存积分核函数为XYZ格式的数据，便于用第三方的软件绘制核函数的变化规律

3. 反演方法及控制参数设置

反演功能是我们研究工作的重要组成部分，也是我们软件的主要功能之一。在研究过程中，所使用的所有的可能方法都进行了研究、试验，并集成到一起，目的是供研究人员采用不同的方法对结果进行分析，比较，以便更准确认识地面核磁共振的反演结果。目前，我们提供的功能与方法主要有：

- (1) 模型约束参数
- (2) 复合噪声发生器
- (3) 任意层状导电模型的含水量光滑模型反演
- (4) 自由不导电半空间模型的正则化反演
- (5) 任意导电模型的分块模型奇异值迭代反演
- (6) 正则化反演最优参数计算分析

具体的控制界面如下图所示：



2.8 存在的问题、建议及其他需要说明的情况。

通过我们上述研究工作，顺利完成了研究任务，达到了项目“建立考虑导电性引起相移效应的地面核磁共振响应方程，在此基础上，给出克服地层导电性影响的地面核磁共振成像基本方程”的预期目标。

地面核磁共振测深方法是新发展起来的目前地球物理勘探领域中惟一的直接勘查地下水的方法技术，其理论与方法技术相对较新。由于其在地下水勘查中的有效性，我国的学者和研究人员也加大了对该方法的应用与理论研究。并在我国的水文地质调查工作，尤其是在西部贫水地区找水工作中，取得了较好的效果，为西部的经济发展做出了贡献。

但是，该技术是高新技术，相应的仪器制造技术掌握在少数国家的手中，所有的仪器必须依靠进口解决，从而制约了该方法在我国的进一步推广，国家将发展该方法的仪器研究作为国家高技术研究发展计划进行重点资助。与之相应，需要提供方法技术的理论支撑。

同时，随着应用的不断深入，遇到的水文地质及地球物理问题也越来越复杂，这些不仅涉及本研究论述的导电性影响问题，还涉及到目前工作非常薄弱的非一维层状模型的响应特征，以及相应的地面核磁响应的观测技术和方法等问题。在我们工作基础上，针对复杂水文地质条件进行地面核磁共振模型模拟研究对更好应用该技术非常必要。

因此，建议进一步开展如下的研究工作：

- (1) 复杂局部含水构造地面核磁共振响应模拟；
- (2) 三维模型地面核磁共振数据成像；
- (3) 地面核磁共振最优观测装置设计技术。



2.9 经费预算执行情况

项目预算经费22.0万，基金委实际批拨22.0万。在项目执行过程中，项目组严格国家自然科学基金经费使用的规定，按照经费预算使用下拨的科研经费。

目前项目组共使用经费21.02万元，经费结余0.98万，这其中主要由于到项目结题时为止，项目的部分研究成果论文正在审查中，它们的正式出版估计还需要出版费0.98万。

具体的经费使用情况详见经费决算表。

2.10 已经发表和投出的论文

- [1] 翁爱华, 董瑞春. 2004, 瞬变电磁测深约束反演解释软件系统及其应用, 地质与勘探, 40(z1):180-183.
- [2] 翁爱华, 董瑞春. 2005, 利用归一化总梯度方法实现中梯激电剖面数据的解释, 物探与化探, 29(5):435-437.
- [3] 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 2005, 矿产勘察电法数据处理解释系统研制, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春.
- [4] 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 2005, 地面核磁共振投影迭代反演, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春.
- [5] 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 2005, 变正则化参数的地面核磁共振数据反演, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春.
- [6] 翁爱华. 2005. 地面核磁共振理论模拟与反演方法初步研究, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春.
- [7] 李莉, 童茂松, 翁爱华, 2005. 复合钒钼酸干凝胶薄膜的制备及其湿敏特性研究. 传感技术学报, 18(4):710~712.
- [8] 李莉, 童茂松, 翁爱华, 2006. SnO₂-Ag-SnO₂ 结构元件室温下对 H₂S 的敏感特性研究. 传感技术学报, 19(4):950~952.
- [9] 李莉, 童茂松, 翁爱华, 2006. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏特性的影响因素. 电子元件与材料, 25(8):25~28.
- [10] 李莉, 童茂松, 翁爱华, 2006. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的感湿机理. 电子元件与材料, 25(6):30~32.
- [11] 李莉, 童茂松, 翁爱华, 2006. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的复阻抗谱. 传感器与微系统, 25(5):39~41.
- [12] Weng A H, Xu S Z and Wang X Q. 2006, On Inversion Method of Surface Nuclear Magnetic Resonance Data, ICEEG(2006), Wuhan, China (EI).
- [13] 翁爱华. 2006. 地面核磁共振导电性的等效影响, 浙江大学学报(理学版), 已修改.
- [14] 翁爱华, 王雪秋. 2006. 瞬变电磁测深数据的变时窗滤波处理技术, 石油地球物理勘探, 已修改.
- [15] 翁爱华. 2006. 瞬变电磁感应电动势计算方法的讨论, 物探化探计算技术, 已修改.
- [16] 翁爱华, 王雪秋. 2006. 高精度地面核磁共振数据正演计算, 吉林大学学报(地学版), 已修改.
- [17] 张文权, 翁爱华, 2007. 地面核磁共振正则化反演方法研究, 吉林大学学报(地学版). 已修改.
- [18] 翁爱华, 王雪秋, 刘国兴等. 2006. 导电性影响的地面核磁共振反演, 地球物理学报, 已修改.
- [19] 翁爱华, 2006, 模型约束实现地面核磁共振数据反演, 地球物理学报, 已投稿.
- [20] 翁爱华, 2006, 地面核磁共振反演导电层状模型, 计算物理, 已投稿.
- [21] Weng, A. H., Wang, X. Q., Sun, J. G., 2007, Occam's Inversion of Surface Nuclear Magnetic Resonance in Layered Electrical Conductive Earth, Geophysics, 已投稿.



2.11 项目组主要研究人员

在研究过程中，项目组成员相对稳定，分工明确，具体如下：

编号	姓名	单位	项目分工	工作时间(月)/年	其它
1.	翁爱华	吉林大学	项目组织与协调	10	
2.	李舟波	吉林大学	理论分析和指导	3	
3.	刘国兴	吉林大学	实验研究与指导	4	
4.	莫修文	吉林大学	理论分析	6	
5.	王得利	吉林大学	程序开发	4	
6.	张辉	吉林大学	编程与数值分析	6	2006年6月 毕业离校
7.	董瑞春	吉林大学	实验及野外工作	3	

附表1、基金项目研究成果目录

序号	成果类型	成果或论文名称	主要完成者	成果说明	标注状况
1	期刊论文	利用归一化总梯度方法实现中梯激电剖面数据的解释	翁爱华, 董瑞春	翁爱华, 董瑞春. 利用归一化总梯度方法实现中梯激电剖面数据的解释. 物探与化探, 29(5):435-437, 2005	40304009 SCI
2	期刊论文	瞬变电磁测深约束反演解释软件系统及其应用	翁爱华, 董瑞春	翁爱华, 董瑞春. 瞬变电磁测深约束反演解释软件系统及其应用. 地质与勘探, 40(11):180-183, 2004	40304009
3	期刊论文	复合钒钼酸干凝胶薄膜的制备及其湿敏特性研究	李莉, 董茂松, 翁爱华	李莉, 董茂松, 翁爱华. 复合钒钼酸干凝胶薄膜的制备及其湿敏特性研究. 传感技术学报, 18(4):710-712, 2005	40304009
4	期刊论文	SnO ₂ -Ag-SnO ₂ 结构元件室温下对H ₂ S的敏感特性研究	李莉, 董茂松, 翁爱华	李莉, 董茂松, 翁爱华. SnO ₂ -Ag-SnO ₂ 结构元件室温下对H ₂ S的敏感特性研究. 传感技术学报, 19(4):950-952, 2006	40304009
5	期刊论文	复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏特性的影响因素	李莉, 董茂松, 翁爱华	李莉, 董茂松, 翁爱华. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏特性的影响因素. 电子元件与材料, 25(8):25-28, 2006	40304009
6	期刊论文	复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的感湿机理	李莉, 董茂松, 翁爱华	李莉, 董茂松, 翁爱华. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的感湿机理. 电子元件与材料, 25(6):30-32, 2006	40304009
7	期刊论文	复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的复阻抗谱	李莉, 董茂松, 翁爱华	李莉, 董茂松, 翁爱华. 复合钒钼酸干凝胶薄膜湿敏元件的复阻抗谱. 传感器与微系统, 25(5):39-41, 2006	40304009
8	期刊论文	地面核磁共振导电性的等效影响	翁爱华	翁爱华. 地面核磁共振导电性的等效影响. 浙江大学学报(理学版), 2006. 已修改	40304009
9	期刊论文	高精度地面核磁共振数据正演计算	翁爱华, 王雪秋	翁爱华, 王雪秋. 高精度地面核磁共振数据正演计算. 吉林大学学报(地学版), 2006. 已修改	40304009
10	期刊论文	地面核磁共振正则化反演方法研究	张文权, 翁爱华*	张文权, 翁爱华. 地面核磁共振正则化反演方法研究. 吉林大学学报(地学版), 2007 已修改	40304009

11	期刊论文	导电性影响的地面核磁共振反演	翁爱华, 王雪秋, 刘国兴, 莫修文, 王得利	翁爱华, 王雪秋, 刘国兴, 莫修文, 王得利. 导电性影响的地面核磁共振反演. 地球物理学报, 2006. 已修改	40304009 SCI
12	期刊论文	瞬变电磁感应电动势计算方法的讨论	翁爱华	翁爱华. 瞬变电磁感应电动势计算方法的讨论. 物探化探计算技术, 2006. 已修改	40304009
13	期刊论文	瞬变电磁测深数据的变时窗滤波处理技术	翁爱华, 王雪秋	翁爱华, 王雪秋. 瞬变电磁测深数据的变时窗滤波处理技术. 石油地球物理勘探, 2006. 已修改	40304009 EI
1	会议论文	On Inversion Method of Surface Nuclear Magnetic Resonance Data	Weng A H, Xu S Z and Wang X Q	国际, 口头报告, Weng A H, Xu S Z and Wang X Q. On Inversion Method of Surface Nuclear Magnetic Resonance Data, ICEEG(2006), 2006, Wuhan, China (EI)	40304009 EI
2	会议论文	地面核磁共振理论模拟与反演方法初步研究	翁爱华	国内, 特邀报告, 翁爱华. 地面核磁共振理论模拟与反演方法初步研究, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春	40304009
3	会议论文	地面核磁共振投影迭代反演	翁爱华, 肖占山, 徐世浙	国内, 口头报告, 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 地面核磁共振投影迭代反演, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春	40304009
4	会议论文	变正则化参数的地面核磁共振数据反演	翁爱华, 肖占山, 徐世浙	国内, 口头报告, 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 变正则化参数的地面核磁共振数据反演, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春	40304009
5	会议论文	矿产勘察电法数据处理解释系统研制	翁爱华, 肖占山, 徐世浙	国内, 口头报告, 翁爱华, 肖占山, 徐世浙. 矿产勘察电法数据处理解释系统研制, 第21届中国地球物理年会, 2005, 长春	40304009
1	专利	杆状不极化电极	翁爱华, 董瑞春	中国, 实用新型, ZL200420012887.6, 2006	
1	获奖	傅承义青年科技奖	翁爱华	中国地球物理学会, 2005, 傅承义青年科技奖, 一等奖	

注1、“成果类型”栏, 分为“专著 / 期刊论文 / 会议论文 / 专利 / 获奖 / 其他”六类, 请归类集中填写并单独编号;
 注2、“成果说明”栏, 用于填写如刊物名、获奖类别、级别等必要的说明和便于其他人查询的信息, 具体要求见撰写提纲;
 注3、“标注状态”栏, 用于说明有无标注“自然科学基金资助”及项目批准号等, 具体要求见撰写提纲。

附表2、基金资助项目统计数据表 (本表是针对各种性质基金项目收集数据以便进行整体资助效果分析使用,并非要求每个项目都具有以下各类成果,特别是成果推广栏目,主要针对重大项目或一些得到应用的项目,没有可空白不填。)

获奖 (项)	国家级						省部级				国际 学术奖	其它			
	自然科学奖		科技进步奖		发明奖		自然科学奖		科技进步奖						
	一等	二等	一等	二等	一等	二等	一等	二等	一等	二等					
											1				
专著/ 论文 (篇)	发表论文数(含已录用稿件数)						四大检索系统				专著				
	国际会议		全国性会议				收录情况				中文	外文			
	特邀 报告	分组 报告	特邀 报告	分组 报告	国际 刊物	国内核 心刊物	国内一 般刊物	SCI	EI	ISTP	ISR	已出 版	待出 版	已出 版	待出 版
	1		1	3		13		1							
专利及 其它	专利(项)				成果转化及经济效益				其它成果						
	国内		国外		可推广 项数	已推广 项数	经济效 益(万 元)	软件/ 数据库	图表/ 图集	新仪器/ 新方法	鉴定及 其它				
	申请	批准	申请	批准											
	1						1								
人才培 养及学 术交流	人才培养(人)						举办学术会议次数及参加人数								
	博士后		博士		硕士		中青年学术带头人		国际		国内		出国参加国际学术会议人数		
	在站	出站	在读	毕业	在读	毕业	40岁以 下	40-50 岁	次数	人数	次数	人数	次数	人数	

注:此表统计数据必须与表2成果目录表和报告正文中的说明相一致。如有国际学术奖、软件、图集、组织国际会议等,具体内容须在报告正文中描述。

项目负责人签字及审核意见表

<p>项目负责人承诺: 我所承担的项目(编号:40304009 名称:导电性对地面核磁共振测深响应影响理论研究)结题报告内容填写实事求是,数据详实。在今后的研究工作中,如有与本项目相关的成果,将标注“国家自然科学基金资助”,并报送国家自然科学基金委员会。</p> <p style="text-align: right;">负责人(签章): 日期:</p>					
<p>项目依托单位科研管理部门审查意见:</p> <p style="text-align: center;">经办人(签章): 单位公章: 日期:</p>					
<p>科学处审核意见:</p>					
完成情况	优	良	中	差	负责人(签章):
综合评分 (划√)					日期:
<p>科学部核准意见(对重点、重大、国家杰出青年科学基金项目):</p> <p style="text-align: right;">负责人(签章): 日期:</p>					
<p>评估组或委领导意见(主要对后期评估和重点、重大、国家杰出青年基金等特殊项目):</p> <p style="text-align: right;">组长或委领导(签章): 日期:</p>					

国家自然科学基金资助项目经费决算表

结题种类 () (金额单位: 万元)

填报说明:					
电子表格与书面材料所报送的决算情况必须保持一致。					
项目(课题)名称	导电性对地面核磁共振测深响应影响理论研究				
项目(课题)负责人	翁爱华	批准号	40304009		
已拨入经费(总额)	22.0000				
科 目	预算经费	调整经费	预算总经费	经费支出	说 明
一. 研究经费	18.9000	0.0000	18.9000	18.1300	
1. 科研业务费	12.9000	0.0000	12.9000	12.2800	
(1) 测试/计算/分析费	4.0000	0.0000	4.0000	4.0000	按照计划使用
(2) 能源/动力费	0.6000	0.0000	0.6000	0.6000	按照计划使用
(3) 会议费/差旅费	3.0000	0.0000	3.0000	3.2500	
(4) 出版物/文献/信息传播事务费	4.5000	0.0000	4.5000	3.6750	节余的经费用于尚未出版的研究论文
(5) 其它	0.8000	0.0000	0.8000	0.7550	市内交通费
2. 实验材料费	2.5000	0.0000	2.5000	2.6500	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	2.5000	0.0000	2.5000	2.6500	由于材料价格上涨,多支出0.15万元
(2) 其它					
3. 仪器设备费	1.5000	0.0000	1.5000	1.3300	
(1) 购置	1.5000	0.0000	1.5000	1.3300	计算机硬件价格下降,少支出0.17万
(2) 试制					
4. 实验室改装费					
5. 协作费	2.0000	0.0000	2.0000	1.8700	协作单位仪器使用费
二. 国际合作与交流费	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
1. 项目组成员出国合作交流					
2. 境外专家来华合作交流					
三. 劳务费	2.1000	0.0000	2.1000	2.2300	
四. 管理费	1.0000	0.0000	1.0000	0.6600	
合 计	22.0000	0.0000	22.0000	21.0200	节余0.98万元
已拨入经费结余	0.9800				
本项目其他经费来源	预算经费		经费支出		
国家其他计划资助经费					
其他经费资助(含部门匹配)					
其他经费来源合计	0.0000		0.0000		

项目负责人(签章): 科研管理部门负责人(签章): 财务负责人(签章):

年 月 日 年 月 日 年 月 日

附: 经费使用说明表

填报说明: b) 项目(课题)负责人需要对经费使用情况作一般说明; c) 当预算经费与拨入经费不相等时,需要特别说明; d) 当经费支出金额与经费预算金额相差较大时,需要着重说明。		
项目预算经费 22.0 万,基金委实际批拨 22.0 万。预算经费与拨入经费相等。 在项目执行过程中,项目组严格国家自然科学基金经费使用的规定,按照经费预算使用下拨的科研经费。 目前项目组共使用经费 21.02 万元,其中研究经费支出 18.13 万,包括 12.28 万科研业务费,2.65 万实验材料费,1.33 万一起设备费以及 1.87 万协作费。劳务费支出 2.23 万,由于物价上涨,多支出 13 万。管理费支出 0.66 万,实际按照 3%计算。 项目结题时,经费节余 0.98 万,这主要由于到项目结题时为止,项目的部分研究成果论文正在审查中,它们的正式出版估计还需要出版费 0.98 万。 具体的经费使用情况详见经费决算表。		
负责人(签章) 年 月 日		
科研管理部门意见 签 章 年 月 日	财务部门意见 签 章 年 月 日	审计部门意见 签 章 年 月 日