

隧道超前探测准全空间磁共振理论及应用

林婷婷, 万 玲, 曲永星, 范铁虎, 王世隆, 易晓峰, 林 君

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130026)

摘 要: 依据地下探测的全空间特点, 首次提出准全空间探测模型, 推导准全空间 MRS 响应核函数表达式, 有效剔除隧道已挖空区域在计算结果中的影响, 提高 MRS 正演计算准确度。同时, 反演方法采用序列二次规划法进行, 完成了地下准全空间模型磁共振数据非线性反演。理论数据中, 对比地面半空间、地下全空间的反演结果, 准全空间模型能更精确地反演地下灾害水体位置及含量, 且在含噪 10% 的情况下仍然得到较为理想的反演结果。在理论研究的基础上, 结合金温铁路泽雅隧道的 MRS 现场测试, 对掘进掌子面前方隐伏含水构造进行解释, 并利用瞬变电磁数据对 MRS 探测结果进行了一致性的比对分析。该项研究表明准全空间探测模型结合 SQP 反演算法能够准确给出地下灾害水体的定位及富水程度, 实现地下水害的超前准确预报, 为隧道磁共振探测提供理论基础。

关键词: 隧道; 磁共振测深; 准全空间; 序列二次规划

中图分类号: P631

文献标志码: A

Quasi-whole space magnetic resonance theory and its application in tunnel advanced detection

LIN Ting-ting, WAN Ling, QU Yong-xing, FAN Tie-hu, WANG Shi-long, YI Xiao-feng, LIN Jun

(Key Laboratory of Geo-Exploration Instrumentation, Ministry of Education, Jilin University,
College of Instrumentation and Electrical Engineering, Changchun 130026, China)

Abstract: Based on of the whole-spatial characteristics of underground exploration, the quasi-whole space detection model was proposed for the first time, the quasi-whole space response kernel function of MRS was derived. The effect of the hollowed out area of the tunnel in the calculation result is eliminated effectively and MRS forward calculation accuracy is improved. Meanwhile, with the sequential quadratic programming (SQP) inversion method, the nonlinear inversion of magnetic resonance data of the underground quasi-whole space model is fulfilled. In the theoretical data, contracting the inversion results of ground half space with the underground space, quasi-whole space model can be more accurate in the inversion of underground disaster water's position and content, and a good inversion result even under the condition of containing 10% noise is gained. Based on the theoretical research and combining with MRS field testing of Zeya Tunnel of Jin Wen Railway, the water-bearing structure hidden in the tunneling tunnel face was explained, and the consistency of the detecting results comparatively was analyzed. The results show that the whole space exploration model combining SQP inversion algorithm can give the position of underground disaster water and water-bearing level accurately, and the prediction of groundwater harm accurately is achieved to lay a theoretical foundation for MRS detection of the tunnel.

Key words: tunnel; magnetic resonance detection; quasi-whole space; sequential quadratic programming

道路交通设施是国民经济的基础设施。我国山区众多, 公路铁路经常在山岭中穿过, 隧道在道路工程

中所占的比例很大。由于地质条件复杂, 隧道建设时经常会遇到突水涌泥灾害, 给施工安全带来重大灾难

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发和应用专项(2011YQ030133); 国家自然科学基金青年基金项目(21101071); 吉林省科技发展项目(20120326)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 范铁虎, 讲师, 博士; 电话: 13604396789; E-mail: fth@jlu.edu.cn

和巨大经济损失。因此,为保障隧道施工安全,减轻突水、突泥等灾害造成的损失,提高隧道含水构造超前预报的精度具有重要的理论意义和重大的工程应用价值^[1]。

目前,国内外开展了多种隧道突水超前探测方法,主要包括超前钻孔法、瞬变电磁法、探地雷达法和高密度电阻率法等^[2]。其中,超前钻孔法是最直接有效的地质超前预报方法,但一次钻孔距离短,费用高且施工时间长。其他几种物探方法主要是通过探测岩石物理性质、岩石电性和弹性变化来间接判断是否存在水害隐患,无法定量探查、并且解释结果不具有唯一性。

磁共振地下水探测技术(Magnetic resonance sounding, MRS)^[3]是近年来地球物理及水文地质工作者广泛应用的地下水直接探测的方法,与常规探测地下水的方法相比,具有定性定量分析地下水的优势,已在地面地下水勘察中开展了广泛的应用^[4-8]。但由于地下空间狭窄,进行地下磁共振探测存在线圈尺寸小、噪声干扰严重、探测距离受限等难题,因此,目前利用磁共振技术直接探测和评价隧道突水水源方面的研究尚未见文献报道。

吉林大学磁共振课题组已开展了大量的地面磁共振勘探的基础研究与应用研究^[9-11]。针对地下磁共振探测难题,目前,成功研发了小型化磁共振仪器^[12],并进行了吉林长松岭隧道^[13]、沪昆高速铁路斗磨隧道等地的灾害水源探测工作,为隧道超前地质预报提供了一定的借鉴指导意义。然而,地下磁共振理论研究还需要进一步深入^[14]。首先,与地面探测的半空间不同,地下磁共振应用会产生全空间响应,同时,还应重点考虑已挖空区域在全空间模型中的影响,如图1所示。故本文作者首先建立磁共振隧道超前探测模型,正演计算准全空间模型磁共振响应。

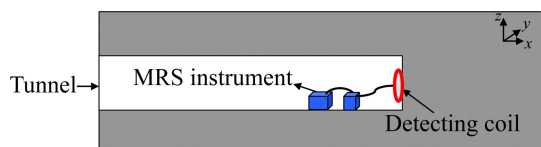


图1 磁共振隧道超前探测模型(探测隧道挖空区域)

Fig. 1 MRS detection model in tunnel (Hollowed out area of tunnel)

传统的磁共振含水量反演计算有时不能满足计算要求,需要找到一种较好的处理非线性最优化问题的方法来解决反演中存在的一些问题。序列二次规划方法(SQP)作为非线性规划中一种较为有效的方法,已经

在参数优化问题上有了一定的应用:如KIM等在反演导热率的研究中进行了应用、伍开江等^[15]和刘冰等^[16]在基于序列二次规划方法的高密度电阻率方面进行了反演研究等。然而,该方法用于磁共振含水层反演中未见报道。

本文作者提出基于SQP方法的磁共振含水层反演算法,结合“准全空间”理论,对含水层模型以及金温铁路泽雅隧道的实测数据进行了反演。结果表明,上述方法能够实现灾害水体的准确预报,为隧道磁共振探测提供坚实的理论基础。

1 MRS 准全空间正演计算

磁共振方法是利用人工激发频率为拉莫尔频率 f_L 的交变电磁场,使地下水中氢原子核形成宏观磁矩,这一宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动,其进动频率为氢原子核所特有,利用接收线圈接收由宏观磁矩进动产生的电磁信号,即可探测地下水的存在。

当在发射线圈中通以强度为 I ,持续时间为 τ 的交变电流时,激发停止时刻,含水体在接收线圈中产生的磁共振信号初始振幅为

$$E_0(q) = \int_0^l [K(q, x) \cdot n(x)] dx \quad (1)$$

$$K(q, x) = 2\pi f_L M_0 \int_y \int_x B_{\perp} \sin\left(\frac{1}{2} \gamma B_{\perp} q\right) dz dy \quad (2)$$

式中: E_0 为MRS信号初始振幅; l 代表最大探测深度; $q = I \cdot \tau$ 为激发脉冲矩; $0 \leq n(x) \leq 1$ 代表地下含水层含水量大小; M_0 为磁化强度; $\gamma = 2.67522128 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 为氢质子的旋磁比; $B_{\perp} = \mu H_{\perp}$, $H_{\perp}$ 为发射回线在某位置产生的垂直于地磁场方向的磁场强度垂直分量; $K(q, x)$ 为核函数,体现激发磁场对地下某位置处含水体的灵敏度。

地下磁共振应用属全空间模型。在隧道超前探测中,磁共振响应为有效探测范围内所有含水体的综合响应,同时,还应考虑已挖空区域在全空间模型中的影响,如图1所示。因此,地下磁共振响应为“准全空间”含水体的综合反映。准全空间模型磁共振核函数如式(3)所示。其中, L 代表隧道掌子面宽度。

$$K_{QW} = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(q, x, y, z) dy dz, & x \geq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(q, x, y, z) dy dz - \\ \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} K(q, x, y, z) dy dz, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{QW} 为准全空间模型MRS核函数。

模拟探测空间岩石电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$, 拉莫尔频率 2280 Hz , 采用 20 匝 6 m 直径线圈, 对掌子面宽度为 10 m 的隧道进行仿真。分别计算了未考虑已挖空区域影响的全空间模型 MRS 核函数(见图 2(a))及考虑了已挖空区域影响的准全空间模型 MRS 核函数(见图 2(b))。

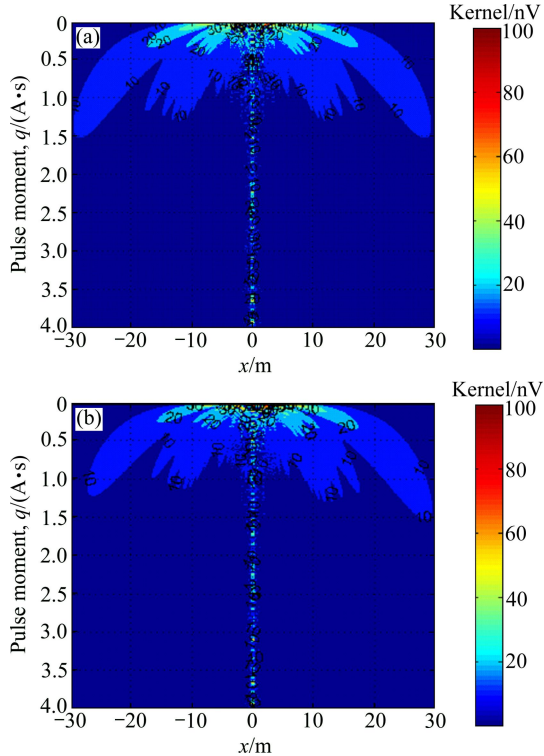


图 2 MRS 核函数: (a)全空间模型; (b)准全空间模型

Fig. 2 MRS kernel: (a) Whole-space model; (b) Quasi-whole space model

2 序列二次规划反演方法

如式(1)所示,磁共振响应初始振幅 E_0 与被激发的地下氢质子数量成正比,即与地下介质含水量直接相关。因此,在本研究中,采用序列二次规划反演方法(SQP 算法),建立 MRS 非线性优化问题为如下形式:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{m}) = \|E_0^{\text{mod}} - E_0^{\text{obs}}\| + \mathbf{C}\mathbf{m} \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{m}) = 0, i = 1, 2, \dots, x \\ g_i(\mathbf{m}) > 0, i = x+1, x+2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(\mathbf{m})$ 为目标函数; E_0^{mod} 为理论磁共振响应初始振幅; E_0^{obs} 为野外实测磁共振初始振幅数据; $\mathbf{C}$ 为平滑度矩阵; $\mathbf{m}$ 为待解模型参数向量; $g_i(\mathbf{m})$ 为各模型参数约束条件。

利用 SQP 算法求解这类优化问题,算法核心主要是通过将原问题转化为一组二次规划子问题,以子

问题的解作为搜索方向进行搜索,最终获得原问题的最优解。二次规划子问题可描述为

$$\begin{cases} \min \mathbf{G}_k^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H}_k \mathbf{d} \\ \text{s.t. } \nabla g_i(\mathbf{m})^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{m}) = 0, i = 1, 2, \dots, x \\ \nabla g_i(\mathbf{m})^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{m}) > 0, i = x+1, x+2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{G}_k$ 和 $\mathbf{H}_k$ 分别是在第 k 个迭代点处目标函数对各参数的一阶、二阶偏导矩阵,也称梯度矩阵和 Hessian 矩阵。

$$\mathbf{G}_k = f'(\mathbf{m}) = E_0'(\mathbf{m})^T (E_0(\mathbf{m}) - E_0^{\text{obs}}) \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_k = f''(\mathbf{m}) = E_0''(\mathbf{m})^T E_0'(\mathbf{m}) \quad (7)$$

式中: $f'(\mathbf{m})$ 为目标函数的一阶偏导数; $E_0'(\mathbf{m})$ 为 MRS 信号初始振幅对各模型参数的一阶偏导数; $f''(\mathbf{m})$ 为目标函数的二阶偏导数。

在 MRS 的正演计算中,虽然响应对各参数的一阶偏导数存在,但是难以用公式直接给出,为此采用一阶差商代替一阶偏导数的方法,得到

$$E_{0i}'(\mathbf{m}) = \frac{\partial E_0(\mathbf{m})}{\partial m_i} = \frac{E_{0i}(\mathbf{m} + \delta \mathbf{m}_i) - E_{0i}(\mathbf{m}_i)}{\delta m_i} \quad (8)$$

式中: $E_{0i}'(\mathbf{m})$ 为 MRS 信号初始振幅对第 i 个模型参数的一阶偏导数; $\mathbf{m}_i$ 为第 i 个模型参数; δ 的取值范围一般为 $0.001 \sim 0.01$; $\mathbf{d}$ 为模型参数修正,沿 $\mathbf{d}$ 方向进行一维搜索,不断更新解向量

$$\mathbf{m}_n = \mathbf{m} + \mathbf{d} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{m}_n$ 为新模型参数。

3 理论模型算例

磁共振隧道超前探测模拟观测数据采用如下条件获得:拉莫尔频率 2280 Hz ,发射天线为 20 匝 6 m 直径线圈,均匀半空间模型电阻率 $500 \Omega \cdot \text{m}$,设置的含水单元模型参数如表 1 所示。探测空间存在一个含水层,均匀分布在掘进面前方 12~18 m 位置,含水量 30%(质量分数),含水层厚度 6 m。

表 1 理论模型参数

Table 1 Model parameters

Water location/m	Layer thickness, D/m	Water content/%
-30~12	42	0.01
12~18	6	30
18~30	12	0.01

采用上述序列二次规划反演方法对半空间模型、全空间模型和准全空间模型反演,反演结果如图3所示。图3(a)和(b)所示分别为不同激发脉冲对应的初始振幅曲线和采用半空间模型反演后得到的含水单元结构图。其中红色曲线代表设置的理论模型,蓝色曲线代表反演结果(见电子版)。由图3(a)和(b)可见,地下MRS探测时,如依然采用地面半空间模型解释方法,势必导致反演结果严重偏离实际。表现为解释结果中含水层位置不确定,各含水层总体含水量偏大,总含水量大约为真实含水量的两倍。图3(c)和(d)所示分别为采用全空间模型的反演结果(图中各颜色曲线代表的意义与图3(a)和(b)一致)。由图3(c)和(d)可见,在隧道超前探测时,采用全空间模型而不考虑已挖空区域的影响,虽然反演结果得到的各含水层总含水量与真实模型基本相符,但无法给出含水层的准确位置,表现为含水层不定的分布于掘进面前方及后方镜像位置处。图3(e)和(f)所示分别为采用准全空间模型反演结果。由图3(e)和(f)可见,反演结果能够对含水层位置

水量大约为真实含水量的两倍。图3(c)和(d)所示分别为采用全空间模型的反演结果(图中各颜色曲线代表的意义与图3(a)和(b)一致)。由图3(c)和(d)可见,在隧道超前探测时,采用全空间模型而不考虑已挖空区域的影响,虽然反演结果得到的各含水层总含水量与真实模型基本相符,但无法给出含水层的准确位置,表现为含水层不定的分布于掘进面前方及后方镜像位置处。图3(e)和(f)所示分别为采用准全空间模型反演结果。由图3(e)和(f)可见,反演结果能够对含水层位置

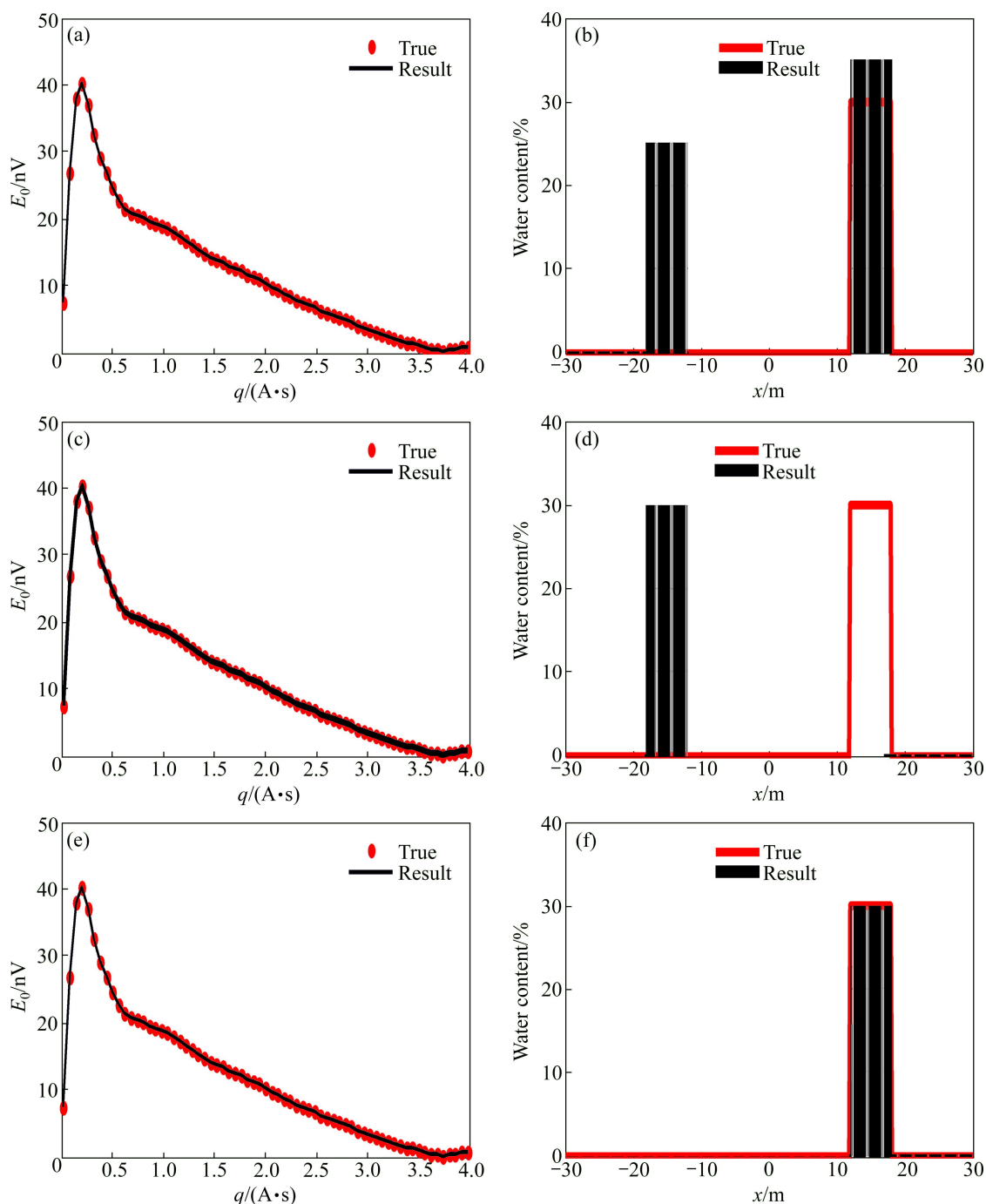


图3 无噪声反演结果: (a), (b)半空间模型; (c), (d) 全空间模型; (e), (f) 准全空间模型

Fig. 3 MRS inversion result without noise: (a), (b) Half-space model; (c), (d) Whole-space model; (e), (f) Quasi-whole space model

准确定位,得到的含水层位置及含水量大小均与理论模型吻合,充分验证了反演算法的有效性和剔除已挖空区域对反演结果影响的重要性。

MRS 信号微弱,信号幅度通常为纳伏级,因此野外工作时受噪声影响较大。为了模拟野外工作环境,使仿真过程接近实际,在 MRS 理论数据中加入了 5% 的 Guass 噪声,反演结果如图 4 所示。图 4 所示为加入 5% 噪声半空间模型、全空间模型和准全空间模型反演结果。由图 4 可见,加入的 5% 噪声并未对反演

结果造成影响,准全空间模型反演结果依然与理论模型保持很好的一致。

当加入 10% 的 Guass 噪声时,反演结果如图 5 所示。图 5 所示为加入 10% 噪声半空间模型、全空间模型和准全空间模型反演结果。由图 5 可见,半空间模型与全空间模型反演结果含水层位置不稳定,且总含水量不能保持规律性。而准全空间模型反演结果虽然与理论模型存在偏差,但给出的主含水层位置及含水量大小与理论模型偏差较小,反演误差在 10% 以内。

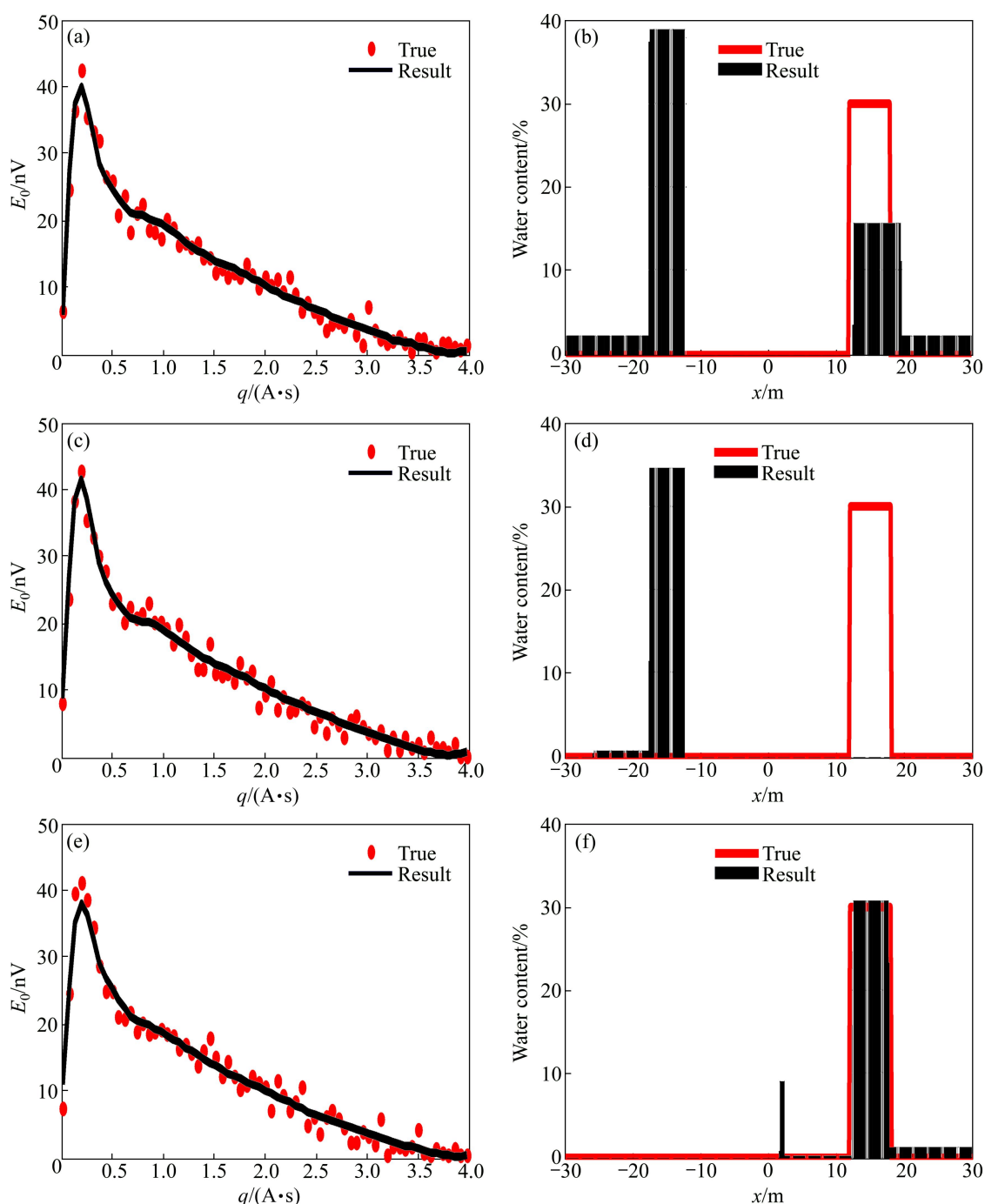


图4 加入5%噪声反演结果: (a), (b) 半空间模型; (c), (d) 全空间模型; (e), (f) 准全空间模型

Fig. 4 MRS inversion result with 5% noise: (a), (b) Half-space model; (c), (d) Whole-space model; (e), (f) Quasi-whole space model

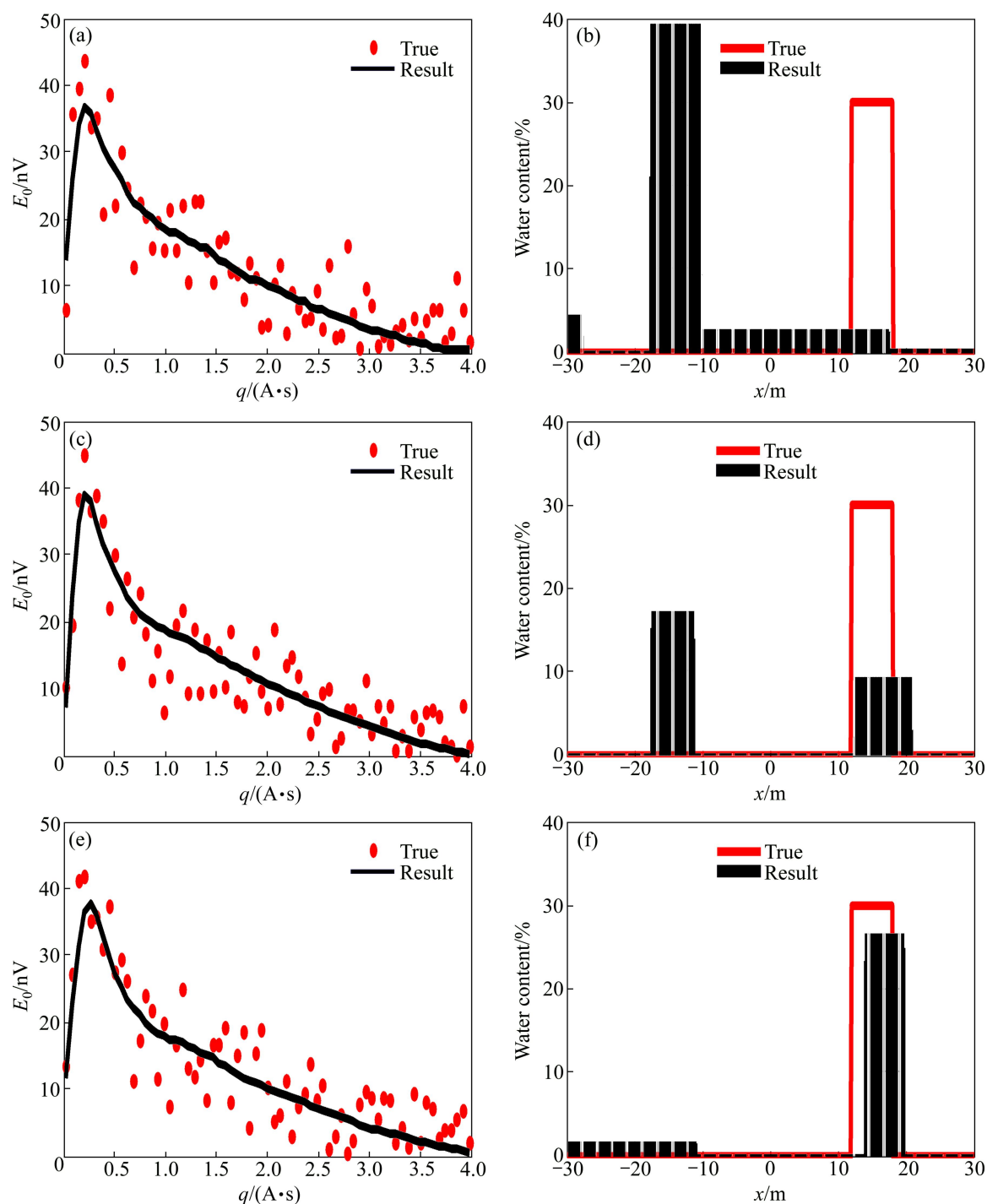


图5 加入10%噪声反演结果: (a), (b) 半空间模型; (c), (d) 全空间模型; (e), (f) 准全空间模型

Fig. 5 MRS inversion result with 5% noise: (a), (b) Half-space model; (c), (d) Whole-space model; (e), (f) Quasi-whole space model

4 隧道超前探测实例

应用上文所述准全空间模型理论及 SQP 反演算法对隧道实际探测数据进行解释, 验证算法的实用性。

项目组采用自主研制的小型化磁共振超前探测系统及瞬变电磁系统在位于金温铁路上的泽雅隧道进行了掘进面前方水害超前探测。隧址区在大地构造上属华南褶皱系, 浙东南褶皱带的临海—温州拗陷, 泰顺—温州断拗的北西侧。区内地质构造较为复杂, 所见各种构造形迹为多次构造运动所形成。测区表现为

强烈的火山活动, 形成大面积的、厚度较大的火山岩。当火山作用趋于宁静时, 随着应力场的变化, 形成测区纵横交错的断裂构造。

探测地点拉莫尔频率 2 001 Hz, 发射天线和接收天线均采用边长为 6 m 的方形线圈 20 匝, 发射了 9 组激发脉冲矩, 叠加 32 次, 最大发射电流 90 A, 垂直悬挂于掌子面, 法线方向探测。经统计叠加、自适应消噪等数据预处理方法^[17], 采用本研究所反演算法对实际探测数据解释, 反演结果如图 6 所示。图 6(a) 和(b)所示分别为实测 MRS 初始振幅信号和反演得到的含水单元结构图。反演结果显示隧道掘进面前方 13.5 m 到 21.3 m 区间存在含水层, 平均含水量达 2.5%。与此同时, 项目组在探测地进行了瞬变电磁探测^[18-22], 已达到两种方法互相验证, 并给出富水区域的范围。瞬变电磁探测结果如图 7 所示。由图 7 可见, 在 4 号测点处存在金属管道低阻异常, 已经施工方验证, 在掘进面前方 15 m 到 30 m 位置存在低阻异常。

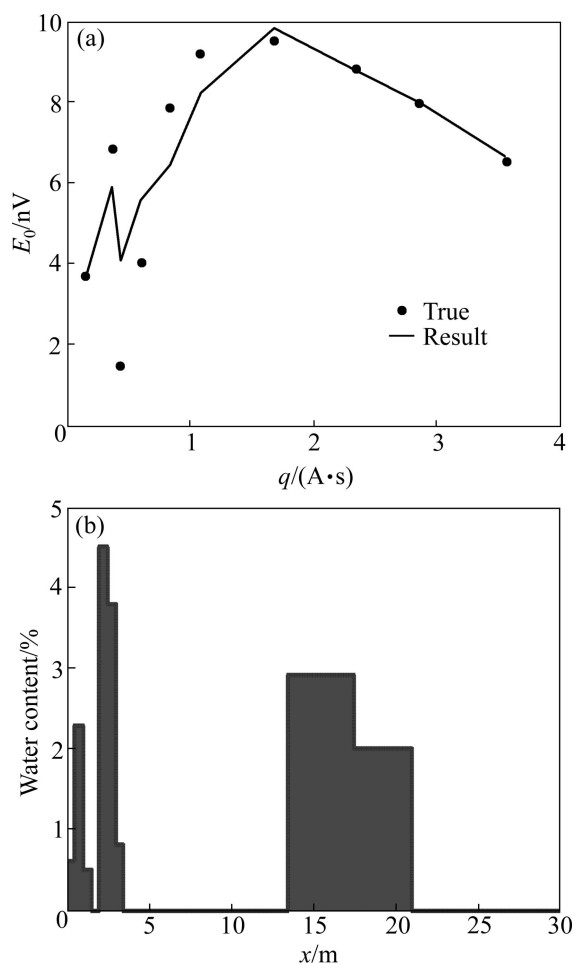


图 6 泽雅隧道 MRS 探测数据反演结果: (a) MRS 测量数据; (b) 反演结果

Fig. 6 MRS inversion result in Zeya tunnel: (a) MRS data; (b) Inversion result

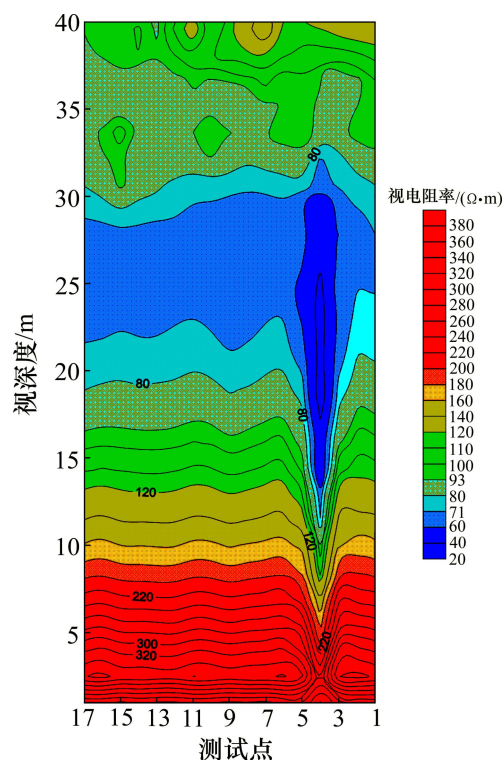


图 7 泽雅隧道 TEM 探测数据解释结果

Fig. 7 TEM inversion result in Zeya tunnel

综合磁共振与瞬变电磁解释结果判断, 在掘进面前方 13 m 后即可能存在较大含水层, 较均匀地平行分布于掌子面位置, 含水层厚度在 10~15 m 之间。因此, 应做好防排水工作, 确保施工安全。

5 结论

1) 提出准全空间模型探测理论, 通过对比地面半空间模型, 地下全空间模型和剔除已挖空区域影响的准全空间模型反演结果, 验证准全空间模型能够对含水层位置进行准确定位, 解决采用半空间模型和全空间模型解释结果出现的含水量过大及含水层位置不明确问题。

2) 序列二次规划反演算法能够对磁共振数据进行有效处理, 反演结果中含水层分界明显, 有助于实际应用中含水层位置的准确判断。

3) 通过对泽雅隧道的实际探测数据反演, 并结合瞬变电磁探测结果的相互验证及对比分析, 给出了掘进面前方水害具体位置及富水程度, 验证了本研究所理论及反演算法的实用性。

4) 本研究为磁共振技术地下探测的数据处理工

作提供了新思路,随着磁共振技术在矿井、隧道中的广泛应用,该反演方法可进行深入研究,得到更多水文地质参数,更加有效地判断水源性质。

REFERENCES

- [1] 张平松,刘盛东,吴健生. 隧道及井巷工程超前探测模拟及其偏移技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 2847–2851.
ZHANG Ping-song, LIU Sheng-dong, WU Jian-sheng. Study on detecting simulation ahead of tunnel and laneway and its migration technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 2847–2851.
- [2] 柳建新,邓小康,郭荣文,刘海飞,童孝忠,柳卓. 坑道直流聚焦超前探测电阻率法有限元数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 970–975.
LIU Jian-xin, DENG Xiao-kang, GUO Rong-wen, LIU Hai-fei, TONG Xiao-zhong, LIU Zhuo. Numerical simulation of advanced detection with DC focus resistivity in tunnel by finite element method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 970–975.
- [3] 林君,段清明,王应吉. 核磁共振找水仪原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LIN Jun, DUAN Qing-ming, WANG Ying-ji. Theory and design of magnetic resonance sounding instrument for groundwater detection and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] CHALIKAKI K, NIELSEN M R, LEGCHENKO A. MRS applicability for a study of glacial sedimentary aquifers in Central Jutland, Denmark [J]. Journal of Applied Geophysics, 2008, 66: 176–187.
- [5] 戴苗,胡祥云,吴海波,蒋龙聪,杨迪琨. 地面核磁共振找水反演[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1876–1882.
DAI Miao, HU Xiang-yun, WU Hai-bo, JIANG Long-cong, YANG Di-kun. Inversion of surface nuclear magnetic resonance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1876–1882.
- [6] MOHNKE O, YARAMANCI U. Smooth and block inversion of surface NMR amplitudes and decay times using simulated annealing [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50: 163–177.
- [7] BRAUN M, YARAMANCI U. Inversion of resistivity in magnetic resonance sounding [J]. Journal of Applied Geophysics, 2008, 66: 151–164.
- [8] LEGCHENKO A, VALLA P. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50: 3–19.
- [9] 林君. 核磁共振找水技术的研究现状与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 681–691.
- LIN Jun. Situation and progress of nuclear magnetic resonance technique for groundwater investigations [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2): 681–691.
- [10] LIN Jun, LIN Ting-ting, JI Yan-ju, CHEN Zu-bin, ZHAO Yi-ping, LI Hai-sheng. Non-invasive characterization of water-bearing strata using a combined geophysical surveys [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 91: 49–65.
- [11] 田宝凤,林君,段清明,蒋川东. 基于参考线圈和变步长自适应的磁共振信号噪声压制方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2462–2472.
TIAN Bao-feng, LIN Jun, DUAN Qing-ming, JIANG Chuan-dong. Variable step adaptive noise cancellation algorithm for magnetic resonance sounding signal with a reference coil [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2462–2472.
- [12] 易晓峰,林君,段清明. 基于双匝线圈的轻便式核磁共振找水仪研制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 1–10.
YI Xiao-feng, LIN Jun, DUAN Qing-ming. Research and development of portable nuclear magnetic resonance groundwater exploration instrument based on double-turn coils [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 1–10.
- [13] 林君,蒋川东,段清明,王应吉,秦胜伍,林婷婷. 复杂条件地下水磁共振探测与灾害水源探查研究进展[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1560–1570.
LIN Jun, JIANG Chuan-dong, DUAN Qing-ming, WANG Ying-ji, QIN Sheng-wu, LIN Ting-ting. The situation and progress of magnetic resonance sounding for groundwater investigations and underground applications [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1560–1570.
- [14] 孙怀凤,李术才,李貅. 核磁共振测深进行隧道超前地质预报的可行性[J]. 山东大学学报: 工学版, 2013, 43(1): 92–103.
SUN Huai-feng, LI Shu-cai, LI Xiu. Feasibility of using magnetic resonance sounding in prediction of water bearing structures in front of a tunnel face [J]. Journal of Shandong University: Industry Science Edition, 2013, 43(1): 92–103.
- [15] 伍开江,周启友. 基于序列二次规划方法的高密度电阻率反演[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 63–67.
WU Kai-jiang, ZHOU Qi-you. High density electrical resistivity inversion based on sequential quadratic programming method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(3): 63–67.
- [16] 刘冰,徐兴平,李继志. 基于序列二次规划算法的水平井射孔优化[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 97–101.
LIU Bing, XU Xing-ping, LI Ji-zhi. Application of SQP algorithm to optimize perforation in horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 97–101.

- [17] JIANG C, LIN J, DUAN Q, SUN S, TIAN B. Statistical stacking and adaptive notch filter to remove high-level electromagnetic noise from mrs measurements [J]. *Near Surface Geophysics*, 2011, 9(9): 459–468.
- [18] 于景邨, 刘树才, 王扬州. 巷道内金属体瞬变电磁响应特征及处理技术[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1403–1407.
YU Jing-cun, LIU Shu-cai, WANG Yang-zhou. Response characteristic of transient electromagnetic to metallic facilities in coal mines and the disposal technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1403–1407.
- [19] 谭代明. 地下全空间瞬变电磁响应的研究[J]. *物探与化探*, 2009, 33(4): 436–439.
TAN Dai-ming. A study of the response of transient electromagnetic underground whole-space [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*. 2009, 33(4): 436–439.
- [20] 孟庆鑫, 潘和平. 井中磁源瞬变电磁三维时域有限差分数值模拟[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(2): 649–655.
MENG Qing-Xin, PAN He-Ping. 3D FDTD numerical simulation for transient electromagnetic of magnetic source in borehole [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(2): 649–655.
- [21] 薛国强, 李 貅. 瞬变电磁超前预报成像技术[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 894–900.
XUE Guo-qiang, LI Xiu. The technology of TEM tunnel prediction imaging [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 894–900.
- [22] LEGCHENKO A, EZESKY M, CAMERLYNCK C, AL-ZOUBI A, CHALIKAKIS K. Joint use of TEM and MRS methods in a complex geological setting [EB/OL]. www.sciencedirect.com, 2009: 908–917.

(编辑 李艳红)