

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311386

# 基于 CS-FastICA 的超导电磁数据消噪方法研究\*

高全明<sup>1,2</sup>, 张瀚文<sup>1</sup>, 侯宇丹<sup>1</sup>, 张嘉宸<sup>1</sup>, 嵇艳鞠<sup>1</sup>

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130061; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所  
信息功能材料国家重点实验室 上海 200050)

**摘要:** 超导电磁探测极易受到环境电磁噪声的干扰, 严重影响了数据的解释精度。针对这一问题, 提出了一种基于信噪分离消噪原理的超导电磁噪声抑制方法。该方法首先利用 FastICA 算法从观测信号中分离提取二次磁场信号, 然后针对信号分离后的幅值不确定性问题, 基于最大化非高斯性和最小畸变准则构建优化约束模型, 最后利用 CS 搜索算法迭代求解分离矩阵的最优参数值。仿真结果显示, 本文方法在信噪比和均方误差指标上均优于 PCA、WA 和 ICA 方法, 消噪后信号的信噪比提高了 16.6 dB。现场实验表明, 本文方法对多种环境电磁噪声均具有良好的抑制效果, 消噪后观测信有效时间提高了近 4 倍。观测信号质量得到了显著改善, 视电阻率成像解释深度达 1 000 m, 充分验证了本文方法的有效性和实用性。

**关键词:** 超导电磁探测技术; 电磁噪声; 信噪分离; 幅值不确定性问题

中图分类号: TH763 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 413.10

## Research on the superconducting electromagnetic denoising method based on CS-FastICA

Gao Quanming<sup>1,2</sup>, Zhang Hanwen<sup>1</sup>, Hou Yudan<sup>1</sup>, Zhang Jiachen<sup>1</sup>, Ji Yanju<sup>1</sup>

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China;  
2. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem  
and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The superconducting electromagnetic detection is highly susceptible to interference from environmental electromagnetic noise, which seriously affects the accuracy of data interpretation. To address this issue, this paper proposes a superconducting electromagnetic noise suppression method based on the principle of signal-to-noise separation and denoising. Firstly, the FastICA algorithm is utilized to extract the secondary magnetic field signal from the observed signal. Then, an optimization constraint model is formulated, which is based on maximizing non-gaussianity and minimizing distortion to address the uncertainty of the signal amplitude after separation. Finally, the CS search algorithm is used to iteratively solve for the optimal parameters of the separation matrix. Simulation experiment results show that the proposed method outperforms the PCA, WA and ICA methods in terms of signal-to-noise ratio and mean square error metrics, with a 16.6 dB improvement in signal-to-noise ratio after noise reduction. Field experiment results show that the proposed method has good suppression effects on various environmental electromagnetic noise. The effective signal duration is increased by nearly 4 times after denoising. The observed signal quality is significantly improved, and the imaging interpretation depth reaches 1 000 m. The effectiveness and practicality of the proposed method is fully evaluated.

**Keywords:** superconducting electromagnetic detection technology; electromagnetic noise; signal-noise separation; amplitude uncertainty problem

## 0 引言

瞬变电磁法又称时间域电磁法 (transient electromagnetic method, TEM), 是一种利用电磁感应原理探测地下介质电阻率的地球物理勘探方法, 被广泛应用于环境监测、资源勘查、地质灾害调查等领域<sup>[1-4]</sup>。传统的 TEM 方法主要利用感应线圈作为接收传感器, 观测地下介质在一次脉冲磁场激励下产生的二次感应场信号 ( $\text{dB}/\text{dt}$ )。然而, 由于感应线圈灵敏度和带宽的限制, 传统 TEM 方法在深地勘探方面的局限性日益凸显。

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是目前灵敏度最高的磁传感器之一, 具有  $\text{fT}$  量级的磁场信号分辨, 可以有效感知 TEM 探测时地下深部介质的极微弱的二次磁场信号 ( $B$ )。因此, 基于 SQUID 的超导电磁探测技术受到了国内外众多学者的广泛关注<sup>[5-7]</sup>。研究表明, 超导电磁探测技术的理论探测深度超过 3 000 m, 被列为地球深部精细化探测的颠覆性技术之一<sup>[8]</sup>。超导电磁探测技术是突破传统 TEM 探测深度瓶颈, 实现地下复杂地质构造的高分辨、大深度探测的先进技术手段。

近年来, 随着人类生产生活的不断发展, 环境电磁噪声日益复杂, 噪声能量越来越大, 严重干扰超导电磁探测观测信号, 使深部勘探工作面临巨大挑战。超导电磁探测早期信号主要表征浅部地电特征, 晚期信号衰减慢、趋肤深度大, 主要表征深部地电特征。因此, 提高晚期道信号的信噪比对于提升探测深度至关重要。

目前, 国内外学者对电磁噪声抑制方法进行了深入研究。相关研究工作可归纳为以下 3 类方法, 周期叠加法、滤波消噪法和信噪分离法。其中, 周期叠加法是电磁探测中常用的一种消噪方法。该方法通过对观测信号进行多次采样叠加, 以实现电磁噪声抑制的目的。随后, 学者们基于周期叠加法提出了一些改进方法, 如稳健 M 估计时间窗口抽道叠加法<sup>[9]</sup>、双极性脉冲发射均衡叠加法<sup>[10]</sup>、复合窗函数加权叠加法<sup>[11]</sup>等。上述方法对平稳随机特性的天电噪声具有良好的抑制效果, 但对人文噪声等非随机性电磁噪声的抑制能力有限。此外, 一些学者尝试利用滤波技术消除电磁噪声, 如数字滤波器<sup>[12]</sup>、基于移动窗口的均值滤波法<sup>[13]</sup>、卡尔曼滤波消噪法<sup>[14]</sup>等。但是这些方法只能抑制电磁噪声中某些特定的频率成分, 无法满足宽频电磁噪声的抑制需求。另一方面, 一些学者开展了基于小波分析法的滤波消噪方法研究<sup>[15-18]</sup>, 并取得了良好的应用效果。然而, 由于小波基的选取存在一定的困难, 使得该方法在实际应用中具有很大的局限性。相比之下, 基于信号检测理论的信噪分离法得到了众多学者的关注。该方法通过将有效信号和噪声进行

分离处理, 以剔除噪声成分获得更高信噪比的信号信息。例如, 学者们提出了变分模态分解法<sup>[19]</sup>、最小噪声分离法<sup>[20]</sup>、主成分分析法<sup>[21]</sup>、最小均方误差法<sup>[22]</sup>, 并将其应用于工频干扰、尖峰噪声抑制。信噪分离法在电磁探测消噪方面具有广泛的适用性和高效性, 成为了当前抑制电磁噪声的一种有效方法。

本文在综合分析超导电磁探测噪声的基础上, 基于信噪分离消噪原理提出了一种电磁噪声抑制方法。该方法利用快速独立成分分析法 (fast independent component analysis, FastICA) 进行超导电磁数据信号分离。同时针对分离后信号幅值不确定性问题, 基于最大化非高斯性和最小畸变准则构建优化约束模型, 利用 CS 搜索算法迭代求解分离矩阵的最优参数值, 从而有效校正不确定性误差, 提高了方法的鲁棒性。最后, 通过仿真实验和野外现场实验验证了本文所提方法的有效性, 实验结果表明该方法具有良好的电磁噪声抑制效果。

## 1 超导电磁探测技术

SQUID 是一种基于超导约瑟夫森效应和磁通量子化现象的高灵敏度磁传感器。根据偏置电流的不同, SQUID 分为直流 (DC) SQUID 和交流 (RF) SQUID 两类。其中直流 SQUID 由一个超导环和两个近似相等的约瑟夫森结组成, 通过感知超导环中的磁通变化量测量外界磁场。根据 BCS 理论, 超导环内包含的磁通是量子化的, 即磁通是磁通量子  $\Phi_0$  的整数倍。由于  $\Phi_0$  的量级非常小, 因而 SQUID 可观测到极微弱磁信号。此外, SQUID 具有宽频带 ( $>10$  MHz) 的特性, 且频带范围内传感灵敏度不受频率变化影响。因此, SQUID 已成为当前最为理想的瞬变电磁接收传感器<sup>[23]</sup>。

超导电磁探测系统主要由 SQUID 传感器、信号读出电路、杜瓦、发射机和接收机组成。如图 1 所示, 超导电磁探测作业时将 SQUID 传感器放置于盛有液氮 (77 K) 的杜瓦内, 使其处于低温超导状态。然后, 利用发射机向地下发射一次脉冲磁场, 通过 SQUID 接收地下介质激励产生的涡流二次磁场信号。

相比于传统 TEM 方法, 超导电磁探测技术在深地勘探方面优势明显: 1) SQUID 传感器具有高灵敏度、宽频带特性, 可观测更为丰富的深部介质地电特征信息; 2) 超导电磁探测测量的磁场  $B$  以时间  $t^{-3/2}$  衰减, 而  $\text{dB}/\text{dt}$  以时间  $t^{-5/2}$  衰减, 即  $\text{dB}/\text{dt}$  比  $B$  衰减的快, 超导电磁探测易于获取更长有效衰减时间的信号, 从而提高探测深度; 3)  $B$  场对低阻的响应能力强于  $\text{dB}/\text{dt}$ , 因此超导电磁探测技术对深部低阻介质具有更高的分辨率。

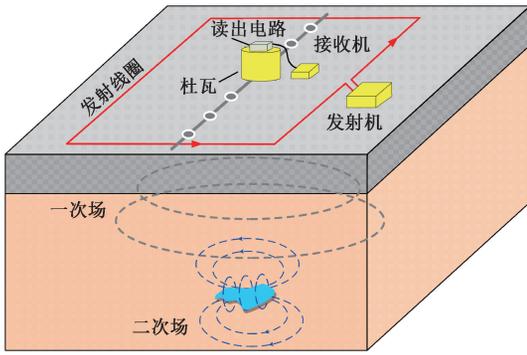


图 1 超导电磁探测示意图

Fig. 1 Diagram of superconducting electromagnetic detection

## 2 超导电磁探测噪声分析

超导电磁探测的噪声源主要有内部系统噪声和外部环境电磁干扰两部分。其中, 系统噪声主要表现为 SQUID 传感器本底噪声和信号读出电路噪声。

SQUID 传感器的磁通—电压特性曲线呈非线性关系, 无法直接测量磁场。因此, 需要利用读出电路对 SQUID 信号进行线性化处理, 即磁通锁定环路 (flux-locked loop, FLL)。如图 2 所示, FLL 电路基于负反馈原理, 即电路输出电压通过反馈回路产生反向磁通, 与 SQUID 超导环中被测磁通相抵消, 从而实现环路稳定平衡。在此状态下, 输出电压和被测磁通呈线性转换关系。

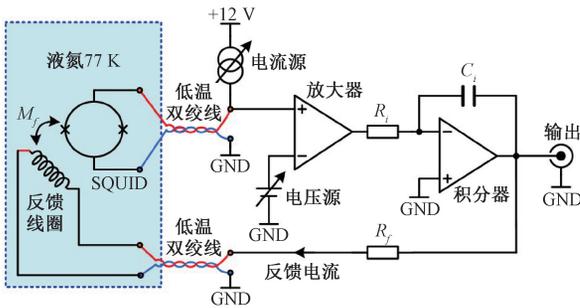


图 2 磁通锁定环路

Fig. 2 Flux-locked loop circuit

SQUID 是一种噪声极低的磁传感器, 低温超导状态下其等效电压噪声低于  $0.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。然而, 集成运算前置放大器电压噪声超过了  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 成为了 FLL 电路的主要噪声来源。为了解决 FLL 电路噪声问题, 学者们探索了低噪声放大器技术。其中, 采用晶体管构建前置放大器 (如图 3 所示) 的方法被证明是一种有效的解决方案<sup>[24]</sup>。该技术利用匹配晶体管作为放大器输入级, 通过差分对称和精密匹配等技术有效地抑制前置放大器

的输入噪声, 将电压噪声压制到  $0.35 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  的极低水平, 实现了 FLL 电路的高灵敏度和低噪声特性。

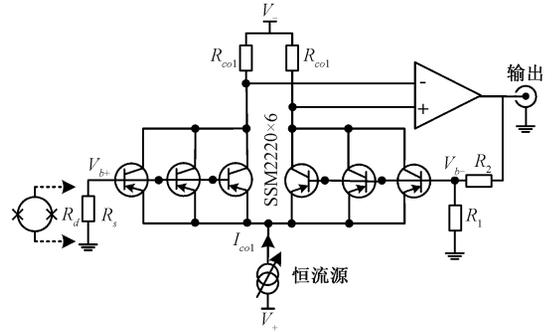


图 3 匹配晶体管前置放大器

Fig. 3 Preamplifier composed of matched transistors

因此, 环境电磁噪声成为了超导电磁探测面临的主要噪声源。SQUID 传感器的磁通反馈调制测量原理赋予其极高的磁通变化感知灵敏度, 但同时也使其对外界电磁噪声非常敏感。环境电磁噪声不仅影响超导电磁数据质量, 而且其中的高频、射频成分会严重干扰 SQUID 传感器的工作稳定性, 引起 SQUID 工作点发生跳变而导致出现失锁现象。目前, 解决这一问题的主要方法是通过电磁屏蔽来抑制 SQUID 环境电磁噪声。该方法利用低电阻率、高导电性的材料, 如铜、铝等作为电磁屏蔽材料, 将其包裹在杜瓦外以屏蔽环境电磁噪声。虽然电磁屏蔽方法对高频段以上电磁噪声具有显著的抑制效果, 但无法抑制低频电磁噪声。因此, 需要研究低频电磁噪声抑制方法。

## 3 超导电磁数据消噪方法

### 3.1 基于 FastICA 超导电磁数据信号分离

FastICA 算法是一种基于高阶统计独立性的信号分析方法, 具有定性分析信号特征的能力, 尤其在低频信号特征提取方面优势明显<sup>[25-26]</sup>。因此, FastICA 算法为解决超导电磁探测低频电磁噪声问题提供了一种有效途径。

根据 FastICA 算法原理, 假设超导电磁探测的观测信号  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_i]$  由两个相互独立的源信号成分  $\mathbf{s} = [s_i, n_i]$  混合组成, 即二次磁场信号  $s_i$  和噪声  $n_i$ 。则每一组观测信号均可表示为两个源信号以不同权重线性叠加组成。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}_{3 \times 3}$  为混合矩阵。

由于混合矩阵  $\mathbf{A}$  是可逆矩阵, 因此存在  $\mathbf{A}$  的逆矩阵, 即分离矩阵  $\mathbf{W}$  满足下式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{y}$  为源信号  $\mathbf{s}$  的估计信号, 即分离后的信号。

由于信号分离时源信号  $\mathbf{s}$  与混合矩阵  $\mathbf{A}$  均是未知状态,使得信号  $\mathbf{y}$  的分离过程中存在不确定性误差。对式(1)进行如下变换:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} = (\mathbf{A}\mathbf{D}^{-1})(\mathbf{D}\mathbf{s}) = \mathbf{A}'\mathbf{s}' \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{A}' = \mathbf{A}\mathbf{D}^{-1}$ ,  $\mathbf{s}' = \mathbf{D}\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{D}$  为任意对角矩阵。

由式(3)可知,无法确定分离后的信号  $\mathbf{y}$  对应  $\mathbf{s}$  还是  $\mathbf{s}'$ , 从而产生了分离后信号幅值不确定性误差。

由式(3)可得:

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} = (\mathbf{A}'\mathbf{D})^{-1} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{A}')^{-1} = \mathbf{r}_i\mathbf{u} \quad (4)$$

$$\text{其中, } \mathbf{r}_i = \mathbf{D}^{-1}, \mathbf{u} = (\mathbf{A}')^{-1} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{22} & u_{22} \end{bmatrix}.$$

### 3.2 分离矩阵参数优化约束模型

根据中心极限定理,两个独立源信号线性叠加后,得到的组合信号更趋于高斯分布,这也意味着信号的独立性更强。因此,非高斯性可作为信号独立性的度量标准。负熵具有不随任何可逆的线性变换而改变的特性,是一种评估信号非高斯性的有效指标。信号的非高斯性越强,负熵越大。考虑到求解过程涉及概率密度函数,负熵可利用下面的近似公式计算:

$$J(\mathbf{y}) = [E\{G(\mathbf{y})\} - E\{G(\mathbf{y}_{\text{Gauss}})\}]^2 \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{y}_{\text{Gauss}}$  为服从高斯分布的随机变量,且与分离信号  $\mathbf{y}$  具有相同的方差。  $G(\cdot)$  为非二次函数,可表示为:

$$G(\mathbf{y}) = -\exp\left(-\frac{\mathbf{y}^2}{2}\right) \quad (6)$$

最小畸变准则是指分离信号和观测信号之间的畸变最小化,即:

$$\min E(\sqrt{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|^2}) \quad (7)$$

由式(3)可知,分离后的信号  $\mathbf{s}'$  与源信号  $\mathbf{s}$  之间呈线性比例关系,即:

$$\mathbf{s} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{s}' = \mathbf{r}_i\mathbf{s}' \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{r}_i = \text{diag}([r_1, r_2])$ 。

综上,基于最大化非高斯性和最小畸变原则建立分离矩阵优化约束模型:

$$F = \frac{1}{J(\mathbf{y})} + E(\sqrt{\|\mathbf{r}_i\mathbf{y} - \mathbf{x}\|^2}) \quad (9)$$

显然,优化约束模型为关于分离矩阵参数  $\mathbf{k}$  和  $\mathbf{r}_i$  的非线性欠定方程,无法进行直接求解。在这种情况下,可以将分离矩阵参数的求解问题转换为多目标优化问题,以最小化约束模型为限定条件,利用寻优迭代获取参数最优解。

### 3.3 基于CS算法分离矩阵参数求解

布谷鸟搜索算法(cuckoo search, CS)是一种仿生类智能优化算法,具有对迭代初值不敏感、全局搜索能力强、收敛速度快、通用性好等优点。其主要思路基于以下

两点,自然界鸟类的巢卵寄生性与 Levy 飞行机制。CS 算法利用 Levy 飞行机制模仿鸟类随机游走行为,通过模拟布谷鸟的寄生性育雏行为解决最优化问题。Levy 飞行具有小步长度短距离游走和大步长的长距离游走相互交替特征,可有效避免迭代寻优过程中容易陷入局部最优的缺陷。

利用 Levy 飞行机制优化参数  $\mathbf{p}$  更新公式:

$$p_{i+1} = p_i + \alpha \oplus \text{levy}(\lambda), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$\alpha$  为更新步长,可以从 Levy 分布中获取:

$$\alpha = 0.01 \times (u/|v|)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

其中,  $\beta = 3/2$ 。

$u$  和  $v$  服从正态分布,即:

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (12)$$

$$\text{其中, } \sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{2^{\beta-1/2} \Gamma[(1+\beta)/2] \beta} \right\}^{\frac{1}{\beta}}, \sigma_v = 1.$$

基于 CS 算法求解分离矩阵参数具体步骤如下:

1) 设定初始参数,寻优解的数量  $n$ 、优化参数的初始迭代值  $\mathbf{p}_0 = [\mathbf{u}, \mathbf{r}_i]$ 、优化参数的维数  $l$ 、发现概率  $d$ 、迭代精度  $c$  以及最大迭代次数  $t$ ;

2) 将优化参数的迭代初值  $\mathbf{p}_0$  和观测信号  $\mathbf{x}$  代入优化约束模型中求解出迭代误差,记录该误差值;

3) 利用式(11)更新步长  $\alpha$ ;

4) 判断是否更新优化参数的迭代值,将随机数  $R \in (0, 1)$  与发现概率  $d$  进行比较,如果  $R > d$ , 则利用式(10)更新优化参数的迭代值;

5) 将更新的优化参数迭代值带入优化约束模型重新计算并记录迭代误差;

6) 对比当前迭代误差值与前一次迭代误差值,选取迭代精度更高的一组优化参数的迭代值作为当前最优解;

7) 若迭代次数大于  $t$  或迭代误差小于  $c$ , 则结束迭代,否则返回步骤 3)。

## 4 仿真实验

本文进行了超导电磁探测电磁噪声抑制仿真实验,以验证所提出的 CS-FastICA 方法的有效性。在仿真实验中,我们利用均匀大地中长接地导线源在全空间任意一点的磁场模型计算得到频率域磁场值,如式(13)所示。然后,通过频时变换得到时域磁场的衰减曲线,将其作为仿真实验理论信号。同时,利用高斯白噪声和尖峰脉冲噪声分别模拟环境电磁噪声的随机性和非随机性噪声成分,将其混合理论信号构成含噪信号,如图 5 所示。

$$B = \frac{I\mu_0}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{y}{R} \int_0^\infty (1 + r_{TE}) e^{u_0 r} \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda R) d\lambda dx' \quad (13)$$

式中:

$$R = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} \quad (14)$$

其中,  $\mu_0$  为磁导率;  $2L$  为长接地导线源的长度;  $x, y, z$  为接收点位置参数;  $r_{TE}$  为大地的反射系数。

基于获取的仿真实验数据, 本文开展超导电磁探测电磁噪声抑制实验。首先求解分离矩阵参数, 具体的寻优迭代实验参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

Table 1 Parameters setting

参数	符号	设定值
优化参数维度	$l$	6
寻优解的数量	$n$	12
发现概率	$d$	0.1
初始迭代参数	$[u, r_i]$	$\text{rand}(1, l)$
迭代精度	$c$	0.001
最大迭代次数	$t$	500

图 4 展示了 CS-FastICA 方法的分离矩阵参数寻优求解过程。从图中可以看到, 在随机生成优化参数迭代初始值的情况下, 分离矩阵的 6 个未知参数经过约 500 次迭代计算后收敛于最优值, 证明了本文所提方法具有良好的全局收敛性。

本文引入了主成分分析消噪法 (principal component analysis, PCA)、小波分析消噪法 (wavelet analysis, WA) 和独立成分分析消噪法 (independent component analysis, ICA) 作为对比方法, 以评估本文所提的 CS-FastICA 方法的性能。图 5 展示了上述方法的电磁噪声抑制结果。从图中可以看出, 上述方法均具有电磁噪声抑制能力。然而, PCA、WA 和 ICA 方法消噪后信号在晚期道均存在不同程度的幅值失真问题, 其中 ICA 方法的失真问题最为明显。相比之下, 本文方法消噪后的信号与理论信号的吻合度较高, 证明了该方法在抑制电磁噪声方面的有效性。

本文采用信噪比和均方误差作为噪声抑制效果的评价指标, 量化评估上述两种方法的噪声抑制效果, 如式 (15) 和 (16) 所示。

$$SNR = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^N \frac{t_s(i)^2}{|y(i) - t_s(i)|^2} \right) \quad (15)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N |y(i) - t_s(i)|^2}{N} \quad (16)$$

其中,  $y(i)$  为消噪后的信号,  $t_s(i)$  为理论信号。

表 2 为噪声抑制效果的评价指标, 消噪后信号的信噪比值越大、均方误差值越小, 说明噪声抑制效果越好。

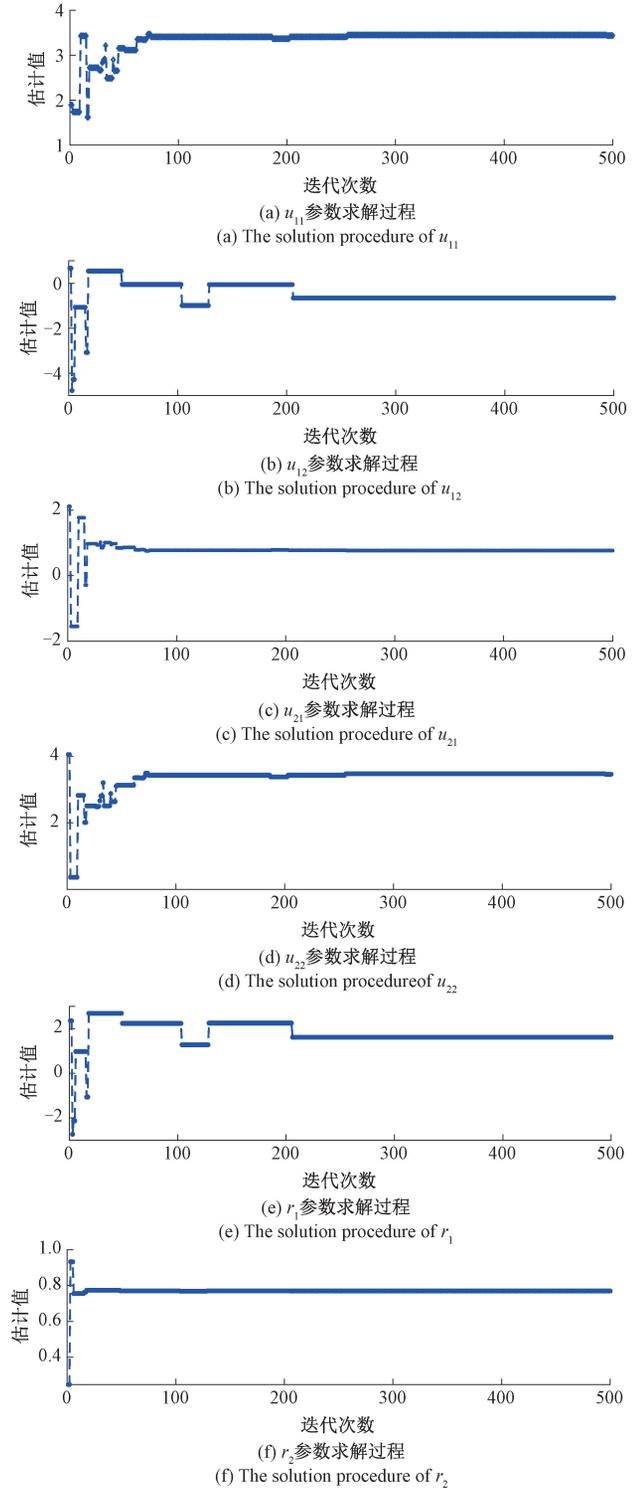


图 4 分离矩阵参数寻优求解过程

Fig. 4 Process diagram for optimizing the separation matrix parameters

从表 2 中的指标可以看到, 本文所提的方法在这两个指标上均优于其他 3 种方法, 消噪后信号的信噪比提高了 16.6 dB, 噪声抑制效果明显。

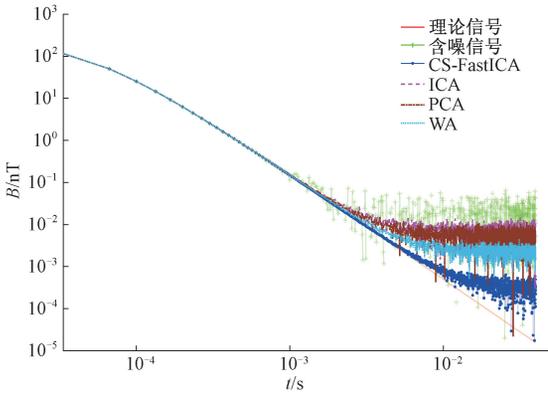


图5 不同方法电磁噪声抑制结果对比

Fig. 5 Comparison of electromagnetic noise suppression results of different methods

表2 不同方法的噪声抑制效果的评价指标

Table 2 Evaluation indicators for noise reduction effects of different methods

方法	信噪比	均方误差
含噪信号	45.379 1	$4.096\ 7 \times 10^{-4}$
ICA	53.928 4	$5.721\ 5 \times 10^{-5}$
PCA	56.513 9	$3.154\ 7 \times 10^{-5}$
WA	57.022 4	$2.806\ 1 \times 10^{-5}$
CS-FastICA	62.015 5	$8.888\ 0 \times 10^{-6}$

### 5 现场实验

为了进一步综合评估本文方法的性能,在黑龙江省铅锌多金属矿区开展了电性源超导电磁探测现场探测实验,如图6(a)所示。具体实验参数如下:发射电流为10 A,关断时间为200 μs,发射极距为800 m,收发距为300 m,测线长度405 m,测点间距45 m,接收机采样频率为30 kHz,采样窗口长度40 ms。

在野外实验环境下,观测信号通常受到工频噪声、天电噪声、人文噪声等复杂的环境电磁干扰。如图6(b)所示,实验中采用了铝箔纸包裹杜瓦形成电磁屏蔽层,并对观测信号进行多次叠加处理以抑制环境电磁噪声。然而,观测信号晚期道信号仍被噪声淹没,无法进行后续的数据解释处理。

利用本文方法对实测数据进行消噪处理,选取第1、5、10个测点,如图7所示。通过对比本文方法消噪前后信号衰减曲线,可以发现该方法能够有效地抑制观测信号中的尖峰噪声和低频噪声等环境电磁噪声,并且消噪后的信号衰减趋势没有明显的畸变。同时,消噪后的信

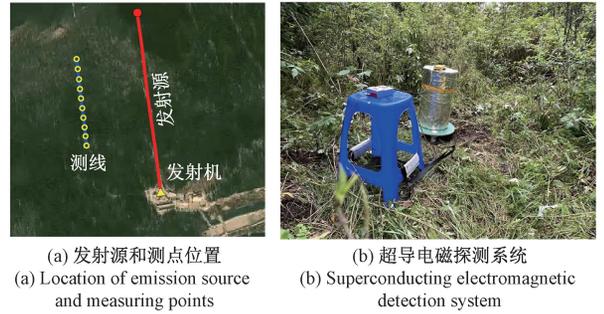
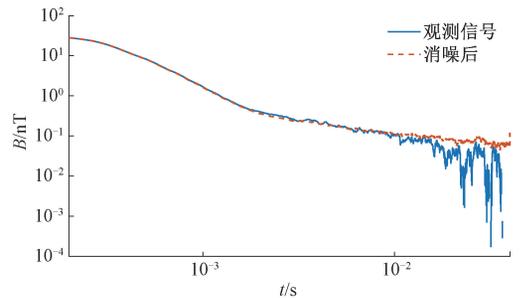
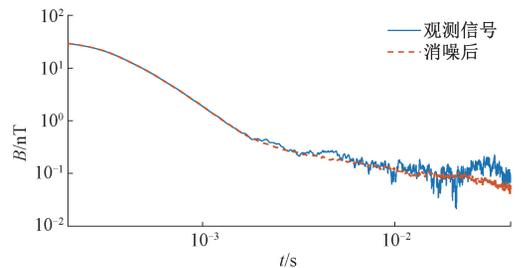


图6 实验设备

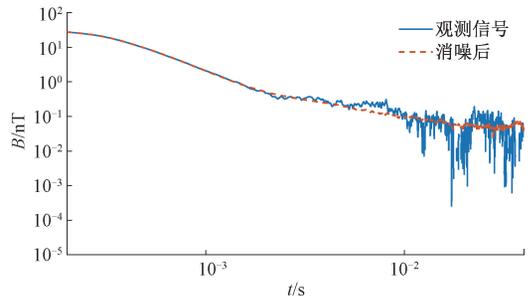
Fig. 6 Experimental equipment



(a) 测点1观测信号的消噪结果  
(a) The denoising results of the observation signal at measurement point 1



(b) 测点5观测信号的消噪结果  
(b) The denoising results of the observation signal at measurement point 5



(c) 测点10观测信号的消噪结果  
(c) The denoising results of the observation signal at measurement point 10

图7 现场实验电磁噪声抑制结果

Fig. 7 Electromagnetic noise suppression results of field experiment

号有效衰减时间接近 40 ms 采样窗口长度。与消噪前观测信号相比,有效时长提高了近 4 倍,有效提升了观测信号的解释深度。

视电阻率是地下电性不均匀体的一种综合反映,通过分析和解释视电阻率的变化规律,可以探查地下电性不均匀异常体,实现找矿和勘探工作。利用实测数据和消噪后的数据进行解释,得到了视电阻率图,如图 8 所示。从图 8(a)中可以看到,消噪前视电阻率图像难以有效识别异常体,而且存在很多假异常,导致无法提取有效的地质信息。图 8(b)展示了利用 CS-FastICA 方法处理后的视电阻率的剖面图,从图中可以看到,50~300 m 深度的多处假异常被有效抑制。同时,高阻异常区从 400 m 深度延伸至 1 000 m,消噪后可有效识别异常体,验证了本文所提方法的有效性。

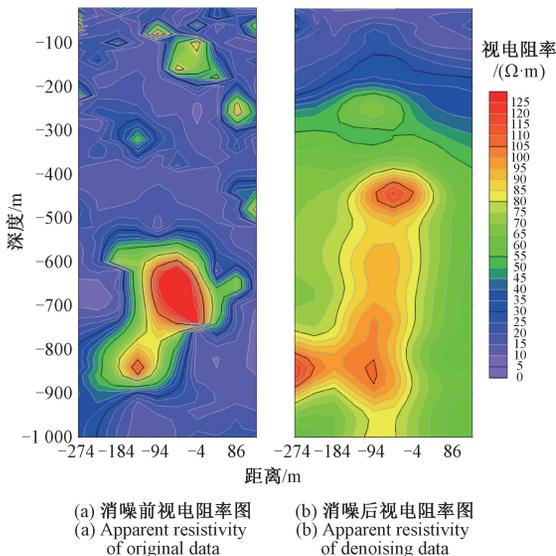


图 8 现场实验视电阻率图

Fig. 8 Inversion diagram of resistivity

## 6 结 论

超导电磁探测技术具有高灵敏度、宽频带等优点,在深地探测领域具有广阔的应用前景。然而,自然环境中电磁噪声种类复杂多样,严重降低了超导电磁探测技术的有效探测深度。本文综合分析了超导电磁探测噪声因素,基于信噪分离消噪原理提出了一种电磁噪声抑制方法。该方法充分利用 FastICA 算法的低频信号特征提取能力,从观测信号中有效分离涡流二次磁场信号。同时,基于最大化非高斯性和最小畸变准则构建分离矩阵的优化约束模型,利用 CS 算法强大的全局搜索寻优能力获取分离矩阵最优参数,从而有效校正了信号分离后的幅值

不确定性误差。仿真实验结果表明本文方法对不同种类环境电磁噪声均具有良好的抑制能力。野外现场实验结果显示,利用本文方法消噪后观测信号有效衰减时间提高了近 4 倍,晚期道信号质量改善效果显著,证明了本文方法的有效性。因此,将本文方法应用于超导电磁探测可有效改善观测信号晚期道信噪比,提高信号的解释深度和准确度,对于提升超导电磁探测技术深地探测能力具有重要作用。

## 参考文献

- [1] 王亮,戴云峰,刘冰,等. 基于等值反磁通瞬变电磁法快速探测海水入侵研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(3): 1397-1407.  
WANG L, DAI Y F, LIU B, et al. Research on rapid detection of seawater intrusion based on opposing-coil transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(3): 1397-1407.
- [2] XU Y, SUN Z, GU W, et al. Three-dimensional inversion analysis of transient electromagnetic response signals of water-bearing abnormal bodies in tunnels based on numerical characteristic parameters[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(1): 1106-1121.
- [3] NIKAM R, PAVAN K G, DURGA P A, et al. Delineation of paleochannel and groundwater resources in the Khari river basin, Kachchh using transient electromagnetics[J]. Journal of the Geological Society of India, 2023, 99(2): 239-246.
- [4] 戚志鹏,郭建磊,孙乃泉,等. 隧道瞬变电磁克希霍夫偏移成像与地质灾害探测[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 129-135.  
QI ZH P, GUO J L, SUN N Q, et al. Geological structure detection with tunnel transient electromagnetic Kirchhoff 2D migration imaging[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 129-135.
- [5] ARAI E. State-of-the-art geophysics for metal exploration[J]. Resource Geology, 2021, 71(4): 470-491.
- [6] 荣亮亮,蒋坤,裴易峰,等. 适用于瞬变电磁勘探的低温超导磁传感器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2671-2677.  
RONG L L, JIANG K, PEI Y F, et al. Low-Tc SQUID sensor for time domain electromagnetic prospecting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2671-2677.
- [7] 包苏新,董丙元,裴易峰,等. 低温超导瞬变电磁法在内蒙古四子王旗地质勘探中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1211-1218.  
BAO S X, DONG B Y, PEI Y F, et al. Application of

- low temperature TEM to geological exploration in siziwangqi, inner mongolia [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1211-1218.
- [8] 林君, 嵇艳鞠, 赵静, 等. 量子地球物理深部探测技术及装备发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 156-166.
- LIN J, JI Y J, ZHAO J, et al. Development strategy of quantum-based deep geophysical exploration technology and equipment [J]. Chinese Academy of Engineering, 2022, 24(4): 156-166.
- [9] 刘卫强, 陈儒军, 向毕文. 稳健 M 估计用于瞬变电磁数据抽道叠加与噪声压制[J]. 物探与化探, 2015, 39(6): 1238-1244.
- LIU W Q, CHEN R J, XIANG B W. Robust M estimates for transient electromagnetic samples stacking and denosing in time window [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1238-1244.
- [10] 嵇艳鞠, 林君, 程德福, 等. 瞬变电磁法中数据取样处理方法的研 究[J]. 物探与化探, 2003(2): 142-145.
- JI Y J, LIN J, CHENG D F, et al. Sampling and processing techniques of digitized signals in transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003(2): 142-145.
- [11] 武欣, 薛国强, 肖攀, 等. 瞬变电磁采样函数优化法降噪技术 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3677-3684.
- WU X, XUE G Q, XIAO P, et al. Noise reduction technology of TEM using optimization of instrument sampling function [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(9): 3677-3684.
- [12] 于生宝, 苏发, 郑建波, 等. 基于 LabVIEW 的瞬变电磁接收系统设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1725-1731.
- YU SH B, SU F, ZHENG J B, et al. Design of transient electromagnetic receiving system based on LabVIEW [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1725-1731.
- [13] 张向阳, 曹平, 刘文连, 等. 基于移动窗口均值滤波算法处理地空瞬变电磁基线漂移[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 849-852.
- ZHANG X Y, CAO P, LIU W L, et al. Moving window mean filter algorithm for semi-airborne transient electromagnetic baseline drift [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 849-852.
- [14] 范涛, 刘磊, 王秀臣, 等. 卡尔曼滤波压制瞬变电磁干扰技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 76-78, 82.
- FAN T, LIU L, WANG X CH, et al. Technology of suppressing TEM interference by Kalman filtering and its application in detection of goaf in coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 76-78, 82.
- [15] 王路, 李强, 吕扬, 等. 瞬变电磁法双参数优化小波降噪效果研究[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(1): 122-131.
- WANG L, LI Q, LYU Y, et al. Research on effect of two-parameter optimization wavelet noise reduction by transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2023, 20(1): 122-131.
- [16] 李肃义, 赵彦超, 孙卫斌, 等. 海洋可控源电磁数据的新 型小波基消噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 67-74.
- LI S Y, ZHAO Y CH, SUN W B, et al. New wavelet-based denoising method for marine controlled source electromagnetic data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 67-74.
- [17] 毛鑫鑫, 毛立峰, 杨聪, 等. 半航空瞬变电磁数据小波降噪方法研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1287-1296.
- MAO X X, MAO L F, YANG C, et al. Research on wavelet denoising method for semi-airborne transient electromagnetic data [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1287-1296.
- [18] 古瑶, 解海军, 李璐, 等. 基于小波包-神经网络混合算法的瞬变电磁信号降噪研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 147-152.
- GU Y, JIE H J, LI L, et al. Research on denoising of transient electromagnetic data based on wavelet packet-neural network algorithm [J]. Coal Engineering, 2023, 55(5): 147-152.
- [19] 戚庭野, 卫会汝, 冯国瑞, 等. 基于 WOA-VMD 的瞬变电磁探测信号降噪方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 3885-3898.
- QI T Y, WEI H R, FENG G R, et al. Denoising method of transient electromagnetic detection signal based on WOA-VMD algorithm [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 3885-3898.
- [20] 朱凯光, 李玥, 孟洋, 等. 最小噪声分离在航空电磁数据噪声压制中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 876-883.
- ZHU K G, LI Y, MENG Y, et al. Application of minimum noise fraction on noise removal for airborne electromagnetic data [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(3): 876-883.
- [21] 朱凯光, 王凌群, 谢宾, 等. 基于主成分分析的航空

电磁数据噪声去除方法[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2430-2435.

ZHU K G, WANG L Q, XIE B, et al. Noise removal for airborne electromagnetic data based on principal component analysis [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2430-2435.

- [22] 刘帅, 曾庆宁, 郑展恒. 最小均方误差算法在瞬变电磁信号降噪中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1826-1831.

LIU SH, ZENG Q N, ZHENG ZH H. Application of minimum mean square error algorithm in transient electromagnetic signal denoising [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 1826-1831.

- [23] 王兴春, 邓晓红, 陈晓东, 等. 基于高温超导的瞬变电磁法在青城子矿集区的应用[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1871-1880.

WANG X CH, DENG X H, CHEN X D, et al. Application effect of TEM based on high temperature superconducting sensor in Qingchengzi ore-concentrated area[J]. Earth Science, 2021, 46(5): 1871-1880.

- [24] ZHAO J, ZHANG Y, LEE Y H, et al. Investigation and optimization of low-frequency noise performance in readout electronics of dc superconducting quantum interference device[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5): 054707.

- [25] 韩亮, 蔡文涛, 蒲秀娟, 等. 结合 FastICA 与 EKF 的腹部源胎儿心电信号提取[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 116-125.

HAN L, CAI W T, PU X J, et al. Abdominal electrode-sourced FECG extraction utilizing EKF combined with FastICA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 116-125.

- [26] 朱江艳, 马军, 杨创艳, 等. 基于 FastICA-BAS-MCKD 的滚动轴承复合故障特征提取方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 107-117.

ZHU J Y, MA J, YANG CH Y, et al. Compound fault

feature extraction method of rolling bearing based on FastICA-BAS-MCKD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 107-117.

## 作者简介



**高全明**, 2014 年于聊城大学获得学士学位, 2017 年于长春理工大学获得硕士学位, 2020 年于吉林大学获得博士学位, 现为吉林大学仪器科学与电气工程学院博士后, 同时也是中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室客座人员, 主要研究方向为超导电磁探测技术。

E-mail: gaoqm@jlu.edu.cn

**Gao Quanming** received his B. Sc. degree from Liaocheng University in 2014, received his M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2017, and received his Ph. D. degree from Jilin University in 2020. He is currently a postdoctoral fellow in the College of Instrumentation and Electrical Engineering at Jilin University. His main research interests include superconducting electromagnetic detection technology.



**嵇艳鞠**(通信作者), 1994 年于吉林大学获得学士学位, 1997 年于吉林大学获得硕士学位, 2004 年于吉林大学获得博士学位, 现为吉林大学仪器科学与电气工程学院教授, 主要研究方向为计算电磁学、时域电磁多物理场探测技术、超导量子传感测量技术。

E-mail: jiyj@jlu.edu.cn

**Ji Yanju** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Jilin University in 1994, received her M. Sc. degree from Jilin University in 1997, and received her Ph. D. degree from Jilin University in 2004. She is currently a professor in the College of Instrumentation and Electrical Engineering at Jilin University. Her main research interests include computational electromagnetics, time domain electromagnetic multi-physical field detection technology and superconducting quantum sensing measurement technology.