

文章编号: 1001-1749(2023)01-0093-07

应用样条拟合与插值法抑制航空电磁运动噪声

余洋^{1,2,3}, 吴珊^{1,2,3}, 肖都^{1,2,3}, 李飞^{1,2,3},
杜炳锐^{1,2,3}, 曹展宏^{1,2,3}

1. 自然资源部 地球物理电磁法探测技术重点实验室, 廊坊 065000;
2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000;
3. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 廊坊 065000)

摘要: 呈现低频特性的运动感应噪声源于电磁感应接收线圈在地磁场中的运动变化, 在固定翼时间域航空电磁测量数据中, 其幅值往往达到有用信号的成百上千倍, 原始数据中运动噪声的精确估计是目前时间域航空电磁法数据去噪技术的重点研究方向。针对电磁感应接收信号的特点, 首先应用三次样条拟合法在截取的半周期晚期信号中压制高频干扰, 提取低频运动噪声信息, 然后用一维样条插值法估计连续的全周期运动噪声, 最后从观测信号中减去估计信号, 从而实现对运动噪声的抑制。对模拟数据和实测数据的应用研究结果表明, 样条拟合与插值法对低于发射基频运动噪声的抑制效果显著, 选用较小的均衡参数可以提高噪声压制能力, 选用较大的延迟取样点, 可以减轻对晚期有用信号的损伤, 提高深部探测能力。

关键词: 固定翼时间域航空电磁法; 数据预处理; 运动噪声抑制; 三次样条拟合

中图分类号: P 631.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.12

0 引言

时间域航空电磁法通过分析地质体感生电磁场的强度和随时间的衰减特性, 确定地下地质体的空间分布和电性。笔者着眼于固定翼时间域航空电磁法, 基于该方法国外上世纪末至本世纪初发展了 SPECTREM、GEOTEM 和 MAGTEM 等系统, 我国十二五启动研发有 IFTEM 系统, 这类系统以大收发距偶极收发装置为特征, 具有绿色、高效和大深度探测能力, 可用于金属矿产和水资源快速普查^[3,6,8-11]。

固定翼时间域航空电磁法的探测深度和精度依

赖测量数据的高信噪比, 然而实际工作中, 由于接收传感器的宽带特性, 除了大地响应信号, 采集到的原始数据中还伴有多种类的强干扰噪声(如系统噪声、天电噪声、工频噪声、低频运动噪声等), 其中运动噪声是对数据影响最大的一种噪声, 因此有必要对运动噪声的抑制方法进行研究^[2,5,7]。

Mette 阐述了运动噪声是运动的电磁感应接收线圈因切割地磁场, 或者地磁场矢量发生变化导致接收线圈内磁通量改变而形成的一种噪声^[7]。Lane^[2]通过对实测数据分析指出, 对于固定翼时间域航空电磁系统, 其运动噪声要比大地电磁响应幅值高几个数量级, 低空作业时的运动噪声要比高空平稳飞行时的运动噪声大一个数量级。

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0601900); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190030); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(AS2019P01); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(JYYWF20180103)

第一作者: 余洋(1985—), 男, 工程师, 主要从事航空物探仪器研发及应用技术研究, E-mail: cgsyyang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 吴珊(1985—), 女, 工程师, 主要从事航空物探仪器研发及应用技术研究, E-mail: wshan@mail.cgs.gov.cn。

运动噪声的抑制或消除技术主要包括两个方向:①采用硬件方法减缓接收线圈的运动幅值和频率(如 Macnae 等^[5]采用减振技术将接收线圈的振动频率控制在工作基频以下的方法压制运动噪声,Fugro 公司通过增强线圈悬挂稳定性来压制运动噪声),但硬件方法不能从根本上消除运动噪声;②采用数据预处理技术来压制运动噪声,是笔者研究的主要内容。

在数据预处理中压制运动噪声的技术主要包括三类:①滤波技术(如 Beselli^[1]采用的高通滤波方法来抑制低频运动噪声,Macnae^[5]应用叠加滤波技术去除运动噪声);②Munkholm^[6]提出的根据主场方向上三分量磁场之和的投影与运动噪声间耦合最小的原理来压制运动噪声的校正技术;③运动噪声拟合技术(Lemire^[4]利用多项式拟合法和 B 样条插值法对运动噪声进行了压制,孟洋^[13]采用超晚期插值方法和最小噪声分离变换法分别对航空电磁原始数据和剖面数据的运动噪声进行压制,尹大伟等^[12]基于 Lemire 提出的多项式拟合法对运动噪声进行去除,黄威^[11]利用正交多项式拟合半周期全波形数据的运动噪声情况,得到的拟合系数对整个半周期数据进行拟合,达到去除运动噪声的目的)。

综上,笔者基于 Lemire^[4]等提出运动噪声拟合去噪思路,提出利用三次样条拟合结合一维样条插值方法去除运动噪声。首先截取每个半周期二次场响应的晚期信号,使得该信号片段含有的大地响应信息最小化,同时含有的低频运动信息最大化。然后利用三次样条函数的均衡特性压制高频干扰,将低频运动噪声信息分离并拟合出来,再将拟合的所有片段组成输入数据,用一维样条插值函数来估计连续的运动噪声。最后从观测信号中减去该估计信号,从而实现运动噪声的抑制。笔者基于 Labview 软件环境编程实现了该算法,通过仿真试验,讨论了均衡参数和延迟取样点对运动噪声抑制效果的影响,实测数据的处理结果验证了三次样条拟合可以有效地去除实测数据中的运动噪声。

1 接收信号与运动噪声模拟

为了便于开展算法研究和仿真分析,在分析实测数据的前提下,首先模拟了航空电磁接收信号和运动噪声。航空电磁测量系统接收信号 $y(t)$ 可用式(1)表示。

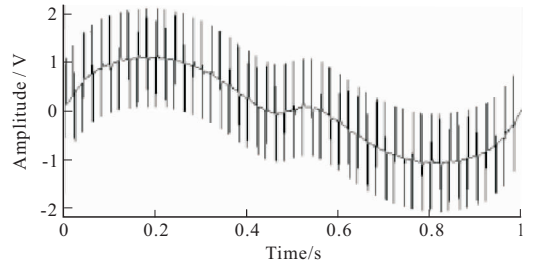


图 1 运动噪声干扰的接收信号波形

Fig. 1 The received signal waveform interfered by motion induced noise

$$y(t) = G(t) * H(t) + M(t) + W(t) \quad (1)$$

其中: $G(t)$ 为大地电磁响应; $H(t)$ 为系统响应; $M(t)$ 为运动噪声; $W(t)$ 为系统噪声、天电干扰、工频干扰等各类噪声。

在脉冲发射期间(on_Time),感应接收线圈传感器的信号主要来自于发射线圈产生的电磁场,此时归一化的 $G(t) * H(t)$ 可用式(2)来近似,在脉冲关断期间(off_Time), $G(t) * H(t)$ 是一条衰减常数变化的指数衰减曲线,可简化为一条固定衰减常数的指数曲线。运动噪声 $M(t)$ 由多个不同幅值、相位的正弦波组成,用式(3)来表示。噪声 $W(t)$ 使用均匀白噪声来表征。

$$G(t) * H(t) \begin{cases} \approx S \frac{dB}{dt} \approx \cos(\omega t) & \text{供电} \\ \approx A e^{\sigma t + \varphi} & \text{断电} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为接收线圈等效物理面积; dB/dt 为接收线圈处发射线圈产生的电磁场的变化率; ω 为发射基频的角频率; A 为幅值; σ 为衰减常数; φ 为延迟常数。

$$M(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (3)$$

式中: A_i 、 ω_i 、 φ_i 分别为单频噪声的幅值、角频率和相位。

笔者根据 IFTEM 系统的参数^[10]采用基频为 25 Hz 的半正弦作为发射波形,供电脉宽为 4 ms,采样率为 100 kHz。利用上述公式来模拟航空电磁接收信号,对运动噪声去除效果进行验证。图 1 示意了在双极性半正弦波电磁脉冲激发下受到运动噪声干扰的接收信号。

除了根据曲线和频谱图来观察运动噪声去除效果外,这里借鉴了黄威^[12]提出的通过均方根误差 RMS(Root mean square error)和信噪比 SNR(Signal to noise ratio)来评价噪声去除效果的方法。不同之处在于,除了对全部数据进行总体评价外,笔者

提出对晚期道信号的去噪效果进行独立评价是必要的,并对应地将均方根误差和信噪比的计算公式调整如下:

RMS =

$$\sqrt{\left(\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=q}^{m-1} [y_1(i,j) - y_2(i,j)]^2\right) / n \times (m-q)} \quad (4)$$

$$\text{SNR} = 10 \lg P_{\text{signal}} / P_{\text{noise}} \quad (5)$$

$$P_{\text{signal}} = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=q}^{m-1} y_1^2(i,j)\right) / (n \times (m-q)) \quad (6)$$

$$P_{\text{noise}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=q}^{m-1} [y_1(i,j) - y_2(i,j)]^2}{n \times (m-q)} \quad (7)$$

式中: $y_1(i,j)$ 为无噪声数据; $y_2(i,j)$ 为含噪数据; n 为半周期个数; m 为半周期数据点数; q 对应半周期信号中的晚期道起始点。

2 运动噪声拟合算法

2.1 去噪算法思路

参考 Lemire^[4]提出的运动噪声拟合思路,提出了如图2所示的拟合方案。发射波形采用脉冲波形,供电时间 on-Time 为 4 ms,因此 25 Hz 的发射基频每个半周期采样点总数为 $m=2\,000$ (点均为采样点而非物理点),发射电流关闭后断电时间 off-Time 为 16 ms。二次场响应观测值 Y_i 随时间序列 X_i 衰减,当二次场响应衰减为零或可以忽略的值时,设置此时的采样点序号 i 设为信号的湮没点 k ,即认为该点之后有用的二磁场响应可以忽略,仅含有包括运动噪声在内的各种噪声成分,称之为拟合区段。首先通过三次样条拟合算法对拟合区段数据进行拟合,提取低频运动噪声。然后将所有拟合区段的拟合噪声数据作为已知数据,用一维样条拟合方法估计插值区段的运动噪声。最后将原始数据减去拟合得到的运动噪声,即为去除运动噪声后的电磁数据。图2中 Y_{sig} 为全周期电磁接收信号, Y_{mov} 为拟合得到的运动噪声。

2.2 三次样条函数及一维插值

三次样条函数的定义为样条曲线 $f(x)$ 是一个分段定义的公式。给定 $n+1$ 个数据点,共有 n 个区间,三次样条方程满足以下条件:①在每个分段区间 $[x_i, x_{i+1}]$, $f(x) = f_i(x)$ 都是一个三次多项式;②满足 $f(x_i) = y_i, i=1, 2, \dots, n$;③样条曲线的一阶和二阶倒数在 $[a, b]$ 区间都是连续的,即曲线是光滑的。所以 n 个三次样条多项式分段可以用式(8)表示。

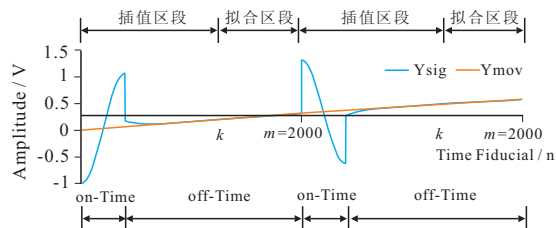


图2 运动噪声拟合与插值思路示意图

Fig. 2 Motion noise fitting and interpolation idea diagram

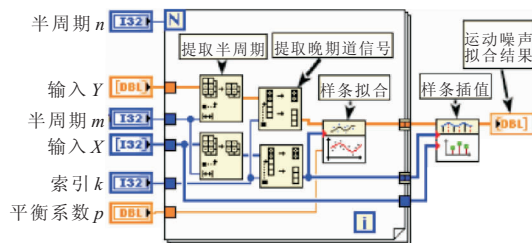


图3 运动噪声拟合程序结构框图

Fig. 3 The block diagram of the motion noise fitting program

$$f_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$$

$$i = 0, 1, \dots, n \quad (8)$$

其中: a_i, b_i, c_i, d_i 为 $4n$ 个未知系数。

三次样条函数一维插值:如 x_i 在 X 中两个点 (x_j, x_{j+1}) 之间,使用两点间的三次样条多项式(8)插值得到对 y_i 。多项式满足下列条件:在 x_j 点的一阶和二阶导数连续;多项式满足所有数据点;起始点和末尾点的二阶导数为“0”。

2.3 运动噪声拟合

笔者应用如下函数对测量数据进行三次样条拟合:

$$p \sum_{i=0}^{N-1} w_i (y_i - f(x_i))^2 + (1-p) \int_{x_0}^{x_{n-1}} \lambda(x) (f''(x))^2 dx \quad (9)$$

$$\lambda(x) = \lambda_i, x_i \leq x \leq x_{i+1}$$

$$i = 0, 1, \dots, n-2 \quad (10)$$

式中: p 为平衡参数; w_i 为权重数组的第 i 个元素; x_i 为 X 的第 i 个元素; $f''(x)$ 为三次样条函数 $f(x)$ 的二阶导数; $\lambda(x)$ 为分段常量函数; λ_i 是平滑数组的第 i 个元素。由于仅需拟合晚期道信号的低频分量,不考虑权重和平滑参数,故此设 $w_i = 1, \lambda_i = 1$ 。

2.4 算法实现

图3展示了本文设计的基于Labview的运动噪

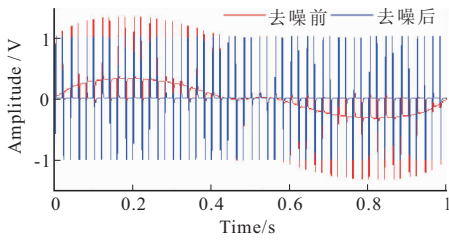


图4 仿真数据运动噪声压制前后效果对比
Fig. 4 Comparison of the effect before and after the motion noise suppression of simulation data

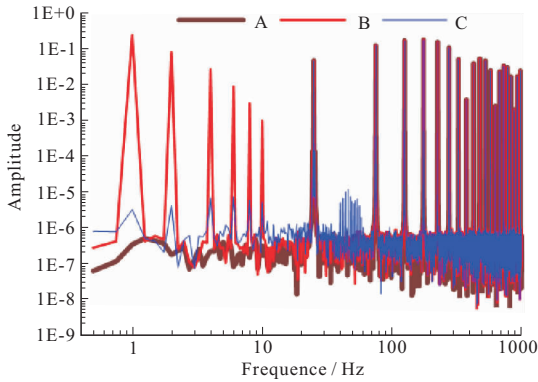


图5 仿真数据噪声压制前后的幅频特性分析
Fig. 5 Analysis of amplitude-frequency characteristics before and after noise suppression in simulation data

声拟合程序结构。输入数据为航空电磁测量获得的数据集 $[X, Y]$, 包含 n 个半周期, 每个半周期采样点数为 m , 拟合区间起始点, 即湮没点为 k , 三次样条插值平衡系数为 p 。

3 仿真分析

3.1 模拟数据示例

通过对模拟仿真数据验证三次样条拟合算法对运动噪声的去除效果。对大地响应模拟数据加入随机噪声的同时加入 1 Hz、2 Hz、4 Hz、6 Hz、8 Hz 和 10 Hz 的运动噪声, 对比加入运动噪声前后数据的曲线、频谱曲线、均方根、信噪比、峰值衰减比来分析去噪效果。

从图 4 中可以看出, 运动噪声去除前后曲线变化明显, 直观上低频干扰获得了有效抑制。图 5 的曲线 A 是大地电磁响应加随机噪声信号的频谱, 曲线 B 在 A 的基础上增加 6 个单频点低频运动干扰信号后的频谱, 曲线 C 是应用样条拟合方法去除运

表 1 仿真数据的均方根误差和信噪比

Tab. 1 Root mean square error and signal-to-noise ratio of simulated data

	RMS/mV	SNR/dB
白噪声	0.54	55.2
白噪声及运动噪声	213.45	5.1
去除运动噪声	0.82	54.8

表 2 仿真数据的运动噪声峰值衰减比

Tab. 2 Motion noise peak attenuation ratio of simulation data

噪声频点/Hz	1	2	4	6	8	10
峰值衰减比	48	42	35	30	26	22

动噪声后的信号的频谱。可以看出, 去噪后六个频点的运动噪声显著衰减, 而基频和谐波幅值没有变化, 达到了抑制低频运动噪声目的。

表 1 给出了加随机白噪声电磁响应数据的均方根误差和信噪比, 是运动噪声抑制需要极力逼近的参数。加入运动噪声后, 均方根误差增加显著, 而信噪比下降明显。应用三尺样条拟合法去除运动噪声后, 均方根误差和信噪比已逼近了白噪声信号的数值。由表 1 可以看出, 本文提出的方法对去除运动噪声有较好的效果。

表 2 统计了六个干扰频点运动噪声的峰值衰减比。从表 2 可知, 1 Hz 时衰减可达 48 dB, 而 10 Hz 时衰减只有 22 dB, 说明干扰抑制效果和运动噪声的频率相关, 在硬件上改进接收线圈传感器的振动特性, 对抑制运动噪声干扰程度是有益的。

3.2 均衡参数的影响

应用的三次样条拟合方法使用均衡参数 p 来控制拟合区段低频运动噪声的提取效果, p 越接近 1, 拟合曲线和输入数据越接近, p 值越靠近零, 对高频噪声的抑制能力越强。图 6 展示了使用三个不同 p 值进行运动拟合去噪后的信号频谱, 可见 p 值越小, 对低频段运动噪声的压制能力越强。

3.3 湮没点的影响

在进行拟合去噪之前, 应先确定湮没点 k , 以选择拟合区段。 k 越小, 提供的低频运动噪声信息越丰富, 但包含的地质体低频响应信息也越多, 反之亦

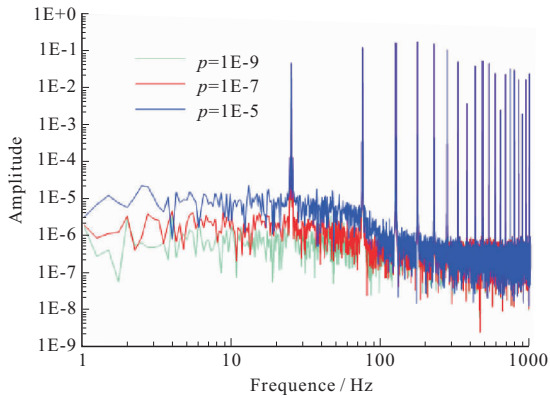


图 6 不同平衡参数拟合的仿真数据频谱曲线
Fig. 6 Simulation data spectrum curve fitted by different balance parameters

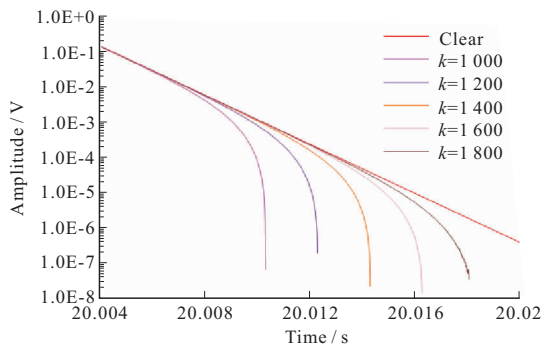


图 7 不同湮没点参数拟合的仿真数据衰减曲线
Fig. 7 Simulation data attenuation curve fitted by different annihilation points parameters

然。所以 k 的选择非常关键,否则去噪后的数据会丢失深部地质信息。如果探测目标是浅层,则 k 可以选择的小一些,但如果目标是深部探测,则 k 要大一些。图 7 展示了不同 k 值拟合去噪后的二磁场衰减曲线, Clear 代表无噪的大地响应,当 $k=1\ 000$ 时,去噪信号较早拐头向下,造成晚期信号失真。 k 越大,大地响应衰减曲线的晚期信号失真度越小。

表 3 给出了湮没点选择的评价依据。采用不同湮没点拟合去噪后的晚期信号信噪比来优选 k 值。选择 $\mathbf{X}\{1000,2000\}$ 对应的晚期信号根据式(5)来计算信噪比,分别计算早期道区间($q=410$)和晚期道响应($q=1\ 000$)的信噪比。当 $k=1\ 000$ 时,早期道和晚期道信噪比都为最小,这是由于 k 过小,将有用信号当成噪声进行了拟合;当 $k=1\ 400$ 时,早期道获得最大信噪比;当 $k=1\ 600$ 时,晚期道获得最大的信噪比,当 k 继续增大,则拟合区段数据量过少,导致信噪比下降。所以可以根据晚期道的信噪比来优选 k 值。

表 3 不同湮没点拟合去噪仿真数据的信噪比

Tab. 3 The signal-to-noise ratio of different annihilation points fitting denoising simulation data

湮没点 k	1000	1200	1400	1600	1800
SNR($q=410$)	-4.5	3.22	4.80	4.82	4.71
SNR($q=1000$)	30.9	41.1	41.5	41.3	41.2

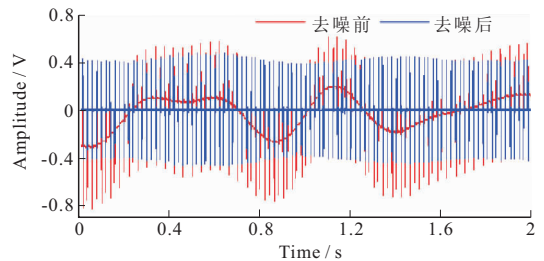


图 8 实测数据运动噪声拟合去噪前后效果对比
Fig. 8 Comparison of the effect before and after the denoising of the motion noise of the measured data

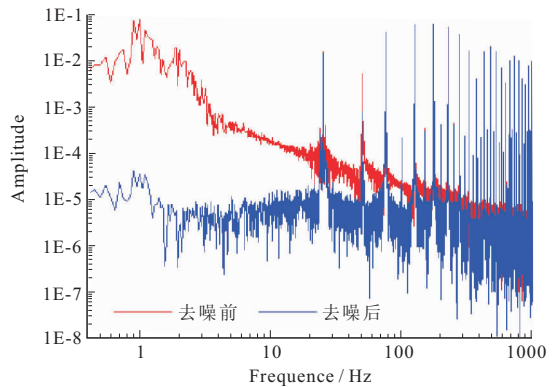


图 9 实测数据运动噪声去除前后的频谱对比
Fig. 9 Spectrum comparison of measured data before and after motion noise removal

4 实测数据应用

为了进一步检验方法的有效性,对 iFTEM 系统在哈尔滨某区域的实测数据进行了运动噪声去除数据预处理。IFTEM 测量参数包括:发射基频为 25 Hz,发射磁矩为 50 万 Am^2 ,采样率为 100 KHz,半周期数据为 2 000 个,on-time 为 4.3 ms,收发距为 120 m,飞行高度为 200 m,吊舱离地高度为 150 m。三次样条拟合采用的参数是:平衡系数 $p=$

1~8, 湮没点 $k=1\ 200$ 。

图 8 给出了实测数据带有运动噪声和去除运动噪声后 2 s 的时间序列, 图 9 对比了二者的幅频特性。从图 8、图 9 可以看出, 影响信号的运动噪声不是单个频率, 而是很多个频率的累加。通过三次样条拟合方法对运动噪声进行去除, 可以得到很好压制低频噪声的同时保持了原始数据信号的响应特征, 噪声压制能力随噪声频率增加而减弱, 5 Hz 以下的低频段压制能力可达约 5 千倍。

5 结论

笔者利用三次样条拟合方法对时间域航空电磁数据中的运动噪声进行抑制, 通过对模拟和实测数据的仿真分析, 得到如下结论: ①这里选用的三次样条拟合去噪方法可以有效抑制低频运动噪声; ②该拟合去噪方法的抑制能力和噪声频率成反比, 因此从硬件上着手降低接收探头振动频率对提高数据信噪比是有益的; ③选用较小的均衡参数可以获得更好的抑制效果; ④因为时间域电磁法主要关心 off-time 数据质量, 因此使用信噪比分段评价方法是有必要的; ⑤湮没点参数的选择对运动噪声是否正确去除尤为重要, 否则容易损伤有用信号。

参考文献:

- [1] BUSELLI G, PIK J, HWANG H. AEM noise reduction with remote referencing [J]. *Exploration Geophysics*, 1998(29):71-76.
- [2] LANE R, PLUNKETT C, PRICE A, et al. Streamed data— a source of insight and improvement for time domain airborne EM [J]. *Exploration Geophysics*, 1998(29):16-23.
- [3] LEGGATT P B, KLINKERT P S, HAGE T B. The Spectrem airborne electromagnetic system— Further developments [J]. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1976-1982.
- [4] LEMIRE D. Baseline asymmetry, Tau projection, B-field estimation and automatic half-cycle rejections [R]. Montreal: THEM Geophysics Inc, 2001.
- [5] MACNAE J C, LAMONTAGNET Y, WEST G F. Noise processing techniques for time-domain EM systems [J]. *Geophysics*, 1984(49):934-948.
- [6] MULLEN L C. Three-dimensional mapping of salt stores in the murray-darling basing, Australia [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 103-115.
- [7] MUNKHOLM M S. Motion-induced noise from Vibration of a moving TEM detector coil; characterization and suppression [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1997(37):21-29.
- [8] SHEARD S N, RITCHIE T J, CHRISTOPHERSON K R. Mining, environmental, petroleum, and engineering industry applications of electromagnetic techniques in geophysics [J]. *Surveys in Geophysics*, 2005(26): 653-669.
- [9] SMITH R S. The MEGATEM fixed-wing transient EM system: Development, applications, success [C]. 7th SAGA meeting, 2001:143-150.
- [10] 胡平, 李文杰, 李军峰, 等. 固定翼时间域航空电磁勘查系统研发进展 [J]. *地球学报*, 2012, 33(1):7-12.
HU P, LI W J, LI J F, et al. The advances in the development of fixed-wing airborne time-domain electromagnetic system [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(1):7-12. (In Chinese)
- [11] 黄威, 贲放, 吴珊, 等. 正交多项式法在航空电磁运动噪声去除中的应用 [J]. *物探与化探*, 2019, 43(4):892-898.
HUANG W, BEN F, WU S, et al. The application of orthogonal polynomial fitting method to airborne electromagnetic motion noise removal [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(4):892-898. (In Chinese)
- [12] 尹大伟, 林君, 朱凯光, 等. 时间域航空电磁数据线圈运动噪声去除方法仿真研究 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(5):1639-1645.
YIN D W, LIN J, ZHU K G, et al. Simulation research on coil motion noise removal for time domain airborne electromagnetic data [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43:1639-1645. (In Chinese)

- [13] 孟洋. 航空电磁探测线圈运动噪声特性分析与压制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
MENG Y. Study on characteristics analysis and sup-

pression technology of coil motion noise for airborne electromagnetic exploration[D]. Changchun:Jilin University,2017. (In Chinese)

Application of spline fitting and interpolation method to suppress airborne electromagnetic motion noise

YU Yang^{1,2,3}, WU Shan^{1,2,3}, XIAO Du^{1,2,3}, LI Fei^{1,2,3}, DU Bingrun^{1,2,3}, CAO Zhanhong^{1,2,3}

(1. Laboratory of geophysical Electromagnetic Probing Technologies,
Ministry of land and Resources, Langfang 065000, China;

2. Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration,
Chinese Academy of Geological Science, Langfang 065000, China;

3. National Research Centre of Geoexploration Technology, Langfang 065000, China)

Abstract: The motion-induced noise with low-frequency characteristics is due to the variation of the motion of the electromagnetic receiving coil in the geomagnetic field. In the fixed-wing time-domain aeromagnetic measurement data, the noise amplitude often reaches hundreds or thousands of times the valid signal, the accurate estimation of motion noise in raw data is the critical research direction of time-domain airborne electromagnetic data denoising technology. According to the characteristics of electromagnetic induction receiving the signal, this paper firstly applies the cubic spline fitting method to suppress the high-frequency interference and extract the low-frequency moving noise information in the intercepted semi-periodic late signal, then, the continuous full-period motion noise is estimated by one-dimensional spline interpolation, and the estimated signal is subtracted from the observed signal to suppress the motion noise. The results of the application of the simulated data and the measured data show that the spline fitting and interpolation method is effective in suppressing the motion noise below the transmitting fundamental frequency. The noise suppression ability can be improved by selecting smaller equalization parameters, choosing a large delay sampling point can reduce the damage to the late useful signal and improve the ability of deep detection.

Keywords: fixed-wing time-domain AEM method; data pre-processing; motion noise suppression; cubic spline fitting