

doi: 10.11720/wtyht.2024.1544

王志宏,张诺亚,胡杉杉,等.无人机噪声对半航空瞬变电磁数据的影响分析[J].物探与化探,2024,48(6):1633-1642.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1544

Wang Z H, Zhang N Y, Hu S S, et al. Impacts of drone noise on semi-airborne transient electromagnetic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1633-1642. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1544

无人机噪声对半航空瞬变电磁数据的影响分析

王志宏¹, 张诺亚^{2,3}, 胡杉杉^{2,3}, 郑梓强^{2,3}, 刘玉超^{2,3}, 周正^{2,3}, 孙怀凤^{2,3}

(1. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 2. 山东大学 岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 3. 山东大学 地球电磁探测研究所, 山东 济南 250061)

摘要: 无人机作为半航空瞬变电磁的飞行平台,其本身会产生电磁信号,对采集的瞬变电磁信号产生影响。本文研究了半航空瞬变电磁数据采集过程中无人机产生的噪声对采集数据的影响,通过开展野外试验、系统性能测试等,分析了不同转速、不同吊挂长度、不同飞行高度、不同飞行速度对无人机噪声的影响,提出了通过确定最优吊挂长度、加入屏蔽层等措施进行无人机噪声的压制方法。本文研究基于 KWT-X8L-25 八旋翼无人机开展,其研究过程与研究思路同样适用于其他型号的无人机,可以为半航空瞬变电磁飞行平台的遴选提供借鉴。

关键词: 半航空瞬变电磁; 无人机噪声; 飞行高度

中图分类号: P631.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)06-1633-10

0 引言

近年来,我国地质找矿虽取得一系列重大成果,但未来 5~15 年,对国外依存度仍会在较长时期内维持在较高水平,特别是重要矿产。国内尚未开发的矿产资源多集中于地形条件复杂的高海拔山区、人迹罕至的无人区等^[1],因此亟须开展适用于复杂地形的探测方法与装备研究。瞬变电磁法作为矿产勘查的常用方法,现已发展了地面、航空、半航空等多种装置形式。随着无人机技术的不断成熟,基于无人机机载平台的半航空瞬变电磁法逐渐兴起,该方法将发射源置于地面,采用无人机挂载线圈在空中进行连续数据采集。半航空瞬变电磁探测系统能够突破复杂地形条件开展勘查工作,兼具航空瞬变电磁法工作效率高和地面瞬变电磁法勘探深度大的优势^[2],在荒漠、山区等地形复杂地区的矿产勘探中,能够有效降低勘探风险,减少人为成本,提高勘

查效率,具有良好的应用前景和发展空间。

在仪器系统设计和研发方面,国外的瞬变电磁仪器功能相对完善,性能稳定,数据解释软件成熟,在资源勘探、地质填图、工程勘察等领域获得了广泛应用。Nabighian^[3]在 1987 年率先对半航空瞬变电磁法进行了定义,开启了国内外地球物理勘探的新篇章;1993 年, Elliott 以地面大回线源为激发源,使用直升机作为飞行平台搭载瞬变电磁接收设备,建立名为 FLAIRTEM 的半航空瞬变电磁勘探系统,沿用大定源解释方法进行数据解释与分析^[4];该系统探测范围大,灵敏度高,但是需要大面积铺设激发源,故而对场地要求较高,在复杂地形条件下很难正常工作。1997 年, Fugro 公司借鉴航空瞬变电磁法,去除其激发源,以布设在地面的发射线圈作为激发源,形成 TerraAir 系统^[5]。1998 年,基于 LOTEM 的装置和解释方法, Mogi 等研制了首套电性源半航空 GREATEM 半航空瞬变电磁系统,通过实验验证了该系统的有效性和可靠性,探测深度可

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2024-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005601); 中国核工业地质局基础地质项目“松辽盆地东部地区航空物探调查”(202115)及“地空电磁法铀矿勘查关键技术研究及应用”(202242-5)

第一作者: 王志宏(1973-),男,汉族,正高级工程师,毕业于中国地质大学(北京)地球物理工程专业,现主要从事航空电磁法生产研究工作。
Email: wzhsjz@163.com

通讯作者: 孙怀凤(1982-),男,教授,主要从事航空电磁法理论与装备方面的研究。Email: sunhuafeng@email.sdu.edu.cn

达 800 m^[6-7]。我国在半航空电磁系统研究方面多以理论方法研究为主,仪器研制方面较晚。近年来,国内多个机构如吉林大学、长安大学、成都理工大学和中国科学院电子学研究所等,先后开展了半航空电磁研究与系统研发工作^[8-9]。2013 年,嵇艳鞠等人研制了无人飞艇长导线源半航空瞬变电磁勘探系统,并通过实验证明系统的有效性^[10];同年,符磊等研制了一种基于磁通负反馈机制的低噪声、大面积空地接收线圈的电性源半航空瞬变电磁探测传感器,通过噪声测量验证了该方法的正确性,能够减少传感器的噪声,提高信噪比^[11];2015 年张雨默基于 STM32 研制了时域电磁标准源,并采用标准源对接收机进行标定和校正^[12];2016 年成都理工大学针对半航空瞬变电磁发射系统相关的理论方法和发射机设计的关键技术进行了研究,并完成了实验样机的功能验证^[13];2016 年,吉林大学研发了基于 Lab-view 的滑翔机半航空瞬变电磁接收系统^[14];2017 年,中国科学院研发了一种新的半航空瞬变电磁系统(S-ATEM),形成了一套稳定、高效、可实用的探测系统^[15]。在数据预处理与噪声去除方面,研究人员分别利用小波去噪方法^[16]、小波分解技术^[17]、独立主成分分析^[18]、平稳小波变换和逆平稳小波变换^[19]、独立分量分析法和均值滤波基线漂移矫正算法以及卡尔曼滤波^[20-21]、集成经验模态分解(EE-MD)^[22]等方法,实现了较好的去噪、降噪效果。在应用方面,山东大学孙怀凤团队形成了针对半航空瞬变电磁的数据校正处理系统^[23],取得了较好的处理结果,为后续数据处理及反演工作提供了一定的基础,并在广西多条复杂岩溶隧道的隐蔽灾害探查中成功应用^[24-25]。

目前,国内仅有吉林大学、中科院地质与地球物理所、成都理工大学等少数几家科研单位开展了半航空瞬变电磁仪器研制工作,现有的成果多集中于理论研究和室内试验,仪器用于实际工程还存在诸多限制。随着传感器和数据接收系统的小型、智能化,以及民用低成本无人机性能与稳定性的提高,使无人机搭载半航空电磁系统进行探测成为可能。现阶段,半航空电磁探测技术已经成为国内外的研究热点和今后物探技术发展的重要补充。为解决半航空瞬变电磁探测技术的卡脖子难题,亟需研制专用的轻量化、高性能接收系统。

本文研制的半航空瞬变电磁接收系统包含接收机、感应式瞬变电磁接收线圈和 GPS 秒脉冲电流同步器。接收机采用双 MCU 分层架构进行设计;外部搭载 SDRAM 结合 FATFS 系统实现高采样率的信号采集和存储;接收线圈采用多层交错式差分绕制方式以提高信噪比,内置姿态和 GPS 传感器,实时记录线圈姿态和位置信息;采用 GPS 秒脉冲实现高精度实时收发系统同步,同时开发了专用的数据预处理软件。通过集成试验,针对测试过程中发现的无人机噪声屏蔽和压制等问题开展不同转速、不同系统吊挂长度、不同飞行高度、不同飞行速度的影响研究,并成功开展野外系统集成测试。

1 半航空瞬变电磁接收系统

本文研制的半航空瞬变电磁接收系统组成部分如图 1 所示。该系统主要包括接收机、感应式瞬变电磁接收线圈(图 2)、配件三大部分,能够实现全时域、高灵敏度、高带宽数据采集。

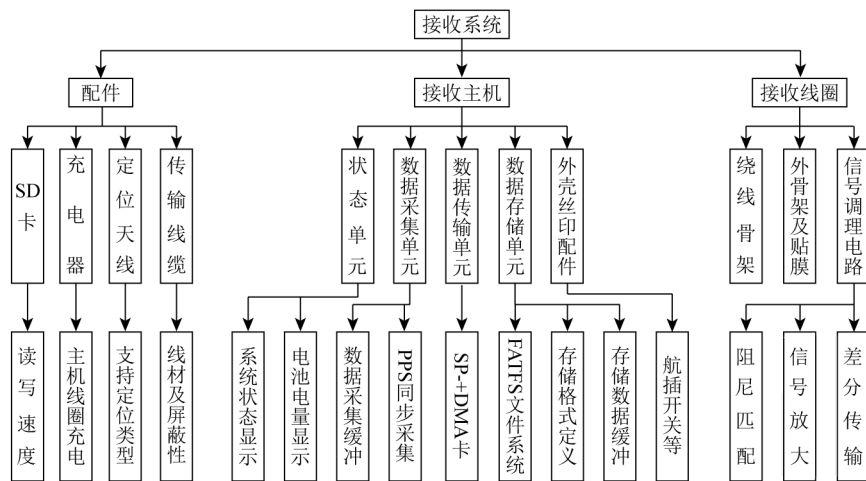


图 1 接收系统主要组成部分

Fig.1 The main components of the SATEM receiving system



图 2 接收机与接收线圈
Fig.2 The receiver and the receiving coil

接收机采用双 MCU 分层结构设计,内置放大器、AD 转换模块、采集卡、数据传输单元以及嵌入式计算机,采集记录器采用全波形采集,可实现数据的高速采集、存储和上传。接收线圈采用多层交错差分设计方式,采用分段绕制并增加线圈间距的方式减小线圈本身的分布电容,提高传感器的谐振频率,同时在接收线圈放大电路上选用低噪声放大器件,减小电路噪声,在保持高灵敏度与高带宽的同时,可有效去除共模干扰,提高系统信噪比;嵌入姿态模块,与定位系统和高精度陀螺仪相融合,可以实时获取线圈姿态。整体接收系统采用 GPS 秒脉冲实现收发信号同步,与发射机相连,可实时记录发射电流,提供精准关断时间,能够兼容目前市面上已有的大功率瞬变电磁发射系统。该系统主要技术参数见表 1。

表 1 接收系统主要技术指标 Table 1 Specifications of receiving system	
参数	指标
采样类别	连续采集
采样速度/位数	256 ksp/s/24bit
同步方式	秒脉冲 PPS
接收线圈面积	56 m ²
续航时间	>8 h
SD 卡存储容量	32 GB
系统带宽	≥40 kHz
USB 传输速度	平均 1 MB/s
姿态/GNSS 采样率	5 Hz
输入动态范围	>60 dB

2 系统集成与性能测试

2.1 飞行平台

为保证稳定和高效的数据采集,考虑无人机载重、续航、飞行稳定性等因素,基于对国内外市面现有的无人机种类的充分调研,本次研究选用 KWT-X8L-25 八旋翼无人机作为飞行平台(图 3),该无人机最大载重为 25 kg。接收系统设计的接收线圈质

量小于 3 kg,接收机质量小于 2 kg,接收系统整体质量小于 6 kg,满足无人机负载需求,且搭载半航空瞬变电磁测量系统作业时续航时间可达 40 min,机身稳定性较好、飞行效率高;飞行速度可选 5~15 m/s,满足半航空瞬变电磁接收系统的采样率要求。其主要技术指标如表 2 所示。



图 3 KWT-X8L-25 无人机
Fig.3 KWT-X8L-25 UAV

表 2 KWT-X8L-25 无人机主要技术指标 Table 2 Specifications of KWT-X8L-25 UAV	
项目	参数指标
最大翼展	3180 mm±20 mm
空机质量	19 kg±0.5 kg
空载起飞质量	35 kg±0.5 kg
推荐最大起飞质量	≤60.5 kg
任务载重	≤25 kg
空载悬停时间	≥60 min(海拔 1000 m 以下,25 ℃)
满载悬停时间	≥25 min(海拔 1000 m 以下,25 ℃)
最大上升速度	4 m/s
最大下降速度	2 m/s
最大飞行速度	15 m/s
相对爬升高度	4000 m(平原)
工作海拔	5000 m(相对爬升 2000 m)
抗风能力	7 级风

2.2 系统集成与性能测试

2.2.1 系统集成

半航空瞬变电磁接收系统研制及校准工作完成后,为确保接收系统空中采集性能正常,进行了系统集成与性能测试。为适应半航空瞬变电磁测量系统接收机、接收线圈等的安装,提升系统起降、抗风、平衡控制能力,对 KWT-X8L-25 无人机进行了机械吊挂结构改装。改装完成后,将自主研发的半航空瞬

变电磁系统接收机、接收线圈通过安装支架、吊缆等集成于改装后的 KWT-X8L-25 无人机上,并使用传输线缆连接接收线圈和接收机(图 4)。

2.2.2 系统噪声测试

绝大多数情况下,器件或系统产生的噪声都是有害的,为确保该集成系统噪声处在较低的水平,不会对采集的数据和系统产生影响,针对该系统进行了本底噪声测试。将接收主机使用屏蔽线缆连接接收线圈,接收线圈输入两端连接到地,测试系统整体噪声情况。如图 5 所示(图中纵坐标 U 为电压, A 为振幅),系统整体噪声水平约为 $400\ \mu\text{V}$ (线圈放大倍数为 330),折合到输入端系统内部噪声约为 $1.2\ \mu\text{V}$,无明显的干扰信号,系统整体噪声水平较低。



图 4 半航空瞬变电磁接收系统集成于无人机平台
Fig.4 Semi-airborne TEM receiving system integrated with UAV

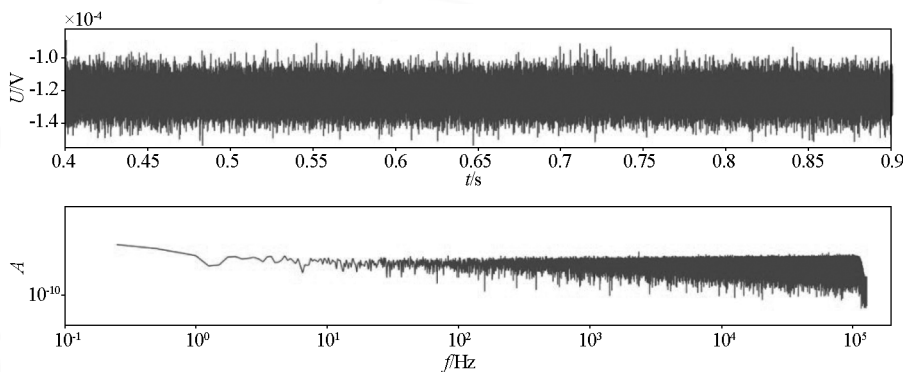


图 5 接收系统本底噪声测试结果

Fig.5 The inner noise test results of the receiving system

2.2.3 野外采集测试

为测试系统的整体性能、电磁兼容性、工作状态、链路通信情况等,在山东大学某校区广场进行了野外数据采集,测试无人机桨叶转动时系统是否可正常采集以及信号特征。

首先,在无人机关机、接收机和接收线圈通电后测试环境背景噪声,此时低频段噪声主要为 50 Hz 工频噪声及其谐波,无其他异常干扰(图 6)。无人机通电后,先在无发射源的情况下进行采集。如图 7a 所示,在桨叶转速为低转速时,信号的高频部分

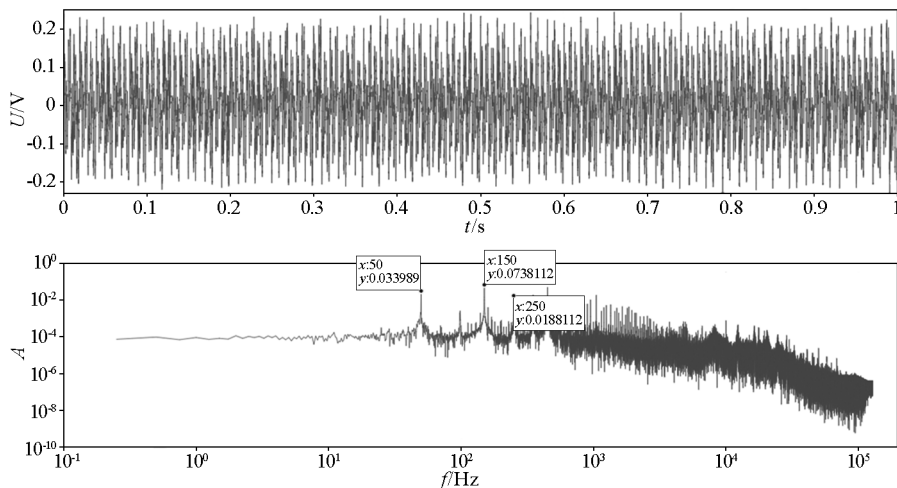


图 6 背景噪声波形(上)及其频谱(下)

Fig.6 Raw data (top) and spectrum (bottom) of environmental background noise

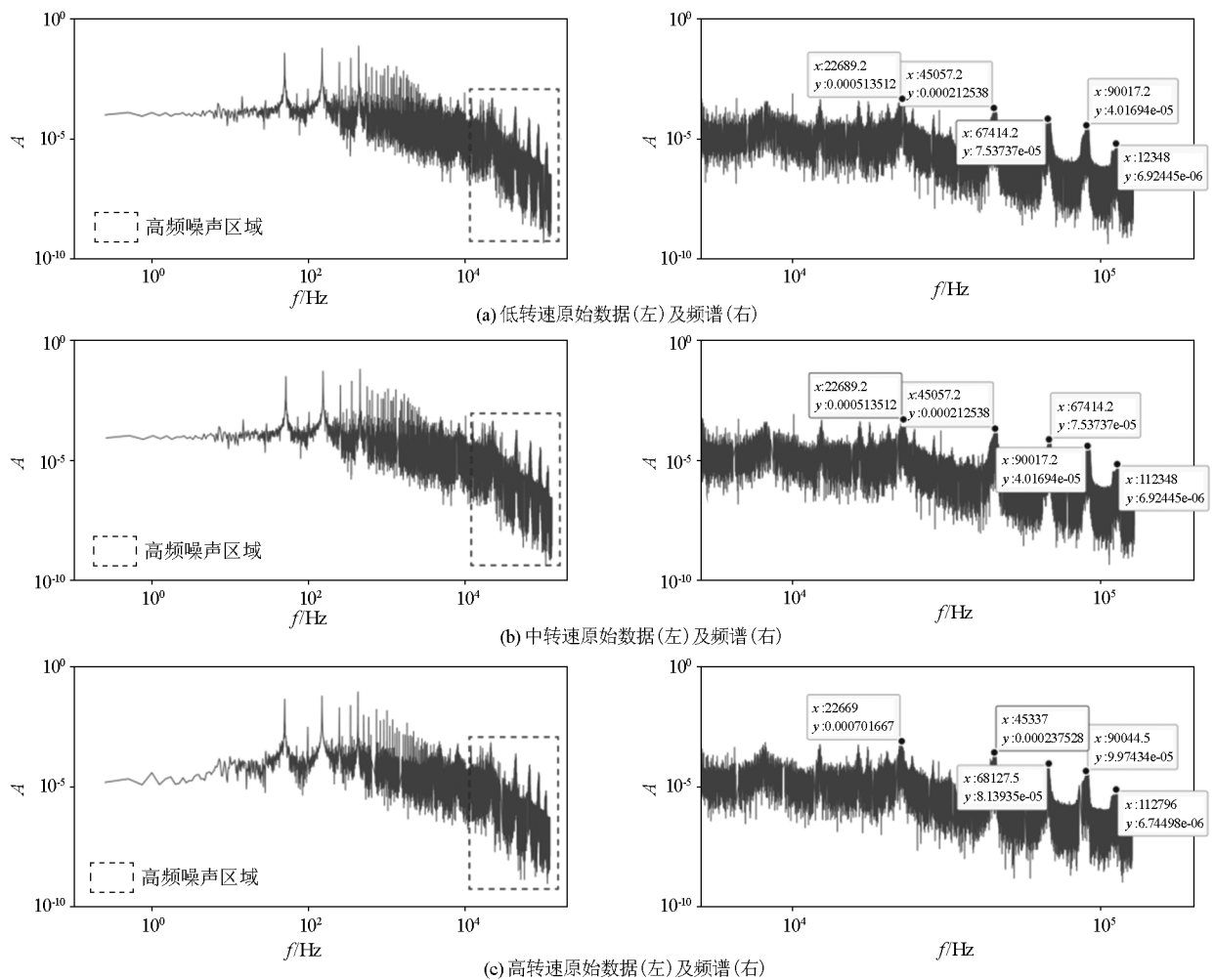


图7 不同转速下采集的原始数据及频谱

Fig.7 Raw data and spectrum at different speeds

出现了明显频带较宽的噪声,且尖峰较大,主要集中在 22 kHz、45 kHz、68 kHz、91 kHz 和 113 kHz 附近。随后采集空中悬停状态下桨叶为中转速和高转速采集的信号,如图 7b、图 7c 所示。对比分析不同转速下采集的信号特征,随着转速的加快,均在 22 kHz、45 kHz、68 kHz、91 kHz 以及 113 kHz 附近出现了高频噪声的尖峰,且噪声尖峰的幅值逐渐增加,证实了无人机桨叶旋转对采集信号有较大的干扰。

采集测试过程中,接收系统与无人机之间的吊挂长度均为 4 m,在原始数据中观测到了强烈的高频噪声,导致数据中存在过多高频异常信号。通过对比发现,该高频噪声出现于无人机开机且桨叶转动的测试场景下,且随着转速的增加,高频噪声的幅值不断增强;但在无人机开机、桨叶未转动的测试场景下并未观测到高频噪声。因此,推断此高频噪声可能是由于无人机桨叶内的电机马达转动引起的高频电磁异常。

由于半航空瞬变电磁的接收系统吊挂于空中进行数据采集,相比于地面瞬变电磁观测系统,半航空

瞬变电磁系统的探测精度较低,因此对接收系统的灵敏度有较高的要求。而此类高频信号的存在严重降低了采集信号的信噪比,信噪比过低的数据会影响数据成像精度和反演结果准确性,探测结果难以指导地质解释。因此,在野外采集过程中需要通过试验验证,分析无人机噪声对数据的影响,并采取针对性措施削弱无人机噪声对数据采集的影响,以提高数据信噪比,提升半航空瞬变电磁探测技术在复杂地形区域勘查的技术优势。

3 无人机噪声抑制试验验证

半航空瞬变电磁探测过程中采用无人机作为飞行平台进行数据采集,影响无人机噪声的主要因素有桨叶转速和吊挂绳长度。因此,考虑从系统结构优化角度提高数据信噪比,即采用合适的吊挂长度并加入铜箔屏蔽层,以减弱无人机高频噪声对接收线圈的电磁干扰。选用合适的吊挂长度,不仅能有效规避无人机桨叶旋转产生的高频噪声,而且能确

保线圈采集过程的稳定性,不会产生较大的运动噪声。

3.1 不同吊挂长度测试

最优吊挂长度的确定需满足下列 3 个条件:

- ①信号能否正常采集;②高频信号是否被有效压制;
- ③接收系统采集时姿态是否稳定、是否有较大的晃动影响信号采集质量。

测区位于山东省济南市黄河北一处人文干扰较少的农田区,线缆长度分别设置为 6 m、8 m、10 m、12 m,接收线圈离地高度为 56.19 m。

首先进行地面静态参考噪声测试,在无任何发射源的情况下获取测区内的背景噪声。如图 8 所

示,测区内整体噪声低频段主要集中在 50 Hz 频率及其谐波附近。以地面静态噪声采集信号为基准,对 4 种不同吊挂长度下的噪声水平、基线摆动、线圈稳定性情况进行了评估。

图 9 为 6 m、8 m、10 m、12 m 吊挂长度下采集的原始信号的频谱特征,4 种吊挂长度无人机高频信号幅值如表 3 所示,其中高频噪声主要分布在 31 kHz、41 kHz、52 kHz、62 kHz、68 kHz 以及 72 kHz 附近。吊挂长度为 6 m 时,大部分无人机高频噪声均能被有效压制,高频噪声的幅值降低,但 22 kHz、45 kHz 处的高频噪声依然存在且幅值较高;当吊挂长度增加至 8 m 时,相较于 6 m 时,22 kHz 处的信号幅

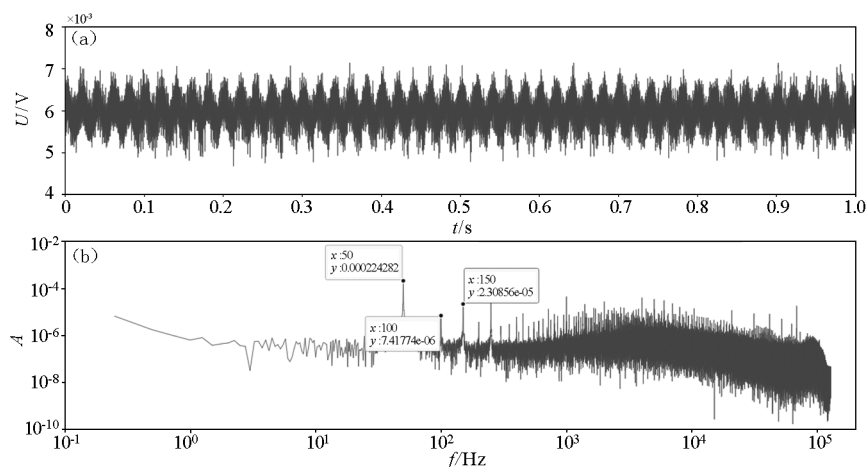


图 8 地面静态参考噪声信号 (a) 及频谱 (b)

Fig.8 Raw data (a) and its spectrum (b) of ground reference signal

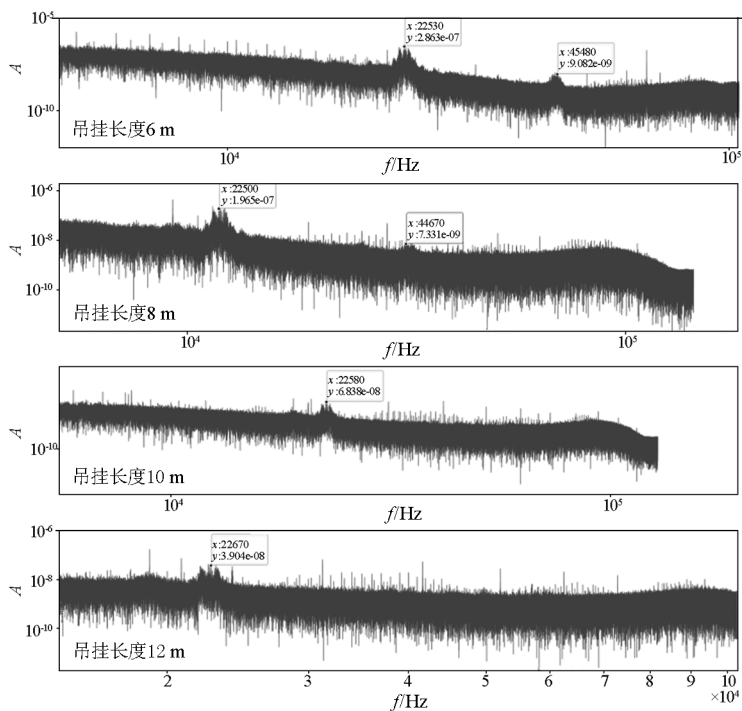


图 9 不同吊挂长度信号频谱

Fig.9 Spectrum of received EM data with different hanging heights

表 3 4 种吊挂长度无人机高频信号幅值
Table 3 High-frequency signal amplitudes of UAV
with four kinds of hanging lengths

频点	吊挂长度			
	6 m	8 m	10 m	12 m
22 kHz	28.36	2.924	6.838	3.904
45 kHz	9.082	7.331	—	—

值衰减了约 31%, 45 kHz 的信号幅值衰减了约 19%; 吊挂长度增加至 10 m 时, 仅能观察到 22 kHz 处的高频信号, 信号幅值衰减了约 76%; 吊挂长度增加至 12 m 时, 22 kHz 处的高频信号幅值衰减了约 86%。4 种吊挂长度下均能有效采集电磁信号, 随着吊挂长度的逐渐增加, 高频信号也得到了有效压制, 频谱特征更平滑, 毛刺现象减少, 说明增长吊挂长度且加入屏蔽层后可以有效压制无人机噪声, 减少对接收线圈采集信号的干扰。当吊挂长度增加至 12 m 时, 肉眼可观测到线圈摆动幅度较大, 原始

数据中线圈运动噪声明显, 影响数据质量。

综合分析不同吊挂长度的测试结果可知, 增加吊挂长度能够有效压制无人机系统电机马达转动引起的高频噪声。但频率 22 kHz 附近的无人机噪声压制较为困难, 后续可以通过上位机软件进行噪声滤除。为保证线圈平稳挂载和飞行, 最终确定 10 m 为该套接收系统适配 KWT-X8L-25 无人机的最佳吊挂长度。

3.2 系统性能测试

采用 10 m 吊挂长度, 在黄河北试验区进行了系统性能测试, 试验区地理位置和航线设计见图 10。测试发射源使用 190 m×190 m 的回线源, 采用加拿大凤凰 V8 多功能电法仪的 T-4 瞬变电磁发射机发射, 采用研制的接收机和接收线圈进行接收, 分别进行了不同飞行高度、不同飞行速度的测试。

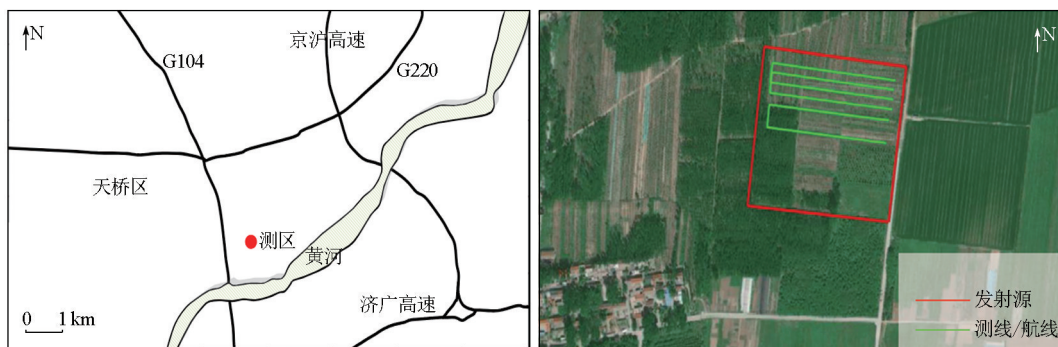


图 10 试验区地理位置及航线设计

Fig.10 Geographical location of the studied area and survey design

3.2.1 不同飞行高度测试

野外实测采集时需选用合适的飞行高度, 以保证接收系统可安全、稳定、无损地采集数据。本次测试分别设置了 60 m、90 m、110 m 三种不同的飞行高度, 飞行速度均设为 5 m/s, 无人机与接收系统间吊挂长度 10 m, 发射电压为 24 V, 发射电流为 4.9 A。如图 11 所示, 3 种飞行高度下均能稳定、无损地采集数据, 且线圈姿态较稳定, 基线摆动较小。飞行高度 60 m 时, 采集到的信号峰值大致在 ± 6 mV; 飞行高度为 90 m 时, 信号峰值大致在 ± 4.7 mV; 飞行高度 110 m 时, 信号峰值降至 ± 3 mV。由此可知, 随着飞行高度的增加, 线圈离地高度增加, 采集到的信号逐渐减弱, 晚期信噪比逐渐降低, 数据过早进入噪声区。因此, 在实际采集过程中, 若地形条件允许, 接收系统与地面间距不宜过大, 建议无人机的飞行高度高于测区内最高海拔点 60 m 即可, 此距离下既可以保证采集数据的质量, 也可以保证采集作业的安全性。

3.2.2 不同飞行速度测试

由于接收线圈与无人机之间通过软绳相连, 半航空瞬变电磁数据采集过程中风力、无人机偏转、无人机航速等因素都会导致线圈产生自旋或偏转, 进而产生运动噪声, 较小的运动噪声可通过多项式拟合等方法去除, 若运动噪声过大则会导致采集的数据不可用。因此, 在野外实测采集时还应确定最优的飞行速度以保证数据采集质量。

为测试不同飞行速度下的数据采集质量, 分别进行了空中悬停和不同飞行速度的数据采集。飞行速度分别设置为 5、7.5、10 m/s, 发射电压为 24 V, 发射电流为 5.5 A, 飞行高度均为 90 m, 吊挂长度均为 10 m, 采集结果如图 12 和图 13 所示, 3 种飞行速度下采集的数据均完整有效。空中悬停采集时, 原始数据基线平稳, 没有明显的波动。随着飞行速度的增加, 接收线圈的运动姿态呈现出不同幅度的摆动, 图 13b、c 中原始数据中的基线呈现为波浪形态, 飞行速度越大, 基线摆动越严重, 且叠加积分后的晚

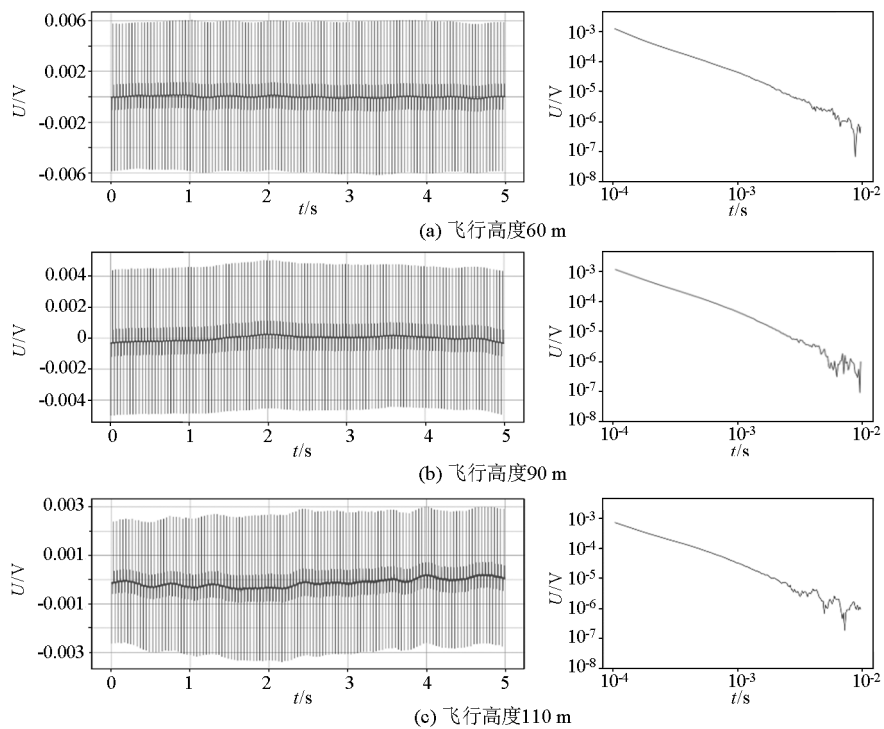


图 11 不同飞行高度的原始数据(左)及叠加积分后的数据(右)

Fig.11 Received raw EM data (left) and stacked results (right) at different flight altitudes

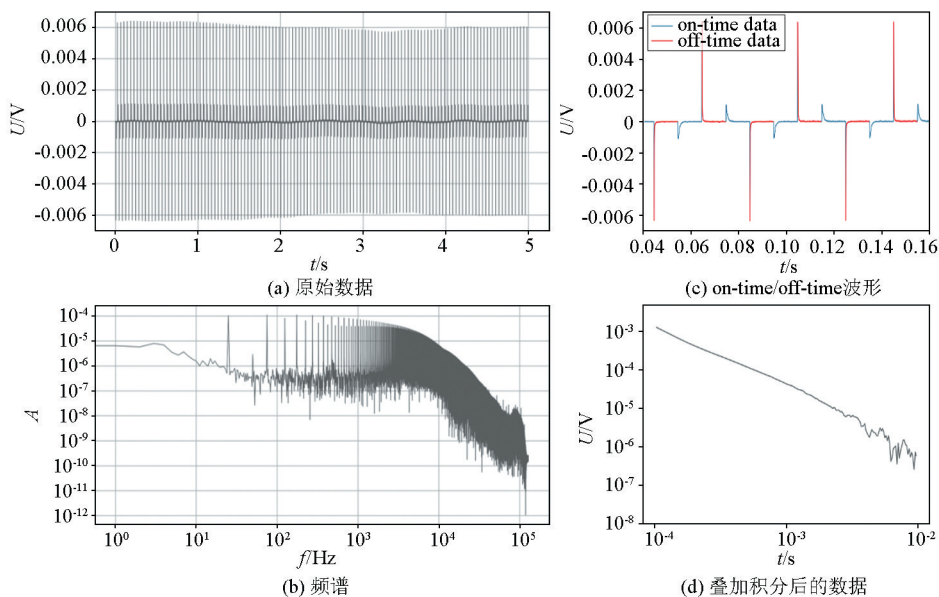


图 12 空中悬停测试结果

Fig.12 Receiving results in vertical hover mode

期数据信噪比降低。综上分析,飞行速度的增加会影响数据采集质量,过快的飞行速度会引起较大的运动噪声,降低数据质量。因此为保证飞行安全和数据质量,野外数据采集可选用 5 m/s 的飞行速度。

综合分析不同飞行高度、不同飞行速度、悬停测试的数据采集结果,本文研制的半航空瞬变电磁接收系统搭载在 KWT-X8L-25 无人机平台进行野外探测时可稳定有效的采集数据。但是,数据采集质量

易受飞行高度和飞行速度的影响,通过对比试验最终确定接收系统适配 KWT-X8L-25 无人机平台的最优飞行速度为 5 m/s、最优飞行高度为 60 m。

4 结论

本文基于 KWT-X8L-25 无人机平台搭载研制的半航空瞬变电磁接收系统,成功实现了数据高带宽、

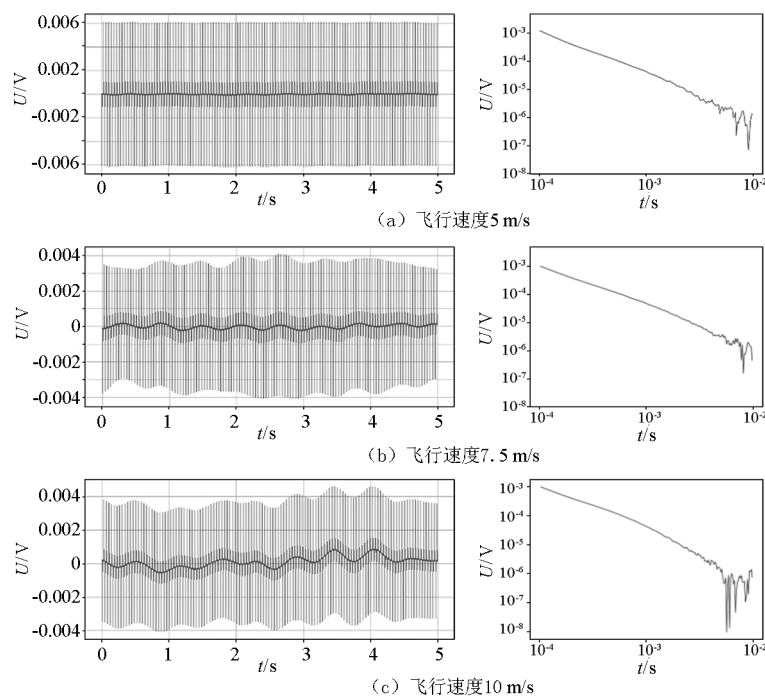


图 13 不同飞行速度的原始数据(左)及叠加积分的数据(右)

Fig.13 Received raw EM data (left) and stacked results (right) at different flight speeds

高灵敏度连续采集,高速存储和上传等功能。实际探测过程中,无人机桨叶高速旋转会引起较大的高频噪声干扰,降低采集数据质量。为确保无人机搭载接收系统作业时能够获得最佳探测效果,通过野外试验选取了最优吊挂长度和干扰屏蔽措施,确定了 10 m 为该系统搭载的最优吊挂长度,并确定了该接收系统适配 KWT-X8L-25 无人机的最优飞行速度为 5 m/s、最优飞行高度为 60 m。研制的半航空瞬变电磁接收系统能够有效应对高频噪声干扰,提高数据采集质量;试验提出的建议飞行参数和测试方法可为半航空瞬变电磁探测应用提供设计指导,为工程勘察和安全评估提供可靠支持。未来将依托高风险岩溶隧道、煤矿采空区等工程实例开展试验应用,评估该接收系统在工程应用中的有效性和准确性,并进一步优化系统性能。

参考文献 (References):

- [1] 林君,薛国强,李貅.半航空电磁探测方法技术创新思考[J].地球物理学报,2021,64(9):2995-3004.
Lin J, Xue G Q, Li X. Technological innovation of semi-airborne electromagnetic detection method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 2995-3004.
- [2] 张莹莹,李貅.地空瞬变电磁法研究进展[J].地球物理学进展,2017,32(4):1735-1741.
Zhang Y Y, Li X. Research progress on ground-airborne transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1735-1741.
- [3] Nabighian M N. Electromagnetic methods in applied geophysics [M]. Tulsa, USA: SEG Books, 1988: 217-231.
- [4] Elliott P. New airborne electromagnetic method provides fast deep-target data turnaround[J]. The Leading Edge, 1996, 15(4): 309-310.
- [5] Smith R S, Annan A P, McGowan P D. A comparison of data from airborne, semi-airborne, and ground electromagnetic systems[J]. Geophysics, 2001, 66(5): 1379-1385.
- [6] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM)[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(1/2): 61-64.
- [7] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of Mount Bandai, north-eastern Japan[J]. Exploration Geophysics, 2009, 40(1): 1-7.
- [8] 张良.半航空瞬变电磁接收机研制[D].成都:成都理工大学,2017.
Zhang L. Development of semi-aeronautical transient electromagnetic receiver[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [9] Wu X, Xue G Q, Fang G Y, et al. The development and applications of the semi-airborne electromagnetic system in China[J]. IEEE Access, 2019, 7: 104956-104966.
- [10] 嵇艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J].地球物理学报,2013,56(11):3640-3650.
Ji Y J, Wang Y, Xu J, et al. Development and application of the grounded long wire source airborne electromagnetic exploration system based on an unmanned airship[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3640-3650.
- [11] 符磊,林君,王言章,等.磁通负反馈空心线圈传感器特性和噪声研究[J].仪器仪表学报,2013,34(6):113-119.
Fu L, Lin J, Wang Y Z, et al. Research on characteristic and noise

- of magnetic flux negative feedback air coil sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 113–119.
- [12] 张雨默, 袁贵扬, 黎东升, 等. 基于 STM32 的时域电磁标准信号源研制[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(9): 62–65, 69.
Zhang Y M, Yuan G Y, Li D S, et al. The development of transient electromagnetic standard signal source based on ARM [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(9): 62–65, 69.
- [13] 李琳琳. 半航空瞬变电磁发射机关键技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Li L L. Research on key technologies of semi-aeronautical transient electromagnetic transmitter [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [14] 苏发. 半航空时间域瞬变电磁接收系统设计[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Su F. Design of semi-aeronautical time domain transient electromagnetic receiving system [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [15] Liu F B, Li J T, Liu L H, et al. Development and application of a new semi-airborne transient electromagnetic system with UAV platform[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2222–2229.
- [16] 李肃义, 林君, 阳贵红, 等. 电性源时域地空电磁数据小波去噪方法研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3145–3152.
Li S Y, Lin J, Yang G H, et al. Ground-Airborne electromagnetic signals de-noising using a combined wavelet transform algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3145–3152.
- [17] Wang Y, Ji Y J, Li S Y, et al. A wavelet-based baseline drift correction method for grounded electrical source airborne transient electromagnetic signals[J]. Exploration Geophysics, 2013, 44(4): 229–237.
- [18] 陈斌, 陆从德, 刘光鼎. 基于核主成分分析的时间域航空电磁去噪方法[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 103–111.
Chen B, Lu C D, Liu G D. A denoising method based on kernel principal component analysis for airborne time-domain electromagnetic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 103–111.
- [19] Li D S, Wang Y, Lin J, et al. Electromagnetic noise reduction in grounded electrical-source airborne transient electromagnetic signal using a stationary wavelet-based denoising algorithm[J]. Near Surface Geophysics, 2017, 15(2): 163–173.
- [20] Ji Y J, Wu Q, Wang Y, et al. Noise reduction of grounded electrical source airborne transient electromagnetic data using an exponential fitting-adaptive Kalman filter[J]. Exploration Geophysics, 2018, 49(3): 243–252.
- [21] Ji Y J, Li D S, Yu M M, et al. A de-noising algorithm based on wavelet threshold-exponential adaptive window width-fitting for ground electrical source airborne transient electromagnetic signal [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 128: 1–7.
- [22] Shi Z Y, Liu L H, Xiao P, et al. Applying transmission line theory to study the transmitting turn-off current in a long grounded wire[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5112–5122.
- [23] 陈成栋. 半航空瞬变电磁数据采集设计和数据校正研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Chen C D. Research on data acquisition design and data correction of semi-airborne transient electromagnetic data [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [24] Sun H F, Zhang N Y, Li D R, et al. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 132: 104893.
- [25] Liu R, Sun H F, Liu D, et al. A joint application of semi-airborne and in-tunnel geophysical survey in complex limestone geology[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(6): 226.

Impacts of drone noise on semi-airborne transient electromagnetic data

WANG Zhi-Hong¹, ZHANG Nuo-Ya^{2,3}, HU Shan-Shan^{2,3}, ZHENG Zi-Qiang^{2,3},
LIU Yu-Chao^{2,3}, ZHOU Zheng^{2,3}, SUN Huai-Feng^{2,3}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Laboratory of Earth Electromagnetic Exploration, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: As a semi-airborne transient electromagnetic (TEM) platform, drones inherently generate electromagnetic signals that may interfere with the collected transient electromagnetic data. This study investigated the impacts of drone noise on the collected data. Through outdoor experiments and systematic performance testing, this study analyzed the impacts of drone noise under varying rotor speeds, suspension lengths, flight height, and flight speeds. Accordingly, this study proposed methods for suppressing drone noise, such as determining the optimal suspension length and incorporating shielding layers. The study was conducted using the KWT-X8L-25 octocopter drones, but the research methodology and philosophy are also applicable to other drone models, thus serving as a reference for the selection of semi-airborne TEM platforms.

Key words: semi aviation transient electromagnetic; drone noise; flight altitude

(本文编辑: 沈效群)