

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005642

基于锁相技术的感应电流检测方法研究*

张鹏^{1,2} 黄晓龙^{1,2} 王耀利³

(1.中北大学 仪器与电子学院 太原 030051; 2.中北大学 南通智能光机电研究院 南通 26000;
3.中北大学 电气与控制工程学院 太原 030051)

摘要: 针对电引爆装置在复杂电磁辐射环境中会通过电磁耦合产生感应电流,导致电引爆装置失火的问题,提出了一种基于锁相技术的非接触式感应电流检测方法。采用基于隧道磁阻效应的电流探头,根据电磁感应原理,结合锁相技术对隧道磁阻探头的输出信号进行分析,从而对感应电流进行实时监测,避免失火;得出基于锁相技术的非接触式感应电流检测方法相比于传统的红外比色测温法,具有更快的响应速度和更高的测量精度的结论。搭建了强电磁环境对电引爆装置的工作环境进行模拟,采用非接触式电流探头进行实验检测,实现对感应电流的监控、检测,达到预警效果,实验结果表明所述方法的电流检测精度 ± 0.1 mA 范围内波动,满足电引爆装置发火电流的检测要求,为复杂电磁环境下电引爆装置的感应电流监测提供了有效的解决方案。

关键词: 感应电流;电火工品;锁相技术;微弱信号检测

中图分类号: TM933.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research on induction current detection method based on phase lock technology

Zhang Peng^{1,2} Huang Xiaolong^{1,2} Wang Yaoli³

(1.School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2.Nantong Institute of Intelligent Opto-Mechatronics, North University of China, Nantong 26000, China;
3.School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the electric detonating device will generate induced current through electromagnetic coupling in a complex electromagnetic radiation environment, which will cause the electric detonating device to misfire, a non-contact induced current detection method based on phase lock technology is proposed. The current probe based on the tunnel magnetoresistance effect is used, and the output signal of the tunnel magnetoresistance probe is analyzed according to the principle of electromagnetic induction and phase-locking technology, so as to monitor the induced current in real time to avoid fire, and the non-contact based on phase-locking technology is obtained. Compared with the traditional infrared colorimetric temperature measurement method, the inductive current detection method has a faster response speed and higher measurement accuracy. A strong electromagnetic environment is built to simulate the working environment of the electric detonation device, and a non-contact current probe is used for experimental detection to realize the monitoring and detection of induced current and achieve the early warning effect. The experimental results show that the current detection accuracy of the method is ± 0.1 Fluctuations in the mA range meet the detection requirements of the ignition current of the electric detonation device, and provide an effective solution for the induction current monitoring of the electric detonation device in a complex electromagnetic environment.

Keywords: induction current; EED; phase lock technology; weak signal detection

0 引言

空间中广泛存在电磁信息,其在军事领域、空天信息领

域以及工业应用领域同样具有不可替代的作用;尤其是在雷达,战机,卫星等装备之间的通讯作用更为明显^[1-2]。然而在实际应用中,空间中充斥着各种频率的电磁波,很容易

收稿日期:2020-12-31

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61573323)、山西省面上青年基金项目(201801D221172)资助

• 154 •

在一定空间形成信号密集、种类繁多、破坏性强的电磁干扰信号,使仪器线路产生高频感应电流,从而导致仪器仪表失灵,产生机器故障等^[3]。因此实时监测感应电流,确保仪器不受干扰、正常通信,保障设备正常运行具有重要意义^[4]。

本文针对电引爆装置所处的电磁辐射环境极其恶劣,导致电引爆装置吸收电磁能量^[5],引起误爆、失火、性能降低等问题,提出一种基于锁相技术和隧道磁阻效应的非接触式电流检测方案,可实现电引爆装置感应电流的检测,达到电引爆装置安全性能评估的目的^[6-9]。首先,阐述受恶劣电磁辐射环境影响,电引爆装置走火、性能降低问题分析并介绍基于锁相技术的非接触式感应电流检测原理;其次,对感应电流检测结果进行分析;最后,得出该方法可以有效进行电引爆装置安全性能评估的结论。

1 感应电流检测方法

电引爆装置作为武器系统重要的组成部分,当外部环境触发一定条件时,电引爆装置引爆弹药摧毁敌方平台是其优势,与此同时,电引爆装置本身也极易受到恶劣电磁环境的干扰,引起误爆,造成损失。其中,恶劣电磁环境下在引信敏感元产生感应电流是造成误爆的关键原因。因此快速、准确的获取高频感应电流大小,实现实时对电引爆装置的安全性能评估成为研究重点内容。

国内外对电引爆装置的感应电流测试研究有很长时间,其中光纤测量法、敏感材料判别法、接触式测温法为传统使用较多的方法,不过由于电引爆装置的使用环境特殊,传统方法准确度和可靠性较低,无法满足使用要求,因此采用具有高灵敏度的非接触式隧道磁阻探头是一种比较好的方法,隧道磁阻探头与电引爆装置的检测如图 1 所示。

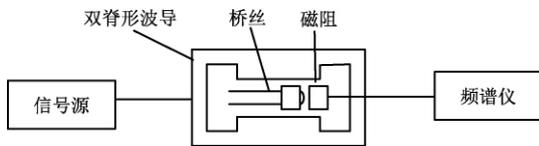


图 1 电引爆装置感应电流检测

将隧道磁阻探头放在电引爆装置敏感部位桥丝的中垂线上,在不破坏其场分布的前提下实现非接触式电流检测功能。基于电磁感应原理与隧道磁阻效应,使磁阻的阻值发生变化,并利用磁阻阻值和磁场、磁场和电磁感应电流之间的相互关系,实现电引爆装置的电磁感应电流检测。

隧道磁阻探头以及检测电路的输出伴有噪声干扰,传统测量方法主要是通过窄带滤波的方法,但是由于滤波器的自身缺陷等因素,通常不会得到令人满意的信噪比,因此通常使用锁相放大器来测量微弱信号的幅度与相位信息。

搭建锁相系统主要由信号通道、参考通道、相关解调器组成^[10-12],其基本组成如图 2 所示。

互相关检测中输入信号为 $f_1(t)$,其表示为:

$$f_1(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1)$$

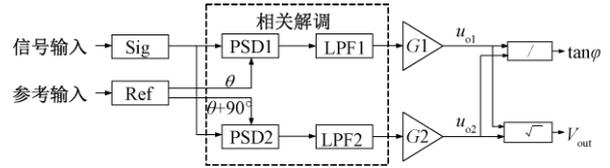


图 2 锁相放大器组成

其中, V_s 为待测信号的幅值; φ 为待测信号的相位。

假设参考信号是与待测信号同频的两路正交的正弦信号:

$$f_2(t) = V_r \cos \omega_0 t \quad (2)$$

$$f_3(t) = V_r \sin \omega_0 t \quad (3)$$

其中, V_r 为参考信号的幅值; ω_0 为参考信号的频率。由图 2 相关解调以及公式可以看出,当参考信号是余弦信号时,两通道信号经过相关运算后得到:

$$u_{o1}(t) = f_1(t) \cdot f_2(t) \quad (4)$$

$$u_{o1}(t) = \frac{V_s V_r}{2} \cos(2\omega_0 t + \varphi) + \frac{V_s V_r}{2} \cos \varphi \quad (5)$$

由上式可以看出,经过乘法器运算后,中心频率为 ω_0 的载波信号被迁移到了 $\omega = 0$ 和 $\omega = 2\omega_0$ 处,由余弦信号自身特性,在一个时钟周期内的积分值为 0,因此可得经过相关运算后的结果:

$$u_{o1}(t) = \frac{V_s V_r}{2} \cos \varphi \quad (6)$$

由式(6)可以看出经过相关运算后,输出信号只与待测信号的幅值、参考信号的幅值以及两路信号之间的相位差有关,参考信号的幅值在通常情况下设为定值,因此只需求得两路信号的相位差即可得到待测信号幅值信息。

同理当参考信号是正弦信号时可以得到:

$$u_{o2}(t) = -\frac{V_s V_r}{2} \sin \varphi \quad (7)$$

利用式(7)可以解算出待测信号与参考信号的相位差:

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{u_{o2}}{u_{o1}}\right) \quad (8)$$

通过合理设置参考信号的幅值以及求得的相差即可得到待测信号的幅值:

$$V_s = 2 \sqrt{u_{o1}^2 + u_{o2}^2} / V_r \quad (9)$$

2 测试结果分析

在检测电引爆装置感应电流时,采用高性能隧道磁阻传感器检测感应电流变化所产生的磁场,首先搭建基于双脊型波导的复杂电磁场,模拟引爆装置的工作环境,如图 3 所示,在电磁环境中,感应电流的变化会引起周围电场的变化,变化的电场会产生变化的磁场,利用隧道磁阻传感器检测电磁环境中变化的磁场,从而检测到变化的电流。

利用磁阻效应实验仪完成对隧道磁阻探头的电磁性能的测试,如表 1 所示。主要是通过两方面的测试:1)测定电

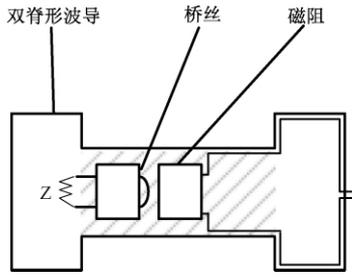


图 3 基于双脊形波导的复杂环境

流和磁感应强度的关系;2)测量磁感应强度和磁阻变化的关系。

通过实验数据显示在同等实验环境下,基于隧道磁阻的传感器的灵敏度要比 AMR 高出 5 倍,比 GMR 高出 2 倍,为本次实验奠定了基础。

作为微弱感应电流检测过程中的敏感元件,磁阻的响应输出与磁场强度近似为线性关系。通过电流探头进行检测,对其输出的电压信号进行检测,可以通过对比真值表得出磁通量的变化率,磁通量、磁感应强度与电流之间的关系有:

表 1 实验所得磁阻探头灵敏度对比 (mV/V/Oe)

探头类别	TMRP44FP	TMRQ4V7F	GMRMTG-L5B	AMRMT10C
实验 1	7.880	5.250	2.815	0.424
实验 2	7.866	5.189	2.809	0.426
实验 3	7.995	5.268	2.866	0.439
平均值	7.913	5.236	2.830	0.429
灵敏度	7.589	4.963	2.830	1.290
灵敏度标准差	0.403	0.374	0.031	0.008
线性度/%	0.64	0.64	0.68	0.28
线性度标准差	0.0012	0.0036	0.0028	0.0013

$$\Phi = BS \tag{10}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \tag{11}$$

其中, Φ 表示磁通量; B 表示磁感应强度; S 表示隧道磁阻探头的横截面积; μ_0 为真空磁导率; I 为敏感单元桥丝中的电流; a 为敏感单元桥丝与隧道磁阻探头的间距,因此电流与磁感应强度的关系为:

$$B = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I}{4\pi a} \rightarrow I = \frac{2\sqrt{2}\pi a B}{\mu_0} \tag{12}$$

通过上述过程,建立起敏感单元桥丝上的感应电流与锁相放大器检测到的微弱电压值的关系,在强电磁干扰环境的每一个频率下,都可以有效提取隧道磁阻探头上的输出电压值,实现桥丝上电磁感应电流的检测。

隧道磁电阻采取差分走线的方式输出信号,大大增强隧道磁阻的抗干扰能力,可以有效抵消外界的共模噪声;同时隧道磁电阻两根数据线相位相反,对外辐射的电磁场可以相互抵消,耦合紧密,泄露到外界的电磁能量较少。也可以有效抑制干扰噪声。

为了方便处理隧道磁电阻的输出信号,需要将差分输出信号转换为单端信号,如图 4 所示为双通道精密放大电路, -3 dB 带宽为 350 MHz,经过转换后输出 $V_{out} = -Gain \cdot (V_{in1} - V_{in2})$, $V_{in1} - V_{in2}$ 表示差分输入电压, $Gain = R_F/R_1$ 表示双通道精密放大电路的增益。

变化的感应电流信号引起磁场的变化,磁场的变化引起隧道磁电阻阻值的变化,输出微弱的电压信号,双通道精密放大器将两路差分信号转换为单端信号。混频器由

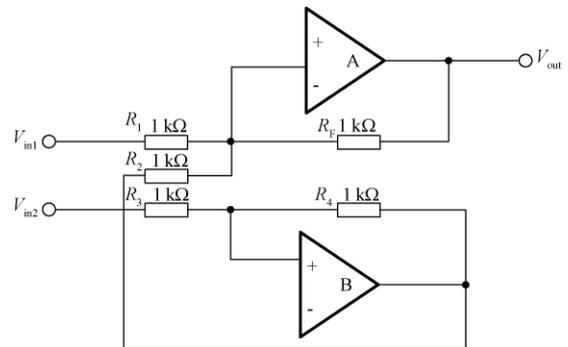


图 4 双通道精密放大电路

于其动态范围大,失真小,隔离度高,适用于频率变换。如图 5 所示,输出的中频信号再经过锁相放大进行检测^[13-14]。

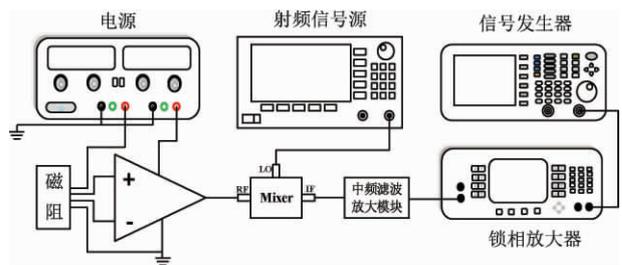


图 5 检测系统

模拟下变频^[15]是检测系统中的重要内容之一,利用混

频技术将有用信号的频谱搬移到低频,在实验中可以实现将隧道磁阻探头输出的宽带高频信号变成窄带低频信号,混频系统主要有模拟混频和低通滤波两个重要的组成部分,其中模拟混频部分将待测的高频信号与信号源提供的本振信号进行混频,在混频器的输出端获得差频项、和频项与其他寄生频率项,因此在混频器的输出端加一个低通滤波器,从而获得低频项。

在对双脊形波导输入交流信号后,在双脊形波导上下脊之间对应产生电磁场,桥丝上产生感应电流,按照上述实验装置,并在锁相放大器上记录输出电压值,并对磁阻输出电压以及感应电流进行推算,在 L 波段选取频率点 200、500、1 000、1 500 和 2 000 MHz 的信号进行测试,结果如图 6 所示。

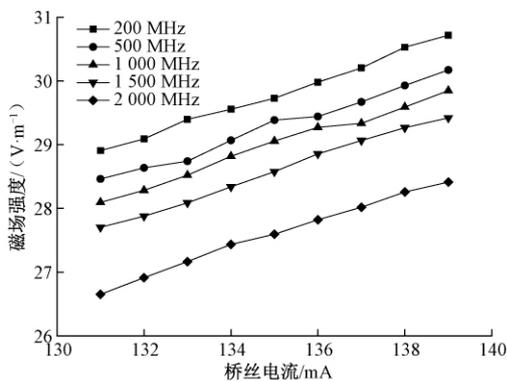


图 6 频率为 200、500、1 000、1 500、2 000 MHz 时,感应电流与感应磁场的关系

依照图 6 记录结果显示,在实验频率不变的情况下,通过增加输入双脊形波导内交流信号的幅值,增强两脊之间的场强,桥丝上的感应电流也将增大;在保证双脊形波导内部磁场强度不变,增大磁场频率,桥丝上的感应电流随之变大;且随着场强一直增大,都会呈现出这样的关系,直至感应电流大小超过桥丝的安全电流,导致桥丝断裂。电磁环境辐射频率的增加同样会导致感应电流增大,直至桥丝断裂。

图 7 所示为检测电流误差值随频率变化的结果,在对

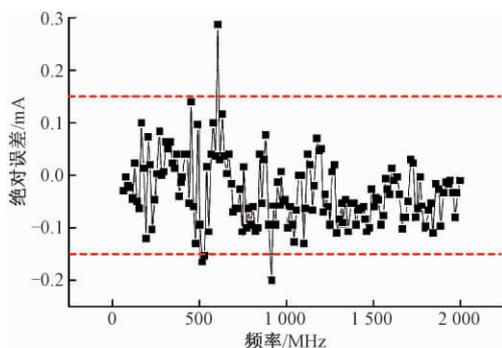


图 7 高频感应电流测试精度误差曲线

双脊形波导内部发射交流信号,从而使得两脊之间产生均匀电磁场,在图 7 中看出电引爆装置感应电流的误差值在 ± 0.1 mA 范围内浮动,当频率继续增加,误差值逐渐稳点在 0.1 mA 内;由于双脊形波导内部电磁场强度的控制精度以及磁阻探头与电引爆装置的距离都会影响高频感应电流的测试结果,但是非接触式的测量方法最大限度避免测试器件引入的误差,因此以上测试结果在电引爆装置的安全性评估范围内可以接受。

3 结 论

本文针对电引爆装置易受干扰,安全性能难以保障的问题,提出了一种基于锁相技术的非接触式感应电流检测方法,经试验证明这种感应电路检测方法相比于传统测温法、特殊材料判别法等具有更高的准确度与可靠度,同时对该方法的绝对误差进行试验,能够满足电引爆装置感应电流检测要求,可以有效对电引爆装置安全性能进行评估与预警,从而提高武器系统的安全性与可靠性。

参考文献

- [1] 徐震寰,李予国,罗鸣.船舶轴频电磁场信号的海底测量及其特性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(4):652-657.
- [2] 苟江川,朱峰,邹杰,等.弓网电弧对航空器仪表着陆系统的电磁干扰影响研究[J].铁道学报,2018,40(7):61-66.
- [3] 相里康,马瑞卿,张庆超,等.飞机电列车系统电磁干扰产生机理及抑制方法[J].西北工业大学学报,2015,33(6):994-1000.
- [4] 孙曙光,刘建强,杜太行,等.一种基于自适应滤波器的改进 ip-iq 无功电流检测方法[J].电测与仪表,2018,55(5):22-27.
- [5] 李文文,袁瑞铭,吕言国,等.工频磁场作用下电能表锰铜分流器感应电流的仿真分析[J].电测与仪表,2018,55(19):119-123.
- [6] 郎平,韩磊,李岩.低频微弱信号高精度检测研究[J].北京理工大学学报,2020,40(2):150-156.
- [7] 张刚,曹莉,贺利芳,等.指数型随机共振微弱振动信号检测方法[J].振动与冲击,2019,38(9):53-61.
- [8] 朱四维,田铭兴,王江彬.广义瞬时功率理论及其在电流检测中的应用研究[J].电测与仪表,2018,56(9):110-116.
- [9] 苏理云,孙唤唤,王杰,等.混沌噪声背景下微弱脉冲信号的检测及恢复[J].物理学报,2017,66(9):29-38.
- [10] 卫程,李宁,刘卫新.智能电网数字锁相技术和小波变换的微弱信号测量研究[J].电测与仪表,2018,55(S1):42-45.
- [11] BROUN W L. Experiment for illustrating the terrestrial electrical currents[J].Philosophical Magazine,

- 1878, 5(33):475-476.
- [12] LIU Y, WANG X B, WANG Y. Numerical modeling of the 2D time-domain transient electromagnetic secondary field of the line source of the current excitation[J]. 应用地球物理(英文版), 2013(2): 134-144.
- [13] TANG Q, WANG J, ZHANG Y, et al. Detection of a weak near-infrared signal using a digital orthogonal-vector lock-in amplifier[J]. Journal of Instrumentation: An IOP and SISSA Journal, 2019, 14(5):5011.
- [14] HUANG K, GENG Y, ZHANG X, et al. A wide-band digital lock-in amplifier and its application in microfluidic impedance measurement [J]. Sensors, 2019, 19(16):3519.
- [15] 白力军, 张冠宇, 苏志强, 等. 任意频点双混频时差测量方法及仪器的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014(5): 45-51.

作者简介

张鹏(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为 IMU 标定、组合导航等。

E-mail: sxyczhangpeng@126.com

黄晓龙, 硕士研究生, 主要研究方向为微弱信号检测技术与应用。

E-mail: huangxlnuc@163.com