

分布式脉冲磁场测量系统研究

刘圣霞¹ 许祥辉² 王晶¹

(1. 常州信息职业技术学院 常州 213164; 2. 92138 部队 常州 213134)

摘要: 脉冲磁场测量是电磁防护领域的重要研究内容之一,是电磁脉冲研究的基础。基于巨磁电阻(GMR)片研制的三维脉冲磁场测量探头,具有结构简单、体积小、测量范围宽,响应频率高等优点。通过实验标定,探头可以较好地测量三维脉冲磁场,磁场强度的测量范围为 $-40\sim+40$ Gs,测量频率范围 $0\sim 1$ GHz。将探头测量的磁场信号转换为电压信号后,由 TMS320F28335 DSP 采集并存储在 SD 卡后,通过 CAN 总线组网,构建分布式脉冲磁场测量系统。结果证明,该系统具有组态灵活、测点容量大、抗干扰能力强、并能够实现三维脉冲磁场测量等特点。

关键词: 分布式系统;脉冲磁场测量;GMR;DSP

中图分类号: TM937;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.35

Research on distributed measurement system of pulsed magnetic field

Liu Shengxia¹ Xu Xianghui² Wang Jing¹

(1. Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China; 2. Unit 92138 of PLA, Changzhou 213134, China)

Abstract: The pulsed magnetic field measurement is an important researching content of the electromagnetic protection field and the basis in electromagnetic pulse (EMP) study. A new probe is designed using GMR chips. It has many advantages, such as, simple structure, small volume, wide measuring range, high frequency response etc. After calibration by experiments, the probe can be used to measure three-dimensional pulse magnetic fields, intensity range of $-40\sim+40$ Gs, frequency range of $0\sim 1$ GHz. The magnetic signals, after converting into voltage signal, are collected and stored in SD card by TMS320F28335 DSP. Finally, through the Can-Bus network, the distributed pulse magnetic field measurement system is proposed. Experiments show that the system has advantages of small volume, flexible configuration, the large capacity of measuring point, strong anti-jamming capability.

Keywords: distributed system; pulsed magnetic field measurement; GMR; DSP

1 引言

随着电子产品在军事、航天等领域广泛应用,电磁测量越来越重要,而相比低频磁场,瞬态脉冲磁场更容易产生干扰,甚至损坏设备。脉冲电磁测量分析有两个途径^[1]:仿真分析方法和仪器测量。仿真分析是利用 FEKO 等仿真软件对环境建立数学模型,通过数学计算方法分析空间的脉冲电磁的分布特性,该方法具有一定借鉴意义;仪器测量是利用脉冲磁场测量设备对环境中的脉冲磁场进行实测。

国外,20 世纪 80 年代 Wiggins 等人^[2]为研究高压变电站的瞬态电磁干扰^[2],对电磁脉冲产生的瞬态电磁场信号进行初步的测量和分析。南京理工大学和华北电力等科研人员都进行过瞬态磁场测量系统的研究^[3]。目前,测量探头存在体积较大、测量频率范围窄等问题。传统瞬态磁场传感器主要有两类霍尔传感器和电磁感应线圈^[4]。霍尔效

应的磁场测量探头在测量脉冲磁场信号时,其响应的频率往往达不到脉冲信号的要求^[5];感应线圈测量磁场的优点是响应频带范围宽可以达到射频磁场的测量频带要求,但是其灵敏度与线圈面积有关,难以实现“点”测量。

脉冲磁场测量系统向网络化,集成化,小型化^[6]发展,因此本文提出分布式脉冲磁场测量系统,该系统基于 GMR 巨磁阻芯片,能进行小空间内磁场信号实验和研究,实现闪电信号的测量与定位、脉冲武器的磁场测量等。

2 分布式系统的总体结构

分布式脉冲磁场测量系统总体上由 3 部分组成:系统监测计算机、CAN 总线和脉冲磁场测量终端。系统检测计算机(上位机)的功能是对各个测量终端进行监控,对各个测量终端所测量的信号进行数据处理和信息显示;CAN 总线的功能是连接各个测量终端,进而组成一个分布式测

量网络;数字测量终端的功能是采集各点的脉冲磁场。数字测量终端的结构由两个部分组成:脉冲磁场测量探头和数字采集模块。此外,为避免脉冲磁场信号对监测计算机产生干扰,需将其放置于屏蔽的容器内。系统总体结构如图1所示。

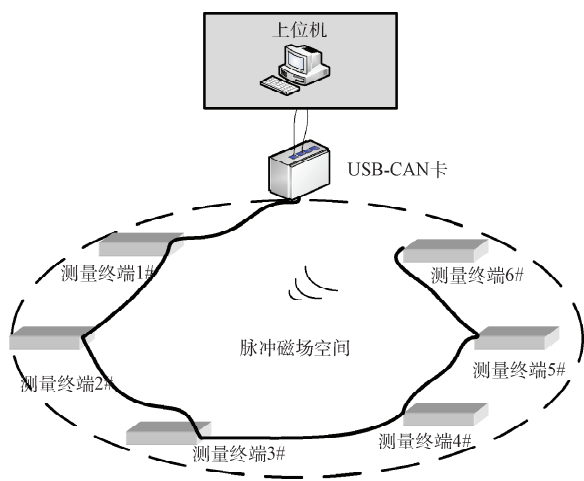


图1 分布式系统示意图

分布式脉冲磁场测量系统中的若干个测量终端分布在被测空间内,用以测量不同点上的脉冲磁感应强度。各测量终端由CAN线连接起来,实现测量终端与上位机之间的数据通信,并且各终端具有独立的数据存储功能,能分别读取各点数据,进而对单点的数据进行分析和处理。系统测量终端将采集的脉冲磁场信号存储到板载的SD卡中,待脉冲磁场过后,再与计算机数据通信,避免脉冲磁场对通信过程中的数据造成干扰,防止通信出错。

3 测量探头

3.1 测量探头的研制

脉冲磁场探头是分布式脉冲磁场测量系统的核心部件,探头性能好坏直接影响整个测量系统性能的优劣。本文采用新型的磁场测量元件—巨磁电阻(GMR),根据其测量原理设计传感器。芯片采用上海东方微磁公司生产的型号VA110F4的双极(自旋阀)GMR磁传感器。该型号GMR设计的探头分辨率可达22 nT,测量范围为 $-48 \sim +48$ Gs,灵敏度可达 $40 \text{ mV/V} \cdot \text{mT}$,可响应 $0 \sim 1000$ MHz的信号^[7-8]。GMR传感器输出曲线如图2所示。

空间磁场矢量分解为 B_x 、 B_y 、 B_z 三个方位,每个通道有1个GMR传感器芯片将磁场转换为电压信号,传给信号采集模块。信号传输线路需使用良好的屏蔽手段,以防止脉冲磁场造成信号干扰。测量探头的原理及实物如图3所示。

图3(b)中,最上方是GMR巨磁电阻传感器,中间是蓄电池,最下方是处理模块。为避免测量过程中脉冲磁场对

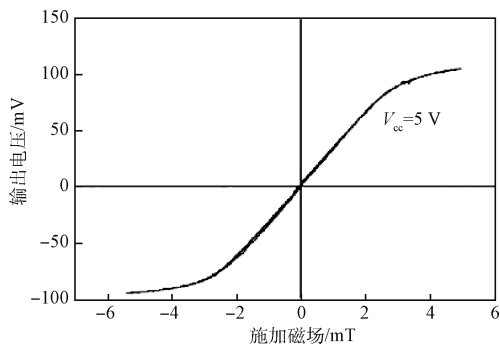
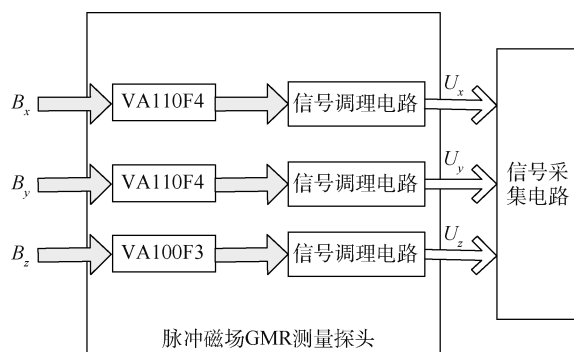
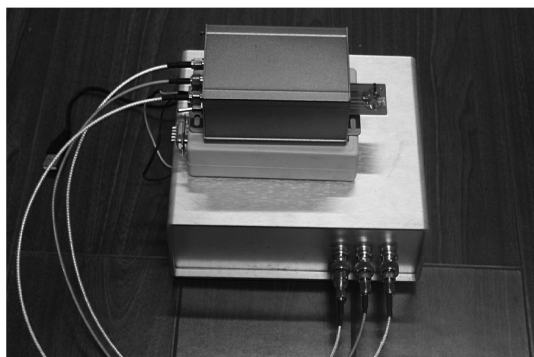


图2 GMR传感器输出曲线



(a) 测量探头原理



(b) 测量探头实物

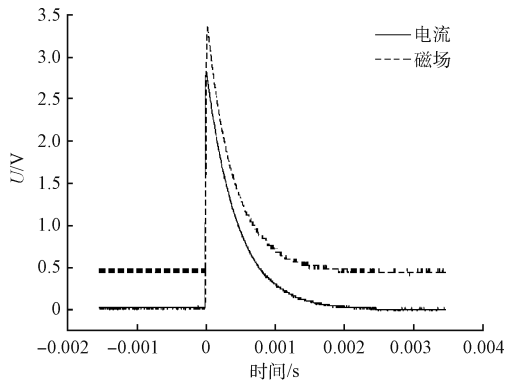
图3 测量探头实物

信号的干扰,GMR磁场测量探头和采集模块使用密闭的金属壳体封装,3个通道的信号线均采用抗干扰性能较好的高频线,接头处采用SIM转接头。

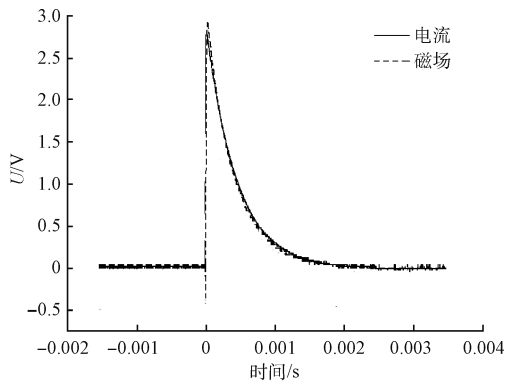
3.2 测量探头的标定

为确定测量探头的输出信号与被测磁场强度之间的转换关系,需对探头进行实验标定。雷电磁场模拟器产生的脉冲电流和脉冲磁场同时由罗氏电流探头和GMR脉冲磁场探头分别测量,最终由测得的脉冲电流计算的理论磁场结果对GMR探头进行标定。

雷电脉冲磁场模拟器充电1.5 kW后瞬间放电,GMR磁场传感器距离雷电脉冲磁场线圈中心距离 $D=1$ m检测脉冲磁场强度,示波器测得的电流、磁场信号如图4所示。



(a) 检测的电流和磁场波形



(b) 去直流分量后的波形

图 4 电流和磁场波形

图 4(a)中,上方曲线为罗氏线圈电流互感器测得的脉冲电流信号,下方曲线为本文设计 GMR 磁场探头所测量的脉冲磁场信号。图 4(b)为去除磁场中的直流分量。从图 4 可以看出,去除直流分量后电流波形和磁场波形基本一致,实验结果与理论分析相吻合。上述磁场波形的直流分量产生的原因是周围环境磁场的影响,主要的影响因素是测量环境的地磁场在 GMR 探头方向上有一定的分量。

调整雷电磁场模拟器的电容充电电压分别为 22.5、20、17.5、15、12.5 kV 五个电压实验等级,对 GMR 探头进行标定。

表 1 GMR 探头标定数据

序号	1	2	3	4
模拟器充电电/kV	22.5	17.5	12.5	7.5
电流峰值/A	2 608.0	2 139.1	1 600.3	1 116.1
理论磁场峰/mT	0.788 7	0.701 4	0.612 3	0.520 2
GMR 实测峰/V	3.569	3.175	2.751	2.328
直流分量	0.48	0.48	0.48	0.48
标定结果	传递系数 $k_0=0.221 \text{ mT/V}$			

根据表中标定数据拟合出了 GMR 探头的标定曲线^[9],如图 5 所示。

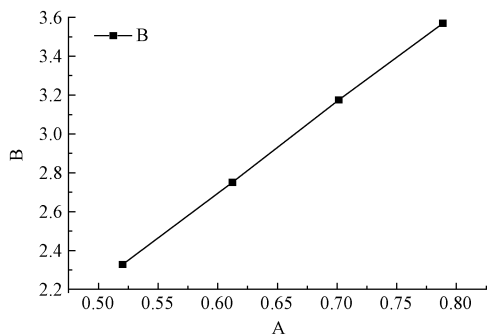


图 5 GMR 探头标定曲线

图 5 中,“■”为测量数据标示,横坐标表示通过理论计算得到的水平东西轴向的磁感应强度的峰值,纵坐标表示 GMR 传感器 X 轴向的电压波形峰值,从图中得出,水平东西轴向 GMR 的标定曲线是近似线性的,其标定系数取每次平均值,大小为 0.221 mT/V。类似的方法得出水平南北(y 轴)方向以及垂直方向(Z 轴)的标定系数分别为 0.181 和 0.217 mT/V。

4 脉冲磁场实测实验

图 6 所示为雷电脉冲磁场模拟器,实验台最左端是示波器,最后端是 GMR 测量探头,该装置通过变压器升压,给电容充电,再经过单环线圈放电能够产生强大的脉冲磁场^[10]。用上述设计的 GMR 传感器输出的电流信号通过三通转接,一路信号送至数字采集模块转化为数字信号后储存在板载 SD 卡上,并通过 CAN 总线将信号发送至计算机,另一路输入示波器采集。三维 GMR 探头放置单环中心轴线上,距离放电环线圈边缘 1 m 处。

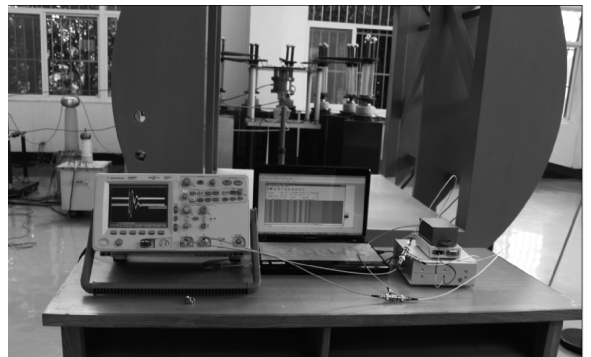


图 6 雷电脉冲磁场模拟器的测量场景

实验中,放电电压为 7 000 V,放电回路中的脉冲电流由罗氏线圈电流探头感应,然后通过 TEK3034 示波器测量其波形,罗氏线圈电流探头的转换系数为 1 025.27 A/V。其中,示波器测得的脉冲电流波形以及 3 维 GMR 磁场传感器测量的磁场波形分别如图 7 所示。

根据电流和 GMR 传感器的输出波形,取各自波形上

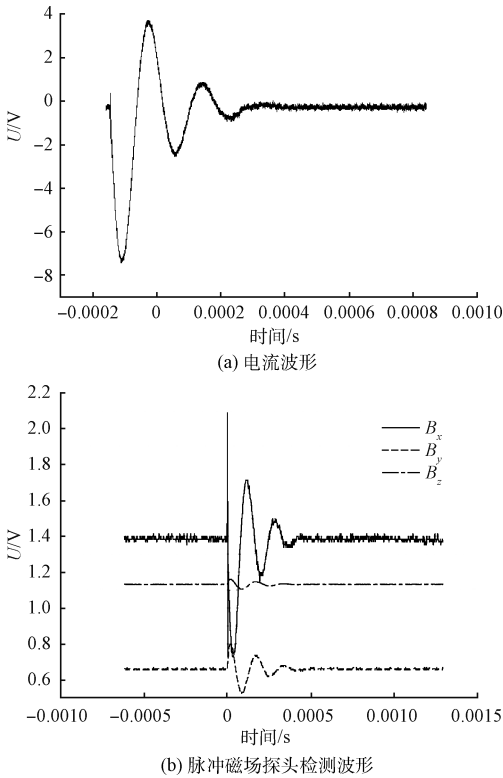


图7 脉冲电流波形与磁场波形

的前4个极值点,将其峰值电压统计。磁场测量探头感受三维空间上的磁场强度,传感器输出相应的电压信号,去直流分量后,根据上述探头标定系数得出磁场强度,各峰值点的磁感应强度的测量结果与理论值的比较如表2所示。

表2 峰值点的理论磁场与测量磁场统计

峰值次数	电流/A	理论磁场/mT	B_x /mT	B_y /mT	B_z /mT	合成磁场/mT
1	7 484	0.149	0.147	0.034	0.006	0.147
2	3 691	0.073 3	0.068	0.022	0.003	0.072
3	2 543	0.050 5	0.045	0.017	0.003	0.048
4	861	0.017 11	0.014 8	0.005 6	0.000 9	0.015 8

表2中合成磁感应强度B,为各轴向上的电磁感应强度的合成,即表示为:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (1)$$

其中,理论磁场强度由毕奥—萨伐尔定律,依据下式计算得出:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idh \times R}{R^3} = \frac{\mu_0 Ib^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a_z d\phi}{(b^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{\mu_0 Ibz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a_\rho d\phi}{(b^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 Ib^2}{2(b^2 + z^2)^{3/2}} a_z \quad (2)$$

从实验结果可以看出,测量的脉冲磁场波形在各峰值

处的测量结果与理论结果基本相等。因此,实验充分说明本文设计的数字脉冲测量终端能够有效的测量脉冲磁场波形。

5 结 论

本文所设计的脉冲磁场测量系统在脉冲信号采集、数据存储与传输方面实现了分布式测量系统的功能。但是,距离成熟的智能测量系统尚有一些的差距,需加以逐步完善,主要有以下几个方面。

1)测量终端进一步集成。将设计的3维GMR脉冲磁场测量探头与数字测量终端集成在一起,进一步提高系统的屏蔽效果。

2)加入数字信号处理电路和相关算法^[11]。从测量的实验结果来看,波形存在噪声。主要有两个方面原因:(1)环境中的干扰信号以及系统的热噪声等;(2)系统采集部分使用了开关电源,不断的开关动作对整个系统会产生干扰;除此之外,可考虑加入滤波相关算法对所测量的数字磁场信号进行处理。

3)上位机软件的完善^[12]。目前,通过CAN总线发送上来的数据是通过周立功公司提供的测试软件界面显示,界面可视化需提高,后续可实现在上位机界面实时显示测量空间各点的脉冲磁场波形、峰值以及绘制各点磁场分布图等。

参考文献

- [1] 潘起军,马伟明,赵治华,等. 磁场测量方法的发展现状及应用[J]. 电工技术学报,2005,20(3): 7-12.
- [2] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching transient fields in substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991: 591-599.
- [3] 史仰伟. 变电站瞬态磁场测量系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学,2010:40-45.
- [4] 李福超. 瞬态磁场测量仪硬件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学,2012:10-20.
- [5] 李德胜,黄操军. MOS霍尔传感器数组[J]. 电子测量与仪器学报,2001, 15(1):6-8.
- [6] 汪晓华. 手持式瞬态磁场记录仪硬件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2014:8-12.
- [7] 柴秀丽,张延宇. 巨磁阻抗磁传感器研究进展[J]. 传感器与微系统,2011,30(12):11-13.
- [8] SMITH C H, SCHNEIDER R W, DOGARU T. GMR magnetic sensor arrays for NDE eddy-current testing [J]. Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2004, 23(23): 406-413.
- [9] JUDD M D, FARISH O. A pulsed GTEM system for UFH sensor calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4):875-880.

- [10] LIU P SH. Research on technology about the measurement of lighting current indirectly by crossed square loop system[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2012:10-30.
- [11] 陈子玉, 黄彦, 曹霞, 等. 双锁相法在脉冲强磁场弱信号测量中的应用[J]. 电子测量技术, 2012, 35(8): 27-28.

- [12] 施江涛, 韩小涛, 谢剑峰. 脉冲强磁场装置监控软件系统的研制[J]. 河北电力技术, 2016, 35(4):18-20.

作者简介

刘圣霞, 工学硕士, 主要研究方向为数字图像处理、电磁环境效应及其防护等。
E-mail: lxs. 13@163. com

(上接第98页)

论考核4大功能, 扩大了仿真系统的适用范围, 同时又填补了其他虚拟仿真系统只有操作培训而未有设备安装培训仿真的空白。虚拟仿真系统在塔架式抽油机设备安装培训方面的应用, 改变了课堂教学枯燥乏味的现状, 同时又避免了真机实操带来的危险, 大大提高了培训效率。

参考文献

- [1] 王大虎, 刘海洋, 王敬冲. 基于虚拟现实的采煤机培训系统开发[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 262-265.
- [2] 李从信, 邓红, 彭志娟. 基于虚拟现实技术的抽油机培训系统的研究与实现[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2006, 22(3): 46-48.
- [3] 王海生. 基于VRP的油田虚拟现实仿真培训系统设计[J]. 长江大学学报, 2013, 10(7): 33-35.
- [4] 张锋. 基于C#的在线考试系统设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(10): 109-110.
- [5] 蔡武, 陈果, 朱志敏, 等. 基于3D Max和Virtools的矿井虚拟仿真系统设计[J]. 煤炭工程, 2011(1): 111-113.
- [6] 毕硕本, 张国建, 侯荣涛, 等. 三维建模技术及实现方法对比研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(16): 26-30.
- [7] 冯莉莉, 武卫玲. 基于3ds Max的虚拟校园三维模型的创建[J]. 林业科技情报, 2009, 41(1): 10-11.
- [8] 彭国华. 基于3D Max的三维动画角色建模技术的研究与应用[J]. 陕西科技大学学报, 2010, 28(2): 145-148.
- [9] 苑丽贤. Premiere软件对多媒体元素的处理方法研究[J]. 电子制作, 2015(4): 75-76.
- [10] 杨中亚, 赵勇, 刘娟鹏, 等. 基于虚拟现实的输电线路巡视仿真培训系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 92-97.
- [11] 孔丽文, 薛召军, 陈龙, 等. 基于虚拟现实环境的脑机接口技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 317-325.
- [12] 张克勤. 虚拟现实软件的界面设计分析[J]. 软件设计, 2013(4): 10-11.

作者简介

王大虎, 1969年出生, 副教授, 博士, 主要研究领域为虚拟现实技术。

E-mail: 18903911101@126. com

卢正帅, 1989年出生, 硕士研究生, 主要研究方向抽油机虚拟仿真。

E-mail: 18839122593@163. com

贾倩, 1991年出生, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统虚拟仿真。

E-mail: 631259561@qq. com