

# 基于 STM32F407 的高压输电线电磁检测系统设计

郭锐<sup>1</sup>, 曹雷<sup>2</sup>, 贾娟<sup>2</sup>, 贾永刚<sup>2</sup>, 程军<sup>3</sup>, 裘进浩<sup>3</sup>, 季宏丽<sup>3</sup>

(1. 国网山东省电力公司 电力科学研究院 电力机器人技术实验室, 济南 250002)

(2. 山东鲁能智能技术有限公司 研发中心, 济南 250101)

(3. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 针对输电线的结构特点, 采用涡流检测与漏磁检测相结合的电磁检测方法, 设计了一套以高速 ARM 微控制器 STM32F407VG 为控制核心器件的高压输电线电磁检测系统; 介绍了系统采用直接数字频率合成 DDS 技术的涡流激励信号产生模块、采用锁相放大技术的涡流信号提取模块、采用差动测量技术的漏磁检测模块、A/D 模数转换模块等; 上位机程序采用 LabVIEW 虚拟仪器设计, 并通过 USB 总线与系统进行实时通信; 整个系统具有实时性强、易于集成和重构的特点; 最后利用设计的电磁检测系统对输电线接头处钢芯拉开缺陷和铝绞线中的断股损伤分别进行了漏磁和涡流检测, 结果验证了检测的可靠性和实用性。

**关键词:** 高压输电线; 涡流检测; 漏磁检测; STM32; DDS; 锁相放大

## Design of Electromagnetic Testing System for Power Transmission Line Based on STM32F407

Guo Rui<sup>1</sup>, Cao Lei<sup>2</sup>, Jia Juan<sup>2</sup>, Jia Yonggang<sup>2</sup>, Cheng Jun<sup>3</sup>, Qiu Jinhao<sup>3</sup>, Ji Hongli<sup>3</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Electric Power Robotics Lab, Jinan 250002, China)

(2. Shandong Luneng Intelligence Technology Co., Ltd, Research & Development Center, Jinan 250101, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Taking into account the structural characteristic of the high voltage overhead transmission line, an electromagnetic testing system based on the high speed ARM microprocessor STM32F407 is designed in this paper, which combines with eddy current testing and leakage magnetic flux testing systems. In the paper we introduced the Direct Digital Synthesis (DDS) based eddy current excitation signals generator module, eddy current signals extraction module which was realized by lock-in amplifier, leakage magnetic detection module which employed differential measurement technique, and A/D conversion module etc. In addition we also designed the host computer programs with LabVIEW, and it communicated with the system via the USB bus. The whole system possesses advantages such as strong real-time, easy to integration and remodeling. The validity of the proposed system is proved by a real detection process, which is implemented to find out the defects in butt joint and aluminum strands on power transmission line.

**Keywords:** power transmission line; eddy current testing; magnetic testing; STM32; DDS; lock-in amplifier

## 0 引言

高压架空输电线路的完好性对输电系统的安全运行极为重要。由于输电线工作条件与环境的特殊性, 铝绞线与钢芯极易出现各种形式的损伤<sup>[1]</sup>。因此, 研制一种能方便、准确地检测出输电线损伤及并定位损伤部位的检测仪器具有重要的现实意义。

基于电磁原理的检测方法具有灵敏度高、设备简单、检测结果直观易懂、易于实现自动化等优点, 可以方便地进行线上实时检测。电磁检测方法分为漏磁检测和涡流检测方法两种。涡流检测对输电线外部铝绞线的损伤具有很高的灵敏度, 漏磁

检测可以深入检测内部钢芯缺陷。本文使用这两种方法相结合, 设计了一套以高速 ARM 芯片 STM32F407 为控制核心器件、采用 DDS 技术产生激励信号、采用锁相放大技术提取涡流信号的高压输电线电磁检测系统。

## 1 电磁检测系统总体概述

### 1.1 电磁检测基本原理

涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的, 对象主要是铝绞线。在穿过式的涡流激励线圈中通以交变电流, 建立的交变磁场与置于线圈中的输电线发生电磁感应。输电线中感生出涡流, 进而产生相应感应磁场, 影响线圈的电压与阻抗。通过检测涡流拾取线圈中的电动势情况, 就可以确定输电线中铝绞线的缺陷。

漏磁检测方法采用励磁装置—铁芯和线圈将钢芯磁化至一定的磁场强度, 漏磁检测装置—霍尔传感器用来探测断线产生的扩散漏磁场。当输电导线穿过该装置作相对运动时, 被检测的导线内部钢芯被磁化, 钢芯上的断线断口产生漏磁场, 磁通明显变化, 漏磁检测装置检测到断线信号并用电信号输出。通过检测该电信号的变化情况就可以确定输电线中钢芯的

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-01-09。

**基金项目:** 国家电网公司重点科技项目; 教育部优秀青年教师基金 (20123218120035); 南京航空航天大学基本科研业务费 (NS2013096); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**作者简介:** 郭锐 (1978-), 男, 博士, 研究员, 国网山东省电力公司电力科学研究院首席专家, 主要从事电力机器人技术、输变电设备无损检测技术、输变电设备带电作业技术等方向的研究。

缺陷<sup>[2]</sup>。

### 1.2 系统总体结构设计

本文设计了如图 1 所示检测系统，系统主要包括 STM32 主控制系统、激励信号发生模块、功率放大模块、锁相放大模块、差分放大模块、上位机程序等部分。首先，STM32 主控芯片通过 SPI 接口控制 AD9954 DDS 模块发生特定频率特定相位的正弦激励信号；激励信号进入涡流激励线圈以后，输电线中感生出电涡流；涡流拾取线圈拾取涡流信号，并将输出经过锁相放大后得出涡流幅相位信号，并将信号经程控放大模块后传递到 A/D 模块；同时励磁装置磁化输电线钢芯，霍尔元件检测到的漏磁信号经过差分放大滤波后，也经过程控放大模块传递到 A/D 模块；A/D 模数转换模块将漏磁信号和涡流信号转换为数字信号并通过并行模式传递给主控制系统；主控制系统将采集到的数据一方面通过 SDIO 接口存储到 SD 卡内，另一方面通过全速 USB 向上位机传输；上位机 LabVIEW 程序通过 USB 总线与主控制系统进行通信，实现数据传输、存储，增益控制，波形实时显示等功能。

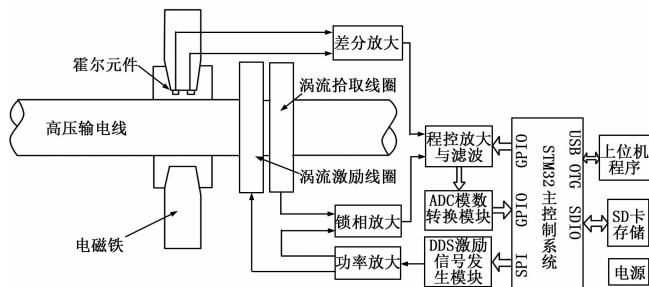


图 1 电磁检测系统图

## 2 系统硬件功能模块设计

### 2.1 主控制系统模块

基于检测系统波形发生、信号采集、数据存储与传输等的需求，本系统采用 ST（意法半导体）公司生产的 STM32F407VG<sup>[3]</sup> 芯片作为主控制模块核心。STM32F407VG 是基于最新 Cortex-M4 内核的 32 位高速低功耗 ARM 微控制器，经过 PLL 倍频后，其工作频率可达 168 MHz。它内置 1 MB 片上闪存，192 KB RSAM，单精度 FPU，并增加了 DSP 指令。此外还有丰富的片上资源保证了系统的实现并大大简化了系统硬件。

### 2.2 基于 DDS 技术的信号发生模块

涡流检测部分需要正弦激励信号，系统中采用直接数字频率合成（DDS）技术芯片 AD9954 完成设计。DDS 技术是一种应用数字技术产生信号波形的办法，相对于其他的波形产生技术，DDS 技术具有频率稳定度高、幅值稳定、信号频率转换速度快、可编程和易于控制等优点<sup>[4]</sup>。

DDS 的内部主要由相位累加器、波形数据表、D/A 转换器，低通滤波器等构成。AD9954 是采用先进的 DDS 技术开发的高集成度 DDS 器件，最高时钟频率为 400 MHz。它内置高速、高性能 14 位 D/A 转换器及超高速比较器，可作为数字编

程控制的频率合成器，能产生 200 MHz 的模拟正弦波。DDS 芯片的频率控制字和相位控制字的设置由 STM32F407VG 根据上位机命令完成，采用 SPI 接口方式向芯片写控制字，图 2 为 DDS 控制系统框图。

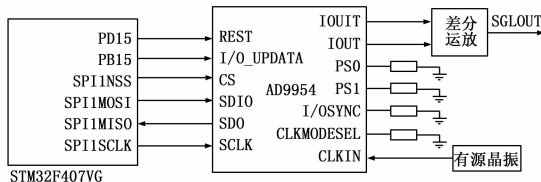


图 2 DDS 控制系统框图

### 2.3 基于正交锁相放大技术的信号调理模块

锁相放大器（lock-in amplifier, LIA）是一种利用互相关原理实现微弱周期信号检测的放大器。它使被测信号有相同频率和相位关系到的参考信号在相关器中实现互相关，从而将深埋在大量的非相关噪声中的微弱有用信号检测出来，同时达到抑制干扰的作用<sup>[5]</sup>。正交锁相放大器输出相位正交的两分量，可以同时测得信号的幅度和相位。

本设计采用了两片 ADI 公司生产的平衡调制解调芯片 AD630 作为相敏检波器件。它由两个运算放大器 A 和 B、切换开关 S、输出积分放大器、比较器等组成，两路增益保持严格匹配的 1:1 关系。该模块电路如图 3 所示，其中移相电路由 AD8032 组成的积分电路实现，低通滤波由 OP2140 组成。检测信号为经过前置调理后的涡流检测信号，经过该正交锁相电路就可以输出其幅值和相位信息。

### 2.4 漏磁测量模块

用于磁场检测的磁敏检测元件有感应线圈、霍尔元件、磁

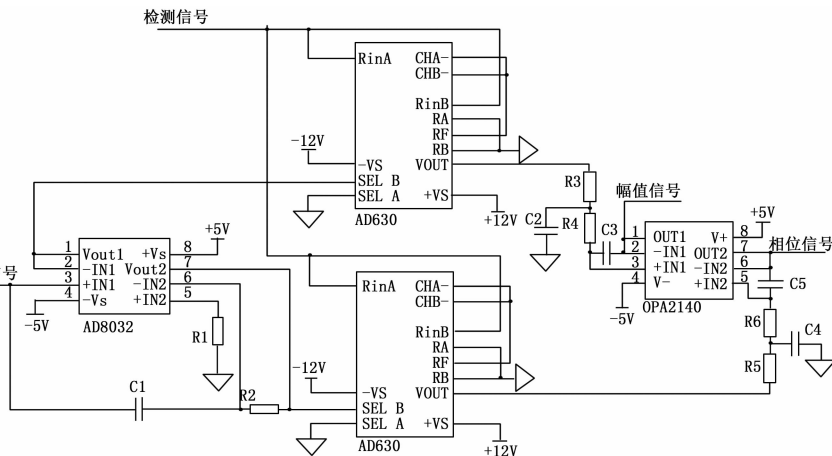


图 3 锁相放大电路

敏管等，感应线圈检测时的感应输出电压随线圈扫描磁场时速度的变化而变动，磁敏管的温漂影响较大。钢芯断股产生的漏磁场很微弱，因此，基于霍尔效应的霍尔元件测这类磁场时比较优越<sup>[6]</sup>。本系统霍尔元件型号为 SS496B，其输出电压与磁场强度成线性比例关系，检测范围为 ±840 Gs，灵敏度可达 2.4 mV/G，电路如图 4 所示。

为了排除测量过程中振动、晃动的影响，提高测量的稳定性、信噪比和抗干扰能力，检测中将两个霍尔元件测量信号进

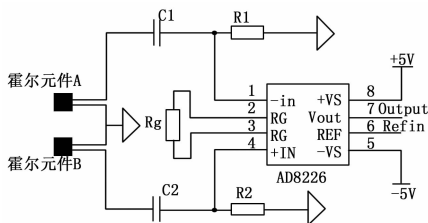


图 4 漏磁测量模块电路

行差分处理, 形成差动测量。如图 4 所示方式布置霍尔传感器, 消除测量间隙等带来的影响。差分放大使用仪用放大器 AD8226 芯片。

### 2.5 A/D 转换模块

信号处理电路对缺陷信号进行检波、放大等处理后获得幅值和信噪比符合要求的模拟量信号, 经过 A/D 转换以获得数字量信号, 并送入微处理器中进行处理和存储。

设计中采用 ADI 公司的 AD7606-8 (16 位 8 通道同步采样模数转换器) 完成模拟信号到数字信号的转换<sup>[7-8]</sup>。AD7606-8 片上集成模拟输入嵌位保护、二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、16 位电荷再分配逐次逼近型 ADC 内核、数字滤波器、2.5 V 基准电压源及缓冲、高速串行和并行接口, 所有的通道均能以高达 200kSPS 的速率进行采样。设计中共有六路信号需要进行转换, 分别为两路涡流幅值信号、两路涡流相位信号、以及两路漏磁信号, 另外两通道预留。经过前端的信号调理, 各路信号范围都为 ±5 V, 经过 16 位的转换, 其分辨率可达到 76.3 μV。基于精度方面的考虑, 使用内部基准电压模式。A/D 芯片由 STM32F407VG 控制其完成采样时序, 8 路信号同步采样, 并采用 16 位并行接口方式完成数据的传输。考虑到设计每通道采样率为 100 kSPS, 在控制程序中使用双缓冲技术, 有效解决数据传输与存储过程中由于速率原因带来的数据丢失问题。

## 3 系统软件设计

### 3.1 主控制模块程序

系统主控制模块的软件部分主要包括: 通过 SPI 控制 AD9954 产生激励波形信号、通过 GPIO 控制 AD7606 进行模数信号转换、定时中断中完成数据转换和数据传输, 全速 USB 通讯、SDIO 数据存储驱动等。软件程序如图 5 所示。

当系统上电复位后, 程序首先进行设备初始化, 包括 STM32 芯片的时钟设置, SPI、GPIO 接口配置、定时器 TIM 配置等; 初始化芯片完成后程序对 USB 接口、SDIO 接口进行配置并加载 FATFS 文件系统, 并开启 RTC 实时时钟; 然后程序调用 AD9954 与 AD7606 芯片的驱动函数, 初始化这两个芯片; 之后系统就进入循环阶段。在循环过程中, 首先等待上位机通过 USB 发送来的控制命令, 然后对接收到的指令进行识别并执行相应程序: 如果指令为程控放大器指令, 程序则执行模拟开关控制函数, 调节前置调理电路增益; 如果指令为 DDS 控制指令, 程序则调用 AD9954 驱动函数, 向其写相应频率相位控制字, 并启动波形输出; 如果指令为数模转换指令, 则须判断该指令为开始还是中止指令, 然后相应地控制定时器的启动与中止、中断的使能与禁止。

系统中断服务程序中完成 AD7606 的 A/D 转换时序,

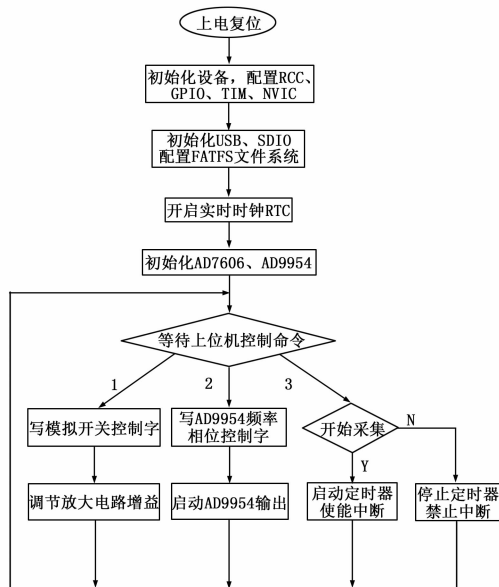


图 5 主控制模块程序框图

将数据并行读取到 STM32 芯片数据缓存区中, 程序一方面调用 SD 卡写函数将缓存区数据存储至 SD 卡, 另一方面调用 USB 发送函数将缓存区数据发送至上位机, 等待数据发送完毕后中断返回。设置定时器周期 10 μs, 则每通道转换频率可达到 100 kHz。

### 3.2 上位机程序

本系统上位机软件采用 NI 公司的 LabVIEW 编写<sup>[9]</sup>。上位机软件的主要功能是实现检测系统控制与检测数据显示、存储。它通过 USB 总线与主控制系统进行通信, 向其发送控制命令、并接受检测数据实时显示。电磁检测系统软件的界面主要由带状图显示窗口、DDS 信号控制窗口、程控放大控制窗口、检测起始按钮等部分组成。

## 4 实验结果与分析

整个实验系统结构试件放置在线上行走机器人上, 电磁铁和传感器由机器人带动沿输电线轴向运动。磁铁电源、涡流线圈激励信号及信号处理由专门设计的集成好的电路盒提供, 电路盒由上面几节中设计的电路构成。传感器信号由屏蔽电线接入电路盒, 电路盒输出数字信号送入上位机进行分析处理。

首先对输电线压接管接头处的钢芯拉开缺陷进行漏磁检测, 接头试件的结构如图 6 所示, 图 (b) 中压接管内部的钢芯中间存在一段大约 30 mm 的空隙。

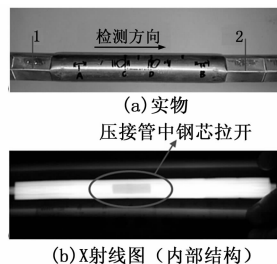


图 6 输电线压接管接头

对于接头试件检测这里对钢压接管末端和钢芯空隙长度进

行定位。在压接管末端存在钢芯压接区和未压接区的过渡。磁铁运行到此处磁通量应该要产生变化。同时对钢芯中的空隙长度进行定位，观察信号幅值的变化。

图 7 给出了传感器距离  $a$  为 6 mm 时的原始输出信号和对信号去偏置，放大及取绝对值后的信号，信号放大倍数为 10。判断时阈值设定为 1.5 V，高于设定阈值的 3 个极值点分别表示压接管前端和两段钢芯端点的位置，位置分别是 29.25 mm、106.25 mm 和 132.5 mm。从图中得到的空隙长度是 26.25 mm，检测精度较高。

输电线涡流检测所用的试件是待测电线上用砂轮磨削出了一处人工缺陷，缺陷范围包括相邻的三股绞线，最深处约为 3 mm。涡流传感器采用两半包裹式的一对磁场激励和接收线圈，检测时出发点大致离损伤为 50 mm。

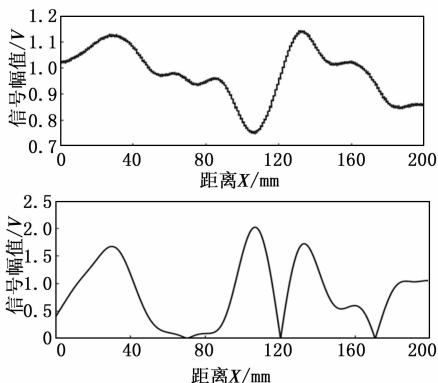


图 7 漏磁检测结果，(a) 原始信号，(b) 经滤波放大和取绝对值的信号

图 8 是经去噪后得到的输电线涡流损伤检测信号，探头激励频率是 50 kHz，信号经放大器放大了 20 倍显示。图中的  $V_x$  和  $V_y$  分别表示信号的实部和虚部，对应锁相放大器的同相输出和正交输出。根据信号波形的起伏变化，可以清楚的判断出铝绞线上的缺陷中心大致位于离运动起点的 50 mm 处，这与实际的情况相吻合。

### 5 结束语

本文使用 STM32F407 作为主控芯片，设计了一套完整的基于涡流和漏磁方法的输电线检测系统。直接数字频率合成 DDS 技术可方便地产生频率相位可调的涡流激励信号；锁相放大技术可有效地从干扰噪声中提取出涡流信号的幅值相位信息；差动测量技术消除测量间隙变动带来的影响，提高漏磁信

号测量的稳定性和抗干扰能力；USB 总线传输技术实现稳定、

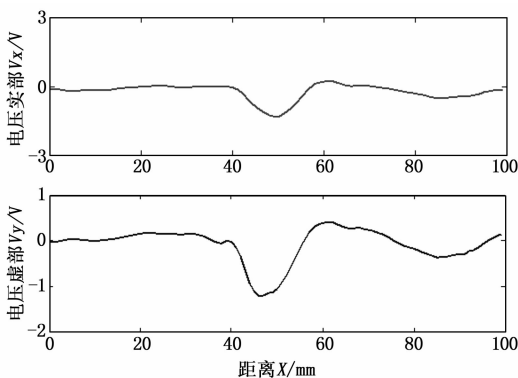


图 8 涡流检测信号，包括信号实部和虚部

高速的数据传输，使上位机 LabVIEW 程序能够有效地对系统参数进行设置，并实时地显示出系统测量数据。

文中最后利用设计的电磁检测系统对输电线接头处和铝绞线中的损伤分别进行了漏磁和涡流检测，结果验证了检测的可靠性和实用性。

### 参考文献:

- [1] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 8.
- [2] 蔡成良, 丁一工, 康宜华, 等. 基于涡流和漏磁检测原理的输电线导线损伤检测 [J]. 电网技术, 2000, 24 (11): 18-22.
- [3] STM32F407xx datasheet. ARM Cortex-M4 32b MCU + FPU, 210DMIPS, up to 1 MB Flash/192+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces&camera [Z]. STMicroelectronics, 2012.
- [4] 田武刚, 潘孟春, 罗飞路, 等. 一种应用于涡流检测的 DDS 正交信号源 [J]. 计量技术, 2008 (4): 9-11.
- [5] 聂绍龙, 黄旭初, 王宣银. 微弱信号检测的原理及其实现 [J]. 电测与仪表, 2002, 39: 9-12.
- [6] 黄向龙, 施 俏. 检测输电线内部钢芯损伤的漏磁传感器设计 [J]. 荆门职业技术学院学报, 2005, 20 (6): 15-17.
- [7] 于克泳, 孙建军. 新一代 16 位 8 通道同步采样 ADC-AD7606 在智能电网中的应用 [J]. 电子产品世界, 2010 (10): 63-65.
- [8] AD7606 datasheet. 8-Channel DAS with 16-Bit, Bipolar Input, Simultaneous Sampling ADC [Z]. Analog Device Inc., 2010.
- [9] Kalkman, C J. LabVIEW: a software system for data acquisition, data analysis, and instrument control [J]. Journal of clinical monitoring, 1995; 11: 51-58.

(上接第 2280 页)

### 参考文献:

- [1] 肖林京, 常 龙, 张瑞雪, 等. 煤矿避难硐室锂离子蓄电池后备电源系统设计 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42 (7): 73-76.
- [2] 李成学, 杨大柱. 电动汽车蓄电池组电池管理及其状态检测 [J]. 电源技术, 2010, 34 (1): 80-83.
- [3] 于志豪, 常 龙, 张瑞雪, 等. 锂电池动力电源单体电池电压检测系统设计 [J]. 电源技术, 2014, 38 (5): 832-834.

- [4] 廖 珺, 周 萍, 王继锋, 等. 基于 NRF24L01 的电池管理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1338-1340.
- [5] 侯天星, 王凤新. 基于 nRF2401 的无线数据传输系统 [J]. 中国农学通报, 2009, 25 (7): 258-263.
- [6] 刘海燕, 杨帮华, 丁丽娜, 等. 基于 STM32 的红外火灾探测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 51-53.
- [7] 刘纯虎, 付 斌, 盛庆华. 基于 STM32 的微型 USB-CAN 适配器开发 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 996-998.