

高压输电线路近电感应系统设计

米 玛 国 宇 孔海波 刘文安 刘 超

(国网日喀则供电公司)

摘要：停电检修是高压输电线路重要的运检工作之一，极易发生人身触电现象，随着安全管控压力逐渐增大，数字化作业手段不断丰富，人身触电现象有所减少，但仍屡见不鲜。为了杜绝人身触电事件发生，本文根据作业现场实际情况，结合数字化管控特点，从近电探测、数据处理、嵌入式开发等方面进行设计，搭建了高压输电线路近电感应系统，可有效对高压电进行预警，避免人身伤亡事故的发生。

关键词：高压输电线路；人身触电；近电预警；数字化管控

0 引言

停电检修是确保电力设备安全稳定运行的重要措施之一，尤其是高压输电设备，由于其运行电压等级高、负荷电流大，如果设备带电，在未采取安全措施的情况下，作业人员误入带电侧，在未接触设备前便会发生放电现象，严重危及作业人员人身安全^[1]。目前，停电检修工作已经采取停送电汇报、验电挂设地线^[2]、悬挂警示标志、装设临时护栏等安全措施^[3]。但在实际工作中，由于高压输电线路位于荒郊野外，平行线路、密集输电通道众多，误登杆、误入带电侧的现象时有发生，作业人员的人身安全面临极大考验^[4]。除此之外，在进行正常检修工作时也存在挂设接地线失去保护、线路客户侧反送电、变电站误送电等可能，致使输电线路带电而造成人身伤亡事故^[5]。随着社会安全意识的不断提高，数字化管控程度不断加深，利用技术手段解决高压输电线路误入带电侧问题，避免触电事故发生具有重大意义^[6]，因此本文设计一种高压输电线路近电感应系统，可以有效提高停电检修作业的安全水

平，确保作业人员现场安全。

1 近电感应系统构成及应用原理

如图1所示，高压输电线路近电感应系统主要由三部分组成：近电感应模块、数据处理模块、声光报警模块。

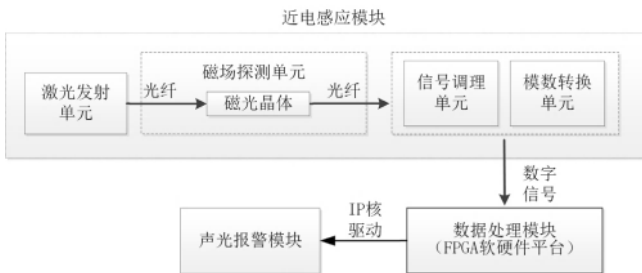


图1 近电感应系统结构图

其中近电感应模块中主要包含激光发射单元、磁场探测单元、信号调理单元和模数转换单元。近电感应模块提供一个稳定可靠的光学探测回路，恒定的光信号进入磁光晶体后，在外界电磁场的作用下会发生

偏转，光信号强度也会随之发生相对变化，在信号调理单元和模数转换单元的作用下，光信号可以变成相对应的电信号，因此通过近电感应模块可以实现电磁场等物理信号到电信号的探测、采集与转换。

数据处理模块主要由 FPGA 软硬件平台构成，根据近电感应模块输出的物理量和 FPGA 的软硬件设计要求，开发设计相对应的接口、总线、算法、拓展电路以及信息存储单元等。当进入数据处理模块的电信号超过预定设置的环境最高值时，则由相应的 IP 核驱动声光报警装置进行报警，从而实现高压输电线路近电感应预警，避免作业人员触电事故发生。

2 近电感应系统光学回路设计

2.1 磁场探测单元设计

目前，市面上探测磁场的传感器有很多，比如霍尔元磁场传感器、光纤磁场传感器、磁光晶体磁场传感器、超导磁场传感器等^[7]，不同的传感器各有优缺点，根据实际应用成本及精度需求^[8]，并经过试验测试，本系统将创新采用通信领域常用的偏振相关型磁光隔离器中的磁光晶体作为探测元件，与传统的磁场传感器相比，它具有结构紧凑、价格低廉、方便改造安装、集成性强、采用光信号传输等优点，光信号通过量与磁场强度成连续单调递增或递减，如图2所示，可满足对高压输电线路进行带电预警的测量需求。

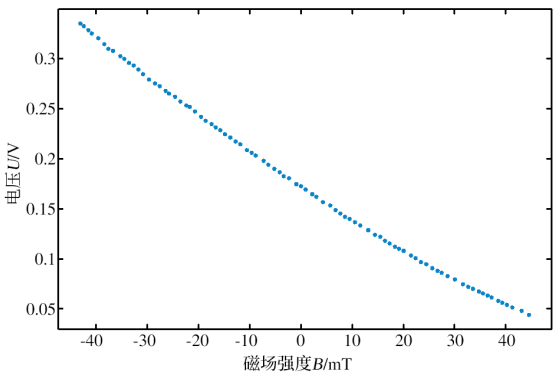


图2 偏振相关型磁光隔离器试验测试图

2.2 激光发射单元设计

为提高带电预警磁场探测的准确度，激光发射单元的设计尤为重要，一是要为磁场探测提供稳定的恒流源；二是要适合偏振性磁光隔离器的技术参数指标；三是体积要小、方便设计安装，寿命长、价格适中。根据以上设计需求，本文采用中心波长为 1550nm 的半导体激光器，该激光器具备体积小、方便安装、使用寿命长等优良特性，并且结构简单，输入功率和输出功率之间连续单调，功率可调节。1550nm 的波段在单模光纤传输中损耗极低，并且不会向外辐射对人体产生不良影响。

由于该类型激光器属于高功率密度、高转换效率的元器件，粉尘、静电以及环境温度变化都会对其产生影响^[9]，因此为了保证 1550nm 半导体激光器安全稳定运行，本文根据半导体激光器的出纤功率、阈值电流、工作电压等性能参数指标，采用 EDL-0A 芯片进行驱动电路设计，原理图如图3所示。

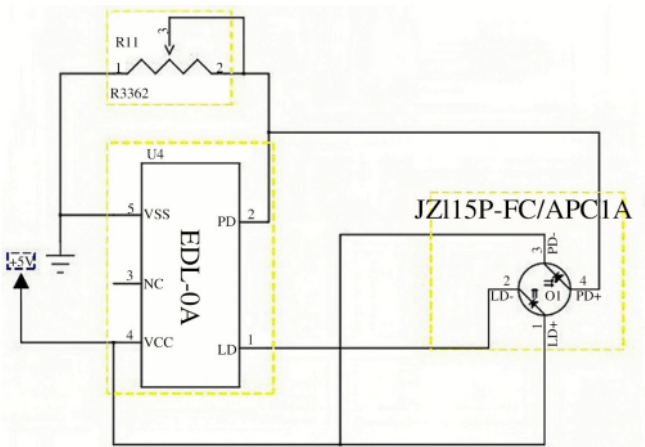


图3 激光驱动电路原理图

2.3 信号调理单元设计

恒定功率的光信号在通过磁光晶体的过程中，受到电磁场的作用会发生一定偏转，从而导致输出的光信号会发生变化，由于输出的光信号比较微弱，为了确保采集到的模拟信号的准确性，信号调理单元将按照光

电转换、前置放大、信号滤波等环节获取模拟信号。

根据光信号的波长范围，同时结合光探测响应快、噪声低、灵敏度好和可靠性高等要求，本文选择探测范围从 1000~1650nm 的可插拔性光探测器。根据光探测器的暗电流、响应度、带宽等性能参数指标，同时为了有效抑制暗电流、降低噪声、保持良好的线性关系，提高测量的精准度，本文采用 AD8608 光电电压结构进行设计。AD8608 极低的输入偏置电流和失调电压，非常适合高灵敏电路的设计。

2.4 模数转换单元设计

模数转换单元是数据采集的核心部分，该设计的采样速率、精度以及芯片性能将直接决定整体数据质量，目前比较常用的 AD 采样芯片主要有逐次逼近型、比较型和双积分型共三种类型^[10]，根据设计需求

本文采用逐次逼近型的 AD 采样芯片，它的采样速率介于比较型和双积分型之间，并且可以满足本设计精度控制需求，而且价格较低。

AD9826 采样芯片是 ADI 公司生产应用于图像处理领域的模拟信号处理器，可实现三通道的快速采样，采样速率不低于 15MSPS，在低性能的情况下也能满足近电探测的频率需求^[11]。

3 近电感应系统 FPGA 硬件平台设计

为了拓展近电感应系统的兼容性，实现多部位多终端近电感应，本设计采用具有丰富接口和逻辑资源可进行大规模数据并行计算的 FPGA 作为硬件平台，具体设计结构图如图 4 所示。

随着硬件技术的不断发展，利用 FPGA 搭建软

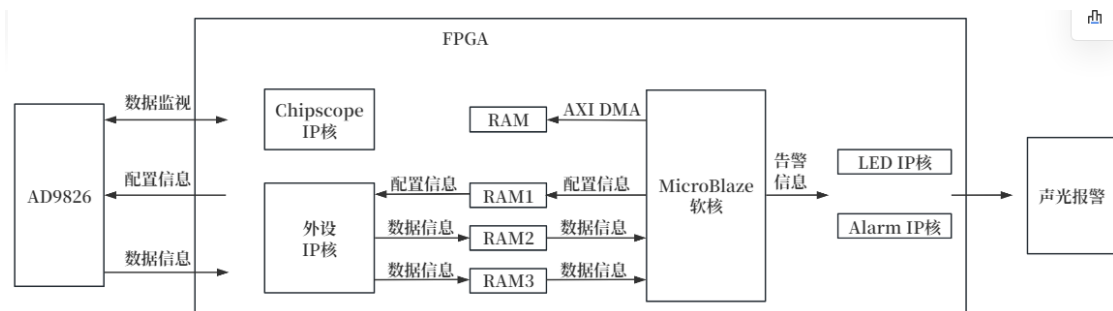


图 4 硬件平台设计结构图

硬件平台的方式已经成为主流，在满足本设计的同时为了避免资源浪费，本设计将采用 Xilinx 公司的 Spartan6 系列产品及必要的外部元件作为硬件平台进行开发。开发过程将用 HDL（Hardware Description Language）语言采用自上而下的层次化设计方法进行，根据之前总的设计目标和各个单元模块的功能依次设计。

3.1 平台硬件板卡接口设计

为了充分利用平台资源，合理配置 FPGA 的 I/O 引脚功能，确保 AD 芯片能够顺利驱动并精确采样，本文对拓展板卡进行详细设计。在对 I/O 引脚进行设计时，主要采用分区分块的设计思路，即将电源接地、工作时序、配置时序进行单独区域划分，并按照数据总线的位置进行对称分布，有效地明确了各个引脚的功能，确保时序正确，部分约束文件如图 5 所示。

NET SCLK	CLOCK_DEDICATED_ROUTE = FALSE;
NET SCLK	LOC = E16 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET SLOAD	LOC = D18 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET SDATA	LOC = F17 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET ADCLK	CLOCK_DEDICATED_ROUTE = FALSE;
NET ADCLK	LOC = K14 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET CDSCLK1	LOC = L17 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET CDSCLK2	CLOCK_DEDICATED_ROUTE = FALSE;
NET CDSCLK2	LOC = K12 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	
NET VINR	LOC = C18 IOSTANDARD =
"LVCMOS33";	

图 5 I/O 引脚约束程序

3.2 平台硬件板卡电源设计

由于 AD 芯片对电源的质量要求较高，为了给板卡提供稳定的电源供应，需单独设计一个稳定的、高频干扰小的 5V 直流电源，如图 6 所示。

直流电源采用 AMS1117 稳压器进行设计，AMS1117 内部已经集成了过流保护和过热保护，并

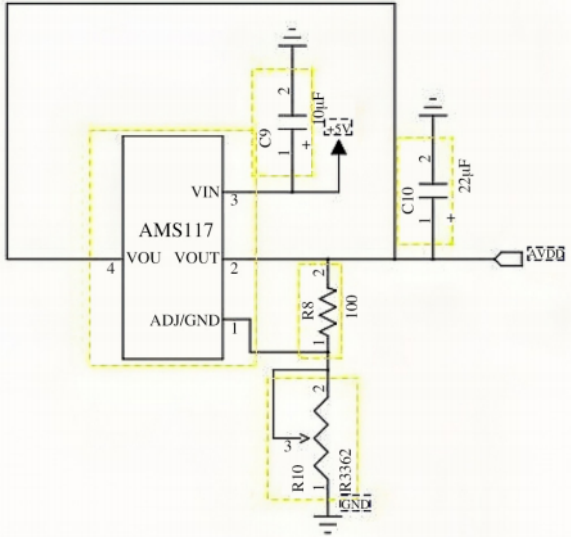


图 6 电源设计原理图

3.3 平台硬件时序设计

图 7 为 AD 芯片配置时序图，为了激活 AD 芯片的信号采集转换功能，需要对该时序进行设计。SDATA、SCLK、SLOAD 三个时序分别为存储器的配置信息、存储器的工作时钟和使能信号。AD 芯片主要有 1 至 3 通道 CDS 和 1 至 3 通道 SHA 六种工作模式^[12]，根据设计需求本课题选择了 2 通道 SHA 模式，时序如图 8 所示。

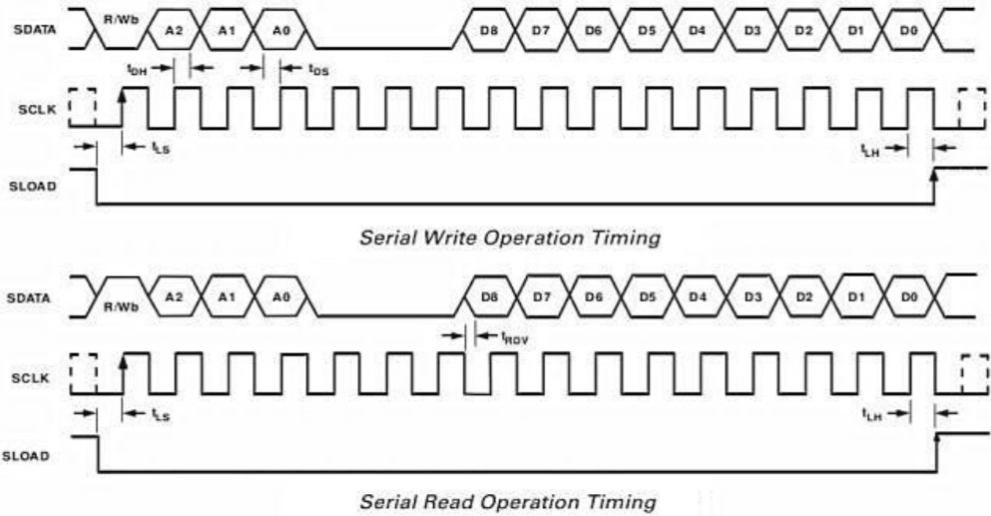


图 7 AD 芯片配置时序图

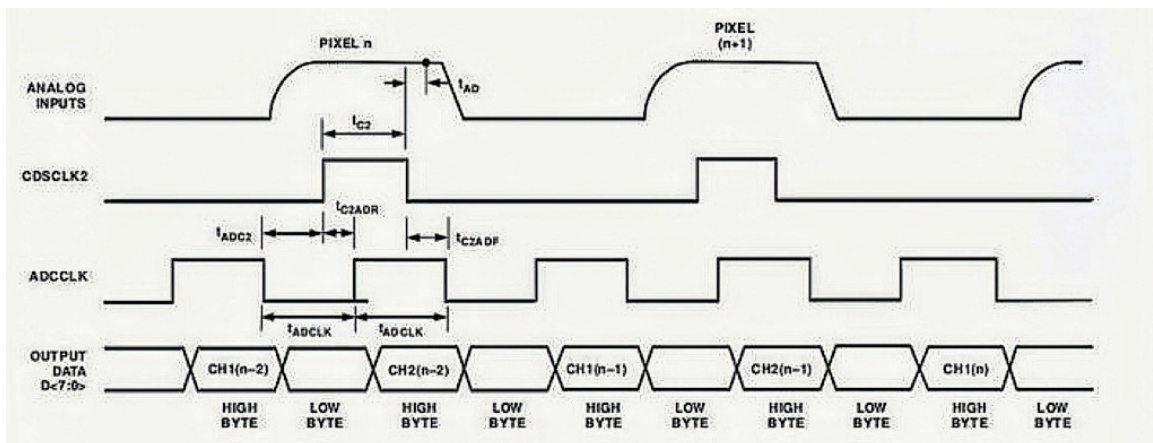


图 8 2 通道 SHA 工作时序图

CDSCLK2 是 AD 芯片的采样信号，在下降沿对输入模拟信号进行采样，在运行过程中 CDSCLK1 接地。在设计中采用 10MHz 的频率作为采样信号的主频率，用 Verilog 语言进行编写，仿真结果如图 9 所示。

示，可有效驱动 AD 芯片进行采样。

4 实验测试与结果分析

近电感应系统设计完成后，为了验证其可行

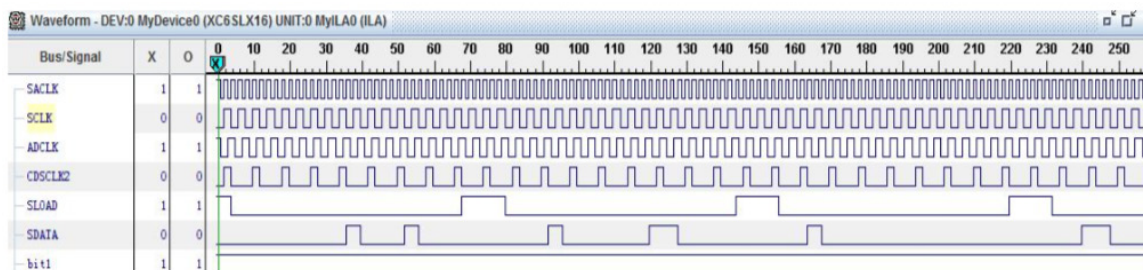


图 9 AD9826 工作时序图

性，对整体工作性能进行测试，根据电磁感应原理，通过磁场的测量得到电流的数值，从而触发近电感应报警，对作业人员进行警示。根据 10kV 运行电流 173~288A 及 110kV 短路最大冲击电流 10~20kA 计算，最小磁场强度在 3.46mT~0.52T 之间，由于作业人员不会接近带电线路，在式（1）中 r 取 1m，即：

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (1)$$

则磁场强度范围将在 0~52mT 之间，根据偏振型磁光隔离器特性曲线，如图 10 所示。

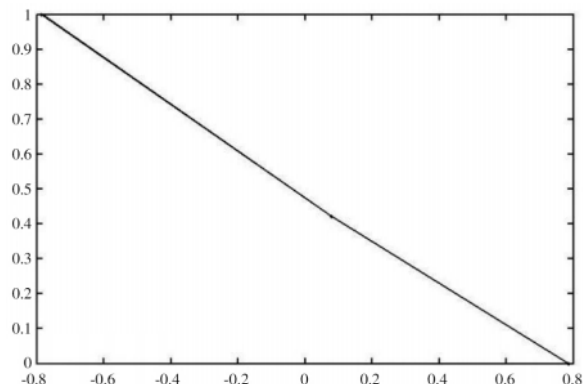


图 10 特性曲线图

数学表达式为：

$$I_m = K \cos^2(\beta + \theta) \tag{2}$$

根据式（3）整理简化得到式（4）：

$$\begin{cases} \theta_t = \mu V \oint_L H dl \\ B = \mu_0 H \\ V = KI_m \end{cases} \tag{3}$$

$$V = A_1 \cos(A_2 B + A_3) + A_1 \tag{4}$$

将试验数据代入式（4）中，利用 Matlab 中的 lsqcurvefit 函数进行非线性拟合得到， $A_1=0.2972$ 、 $A_2=-0.0126$ 、 $A_3=-1.9819$ 。将数值代入式（4）中与原数据进行误差计算及预测模拟，最大误差值不超过 3×10^{-3} ，满足近电感应装置实际使用预警条件。

5 结束语

本文以确保人身安全为出发点，根据高压输电线路停电检修现场实际需要，通过研究通信等其他领域元器件，结合嵌入式开发技术，设计高压输电线路近电感应系统，通过现场试验，具有一定的可行性和可操作性，并具备较好的并行计算和多路接口能力，可有效对高压电进行预警，避免人身伤亡事故的发生。

参考文献

[1] 马亚辉，姜学宝，周建良，等. 一种新型近电报警器的研制 [J]. 机电信息，2016（24）：39-40.

[2] 王晓辉，孙忠文，李甲宇，等. 10~110kV 带电报警型接地线的研究与设计 [C]. 2017 年江苏省城市供用电学术年会论文集，2017：134-136.

[3] 路竹青，常语录，杨钧，等. 一种具有近电报警功能的绝缘杆 [J]. 农村电工，2018，26（11）：34.

[4] 吴锦秋. 安全帽的感应验电装置研制 [J]. 技术与市场，2019，26（10）：40-41.

[5] 姜兵，陶伟，高九千方，等. 电气系统的感应报警装置设计与应用 [J]. 自动化应用，2019（5）：87-88.

[6] 叶欣欣，刘卫明. 一种特高压带电作业报警器的设计 [J]. 机电产品开发与创新，2018，31（5）：22-23.

[7] 龙亮，钟少龙，徐静，等. 微型光纤磁传感器的设计与制作 [J]. 光学精密工程，2013，21（9）：2294-2302.

[8] 周文，高维鑫，刘海波. 基于专家系统的 MNS 型低压抽屉式开关柜智能监控系统的设计研究 [J]. 电力学报，2021，36（4）：378-384.

[9] 肖引娣. 激光参数对尺带刻划精度的影响及优化研究 [D]. 西安：西安理工大学，2013.

[10] 黄楷. 飞控系统供电状态综合测试平台方案设计 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.

[11] 朱柏树. 线阵 CCD 精密尺寸测量仪的研制 [D]. 成都：西华大学，2012.

[12] 冯晓昱. 基于 DSP 的光电图象采集与处理系统的设计 [D]. 成都：电子科技大学，2010.

（收稿日期：2024-07-08）