

中压开关柜在线监测系统硬件抗电磁干扰技术研究

王小华¹, 荣命哲¹, 徐铁军¹, 蔡彬², 张杭¹, 郭媛媛¹, 王鑫³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
2. 大全集团, 江苏 扬中 225000; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

Study on Anti-Electromagnetic Interference Technology by Hardware for On-line Monitoring System of Medium Voltage Switchgear

WANG Xiao-hua¹, RONG Ming-zhe¹, XU Tie-jun¹, CAI Bin², ZHANG Hang¹, GUO Yuan-yuan¹, WANG Xin³

(1. State Key Lab. of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China;
2 DAQO Group, Yangzhong 225000, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

摘要: 从在线监测系统的电源、信号传输、PCB 布局分区、布线等方面入手, 介绍了提高在线监测系统抗电磁干扰的方法。实验证明, 采用该方法设计的在线监测系统, 抗电磁干扰性能得到较大提高, 已经通过了国家高压电器质量监督检验中心电磁兼容性严酷度等级 3 级标准的试验。

关键词: 开关柜; 在线监测; 抗电磁干扰

中图分类号: TM591

文献标志码: A

Abstract: In this paper, the methods used to improve anti-electromagnetic interference ability was introduced, especially focus on the power supply system, signal transmission, PCB subarea layout, and PCB connection layout. By using these methods presented in this paper, the anti-electromagnetic interference ability of on-line monitoring system was improved greatly, and had passed 3 degree EMC standard test.

Keywords: switchgear; on-line monitoring; anti-electromagnetic interference

0 前言

为了提高中压开关柜运行的稳定性, 国内外电力系统各运行单位越来越重视对其开展在线监测技术^[1, 2]。因此, 国内外各大专院校、研究所纷纷开展中压开关柜在线监测技术, 并取得了一些不错的研究成果^[3-12]。但是, 截至目前, 能真正应用到中压开关柜的在线监测装置并不多。究其原因, 电磁兼容性能不达标是重要因素。为此, 笔者针对中压开关柜在线监测系统的抗电磁干扰技术进行研究, 旨在提高在线监测系统的电磁兼容性能, 使之能尽快应用于我国的电力系统的中压开关柜在线监测中。

笔者分别从中压开关柜在线监测系统的电源系

统、信号传输、PCB 布局、布线等方面, 分别研究了其抗电磁干扰技术。

1 在线监测系统的硬件构架

研究的系统监测参数多、信号处理量大、功能较完善, 因此选用双 MCU 结构作为核心, 具体硬件原理图见图 1。其中, DSP 模块主要完成所有信号的采集、处理, 并将处理后的数据分别上传到上位机(计算机)和 P89V51 单片机进行显示; P89V51 单片机主要完成液晶显示、人机接口、LED 指示功能。

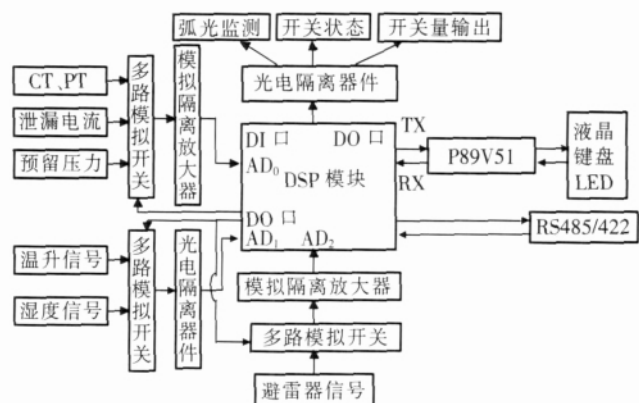


图 1 在线监测系统双 MCU 结构硬件原理图

2 在线监测系统的抗电磁干扰方法

2.1 电源系统的抗电磁干扰技术

在线监测系统选用的电源必须是正规厂家生产的、能够达到电力系统 3 级或 4 级电磁兼容性标准的开关电源。开关电源的电磁兼容性能对系统的抗电磁干扰能力影响最大。没有合格的开关电源, 要达到电磁兼容 3 级标准相当困难。

收稿日期: 2007-01-23; 修回日期: 2007-03-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助(50525722)。

作者简介: 王小华(1978-), 男, 浙江常山人, 讲师, 博士, 现从事开关电器设备在线监测与故障诊断技术研究。

对于中压开关柜在线监测系统来说,部分参数的测量需要将直流电源外供,即电源经系统主机箱给传感器供电。此时,需要对引出系统主机箱的电源进行特殊处理,以提高其抗电磁干扰能力。

共模干扰是出现于导线(信号线、电源线)与地之间的干扰,它的出现通常是由于地电位升高所引起,电容耦合引起的干扰一般都是共模干扰。如图2所示的双电源解耦电路,如果有某种原因,GNDB点地电位突变,这相当于在该点与地之间接入一个电压源,它作用于回路中所有端子与地之间,称之为共模电压。如图3所示的单电源解耦电路,在绝对平衡的电路内,+5VB和GNDB之后接入的阻抗完全相同并且两根连线完全一样,则其对地的杂散电容也完全一样,这样的情况不会出现虚假的干扰信号,只是对地电位有变化。如果共模电压太高,可能引起对地放电(反击),造成元器件损坏。随着频率的升高,连线阻抗和杂散电容的作用就越突出,只要稍有不同,由共模电压在两根线上引起的电流就不同,这样两线之间会出现干扰信号,就是所谓的共模干扰电压。差模干扰是出现于信号回路内的、与正常信号电压相串连的一种干扰。它通常是由磁耦合引起的。当有变化的外磁场与两条信号线间包围的面积相连时,则在信号回路内出现感应电压,它与有用信号相串联,共同作用于输出端。

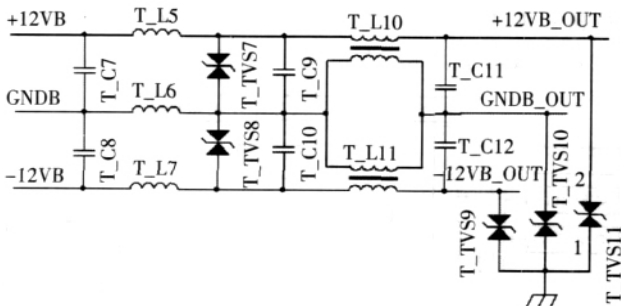


图2 双电源解耦电路

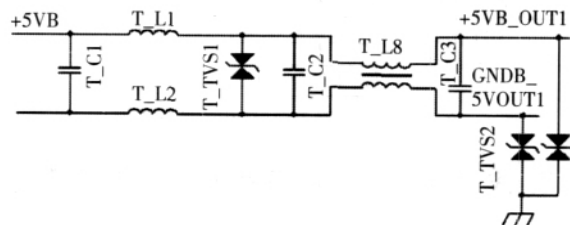


图3 单电源解耦电路

为了抑制电源地线引进的干扰,系统在硬件设计上分别针对单电源和双电源设计了如图2和图3所示的电源解耦电路。其中的电容和电感配合起来共同抑制共模干扰和差模干扰。电容和电感参数的选取都是经验值,而且要结合实际情况。这样设计可以避免电源对系统引入干扰信号,从而在一定程度上保证了系统的测量精度。

2.2 信号调理电路的抗干扰设计

在线监测系统的测量中,对于微弱电信号,如绝缘泄漏电流是微安级信号、热电偶输出的温升信号是毫伏级信号,其如果在信号处理前端就受到了干扰,后果将是非常严重的。而且,由于在线监测系统所处的电磁干扰环境,强干扰信号可能数十倍甚至数百倍于信号处理芯片的电源电压,如果如此大的干扰信号直接输入信号处理芯片,则极有可能烧毁芯片。在实验条件下,当前端的干扰信号淹没了实际信号时,即使经过硬件电路的后级放大和滤波,在示波器上观察到的波形仍然是一片混叠,还时常伴有高频分量,虽然在软件设计过程中也有一些滤波措施,但这样恶劣的输入信号势必会对系统测量精度产生较大影响。甚至更严重的情况,当信号输入端有瞬态冲击电压产生时,整个信号调理电路都有可能被击穿。为了避免上述情况发生,需要对输入信号进行信号解耦以达到抑制干扰、保护电路的目的。典型的信号解耦电路见图4,在运算放大器前端,也就是传感器信号输出端串联了10k的电阻,在放大器的正负输入端采用对称的电阻接法,这样的设计可以保证当有过电压发生时,这些保护电阻先被击穿从而起到保护电路后级的作用。

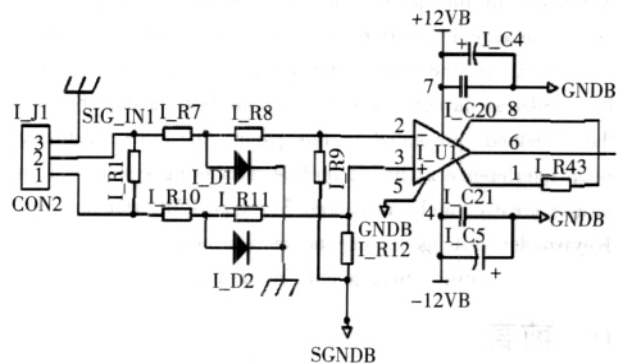


图4 信号解耦典型电路

2.3 印刷电路板的抗干扰设计

印刷电路板是系统中元器件、信号线和电源线的高密度集合体。在线监测系统的印刷电路板设计主要需要考虑以下几个问题

(1) 电路板的合理布局

电路板的布局对于提高电磁干扰能力非常重要。在线监测系统的电路板布局时,要充分考虑到传感器用前端电源、地线与单片机用后端电源、地线的区分。坚决避免在电路板布局时将分别使用前、后端电源的器件布置在同一区域。电路板布局完成后,要非常明显地能区分出前、后端电源的布线区域。图5所示隔离带上面区域为后端电源(单片机及其外围器件用)区域,隔离带下方为传感器端的前端电源,通过隔离带可以明显地区分。

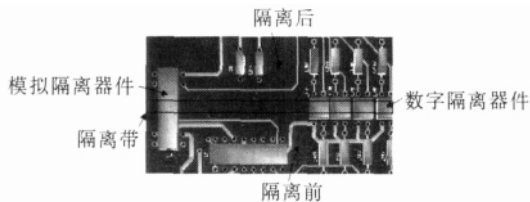


图5 电路板电路布局及隔离带应用

(2) 接地线的处理

接地技术是抑制噪声干扰的重要手段,良好的接地可在很大程度上抑制系统内部噪声耦合,防止外部干扰的引入,提高系统的抗干扰能力。一般系统的“地”可分为两种,一种是实际地,也就是地球的大地,另一种是参考地,仅用作电路中的基准电位,如单电源地负端或双电源的公共端。由于地线上存在分布阻抗(分布电阻、分布电容和分布电感),各部分流回电源参考地的电流就会在地线上产生干扰电压,使各电路地电位相互影响,造成地电位不准。由于分布参数多为电抗,因此频率越高,干扰越大^[13]。本系统中参考地有两种,分别为数字地和模拟地。在数字回路中,地线上通常会串入尖峰脉冲,而数字回路中高低电平有一定的浮动范围,因而这种尖峰不会对数字信号造成太大影响,但是对于模拟信号回路,尤其是对小电压信号回路影响很大,严重时甚至会淹没正常信号,导致测量信号的错误。基于此原因,在设计模拟和数字混合的系统时将两系统的地分开布线,最后把各部分电路的地线分别引入电源的参考地端,即“一点接地”。由于此时地线上的共阻抗降低到了最低限度,因此很大程度上消除了共阻抗干扰。在印刷电路板的制作中,将地线加宽以尽量减小地线阻抗,稳定接地电位,提高抗噪声能力,同时将地线构成闭环以取消地电位差。

(3) 电源线的处理

根据地线电流的大小,加粗导线的宽度。为了减小电源的纹波对其它线路的干扰,在一定的间隔上加高频噪声吸收电容。在布线时将电源线和地线的走向与数据传输的方向一致,可增强抗干扰能力^[14]。

(4) 去耦电容的配置

在印刷电路板的各个关键部位配置去耦电容被视为硬件电路设计的常规做法。去耦电容能吸收和提供集成电路逻辑门动作的瞬间充放电能量,也可旁路器件的高频噪声。由于每块印制板中的各芯片工作时会产生频率不同的信号,为了防止各个集成芯片和各印制板的信号通过电源耦合互相干扰,一般采用去耦法。本设计中在主要芯片的电源端和地线间并联 $0.01 \mu\text{F}$ 的高频陶瓷电容和 $10 \mu\text{F}$ 的钽电容(高频阻抗小,漏电流小);在电源模块输出端的各等级电压和相应的地之间跨接了高频和低频滤波电容。此外,在每块印制板的4个角及中间的电源线和地线之间还并接1只 $10 \sim 100 \mu\text{F}$ 低频电解电容和

1只 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{F}$ 高频陶瓷电容去耦^[12]。还可以在各个印制板上加装阻容滤波器或分别再加入一级集成稳压电路,以防止板与板之间的相互干扰。

(5) 隔离带的应用

为了达到隔离的目的,必要时可以在印刷电路板上刻槽,例如在信号解耦电路的保护电阻中间刻槽可以增加过电压的爬电距离,从而达到保护电路板不被击穿的目的。又例如在后级信号条理电路的光耦器件处刻槽可以起到完全隔离地线的作用。具体应用见图5,黑色方框为隔离带,即刻槽部分。

(6) 布线方法的改进

合理布线并尽可能避免各种信号线之间的电磁耦合。在电路布线中注意以下几点: 电路连线要短,对一般信号传输线可用双绞线。采用双绞线,一是可减少感应面积,二是可使感应电势相互抵消,缩小双绞线的节距可以大大提高抑制比; 对重要的控制信号传输线,除了自身采用同轴电缆加以屏蔽外,在敷设时还应专设屏蔽槽或传线铁管进行一次屏蔽; 信号线与电源线必须分开布线,特别是信号线不能与交流供电线平行布线,并应相距一定距离。各种信号传输线要尽量分开独立布线,交流、直流要分开; 输入、输出线要分开,并应远离强电设备等干扰源。若系统有多块印制板,则强、弱信号电路要分别布置在不同的板上。若系统仅有一块印制板,则也必须按电路性质分开排列,不要交叉混杂; PCB布线时,电源线和地线要尽量粗并远离信号线,采取辐射状,避免形成回路,并尽可能覆盖印制板的空余处,防止在地线上形成较大的电位差。模拟地、数字地、电源地等要各自分开走,自成系统,然后把它们汇集连接到一个公共接地点。信号线在板上走线时尽量靠近地线,同时应远离大电流信号线及电源线。数字信号线既会干扰小信号线,又会受大电流信号线及电源线的干扰,也要合理安排。凡是容易串扰的两条线,要尽量不使他们相互靠近和平行敷设。在双面板上,正反面的走线尽可能垂直,以减少电磁耦合。走线还应尽量短并且少过孔。

2.4 其它抗干扰设计

(1) 屏蔽盒屏蔽和传输线屏蔽

在线监测系统中,采用了屏蔽盒和传输线屏蔽。通过屏蔽体把空间进行电场、磁场或电磁场耦合的部分隔离开来,割断其空间的耦合通道。对于绝缘泄漏电流测量传感器采用了多层屏蔽,每一层屏蔽采用不同的材料,这样大大降低空间的电磁干扰和噪声耦合,有较好的抗干扰效果。此外,信号传输线使用了带屏蔽的双绞线来消除长线传输可能引入的空间干扰。

(2) 光电隔离和模拟隔离

在线监测系统中可采取的隔离措施有光电隔

离、模拟隔离。模拟电路中有时需要数字 I/O 信号,如多路选择开关的片选信号,开关量输入输出的 I/O 信号,这些信号涉及到模拟部分和数字部分,因此在两者之间加光电隔离,可以很好地消除两者之间可能存在的串扰。同样,对模拟信号进行数字采集也会存在上述问题,这时可以加模拟隔离放大器进行模拟信号的隔离。总之通过隔离措施可以将电路上的干扰源和易受干扰的部分隔开,其实质就是切断干扰通道,从而达到抗干扰的目的^[15]。对于输入的模拟信号,串接磁环、并接高压磁片,然后采用隔离运方 ISO124 进行信号的隔离,防止信号端的干扰串入控制单元;对于数字信号,利用 TLP521-4 进行隔离。对于输出的开关量,采用光电耦合器件进行光电隔离后输出。

(3) 系统接地的处理

对于电子系统来说,“地”可以分为两种:一种是“大地”,另一种是“工作基准地”;实践证明,良好地接地可以在很大程度上抑制系统内部噪声耦合,防止外部干扰地侵入,提高系统地抗干扰能力^[16]。反之,若接地处理不好,反而会导致噪声耦合。大地对于保证设备安全和人身安全是至关重要的。它能够提高静电屏蔽通路,降低电磁感应噪声。笔者所设计的屏蔽接地都是接“大地”,而不是工作基准地。

除了上述几种重要的抗干扰措施,系统中还可对所有的信号输入输出端都使用了 TVS 管和稳压管,这样不仅具有保护系统的作用,而且还可以有效地抑制断路器动作时产生的脉冲干扰;对模拟小信号采用高精度的电阻进行耦合,并采用共模抑制比非常高的仪用运算放大器对传感器出来的微伏级信号进行前级放大,以此保证信号的提取精度,在后续信号处理过程中也采用了相应的滤波措施,滤除一些杂散的干扰信号,保证了最后的计算精度。在通信口输入端加装了暂态电压抑制器(TVS),以避免从通信通道耦合入系统的强电脉冲干扰;CMOS 器件的输入阻抗很高,若输入端浮空,会降低其抗干扰能力,栅极感应的静电也可造成栅击穿,因此不用的输入端应该和地线相连。对于动作时可能会产生火花和电磁干扰的按钮和继电器等部件,除了采用光电隔离外,干扰在其节点处跨接了 RC 电路加以吸收,以减小向空间辐射电磁干扰。对于频率发生单元(时钟芯片的晶振和 DSP 的频率单元),设计中尽可能地减小其相关元件的布板面积,并用屏蔽线将其包围以减小向外辐射干扰。在电路板的总体设计中,按照信号类型进行分块布置印刷线路板,避免了高频数字信号和易产生电磁辐射的输出控制部件对模拟信号的干扰。

3 结语

针对中压开关柜在线监测系统的电磁干扰特点,从电源、信号传输、PCB 布局、布线等方面详细介绍了提高在线监测系统抗电磁干扰能力的措施。通过这些措施的实施,笔者项目组开发的中压开关柜在线监测系统在国家高压电器质量监督检验中心进行了 EMC 性能测试,并通过了电磁兼容性严酷度 3 级的试验。

参考文献:

- [1] 李建基. 高压开关发展评述[J]. 电气时代, 2005(11): 26-30.
- [2] SWEETSER C, BERGMAN W J, MNTILLER G, et al. Strategies for Selecting Monitoring of Circuit Breaker [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 742-746.
- [3] MLADEN KEZUNOVI, REN Zhi-fang, GORAN LATISKO, et al. Automated Monitoring and Analysis of Circuit Breaker Operation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 2005, 20(3): 1910-1918.
- [4] COSGRAVE J, STANGHERLIN S, HUMPHRIES J, et al. Intelligent Optical Fiber Monitoring of Oil-filled Circuit Breakers [J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 1999, 146(6): 557-562.
- [5] 马强, 荣命哲, 贾申利. 基于振动信号小波包提取和短时能量分析的高压断路器合闸同期性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 149-154.
- [6] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 短时能量分析法在断路器机械状态监测中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 1301-1305.
- [7] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70.
- [8] 程磊, 李正瀛, 尹小根, 等. D-S 证据理论在断路器故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 48-51.
- [9] 黄瑜琄, 钱家骊. 高压断路器机械状态的监测 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(4): 79-81.
- [10] KAYANO P S D, SILVA M S, MAGRINI L C, et al. Distribution Substation Transformer and Circuit Breaker Diagnoses with the Assistance of Real-time Monitoring [C]// IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition Latin America, 2004: 185-189.
- [11] DENNIS S S LE, BRIAN J LITHGO, ROB E MORRISON. New Fault Diagnosis of Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 2003, 18(2): 454-459.
- [12] 王小华, 荣命哲, 贾申利, 等. 中压开关柜在线监测装置的研制及其抗电磁干扰设计[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 17-20.
- [13] 全国无线电干扰标准化技术委员会, 全国电磁兼容标准化技术委员会, 中国标准出版社. 电磁兼容标准汇编 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [14] 刘君华. 现代检测技术与测试系统设计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [15] 杨吟梅. 变电站内电磁兼容问题(4)-抑制电磁干扰的措施[J]. 电网技术, 1997, 21(5): 67-74.
- [16] 陈金玉. 综合自动化系统中电磁兼容的接地技术及其实践[J]. 电力设备, 2004, 5(2): 52-54.