

微机继电保护装置的电磁兼容设计

苏惠峰¹, 高莉², 段新³, 负保记⁴

(1. 西安科技大学电气控制与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安供电局生技处, 陕西 西安 710032;
3. 长庆油田矿区事业部, 陕西 长庆 710021; 4. 西安西瑞保护控制设备有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为满足高速发展的电力系统对微机保护装置提出的更高要求, 进行了继电保护装置硬件抗干扰设计的研究。针对研发初期的机箱设计, 中期的线路板设计和后期的试验改进三个阶段并结合西瑞公司的 XR-200 系列保护装置对微机保护装置的电磁兼容 EMC (electromagnetic compatibility) 设计进行了全面研究, 提出一些方法和措施。经过论证和试验证明效果良好, 顺利通过相关测试。这些方法措施具普遍性, 对继电保护装置的开发研制有一定的借鉴作用。

关键词: 微机继电保护; 电磁兼容; 抗干扰

Research on the EMC of microcomputer-based relay protection

SU Hui-feng¹, GAO Li², DUAN Xin³, YUN Bao-ji⁴

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Power Supply Bureau, Xi'an 710032, China;
3. Oil Company of Changqing, Changqing 710021, China; 4. Xi'an Xirui Protection and Control Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the rapid development of power system, the anti-interference ability of the micro computer-based relay protection device needed to be improved much more. This paper discusses the design of EMC for micro computer-based relay protection based on the case design, circuit board design and EMC tests, and brings forward some kinds of methods. The test results verify that these methods can be taken into action which are useful to the microcomputer-based relay protection device designers.

Key words: microcomputer-based relay protection; EMC; anti-interference

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0097-05

0 引言

微机继电保护装置已经在电力系统中得到广泛应用, 但作为一种电子装置, 其抗电磁干扰能力较弱。为了进一步提高微机继电保护装置的性能, 使其得到更广泛的应用, 应特别注意解决好电磁兼容性问题。

我们知道, 电子装置的研发如果在开始阶段没有对 EMC 设计给予充分考虑, 那么在产品成型后再采取补救措施将付出沉重代价。但是, 在当前情况下, 想采用系统设计法使产品一次性通过电磁兼容试验是不现实的。本文针对微机继电保护装置的实际情况, 采用初期机箱设计、中期线路板设计和后期试验改进三阶段相结合的综合设计方法来考虑微机继电保护装置的 EMC 设计。

EMC 设计是一个复杂的综合性工程, 影响因素众多, 问题交错复杂, 但是处理时我们都应该紧紧围绕电磁干扰的三个要素即骚扰源、耦合途径和敏

感设备来进行。具体地讲就是消除或减弱骚扰源的影响; 切断耦合途径; 降低敏感设备的敏感度。其中最常用的方法就是屏蔽、滤波、接地。屏蔽用于切断空间的辐射发射途径。滤波用于切断通过导线的传导发射途径。接地的好坏则直接影响到设备内部和外部的电磁兼容性。在微机继电保护装置的各个设计阶段我们都将以此为基础来考虑电磁兼容问题。

1 机箱设计

微机继电保护装置 EMC 设计的第一步, 首先应该考虑机箱的屏蔽效能。微机继电保护装置一般由安装在机箱内的多个电路板插件连接组合而成, 所有信号通过接线端子引入封闭式金属外壳机箱。机箱按照有无总线板分为有总线板的和无总线板的。无总线板的模块间用联线或者扁平电缆相连, 由于存在联线不美观、可靠性差、强弱电容易交叉造成抗干扰能力差等问题, 已逐渐淘汰^[1]。

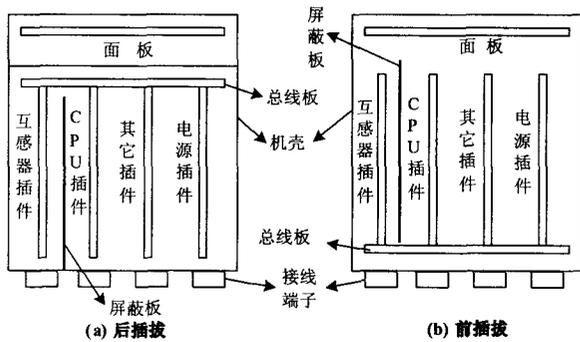


图 1 微机继电保护装置机箱结构示意图

Fig.1 Structure of microcomputer-based relay protection device case

有总线板的机箱通常分为前插拔和后插拔两种方式，如图 1 所示。后插拔方式总线板在装置前面，大电流、电压经过互感器插件进行变换、滤波后到达总线板。前插拔方式大电流、电压先经过安装在总线板上的端子后才到互感器插件，变换、滤波后又回到总线板。后插拔式因为实现了强弱电分离，在进行 EMC 设计方面比较方便。但是，后插拔方式因其装置后边多个插件相互独立，缝隙较多，屏蔽完整性受到破坏，而前插拔不存在这种问题，从这点上看前插拔方式的抗干扰性能更为优良。从各厂家生产的装置情况来看，两种方式都比较普遍，但因为前插拔现场维护更方便，所以使用更广泛一些。对于 35 kV 以下的微机继电保护装置，因原理简单，电路较少，还可以考虑一种结构紧凑、体积较小的筒式结构^[2]。

由于电磁场通过孔缝时的损耗要比穿过金属本体时的损耗小得多，所以讨论机箱的屏蔽效能时主要考虑孔缝的屏蔽效能。比较常用的做法是在两块金属板的接缝处使用导电衬垫或者增加缝隙的深度。导电衬垫具有良好的弹性，保持了电连续性，增加了屏蔽效能。而根据电磁场理论，任何具有一定深度的缝隙都有波导性质，因此增加缝隙的深度就可以增加电磁波通过缝隙时的衰减程度。其它的还有在接缝处涂导电涂料，开孔覆盖金属丝网等措施来增加屏蔽完整性。

2 电路板设计

一般来说，电磁干扰主要是以传导的方式通过各个端口进入保护装置内部的，所以电路板的 EMC 设计尤其重要。电路板级的电磁兼容设计主要从元器件选择、电路设计、接地设计、印制电路板 PCB (printed-circuit board) 布线四个方面考虑。

2.1 元器件选择

元器件的选择应将产品功能和电磁兼容性结合起来考虑。有源器件固有的电磁敏感度特性和电磁骚扰发射特性是电磁兼容性方面最有必要考虑的两个因素。

灵敏度和带宽是评价元件电磁敏感性的最重要的参数。灵敏度越高，带宽越大，抗扰度越差。模拟器件的灵敏度以器件固有的噪声为基础，将器件固有噪声信号强度或最小可识别的信号强度称为灵敏度。数字逻辑器件的带内敏感度特性取决于噪声容限或噪声抗扰度，噪声容限即叠加在输入信号上的噪声最大允许值，噪声抗扰度可表示为：

$$\text{噪声抗扰度} = \frac{\text{支流噪声容限 (V)}}{\text{典型输出翻转电压 (V)}} (\%)$$

通过对常用逻辑器件电磁敏感特性的比较，推荐使用 CMOS、HTL 器件。

数字逻辑器件是一种骚扰发射较强、最常见的宽带骚扰源。逻辑器件的电磁骚扰发射包括传导骚扰和辐射骚扰。传导骚扰可通过电源线、信号线、接地线等金属导线传输；辐射骚扰可通过充当天线的互连线进线辐射。传导骚扰随频率成正比增加，辐射骚扰则随频率平方而增加，频率越高越容易产生辐射。所以，我们最好选择电路功能允许的最慢的上升时间和下降时间的数字逻辑芯片，以限制产生不必要的高频分量。

元器件封装有两种基本形式，即有引脚元件和无引脚元件。有引脚的元件由于寄生效果，在引脚上会产生一个小电感和一个小电容。而无引脚元件其寄生效果要小的多。所以从电磁兼容性能来看，首先选择表面贴装元件，其次考虑放射状引脚元件，最后考虑轴向平行引脚的元件。

有源元器件的电源电压也是一个需要考虑的重要因素。我们应尽量选择板级电源等级的器件以减少电压的变换次数；避免产生和使用不必要的高逻辑电平；还要考虑功耗等因素。

虽然每一种电子元件都有它各自的特性，设计时需要仔细考虑，但是，总的来说，元器件的选择应在保证性能要求的前提下，优先选择频谱窄、功耗低、集成度高、引线短、电源电压低的器件。

在大多数情况下，电路的基本元件满足电磁特性的程度将决定着功能单元和最后的设备满足电磁兼容性的程度。所以下面将讨论一些常见的用来减少或抑制电磁兼容性的电子元件和电路设计技术。

电阻是电路中最广泛使用的元件之一，对于有引脚的电阻，应首选碳膜电阻，其次是金属膜电阻，最后是线绕电阻。由于表面贴装元件具有低寄生参

数的特点, 因此, 表面贴装电阻优于有引脚电阻, 选择时首先考虑。

电容因为其通交流隔直流的特性应用十分广泛, 最常见的用途是作为去耦电容加在每个集成片的电源端子和接地端子之间。去耦电容容量的选择可由式(1)决定:

$$C = \frac{\Delta I}{\Delta U / \Delta t} \quad (1)$$

式中: ΔI 为门电路开启时所需瞬时电流最大值; Δt 为门电路开启所需时间, 一般为脉冲上升时间; ΔU 为电容器上允许的电压跌落。

选择去耦电容时, 除了考虑电容值外, 等效串联电阻 ESR (equivalent series resistance) 值也会影响去耦能力, 应该选择 ESR 值低于 1Ω 的电容。

在继电保护装置的 EMC 设计常常用到铁氧体磁珠。铁氧体元件是很好的吸收性滤波器, 应用十分广泛, 其阻抗可表示为:

$$Z_s = j\omega L_s + R_s = j\omega L_0 \mu \quad (2)$$

其中: $L_0 = \frac{4\pi \times 10^{-9}}{C_1} \times 10^{-9}$, $C_1 = \frac{2\pi}{H \ln \frac{D_0}{D_1}}$

式中: ω 为角频率; L_0 为空心电感; μ 为复磁导率; C_1 为几何尺寸; H 为铁氧体磁珠长度; D_0, D_1 分别为铁氧体磁珠的外径、内径。由式(2)可看出, 铁氧体对干扰的抑制程度不仅与其本身的值有关, 还与其几何尺寸有关, 磁珠内径越小、外径越大、长度越长, 其抑制效果越好。铁氧体是非线性导磁材料, 在饱和情况下, 铁氧体磁环的作用将消失, 在实际选型时要充分考虑到这个问题^[3]。

2.2 电路设计

微机继电保护装置一般由电源回路, 交流信号采集回路, 开入、开出回路和 CPU 及其外围电路等组成。由于交流信号采集回路, 电源回路和开入、开出回路直接和外部电路相连, 容易受到干扰, 这里将详尽论述。

交流信号采集回路和一次系统互感器直接相连, 很容易受到一次强电系统来的各种干扰影响。装置板载小互感器虽然具有一定的隔离和屏蔽作用, 但是在进入模数转换之前进行滤波还是很有必要的。不同结构的滤波电路适合于不同的源阻抗和负载阻抗。实际电路的阻抗很难估算, 特别是高频时, 由于电路寄生参数的影响, 电路的阻抗变化很大, 而且电路的阻抗还与电路的工作状态有关, 再加上电路阻抗在不同的频率上也不一样。因此实际

中究竟选择哪一种结构的滤波器有效主要还是通过试验来确定^[4]。西瑞公司的 XR-200 系列保护装置采用经典的两级 RC 低通滤波电路, 其传递函数为:

$$A(S) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) S + 1} \quad (3)$$

若取 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 则其幅频特性为:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2}} \quad (4)$$

$$20 \lg A(\omega) = -20 \lg \sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2} \quad (5)$$

显然, 随着频率 $\omega=2\pi f \rightarrow \infty$, 滤波器的输出电压衰减逐渐增加, 起到低通滤波效果。我们在交流输入端口加上快速瞬变脉冲, 经过滤波器前后的波形如图 2、图 3 所示。通过对比明显可见该滤波电路对高频干扰的抑制作用效果良好。

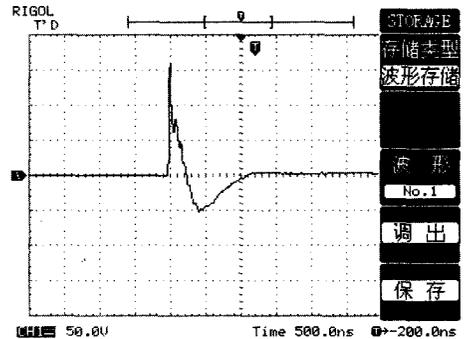


图 2 快速瞬变干扰经过滤波器前的波形

Fig.2 Output wave without improved filter under EFT

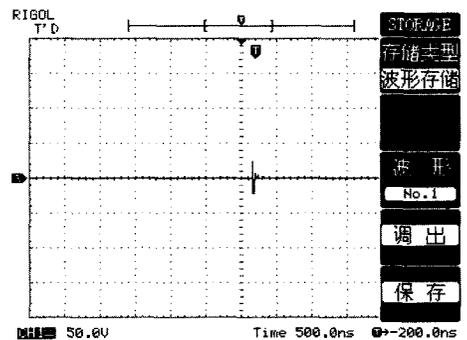


图 3 快速瞬变干扰经过滤波器后的波形

Fig.3 Output wave with improved filter under EFT

微机继电保护装置开入、开出回路的 EMC 设计中广泛地用到光耦器件。开入回路根据现场要求经常设计为直流 220 V 或者 110 V 电源供电, 脉冲量的采集一般设计为直流 24 V 供电, 光耦将这些采集信号变为 CPU 可以接受的电压后就可直接送给 CPU 进行处理。开出回路一般是 CPU 通过控制光耦的发光二极管的正极性为高电平, 负极性为低电

平使光耦导通,从而使继电器完成出口。光耦不但使得强弱电分开,而且通过光强传输几乎完全切断了两个电路的地环路,使得共地线耦合得到很好控制。有时候一级光耦设计不能达到要求可以考虑使用两级或多级。因为光耦器件存在瞬态饱和现象,所以尽量选取速度较慢、驱动电流较大、原副方杂散电容值较小的光耦器件,可以满足开关量输入、输出回路对光耦器件的要求^[5]。开入回路为了满足55%额定电压可靠不动,70%额定电压可靠动作的继电器反措要求,还要选择离散度小的光耦。

电源回路是微机保护装置的重要回路之一。电源回路的各种干扰如果没得到控制,可能会传导到各个插件和元器件,使得微机保护装置内芯片逻辑出错、程序跑飞、装置死机等。所以电源回路的电磁兼容设计必须采取有效的措施。首先是选用稳定性好的模块电源,最好选用技术实力较强的专业电源厂家的产品;其次是要进行很好的滤波,电源部分抗干扰设计一般采用高频扼流线圈+铁氧体磁珠+旁路电容的措施;此外,采用分布式电源供电,两级直流隔离,各模块供电电源相互独立的方法,也可以大大减小电源端口的干扰对于内部数字电路的影响^[6,7]。为了有效地防止浪涌等破坏性试验将电源模块烧坏,应在电源输入端口加氧化锌压敏电阻或放电管来抑制过电压^[8]。

2.3 接地设计

在电子设备中,接地是控制干扰的重要方法。信号接地能给高频干扰电压提供低阻抗通路,使系统稳定工作;安全接地可以防止雷击,防止电荷积累引起火花放电等;如能将接地和屏蔽正确结合起来使用,可解决大部分干扰问题。

对于微机继电保护装置而言,因其工作在强电磁场环境,安全接地是很必要的,各个厂家的装置也都设有专门的接地螺栓使装置外壳和现场地网直接相连。而信号接地方面对微机保护装置来说要特别注意数字地和模拟地的处理。如果把模拟地和数字地大面积直接相连,数字逻辑电路会对模拟电路造成严重干扰。如果不接在一起就是“浮地”,存在压差,容易积累电荷,造成静电。通常的方法是用磁珠、电容、电感或零欧姆电阻将数字地和模拟地相连。磁珠的等效电路相当于带阻滤波器,只对某个频点的噪声有显著抑制作用,使用时需要预先估计噪点频率,以便选用适当型号。对于频率不确定或无法预知的情况,磁珠不合适。电容隔直通交,造成浮地。电感体积大,杂散参数多,不稳定。零欧姆电阻相当于很窄的电流通路,能够有效地限制环路电流,使噪声得到抑制。而且电阻在所有频带上

都有衰减作用,这一点比磁珠效果要好。XR-200系列微机保护装置通过零欧姆电阻将数字地和模拟地相连。

2.4 印制电路板设计

PCB的电磁兼容设计主要从布局、分层和布线三方面来考虑。

确定了PCB板尺寸后先进行物理分区和电气分区,确定元件在板上的位置。布局时,首先做好不兼容分割。元件的位置应按电源电压、数字及模拟电路、速度快慢、电流大小等进行分组,以免相互骚扰。其次,在安装、受力、受热和美观等方面满足要求。器件布局要合理,最好以每个模块的核心元件为中心,其它元件围绕在核心元件周围。整个板子元件分布均匀、整齐、紧凑。

微机继电保护装置的CPU插件通常采用四层板或六层板。多层板减小了地环路的面积,降级了差模辐射,维持全程走线阻抗的一致性,减少了相邻走线间的串扰等。PCB的分层应该是很讲究的,合理的分层不但可以降低系统的射频发射,更可以提高系统的性能,最典型的的就是保证信号的完整性^[9]。

器件布局、PCB分层等基本框架定好后就该布线了。布线时先布置地线、电源线、再安排时钟等高敏感线、高速信号线,最后考虑低速信号线。印制导线的布设要尽可能的短,宽度要根据承受的电流大小而定;印制导线的间距必须要满足电气性能要求,增大走线的间距可以减少电容耦合的串扰;敏感的高频线布在远离高噪声电源线的地方,公共地线布置在线路板的边沿部分;平行地布电源线和地线可以使PCB电容达到最佳。

3 实验结果及改进措施

通过前两个阶段的精心设计,我们进入第三阶段,将对研制出来的产品进行全面测试,在测试中采取措施进一步提高装置的抗干扰水平。

XR-200系列微机保护装置基本上通过了全部相关电磁兼容测试项目,只是在电快速瞬变脉冲群干扰试验过程中出现了两个问题:一是开入端口加上四级干扰后部分回路会误发报文,干扰去除后恢复正常;二是交流端口加入四级干扰会发生花屏,指示灯微微闪烁,干扰去除后,指示灯闪烁现象消失,但花屏现象需要复位后才能消失。

经过分析发现开入各回路由于信号线平行,所有回路公用同一个信号回流端,造成共阻抗耦合。由于保护装置应用的是快速光耦,其动作的内部延时非常短,其典型延时为2~10 μs ,仅仅依靠光隔

的内部延时是无法躲过外部的干扰的, 瞬态尖峰脉冲干扰电压使光耦误动作。我们采用对瞬态尖峰电压抑制效果较好的二极管来处理该问题。通过在公共信号回流线上加上几个二极管, 该问题得到很好的解决。

在交流插件加上一个屏蔽罩并没有改变液晶的花屏问题, 经过测试和讨论判定液晶花屏主要还是干扰通过传导的方式进入液晶模块的。于是我们对交流滤波电路进行了改进, 在该滤波器的前一级加上一个对共模干扰具有良好效果的双头多孔磁珠 FB_1 , 在两级之间加上一个对差模干扰具有较好效果的双头多孔磁珠 FB_2 , 其结构如图4所示。改进后交流端口能很好地通过四级干扰试验, 也不再造成液晶的花屏现象。

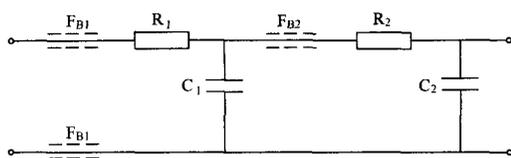


图4 两级RC低通滤波电路

Fig.4 Upper limiting filter circuit

各个厂家保护装置各不相同, 再加上电磁兼容问题千变万化, 因此后期的改进措施也没有统一标准, 除了常用的一些方法外, 还可以采取一些软件方法来改进装置的电磁兼容性能。

4 结论

保护装置“下放”现场的发展趋势使得微机继电保护装置的电磁兼容环境越来越恶劣, 这对保护装置的EMC设计提出了更高的要求。本文将电磁兼容设计与微机保护装置设计流程相融合, 从保护装置设计的各个阶段提出了相应的抗干扰措施, 这些方法和技术应用于西瑞公司的XR-200系列微机保护装置的各个阶段, 效果良好。该系列微机保护装置电磁兼容性能指标满足GB/T14598、GB/T17626标准中规定的最严酷等级的要求, 已经投入市场, 取得了明显的社会和经济效益。

参考文献

- [1] 李钢, 王善祥, 苏文辉, 等. 微机保护通用平台的分析和研究[J]. 继电器, 2005, 33(14): 29-31.
LI Gang, WANG Shan-xiang, SU Wen-hui, et al. Analysis and Studies on Universal Platform of Relays[J]. Relay, 2005, 33(14): 29-31.
- [2] 宝安群, 王佳. 微机保护装置机械结构设计中的电磁屏蔽措施[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 55-57.

BAO An-qun, WANG Jia. Electromagnetic Shielding Measures in Relay Case Design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 55-57.

- [3] 兀鹏越, 焦尚彬, 赵黎明, 等. XR2000型微机保护装置的瞬变脉冲群试验及抗扰措施[J]. 继电器, 2005, 33(3): 75-78.
WU Peng-yue, JIAO Shang-bin, ZHAO Li-ming, et al. Electrical Fast Transient /burst Testing of XR2000 Microprocessor-based Protective Device and Its Anti-interference Methods[J]. Relay, 2005, 33(3): 75-78.
- [4] 吕文红, 郭银景, 等. 电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [5] 蔡敏, 程利军. 光耦器件瞬态饱和对微机保护装置的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 72-75.
CAI Min, CHENG Li-jun. Research on Transient Saturation of Opto-couplers for Electrical Fast Transient/burst[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 72-75.
- [6] 梁志成, 傅静波, 李富同, 等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 65-68.
LIANG Zhi-cheng, FU Jing-bo, LI Fu-tong, et al. Electrical Fast Transient Burst Immunity of Protection Equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 65-68.
- [7] 冯利民, 湛平平, 陈玮, 等. 提高开关电源抗EFT/B干扰性能的研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 78-82.
FENG Li-min, ZHAN Ping-ping, CHEN Wei, et al. Study on Improving the Immunity of SMPS to EFT/B Tests[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 78-82.
- [8] 彭红海, 周有庆, 王洪涛, 等. 微机保护装置抗干扰技术的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 49-53.
PENG Hong-hai, ZHOU You-qing, WANG Hong-tao, et al. Anti-interference Technology for Microprocessor-based Protection[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 49-53.
- [9] 顾海州, 马双武. PCB电磁兼容技术设计实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2008-10-08

作者简介:

苏惠峰(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护装置开发; E-mail: xiaoxian153@tom.com

高莉(1968-), 女, 高级工程师, 主要从事变电站综合自动化系统相关工作;

段新(1973-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变电站运行相关工作。