

微机继电保护硬件系统的抗电磁干扰设计策略

黄 蕙

(重庆工业职业技术学院自动化系, 重庆 401120)

摘要: 针对电磁干扰可能导致的误跳闸或误报警, 提出了改进硬件平台系统的抗电磁干扰设计理念。对微机继电保护系统所处的电磁环境, 电磁干扰源、抗电磁干扰机理和数字电路在干扰下的行为作了详细剖析, 研究了设计电磁兼容性问题, 总结出了微机保护系统硬件设计中应采取的抑制电磁干扰的措施。实验结果表明, 所总结出的合理布局与布线及良好的接地措施是可行和有效的。

关键词: 微机保护硬件系统; 电磁兼容; 电磁干扰; 抗电磁干扰策略

Design strategy of electromagnetic anti-jamming for hardware system of microcomputer relay protection

HUANG Hui

(Dept of Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

Abstract: Aiming at the mistake switch and misinformation resulted from electromagnetism interference, the paper proposes an improved design thought of electromagnetic anti-jamming in hardware platform system. The electromagnetism environment located by microcomputer relay protection system, sources of electromagnetic interference, mechanism of electromagnetic anti-jamming, and behavior of digital circuits under the interference are analyzed in detail. Also the design compatibility of electromagnetic anti-jamming is studied, and the measures of electromagnetic anti-jamming should be taken in the hardware design of microcomputer relay protection system are summarized. The experiment result shows that the above summarized measures of reasonable composition and cabling as well as better grounded are feasible and effective.

Key words: microcomputer protection hardware system; electromagnetic compatibility; electromagnetic interference; electromagnetic anti-jamming strategy

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0220-05

0 引言

随着微电子技术和计算机技术的迅速发展, 继电保护也已经迈向微机时代。一方面, 微机保护装置早已突破常规保护的概念, 向计算机化、网络化、智能化, 保护、控制、测量和数据通信一体化发展。大量微电子技术的应用使其在电磁干扰方面有明显的敏感性和脆弱性; 另一方面, 微机保护装置一般工作在电磁环境极为恶劣的变电站中, 使位于开关场内的继电保护装置比主控室继电保护所遭受的电磁干扰更加强烈, 因此研究微机保护装置的抗电磁干扰性能具有重要的意义, 不少学者对此都作了深入探讨^[1-2]。

1 电磁干扰源分析

保护设备位于变电站内, 变电站的电磁干扰是

非常强烈的。随着输电电压的提高, 当开关进行运行操作或发生故障时, 在空间内会产生更强的电磁场。而且, SF₆ 开关和 GIS(Gas-Insulated Substation, GIS)系统的使用也越来越普遍。由于 SF₆ 气体的去游离能力极强, 当开关操作时, 母线上会出现频率极高的快速暂态过电压, 向空间辐射上升沿极陡的脉冲电磁场, 成为频带很宽的更强烈的干扰源^[3], 其电磁环境极为恶劣, EMC 问题就更加突出。具体地说, 可能存在的电磁干扰有很多种, 例如变电站内可能产生的电磁干扰如高压回路中操作隔离开关及断路器引起的电气暂态现象; 高压回路中绝缘击穿或避雷器和火花间隙放电引起的电气暂态现象; 高压装置产生的工频电场和磁场; 接地系统中的短路电流引起的电位升; 雷电引起的电气暂态现象; 低压设备开合操作引起的快速瞬变干扰; 静电放电; 设施内部或外部的无线电发射装置产生的高频场;

设施内部其他电气或电子设备产生的高频传导和辐射干扰；供电线路串来的低频传导干扰；核电磁脉冲（NEMP）；地磁干扰等等。归纳起来，常见电磁现象的属性如表 1 所示。

表 1 电磁现象属性

Tab.1 Attribute list of electromagnetic phenomena

连续的现象	频发性暂态现象	较少发生的暂态现象
缓慢的电压波动	电压瞬态跌落（持续时间小于 20 ms）	电压瞬态跌落（持续时间大于 20 ms）
① 交流供电	① 交流供电	① 交流供电
② 直流供电	② 直流供电	② 直流供电
谐波，间谐波	电压波动	电压中断
信号电压	电源频率电压	电源频率变化
直流供电波纹	快速瞬变脉冲群	浪涌
从直流到 150 kHz 的传导干扰	阻尼振荡波	振铃波
射频场感应的传导干扰工频磁场	阻尼振荡磁场	短时工频磁场
射频辐射电磁场	静电放电	脉冲磁场

由于电磁环境是非常复杂的，可以用三类现象来描述所有的电磁干扰。① 低频现象（传导及辐射的，除静电放电以外）；② 高频现象（传导及辐射的，除静电放电以外）；③ 静电放电现象（传导及辐射的）。表 2 列出了基本电磁干扰现象，其分类是相当广泛的，包罗了绝大多数的电磁现象。在对于一个给定的设备进行抗干扰分析时，需要按照设备所处的环境及固有特性来进行组合分析。

表 2 基本电磁干扰现象

Tab.2 Interference list of basic electromagnetic phenomena

低频传导现象： 谐波、间谐波 信号电压 电压波动	高频传导现象： 感应连续波电压电流 单向瞬变 振荡瞬变
电压暂降与短时中断 电压不平衡 电网频率变化 低频感应电压 交流网络中的直流	高频辐射现象： 磁场 电场 电磁场（连续波、瞬态）
低频辐射现象： 磁场 电场	静电放电（ESD）现象

2 电磁兼容性与电磁干扰机理

2.1 电磁兼容性

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）是研究在有限的空间、有限的时间及有限的

频谱资源条件下，各种设备可以共存并不致引起性能降低的一门科学。电磁兼容定义为：“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力。”从上述定义看，电磁兼容应包括：设备不受干扰的影响；设备不对周围的其他设备形成不能承受的干扰。电磁兼容涉及到以下问题：干扰源特性的研究，包括电磁干扰产生的机理、频域及时域的特性、抑制其发射强度的方法等；敏感设备的抗干扰性能；电磁干扰的特性，包括辐射和传导；电磁兼容的测量，包括测量设备、测量方法、数据处理方法以及测量结果的评价；系统内及系统间的电磁兼容性。电磁兼容的研究涉及自然界的电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）源及其模型的研究、EMI、EMC 的测量及评估、实现 EMC 的技术及技巧，其内容包括：

① 自然界及人为的电磁干扰源及其模型的研究：闪电及静电放电是两个自然界的电磁干扰源。

② EMI 和 EMC 的测量：开阔场地的测量；辐射干扰的测量；传导干扰的测量；脉冲干扰的测量（静电放电、电快速瞬时变脉冲群、电浪涌）。

③ 实现 EMC 的技术及技巧：屏蔽；接地；绑定；滤波；适当的频率规划及实现；采用特殊设计的电缆及连接器来抑制干扰。

2.2 电磁干扰机理

形成电磁干扰必须同时具备三个因素：电磁干扰源；对此种类型的干扰能量敏感的接受器（敏感设备）；将能量从干扰源耦合到敏感设备的媒质（耦合通道）。因此，抗干扰设计必须从两个方面着手：减小设备内部存在的射频能量（发射）；减小进入设备内的射频能量（敏感度或抗扰度）。发射和干扰是通过辐射及传导途径传输。为了更深入地研究干扰途径，必须认识到传播途径包含多种传播方式。一般来说，干扰途径有：从干扰源到敏感设备的直接辐射；从干扰源将射频能量直接辐射到敏感设备的电源线或信号控制电缆；射频能量通过电源线、信号线及控制线，从干扰源辐射到敏感设备；射频能量通过公共电源线或公共信号/控制电缆。对于上述耦合途径，存在四种形式的耦合：传导、电磁场、磁场及电场。

电磁干扰与耦合方式有关。在装置的端口或敏感设备的回路上的作用形式可以分为共模干扰、差模干扰两种情形。差模干扰是串联于信号源之中的干扰；共模干扰是引起回路对地电位发生变化的干扰，即对地干扰。共模干扰可为直流，也可为交流，它是装置不正常工作的主要来源。通常认为差模信

号携带有用的数据及信息；共模信号不含有任何有用的信息，是最主要的辐射源，对装置的 EMC 影响最大。共模电流的幅度一般比差模电流小，但它却能产生非常高的辐射电场。差模电流的辐射发射可以被削弱，但是绝对无法消除，因为两个传输途径不可能绝对一致。此时共模电流的发射也随之产生。有许多因素，如距导电面的距离、结构的对称性等都会产生共模电流。非常小的共模电流产生的 RF 发射能量将与非常大的差模电流 RF 能量相当，并且共模电流在 RF 回路路径中不可能被取消。

应当注意：印制板 PCB 上的共模电流，与差模电流相比，是很难预测的。共模电流的返回通路常常是经杂散电容（位移电流）至其他相邻物体。因此一个完整的预测方案必须详细考虑 PCB 和其外壳的机械结构以及对地和对其他设备的接近程度。削弱共模干扰的主要方法有：浮空隔离技术；双层屏蔽技术；系统一点接地；低阻抗匹配传输、电流传输代替电压传输；采用隔离变压器；采用光电耦合器等。

当两个信号线都有差分阻抗，就存在差模电流与共模电流的转换。这些阻抗在射频下主要是由于杂散电容及杂散电感产生。在印制板布置时，一定要使装置的杂散电容及杂散电感最小，以阻止差模、共模电流的产生。由于需要平衡的电压及参考地，对于存在高频信号的电路一定要平衡设计，使每个导体上的杂散电容保持一致，最大程度地降低射频辐射能量、减少对其他信号的影响及提高抗扰度。

3 数字电路在干扰下的行为及其影响因素分析

大多数微控制器（MCU）采用 CMOS 技术。由于这些器件的同步特性，时钟信号电平的差异可能引起误动作。所有的 CMOS 设备都有一个噪声阈值，当超过该值时，将产生错误。元器件在干扰作用下被破坏的形式如下：①干扰功率过大造成半导体器件 PN 结点熔化或者烧毁；②电压过高，使半导体器件厚度仅为微米级的氧化膜绝缘层击穿而损坏；③电流过大使半导体器件的镀敷金属烧毁；④出现幅度过大的尖峰电压，使半导体器件处于不能自动恢复至正常状态，造成电路“死机”，切断电源后尚可恢复正常。由于半导体器件的损坏存在累计过程，所以任何不良的影响均会由潜伏性损坏导致永久性损坏。而器件的损坏会带来额定电压下降、性能降低、计算机数据丢失、误动作、拒动作等不良后果。电磁干扰导致电子设备失效的最根本原因在于电子元器件在电磁干扰能量作用下的破坏，其

脉冲能量及元器件失效能量如表 3 和表 4 所示。

从装置系统级 EMC 考虑，在 EMC 研究中应考虑以下几点^[4]：①频率，研究问题的频谱。②幅值，干扰源的电平多强？引起有害干扰的最大电势是多大？③时间，研究的问题是连续信号或者仅在操作间隔内出现？④阻抗，干扰源、敏感设备的阻抗以及传输途径的阻抗。⑤物理尺寸，设备能够引起发射的物理尺寸。当装置产生 EMI 问题时，依照上述特性分析问题是非常有益的。此外根据“Norton 等效定理”得到的 Norton 网络，EMI 问题都可以迎刃而解。

表 3 各种干扰源的能量

Tab.3 Energy of disturbance source

能量范围/J	电磁干扰种类
$10^{-6} \sim 10^{-1}$	静电放电
$10^{-6} \sim 10^{-1}$	操作过电压
$10^{-6} \sim 10^{-1}$	二次雷击
$10^{-6} \sim 10^{-1}$	直接一次雷击

表 4 元器件失效能量

Tab.4 Energy of component failure

失效能量/J	元器件种类
10^{-6}	低噪声晶体管，二极管及 CMOS
10^{-5}	高速晶体管及 IC 电路
10^{-4}	低功率晶体管及信号二极管
10^{-3}	中功率晶体管及 FET
10^{-2}	齐纳管及整流管
10^{-1}	高功率晶体管
1	功率晶闸管，功率二极管及 TVS

4 微机保护硬件系统抑制干扰的策略

通常抑制干扰的措施包括：积极防范电磁干扰的措施，即抑制干扰源；消极防电磁干扰措施，即阻断干扰途径；预防性抑制电磁干扰的措施，即降低受干扰装置的噪声敏感度。在研究系统级 EMC 问题时应当注意：不使用不当的抑制干扰措施；电缆及接插件（连接器）的错误设计、实施及接地处理；错误的印制板（PCB）布置。具体地说，也就是抑制干扰的措施与时钟和周期信号的布线、印制板的布局及信号的布置、选择高频谱能量分布的元器件、共模、差模滤波器、接地处理和不充分的旁路、退耦电容有关系。为了克服上述缺陷，可采用屏蔽、密封、接地、滤波、解耦、正确布线、隔离、电路阻抗控制等措施。

4.1 布局与布线

布局与布线的好坏对 PCB 的电磁兼容性影响是非常大的,所以在布局与布线前就应考虑电磁兼容性问题。数字电路、模拟电路以及电源电路的元件的布局和布线特点各不相同,它们产生的干扰以及抑制措施也不相同。所以在元件布局时,应将数字电路、模拟电路以及电源电路分别放置,将高频电路与低频电路分开。在条件允许的情况下应使之各自隔离或单独做成一块电路板。此外,布局中还应注意强、弱信号的器件分布及信号传输方向、途径等问题。时钟发生器、晶振和 CPU 的时钟输入端都易产生噪声,要相互靠近些。易产生噪声的器件、小电流电路、大电流电路等应尽量远离逻辑电路。

电路元件和信号通路的布局必须最大限度地减少无用信号的相互耦合:低电平信号不能靠近高电平信号和无滤波的电源线;将低电平的模拟电路和数字电路分开,避免模拟电路、数字电路和电源公共回路产生公共阻抗耦合;高、中、低速逻辑电路在 PCB 上要用不同区域;安排电路时要使得信号线长度最小;保证相邻板之间、同一板相邻层之间、同一层面相邻布线之间不能有过长的平行信号线;EMI 滤波器要尽可能靠近 EMI 源,并放在同一块线路上;DC/DC 变换器、开关元件和整流器尽可能靠近变压器放置,使导线长度最小;尽可能靠近整流二极管放置调压元件和滤波电容器;将印刷电路板按频率和电流开关特性分区,噪声元件与非噪声元件要距离远一些;对噪声敏感的布线不要与大电流,高速开关线平行^[5]。在布线时,要注意:

① 45° 角的路径:与过孔相似,应该避免直角的转弯路径,因为它在内部的边缘能产生集中的电场。该场能耦合较强噪声到相邻路径。因此,当转动路径时全部的直角路径应该采用 45°。

② 短截线:会产生反射,同时也潜在增加天线辐射的可能。虽然短截线长度可能不是任何系统已知信号波长的 1/4 整数,但是附带的辐射可能在短截线上产生振荡。因此,避免在传送高频率和敏感的信号路径上使用短截线。

③ 不变的路径宽度:信号路径的宽度从驱动到负载应该是常数。改变路径宽度时路径阻抗会产生改变,从而产生反射和造成线路阻抗不平衡。

④ 树型信号线排列:虽然树型排列适用于多个 PCB 印刷线路板的地线连接,但它带有可能产生多个短截线的信号路径。因此,应尽量避免用树型排列高速和敏感的信号线。

⑤ 辐射型信号线排列:辐射型信号排列通常有

最短的路径,以及产生从源点到接收器的最小延迟,但是这也能产生反射和辐射干扰,所以应避免用辐射型排列高速和敏感信号线。

⑥ 过孔密度:经过电源和地层的过孔过于密集会在接近过孔的地方产生局部化的阻抗差异。这个区域不仅成为信号活动的“热点”,而且电源在这点是高阻,影响射频电流传递。

⑦ 接地敷铜区:所有的敷铜区应该被连接到地,否则,这些大的敷铜区能充当辐射天线。

⑧ 最小化环面积:保持信号路径和它的地返回线紧靠在一起将有助于最小化地环,因而,也避免了潜在的天线环。对于高速单端信号,有时如果信号路径没有沿着低阻的地层走,地线回路必须沿着信号路径流动来布置。

⑨ 其他布线策略:采用平行走线可以减少导线电感,但导线之间的互感和分布电容会增加,如果布局允许,电源线和地线最好采用井字形网状布线结构,具体做法是印刷板的一面横向布线,另一面纵向布线,然后在交叉孔处用金属孔相连。

4.2 接地设计

在电子设备中,接地是控制干扰的重要方法。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。电子设备中地线结构大致有系统地、机壳地(屏蔽地)、数字地(逻辑地)和模拟地等。在 PCB 板的地线设计中,接地技术既应用于多层 PCB,也应用于单层 PCB。接地技术的目标是 minimized 接地阻抗,从而减少从电路返回到电源之间的接地回路电势。

① 正确选择单点接地与多点接地。在低频电路中,信号的工作频率小于 1 MHz,它的布线和器件间的电感影响较小,而接地电路形成的环流对干扰影响较大,因而应采用单点接地。当信号工作频率大于 10 MHz 时,地线阻抗变得很大,此时应尽量降低地线阻抗,应采用就近多点接地。当工作频率在 1~10 MHz 时,如果采用单点接地,其地线长度不应超过波长的 1/20,否则应采用多点接地。高频电路宜采用多点串联接地,地线应短而粗,高频元件周围尽量布置栅格状大面积接地铜箔。

② 将数字电路与模拟电路分开。电路板上既有高速逻辑电路又有模拟电路,应尽量使它们分开,两者的地线不要相混,应分别与电源端地线相连。要尽量加大模拟电路的接地面积。

③ 接地线应尽量短而粗。因为导体电感与其直径对成反比,而与其长度成正比,若接地线用很细的线条,导线电感增大,接地电位会随电流的变化而变化,致使电子设备的定时电平信号不稳,抗

噪声能力变弱。因此应将接地线尽量加粗，使它能通过三倍于印刷线路板的允许电流。

④ 将接地线构成闭环路。在设计只由数字电路组成的地线系统时，将接地线作成闭环路可以明显地提高 PCB 抗噪声能力。因为当印刷线路板上继承电路元件比较多时，耗电量比较大，受接地线粗细的限制，会在地结上产生较大的电位差，引起抗噪声能力下降，若将接地构成环路，则能减小电位差值，提高 PCB 的抗噪声能力。

⑤ 当采用多层线路板设计时，可将其中一层作为接地层，这样可以减少接地阻抗，同时又起到屏蔽作用。设计中常在印刷板周边布一圈的地线，也是起同样的作用。

⑥ 在多层板的设计中，应把电源面和接地面尽可能近地放置在相邻层中，因为电源面和接地面间的绝缘薄层可以产生 PCB 电容。在单层板中，电源线和地线的平行布放也存在这种电容效应。PCB 电容的一个优点是它具有非常高的频率响应和均匀地分布在面或整条线上的低串联电感，它等效于一个均匀分布在板上的去耦电容。

⑦ 布放高速电路和元件时应使其接近地面，而低速电路和元件应使其接近电源面。

⑧ 当电路需要不只一个电源供给时，应采用接地将每个电源分离开。

5 结束语

抗电磁干扰问题是很复杂的，在硬件系统设计中考虑问题稍有不慎，就有可能给微机保护系统留下先天性的故障隐患。随着继电保护装置的更新换

代，电磁兼容问题变得尤为突出，因此结合工程实践对微机继电保护装置的抗电磁干扰性能展开研究，针对可能产生的电磁干扰提出抑制相应的抗电磁干扰措施是有工程参考意义的。

参考文献

[1] 黄益庄. 变电站智能电子设备的电磁兼容技术[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (15): 6-9.
HUANG Yi-zhuang. EMC technology for IED in substations[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (15): 6-9.

[2] 黄海, 张辉, 华栋. 变电站内的电磁干扰及电磁兼容问题[J]. 电力建设, 2002 (2): 32-33.
HUANG Hai, ZHANG Hui, HUA Dong. Problems of electromagnetic interference and compatibility within substations[J]. Electric Power Construction, 2002 (2): 32-33.

[3] 杨吟梅. 变电站内电磁兼容问题——有关的基本概念[J]. 电网技术, 1997, 21 (2): 61-69.
YANG Yin-mei. Problems of compatibility within substations about basic concepts[J]. Power System Technology, 1997, 21 (2): 61-69.

[4] Designing for electromagnetic compatibility (EMC) with HCMOS microcontrollers[M]. Motorola Inc, 2000.

[5] 顾海洲, 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: 2009-10-30; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

黄 蕙 (1962-), 女, 副教授, 主要从事电气自动化系统控制方面的教学与变电站综合自动化方面的科研工作。

E-mail: hh19620124@126.com

(上接第 219 页 continued from page 219)

[7] 高飞翔, 蔡金锭. 分布式发电对配电网电流保护的影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23 (3): 58-61.
GAO Fei-ling, CAI Jin-ding. Analysis for distributed generation impacts on current protection in power distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23 (3): 58-61.

作者简介:

赵月灵 (1983-), 女, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的工作; E-mail: zhaoyue06@163.com

李华忠 (1983-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的工作;

孙 鸣 (1957-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护及调度自动化和分布式发电技术。

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2009-12-02