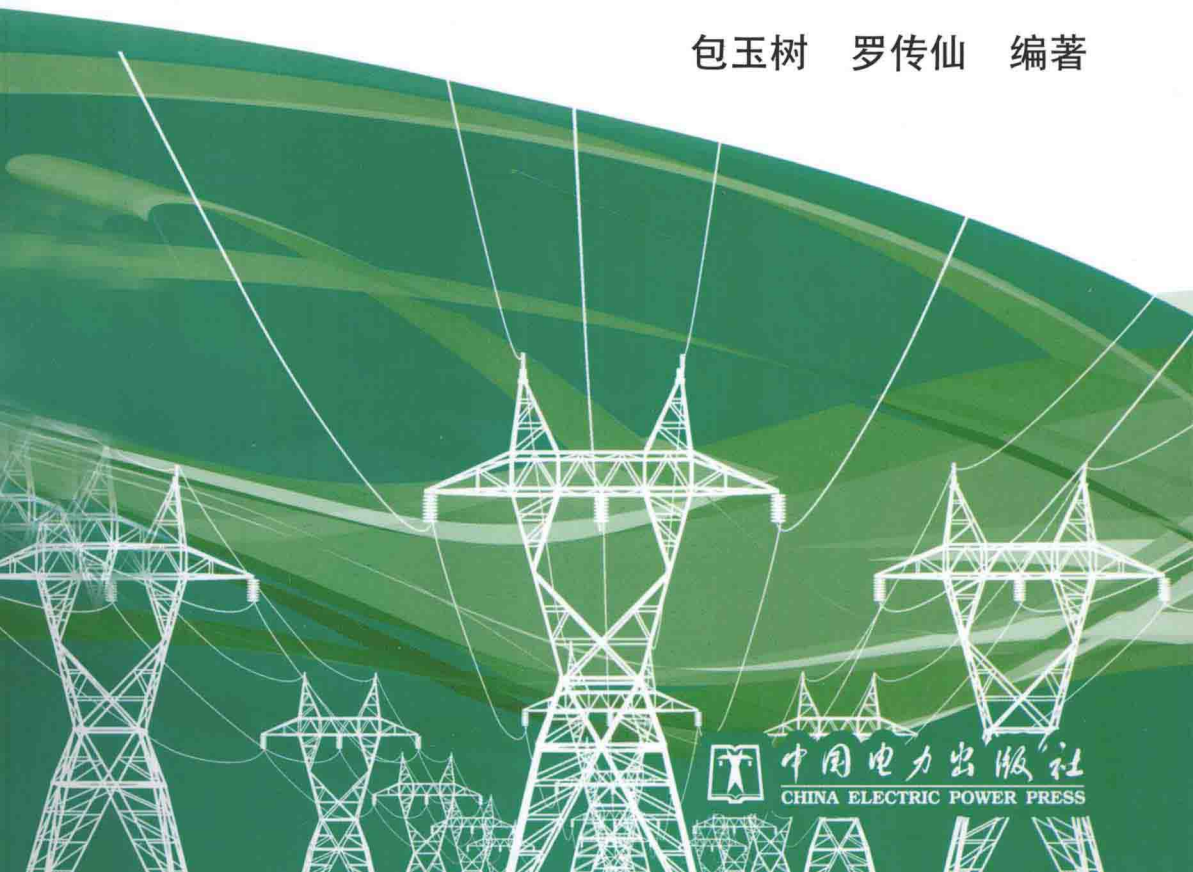


电力测量 抗干扰技术

DIANLI CELIANG
KANGGANRAO JISHU

包玉树 罗传仙 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力测量 抗干扰技术

DIANLI CELIANG
KANGGANRAO JISHU

包玉树 罗传仙 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统介绍了电力系统检测方面干扰量影响及抗干扰对策,针对常规性试验项目,给出了消除或减少各种干扰的具体方法。书中的应用实例内容翔实,具有可操作性,将有助于提高从事相关工作人员的理论与实践水平,更好地服务于特高压与智能电网。

本书适合从事电力系统电气试验人员、高压计量专业人员、电能计量人员及检测仪器(装置)研发人员使用,也可作为职工技能培训教材和高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力测量抗干扰技术/包玉树,罗传仙编著. —北京:中国电力出版社,2014.3

ISBN 978-7-5123-5246-9

I. ①电… II. ①包… ②罗… III. ①电力系统-电气测量-抗干扰-技术 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 279536 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月北京第一次印刷

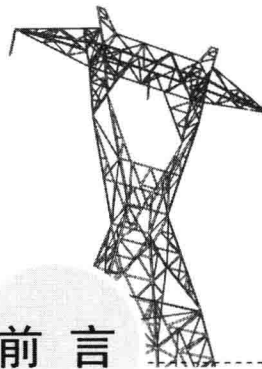
710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 206 千字

定价 39.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



本书系统介绍了电力系统检测方面干扰量影响及抗干扰对策，针对常规性试验项目，给出了消除或减少各种干扰的具体方法。书中的应用实例内容翔实，具有可操作性，将有助于提高相关工作人员的理论与实践水平，更好地服务于特高压与智能电网。

本书主要内容有干扰的类别、抗干扰技术、电能计量装置检测抗干扰、局部放电检测抗干扰、电容和介质损耗因数测量抗干扰、高压计量抗干扰、变电站二次设备抗干扰、电子式互感器抗干扰及误差分析等。

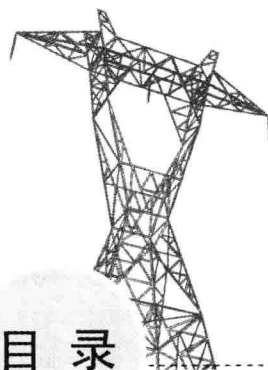
本书第一、二章由中国电力科学研究院雷民、王乐仁，国网电力科学研究院罗传仙，江苏方天电力技术有限公司李夕强编写；第三章第一节由江苏方天电力技术有限公司叶加星、李军编写，第二、三节由包玉树和丰县供电公司秦嘉喜编写；第四章由包玉树编写；第五章前四节由江苏省电力公司检修分公司甘强、刘成民编写，第五节由包玉树编写；第六章第三节由中国电力科学研究院张军、安徽省电力公司电力科学研究院朱琦编写，其余章节由包玉树编写；第七章由江苏方天电力技术有限公司翟学锋、殷峰、欧阳利剑，江苏电力科学研究院徐敏锐编写；第八章前三节由包玉树编写，后四节由王乐仁、江苏方天电力技术有限公司李澄编写。全书由包玉树、罗传仙统稿，王乐仁负责审稿。

本书适合从事电力系统电气试验人员、高压计量专业人员、电能计量人员及检测仪器（装置）研发人员使用，也可作为职工技能培训教材和高等院校相关专业的教学参考书。

由于编者自身认识水平和编写时间的局限性，本书难免存在疏漏之处，恳请各位专家及读者批评指教。

编者

2014年1月



前言

第一章 干扰的类别	1
第一节 干扰的分类	1
第二节 干扰的存在形式	1
第三节 干扰的传输途径	3
第二章 抗干扰技术	4
第一节 屏蔽	4
第二节 隔离	6
第三节 滤波	7
第四节 接地	7
第三章 电能计量装置检测抗干扰	11
第一节 电能表测量干扰分析	11
第二节 500kV 电流互感器现场检测中的抗干扰	23
第三节 剩磁对互感器及变压器的影响分析	32
第四章 局部放电检测抗干扰	37
第一节 “接地”抗干扰	37
第二节 特殊的加压接线方式抗干扰（典型案例）	41
第三节 有效剔除干扰的局部放电试验外部加压线架设方式	44
第四节 交流去磁抗干扰	47
第五章 电容和介质损耗因数测量抗干扰	52
第一节 测量的基本原理	52
第二节 测量介质损耗的各类仪器及其测试方法	55
第三节 介质损耗测试技术的工程应用	60

第四节	影响介质损耗测试的各类因素及抗干扰措施	78
第五节	强电场干扰下高压介质损耗测试方法	85
第六章	高压计量抗干扰	88
第一节	高压计量实验室干扰源触发系统	88
第二节	氧化锌避雷器带电测试仪校验抗干扰	90
第三节	高压试验设备检定技术抗干扰	95
第四节	现场 TA 抗干扰检定装置	103
第五节	全自动互感器校验仪整体检定系统设计及应用	108
第七章	变电站二次设备抗干扰	113
第一节	变电站二次设备的干扰来源	113
第二节	二次回路中电磁干扰的途径	120
第三节	变电站二次设备的抗干扰措施	122
第八章	电子式互感器抗干扰及误差分析	130
第一节	电子式互感器现场校验抗干扰	130
第二节	绕组变形检测抗干扰	146
第三节	变压器套管末屏抗干扰	151
第四节	电子式互感器的误差特性	155
第五节	模拟量输出电子式互感器的误差测量	158
第六节	数字输出电子式互感器的误差测量	162
第七节	电子式互感器数字信号校验系统不确定度分析	173
参考文献		177

第一章

干 扰 的 类 别

第一节 干扰的分类

依照不同标准可以将干扰分为不同的类型。一般被认可的分类方法如表 1-1 所示。

表 1-1

干 扰 的 分 类

分类方式	干扰的种类	
按干扰信号与有用信号的传输关系分类	串模干扰、共模干扰	
按干扰传播方式分类	静电干扰、磁场耦合干扰、电磁辐射干扰、共阻抗干扰、漏电耦合干扰等	
按干扰出现区域分类	内部干扰	内部电磁干扰、过渡干扰、线间干扰、电源干扰、电弧和反电势干扰、接地系统干扰、漏磁干扰、传输线反射干扰、漏电干扰、电气故障干扰、软件故障干扰
	外部干扰	辐射干扰、电网干扰、周围用电干扰、接地干扰、传输线反射干扰、外部线间串扰、环境理化性干扰
按干扰性质分类	自然干扰、人为干扰	
按干扰形式分类	交流干扰、直流干扰、不规则噪声干扰、机内调制干扰	
按干扰频率高低分类	低频干扰、高频干扰	
按干扰频率间隔分类	突发干扰、间歇干扰、周期干扰	
从噪声产生的来源分类	固有噪声干扰、人为噪声干扰、自然噪声干扰	
按干扰出现规律分类	规则干扰、非规则干扰、随机干扰	

第二节 干扰的存在形式

在电路中，干扰信号通常以串模干扰和共模干扰形式与有用信号一同传输。

一、串模干扰

串模干扰是叠加在被测信号上的干扰信号，也称横向干扰。产生串模干扰

的原因有分布电容的静电耦合，长线传输的互感，空间电磁场引起的磁场耦合，以及 50Hz 的工频干扰等。

在电力系统中，干扰信号经常是一些杂乱的波形和含有尖峰脉冲的波形，如图 1-1 (c) 所示，图中 U_s 表示理想测试信号， U_c 表示实际传输信号， U_g 表示串模干扰信号。干扰可能来自信号源内部，如图 1-1 (a) 所示，也可能来自导线的感应，如图 1-1 (b) 所示。

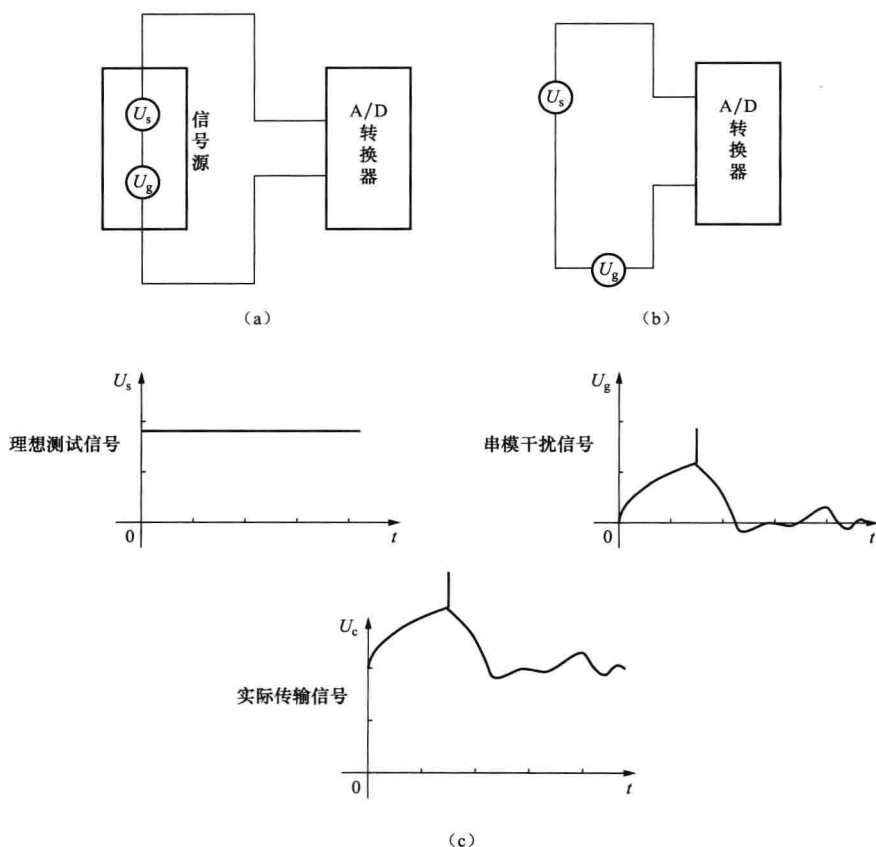


图 1-1 串模干扰示意图

(a) 干扰来自信号源内部；(b) 干扰来自导线的感应；(c) 波形图

二、共模干扰

共模干扰往往是指同时加载在各个输入信号接口的共有的信号干扰。如

图 1-2 所示,检测信号输入 A/D 转换器的两个输入端上的共有的电压干扰。由于输入信号源与计算机控制系统有较长距离,输入信号 U_s 的参考接地点和计算机控制系统输入端参考接地点之间存在电位差 U_{cm} 。这个电位差就在转换器的两个输入端上形成共模干扰。以计算机系统接地点为参考点,加到输入点 A 上的信号为 $U_s + U_{cm}$, 加到输入点 B 上也有信号 U_{cm} 。

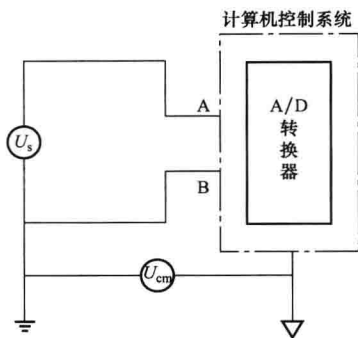


图 1-2 共模干扰示意图

第三节 干扰的传输途径

干扰的传输途径,有“路”和“场”两种形式。

一、通过“路”的干扰

(1) 泄漏电阻。例如,电容器内部介质或外壳等绝缘不良都可产生漏电流,引起干扰。

(2) 共阻抗耦合干扰。主要有电源内阻和接地线阻抗。共阻抗耦合是由于两个电路共有阻抗,当其中一个电路中有电流流过时,通过共有阻抗便在另一个电路中产生干扰。

(3) 经电源系统引入的干扰。

二、通过“场”的干扰

(1) 通过电场耦合的干扰。静电耦合又称电容性耦合,是指由于两电路之间存在寄生电容而使一个电路的电荷变化影响另一个电路的电流。在实际运行中,两根平行导线之间存在静电耦合的情况。

(2) 通过电磁耦合的干扰。电磁耦合又称互感耦合,是指由于两个电路之间存在互感而使一个电路的电流变化通过磁交链影响到另一个电路。例如,电子装置内部线圈或变压器的漏磁就会对邻近电路造成很严重的电磁耦合干扰。

(3) 通过辐射电磁场耦合的干扰。

第二章

抗 干 扰 技 术

干扰的存在严重影响了系统的正常运行,因此在实际运行中需要采取各种手段来提高设备的抗干扰能力,增强系统运行的稳定性。

从原理上讲,抗干扰技术无外乎针对于干扰三要素的三点,即消除或抑制干扰源、破坏干扰传播途径以及削弱接受载体对干扰的敏感性。电力系统实际运用中,抗干扰措施可以分为屏蔽、隔离、滤波和接地等。

第一节 屏 蔽

屏蔽是指利用导电或导磁材料制成盒状或壳状屏蔽体,将干扰源或干扰对象包围起来,从而割断或削弱干扰场的空间耦合通道,阻止其电磁能量的传输。按需屏蔽的干扰场的性质不同,屏蔽可分为电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁场屏蔽。

一、电场屏蔽(静电屏蔽)

处于静电平衡状态下的导体内部各点等电位,即导体内部无电力线。利用金属导体的这一性质,并加上接地措施,则静电场的电力线就在接地金属导体处中断,从而起到了屏蔽电场的作用。

电场屏蔽主要用来防止静电耦合干扰。当用完整的金属屏蔽体将带正电导体包围起来时,在屏蔽体的内侧将感应出与带电导体等量的负电荷,外侧出现与带电导体等量的正电荷,因此外侧仍有电场存在。如果将金属屏蔽体接地,外侧的正电荷将流入大地,外侧将不会有电场存在,即带正电导体的电场被屏蔽在了金属屏蔽体内,如图 2-1 所示。

二、磁场屏蔽(低频磁屏蔽)

磁场屏蔽主要用于消除或抑制低频缓变磁场所引起的干扰。磁场屏蔽的机理是吸收,具体方法是使用高磁导率的材料作屏蔽体,将需要保护的电路包围起来,或者将干扰磁场封闭在一个闭合空间中,如图 2-2 所示。

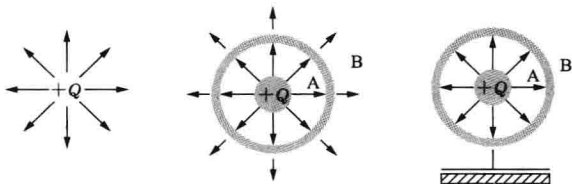


图 2-1 电场屏蔽原理图

由于屏蔽体的磁导率比空气导磁率大得多,所以绝大部分磁场线从屏蔽体的壁内通过,而屏蔽体内的空腔中磁感线很少,这就达到了磁场屏蔽的目的。

三、电磁场屏蔽(高频电磁场屏蔽)

和磁场屏蔽相反,电磁场屏蔽主要用于消除高频交变磁场产生的电感性耦合。当干扰源的频率较高、干扰信号的波长又比被干扰的对象结构尺寸小,或者干扰源与被干扰者之间的距离 $r \gg \lambda / 2\pi$ 时,则干扰信号可认为是辐射场,以平面电磁波形式向外辐射,将电磁场能量带入到被干扰对象的通路。高频磁场由于存在电场分量和磁场分量,故要求采用电场屏蔽和磁场屏蔽同时进行。电磁场屏蔽是利用屏蔽体阻止电磁场在空间传播的一种措施。具体方法是使用优良导体作为屏蔽层对接受电路进行空间包围。这样外界的高频交变电磁场将在屏蔽层上感应出涡流,而

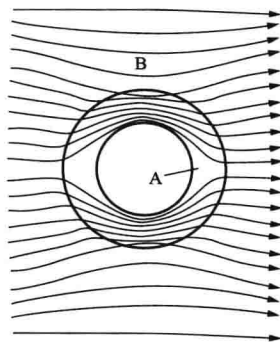


图 2-2 磁场屏蔽原理图

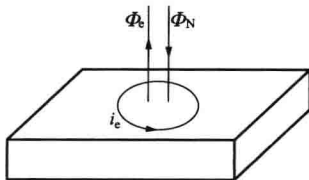


图 2-3 电磁场屏蔽原理图

涡流产生的反向电磁场抵消或者减弱了外界电磁场的影响,从而达到抑制互感耦合的目的,如图 2-3 所示。

屏蔽体对电磁波的衰减有三种不同的机理,一种为波反射,当电磁波到达金属界面时,会发生反射,削减能量;第二种为涡流耗损,电磁波进入金属导体后会产生涡流,消耗部分能量;第

三种为多重反射、折射所产生的涡流消耗的能量。

一般来讲,一个完善的屏蔽系统能大约衰减 50%~70% 的能量。由此可见,电磁屏蔽体对电磁的衰减主要基于电磁波的反射和电磁波的吸收两种情况,不同材料以及材料的厚度不同,对电磁波的吸收效果也是不一样的。电磁波的反射问题比较复杂,它不仅与屏蔽材料的表面阻抗有关,还与波阻抗的大

小以及辐射源的类型有关。

第二节 隔离

隔离是破坏干扰途径、切断耦合通道，从而达到抑制干扰目的的一种技术措施。一般采用的隔离技术有电磁耦合隔离、光电耦合隔离。常用的隔离措施有变压器隔离、光电隔离、继电器隔离等。

一、变压器隔离

变压器隔离一般用于隔离交流信号传输中的干扰。隔离变压器也是一种常用的隔离部件，可以阻断交流信号中的直流干扰并抑制低频干扰信号的强度。

图 2-4 所示为一种带多层屏蔽的隔离变压器。根据变压器的原理，当交流信号从一次侧输入时，其中携带的直流干扰信号将被滤掉，而低频干扰信号也将被大大削弱，从而达到抑制干扰的目的。

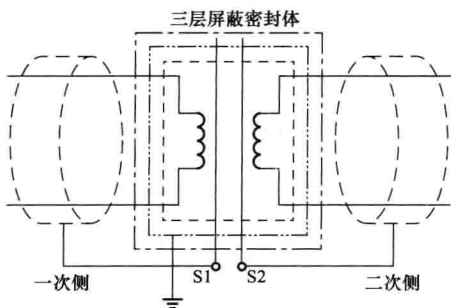


图 2-4 带多层屏蔽的隔离变压器

另外，在变压器的一次侧和二次侧线圈外还设置了静电隔离层 S1 和 S2，其目的是防止一次绕组和二次绕组之间的耦合干扰。变压器外的三层屏蔽密封体的内、外层用铁，起磁屏蔽的作用；中间层用铜，

与铁芯相连并直接接地，起静电屏蔽作用。这三层屏蔽层是为了防止外界电磁场通过变压器对电路形成干扰而设置的，这种隔离变压器具有很强的抗干扰能力。

二、光电隔离

光电隔离以光作为媒介在隔离的两端之间进行信号传输，所用的器件是光电耦合器，具有很强的隔离和抗电磁干扰能力。但是光电耦合器是非线性器件，只适合传输数字信号，如果用于模拟信号传输则必须采用特殊技术进行线性修正。

图 2-5 所示为一般的光电耦合器组成的输入/输出线路。在控制系统中，它既可以用作一般输入/输出的隔离，也可以代替脉冲变压器起线路隔离与脉冲放大作用。由于光电耦合器具有二极管、三极管的电气特性，使它能方便地

组合成各种电路；又由于它靠光耦合传输信息，使它具有很强的抗电磁干扰的能力。

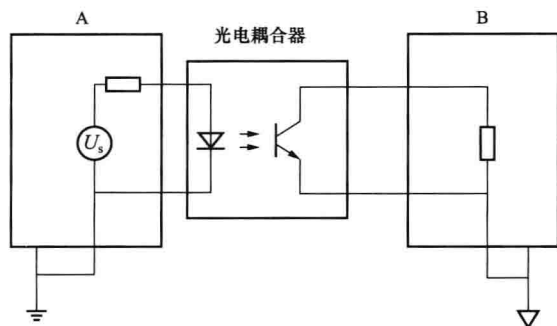


图 2-5 光电隔离原理图

三、继电器隔离

图 2-6 所示是一个采用了继电器隔离的系统。由于继电器线圈和触点仅有机械上的联系，而没有直接的电联系，因此可利用继电器线圈接收电信号，而利用其触点控制和传输电信号，从而实现强电和弱电的隔离。

继电器触点较多，且能承受较大的负载电流，因此在实际运行中继电器隔离的应用也非常广泛。

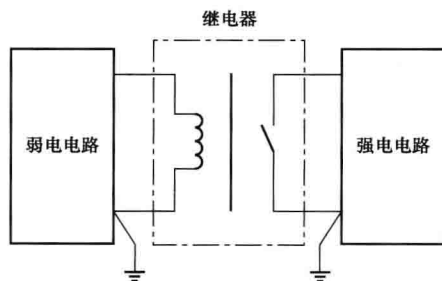


图 2-6 继电器隔离原理图

第三节 滤 波

滤波是根据干扰信号和有用信号在频率特性方面的差异，采取一定的方法，只允许或者只阻止某一频带信号通过的一种抗干扰措施，是抑制干扰传导的一种重要方法。滤波方式可以分为无源滤波、有源滤波和数字滤波。实际运行中已经有大量成熟的滤波器产品投入使用，其原理和具体功能各有不同，这里不再赘述。

第四节 接 地

接地起源于强电技术。由于强电、高压、大功率容易危害人身安全，因此

将电网的零线和电气设备外壳通过接地导线与大地连接，使之与大地等电位，以保障人身和设备的安全。所以强电技术中的接地是指“与大地等电位”，其作用着眼于安全。而在弱电系统中，所谓“地”是指电信号的基准参考点，接地的目的着眼于基准电位和干扰抑制。采用正确的接地方式可以有效抑制干扰。

接地技术的引入最初是为了防止电力或电子等设备遭雷击而采取的保护性措施，目的是把雷电产生的雷击电流通过避雷针引入到大地，从而起到保护建筑物的作用。同时，接地也是保护人身安全的一种有效手段，当某种原因引起的相线（如电线绝缘不良、线路老化等）和设备外壳碰触时，设备的外壳就会有危险电压产生，由此生成的故障电流就会流经 PE 线（地线）到大地，从而起到保护作用。随着电子通信和其他数字领域的发展，在接地系统中只考虑防雷和安全已远远不能满足要求了。

电子电路在工作时需要一个基准电位。该基准电位可以设为电路系统中的某一点、某一段或某一块。当基准电位不与大地相连接时称为相对零电位。相对零电位会随着外界电磁场的变化而变化，有可能导致电路系统工作的不稳定。而当基准电位与大地相连接时称为大地零电位，此时基准电位不会随着外界电磁场的变化而变化，从而保证了系统工作的稳定性。

值得注意的是，不合理的接地方式不仅起不到抗干扰的作用，反而可能引入干扰，例如共地线干扰、地环路干扰等，因此在选择接地方式时需做全面慎重的考虑。实际运行中具体的接地方式有一点接地、多点接地以及混合接地等。

一、一点接地（抗低频干扰）

一点接地系统中只存在一个单一的接地点。一点接地又分为串联一点接地和并联一点接地两种。

图 2-7 所示为典型的串联一点接地示意图。这种接地方式的优点在于简单

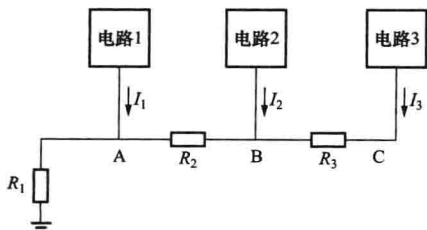


图 2-7 串联一点接地示意图

明了，但是由于地电流会依次流过所有地线，因此会引起各电路之间的耦合。同时由于接地电阻的存在，使得三个电路的接地电位明显不同，当 I_1 （或 I_2 、 I_3 ）发生变化时，A、B、C 三点的电位随之发生变化，导致各电路运行不稳定。

一点接地主要应用于低频电路系统

当中。这种接地方式可以避免形成干扰的地环路。

二、多点接地（抗高频干扰）

图 2-8 所示为多点接地示意图。与一点接地相反，多点接地主要应用于高频电路，且应就近接地。多点接地所需地线较多，接线较为复杂，一般可就近接于接地汇流排或底座、外壳等金属构件上。多点接地可以避免“长线传输”引入的干扰。

一点接地与多点接地在应用上各有优缺点，在实际运行中应根据具体情况慎重选择。一般来说，当系统中信号频率低于 1MHz 时，采用一点接地方式为宜；当频率高于 10MHz 时，采用多点接地方式为宜；而在 1~10MHz 之间，如果采用一点接地，则地线长度不宜超过波长的 $1/20$ ，否则应采用多点接地的方式。

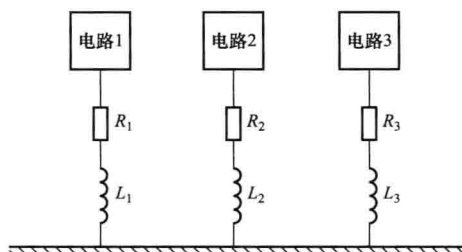


图 2-8 多点接地示意图

三、混合接地

当一点接地和多点接地均无法单独满足系统要求时，可以采取由浮地（模拟信号地不接机壳或大地，阻断干扰电流的通路）、一点接地和多点接地系统组合而成的混合接地系统。混合接地使用电抗性器件（电感和电容）使接地系统在低频和高频时呈现不同的特性，常用于宽带灵敏电路中。

接地技术中，要特别注意以下几点：

(1) 强电地线与信号地线应分开设置，模拟信号地线与数字信号地线应分开设置（尽量阻隔数字地上的噪声窜到模拟地上）。模拟信号和数字信号都要回流到地，因为数字信号变化速度快，从而在数字地上引起的噪声就会很大，而模拟信号是需要一个干净的地参考工作的。如果模拟地和数字地混在一起，噪声就会影响到模拟信号。一般来说，模拟地和数字地要分开处理，然后通过细的走线连在一起，或者单点接在一起。总的思想是尽量阻隔数字地上的噪声窜到模拟地上。当然这也不是非常严格地要求模拟地和数字地必须分开，如果模拟部分附近的数字地还是很干净的话可以合在一起。

(2) 浮地与接地的区别。系统各个部分与大地浮置起来，这种方法具有一定的抗干扰能力，但一旦绝缘下降就会带来干扰。还有一种方法，就是将机壳接地，其余部分浮空。这种方法抗干扰能力强，安全可靠，但实现起来比较

复杂。

(3) N 线与 PE 线（地线）的区别。N 线是中性线，是工作线，在单相系统中又被称为“零线”；没有它，设备可能就不能正常工作了。而 PE 线是和设备外壳相连接的地线，没有它，设备可能能够工作，但外壳可能带电；它可以防止触电事故发生。

(4) 尽量加粗接地线。若接地线很细，接地电位则随电流的变化而变化，致使诸如电子设备的定时信号出现电平不稳现象，抗噪声性能变坏。因此应将接地线尽量加粗。

通用的抗干扰措施就这些，但在实际应用中，会派生出许许多多新的抗干扰手段，在随后的章节里将一一详解。



第三章

电能计量装置检测抗干扰

第一节 电能表测量干扰分析

一、电能表测量干扰概论

近年来随着经济的发展,电力需求越来越旺盛,由于电能表的电能贸易结算功能,电能表测量干扰问题越来越得到人们的关注。电能表虽说是已经很成熟的产品,但随着整个电网内干扰源的增多增大,导致了电能表在自身的电源工作回路及通信回路中受到各方面的电磁信号、通信信号及谐波等干扰,致使现场工作中的电能表发生计量不准确,甚至损坏。

电能表测量干扰主要有以下三类:

- (1) 电磁环境对电能表的测量干扰。
- (2) 数据通信对电能表的测量干扰。
- (3) 谐波对电能表的测量干扰。

第(1)类干扰问题统称为电能表的电磁兼容性。

第(2)类干扰问题主要是由于部分程序设计人员对电能表通信规约编写的不严谨,或者生产过程中设备调试不够全面造成的。

加强对电磁兼容(EMC)性的设计要求,保证电能表能在复杂的电网环境中运行可以不受电网的电磁干扰,且保证准确的计量,是本节讨论的重点。

图 3-1 所示是电能表的干扰源。

二、电磁兼容性对电能表的测量干扰

(一) 电磁兼容概念

电磁兼容 EMC (electromagnetic compatibility) 是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。

(二) 电磁干扰的途径

电能表遭受电磁干扰的主要途径有两个方面:

- (1) 电磁干扰信号通过电能表的电源回路,将高频干扰耦合到电能表的工