

第 5 章

公用电源及设备地

本章导读

本章讨论了公用电源与电路性能之间的关系。为了保证安全和防雷击,要求设备必须接地。电气系统即使使用公用电源,也将电气设备连接到接地导体上。这种共享的接地连接产生了许多问题。接地平面和隔离变压器可用于屏蔽干扰。本章还讨论了线路滤波器、设备接地、飞机接地、使用绝缘接地导体等问题。此外,船舶等设施的防雷是一个重大的安全问题——应考虑电流不能进水位线以下,电池对船舶金属具有腐蚀作用;太阳风会破坏电力传输,损坏输油管道。

5.1 引言

每一个工程师都花费了大量精力来处理公用电源。公用电源会影响模拟和数字系统的性能。工作环境中充满着与电源相关的电磁场。这个环境包含着许多从远距离天线传来的辐射,这些辐射同样是利用公用电源供电的。因为电源场与模拟或者数字系统共享同样的物理空间,故能量能够进入电子设备中。正因为这个原因,设计工程师需要理解公用电源在电子干扰中的作用。

电源在空间飞行器、汽车、飞机或者实验室的应用中表现出不同的问题。本章将介绍电源在设备中的应用,所讨论的许多干扰过程可以应用到每个运行电源系统。

5.2 发展历史

当电力刚刚出现时人们几乎没有什么规章可循。经常有电源起火或人们受到简陋导线的电击事件发生。发生闪电时,电源线会引导闪电进入设备。在保险公司和国家防火协会的施压下,美国颁布了国家电气规范(National Electric Code, NEC)。这个规范提供了控制越来越强大的电力工业标准。

电力是现代社会的核心。当电力出现故障时我们对它的需求会立即显现出来。保证电源质量是很重要的。NEC 已经被地方政府接受了并强制为法律规范。该规范也经常被修改以适应新材料、新方法及新流程。经历了时间的考验,该规范代表了良好的实践应用。该规范的每一条不是纯粹地基于学术性的,是可接受的,因为违背该规范将会给电力行业带来直接的困难。

NEC 提供了电力安装时的安全规则,防止触电及电气引起的火灾。如果故障发生,断路器将断开电源电路,没有人会触电。列出的可以接受并用来安装的材料必须在所有的环境中都能工作,而且要在持续的时间周期中都能工作。电源导线必须接地,当闪电通过耦合进入电网后,在进入住所或设备前可以进入地线的通路,公用地的传输线限制闪电损坏配电硬件。它们的任务是给客户提供不间断电源。

NEC 中描述的规则有多种可应用的方法。一些方法可能比另一些方法在限制电磁干扰方面要好。工程师必须理解干扰的机制,这样才能决定如何设计硬件设备和设施。

5.3 术语

NEC 中清楚地定义了电力工程师常用的关键术语。这些术语必须有明确的定义才能保证实施规则不被误解。而电路工程师的语言是不断进化的。术语“地”对电力工程师意味着与地连接或与之等效,而对电路工程师来说意味着变压器副边的

电力公共点或者浮动电路的参考导体。为了讨论电力线在电子产品中的作用，本章将利用电力行业中术语的定义，以便在后面利用这些术语描述电路的时候少一些障碍。下面给出了与电力相关的 12 个关键术语。

(1) 地：与地相连或者等效的连接。

(2) 设备地：是指所有可能与电源线连接的保护导体，包括管道、设备外壳、机架、插座、沟槽、裸导线及绿色导线。绿色导线在电力线中等效于地，是不传输电流的，除此之外，没有其他电力线可以是绿色的。

(3) 接地导体：传输电流的一个电力导体，标称电压为零伏，经常标记为白色。

(4) 非接地导体：传输电压的电力导体或“热”导体，颜色可以是黑色或蓝色，但永远不会是绿色或白色。

(5) 中性点：在三相电源中，带电流的导体上的电压为零伏，接地导体经常称为中性点，它们是从三相电力源中引出的一条导线。

(6) 隔离地：一个设备接地导体从插座到服务面板或者进线口单独形成的环路，一直是接地的。

(7) 进线口：电力进入设备的入口点。

(8) 接地电极系统：设备中所有的内部相连的非电力导体，包括建筑钢材、计算机板、设备地、钢筋、气体管线、钢缆等。

(9) 馈电电路：给分支电路提供电流的一组带有断路保护器的导体。

(10) 分支电路：一个带有断路保护器的给各种负载提供电力的电路。

(11) 派生电源：从一个辅助电源或者配电变压器引出一个新中性线的供电电源，这个中性线连接到接地电极系统的最近点。

(12) 设备列表：经过试验和准许作为电气安装的硬件列表。

5.4 公用电源

当电源发生故障时，我们对它的需求是显而易见的。保持电源质量很重要。地方政府已经接受了 NEC，并将其规范作为法律条文强制执行。为了适应新材料、新

方法和新流程,该规范定期进行修改。

我们相信购买的电器,这是因为在这些产品上市之前,必须遵守相关规定,并且由各种安全机构对产品硬件进行测试。在美国,大家都熟悉的是“UL 标准”。许多设计者都没有注意到,在三线制电源插头上,圆形接地端要比其他两个电源端长,这就迫使设备在连接电源之前接地,从而避免电击事故。

NEC 要求电器的金属外壳与设备要接地连接。当没有可用的设备接地时,允许使用电器的表面金属与中性或接地导体连接^①。这意味着在一定范围内距离相近的接地水槽或水龙头之间可能存在小的电势差。这是接地导体中的电压降。

NEC 要求医院的电源插座是防修改的。当孩子们试图把东西插进插座时,他们就处于危险的情境下。防修改意味着加载弹簧的快门被电源插头推到一边。

NEC 不允许对规范列表中的设备进行修改,在插座上钻孔也是违法的。这就意味着所有替换部件将是兼容的。除非被批准,否则不能将配电线路或额外线路添加到配电系统中,因为这可能危及安全。对于电工或在设施上工作的承包商来说,这没什么奇怪的。

总的来说,NEC 提供了保持电气设备安全的规则。如果发生故障,在没有人受到电击的情况下,断路器将立即断开电源电路。所允许的安装材料必须能够在各种天气条件下提供长时间的服务。电力线必须接地,以便快如闪电的电力在进入住宅或设施之前能够找到接地路径。

接地导体沿着电网路径进行分布以防雷电对配电设备的损坏,主要是为客户提供不间断的电力。在发电与配电中有相对独立的接地规则。在发电站中,故障电流可能超过 4000A,这时护栏、金属地板、电缆、发电机框架等的黏结就变得至关重要。配电站的接地连接质量也是至关重要的。离开电站的高压线路可能发生接地故障,在造成损坏之前,发电机必须被断开。扶手和钢地板之间的电压降一定不能造成电击事故或引发火灾。

NEC 认识到了对设备进行漏电保护的必要性。该规范允许这些二次电源被阻止接地以限制最大故障电流。这种接地方法仅限于 480~1000V 范围内的电压源。

^① 在第二次世界大战之前建造的许多住宅没有使用接地导体设备。出口插座均为非极化的两种导体类型。用三导体替换两导体插座是非法的,因为这会留下接地保护的错误印象。

需要故障检测器确定故障的位置,以便在发生故障时跳闸。

应用 NEC 中的规则可以有很多方法。一些经实践认可的方法在限制电干扰方面要优于其他。规则中并没有给出必须用哪个方法的任何建议。正是由于这个原因,工程师们必须理解干扰的机理。有了这些知识,就可以决定硬件设备如何一起工作来控制干扰。

5.5 大地作为导体

大地是个复杂的导体。大地上两点之间的电阻值的范围为数十欧姆到数兆欧姆。高电阻区域可能为花岗岩块、干燥的沙漠或者熔岩层,低电阻区域可能在潮湿的泥土上或者海岸边。把铜导体埋在土壤中,地连接电阻在几百个工作周期内可以低到 1Ω 。典型潮湿地的接触电阻在 10Ω 的级别。可以在两个接地点之间施加电压测量这个接触电阻。观测电阻的一半,就可以看作是每个接地点的值。

闪电是一个“搜索地”的现象。为提供闪电保护,NEC 要求在电源进入设备时接地导体(中性线导体)必须在进线口接地,这里与大地连接的电阻不应该超过 25Ω 。在贫瘠土壤环境中可能达不到这个电阻值。在这种情况下,两个接地连接能充分满足这个要求。当闪电击穿电源导体,一个接地连接可以提供闪电离开设备的通路。即使这个公用电源接地,与大地连接仍然是需要的。这个要求所有的设备都单独接地。

接地连接的电源定义是在假设工作频率为 60Hz 的情况下测量的。第 2 章中的讨论可以明显看出,长圆导体的两个接地点之间不会有超过几百赫兹的低阻抗通路。

大地中流动的电流和设备接地电极系统电流不容易进行控制。电磁辐射常常归咎于这个流动电流。任何试图通过对设备中的大地区域进行隔离来限制这个电流流动都是不合理的。NEC 中禁止在一个设备中有两个地电极系统。原因非常简单:两个 10Ω 的大地连接起来的电阻能够达到 20Ω 。如果故障情况发生在不接地导体或者“热”导体与第二个地电极系统之间,断路器可能不会断开。一个 20Ω 的电阻在 120V 时的负载电流只有 6A ,在这种情况下,正常来说都是地电势的两个导体也

可能有电压。在这些条件下,故障状况可能导致未被注意到的严重触电风险。

5.6 中性线与大地连接

NEC 要求中性线或者接地导体的入口在进线口处与大地连接起来。这个中性线在设备内可能没有重新接地。这保证在设备内部,负载电流没有流经地电极系统。设备的故障保护系统依赖于这个限制。

NEC 要求一个设备地导体必须跟随一个电源导体并与一个电源插座相连。这个导体网格是地电极系统的一部分。设备地导体与所有的插座、机箱、水管和设备机架连接在一起。设备地导体必须跟随每一个电源导体作为设备安装的一部分。接地管道必须在所有开路电源线周围。如果一个“热”电源导体与设备地发生故障,这个故障路径必须是低阻抗以保证发生故障的电流足够高,以致断路器在几个电源周期中断开。这就是设备地和电源导体必须并行在一起的原因。任何大的故障路径的环路中有电感,用于限制故障电流的大小。

注意 NEC 允许管道作为唯一的设备地,并提供可允许的管道和硬件列表。在工业设备中,按惯例是优先采用绿色设备地导体,同时也可采用管道作为设备地。

设备地导体经常在许多接触点与地连接,这些接触点可能是水管、锅炉、电机外壳、建筑钢铁、金属滑轨。

注意 设备中的中性线电源导体只能有一个大地连接。

5.7 地电势差

信号电缆连接到信号源的远点并与这个远点的地电势相关联。当这个非终端的地电缆被引入本地电路,两点之间的电势差在示波器中可以看到。不同的电势意

意味着在穿过这个区域的电缆与地之间有电磁场存在。这个电压可以简化为场强乘以由电缆、地及示波器形成的环路面积。在某种方式下,这个区域面积为零,将不会测量到电压。对于地来说,电流关联的场分布在地平面的下方,因此没有方法使这个区域面积为零。如果涉及连续导体平面,环路面积的大小及电压耦合都可以控制。

在设备中,各硬件部分之间和各支架之间都有电势差。这些电势差同样也是区域面积中的电磁场引起的。这些场会在开路导体上产生面电流。一般来说不能用欧姆定律根据电压和测量电阻来计算流动电流。举个例子,两个机架之间的噪声电压可以达到 1.0V。两个机架之间的直流电阻可能是 $1\text{m}\Omega$ 。利用欧姆定律进行计算,电流将会达到 1000A。但很明显这是不正确的。印制电路板的表面也会发生同样的事情。地上两点之间电压在更多情况下是由连接区域的场耦合形成的,而不是电流。在第 7 章中将会讲到更多关于这方面的知识。

用欧姆表测量地上两点之间的电阻是困难的。如果强电流在导体中流动,数字或者有源电压表可能发生故障。通常,仪表的接触电阻比被测电阻更大。一个测量的方法是采用四端口方法。将一个已知的电流施加到被测电阻的两个外部接触点,被测电阻的两个内部接触点之间的电压可以观测到。这个方法避免了仪表的接触电阻问题。这个电阻等于内点电压除以电流的值。

导体两点之间的电阻取决于导体自身的电流如何分布。举个例子,正方形导体平板上两点之间的电阻取决于两点的位置及接触点的区域。因为电流不会在角落流动,角落的形状和厚度不会影响电阻值。

注意 导体两点之间的电阻取决于电流从哪里进入以及如何进入导体。

5.8 场耦合到电源导体

考虑电线杆上电源传输线的情况。沿着传输线方向移动的场能够在这个线路上耦合电压,有两种耦合方式。这个场经过两个导体形成的环路产生了常模电

压；这个场经过导体对与地平面之间产生了共模电压，图 5.1 给出了这两种耦合方式。

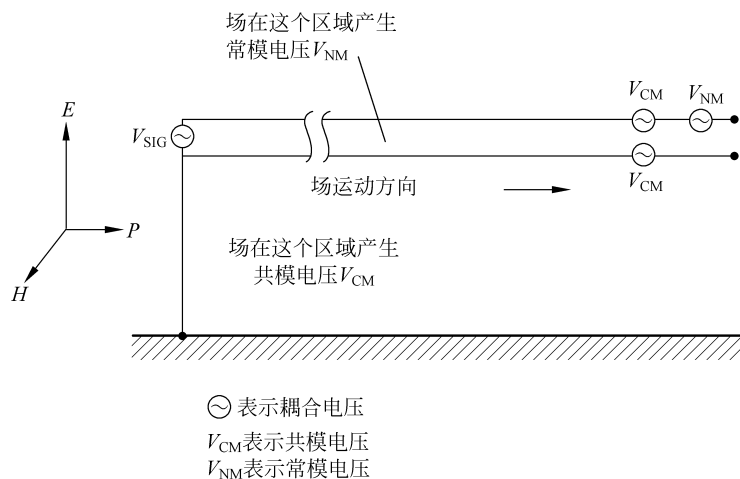


图 5.1 常模和共模耦合

常模耦合加入传输信号中。共模电压影响一组导体，表现为地电势差。地电势差可以看作是电流单独流动的属性，但是这个电压常常是耦合到仪表引线的场产生的。经常有流动电流但是不能用电势差计算这个电流。

共模信号是耦合到一组导体的平均信号。常模耦合单独影响到所有导体对。常模经常称为差别模式、差分模式或者横向模式，共模也被称为纵向模式。第 4 章讨论了共模电压的内容。

共模场既可耦合到电源导体也可耦合到信号导体。对电源来说，这个耦合包含中性线和设备地导体。耦合场在两个方向上移动能量。有反射发生，既有沿着线上的反射也有在末端的反射。这些反射不影响电源传输，但是能增加场能量到通过电源连接的硬件。电源线路滤波器反射频率可以超过 100kHz 的共模和常模干扰。电源线路谐波要求的滤波器是比较大且昂贵的滤波器，这一般是不现实的。

使场能量耦合到硬件电路中有许多方式。电源线路滤波器可以限制这个耦合，第 6 章将详细讨论耦合机制。

5.9 中性线导体

公用电源采用三相发电方式,这是因为发电功率在平衡负载的整个周期是常数。恒定功率发电意味着发电机转子的转矩在每一转动过程中是常数。重型设备(例如大型风扇和工业电机)直接与三相电源连接。对于大部分低功率应用设备,电源取自于相线和中性线。负载排列起来以保证每相提供同样数量的功率。如果负载是线性的且是均衡的,中性线电流在每一个周期中的平均值为零。

大部分电子装置利用整流系统在滤波电容器上储存能量。电容器需要接近峰值电压的电流。每一相中的峰值电流发生在不同时刻,导致中性线电流不能均衡为零。中性线电流富含谐波分量,在中性线导体中的电抗(串联电感加上串联电阻)上流动。中性线导体上的压降可以看作是设备地和地导体之间的电势差。这个电压与电力变压器上漏电容串联,导致电流在公用输入端导体上流动,如图 5.2 所示。

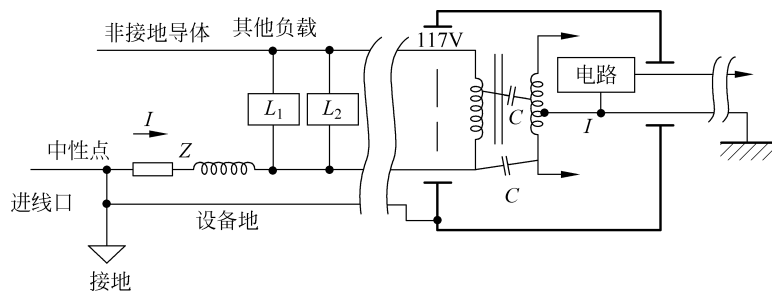


图 5.2 从中性线电压降引起的变压器的耦合

如果配电变压器的负载中有高频谐波分量,变压器周围的漏磁场必须携带同样的谐波分量。这意味着场 B 周围有丰富的谐波。场中的任何高频分量能够很容易耦合到周围的导体环路中。如果建筑钢筋在附近形成环路,这些感应电流可以在整个设备中流动。一个较好的方法是在任何钢筋的附近导体环路中利用绝缘体打断这个环路。

在三相电源中,如果谐波含量非常高,中性线电流可能比线电流还高,导致传输高谐波分量电流的中性线导体过热。如果功率传输采用的是三角形连接,没有中性线导体可考虑。这种方式造价比较昂贵,因为它需要一个附加的派生电源。这个增

加的变压器必须有一个中性点接地。实际上,派生电源像是一个新的进线口。当然,副边的负载同样产生一个中性点电压降。

5.10 变压器 K 因子

电子负载是典型的非线性负载。整流器系统需要在电压峰值时的大量电流。这个非线性电流可以用基波的谐波分量来描述。对变压器的影响是:增加了变压器铁芯的涡流损失和导线上的热损失。变压器给电子负载供电必须控制谐波分量的比例,否则可能导致电子负载过热。这个问题经常发生以至于变压器需要利用特定的因子。这个因子就是著名的 K 因子。高的 K 值要求制作变压器时采用高等级的不锈钢和大尺寸导线。为了限制趋肤效应,导线必须由薄层叠加黏制而成。计算 K 值的方法有几种。简单的方法是采用式(3.1)计算。

$$K = \sum n^2 \left(\frac{I_n}{I_T} \right)^2 \quad (3.1)$$

在该式中, n 是谐波的次数, I_n 是这个谐波分量的电流, I_T 是总的负载电流。

如果没有谐波分量, K 因子为 1。谐波分量超过 25 阶就需要考虑计算 K 。典型的电子负载的 K 因子在 8 左右,超过 30 的情况很少出现。

5.11 功率因子校正

电网公司在向使用大型电动机设备的行业输送电力时都面临着一个问题:由于这些负载是可感应的,所以需要无功电流。为了解决这个问题,电网公司可以在线路上增加电容器修正这种无功电流,也可以使用其他功率因子校正设备来提供无功电流,功率因子校正设备最好位于负载附近。由于无功负载整天都在变化,因此功率因子校正必须是可变的。将电容器切换到电网上会导致瞬变,产生浪涌电流。持续几毫秒的涌入电流可以通过采用串联的浪涌电阻器来限制,这些电阻器会在一定的周期内短路。应该注意,切换会涉及三个相位。

5.12 非接地电源

一些设备需要非接地电源。一个常见的例子是加热大型熔炉所用的电源。如果电源发生故障或者跳闸，熔炉就会遭受损失。当熔炉是空的时候，程序检测到故障同时会关闭电源。设备利用非接地电源时自身必须具有处理任何可能发生故障的功能。

海军舰船上的电源是浮动电源，浮动电源也是一种电磁噪声。当电源与负载连接的开关闭合或断开时，整个系统的分布电容必须存储不同数量的能量。这个瞬态结果通过电力变压器进入每一个设备中。避免这种干扰的方法是增加一个配电变压器，为敏感电子硬件提供接地电源。

5.13 电源要求

当电源开关闭合时发生了什么情况？这个答案可能令人吃惊。开关闭合之前，地和非地导体之间的电场存储了静电场能量。在电源开关闭合时刻，一个波以 $1/2$ 电压开始向负载和电压源方向移动。波电流取决于线路的特征阻抗。当波到达负载时会发生一个基于负载阻抗的反射。同时，波以 $1/2$ 电压反向传播到进线口。波继续传播直到到达支路连接点。在连接点有另一个反射，波沿着这两个路径传播。这个分支和反射过程的电气活动快速进入设备的线网中。导线中存储的静电场能量开始向负载移动，提供电源给负载。

开关闭合之后的电气活动涉及许多反射现象，这个合成的波立刻传播到发电机。进线口的暂态波不再是一个陡直的波阵面。因为这些反射现象使暂态波失去了幅值。有趣的是测量电源线上离闭合开关不同距离的暂态电压。接近开关处的电压值在几纳秒内下降到一半；在面板附近暂态电压可能要持续几毫秒；在进线口的暂态过程几乎是不可见的。波必须最终到达发电机，发电机才能调整其输出电压以适应新的负载。

考虑设备中可以用到的静电场能量。假设每英尺导线的电容为 50pF 。在 1ms 时间波传播的距离为 500ft 。这个半径内的导线网络可能包含有 3000ft 导线。导线电容可能为 $0.15\mu\text{F}$ 。当电压达到 120V 时,电容上储存的能量大约为 10^{-3}J 。如果这个能量在 1ms 内释放,电功率将会达到 1000W 。如果负载需要 500W 的电功率,当距离超过 500ft 时,电压下降大约 5% 。

沿着电源线电路方向反射的电进入电源线之间导体的空间中,一些能量被限制在金属导体内部空间中,另一些能量增加到设备周围的场中。

电源线上高速的电压变化对内部的整流及滤波设备没有影响。仍然有一些耦合机理允许场进入电力变压器等硬件。如果电力滤波器没有正确安装,这就是干扰进入的地方。第6章将讨论干扰进入的工作机理。

5.14 大地电源电流

电源线在设备之间分配电源通常采用4线。这意味着中性线与其他三相同步传输。中性线沿着配电路径作为防雷保护接地。中性线电流的总量取决于负载的平衡和谐波含量。流动的中性线电流在接地点和中性线之间分开。接地点之间的电流密度低,电流在这里扩展到大地上。宽的电流路径意味着低阻抗。一个典型的地电阻率为 $1000\Omega \cdot \text{cm}$ 。用这个数字计算长度为 10m 的土壤上的电阻只有 1.0Ω 。

在使用电源的区域,地面下埋有金属物件,以减小大地上各点的阻抗。例如地下埋的煤气管道、金属栅栏和建筑钢铁。建筑钢铁在许多点接地是为了防雷的一种保护。中性线电流将会沿着这些导体流动,因为它们提供了比地更低的阻抗。注意,在建筑钢铁中流动中性线电流会关联流到附近设备的公用电源。

5.15 线路滤波器

电子硬件常常由线路滤波器供电。这些线路滤波器在电源引线和设备地之间放置电容。设备地形成一个网格,可以在许多点接地。这意味着无功滤波器电流可

以利用并联路径返回到进线口的中性点。线路滤波器的一个功能是阻止干扰场进入硬件。滤波器工作原理是为高频能量提供了一个进入硬件的高阻抗通路和一个环绕硬件的低阻抗通路。滤波器电容中的干扰环路电流正如在设备地网格中的60Hz电流。所有返回环路引导到进线口，在这里设备地连接到中性导体和大地。如果流动电流有许多并联路径，场强将很低。滤波器的数量正比于所涉及的硬件的数量。在大型系统中，从进线口返回到中性点的无功电流可以达到安培量级。

线路滤波器能够为硬件提供本地电源的瞬时能量。如果硬件需要的能量是阶跃模式，本地电源滤波器的电容能够提供这个上升沿能量。这阻止了传播一个阶跃波进入设备的高频分量。但如果一个串联电感器位于滤波器的负载侧，这个能量就不可获得了。

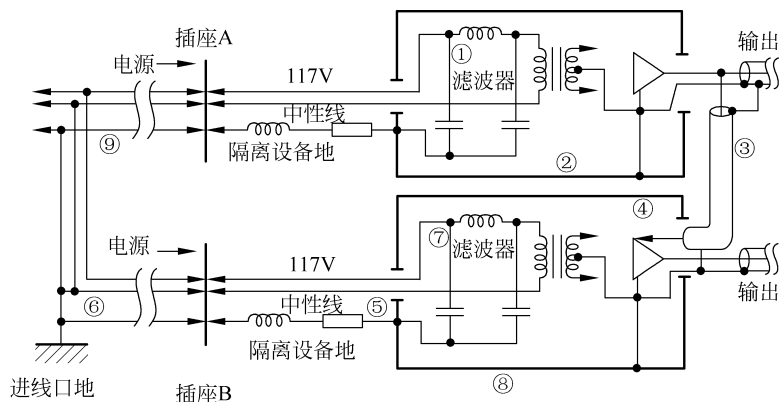
注意 滤波器电容中的60Hz电流是无功的，这意味着与电压没有同相位。这可以用来确定流动电流的源。

5.16 隔离地

将提供的设备地导体和电源导体并联给所有硬件供电。每个硬件的线路滤波器在这个线路和设备地两端连接电容器。设备机架中的硬件、设备地也连接到这个机架。在单独的硬件中，没有机架互连到设备地。在这种情况下，设备地互连在电源插座。

在隔离地情况下，即使在插座处，设备地也没有连接在一起。相反，每一设备地导体各自返回到面板或进线口。这些并联路径很长，因此具有电感性。如果有信号路径与硬件互连，电源滤波器电流将会流经这个交叉连接点。这可以将干扰耦合到这个信号过程，具体情况取决于互连电缆的特性，如图5.3所示。

一个硬件中产生的噪声可以充满整个设备。允许隔离地的理由是阻止从一个硬件中包含的电流通过设备地进入其他硬件。不幸的是，在一个隔离地中电流产生



滤波器电流在路径①②③④⑤⑥和⑦⑧③②⑨中流动
路径③是信号导体

图 5.3 信号路径与硬件互连的滤波器电流流动

的场可以充满整个设备。问题不是电流流动而是流动电流产生的场。在附近导体中,场意味着面电流。如果每一设备地有一个长返回路径,设备中产生的场强度更大。设备地导体形成的网络相关联的场强度较小。如果电流分散到地平面上,场强度进一步减小。

注意 设备地导体网络的特性像是一个伪地平面。

单个设备地导体在较远的距离具有高阻抗。如果阻抗与线滤波器串联,则限制了滤波器在高频时的特性,转而允许线电压干扰进入硬件,这改变了加入线滤波器的目的。这是另一个利用设备地连接网络的原因。

在独立硬件中,电源连接常常通过单独的电源插座进行。在隔离地结构中,设备地所形成的环路更大。假设在两个导体之间的一个信号路径接近这个导体环路,从附近电机中的电流中断产生的暂态场能耦合到这个环路,产生感应共模电压,在信号接口这些电压足以损坏硬件。标准的设备地结构限制了这个环路面积,使安装更可靠。

5.17 设备地的更多历史

中心设备地的设计思想可能起源于电子学的早期。在设计硬件时人们发现利用导管接地减小了模拟放大器中活跃的干扰信号。有证据表明,良好的接地能进一步减小干扰。

电路设计中的常用方法是单点接地方案。这个思想是控制公共导体流动电流所引起的串扰。公共导体包括电源导体、输入信号引线、输出公共引线、屏蔽连接和设备地。这些导体堆放在一个由螺栓固定到机箱的公共地上,连接的次序应仔细考虑。这种排列方式的地称为星形连接。举个例子,一个星形连接确保输出电流不流进一个公共输入导体;同时,设备地中的流动电流将直接流到硬件机箱而不是信号导体。如果频率在 20kHz 以下,星形配置能很好地工作。在今天的数字世界中,这个方法不再有效,它在电路板级或设备级是无效的。

注意 星形连接有其使用的场合。中性线、设备地和在进线口处地的连接是个星形连接。

电路设计者以为接地可以吸收噪声。毕竟,连接到电路点到这个地的电容器似乎带走了噪声。好像很明显,地是个无限大电流池。电容器有能力旁路噪声。

在 20 世纪 50 年代,电子工业因航空和军事活动得到很大的推进。许多大型电子设备在这个时期被制造。接地的思想从硬件设计扩展到整个设备。一个典型的设备可能包含上百个电子器件。如果一个良好接地使得仪器没有噪声,那么一个真正好的接地连接将使得设备真正没有噪声。因此许多设备的制造采用了很昂贵和广泛的接地方案。星形连接扩展到良好接地连接,这个接地连接采用大量的铜和化学处理的土壤。所有信号屏蔽聚集在几个节点,通过一个大型导体传输到地。对所有公用设备地信号进行了相似的处理。在这些方案中,电源仍然是通过接地的进线口供电。这个接地连接与地完全分开。

让所有的设备地通过一个汇聚节点到这个星形地点,显著增加了故障保护路径的环形面积。这个方法增加了滤波器每个返回路径的环形面积。这在设备中增加了干扰场而不是使之没有噪声。

假定噪声电流进入大地却从来不返回,这当然不是一个好的工程。这被称为“电子学中的集水坑理论”。电路理论要求进入地的电流有一个返回路径。返回路在哪,没人知道。工程师似乎把这个问题放在一边。一旦一个复杂的接地方案被实施,很难再去禁用它,也很难用整个设备测试证明或反驳其质量。

注意 设备不是个电路,它是个复杂的导体,这里许多类型的电压和电流关联的场沿着这个路径存储最小的场能量。

传输所有干扰电流到大地的一个中心接地导体是个巨大的倒置天线。这个地周围的干扰场通过整个设备传播。要停止这种辐射设施必须建立一个坚固的密封金属盒。这是一个困难的建筑问题。

5.18 设备的接地平面

接地平面的表面是导电的,接地平面的大小取决于应用。对于印制电路板来说,接地平面的尺寸可能小到 1cm^2 。一个大型印制电路板接地平面可能是 $12 \times 18\text{in}^2$ ($1\text{in}^2 = 6.45\text{cm}^2$)。在电子设备中,建造的接地平面可能有一个房间的大小。接地平面包括机架上的侧板、铝箔条或建筑物下面的地面。虽然导电表面不是平坦的,但可以将金属盒视为接地平面。如果导电表面从地板延伸到墙壁,它仍然是接地平面。很明显,“平面”这个词已经失去了“扁平”的特征。

在第3章中介绍了印制电路板接地平面被用作逻辑和功率电流的返回路径。换句话说,携带信息的场在走线和接地平面之间传送信息。如果导电表面是易弯曲的,即使它变成直角,它仍然起着接地平面的作用。

注意 在设备中使用接地平面提供信息的返回路径是不实际的。

接地平面经常用于设备设计中,它们的存在并不能保证干扰受到限制。像任何其他工具一样,收益必须权衡投入。设备的大小和性质随着技术的变化而变化。曾经需要满屋子的硬件现在只需要一个设备,曾经需要大量的电缆现在只使用光纤,保持不变的是公用电力的特性、雷电的性质和静电放电(ESD)。下面回顾一下接地平面如何在设备中使用。

设备的接地平面通常是支撑在支柱上的桁条(纵梁)网格。桁条之间的间距可以是 30in,支柱通常高约 3ft(1ft=0.3048m)。

高出地面的地板有几个好处。电缆可以在地板下的架子之间通过,这样的安装看起来很整洁。地板下面的空间可以形成一个充气室,用来为电子设备冷却空气。支撑在桁条之间的地砖是微导电的,以便在地板上行走的人可以排出身上电荷。这就控制了具有很强的破坏性的 ESD 过程。人体对地板的电容一般约为 300pF,时间常数为 10s,意味着地砖应提供大约 $300\text{M}\Omega$ 的电阻路径,以允许人体上累积的电荷快速排出。这些导电地砖通常具有约 $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ 的电阻率。

如果桁条网格与房间周边的建筑用钢相连,那么在闪电活动期间,设备机架之间的电势差将是有限的,结构如图 5.4 所示。

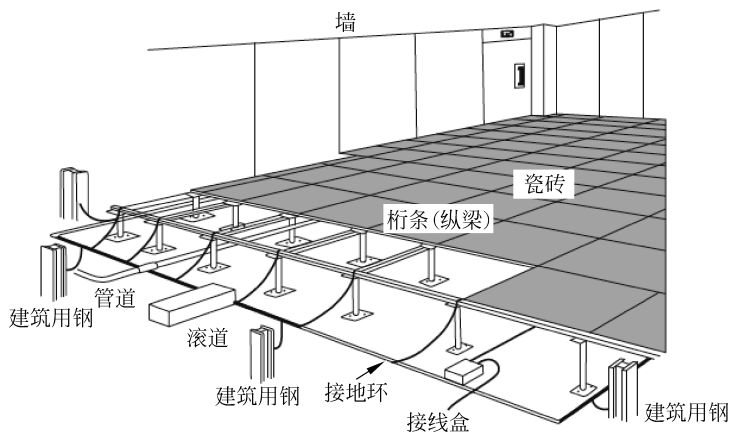


图 5.4 电子设备中的典型接地平面

设备接地平面不会衰减或消除电磁场。导电平面的唯一作用是反射一个到达的波,它具有一个与平面相切的场 E 。具有垂直场 E 的波可以沿着导电平面表面传播而不衰减。平行于导电表面的相关场 H 仅仅使表面电流流动。

为了使桁条接地平面看起来像铜板一样好,桁条之间的电阻连接应该很小。这是通过制造电镀表面的桁条和使用弹簧式垫圈将桁条螺栓连接在一起来实现的。这样,接触面处于恒定压力下,其目的是为了在一系列地板载荷和温度变化时保持良好的连接。

桁条(纵梁)接地平面应该连接到每个电子设备,而每个电子设备又连接到每个设备的接地平面。设备中的线路滤波器已经避开了接地的电容器。该桁条系统连接到接地设备,并为这些电力滤波器的电流提供多条路径。因此,桁条系统在限制与该电流相关的干扰场的强度方面是有效的。

每个嵌在桁条之间的瓷砖必须与瓷砖周边的桁条接触。当瓷砖被移除替换时,提供这种连接的硬件必须重新安装,否则就不能达到防止电荷累积的保护作用。

注意 控制 ESD 的最佳方法是控制湿度。如果湿度在 30% 以上,电荷积聚的可能性就很小。控制湿度的最佳方法是使用中央空调,加湿器经常起不到足够的保护作用。

为了避免产生 ESD(静电放电),转台抛光机不应该在电子硬件附近的地板上使用。

接地平面的桁条起到类似金属网的作用,只是比金属网的开口大很多。为了使金属网有效,它必须与周围的外壳结合在一起,可以参见 7.10 节的介绍。由于接地平面是由桁条制成的,周边没有受控的导线用于孔径闭合。由于这个原因,在接地平面两侧可以存在外场。

为使设备中接地平面有效,所有设备机架都应在其底部与地面黏合。实际上,设备机架应该是接地平面的延伸部分。更重要的是连接电缆的布线。通常的做法是把电缆放在机架下面的混凝土地板上。电缆与桁条接地平面之间的环形区域可以很大。这些环路区域允许在桁条底部存在磁场共模耦合。在桁条上悬挂电缆可以减少这种耦合,尽管少这样做。

连接在一起的机架应该在接触压力下使用接触垫圈来紧靠电镀表面,即使振动也不能使这些连接松开。

5.19 其他接地平面

混凝土地板中的钢筋可能被视为接地平面。钢筋埋设在混凝土中,不存在多个表面连接。因为钢筋不是在每个交叉点都有焊接,所以它们不构成适当的网格结构。这种钢对设施的电气性能几乎没有影响。钢只是更导电的材料,如水管、煤气管道、钢梁或金属托盘。这些导体改变电磁场,但它们不是受控表面。

导电表面可以被添加到连接设备机架的地板上以形成接地平面。这个增加的表面必须在其两端的宽度上黏结到机架的框架上才能有效。这个增加的导体不应使流动的电流在单点处集中。接地平面只有在控制或限制场耦合时才有意义。

5.20 远程站点接地

远程站点通常在露营车中放置电子设备。如果向站点提供公用电源,可能存在安全问题。如果站点在荒漠,则可能没有足够的本地接地连接。车架成为接地电极系统。车辆外部的所有金属物体都应该连接到车辆上。如果没有做到这一点,就有可能存在触电危险。如果存在电力故障或附近有雷击,则车辆和这些导电的外部金属物体之间可能存在电势差。例如,一个金属地板垫和一个附近的金属栅应该连接到车辆底盘上。如果没有这种连接,这可能是极其危险的。

5.21 延伸接地平面

如果需要将一个接地平面从一个房间延伸到另一个房间,那么通过隔墙进行一系列连接就可以了。一种典型的解决方案是使用横跨房间导线将桁条连接在一起。这些导线可以被焊接或通过螺栓连接到桁条上的预留表面上。

如果需要将一个接地平面延伸到二楼,接地平面必须通过一堵墙的向上延伸部分进行连接。在这种情况下,在地板之间布线的电缆必须穿过平面的另一侧,这种布局应该不会有问题。墙平面可以用金属网制成,只要导体在每个交叉点都黏结在一起。网格应沿着房间的纵向焊接或螺栓连接到桁条系统上。网格中的孔允许磁场穿过另一侧,电缆也必须穿过这些网格。

试图使用建筑物间延伸的接地平面是不切实际的。一个公认的妥协方案是将电缆放置在一个大的导电管道内,并将管道两端与地面连接。这就能使与闪电相关的场停留在管道的外部,降低了雷电跟随电缆进入硬件的风险。光纤或射频链路是在建筑物之间传输信号的有效方法,而不必考虑地电势差。

5.22 闪电

当下雨时,水滴夺去空气分子的电子,携带这些电荷到地球,空气中的这些电荷形成了围绕地球的电场。电场强度在地球表面的平均值大约为 100V/m 。我们一般不太重视这个场,因为无论我们走在地球上哪个地方,电势都会变为零。我们的身体是与地球始终保持接触的良导体。出于这个原因,我们没有感觉到这个电压梯度。用灵敏的仪器可以测量出该电压梯度。

在有风雨天气的地方,电场强度增加,场强在尖端物体附近能够达到很高。如果空气在这个物体附近离子化,电离路径在物体尖端向上延伸。在云和离子化路径的尖端之间的电压梯度增加,这加速了离子化过程,导致一个很窄的导电路径建立在地球和离子云之间。此时,有一个雪崩电荷向下沿着电离路径流动。离子云利用这个电离路径作为一个导体存储能量。这正如一个很长的导体正在对一个巨大的储存电荷的电容器放电一样。

空间中放电容积可扩展到离电离路径附近 150m 的地方。以光速计算,大约 $0.5\mu\text{s}$ 的时间这个场就会崩溃。电流脉冲可以从几千安培达到十万安培。电流的第一个脉冲将加宽电离路径。当这个电流脉冲停止,云中的场重新调整,第二个和第三个电流脉冲可以沿着同样的路径。当路径断开或者电压梯度很低时,闪电活动停止。

注意 闪电的机理就是保持地球上空气中的所有电荷平衡。

5.23 闪电和设施

当闪电击中地球时,电流在地球表面分散。因为趋肤效应,电磁场不能穿透地球较深的地方。电击点附近的电压梯度大到足以使站立在潮湿地面的动物触电而亡。

公用设施应该使进线口在同一个点进入设备,例如可能是电源、电缆和电话线路。如果使用了分开接地点,附近闪电电击可以在这些公用设施之间产生大的地电势差。如果这些电路一起置入同一个硬件,可能造成硬件的损坏。

闪电和电路理论几乎没有共同点。闪电脉冲附近的电磁场很复杂。这个快速改变的场控制了闪电将发生的路径。来描述这个电流路径最好的工具是电感。当主脉冲到达建筑物时刻,与地的电压是零。流过建筑物的能量可以看作是在同轴传输线中传输的波。闪电路径是中心导体,外部导体(返回路径)是位移电流在附近空间的流动。位移电流来自于快速变化的 E 场(电场)。

各种不同形状的导体上的电压可以通过假设在一个电感上的电流变化率计算得出。电流脉冲的上升时间大约为 $0.5\mu\text{s}$ 。一个 10in 长导体的电感为 $1\mu\text{H}$ 。一个 50 000A 的电流脉冲在电感上产生的电压为 100 000V。在建筑物上,每层之间的电压很容易达到百万伏。当达到这个电压幅值,空气能够被电离并导电。当闪电击打在建筑的钢铁上,可以看到闪电在大梁上跳跃而不是沿着水平梁到垂直梁。原因很简单,直角路径具有电感性,产生的电压将空气电离化。空气击穿始于梁的交叉点,并移出进入周围空间中。当闪电击打建筑物的屋顶时,闪电应该通过导体被引导到设施的墙上并通过向下并行的导体引向地。这个增加的闪电路径应该比空气管道、水管道或者天线的阻抗要低。

向下并行导体应该提供笔直路径而不是弯曲或者转向的路径。如果必须有转向,它们必须有合理的半径。一个宽的裸金属远好于一个向下的大型圆导体。在建

筑物中片状金属墙板能提供比一组向下并行导体更低的阻抗路径。在这种情况下,这组向下并行导体可能真是多余的。如果使用片状金属,它应该沿着底部边通过多点接地来限制设施楼层地的电弧。

闪电可以在向下并行导体附近产生一个高感应电场。在一个具有钢结构框架建筑物中,电子设备应该放置在远离钢铁的位置以避免可能的破坏。为了证实这个问题,在距离一个 50 000 A 脉冲电流 1 m 远的地方 H (磁场强度) 几乎为 8000 A/m, B (磁感应强度) 是 $\mu_0 H$, 等于 0.01 T。这个磁通量在 0.01 m^2 环形、导体上为 10^{-4} Wb 。如果磁通上升时间是 $0.5 \mu\text{s}$, 感应电压是 200 V。在带有一样的电流片状金属墙板附近, 这个感应电压可能减少为原来的 1/10。

注意 闪电电流不需要流入电路就可以造成破坏。附近的脉冲就可以感应产生足够的电压并在一个环形导体中破坏电路。

5.24 船舶避雷保护

在有雷雨的地区, 船只经常被闪电击中。桅杆或天线的存在为电击提供了一个吸引点。小型船只特别脆弱, 因为它们通常不是金属结构。闪电是一种寻找地的现象, 在这种情况下意味着寻找海洋的表面。在金属船只中, 电流被分散并在很宽的区域流入水中。在小型船只中, 电流进入水中的入口是有限的。

注意 在一些文献中, 海洋表面也被称为地面。

经常忽视的复杂情况是, 电流不能从龙骨或浸没水中的螺旋桨轴流入水中。这是因为海洋是导体, 磁场在导体中衰减。需要明确的是, 电流的流动需要消耗磁场。金属船体之所以能工作, 是因为电流能从大面积的海面进入海洋。在小型船只中, 可能没有一条通向水面的简单传导路径, 结果是船上导电物体之间会产生电弧。在这种情况下, 人体也是一个导电体。

闪电活动所涉及的能量是在云层的电场中。这种能量可以通过光、声音和热释

放。在海洋中流动的闪电电流受限于水面几英尺处的趋肤效应。首先考虑的是防止闪电进入天线并破坏电子设备。可以安装高于天线的尖形接地导体（也称为避雷针、空气端子或下行导体）。天线信号可以使用绑在天空设备终端上的同轴电缆进行传输。同轴通道中的导体将确保闪电电流将遵循直线路径。下一个问题是提供从任何设备终端到海洋表面的传导路径。一组向下的并行导体形成所谓的法拉第笼。这些导体就像保护伞限制场的渗透。在这种情况下，闪电电流沿着这些下行并行导体通向海洋表面。

为了更有效，下行并行导体应该进行“接地”。由于闪电电流（场）不能穿透海水表面超过 1m，所以接地的首选位置在水位线上。

如果没有设置下行并行导体却发生了雷击，那如何将能量传到水中。电弧通常发生在可用导体之间以便将能量传到水中，可用导体可以是电线、导管、电气硬件或管道。为了到达水中，电弧的放电甚至可以在包裹船体的绝缘表面上电击出一个洞。

5.25 停泊的船舶接地

我们通过讨论与电荷相关的电场和磁场开始编写这本书。这些电荷是围绕原子核的电子。在导体中，参与电活动的电子数量只是可用数量的极小一部分。有趣的是，金属、气体和介电材料的性质是由这些电子的场如何在原子水平上相互作用决定的。事实上，导体在非常高的电流水平保持其物理性质，另一种说法是几乎没有任何可用的电子参与电流流动。

化学是研究原子如何相互作用的学科。基本上，这种相互作用涉及在复杂的分子结构中共享电子。大多数金属在自然界中很少以纯态存在，一个很好的例子就是我们称为钢的铁合金。自然界给我们的铁矿石是氧化铁，我们必须做大量的工作，把铁和氧分开，然后加入各种其他元素得到一种好的结构材料。铝也是如此，铝是通过电解从铝土矿中得到的。重要的是要认识到，自然界总是试图将金属与其他原子结合，因为这代表了较低的能量状态。对于铁，与它结合的原子是氧原子，形成的氧化铁分子就是俗称的铁锈。

当导电液体(如海水)与金属接触时,会发生许多化学反应。当盐溶于水中时,钠和氯原子形成的离子不会像在晶体中那样结合在一起。这些离子在某种意义上是分离的,它们可以支持电流在液体中流动。离子电流是电镀的基础。

考虑两艘船与海水接触:一艘是铝船体;另一艘是钢船体。这样就形成了电池,并且在金属之间可以测量到电势差。如果在船体之间有导电路径,例如设备接地导体来自岸上电力,电流将从电池流经海水。海水的化学作用会氧化铝船体,需要三个铝电子来结合两个氧原子以形成一个氧化铝分子,这就是所谓的电偶腐蚀。

限制这种腐蚀有两种方法。第一种方法是使用电流隔离器。这些隔离器抵消设备接地导体中产生电流时微小的电势差。一对背对背的硅二极管将抵消大约0.6V的电势差。如果与设备地串联连接,电池将不再起作用,但仍能提供故障保护。第二种方法涉及牺牲阳极。优选的材料是锌,因为在电位序中锌的位置比较靠前。锌被氧化的,而不是铝。锌必须与铝制船体在水位线以下有良好电连接。如果涉及大的表面,那么可能需要几个锌阳极。在直流电中,电流确实在水面下流动。

我们都知道要保护船只免受电偶腐蚀和杂散直流电流的腐蚀。有许多不同的条件需要考虑。通常由铝、不锈钢和铁组合而成的物品,不需要接地导体就能发生腐蚀。有一些细节需考虑,如裂缝、塑料绝缘体和缠绕紧密的绳子等地方,水可以氧化金属而造成损害,甚至在水中产生酸的化学过程也会对木船体造成损害。

5.26 飞机接地

在飞机金属表面上移动的空气很容易使飞机在飞行中造成电荷积聚。在飞机着陆时,这些电荷最终会流到地面。电荷的排放率取决于空气湿度和飞机的轮胎状况。标准做法是在飞机加油之前对飞机进行接地连接。接地意味着在燃料车、飞机和地面之间的电气连接,是在打开油箱盖之前完成的。飞机与燃油线之间的任何电弧都可能导致爆炸和火灾。加油人员必须穿着特殊的鞋子和衣服,以避免静电放电(ESD)的风险。

飞机在飞行中经常被闪电击中,闪电使飞机作为闪电路径的一部分。如前所

述,闪电通常由多个脉冲组成。飞机在脉冲之间行驶的距离将显示为一系列直线凹痕。飞机上的燃料盖是用来防止表面电流进入的。

5.27 接地故障中断

NEC 现在要求在厨房、浴室及可能使用电器设备的户外使用 GFI(接地故障中断)电源插座。如果接地导体中没有回流 5mA 或更多的电流,这些插座将中断电源。例如电器设备中金属外壳已经与非接地(热)导体形成了一条导电路径就是一个典型的例子。如果用户在金属水槽和电器之间进行电连接,就会受到电击。5mA 范围内的电流也可能是致命的。

GFI 中的电路很复杂。接地和不接地的导体通过小的环形线圈连接。如果电流正好相等且相反,磁路中的净安培匝数为零。如果电流不平衡,一个几百转的线圈在环面上会产生一个几伏的信号。这个信号操控电路,然后操控继电器,继电器将电源从插座断开。继电器“开启”被锁定,只能通过机械方式复位。这种电路已经并入到大部分的半导体元件中。没有实现小型化,产品就不实用了。

注意 当分支电路上有多个插座时,只有一个插座需要 GFI。在 GFI 之外连接的插座将被自动保护。

如果插座不工作,断路器却是正常的,问题可能是 GFI 跳闸了。

5.28 隔离变压器

隔离变压器是一种独立派生的电源。它们常用于操作重型设备,如焊机、间歇式电动机、提升机和冲床。这些负载可能给实验室或测试设备带来干扰问题,这取决于设备是如何设计的。

隔离变压器提供新的接地或中性导体,可消除很大一部分的干扰问题。这个附

加的变压器还有两种方法可以减少干扰。可以在初级变压器线圈和次级变压器线圈之间添加静电屏蔽,并且可以在初级变压器上放置线路滤波器。带有屏蔽、滤波器和断路器的变压器通常被称为计算机电源中心。屏蔽的作用如图 5.5 所示。

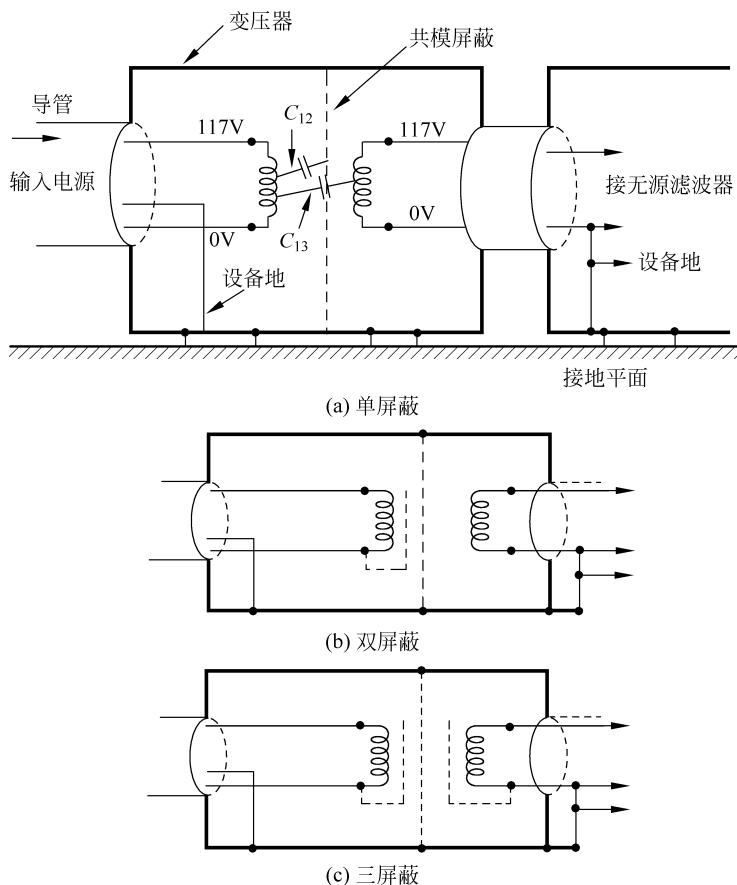


图 5.5 单相隔离变压器屏蔽的作用

第一个初级屏蔽限制了电容 C_{13} 中共模噪声电流的流动。有了屏蔽,电流只在 C_{12} 中流动。在 C_{12} 中流动的电流也在初级线圈中流动,并且由于变压器的作用,噪声可以在次级线圈一侧出现。为了限制这种耦合路径,添加了第二个初级屏蔽,如图 5.5 所示。

在次级线圈上通常增加第三个屏蔽。这限制了通过耦合到初级电路而产生在次级线圈一侧的噪声。重要的是要注意,这三个屏蔽被连接在变压器内部,而且短

连接是最佳的连接方式。那些把这些屏蔽接到中心接地点的想法是不正确的。

5.29 接地与电网

这里以太平洋电网为例,太平洋电网用于在太平洋西北部和南加州之间输送电力,它用两条直流线路供电。这项技术最早是在瑞典开发的。电力可以向任何方向输送,但是在电网内部它通常向南流动。目前电源的容量为 3.1GW,足以供应 200 万~300 万用户。这个系统由约翰·F.肯尼迪总统于 1961 年向国会提出的,并于 1970 年投入使用。据说这个系统每天可以节省南加州 60 万美元的支出。通过哥伦比亚河水输送的能量比燃烧化石燃料产生的能量便宜得多,也清洁得多。直流电实用的原因与距离有关。在频率为 60Hz 时,由于趋肤效应和供应无功能量造成的损耗使得交流系统在 500mile 以上的距离上的供电变得不切实际。有了改进的逆变器,这个距离现在短得多。在世界范围内,围绕高压直流系统正在规划许多扩展系统。

该电力网将三相 60Hz 电源转换为正负 500kV 直流。太平洋电力网是两条直流输电线路,从华盛顿州的塞利洛换流站到洛杉矶附近的西尔马换流中心,距离 1362km。地球(电压中点)用作中性导体或参考导体。每个导体的电流为 3100A。大约 10%的损耗意味着 300A 的接地电流。为了限制连接接地路径时的损耗,接触电阻必须是毫欧姆的数量级。

线路北端的接地线路在 6.6mile 外的俄勒冈州赖斯平原。接地连接由 1067 个铸铁阳极组成,阳极位于一个 2mile 宽的充满石油焦的沟槽中。接地连接通过两个 1.1in 的钢芯铝导线与塞利洛连接。

南加州的接地连接也同样不同寻常。在威尔·罗杰斯州立海滩,一共有 24 根硅铁棒悬挂在混凝土围栏中,被淹没在海底 1ft 之上。海滩到西尔玛的距离是 30mile。两个接地导体也是 1.1in 的钢筋铝。该系统的效率估计为 77%左右。电力导体使用了 8600t 铝。每根直流电力线导体每千米的电阻值为 0.027Ω 。

现在使用的转换器是一组称为阀门的光激活晶闸管。这些转换器比早期的汞

弧阀更有效。现在的转换效率使得更短的传输变得可行。2010年,在匹兹堡、加利福尼亚和旧金山之间完成了 53mile 直流电力线路。该线路能输送 400MW、200kV 的直流电,即峰值需求的 40% 电源。

5.30 太阳风

太阳不断地喷射带电粒子,这些粒子主要是电子和质子。地球的磁场使大部分电流偏转。在太阳剧烈活动期间,粒子流会破坏地球上的通信,偶尔也会造成停电。等离子体将直流电流耦合到使配电变压器铁芯饱和的长传输线上。在这种情况下,必须中断电源以避免系统损坏。如果系统不能从这种传输损失中重新配置,那么系统会停电很多小时。显然,关机比更换硬件要好。在太阳剧烈活动期间,公共事业部门一直处于警戒状态。

长长的金属管道可以与这种太阳风耦合。在北极,长长的输油管道被支撑在塔上,这些塔与下面的融化的土地相连。绝缘体必须中断所形成的导电环路,否则电流引起的电解会破坏管道。