

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.012

接地技术在电力电子技术实践应用中的探讨

廖无限, 周翔, 文定都, 张德军

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 接地技术是保证电力电子装置可靠工作的关键技术之一, 研究了有关接地的系列问题。详述了接地的分类、定义、目的, 引入接地阻抗概念来解释接地出现的各种现象, 并给出了解决接地技术的应用策略, 最后, 设计了一种较佳的接地技术方案, 以期实践者能较好地解决接地技术在电力电子技术实践应用中遇到的大多数问题。

关键词: 接地; 电力电子; 阻抗; 地环路

中图分类号: TN70

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0065-05

Discussion on Grounding Technology in the Power Electronic Technology Practical Application

Liao Wuxian, Zhou Xiang, Wen Dingdu, Zhang Dejun

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The grounding technique is one of the key technologies to ensure reliable operation of power electronic devices, and a series of grounding questions are studied. The classification, definition and purpose of grounding are described, the concept of grounding impedance is introduced to explain various grounding phenomena appeared, and the solving strategies for the grounding problem are presented. Finally, a better grounding technology scheme is designed for practitioners to solve most of the grounding technology problems in the power electronics technology practical applications.

Keywords: grounding; power electronics; impedance; ground loop

0 引言

随着电力电子技术朝着高频、高速、高效率、模块化和多功能化方向的发展, 产生了与之对应的高可靠性、高工作寿命和高抗干扰等方面的突出问题。从应用技术角度来看, 其产生的主要原因是电力电子装置本身功率容量和功率密度的不断增加, 电能变换电路中存在较大的 du/dt 和 di/dt ^[1]。其中, 如何处理好接地技术问题往往贯穿着电力电子实践应用的整个过程, 也是电力电子装置是否达到设计和使

用要求的关键之一。具体来说, 接地技术不仅决定着有关电力电子电路的定性分析和参数计算是否正确, 而且还决定着有关产品设计与生产后电磁兼容性 (electro magnetic compatibility, EMC) 等可靠性实践的成败; 另外, 对于接地技术概念模糊的初学者而言, 它是一个必须逾越的障碍, 是初学者进一步深入电力电子学习和实践的基础。本文先介绍了接地的目的、定义与分类, 分析了接地过程中出现的 3 种现象: 地线阻抗、地环路和公共阻抗, 对 2 大类

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 湖南省科技厅科技计划基金资助项目 (2011FJ3230, 2012FJ4266)

作者简介: 廖无限 (1969-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学工程师, 主要研究方向为电力电子技术及其应用, 自动控制技术及其应用, E-mail: 714637797@qq.com

接地技术进行比较，最后设计了一种在电力电子技术实践中通用的、较佳的接地技术参考方案。

1 接地的目的、定义与分类介绍

1.1 接地的目的

在电力电子技术应用当中，接地的目的有2种：其一是为了保护人身、设备安全；其二是为了抑制干扰。例如，设备外壳的金属件直接连接大地，可以提供静电电荷的泄漏通路，防止静电积累；接系统基准地可以给电源和传输信号提供一个基准电位，保证设备正常工作。系统基准地与大地相连，还可以起抑制干扰的作用^[2]。

1.2 地的定义

所谓地，一般有2种定义：一种地，是作为电路电位基准点的等电位体，其通常被认为零电位；另一种地，是电流能够流回源的一条低阻抗路径。在电力电子技术应用当中，比较倾向于后一种定义。其原因是，一旦电力电子装置运行，实测地上的电位并不是恒定的，如果用仪表或仪器测量地线上各点之间的电位，会发现各点的电位可能相差很大。第一种地的定义是一个等电位体，仅仅是一种理想状态，而后一种地的定义突出了地线中电流的流动性和具有阻抗性的特征，按此种定义很容易理解地线产生干扰的原因^[3]。

1.3 接地的分类

接地的分类如图1所示。

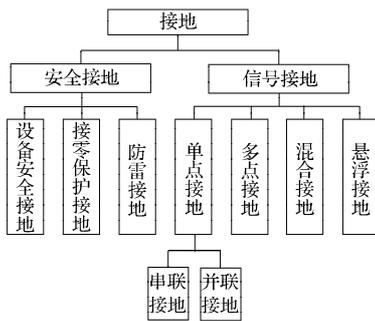


图1 接地的分类

Fig. 1 The grounding classification

接地按作用通常分为安全接地和信号接地。其中，安全接地主要防止人身或设备因电击造成的伤害，可分为设备安全接地、防雷接地和接零保护接地，是一种遵循行业、国家和国际规范的强制性标准；信号接地主要为功率电流或信号流通提供参考的基准电位，可分为悬浮接地、单点接地、多点接地和混合接地^[4-5]。信号接地是比较复杂的问题，需要依据系统信号的频率、电路结构和实现

功能的不同，以及比较实验测试数据后，再权衡利弊，采取相应的策略。本文将重点探讨信号接地问题。

2 接地过程中的现象分析

PCB地平面地线电位分布如图2所示。在对一个较复杂的电力电子电路PCB板的地平面局部测试中发现，实际的地（地线或地平面）一般并不是等电位的，会呈现出幅度不等的电位差。如果接地设计不合理，实际的地（地线或地平面）局部的电位差可能比图中的更大，足可以促使电力电子电路产生误动作，甚至破坏系统正常工作，即产生了地线严重干扰现象。另外，除了接地设计不合理外，焊接、装配和使用过程中接地不良时，也会产生类似现象。上述现象产生的主要原因是电力电子电路中存在地线阻抗、地环路或公共阻抗。

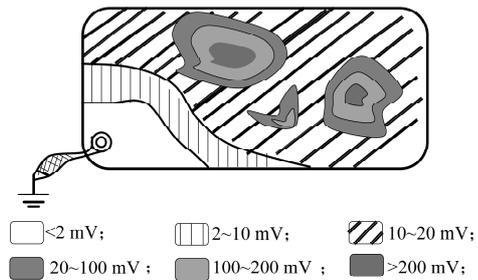


图2 PCB地平面地线电位分布

Fig. 2 Diagram for ground potential distribution in PCB ground plane

2.1 地线阻抗

地线的阻抗 Z 由电阻 R 与感抗 $j\omega L$ 相加组成，即

$$Z = R + j\omega L, \tag{1}$$

式中 ω 为角频率， $\omega = 2\pi f$ ，其中 f 为信号频率。

当信号频率 $f = 0$ 时，导线的阻抗 Z 等于导线的电阻 R ；当信号频率 $f \neq 0$ 时，导线的阻抗 Z 为导线的电阻 R 与电抗 $j\omega L$ 之和；当频率 f 较高时，导线的阻抗 Z 基本上由导线的感抗 $j\omega L$ 决定，感抗 $j\omega L$ 的值远远大于电阻 R 的值。由于地线存在阻抗 Z ，因此，当电流流过地线时，在地线上各点之间形成电位差，进而使信号传输出现偏差，即出现了地线阻抗干扰^[3]。另外，将地线看作导线，单纯从导线的定量分析来看，导线越短、截面积越大，其阻抗 Z 越小，这就会使地线阻抗干扰越小。

2.2 地环路

地环路等效电路如图3所示。如果环路有电流流动，则会产生一定的磁场强度 H 。根据电磁感应原理可得：感应电势 $E(H)$ 正比于环路面积 S ，即

$$E(H) \propto S. \quad (2)$$

地环路面积 S 越大, 电路工作时对外产生的电磁干扰就越大。因此, 针对高频工作状态下的电力电子电路而言, 应尽可能地使地环路面积小。另外, 电力电子电路控制模块中地环路所受的电磁干扰, 也可由附近的大功率电器启动或外界其它的交变电场感应而产生, 因此, 在实际应用当中, 地环路引起的环路电流也要引起足够的重视。

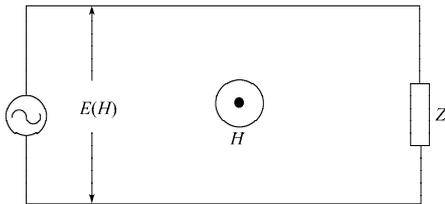


图3 一个等效电路图

Fig. 3 One equivalent circuit diagram

2.3 公共阻抗

共阻抗耦合如图4所示。电路1和电路2共用一段地线, 等效为阻抗 Z 。当电路1有电流 I_1 流过时, 根据欧姆定理可知, 在等效地线阻抗 Z 上, 会产生干扰的地电位 V_N 信号, 且该信号会耦合进入电路2中。同样, 电路2单独工作也一样。因此, 这种共用地线阻抗 Z 的存在会造成相互干扰。

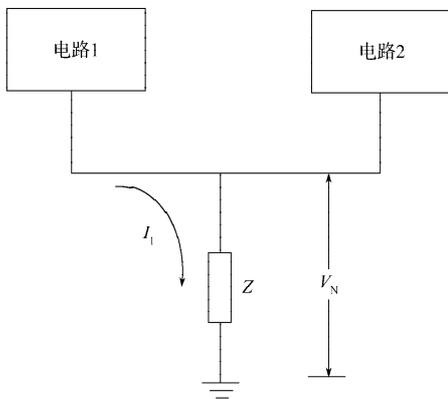


图4 共阻抗耦合示意图

Fig. 4 Schematic diagram for common impedance coupling

3 实用的接地技术比较

从抗信号干扰的角度, 实用的接地技术可分为消除地线环路和消除公共阻抗干扰两大类。其相应的接地策略如下。

3.1 消除地线环路

消除地线环路可采用下述4种隔离结构。

1) 悬浮接地, 简称浮地, 如图5所示。其优点是: 电路与外部的地系统有良好的隔离, 切断了地环路, 可以消除地环路电流, 不易受外部系统的干

扰。缺点是: 电路上易积累静电, 会产生静电干扰, 严重时可产生危险的的对地电压。



图5 浮地示意图

Fig. 5 Floating grounding diagram

2) 隔离变压器。隔离变压器可以不用考虑共地问题。其分为一次侧与二次侧非屏蔽不共地方式(见图6)和一次侧与二次侧屏蔽不共地方式(见图7)。图6中, 隔离变压器一次侧与二次侧之间可以等效为电容 C_p , 两者之间会有电压差 V_G , 因此, 只要不超过隔离变压器设计的频率和工作电压范围, 一次侧与二次侧之间容抗和耐受电压可保证其安全的信号隔离。图7中, 金属屏蔽层必须接点2, 该电路抗干扰能力才最强; 隔离变压器一次侧与二次侧之间可以等效为电容 C_1 和 C_2 与地构成电容滤波电路, 两者之间也会有电压差 V_G ; 相对于图6所示的电路, 其抗干扰能力更好。

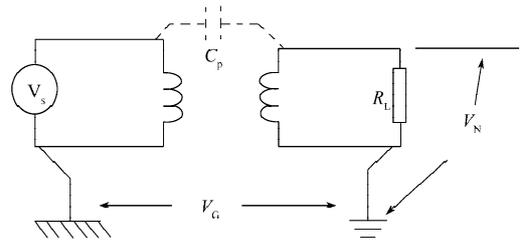


图6 一次侧与二次侧非屏蔽不共地方式示意图

Fig. 6 Schematic diagram for unshielded non-common-ground mode of primary and secondary sides

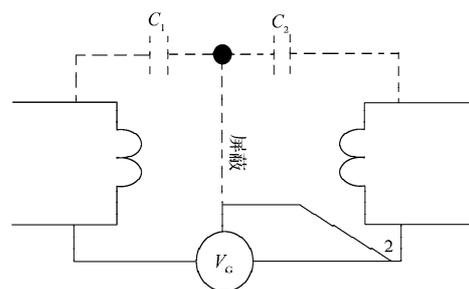


图7 一次侧与二次侧屏蔽不共地方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram for shielded non-common-ground mode of primary and secondary sides

3) 光耦器件, 如图8所示。光耦器件也可以不用考虑共地问题。其工作原理与图6类似, 与隔离变压器不同的是, 这种方式只能传递信号, 不能传递能量, 但是当前的光耦是一种最好的, 同时具有隔离性强和工作频率范围宽的器件, 应用于抗干扰中占有越来越大的比重。

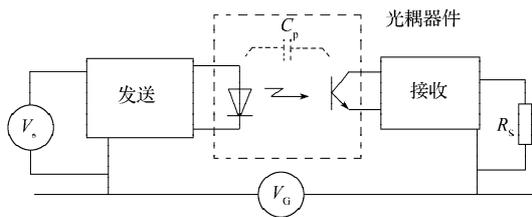


图8 光耦器件示意图

Fig. 8 Schematic diagram for optocoupler device

4) 共模扼流圈, 如图9所示。图中, 发送端与接收端之间也存在一个等效的电压差 V_G 。共模扼流圈只能抑制共模干扰, 不能抑制差模干扰。对于高频电路来说, 共模扼流圈的匝数越多, 则寄生电容越大, 地环路的阻抗变小, 线环路电流变大, 则高频隔离效果会变差。

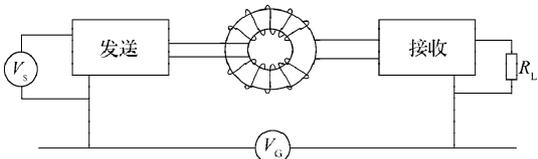


图9 共模扼流圈示意图

Fig. 9 Schematic diagram for the common-mode choke

3.2 消除公共阻抗

消除公共阻抗可采用下述4种隔离结构。

1) 单点接地 (串联)。单点接地 (串联) 主要由各自隔离的电路1、电路2和电路3组成, 3个电路依次串联接地线, 其存在接地的等效阻抗 Z_1 , Z_2 和 Z_3 , 如图10所示。假设置位的电位参考点分别为 x , y 和 z , 各电路流入地线的电流分别为 I_1 , I_2 和 I_3 , 则 x 点电位为 $V_x=(I_1+I_2+I_3)Z_1$, y 点电位为 $V_y=(I_1+I_2+I_3)Z_1+(I_1+I_2)Z_2$, z 点电位为 $V_z=(I_1+I_2+I_3)Z_1+(I_1+I_2)Z_2+I_3Z_3$ 。由此可见, 接地线 x , y 和 z 3点的电位差异取决于接地的等效阻抗和各电路的入地线电流。这种方式虽然电路简单, 应用较多, 但地线存在公共阻抗耦合, 不适合应用于电力电子技术中高频复杂的电路。

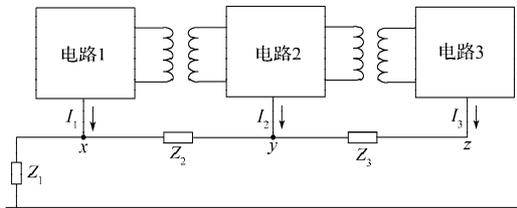


图10 单点接地 (串联) 示意图

Fig. 10 Single-point grounding (series) diagram

2) 单点接地 (并联)。单点接地 (并联) 主要由各自隔离的电路1、电路2和电路3组成, 3个电路依次并联接地线, 其存在接地的等效阻抗 Z_{11} , Z_{12} 和 Z_{13} , 以及公共阻抗 Z , 如图11所示。假设置位的电位参考点分别为 x_1 , y_1 和 z_1 , 公共阻抗 Z 上的电位

参考点为 a , 各电路流入地线的电流分别为 I_{11} , I_{12} 和 I_{13} , 则可以得到各参考点的电位如下。为计算方便, 另假设 Z_{11} , Z_{12} 和 Z_{13} 数值相等, I_{11} , I_{12} 和 I_{13} 数值相等, 则 a 点的电位为 $V_x=(I_{11}+I_{12}+I_{13})Z$, 而 x_1 , y_1 和 z_1 点的电位为

$$V_{x_1} = V_{y_1} = V_{z_1} = (I_{11} + I_{12} + I_{13})Z + I_{13}Z_{13}$$

由此可见, 接地线的 x_1 , y_1 和 z_1 点的电位差异也取决于接地的等效阻抗和各电路的入地线电流, 但是假设 Z_{11} , Z_{12} 和 Z_{13} 相等, 则各电路的地电位只与本电路的地电流、地线公共阻抗 Z 相关。这种方式较容易做到无过多的公共阻抗耦合 (即能保证地线公共阻抗 Z 足够小), 适合应用于电力电子技术中高频复杂的电路。

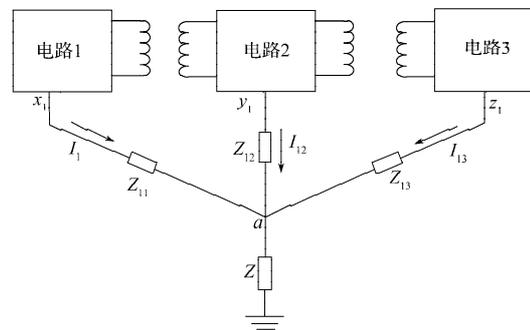


图11 单点接地 (并联) 示意图

Fig. 11 Single-point grounding (parallel) diagram

3) 多点接地。当工作频率高于 10 MHz 或系统内信号地线长度超过波长的 1/20 时, 即通常所说的高频电路, 此时若继续采用单点接地方式, 不仅容易形成较长的地线而增加地线的阻抗, 而且信号线间的杂散电感及分布电容也会造成信号间的耦合, 从而造成系统工作不稳定。当频率进一步增加, 地线的长度达到信号 1/4 波长或其奇数倍时, 地线会由于谐振使阻抗迅速减小, 从而向外辐射噪声信号, 此时的干扰将更为严重。所以, 为降低地线阻抗, 高频系统设备的信号地线应采取就近接地, 即多点接地 (见图12)。同时, 还应尽量采用短而粗的导线作为连接线, 以减少接地阻抗^[7], 即各个接地点都直接接到就近的接地平面上, 使其接地线的长度尽量短。这种接地方式的缺陷是次生地环路问题, 这也需要引起注意。



图12 多点接地示意图

Fig. 12 Multi-point grounding diagram

4) 混合接地。对于电力电子技术而言, 工作频率大于 10 MHz 和小于 1 MHz 的复杂电路通常采用混合接地形式。该接地形式既包含单点接地特性, 又包

含多点接地特性,如图13所示。各电路点主要采用单点接地形式,还可以通过高频电容器多点接地。由于电容的通交隔直作用,对于低频信号电路而言,各电容相当于开路,则整体为单点接地工作方式;而对于高频信号电路,电容相当于短路,则整体为多点接地工作方式。

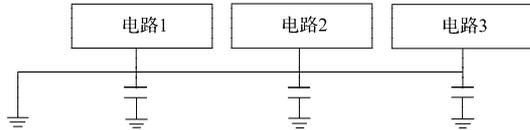


图13 混合接地示意图

Fig. 13 Hybrid grounding diagram

4 通用的接地形式

电力电子技术电路越复杂,则处理接地的问题越困难,目前还没有一个“放之四海而皆准”的接地通用规律。根据上述原理和接地结构,本文介绍了一种通用的、较佳的接地形式,如图14所示。在电力电子技术实践中,参照本文接地方式来处理接地问题,能达到事半功倍的效果。

本文接地方式的具体操作如下。将电力电子技术接地进行分类处理,根据各电路子模块的具体功能和性质,分为模拟工作地、数字工作地、电源地和保护地,并且各类接地分别汇集,再以树状进行连接。其中,模拟工作地、数字工作地的工作电流较小,可以各自汇集后,共用一个汇流条,称之为工作地汇流条,并且这个汇流条线径要大于或等于模拟工作地和数字工作地汇流条线径之和;电源地经汇集后,共用一个汇流条,称之为电源地汇流条,同样这个汇流条线径要大于或等于各电源地汇流条线径之和;保护地汇集后,也共用一个汇流条,称之为保护地汇流条,同样这个汇流条线径要大于或等于各保护地汇流条线径之和。接着,经工作地汇流条、电源地汇流条和保护地汇流条汇集到电力电子系统的机架上,其中机架上汇流条线径要大于其它各汇流条线径之和。最终,经总的接地点入大地。

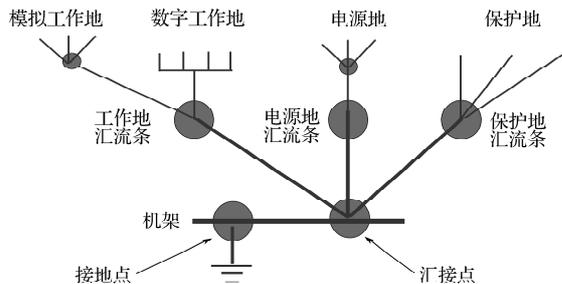


图14 电力电子技术常用接地形式参照示意图

Fig. 14 Schematic diagram for commonly grounding referred form of power electronics technology

5 结语

从实际出发,遵循最基础的电路原理,特别是在较复杂的电力电子电路中,明确2个核心。这2个核心是:

1) 消除地线环路。尽量减小地环路阻抗,减小地环路电流。

2) 消除公共阻抗。尽量减小公共阻抗,减小地线之间的电位差。

同时,还要明确理解2个现象和规律:

1) 通常,实际的地(地线或地平面)并不是等电位的。

2) 电路中的回流总是走最小阻抗路径。

初学者可以参照本文所介绍的通用接地方式,再结合上述接地形式的特性,只要多参与设计和实践,并逐步积累经验,就能较好地解决接地技术在电力电子技术实践应用中遇到的大多数问题。

参考文献:

- [1] 闫民华,强生泽,杨贵恒,等.电力电子装置的电磁兼容技术[J].电源世界,2010,12(7):31-33,45.
Yan Minhua, Qiang Shengze, Yang Guiheng, et al. Magnetic Compatibility Technology for Power Electronic Equipment[J]. The World of Power Supply, 2010, 12(7): 31-33, 45.
- [2] 苏晓华,闻映红.电子设备的接地技术[J].安全与电磁兼容,2004,15(1):39-42.
Su Xiaohua, Wen Yinghong. Grounding for Electronic Equipment[J]. Safety & EMC, 2004, 15(1): 39-42.
- [3] 曹振平.弱电系统中的地线干扰与接地方法[J].电子工程师,2004,30(4):44-46.
Cao Zhenping. Grounding Wire Interference and Grounding Method in Electronic System[J]. Electronic Engineer, 2004, 30(4): 44-46.
- [4] 王耕.地电位变化与电子设备的接地研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2011,29(2):7-12.
Wang Geng. Research on the Ground Potential Changes and the Electronic Equipment Grounding[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2011, 29(2): 7-12.
- [5] 张国兵,佟洁.电力电子装置的EMC设计[J].电子质量,2006(12):65-69.
Zhang Guobing, Tong Jie. EMC Design of Power Electronic Devices[J]. Electronics Quality, 2006(12): 65-69.
- [6] 汉泽西,李彪,郭正虹.接地抗干扰技术的探讨[J].测控技术,2007,26(12):74-77.

(下转第82页)