

文章编号: 1001-893X(2010)08-0156-05

冷机低阻通路下的潜通电路分析及隔离方法^{*}

尹申燕, 刘 敏, 李 靓

(西南电子设备研究所, 成都 610036)

摘 要:介绍了潜通电路的概念和分析方法, 指出冷机低阻通路是在工程实际中形成潜通电路的典型原因以及冷备份电路和先后上电电路两种常见的潜通表现形式, 提出了采用二极管、三态门、集电极开路(OC)输出、光电隔离和选用开关电源等 5 种电路潜通隔离方法, 并阐述了各种方法的潜通隔离原理, 可用于指导潜通电路的分析及其隔离防护电路的设计。

关键词:电子系统; 潜通电路分析; 低阻通路; 隔离

中图分类号: TN701 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.033

Sneak Circuit Analysis(SCA) and Isolation Methods Under Power-off Low Impedance Path

YIN Shen - Yan, LIU Min, LI Liang

(Southwest China Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper introduces the sneak circuit concept and analysis method, points out that power-off low impedance path is the typical reason of forming sneak circuit in engineering practice while cold backup circuit and sequential power-on circuit are the two ordinary failure forms of sneak circuit, and presents five circuit design methods including using diodes, tri-state gates, open collector(OC) output, optical coupler and switching DC-DC modules for isolating sneak circuits and their working principles, which can be used to direct sneak circuit analysis(SCA) and its isolation circuit design.

Key words: electronic system; sneak circuit analysis(SCA); low impedance path; isolation

1 引 言

潜通电路是指电子系统中会使系统产生非期望功能或抑制期望功能的电路。此概念起源于 1961 年的美国“红石”火箭(Mercury Redstone Rocket)事故——火箭尾部插件脱离时形成的潜通电路导致火箭直接坠毁在了发射台上^[1]。此后, 波音公司接受美国宇航局的任务, 开展专门的潜通电路分析(Sneak Circuit Analysis, SCA)研究, 逐步建立起了规范的潜通电路分析理论与方法。经过波音公司、SoHaR 公司(美国军方指定 SCA 软件开发公司)和欧空局的

推动, 潜通电路分析逐渐发展成为航空航天、军用系统等领域一项重要的可靠性分析与设计工具^[2]。在国内, 潜通电路电路分析已成为国防装备研制的可靠性工作项目之一, 更是航天电子设备研制可靠性工作的必做内容。

但是, 目前关于潜通电路的研究主要集中在潜通电路的形成原因分析、复查方法研究^[3]、分析软件设计^[4]以及潜通电路分析在具体系统中的实施应用^[5]等方面, 鲜有文献提及如何采取合理有效的电路设计措施, 主动预防可能发生的电路潜通。本文在装备研制工程经验的基础上, 总结出潜通电路形成的典型原因和在工程实际中的常见表现形式, 并据此提出几条

^{*} 收稿日期: 2010-05-31; 修回日期: 2010-07-19

预防电路潜通的有效隔离电路设计方法。

2 潜通电路分析理论介绍

2.1 潜通电路的概念

潜通电路(亦称潜藏电路、潜在电路),是指电子系统中存在的一种非期望通路或者逻辑流,是设计师无意地设计进系统的,是设计意图之外的电路。在特定的条件下,它能导致发生非期望的功能或抑制所期望的功能。这种功能异常与元器件失效无关,不是硬件故障造成的,而是由于设计疏忽所致。潜通电路一般表现为 4 种形式^[1,5]:

- (1)潜在路径:引起电流、电能或逻辑序列沿非期望的路径或者方向流动;
- (2)潜在时序:事件按非期望或相矛盾的顺序出现;
- (3)潜在指示:引起系统状态的含糊或虚假的指示,误导操作者向系统施加非期望的操作;
- (4)潜在标志:错误或者不准确地标系统功能,误导操作者向系统施加错误的激励。

上述 4 种潜通形式中,后两种是指系统由于自身的设计缺陷,在运行过程中可能引起操作者的非期望操作而导致错误结果的“广义潜通”。在电子系统设计中一般遇到的是“狭义潜通”——潜在电流通路和潜在逻辑时序。

2.2 潜通电路的分析技术

潜通电路分析的基础是对电路进行拓扑简化,从而使电路的电流模型显性化,进而方便潜通线索(易于导致潜通的条件,如通路中的逆向电流、过流、两条通路中预期之外的交互等)识别。分析的基本方法是:首先把复杂的系统和详细的电气原理图简化成以电源、节点、开关、负载和地来表示的简化电路,删去原图细节,将电路元件及其电气连接重新绘成网络树形式;然后利用具体化或图形化的拓扑图来详细分析每个网络树中节点的电流流动。所有电路网络树都是由 5 种基本的电路拓扑模式组成,如图 1 所示,其中 P 表示电源,G 表示地,S 表示开关,L 表示负载^[1,5]。

- (1)I 型:单地单电源单线型;
 - (2)倒 Y 型:双地单电源的接地拱型;
 - (3)Y 型:单地双电源的电源拱型;
 - (4)X 型:双地双电源交叉的组合拱型;
 - (5)H 型:双地双电源桥接型。
- 最后,将电路本身的工作原理和已有的潜通线

索同时应用到简化后的节点拓扑图进行分析,检查电路可能存在的问题,通常表现为一种或多种潜通。目前的潜通电路分析除了传统的潜在通路分析之外还包含了数字潜通电路分析和软件潜通路分析^[2]。

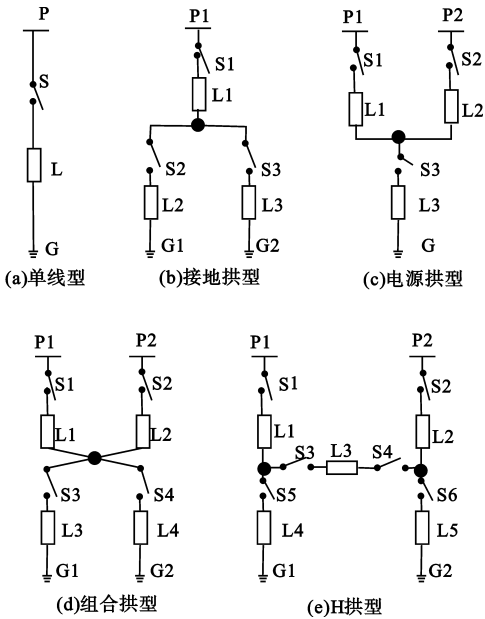


图 1 5 种基本的拓扑图
Fig.1 Five basic topographs

3 潜通电路案例分析

3.1 电路潜通典型原因

由于潜通电路是设计预期之外的潜在通路,在其导致电路功能失效之后,这一现象背后的真正原因往往难以被发现,只有通过反复的测试分析才能最终确定,由此会增加大量的研制时间和成本。

通过最近几次装备研制过程中的归零案例总结发现:在同一电子系统中,两部分电路(或两台单机)之间存在信号连线或者共用电源等电气连接关系时,如果一部分电路(或单机)上电,另一部分电路(或单机)不上电,此条件下冷机与热机之间的低阻通路是形成电路潜通的典型原因。通常表现为热机通过低阻通路向冷机“漏电”,致使本应处于空闲关电状态的冷机电路带有一定的但小于器件额定要求的潜通电压,从而致使电路功能异常。

3.2 冷机低阻通路的表现形式

3.2.1 冷备份电路潜通

冷备份是提高电路可靠性的有效措施之一,两个完全相同的电路分时工作,其中一个电路功能失效时可通过继电器直接切换到另一个原来空闲的冷

备份电路继续工作。此措施常在系统关键单机设计中采用,但如果处理得不好,主备电路之间极易发生电路潜通。

实际案例如图 2(a)所示,完全相同主备份两块电路共用一个输入信号线,输入信号均通过 1 kΩ 电阻上拉到电源。由于两个电路在信号输入端连通,当主份电源 + 5V1 加电、备份电源 + 5V2 不加电时,主份 + 5V1 电源会通过图中虚线所示的低阻通路向备份电源 + 5V2 漏电,从而导致备份电路带有一定的潜通电压,上拉电阻越小,潜通电压越大。按照第 2 节中的潜通电路分析方法绘制的电路拓扑图如图 2(b)所示,将电路其余部分等效成负载 L,此电路连接属于图 1 中的 Y 型(单地双电源拱型)。

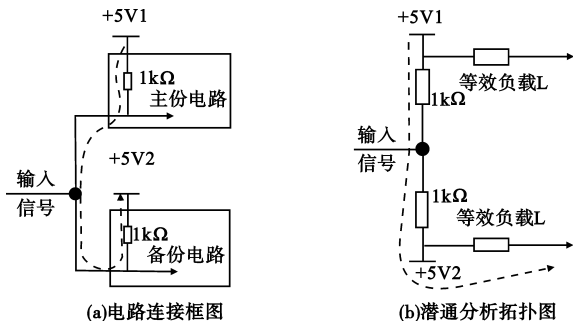


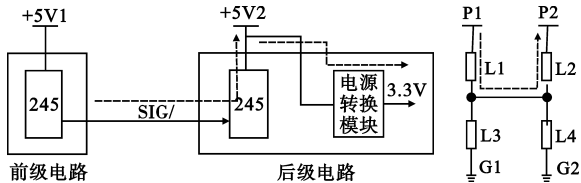
图 2 冷备份电路潜通示意图

Fig.2 Diagram of cold backup sneak circuit

3.2.2 先后上电电路潜通

在高可靠的电子系统中,为了预防多个设备同时上电产生的浪涌电流过大对系统造成不良影响,往往会采取不同单机分步依次上电的加电方法。在一部分单机先上电、另一部分单机尚未上电的情况下,两者之间互连信号线形成的冷机低阻通路可能引起电路潜通,造成后上电单机上电工作异常。

实际案例如图 3(a)所示,前级电路电源 + 5V1 先上电,后级电路电源 + 5V2 未上电时,前级电路输出的低有效信号 SIG/为高电平 5 V。此信号电压经过后级电路中的 245 芯片内部的低阻通路反馈到后续电源端 + 5V2,然后再通过电源转换模块在电路 3.3 V 的器件上形成约 1.4 V 的潜通电压。也就是说,在后级电路上电之前,其上已经有 1.4 V 的潜通电压,如果后级的电路中的某些器件如 FPGA 加载 PROM 芯片 XQ17V16 对上电时间有特殊要求——电源从 0 V 上升到 3.3 V 必须小于 50 ms,先期存在的潜通电压破坏了器件的上电时间要求,导致其上电工作异常,无法正确加载 FPGA。前后单机互联的拓扑关系如图 3(b)所示,属于 H 型(双地双电源桥接型)。



(a) 电路连接框图

(b) 潜通分析拓扑图

图 3 先后上电电路潜通示意图

Fig.3 Diagram of sequential power-on circuit sneak circuit

电子元器件冷机时形成的从信号端到电源端的方向低阻通路与器件自身的结构和工艺有关,有的器件如 LVDS 差分驱动芯片 DS90C031QML 不上电时信号端也呈高阻态(Power-off High Impedance),并不会导致电路潜通。同时,潜通电压的大小也与耦合信号的路数相关,一般来说,满足低阻通路的耦合信号越多,形成的潜通电压越大。

4 潜通电路隔离

4.1 隔离准则

多电源、多地的复杂电子系统容易产生电路潜通,电路潜通的典型原因是形成了设计预期之外的冷机低阻通路。因此,系统克服电路潜通的基本原则是采取有效的隔离措施,既能保证信号的传输,又能避免形成设计预期之外的低阻通路,简而言之,使低阻变高阻。

4.2 隔离方法

4.2.1 二极管隔离

如图 4 所示,在电源与可能的低阻通路之间增加一个保护二极管,由于二极管具有单向导通的特性,电流只能从电源端向负载流动而不能反向流动。这样既能保证电路正常上电时正确工作,又能预防电路冷机时耦合信号线的电压反灌到电源端,形成潜通电压,造成不良影响。

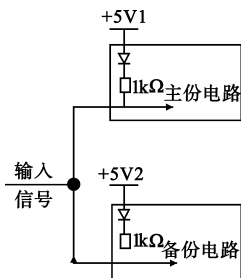


图 4 二极管隔离示意图

Fig.4 Diagram of isolation using diodes

4.2.2 三态门隔离

三态门除了通常的高电平和低电平两种输出状态外,还有第三种输出状态——高阻态。处于高阻态时,门电路与负载之间相当于开路。这一特性正好适用于物理上需要连接但电气上需要隔离的冷备份电路设计。

如图 5 所示,电路增加一级输入输出隔离驱动器(245 芯片),输入输出信号需要经过隔离 245 后才能进入主备份电路。当其中一块电路工作时,另一块空闲电路上的隔离 245 处于高阻状态,从而保证主份电路上运行的对外输入输出信号对备份电路上的未加电部分没有影响。采用这种方案需要增加一组先于电路工作电源上电的 +5 V 共用电源,以确保当电路上工作时,主备份上的隔离 245 已经分别处于正确的导通和高阻工作状态。

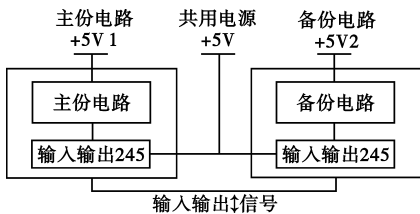


图 5 三态门隔离示意图
Fig.5 Diagram of isolation using tri-state gates

4.2.3 OC 门隔离

集电极开路 (Open Collector, OC) 输出的电路结构如图 6(a)所示,右边的那个三极管集电极什么都不接,所以叫做集电极开路(左边的三极管起反相作用,使输入输出电平一致)。对于图 6(a),当左端的输入为“0”时,前面的三极管截止,所以 +5V1 电源通过 1 kΩ 电阻加到右边的三极管上,右边的三极管导通(即相当于一个开关闭合);当左端的输入为“1”时,前面的三极管导通,而后面的三极管截止(相当于开关断开)。

图 6(a)可简化成图 6(b)中的等效电路,当开关闭合时,输出直接接地,所以输出电平为 0 V;而当开关断开时,则输出端悬空,呈高阻态,此时如图 6(c)所示,在后续电路外接上拉电阻 R_c 到 +5V2,即可输出高电平。OC 门常用于实现“线与”和电平转换。

不难看出,OC 输出电路实际上只提供了一个电子开关而无驱动电流,后续电路的高电平是由自己的经电阻上拉的电源驱动而得。因此,在系统的前

级单机中采用 OC 门输出,后级单机中输入端上拉的信号耦合方法,可以有效克服前后级单机先后上电时形成的电路潜通。

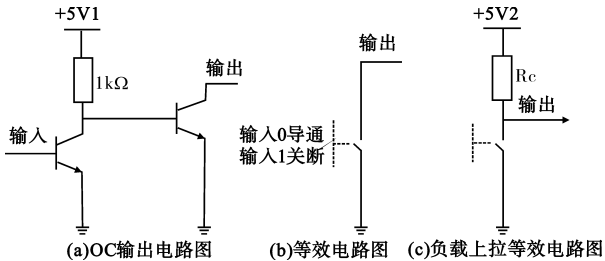


图 6 OC 输出隔离示意图
Fig.6 Diagram of isolation using OC output

4.2.4 光电隔离

系统中的单机信号互联时采用光电耦合器 (Optical Coupler),信号按“电-光-电”的形式传输,可以做到输出和输入之间电气绝缘,从而最大程度上预防系统多个电源之间的电路潜通。

4.2.5 选用开关电源

在实际测试中还发现,在同时存在潜通电压的情况下,一部分电路上电工作异常,而另一部分设计大致相同的电路却未受影响。这是由于为异常电路供电的 DC-DC 变换模块是线性输出特性,当其输入端有一定的潜通电压时,即使电压并未达到设计要求,DC-DC 模块也会相应输出一定电压,从而导致后续器件工作异常;而为正常电路供电的 DC-DC 模块是开关输出特性,即使其输入端有一定的潜通电压,但未达到其输入额定值时,其并无电压输出,所以没有造成电路功能失效。因此,电路设计时不选用线性电源而选用开关电源也是一种行之有效的抑制潜通影响的方法,但这种方法与前述 4 种不同,不是一种先期隔离电路潜通的措施,而是在发生电路潜通之后减小其影响面的保护性补救措施。

5 结 论

电路潜通的风险随着电子设备复杂度的增加而提高,笔者结合几型装备研制的经验总结出冷机低阻通路是在工程实际中形成潜通电路的典型原因,并据此提出了几种克服电路潜通的有效隔离方法,并详细阐述了其隔离原理,可用于指导潜通电路的分析及其隔离防护电路的设计。但这只是一些独立的点上的参考方法,目前尚没有一套相对完善的可

克服电路潜通的通用设计准则或者电路解决方案，相关研究亟待加强。

参考文献：

[1] David John. The Principled Design of Computer System Safety Analyses [D]. Heslington, York, UK: University of York, 1999:55 – 57.

[2] MIL – HDBK – 338B, Electronic Reliability Design Handbook[S].

[3] AIAA S – 102.2.5 2009.01.01, Performance – Based Sneak Circuit Analysis(SCA) Requirements[S].

[4] 李国华, 胡昌华, 叶雪梅, 等. 潜在通路分析技术的发展[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(2):84 – 86.

LI Guo – Hua, HU Chang – Hua, YE Xue – mei, et al. A Retrospective And Prospective Review on Sneak Circuit Analysis Technology [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(2):84 – 86. (in Chinese)

[5] 卢佩英, 沈士团, 孙宝江. 潜在通路分析在自动测试系统中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(7): 847 – 849.

LU Pei – ying, SHEN Shi – tuan, SUN Bao – jiang. Research of Applying Sneak Circuit Analysis to Automatic Test System [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(7):847 – 849. (in Chinese)

作者简介：

尹申燕(1977 –),男,四川仁寿人,2003 年于重庆大学获硕士学位,现为西南电子设备研究所工程师,主要研究方向是为雷达、电子战信号处理;

YIN Shen – yan was born in Renshou, Sichuan Province, in 1977. He received the M. S. degree from Chongqing University in 2003. He is now an engineer. His research interests include radar and electronic warfare signal processing.

Email: yinshenyan@hotmail.com

刘 敏(1978 –),男,重庆人,2000 年于浙江大学获学士学位,现为西南电子设备研究所工程师,主要研究方向为电子对抗;

LIU Min was born in Chongqing, in 1978. He received the B. S. degree from Zhejiang University in 2000. He is now an engineer. His research direction is electronic countermeasures.

Email: liumin29@yahoo.cn

李 靓(1976 –),女,四川成都人,1998 年于电子科技大学获学士学位,现为西南电子设备研究所高级工程师,主要研究方向是航天嵌入式软件。

LI Liang was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1976. She received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1998. She is now a senior engineer. Her research direction is space embedded software.

Email: lilian@mei29.scgb.com

恭喜冯超成为本刊网站第 1 万个访问者

根据读者(访问者)提供的屏幕截图信息,本刊编辑部确认菏泽学院机电工程系冯超为本刊网站第 1 万个访问者,在此向他表示祝贺。

为了及时监测本刊网站的访问量,特别是对具有重要意义 的访问计数出现周期进行分析,为进一步改进本刊工作提供有关信息,本刊编辑部决定,凡第 1 万、2 万、3 万……个访问者,将获得本刊连续 1 年的免费赠阅,以及年终的期刊精装合订本 1 套。如果您符合要求,请将页面截图(应有屏幕右下角通知区域的日期显示,或能表明计数出现日期的相关信息)以及个人详细联系信息发送到 dianxunjishu@china.com 或 dxjs@swiet.com.cn,我们将及时在网站发布。

感谢对本刊的关注与支持。

《电讯技术》编辑部