

复杂航天器电气系统潜通路分析技术研究

欧连军, 姜爽, 赵岩, 刘文文, 杨友超

(中国运载火箭技术研究院 研究发展中心, 北京 100076)

摘要: 针对复杂航天器电气系统功能接口复杂、信号类型众多的特点, 系统分析了导致潜通路存在的接口冗余、时序逻辑复杂、接地类型多等客观原因; 明确了复杂航天器电气系统潜通路分析工作流程, 并简要论述了潜通路分析的准备工作中的单机电气接口数据收集、电路原理图设计与简化的方法和要点, 结合潜通路仿真建模分析及优化方法, 总结了复杂航天器电气系统潜通路故障定位的潜在路径搜索与分析、识别与验证的步骤; 提出了复杂航天器电气系统预防潜通路的电气接口信号类型简单化、电气接口隔离、信号流向单一化、接地设计提前规划四项设计原则, 并针对某航天器匹配测试阶段发现的潜通路问题的原因及改进措施进行了分析。

关键词: 电气系统; 潜通路; 故障

Research on Potential Path Analysis Technology of Spacecraft Complex Electrical System

Ou Lianjun, Jiang Shuang, Zhao Yan, Liu Wenwen, Yang Youchao

(China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076, China)

Abstract: For the characteristics of complex spacecraft electrical system, that is complex functional interface and many types of signals, the objective reasons such as redundancy of interface, complexity of temporal logic and multiple grounding types are analyzed systematically. The working procedure of sneak path analysis for complex spacecraft electrical system is defined, the single channel electrical interface data collection, circuit schematic design and simplification methods and key points in the preparation of sneak path analysis are briefly discussed, combined with the simulation analysis and optimization method of sneak path, the potential path search, analysis, identification and verification of potential path fault location of complex spacecraft electrical system are summarized. Four design principles for the prevention of sneak path in complex spacecraft electrical system are presented, that is simplified electrical interface, signal type, isolated electrical interface, single signal flow and planned ground design, the reasons for the hidden path problems in the matching test of the spacecraft and the improvement measures are analyzed.

Keywords: electrical system; potential pathway; fault

0 引言

潜在电路是指因系统或设备中存在异常电路通路, 当受到特定的激励后产生的响应, 其直接后果是触发了电路中非预期的存在的功能和意外的抑制了正常需要的功能, 这种触发功能的信号传递通道是一种没有被识别的固有信号通道^[1]。随着航天器的发展, 电气系统需要完成的功能越来越多, 电气系统间接口越来越复杂, 这些都是电气系统潜通路可能存在的因素。而潜通路的存在, 对飞行器可靠、安全的完成任务将产生不同程度的影响。本文从电气系统综合设计的角度, 探讨了复杂航天器电气系统潜通路分析方法, 提出了能够提前预防潜通路的复杂航天器电气系统的设计方法。软件和管路潜通路分析与预防技术不在本文论述范围之内。

1 电气系统潜通路分析技术的发展

20世纪60年代, 美国发射的红石火箭因为一条关机线圈的潜通路存在, 造成火箭刚起飞后误关机, 引起业内对潜通路的高度关注, 并开始研究。1967~1989年, 波音公司、洛马

公司等结合航天器研制和发射过程中重大的故障和事故案例进行研究, 首先建立了潜在电路分析理论和方法, 随后又提出了模拟电路、混合电路和集成电路潜在电路分析技术和方法, 同时也开发了一套基于理论的潜在电路分析计算机辅助工具, 并在研制中加以推广应用, 取得了良好的使用效果。1990年后, SoHaR公司先后成功研发了一个与电路输入工具OrCAD结合、利用专家系统支持线索表检查的辅助分析系统SCAT, 和具有Windows图形界面的分析工具CapFast/SCA, 辅助普通设计人员进行潜在电路分析。欧洲在20世纪80年代开始研究潜通路技术, 1997年正式颁布了根据ESA-SCA方法改编的潜在分析标准ECSS-Q-40-04A: Part1-Part2, 标志着欧洲在该领域的研究和应用已趋于规范化。^[1]

国内于20世纪80年代末90年代初真正认识和开始研究潜在通路。1988年, 国内航空611所、航天12所、708所、北京航空航天大学、西北工业大学、电子科技大学等一些研究所和高校相继开展潜通路理论和分析工具的研究开发工作, 航天12所得到军事装备可靠性标准化委员会的支持, 针对运载火箭和战略导弹控制系统潜通路问题, 进行了分析技术的研究, 并形成了一套适合电气系统潜通路分析的软件, 取得了一定的成果, 但非常大的工作量和对分析人员的高要求, 限制了该技术的推广使用^[2]。21世纪, 随着各行业对可靠性的要求

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-08-21。

作者简介: 欧连军(1980-), 男, 甘肃人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天器航电综合系统控制总体设计方向的研究。

的提高, 潜通路分析技术的发展已成为必然。经查有多篇文献先后提出了基于虚拟试验的潜通路分析、基于网络流仿真的潜通路分析、基于图论的潜通路分析、基于关键节点的潜通路分析、基于定理推理的潜通路分析等技术和方法^[3-5], 特别是有些文献通过对 5 种基本潜通路拓扑结构研究分析, 并结合工程经验和典型电路案例, 提出了电路、定时、电磁感应损伤潜在通路的 8 种设计规则^[6], 可有效规避潜通路, 提高系统设计可靠性。

2 复杂航天器电气系统潜通路的特点

复杂航天器电气系统因其要配合航天器完成飞行任务, 需要有导航、控制、测控通信、热控管理、配电管理、时序控制管理、火工品控制管理等功能, 系统集成度和功能密集度高, 系统和分系统组成复杂, 设备电信号连接关系复杂, 特别是在目前航天项目研制周期进一步压缩、产品化正在推广的高速发展阶段, 复杂航天器潜通路出现的特点不同于通常的单个电子仪器设备, 往往出现在分系统间、单机电气接口之间。

1) 复杂航天器因要实现飞行过程中的各种功能, 一般分系统组成和功能复杂, 实现分系统功能的各单机冗余度和对外接口均较多, 如果对于分系统和单机电气设计统筹考虑不够系统, 则容易在两个或多个分系统之间、测试系统与航天器上电气系统之间、单机之间出现潜通路, 通常接口功能越多、实现电路越复杂, 引起潜通路的可能性越大。

2) 复杂航天器因要完成既定的飞行任务, 一般都有较复杂的时序逻辑控制, 通常由多个逻辑控制电路配合完成。如果设计不合理存在潜通路, 在某种特定的条件下才会激发, 这种特定条件可能是与工作时序相关的逻辑状态、多个工作时序状态的不兼容、显性正常特定工况环境异常的故障模式。

3) 复杂航天器潜通路的存在, 通常和电气系统的接地设计、隔离设计相关, 不同系统、不同单机的接地类型越多, 又因接口连接关系复杂, 接地设计和隔离设计规则容易被破坏, 极易出现潜通路和电磁兼容问题。

3 复杂航天器电气系统潜通路分析方法

3.1 复杂航天器电气系统潜通路分析准备

复杂航天器电气系统潜通路分析都是以各系统单机电气接口数据为基础, 形成完整、正确的电气系统电路原理图, 并以此为基础对电路原理图进行简化处理。在此基础上可以进行两个方面的潜通路分析工作, 一是进行电气原理图建模, 并使用专门的电路分析软件或潜通路分析软件进行仿真分析及优化; 二是直接按照潜通路分析的方法或规则, 对电路图进行潜在路径的分析与搜索, 并进行潜在的路径识别, 通过搭建试验电路进行验证和改进。图 1 为复杂航天器电气系统潜通路分析工作流程。

3.1.1 单机电气接口数据收集

单机是电气系统的基本组成单位, 单机电气接口数据的正确性和完整性, 决定了整个电气系统电路图的完整性和正确性, 进而决定了潜通路分析的有效性。单机电气接口数据一般情况通过单机电路图或单机接口数据单提供总体, 对于与接口密切相关的数据必须详细而准确, 一是对外供电模块电路、隔离电路、内外地的定义及连接方式, 二是对外数字信号隔离电

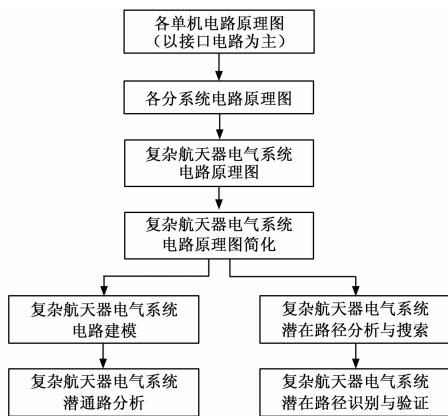


图 1 复杂航天器电气系统潜通路分析工作流程

路, 对外数字信号与内部电源地、数字地、模拟地的连接关系, 三是对外模拟信号隔离电路, 对外模拟信号与内部电源地、数字地、模拟地的连接关系。单机接口电路隔离、接地设计是容易出现潜通路的重要环节, 对于潜通路分析尤为重要。

3.1.2 电路原理图绘制

复杂航天器电气原理图一般包括各组成系统单机简单的内部功能电路、准确的接口电路和连接关系, 是开展电气系统设计的重要工具, 也是做系统功能实现分析、故障模式分析、潜通路分析的基础。复杂航天器电气原理图要对接口电路芯片详细化, 对上拉、消反峰、滤波、接地、保护等电路一定不能忽略或省略, 要对元器件参数进行明确, 如 $10\ \Omega$ 的电阻和 $100\ \Omega$ 的电阻就可能造成两种不同的结果。

3.1.3 电路原理图简化

复杂航天器电气系统因其功能复杂、电气设备构成众多、连接关系复杂, 电路原理图通常非常复杂、特别巨大, 用此图进行潜通路建模或进行潜通路分析搜索, 工作量非常大, 消耗的资源和时间非常多, 也不十分方便。通常按照电气特性或模块进行分解, 再分层次进行潜通路分析, 如常用的简化出接地原理图、数字信号原理图、模拟信号原理图, 先分析各简化原理图中的潜通路, 再分析各图之间的潜通路。图 2 为复杂航天器电气系统接地简图。

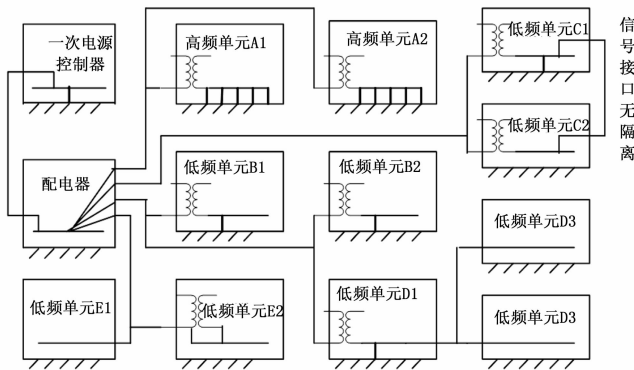


图 2 复杂航天器电气系统接地简图

3.2 复杂航天器电气系统潜通路仿真分析

潜通路分析软件或电路仿真分析软件经常在设计阶段使用, 有效的潜通路仿真分析一般是基于精准的建模和对模型的

深刻理解,对于复杂航天器电气系统因其组成及连接关系复杂,直接用潜通路分析软件进行仿真,需要输入的参数、变量及模式多,工作量巨大,建议对电原理图简化,按功能分块并分别进行建模或仿真,这里主要讨论如何使用 Multisim 等电路仿真软件进行潜通路分析。

3.2.1 电气原理图建模

复杂航天器电气系统潜通路分析仿真电路建模,需要按照电路功能、电路类型等分别进行建模和分析,在建模时按照系统、功能模块和元器件三级开展^[7],将电路中的主要连接关系进行抽象,保留电路中的主要和关键器件,对于串联或并联相似电路,大到相同的电路模块或芯片,小到电阻或二极管等器件,根据电路的参数特性进一步简化。还需要注意在进行建模时要特别关注电路接口部分,对于外围电路的负载特性,为了提高效率,可以用电阻、电容或电感进行等效。

3.2.2 仿真分析及优化

仿真分析只有在关键电路建模和参数特性准确、等效电路及特性尽可能的正确的基础之上才有效,通常通过在关键电路节点设置电压、电流、示波器等虚拟仪表,动态记录并观察电路参数的变化情况,并与设计值进行比较,如果出现异常既有可能存在建模不准确、电路设计有问题、存在潜通路 3 种问题。对于建模不准确和电路设计问题,根据实际情况分析,并对问题电路重新进行建模和设计优化,对于潜通路问题,可结合下面的潜通路预防设计原则,采取增加隔离等措施阻断潜通路。

3.3 复杂航天器电气系统潜通路故障定位分析

复杂航天器电气系统工程师经常需要对整个电气系统潜通路故障进行分析和定位,对于有经验的电气工程师,并不常用潜通路分析软件或电路仿真分析软件进行故障的分析、定位和排除,而是经常使用电路图进行潜通在路径的搜索、分析和识别。

3.3.1 潜在路径搜索与分析

潜在路径搜索与分析也是以准确的电路模型和参数特性为基础,在分析时特别要把握关键路径上消反峰电路、防反击电路、不同设备之间的地线路径,这些电路经常会在不经意间提供电路的潜在路径,对于 Y 型、X 型、H 型拓扑结构^[8]的电路当然是分析的重点。

3.3.2 潜在路径识别与验证

通过电路原理图搜索和分析,可基本识别潜在路径,但实际上由于各单机芯片电路不尽完整、电气元件参数不尽准确,还需要通过转接盒对实际产品搭建的电气系统特征点的电压进行测量,并与理论分析进行印证验证潜通路。

4 复杂航天器电气系统预防潜通路设计原则

潜通路的特点决定它是电气系统故障的一种表现形式,通常在设计阶段很难发现,但是如果设计师遵守一些常规的设计原则,能够起到规避和预防的效果,总结主要有以下原则:

4.1 设备间电气接口信号简单化

传统的航天器电气系统接口设计,无论是电控信号、状态采集信号,还是测量参数采集信号,经常使用设备间模拟量直采、IO、OC 指令直传直控,此种方式与数字量传输、各单机本地采集本地控制相比,减少了设备输入输出端数字通信模块

处理环节,理论上提高了可靠性,随之带来的问题是,各单机之间数字地、模拟地、电源地、各种电平地之间的混联隔离问题,处理的不好会通各种地的连接带来潜通路问题。随着数字电路越来越成熟,复杂航天器电气系统设计应以接口信号简单化为原则,减少模拟量直采、IO、OC 指令直传直控,通过使用总线传输本地采集信号和控制指令,减少信号类型,简化接口连接。

4.2 设备间电气接口隔离

电气系统接口无论是模拟量、数字量、总线,还是供电信号,都应尽可能的进行隔离设计,从根源上避免单机间、系统间由于电气信号直接连接,引入潜通路的可能。

4.3 设备间信号流向单一化

电气系统 Y 型、X 型、H 型电路拓扑结构^[8],是引入潜通路的多发环节,其根本问题是这些电路存在信号流向不单一的可能,这种可能就是造成潜通路的潜在因素。将电路尽可能的设计成 I 型电路,或者在以上电路拓扑结构中加入二极管,使得信号流向单一化,可从根本上规避潜通路的存在。图 3 是 H 型电路拓扑结构存在潜通路的典型案例,可通过增加二极管消除。

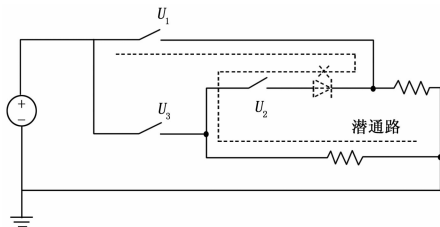


图 3 飞机起落架及舱门控制电路^[9]

4.4 电气系统接地提前设计

复杂飞行器电气系统设计虽然应尽可能的采用本地采集、控制,通过总线传输信号和指令,但是,因其功能的复杂性和有些功能的特殊性和重要性,设备间状态模拟直采和直控难以避免,在接口信号比较多又独立的情况,全都进行隔离也会增加整个系统的成本和重量,因此,整个电气系统接口处不可避免的会存在各种电源和信号的模拟类的、数字类的、各种电平的地。此时,应在电气系统设计之初,就应提出各系统、各单机不同类型地信号设计和隔离原则,可以避免很多不必要的潜通路和电磁兼容问题。

5 复杂航天器电气系统潜通路分析

图 4 是某飞行器电气系统匹配测试期间发现的潜通路问题原理图,存在 A、B 两条潜通路,导致复位开关按下时,“开始”通道继电器接通,“复位”通道继电器反而被旁路,不能够执行复位指令。这个电路是一个典型的发生在控制、配电和地面 3 个系统之间的潜通路问题,单独看单机、器上和器地设计都没问题,在单机测试、系统测试、两个系统测试时都不能发现;该潜通路也是典型地双控电路,通过保护电路(二极管)形成,采用了大量的模拟通道并且没有进行有效的隔离,对地也没有进行很好的规划。解决该问题的临时措施是在潜通路的必经环节位置增加二极管。

(下转第 193 页)

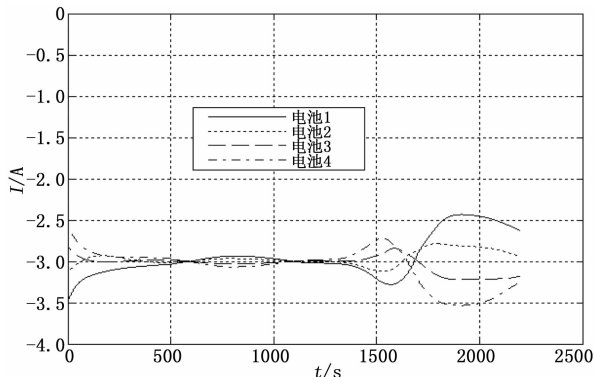


图 7 电池 1、电池 2、电池 3 与电池 4 的放电电流 (IC 速率: -12A)

且, 这些变化将依赖于电池的特性, 如 $v_{oc} \sim SOC$ 曲线以及电池的阻抗随 SOC 的变化是如何变化的。另外, 并联电池组的整体性能也依赖于电池组应用的具体情况, 并与负载电流的幅值、持续时间和频率等有关。例如, 运用于混合动力汽车的电池组的 SOC 通常保持在一个相对较窄的范围内, 一般多集中在约 50% 的 SOC 范围内。这意味着它经历的电流分配情况与在纯电动汽车中的电池组的电流分配情况不同。

4 总结

由仿真实验得出的主要结果表明, 具有不同阻抗和容量电池的并联电池组会表现出不均衡, 单体电池间可能会有显著的电流差异, 使部分单体电池可能产生高于预期的工作电流, 导致部分单体电池老化更加迅速进而缩短了整个电池组的寿命, 降低了电池组的有效容量和安全性。目前, 对并联电池组均衡电路拓扑的研究还很少, 接下来将借鉴串联电池组的均衡电路拓扑以及均衡方法, 通过探索抑制支路电流变化的方法, 实现对并联电池组能量均衡和管理的目的。

(上接第 188 页)

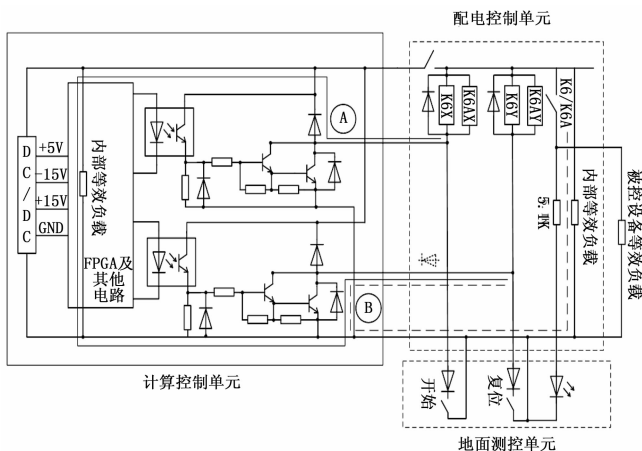


图 4 某航天器电气系统潜通路问题原理图

6 结束语

本文针对复杂航天器电气系统潜通路问题, 分析了潜通路问题存在的原因, 介绍了潜通路问题仿真分析和故障定位分析方法和流程, 并提出了复杂航天器电气系统预防潜通路的设计

参考文献:

- [1] Piller S, Perrin M, Jossen A. Methods for state-of-charge determination and their applications [J]. Journal of Power Source, 2001, 96 (1): 113-120.
- [2] 刘文刚, 周波, 王晓丹, 等. 18650 型锂离子电池的循环容量衰减研究 [J]. 电源技术, 2012, 36 (3): 306-309.
- [3] Gong X, Xiong R, Mi C C. Study of the characteristics of battery packs in electric vehicles with parallel-connected lithium-ion battery cells [A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE [C]. 2014: 3218-3224.
- [4] Zhang X, Mi C. Management of energy storage systems in EV, HEV and PHEV [J]. Veh. Power Manag., 2011: 259-286.
- [5] Lozano J G, Cadaval E R, Montero M I, et al. Battery equalization active methods [J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 934-949.
- [6] Barre A, Deguilhem B, Grolleau S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications [J]. Journal of Power Sources, 2013 (241): 680-689.
- [7] Maher K, Yazami R. A study of lithium ion batteries cycle aging by thermodynamics techniques [J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 527-533.
- [8] Wu B, Yufit V, Marinescu M, et al. Coupled thermal-electrochemical modelling of uneven heat generation in lithium-ion battery packs [J]. Journal of Power Sources, 2013, 243: 544-554.
- [9] Hu X, Li S, Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries [J]. Journal of Power Sources 2012, 198: 359-367.
- [10] 贾玉健, 解大, 顾羽洁, 等. 电动汽车电池等效电路模型的特点和分类 [J]. 电力与能源, 2011, 32 (6): 516-521.
- [11] Bruen T, Marco J. Modelling and experimental evaluation of parallel connected lithium ion cells for an electric vehicle battery system [J]. Journal of Power Sources, 2016, 310: 91-101.

四大原则。结合某航天器电气系统潜通路典型案例, 分析了该案例中潜通路问题存在的设计不合理因素以及改进措施。

参考文献:

- [1] 张翔, 赵岩, 杨友超, 等. 潜通路分析在飞行器电气系统设计中的应用 [J]. 宇航计测技术, 2016, 36 (4): 64-67.
- [2] 严殿启. 潜通路分析技术 [J]. 导弹与航天运载技术, 2000 (1): 43-47.
- [3] 邹涛, 马齐爽. 基于网络流仿真的潜通路分析方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (4): 546-550.
- [4] 梁因, 马齐爽, 徐萍. 基于图论的潜通路分块分析方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (1): 115-119.
- [5] 焦建民, 周军, 周凤岐. 基于定性推理的潜在通路分析技术研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23 (1): 220-222.
- [6] 严殿启, 孟鹏飞. 火工品控制及供电系统减少潜在电路的设计规则 [J]. 航天控制, 2016, 34 (3): 83-88.
- [7] 雒志鹏, 魏清新, 杨波. 电路仿真与故障诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2619-2624.
- [8] 姚秀芳, 胡杰. 复杂电路的潜通路分析 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19 (6): 76-79.
- [9] 徐萍, 马齐爽, 邹涛. 开关电路潜通路分析的一种方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (3): 361-363.