

基于固态功率控制器的器载配电器的 BIT 设计技术研究

赵 岩, 欧连军, 姜 爽, 张 翔, 杨友超

(中国运载火箭技术研究院 研发中心, 北京 100076)

摘要: 航空航天飞行器发展迅速, 用电设备数量增多, 飞行任务复杂性增大, 对飞行器配电系统的智能程度以及可靠性提出更高要求; 配电系统是配电系统的核心设备, 为飞行器所有用电负载设备分配电能, 其性能的优劣直接影响到飞行任务的成败, BIT (Built-In Test) 技术是一种能够显著改善系统或设备测试性能和诊断能力的重要手段; 研究了以固态功率控制器为核心器件的配电系统总体方案, 对固态功率控制器的故障模式与测试方法进行了分析, 给出了测试点设计和优选方法, 通过故障诊断能力计算结果表明 BIT 设计技术可提高配电系统的可靠性和智能化程度。

关键词: 飞行器; 智能配电; 固态功率控制器

Research on BIT Design Technology of Power Distribution for Spacecraft Based on Solid State Power Controller

Zhao Yan, Ou Lianjun, Jiang Shuang, Zhang Xiang, Yang Youchao

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

Abstract: The aerospace craft is developing rapidly, with the increase of the number of electrical equipment and the complexity of flight mission, the intelligence level and reliability of the aircraft power distribution system are facing higher requirements. The distributor is the core equipment of the distribution system, which distributes electric energy for all electric load equipment of the aircraft, and its performance directly affects the success or failure of the mission, the BIT (built-in test) technology is an important method to improve the performance and diagnostic ability of system or equipment. The overall scheme of the power distribution system based on the solid state power controller is studied, the failure modes and testing methods of the solid state power controller are analyzed, the design and optimization methods of test points are proposed, the calculation results of fault diagnosis ability show that BIT design technology can improve the reliability and intelligence of distribution system.

Keywords: spacecraft; intelligent power distribution; solid state power controller

0 引言

随着航天航空技术的高速发展, 飞行器性能得到大幅提升, 飞行器上设备及用电量剧增, 设备负载工作时序复杂, 对飞行器配电系统的可靠性和智能化程度要求越来越高^[1-2]。配电系统是飞行器电气系统的重要组成部分, 配电系统是配电系统的核心设备, 主要实现飞行器能源控制和分配, 其性能的优劣直接影响到飞行器任务成败。

固态功率控制器 (solid state power controller, SSPC) 是一种新型的智能固态开关, 具有反时限过流保护、故障限流、短路故障保护等功能, 是飞行器配电系统发展的趋势, 将逐渐取代继电器、接触器以及保险丝的传统配电模式, 成为飞行器主流配电核心器件^[3-4]。

机内自检 (built in test, BIT) 是系统或设备内部提供的检测和隔离故障的自动测试能力, BIT 技术是改善系统或设备的测试性和诊断能力的重要途径。为了保证飞行器配电系统安全, 而且能够确定配电器和负载设备健康状态, 配电系统

具备 BIT 能力, 满足任务书可测试性要求^[5]。

1 配电系统总体方案

配电系统是飞行器重要分系统, 主要负责飞行器能源分配、故障监测、隔离及恢复等。飞行器 28 V 低压配电系统总体设计框图见图 1。

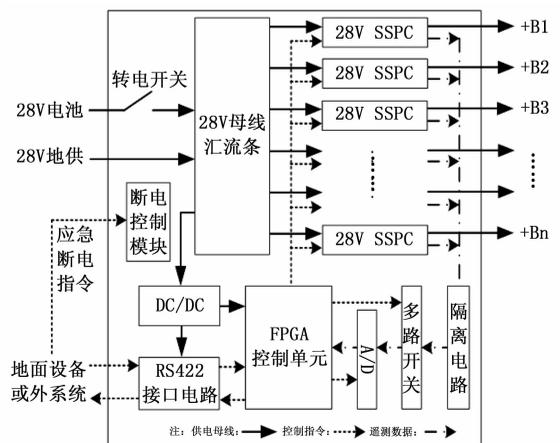


图 1 系统总体设计框图

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-08-21。

作者简介: 赵 岩 (1987-), 男, 山西阳泉人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器供配电及综合测试系统方向的研究。

配电器的核心是直流固态功率控制器 (Solid State Power Controller, 以下简称 SSPC), 它是以半导体功率管为核心构成的智能固态开关电器, 接通和断开电路不产生电弧, 因此可靠性高; 体积重量相比接触器、继电器等机械式开关大大降低, 功率密度高; 并具有反时限过流保护、故障限流、短路故障保护功能等功能。图 2 为典型固态功率控制器的功能组成框图。

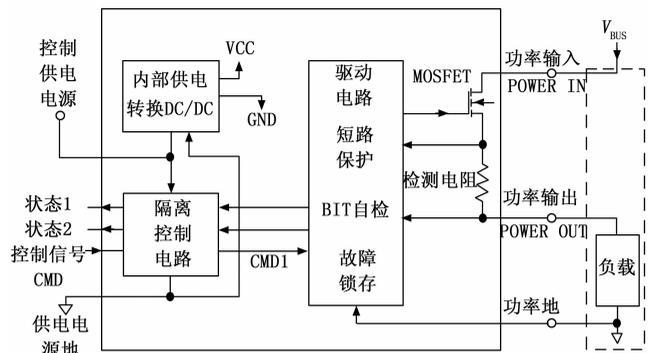


图 2 SSPC 功能框图

本文针对配电器中核心部件——固态功率控制器开展 BIT 设计技术研究。

2 BIT 设计技术研究

2.1 SSPC 故障模式与测试方法分析

在故障模式与影响分析基础上, 针对 SSPC 可能出现的每一种故障模式决定检测方法、检测参数、测试点以及决定是否隔离该故障和采取何种隔离措施。故障模式与测试方法分析结果表 1 所示。

2.2 SSPC 测试点设计和优选方法

2.2.1 SSPC 内部电路功能模块划分的原则

单个 SSPC 内部电路功能模块划分的原则如下:

1) SSPC 的每一项功能应设计成独立的可更换电路单元模块, 保证每一项功能可以单独测试; 如果一个可更换的电路单元模块具有多项功能, 应保证每一项功能都可以单独测试。在数字的 SSPC 中, 每一项有软件程序实现功能应设计成独立可测试的程序模块或供主程序调用的子程序。

2) 功能电路模块划分应有利于故障定位和隔离, 功能不能明确划分的一组电路应尽可能放在同一个可更换单元中。在不影响功能划分时, 应当使数字电路和模拟电路分开, 并可以单独测试。

2.2.2 SSPC 的功能划分和相关性测试模型

按照上述 SSPC 内部电路功能模块划分原则将 SSPC 功能模块进行划分, 并选择测试点, 图 3 是根据典型 SSPC 的组成进行功能模块划分和测试点初选的结果。其中每个功能模块都是作为一个内场可维修单元 (SRU, Shop Replaceable Unit), 以方框表示, 测试点初选覆盖了所有 SRU 的输出, 以圆圈表示, 箭头表示信号的流向。

图 3 共划分了 13 个 SRU 单元 ($F_1 \sim F_{13}$), 初选出 13 个测试点 ($T_1 \sim T_{13}$)。

根据测试相关性理论, 被测试的组成单元与测试点之间存在逻辑关系。例如, 若测试点 T_1 依赖于组成单元 F_1 , 那么当

表 1 故障模式分析与相应的测试方法

故障模式	检测方法和检测参数	测试点	故障隔离方法或改进措施
控制隔离接口光耦器件故障	检测普通光耦输出电压	普通光耦的集电极或发射极	1) 在设计上增大光耦 LED 的电流 2) 采用两个光耦器件的副边输出并联冗余
控制供电电源故障	采用电压求和法和电压比较法综合判断控制供电电源和电压基准等是否故障。	检测供电电源的输出电压	模块电源的输出采取限流
主功率 MOSFET 驱动电路故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、主 MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	
主功率 MOSFET 开路故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	多个 MOSFET 并联
主功率 MOSFET 短路故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、主 MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	1) MOSFET 串联使用 2) 与熔断器串联使用
主功率 MOSFET 栅极静电击穿故障	BIT 自检: 主 MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 主 MOSFET 驱动电压 2) 开关信号	增加栅极并联电阻和稳压管防静电
SSPC 短路保护功能故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、主 MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	1) MOSFET 串联使用 2) 与熔断器串联使用
SSPC 反时限保护功能、立即跳闸保护功能故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、主 MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	增加超控端口
续流二极管短路故障	BIT 自检: 检测负载电压、负载电流、MOSFET 驱动电压、开关控制信号	1) 负载电压 2) 负载电流 3) 主 MOSFET 驱动电压 4) 开关信号	采用两个二极管串联

F_1 发生故障, T_1 测试结果必定是不正常的, T_1 和 F_1 是相关的。

根据测试相关性理论, 做如下假设:

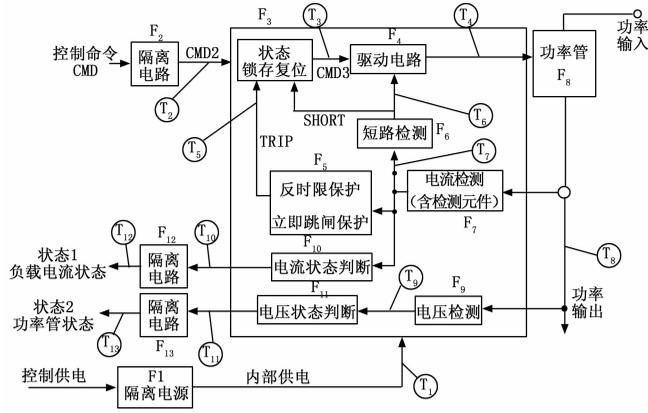


图 3 典型 SSPC 功能模块划分和测试点初选

- 1) 被测试 SSPC 仅有两种状态: 正常状态, 无故障正常工作; 故障状态, 不能正常工作。
- 2) SSPC 故障的原因是其中的 SRU 单元发生了故障, 并且认为只有一个 SRU 单元发生故障, 即单故障假设 (认为多个 SRU 同时发生故障的概率很小)。
- 3) 某一个 SRU 单元发生故障时, 在信号流向的各个测试点上, 测试的有效性相同。

图 3 中 SRU 单元与测试点之间的相关性数学模型可用下述矩阵 (D 矩阵) 描述:

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

其中: $d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } T_j \text{ 与 } F_i \text{ 相关时} \\ 0 & \text{当 } T_j \text{ 与 } F_i \text{ 不相关时} \end{cases}, m=n=13。$

通过分析图 3 中测试点与 SRU 故障的相关性, 可以得到 D 矩阵如表 2。

表 2 相关性数学模型 (D 矩阵)

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}
F_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_6	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_7	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_8	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
F_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
F_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
F_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

为简化计算工作量, 并识别冗余测试点和故障隔离模糊

组, 对 D 矩阵进行简化。

(1) 比较 D 中各列: 由于 $T_1 = T_2, T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = T_7 = T_8$, 因此说明 T_1 和 T_2 达到的测试效果是相同的, $T_3 \sim T_8$ 的测试效果也相同。所以 T_1 和 T_2 互为冗余测试点, $T_3 \sim T_8$ 也互为冗余测试点。

(2) 比较 D 中各行: $F_1 = F_2, F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = F_7 = F_8$, 说明 F_1 和 F_2 对应的故障类不可区分, $F_3 \sim F_8$ 对应的故障类不可区分, 可以作为故障隔离模糊组处理。

简化的 D 矩阵模型如表 3 所示。

表 3 简化的相关性数学模型 (简化 D 矩阵)

	$T_1 \sim T_2$	$T_3 \sim T_8$	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}
$F_1 \sim F_2$	1	1	1	1	1	1	1
$F_3 \sim F_8$	0	1	1	1	1	1	1
F_9	0	0	1	0	1	0	1
F_{10}	0	0	0	1	0	1	0
F_{11}	0	0	0	0	1	0	1
F_{12}	0	0	0	0	0	1	0
F_{13}	0	0	0	0	0	0	1

2.2.3 测试点优选与故障诊断能力计算

2.2.3.1 选择故障检测用测试点

首先从简化 D 中优选故障检测的测试点。暂不考虑可靠性和测试费用影响。表 3 中 T_{13} 这一列的总和最大, 记为 $W_{FD13} = 5$, 所以选择 T_{13} 作为故障检测的一个检测点, 可以检测到除 F_{10} 和 F_{12} 以外所有的 SRU。很明显, 只需再选择 T_{12} 就可以测试到所有的 SRU 单元了。

T_{12} 和 T_{13} 分别是负载电流状态和功率管状态, 只需选择这两个状态作为测试点即可以测试出 SSPC 是否故障。这也解释了为什么国内外的模块 SSPC 大都选择这两个状态作为状态反馈量。

2.2.3.2 选择故障隔离用测试点

由于 F_{12} 和 F_{13} 已经成为单行 (只有一个 1), 即 T_{12} 和 T_{13} 是故障隔离的必选测试点。

然后考虑其他测试点的选取。根据串联系统对半分割的思想, 认为测试点的选取如果能将故障单元和非故障单元对半分割时, 故障隔离的效率最高。所以选择 T_j 中故障隔离权值 W_{FI} 最高的那个测试点作为优选测试点。其中, 为第 j 列中除了 F_{12} 和 F_{13} 行以外 0 的个数, 为第 j 列中除了 F_{12} 和 F_{13} 行以外 1 的个数。 W_{FI} 的计算结果见表 4。

$T_3 \sim T_8, T_9, T_{10}, T_{12}$ 的故障隔离权值均为 6, 但由于 T_{12} 已经选为故障隔离测试点, 所以 T_{12} 应作为第一个故障隔离测试点。

T_{12} 选为测试点后, D 矩阵中除了 F_{12} 和 F_{13} 以外的部分可划分和。其中中显然应选择 T_9 作为第二个优先测试点。再次对采用上述故障隔离权值优选测试点的方法, 可以得到 W_{FI} 计算结果见表 4。

$T_1 \sim T_2, T_3 \sim T_8, T_9, T_{11}, T_{13}$ 的故障隔离权值均为 2, 但由于 T_{13} 已经选择故障检测测试点, 可以判断 F_{10} 是否故障。所以 T_{13} 作为第 3 个优先测试点。下一步可任选 $T_1 \sim T_8$ 作为

优选测试点。其中 T_1 的测试比较方便，选择 T_1 作为第 4 个优选测试点。

最终剩下 F_{10} 和 F_{12} ，选择 T_{10} 作为第五个优选测试点。

根据上述分析，选择 T_{12} 、 T_9 、 T_{13} 、 T_1 、 T_{10} 作为故障隔离优选测试点。

表 4 简化的相关性数学模型(简化 D 矩阵)

		$T_1 \sim T_2$	$T_3 \sim T_8$	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}
D_1	$F_1 \sim F_2$	1	1	1	1	1	1	1
	$F_3 \sim F_8$	0	1	1	1	1	1	1
	F_{10}	0	0	0	1	0	1	0
D_1^0	F_9	0	0	1	0	1	0	1
	F_{11}	0	0	0	0	1	0	1
D_1^0	F_{12}	0	0	0	0	0	1	0
	F_{13}	0	0	0	0	0	0	1
	W_{FI}	4	6	6	6	4	6	4
D_1	W_{FI}	2	2	2	0	2	0	2

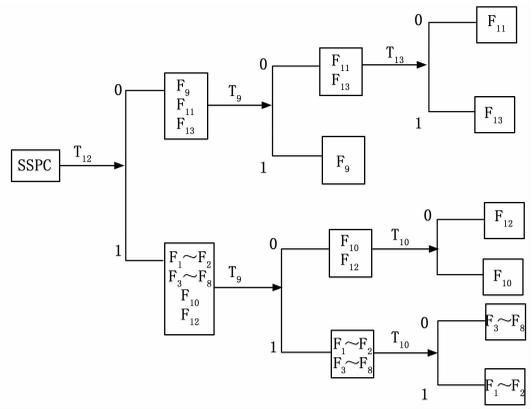


图 4 测试诊断树

隔离到单个组成单元 (模糊度 = 1); 隔离到 2 个组成单元的故障隔离率 $\gamma_{FI(2)} = (5+2)/13 = 53.8\%$ (模糊度 ≤ 2)。

上述故障诊断能力计算结果表明 BIT 设计技术在配电系统中的应用可提高其系统的可靠性和智能化程度。

2.2.3.3 建立基层级测试诊断树

根据故障隔离测试点的选取结果和相关性矩阵建立测试诊断树如图 4 所示。

3 总结

从图 4 的测试诊断树可以看出，所有故障都可以被检测到；有 5 个组成单元可以被隔离到单个组成单元，即 F_9 、 F_{10} 、 F_{11} 、 F_{12} 、 F_{13} ；有 7 个组成单元可以被隔离到两个组成单元，即 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 。故障诊断能力计算也可以由相关性矩阵中只包含优选测试点的子矩阵计算得到。

故障检测率 $\gamma_{FD} = 100\%$ 可以检测到所有组成单元的功能故障；隔离到单个组成的单元故障隔离率 $\gamma_{FI(1)} = 5/13 = 38.5\%$

参考文献:

- [1] 郑先成, 等. 航天器新型固态配电技术研究 [J]. 宇航学报, 2008, 29 (4): 1430-1434.
- [2] 姜东升, 陈琦, 张沛, 等. 航天器供配电智能管理技术研究 [J]. 航天器工程, 2012, 21 (4): 100-105.
- [3] 刘红奎. 基于 FPGA 的固态功率控制器的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 1-3.
- [4] 赵雷, 王磊, 董仲博, 等. 星载电子设备浪涌电流抑制以及浪涌电流的测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 2730-2732.
- [5] 杨文涛, 张小林, 吴建军. 无人机电源机内测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (7): 1509-1511.

(上接第 246 页)

参考文献:

- [1] 郭方方, 唐匀龙, 修龙亭, 等. 基于云计算的网络安全态势感知模型研究 [J]. 计算机学报, 2014, 47 (11): 149-151.
- [2] Bass T. Intrusion detection system and multisensor data fusion; creating cyberspace situational awareness [J]. Communications of the ACM, 2012, 43 (4): 99-105.
- [3] Shifflet J. A technique independent fusion model for network intrusion detection [A]. Proceedings of the Midstates Conference on Undergraduate Research in Computer Science and Mathematics [C]. 2012, 3 (1): 13-19.
- [4] 陈秀真, 郑庆华, 管晓宏, 等. 层次化网络安全威胁态势量化评估方法 [J]. 软件学报, 2013, 17 (4): 885-897.
- [5] 赵国生, 王慧强, 王健. 基于灰色关联分析的网络可生存性态势评估研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 27 (10): 156-864.
- [6] 杨启昉, 马广平. 关联规则挖掘 Apriori 算法的改进 [J]. 计算机应用, 2012, 28 (12): 217-218.
- [7] Shifflet J. A technique independent fusion model for network intrusion detection [A]. Proceedings of the Midstates Conference on

- Undergraduate Research in Computer Science and Mathematics [C]. 2013, 3 (1): 13-19.
- [8] 张春生. 改进的数据库一次扫描快速 Apriori 算法 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 30 (16): 3811-3813.
- [9] Ling X, Ren A S. Analysis on factors affecting quantity safety of agricultural products based on DEMATEL method [J]. Science & Technology and Economy, 2012, 22 (1): 65-68.
- [10] Sun B, Liu W, Tian D, et al. Application of time series date mining on security analysis [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2013, 28 (3): 270-274.
- [11] 刘华婷, 郭仁祥, 姜浩. 关联规则挖掘 Apriori 算法的研究与改进 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 26 (1): 146-148.
- [12] Yu M, Hu M, Jin G, et al. Association rules algorithm applied to telecommunication network alarms [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2014, 281 (3): 264-269.
- [13] 钱光超, 贾瑞玉, 张然, 等. Apriori 算法的一种优化方法 [J]. 计算机工程, 2012, 34 (23): 196-198.
- [14] Tang H Y, Zhan X Y. The research of the accessibility website design based log mining [J]. Computer Knowledge and Technology, 2013, 7 (4): 3261-3262.