

基于 FPGA 和 SSPC 的智能配电系统设计与实现

赵岩, 欧连军, 李海伟, 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: 航天及航空领域智能配电技术发展迅速; 配电系统是航天及航空飞行器的重要分系统, 其性能的优劣直接影响到飞行任务的成败, 为了提高配电系统的可靠性和灵活性, 提出了基于 FPGA 和 SSPC 的智能配电系统设计, 从航天及航空飞行器智能配电技术的发展现状出发, 具体阐述了该系统总体方案的设计思路及关键技术, 同时分析了采用 FPGA、SSPC 和总线通信带来的控制灵活、易于实现故障隔离和系统重构、可靠性高以及系统重量轻等诸多优点; 该系统已开展了相关的试验验证, 试验结果表明该系统稳定可靠, 具有广泛的应用前景。

关键词: FPGA; SSPC; 智能化; 配电

Design of Intellectualized Power Distribution System Based on FPGA and SSPC

Zhao Yan, Ou Lianjun, Li Haiwei, Zhang Xiang, Yang Youchao

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

Abstract: Intellectualized power distribution technology for aerospace field is developing rapidly. Distribution system is an important part of the spacecraft electrical system, whose performance is directly related to the success or failure of the mission, in order to improve the reliability and flexibility of the distribution system, the paper proposed a design of intellectualized power distribution system based on FPGA and SSPC. The paper first introduced the development situation of the spacecraft intellectualized power distribution technology, specifically elaborated design ideas of overall program and key techniques, and also analyzed the advantages: flexible control, troubleshooting and system reconstruction, high reliability, low system weight, which were brought by using FPGA, SSPC, bus communication. The system experimentation has been completed, and the results show that this system is steady and reliable, it has comprehensive application foreground.

Keywords: FPGA; SSPC; intellectualized; distribution

0 引言

随着航天航空技术的高速发展, 航天飞行器和航空飞行器(以下统称为飞行器)性能有了很大的提升, 飞行器上的设备负载及其用电量剧增, 且设备负载工作时序复杂, 这就对配电系统的可靠性和控制灵活性提出了更高的要求。

目前, 在国内外飞行器配电领域基本有两种配电体制: 常规配电体制和智能配电体制^[1]。国外早期的飞行器配电系统采用常规配电体制, 随着计算机技术和半导体技术的高速发展, 美国最早在 20 世纪 70 年代初开始研究智能配电技术, 并取得很大进展, 形成了相关的标准规范。国内在飞行器智能配电技术研究起步较晚, 20 世纪 80 年代末国内部分高校开始着手研究智能配电技术, 目前在航空领域诸如飞机、无人机等大部分航空飞行器已经采用智能配电体制替代常规配电体制, 在航天领域受限于器件等级等多方面因素智能配电技术发展缓慢, 仅在少部分航天飞行器采用了智能配电体制^[1-2]。

常规配电体制的核心器件主要采取继电器、接触器、断路器等机电式配电设备^[3-4], 控制指令及遥测数据采用硬线直连的方式与外系统实现信息交互, 常规配电体制技术成熟、可靠性高, 但其也存在系统重量大、电缆网复杂、控制不灵活等缺点; 智能配电体制的核心器件则主要采用数字集成电路、固态功率控制器(以下简称 SSPC)等半导体器件, 控制指令及遥

测数据采用总线的方式与外系统实现信息交互, 具有可靠性高、控制灵活、负载适应性强、易于实现集成化、智能化以及故障隔离和系统重构等诸多优点。针对智能配电体制, 本文提出了一种基于 FPGA 和 SSPC 的智能配电系统设计方案。

1 总体方案设计

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。本文提出的基于 FPGA 和 SSPC 的智能配电系统的控制单元采用 ACTEL 公司的 FPGA 芯片, 可实现了系统的逻辑控制和数据编码等功能, 功率执行器件采用 SSPC, 具有重量轻、响应快、抗电磁干扰能力强、寿命长及易于实现智能控制等优点^[5-6], 系统总体设计框图见图 1。

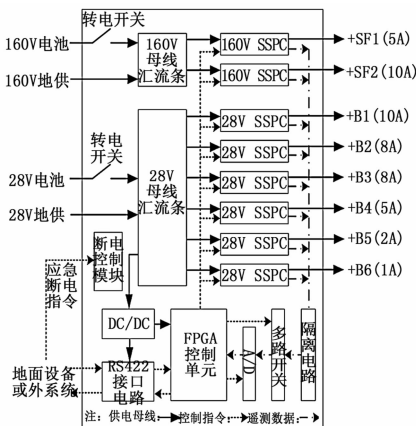


图 1 系统总体设计框图

收稿日期: 2015-11-15; 修回日期: 2015-12-07。

作者简介: 赵岩(1987-), 男, 山西人, 工程师, 主要从事供电及综合测试系统设计方向的研究。

2 系统硬件设计

2.1 主控电路设计

主控电路中 FPGA 采用 ACTEL 公司生产的 FLASH 型 FPGA, 型号为 A3P1000-PQ208M。该 FPGA 具有以下特点: 1) 满足军温条件-55~125℃; 2) 配置不易失, 不易受中子影响; 3) 基于 CMOS 工艺的 Flash 技术, 130 nm, 7 层金属; 4) 1.2~1.5 V 核电压, I/O 电压支持低功耗; 5) 100 万门系统门; 6) 多达 504 kbit 的双端口 ram; 7) 支持 350 M (1.5 V 系统) 和 250 M (1.2 V 系统) 系统特性; 8) 内部有 6 个 CCC (Clock Conditioning Circuit) 块, 每一块内有锁相环。

2.2 总线通信接口设计

飞行器上配电设备与地面测试设备以及遥测系统设备通信接口采用 RS-422 总线接口, 实现控制指令以及遥测数据的收发功能, 与以往硬线方式相比, 控制较为方便灵活, 电缆网设计简化且重量轻, 图 2 为总线通信接口电路示意图。

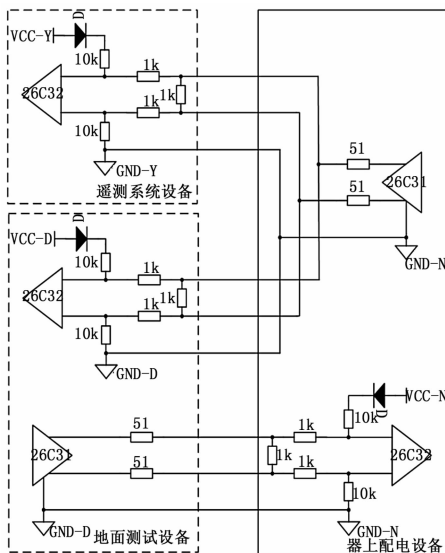


图 2 总线通信接口电路示意图

2.3 配电支路设计

配电支路设计采用 SSPC 配电模块, SSPC 配电模块主要分为驱动模块、过流短路保护模块、电流采集和检测模块等, 其功能框图如图 3 所示。

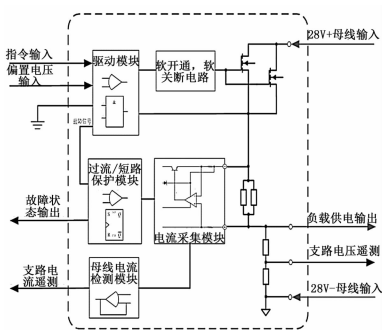


图 3 SSPC 配电模块功能框图

28 V SSPC 模块中功率 MOS 管选用 IRF5M5210, 160 V SSPC 模块中功率 MOS 管选用 IRF9640, 基本参数见表 1。

表 1 功率 MOS 管基本参数表

序号	参数		IRF5M5210	IRF9640
1	TJ/TSTG	工作结温存储温度范围(℃)	-55~150	-55~150
2	RDS(ON)	漏-源工作状态阻抗(Ω)	0.07	0.350
3	VGS	栅源电压(V)	±20	±20
4	BVDSS	漏-源极崩潰电压(V)	100	200
5	VGS=-10V TC=25℃	连续漏极电流(A)	34	11
6	VGS=-10V TC=100℃	连续漏极电流(A)	19	7
7	IDM	脉冲漏极电流(A)	124	44

28 V 可控支路共计 6 路, 额定电流分别为 10 A、8 A、8 A、5 A、2 A、1 A, 160 V 可控支路共计 2 路, 额定电流分别为 10 A、5 A, 为满足配电通路电流的 I 级降额, 28 V SSPC 模块中均采用了两只 IRF5M5210 型 MOS 管并联设计, 160 V SSPC 模块中均采用了两只 IRF9640 型 MOS 管并联设计。

以 +B1 支路为例, 配电支路设计电原理图见图 4, FPGA 发出的加电指令和断电指令经过三极管 2N2222 驱动控制继电器 K1, 加电指令驱动电路采用并联设计, 断电指令驱动电路采用串联设计, 配电支路功率 MOS 管控制电路采取了软启动电路, 对抑制负载上电浪涌电流有一定的作用, 图 5 为软启动电路测试波形。

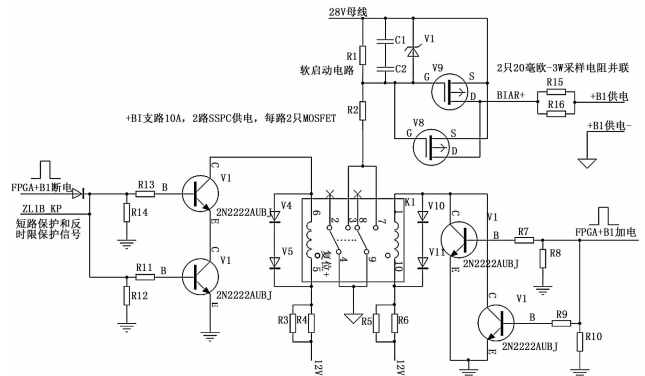


图 4 配电支路设计电原理图

2.4 故障隔离与系统重构设计

智能配电系统能够通过硬件和软件联合设计实现故障隔离和系统重构设计。

当某负载出现短路或者过流故障状态时, 系统通过硬件电路实现故障负载的自动切断, 避免影响整个配电系统的瘫痪。实现故障隔离的硬件电路是 SSPC 的重要组成部分, 即 I2t 反时限保护电路和短路保护电路, 详见图 6。

以 +B1 支路为例, 系统通过电流监测器 INA196 获取该支路的电流值 (已转换成电压量信号), 送给 I2t 反时限保护电路和短路保护电路, I2t 反时限保护电路由积分电路和比较电路构成, 短路保护电路由比较电路构成, 这两个电路均已提前设定了不同的阈值, 当支路电流超过了其设定阈值时, 比较电路会输出故障信号, I2t 保护电路故障信号和短路保护故障信号通过二极管隔离后输出故障信号 ZL1B_KP, 控制支路 MOS 管的关断, 最终实现故障负载的切断隔离。

当负载因出现故障备切断隔离后, FPGA 尝试 4 次间隔性

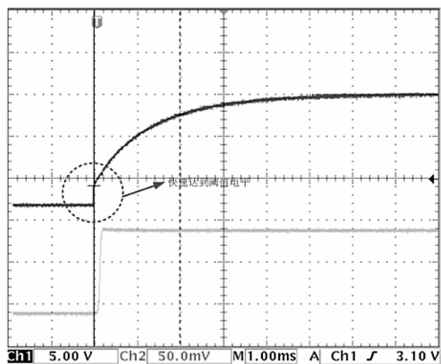


图 5 软启动电路测试波形

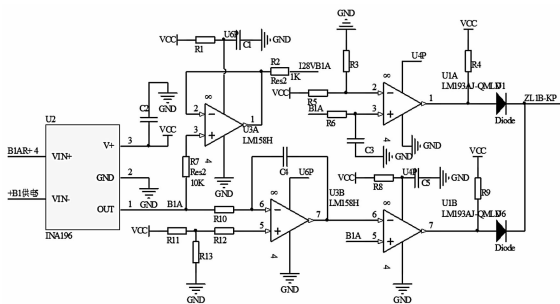
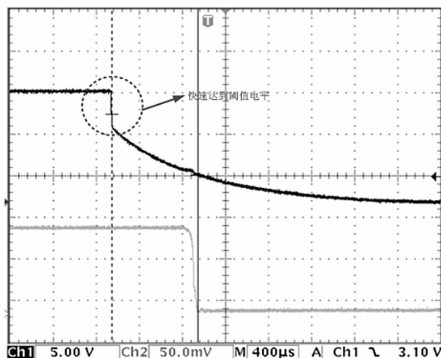


图 6 反时限保护和短路保护电路原理图

地自动发出故障负载的加电指令，可实现系统重构，故障隔离与系统重构流程图见图 7。

3 试验验证与分析

该智能配电系统已在地面综合试验以及全飞行器匹配试验中得到了充分试验验证。

在地面综合试验中模拟开展了某负载短路保护与系统重构试验，图 8 为短路保护与系统重构试验测试数据。

图 8 示波器获取的波形中 CH1 为负载电压，CH2 为短路保护信号，当负载模拟短路时，负载电压由 30.2 V 变为 0 V，系统自动发出第 1 次加电指令，由于负载仍然处于短路状态，在系统发出第 1 次上电指令后，系统检测到短路保护信号，负载电压即刻由 30.2 V 又变为 0 V。系统自动间隔 1 s 发出 4 次加电指令，当系统发出第 3 次上电指令后，负载模拟解除短路状态（即正常状态），当系统自动发出第 4 次上电指令后，负载电压保持 30.2 V 不变，负载工作恢复正常。

经试验验证表明，该智能配电系统成功实现了配电系统的短路保护与系统重构功能。同时，智能配电系统采用 SSPC、

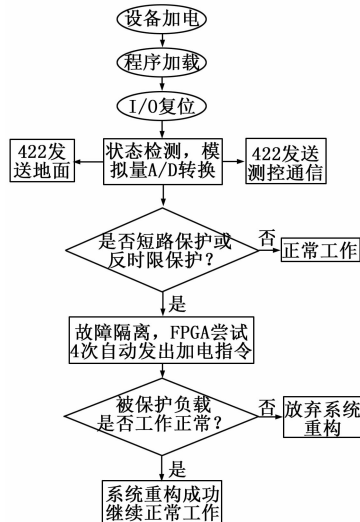


图 7 故障隔离与系统重构流程图

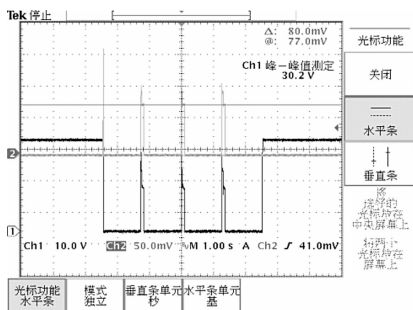


图 8 短路保护与系统重构试验波形

FPGA 以及总线通信技术，不但控制灵活、系统可靠性高，系统重量也大幅度减轻，与传统配电系统相比，智能配电系统重量减轻约 45%。

4 结束语

智能配电系统采用 FPGA 作为主控电路，使整个配电系统可靠、高效；采用总线通信技术，控制的灵活及方便程度大大提高，简化了电缆网设计，减轻了电缆网重量；采用 SSPC 配电技术，实现了配电系统智能化、轻质小型化设计，同时也实现了配电系统的故障隔离与系统重构功能。因此，该智能配电系统在航天航空供电领域有着广泛的应用前景。

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] 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.
- [3] 马世俊, 等. 卫星电源技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2001.
- [4] 王永谦, 等. 卫星电源系统配置方案的优化设计 [J]. 中国空间科学技术, 1999, 10 (5): 1-7.
- [5] 陈春燕, 等. 飞行器低压固态配电技术研究 [J]. 中国仪器仪表, 2014, 6: 64-66.
- [6] 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测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 2730-2732.