

一种新型高可靠性箭上配电控制器设计

葛 立¹, 李 骥¹, 刘 毅¹, 王 未², 冯敏涛²

(1 北京航天长征飞行器研究所 北京 100076

2 中国运载火箭技术研究院 北京 100076)

摘要: 针对传统箭上配电器在新应用时期下产生的问题,设计了一种基于 MOSFET 的供配电开关和基于采样电阻进行电流采集的新型高可靠性箭上遥测配电控制器,解决了传统继电器控制器触点大电流冲击粘连问题,实现了新形势下的全国产化、小型化设计要求,进一步提高了系统可靠性,具有广泛的应用推广性。

关键词: 遥测; 配电器; MOSFET; 可靠性

中图分类号: TN40

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)06-0046-05

A new design of high reliability power distribution controller on rocket

GE Li¹, LI Ji¹, LIU Yi¹, WANG Wei², FENG Mintao²

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, a new type of high reliability telemetry power distribution controller based on MOSFET switch and sampling resistance is designed by analyzing the problems of the traditional device on the rocket. It solved the problem of large current impact adhesion of traditional distributor device and realized the miniaturization design requirement under the new situation, further improved the system's reliability. It has wide application and popularization.

Key words: Telemetry; Power distribution device; MOSFET; Reliability

引 言

箭上遥测系统是航天运载器和武器型号中负责采集箭内各种飞行参数并与其它系统进行指令交互的重要分系统。箭上配电控制器的作用是根据指令或程序将遥测系统中的各类传感器、采编器、存储器、中心程序器、接口控制器等进行电能分配并采集状态和回报。近年来,航天发射任务密集,新器件、新技术不断在新型号中使用,与此同时,暴露出了传统遥测配电器中的一些问题。设计一种适应新时代下的新型高可靠性箭上遥测配电控制器成为必然。本文基于对传统遥测配电器优缺点分析,提出并设计了一种新型高可靠性箭上遥测配电控制器。

1 箭上遥测配电控制器原理与问题分析

1.1 工作原理

箭上遥测系统配电器系统组成如图 1 所示。箭上遥测配电器通过接收控制系统或地面测控计算机指令选择通过箭上电池或地面电源给各类遥测设备供配电,同时,回采各设备电压电流状态回报给指令发出方以判断箭上遥测系统工作状态是否异常。

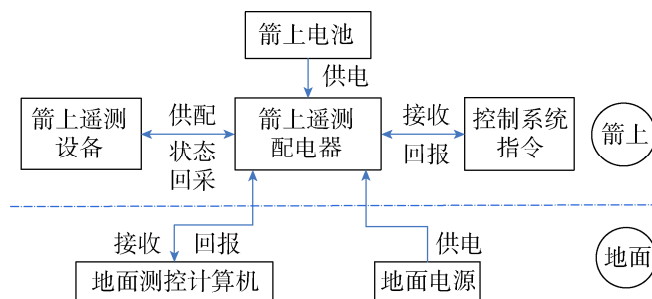


图 1 遥测系统配电器系统组成

Fig. 1 Composition diagram of telemetry system distributor

1.2 问题分析

传统箭上配电器给遥测设备供电通过接收指令或地面开关控制电磁继电器的常闭、常开触点的吸合与断开配合实现；配电回采分为电压和电流两部分，电流采用霍尔传感器进行采集变换后与电压一并进行 AD 变换送入主处理器内进行算法处理后回报给地面或控制系统。

电磁继电器根据电磁效应，工作时输入回路中线包供电，电流产生足够大的磁力使得输出回路的衔铁工作，常开触点闭合或常闭触点断开实现开或关。电磁继电器的触点开关为机械开关，抗干扰能力强，但在近几年的型号任务中出现了无法断电现象，问题定位于触点被烧坏，即使输入回路控制电压消失，常开触点仍不能释放，失效分析结果为机械开关闭合的瞬间大电流引起的触点粘连。通过对系统的梳理与比对计算，出现问题的型号中箭上遥测后端设备所带容性负载大，上电的瞬间容性负载充电，大能量需求产生了大于继电器触点最大过负载的电流，触点被大电流烧坏粘连引起故障产生。示波器捕获模拟上电过程瞬间大电流冲击如图 2 所示。

配电电流回采使用霍尔传感器串入供电回路进行电压变化处理后进入主控芯片。使用霍尔传感器的优势是电路设计简单；其缺点主要有两点：缺点一，霍尔传感器由于本身特性，每个器件使用之初都需要通过试验法获得调整零位电平和斜率的系数，效率较低，同时带来的每台设备的程序都不相同，软件归档复杂；缺点二，国产化设计与小型化箭上设备设计产生不可调和的矛盾，霍尔传感器国产同类器件体积与重量超过进口芯片 10 倍之多，新型箭上设备的体积要求使得必须设计新的箭上电流采集方案。

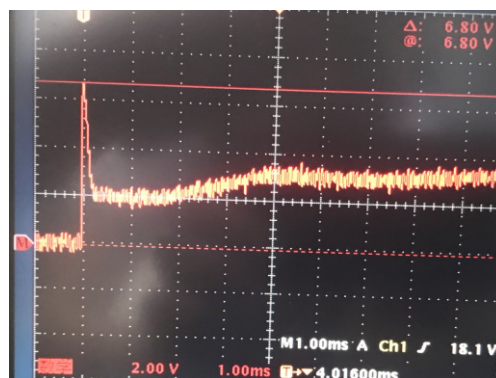


图 2 上电模拟试验电磁继电器触点瞬间大电流捕获

Fig. 2 Instantaneous current acquisition of electromagnetic relay in power on simulation test

2 新型配电控制器设计

新型配电器在设计中采用可靠性设计、小型化设计、可扩展化通用设计的思路。主控芯片选用更为可控、可靠的国产大容量 CPLD 芯片 SM2210；功率配电部分选用大功率 MOSFET 实现；使用采样电阻配合运放实现电流的高精度采集。新型箭上配电器总体方案设计如图 3 所示。配电器供电形式分为地面电源供电和箭上电池供电两种，设备上电后初始状态为地面电源供电，通过 KC 组 MOSFET 开关实现对箭上其他设备的分路供电控制；接收到转电指令后，KA 组 MOSFET 开关闭合，箭上电池供

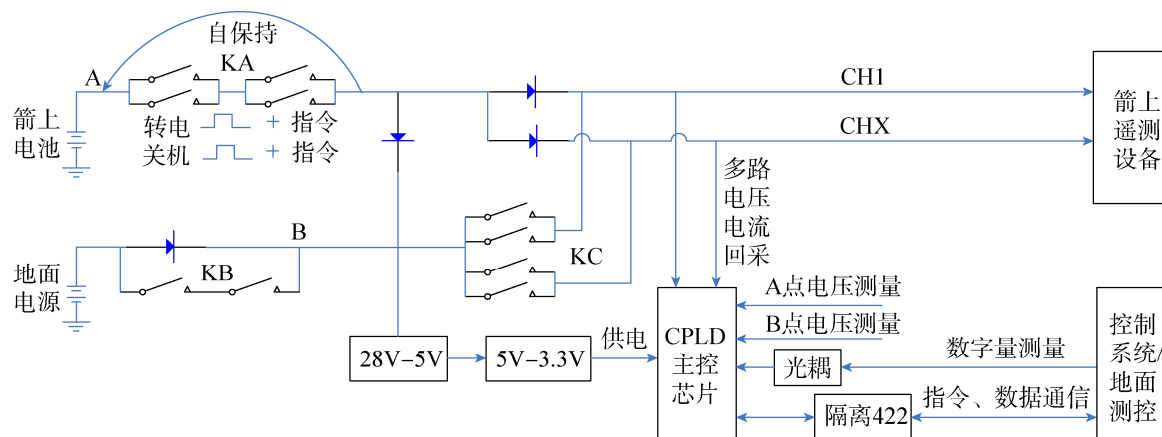


图 3 新型箭上配电器总体方案

Fig. 3 Schematic diagram of the new distributor

电, 地面电源断电。为了监控箭上设备供电工作正常与否, 对分路供电通道 CH1~CHX 的电压和电流值进行回采, 由主控芯片进行软件判决, 具有过流保护功能。配电器与控制系统或地面测控系统的数据交互均为隔离设计。

基于航天型号产品对可靠性的要求^[1], 对关键控制信号同时采取指令、硬触发互为备份的冗余设计思路; 对转电后的电池供电状态进行自保持设计; 关键开关采用 MOSFET 串并联形式确保接通和断开的可靠; 地面供电旁路保护电路使得地面长期加电时功率二极管得到保护。

2.1 配电执行功能设计

为解决配电执行时机机械开关闭合瞬间大电流引起的触点粘连问题, 采用 MOSFET 及配套电路设计替代原电磁继电器设计方案。相比于电磁继电器, MOSFET 没有机械零部件, 无机械磨损, 无动作噪声, 能在高冲击、振动的环境下可靠工作, 寿命长; 无燃弧触点, 无触点火花、电弧, 对外干扰小; 开关切换速度快, 动作时间可达毫秒级^[2]。以地面 1 路供配电为例, 如图 4 所示, 说明配电执行功能设计思路。VCC28G 为地面电源输入, 上电后经过嵌位二极管 D1 的保护输入至导通的 MOSFET Q1、Q2, 经过 RC 电路滤波, 此时若接收到控制系统或地面测控计算机发来的供配电指令, CPLD 则控制 I/O 输出两路互为备份的高电平信号 K1_out、K1_out2 使得三极管 Q6、Q7 导通, 以此打开并联配电开关 Q4、Q5, K1 节点可以向外输出后端设备所需功率。地面电源供电时三极管 Q3 不工作, 转电后通过回拉的电池电压 VCC28B2 导通, 将 Q2 关断以确保电池电流不倒灌至地面电源。为提高配电可靠性, 加入二极管 D2 与 MOSFET Q1、Q2 并联, 设计为 Q1、Q2 的备份电路, 若 Q1、Q2 不能正常导通, D2 可作为后端电路的配电通道使用。

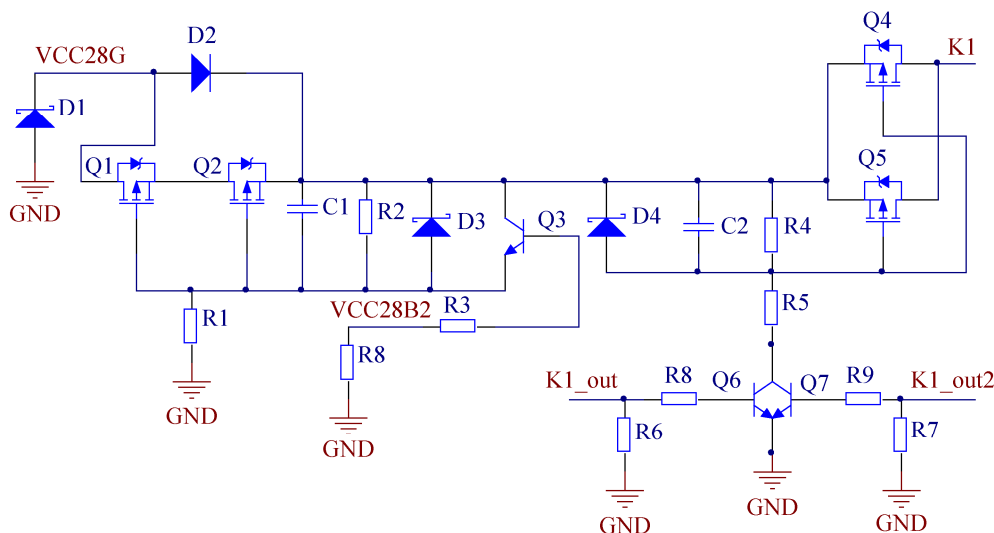


图 4 地面电源供配电原理图

Fig. 4 Schematic diagram of ground power supply distribution

2.2 电流采集功能设计

为解决霍尔传感器检测替代问题, 设计使用串联采样电阻检测技术进行电流测量。电阻检测技术由于外挂电阻进行电流采集, 采样精度高。为减小在采样电阻 R_{SENSE} 上的压降及功率损耗, R_{SENSE} 的阻值要小。设计中使用允差小于千分之一、温度特性好、允许环境温度宽、长期稳定、有失效率等级的毫欧级电阻并联方案。电阻检流电路分为高位检测和低位检测。高端检流电路连到电源端, 能够检测到后续回路的任何故障并采取相应的保护措施, 但需要处理较大的共模信号并使用进口芯片^[3]。选择使用低端检流电路进行设计, 低端检流电路运放以地电平作为参考电平, 检流电阻接在正相端, 如图 5 所示。根据欧姆定律, 用运放采集到的采样电阻 R_{SENSE} 两端的电压经过 CPLD 进行系数还原后除以电阻值即可得到采样电流的数值。采样电阻 R_{SENSE} 使用两颗并联的接法以提高可靠性。

2.3 数字量测量功能设计

箭上配电控制器具备接收控制系统和地面综合测控计算机数字量信号并转发给其它箭上设备的功能。接收端采用光耦隔离串并联方式实现,进入 CPLD 后进行判宽处理;发送端由两种方式转发,分别为 CPLD 控制三极管驱动后端电路输出脉冲和 RS422 转发实现。

2.4 转电、关机功能设计

为了保证箭上配电控制器在流程任务执行过程中能够顺利转电和关机,设计为硬件脉冲触发和指令触发两者并行模式,任意一种触发模式均可实现功能。为保证飞行过程中的可靠性,配电器在转电指令发出后,其转电开关应始终处于接通状态。设计如图 6 所示的自保功能,通过回采转电指令执行接通后的电压 V_{CC28B2} 使三极管 Q5、Q6、Q7、Q8 导通,通过拉低 On_con 信号使得 Q1、Q2、Q3、Q4 能够持续接通以实现转电的自保功能。

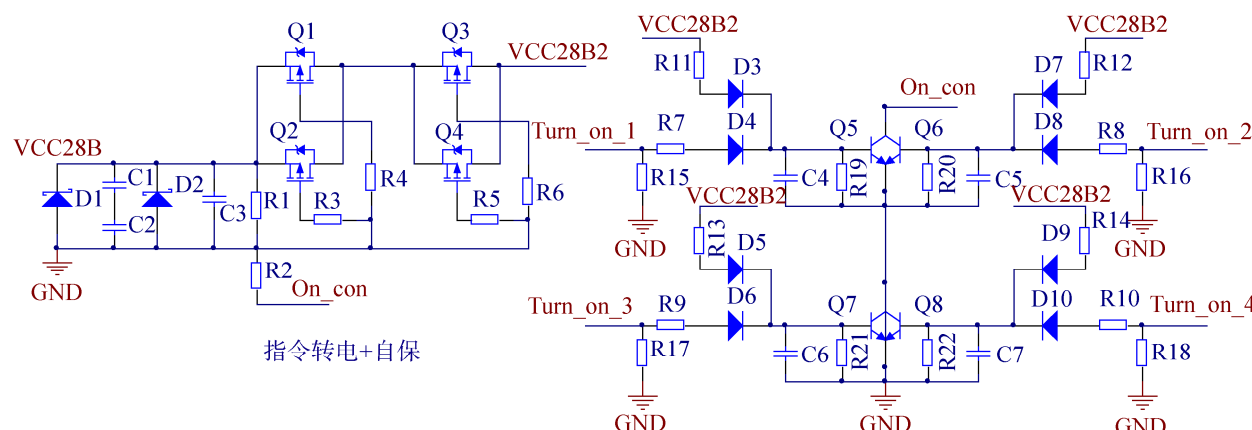


图 6 指令转电自保电路

Fig. 6 Switching command self-protection circuit

3 可靠性设计

由于航天器在执行飞行任务时,电磁环境十分恶劣,设计箭上配电控制器时,运用了头脑风暴法,应对各种有可能出现的突发情况进行了以下可靠性策略设计。

3.1 硬件可靠性设计

配电控制器数字量采集后转发硬件驱动电路分路串入小阻值绕线电阻,若后端接收设备发生短路则绕线电阻烧断,确保配电控制器不受外设备影响而正常工作。

供配电开关均采用串并联冗余设计以提高固有可靠性,元器件的选取进行降额使用,设计了硬件短路保护、自保电路。

3.2 软件策略可靠性设计

配电控制器供电默认状态为地面电源供电,地面电源上电后通过电源转换后直接给 CPLD 供电,转电后由箭上电池供电,CPLD 上电后先读取分离开关状态,若分离状态无效则接收地面或控制系统指令,实现分路供配电、断电、转电;如发现已分离则封锁指令,断开紧急关机通路,不再响应指令,直至分离状态解除重新打开指令通道。读取分离开关决定是否封锁指令的设计策略可防止起飞后各种干扰信号带来的误关机和误动作。

软件中包含电流报错策略,若采集电流超过门限电流值,上报给控制系统或地面综合测控计算机,由二者根据不同的流程和状态采取分级应对策略。软件中对关键信号采用三判二的方式进行处理。

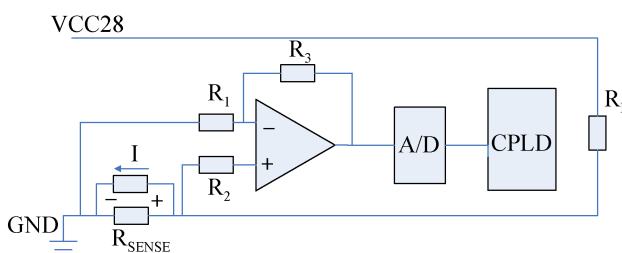


图 5 低端电流检测电路

Fig. 5 Current detection circuit of sense in GND line

系统发电平滤波触发后的应急供电指令, 由独立的 CPLD 逻辑采集并程序配电, 同时转电, 以分离指令通道故障和指令部分逻辑故障。指令和应急两种方式若同时上电, 响应应急上电; 若任意一种方式断电则断电。

4 两种配电控制器比对

用示波器对新型箭上遥测配电控制器 MOSFET 电路上电瞬间进行捕获, 如图 7 所示。可以看到, MOSFET 电路上电过程平缓, 不会产生类似电磁继电器的大电流冲击现象, 有效避免了电流浪涌对后端电路的损伤, 提高了配电器的可靠性。

使用高精度采样电阻的电路进行电流量测量不仅提高了采样精度, 也使得箭上配电器软件版本号统一, 设备得以实现全国产化的小型化设计。需要注意的是, 这种电路设计方法使得每个测量通路的零位略有不同, 需向任务提出方确认。

将新型箭上遥测配电控制器与传统配电器进行参数比对, 具体见表 1。新型箭上遥测配电器在体积、重量、飞行可靠性方面优于传统配电器。

5 结束语

箭上遥测配电器作为整个遥测系统的关键核心设备, 其高可靠地工作是系统得以正常工作的前提。为确保新型箭上遥测配电控制器的高可靠性, 在设计中从元器件选取、硬件电路设计、软件策略设计进行了全方位可靠性设计。新型箭上遥测配电器通过型号验证, 可以高可靠地在复杂电磁环境下长期工作。

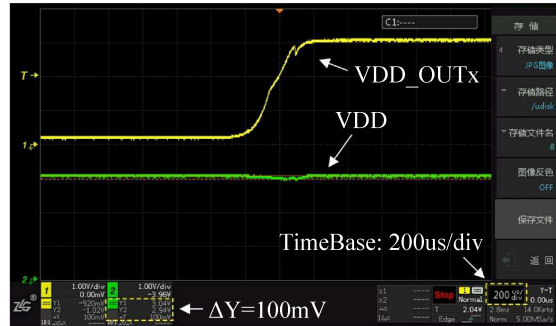
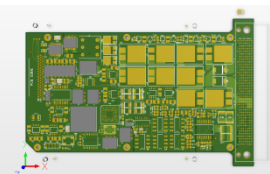


图 7 MOSFET 电路上电过程

Fig. 7 Power on process of MOSFET circuit

表 1 新旧配电器参数比对表

Table 1 Comparison parameters of new and old distributor		
比对项目	传统配电器	新型配电器
体积	 148mm×150mm×91mm	 150mm×90mm×25mm
重量	2.89kg	1.1kg
飞行可靠性	99.96%	99.99%

参考文献

- [1] 赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估(PRA)方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(6): 91-97.
ZHAO Liyan, GU Jifa. Application of probabilistic risk assessment (PRA) method in safety analysis of a certain type of launch vehicle in China[J]. Theory and practice of systems engineering, 2000, 20(6): 91-97.
- [2] SCHMITT S. MOSFET selection and drive strategies for DC solid state circuit breakers[C]. IEEE Proceedings of VDE, 2014: 1-6.
- [3] HELLES G N. Electronic products world[EB/OL]. (2018-06-30)[2020-9-22]. <https://wenku.baidu.com/view/35496cec4afe04a1b071de03.html>.

[作者简介]

- 葛立 1985 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥测产品研发。
李骥 1978 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为遥测产品研发。
刘毅 1973 年生, 高级工程师, 主要研究方向为遥测产品结构。
王未 1967 年生, 工程师, 主要研究方向为国际宇航发射。
冯敏涛 1977 年生, 高级工程师, 主要研究方向为伺服控制。