

# 航天器热试验电源健康管理系统的设计与实现

刘泽元, 文晶, 张曦, 朱琳

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 航天器热试验对程控电源的数量需求规模较大, 电源以机柜阵列形式进行配置, 其运行状态的稳定性将直接影响试验的安全性与可靠性; 首先对热试验用程控电源的健康管理技术进行研究, 以 Agilent N5750 型电源为研究对象, 基于程控电源历史故障类型分析, 对程控电源故障检测技术进行研究, 并结合电源冗余切换技术, 设计电源在线切换装置; 通过试验验证, 该系统能够快速实现在用电源的故障检测定位, 并能够在秒级时间内完成故障电源向备用电源的在线切换, 系统全部工作周期小于 3s, 实现了控温系统大规模电源阵列的智能健康管理, 提高了航天器热试验控温系统的运行可靠性。

**关键词:** 热试验; 程控电源; 健康管理; 故障检测; 在线切换

## Design and Implementation of Power Supply Health Management System for Spacecraft Thermal Test

Liu Zeyuan, Wen Jing, Zhang Xi, Zhu Lin

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The thermal test of spacecraft has a large demand for the program-controlled power supply, and the power supply is configured in array. Its operation state affects the reliability of spacecraft thermal test greatly. In this paper, the health management technology of program-controlled power supply is researched and Agilent N5750 power is used as the research object. Combining the analysis of the history fault type of power supply, the fault detection technology of power supply is studied. Then, combined with the technology of power supply redundancy switching, an on-line switching device is designed. Through the verification experimental, the experimental results show that this system can quickly realize the detection and positioning of the fault power supply, and can complete the online switching of the fault power supply to the backup power within the second-level time. The system can complete the fault detection and online switching in 3 seconds. The research enhances the health management efficiency of the large scale array power supply, and improves the operational reliability of the spacecraft thermal test.

**Keywords:** spacecraft thermal test; program-controlled power supply; health management; fault detection; online switching

## 0 引言

航天器真空热环境试验作为航天器研制过程耗时最长、耗资最大、状态最复杂的试验项目, 对试验过程的可靠性要求非常之高。随着当前航天技术的迅速发展, 航天器的设计规模与技术状态更为复杂, 对热试验的设备规模需求与技术要求也随之增大。控温系统作为航天器热试验用环境模拟设备测控系统的子系统, 主要由控温软件、程控电源和加热装置组成, 其中程控电源作为红外灯、红外笼、薄膜加热器等加热装置的供电设备, 通过其输出电流控制加热装置的辐射热流, 最终实现航天器外热流的模拟, 是航天器热试验最为关键的仪器设备之一。由于试验用电源数量规模较大, 尤其是 921 平台、空间站等大型航天器热试验时, 所用电源数量将达上千台, 电源工作情况较为复杂, 与控温软件通信频率较大, 经常出现输出误差较大、无输出或通信中断等故障现象, 引发试验状态异常。目前,

试验系统对程控电源故障检测的实时性水平较低, 且在发现问题后, 多采用现场人工更换故障电源, 耗时较长、效率较低, 且极易引发质量事故, 大大影响航天器热试验的可靠性<sup>[1-2]</sup>。

为解决上述问题, 需对控温系统程控电源健康管理技术进行研究, 本文以 Agilent N5750 型电源为对象, 首先结合热试验电源故障案例, 对程控电源故障类型进行分析, 研究了电源输出超差、无输出等输出故障与通信丢包、中断等网络故障模式的实时检测技术, 然后结合冗余切换技术, 设计了故障电源向备份电源的在线切换装置, 实现对程控电源健康管理系统的开发。该系统能够在 3 s 时间内完成最多 30 台电源的故障检测与在线切换工作, 故障检测率大于 98%, 提高了热试验控温系统的可靠性, 大大降低了由电源故障所引发的热试验质量风险。

## 1 电源故障检测技术研究

### 1.1 电源故障类型分析

根据航天器热试验程控电源故障历史记录信息, 对电源健康状态及故障类型进行统计分析, 可将其分为输出状态故障和网络状态故障两类, 其中输出状态故障包括输出

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-06-18。

作者简介: 刘泽元(1989-), 男, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器热试验测控技术方向的研究。

超差和工作故障两种, 当电源内部电路出现故障时, 实际输出电流值(电压值)与理想输出电流值(电压值)存在误差, 且超过试验所容许最大误差, 则定义该电源为输出超差故障; 当电源因工作环境恶劣、工作时间过长、内部电路故障等原因, 产生系统故障, 其自检功能将确定上述故障并形成自保护, 无电量输出, 则定义电源为工作状态故障; 网络状态故障包括通信中断和通信不畅两种, 当由于电源通信模块故障、路由器故障、LAN 接口插接不到位或网线故障等原因, 造成控制软件与程控电源无法通信或丢包率较大, 则定位该电源为通信中断或通信不畅故障。

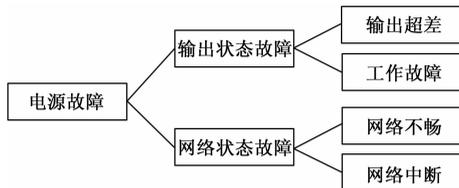


图 1 程控电源故障树

### 1.2 电源故障检测方案设计

为实现对电源输出状态故障的检测, 本文通过对 N5750 电源后面板模拟编程接口 J1 中相关端口信号的测量, 实现对电源输出超差和工作故障模式的检测。具体通过模拟量采集端口对电源接口 J1 的电流输出监视端口 P24 进行测量, 换算得到电源实际输出值。并将其与该台电源的目标输出值的差值与输出误差阈值(一般取 0.1A)进行对比, 判断电源输出是否出现超差故障, 得到输出超差故障电源的 IP 位置信息<sup>[3]</sup>。对于电源工作故障的检测, 通过数字量采集端口对电源接口 J1 的电源正常工作信号端口 P16 进行测量, 当 P16 端口输出信号为高电平时, 电源为正常工作状态; 当输出信号为低电平时, 电源出现工作故障。

热试验测控系统中, 程控电源通过局域网交换机与服务器和客户机进行通信。为实现对程控电源网络状态的检测, 本文采用 ICMP 通信协议技术<sup>[4-5]</sup>, 通过测试设备主机向被检测电源 IP 地址连续分别发送数据包, 并对其返回数据包情况进行分析, 分析内容包括返回数据包与发送数据包的比对、返回数据包耗用时间等。在每个检测过程中, 若连续出现未接收到返回数据包且超过所设定最大允许连续丢包次数(譬如 5 次), 则检测终止, 判定电源出现通信中断故障; 若未出现连续未接收到返回数据包超过设定所最大允许连续丢包次数, 且返回数据包的丢包率超过最大允许丢包率(丢包率是指在每周周期网络检测过程中, 出现与发送数据包内容不一致的返回数据包数量和未接收到返回数据包的数量之和与已发送数据包数量的比值)<sup>[6]</sup>, 则检测终止, 判定电源出现通信不畅故障, 以此获取网络故障电源 IP 信息。

## 2 电源在线切换技术研究

为实现热试验过程中故障电源的在线快速更换, 降低

因人工电源更换速度较慢给热试验带来的风险, 需对电源在线切换技术进行研究。本文基于继电器网络技术<sup>[7-8]</sup>, 设计了电源在线切换装置, 并研究了电源在线切换策略。电源在线切换原理如图 2 所示。

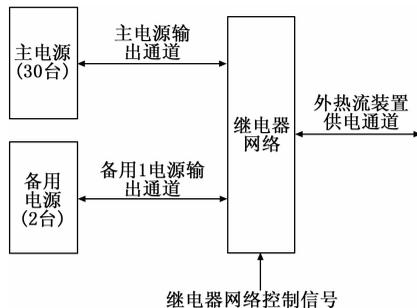


图 2 电源在线切换方案原理图

如图 2 所示, 实现故障电源在线切换的主要设计思路为: 将 30 路主电源输出通道与 2 路备用电源输出通道均接入继电器网络, 并通过继电器网络的 30 路供电输出通道连接至外热流负载装置。其中, 继电器网络逻辑组合设计是电源在线切换方案设计的关键内容。继电器网络由 120 路单刀双掷继电器组成, 其中, 每 4 路单刀双掷继电器构成 1 路外热流加热装置供电通道及其对应主电源和 2 台备用电源输出通道的电气连接单元, 能够实现加热装置负责向主电源和两台备用电源的中任意一台电源的电气匹配连接。每个电气连接单元的工作原理如图 3 所示, 继电器缺省状态均为常闭, 在缺省状态下, 负载供电通道 A 连接至主电源输出通道 B, 按照表 1 所示的继电器动作组合, 负载供电通道可切换至备用电源 1 或备用电源 2 的输出通道。

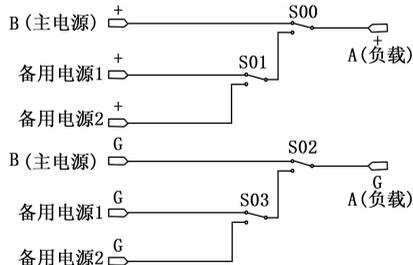


图 3 备用电源切入设计原理图

表 1 继电器状态与负载供电通道对应关系表

负载供电状态	S00	S01	S02	S03
主电源供电	0	—	0	—
备用电源 1 供电	1	0	1	0
备用电源 2 供电	1	1	1	1

注: 表中继电器常闭状态表示为 0, 断开状态表示为 1, 任意状态表示为一。

由于目前航天器热试验控温策略中, 电源多采用恒流工作模式。为防止电源切换断路时, 电源出现打火现象, 切换过程中需将故障电源和备用电源设置为无输出状态, 保证电源切换操作为冷切换。

### 3 电源健康管理系统的的设计

#### 3.1 系统总体方案

基于电源故障检测技术与在线切换技术的研究, 本文对电源健康管理进行了开发, 通过软硬件的设计, 最终实现对一个机柜规模的电源阵列的健康管理。本系统由硬件和软件两部分组成, 其中系统硬件由主控制分系统、电源输出状态检测分系统、网络状态检测分系统、在线切换分系统组成。系统总体结构原理如图 4 所示。

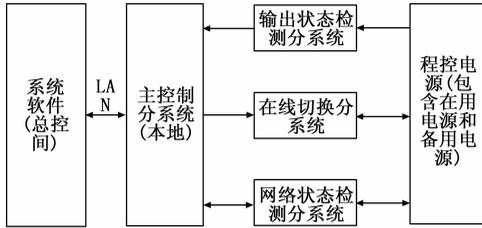


图 4 系统总体结构原理图

系统总体工作流程如图 5 所示。

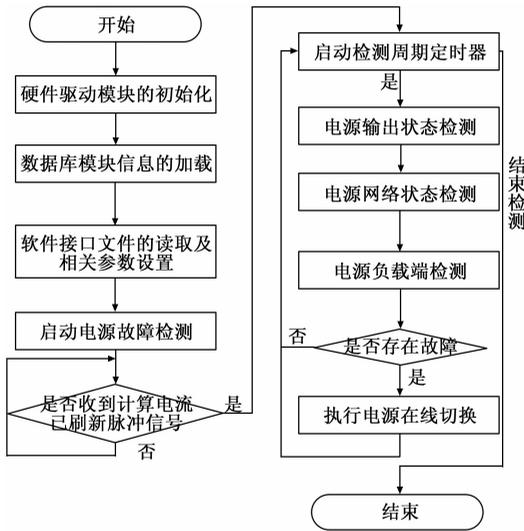


图 5 系统总体工作流程图

#### 3.2 系统硬件设计

系统硬件主控制分系统采用康拓公司 PXI-5010 工控机箱与 PXI/CPCI5098 嵌入式主控制器相结合的模式, 并通过对 PXI 总线测控仪器资源的控制<sup>[9]</sup>, 实现系统硬件的功能设计。输出状态检测分系统实现对主备 32 台电源的输出超差和工作故障的检测, 其中输出超差检测内容包括输出电流和输出电压; 网络状态分系统基于当前局域网交换机, 并通过 ICMP 软件协议及其衍生算法, 实现对 32 台电源的网络传输情况的检测; 在线切换分系统主要实现电源的本地使能输出控制以及电源冗余切换的功能, 电源无输出控制的方式有上位机软件远程指令控制和本地使能控制两种方式, 然而当电源出现网络状态故障时, 无法实现远程指令关闭, 需借助本地使能关闭功能, 通过继电器控制电源

接口 J1 的端口 P1 与 P14 的短接与开路, 使能电源的输出。

根据电源在线切换技术的研究, 电源在线切换装置的设计选用 10 块 Pickering 公司的 40-161-101 系列的大功率开关模块, 该型号板卡为 PXI 总线型, 可集成于主控制系统工控机箱, 每块板卡具有 12 路单刀双掷大功率继电器, 共构成 120 路继电器网络, 能够实现 30 台备用电源输出通道和 2 台备用电源输出通道与 30 路负载回路的冗余连接。

系统硬件设计为机柜形式, 各分系统硬件资源集成在机柜内部, 方便设备的移动与使用。

#### 3.3 系统软件设计

系统软件基于 VS2010 环境进行开发, 开发语言为 VB, 运行环境为 win7 操作系统。软件数据库采用微软 SQL SERVER 2005, 调用 Agilent I/O 库实现电源的底层驱动。

本系统软件采用 C/S 架构模式进行设计<sup>[10]</sup>, 分为主控软件和显示软件两部分, 其中主控软件运行在系统本地硬件主控制分系统上, 直接与系统硬件资源进行通信控制, 实现电源输出状态检测、电源网络状态检测与电源在线切换功能, 同时, 主控软件实时接收显示软件的指令, 并将电源最新状态信息发送到显示软件进行界面显示; 显示软件运行于测控系统局域网任何一台客户机上, 负责接收主控软件发来的数据并显示在界面上, 同时接收人机交互界面的输入信息, 向主控软件发送控制指令。两种模式的软件通过 UDP 协议通讯, 双方互发心跳数据, 以此判断对方是否在线, 对方断线后发出警报提示。

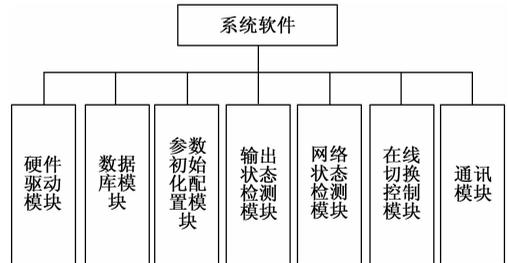


图 6 系统软件结构组成图

软件采用模块化进行设计与开发, 开发结果、过程、内部协议均为公开, 可维护性强, 提供各种配置接口, 用户界面友好, 可操作性强, 提高了软件的设计重用性和系统的可扩展性。软件结构组成如图 6 所示。

### 4 试验验证与结果分析

电源阵列健康管理开发完成后, 在航天器热试验电源间现场对其开展了性能验证试验。根据系统设计指标, 试验分别对电源阵列输出电流检测精度, 输出状态故障检测率、网络状态故障检测率及在线切换功能可靠性等内容进行了验证与分析。

如图 7 所示, 被管理电源阵列以机柜为单元, 每个机柜含有 30 台电源, 电源机柜的输出通过 2 条电缆与电源管

理系统的输入通道接口 B1、B2 进行连接, 电源管理系统的供电输出接口 A1、A2 连接至本次试验所选用的红外灯阵负载, 以此构成电源管理的完整电气连接。

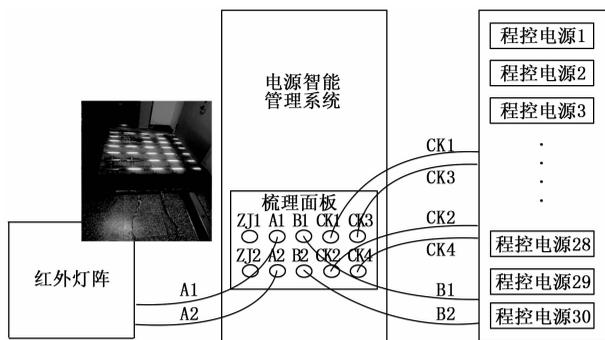


图 7 电源管理系统工作状态电气连接图

验证试验首先对电源健康管理系统的电流检测精度进行验证分析。采取模拟工况试验的方法, 驱动程控电源向红外灯阵加载工况电流, 工况电流如图 8 所示, 工况周期为 5 min, 工况单步时长为 30 s, 机柜上每个电源所加载的工况完全一致。

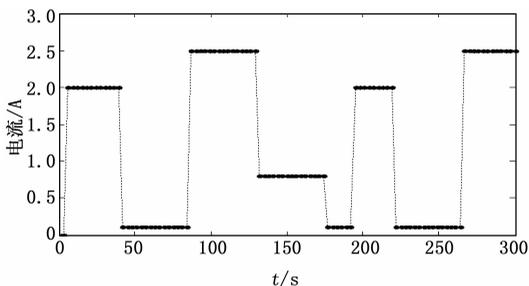


图 8 电源加载模拟工况电流图

通过电源健康管理系统采集到的输出电流与模拟工况电流的对比, 分析系统对电源输出电流的检测精度。本文取 5#, 10#, 20#, 25# 四台电源输出通道的电流检测结果, 对其检测误差进行分析, 其误差值如图 9 所示。

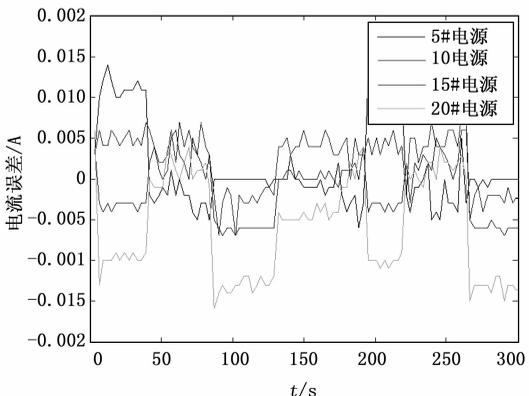


图 9 系统电流检测误差曲线

流的误差值小于  $\pm 0.02A$ , 系统相对误差小于 0.5%, 远小于电源输出超差阈值 0.1 A, 满足对输出超差故障检测的需求。

针对输出状态故障检测率、网络状态检测率的验证, 采用人工设置故障的方法进行, 通过手动调节程控电源前面板电流设定旋钮, 改变输出电流, 设置电源输出状态故障, 手动插拔电源网络线的法方式, 设置电源网络状态故障, 验证电源管理系统对故障的检测结果。本文分别重复执行输出状态故障设置和网络状态故障设置 100 次, 系统均能够对故障进行有效判读与定位, 检测率为 100%。在每次故障检测的同时, 对在线切换与切回功能也进行了验证, 验证结果表明系统切换逻辑无差错, 且切换过程中无热切换打火现象发生, 能够有效实现备用电源向故障电源的替代, 切换时间小于 2 s, 满足设计要求。

### 5 结论

本文通过对电源故障检测技术及电源冗余切换技术的研究, 设计并开发了电源健康管理系统, 该系统实现了对 30 台电源规模阵列的输出状态与网络状态的实时监测, 并具有 2 台电源向 30 台在用电源的冗余备份功能, 故障检测检测周期最小为 3 s, 备用电源切换时间小于 2 s, 提高了航天器热试验电源故障电源判定与定位的及时性, 大大缩减了故障电源的更换时间, 提高了航天器热试验的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 刘畅, 王奕荣. 真空热试验测控软件系统架构设计 [J]. 航天器环境工程, 2010, 27 (3): 324-327.
- [2] 孙日明, 刘吴月, 张荣春, 等. 分布式航天器真空热试验测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3270-3273.
- [3] 马 岚, 王厚军. 基于输出电压和电源电流协同分析的故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (8): 1872-1878.
- [4] 曹文斌, 陈国顺, 牛 刚, 等. 基于 ICMP 和 SNMP 的网络设备监测技术 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 34 (4): 1152-1160.
- [5] 史振华, 刘外喜, 杨家焯. SDN 架构下基于 ICMP 流量的网络异常检测方法 [J]. 计算机系统应用, 2016, 25 (4): 135-142.
- [6] 肖寅东. 网络状态监测仪中丢包检算法及其实现的关键问题研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [7] 任宗基. 重要负荷电源无缝切换供电方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [8] 应朝龙, 蔡 翔, 王成诚. ATS 矩阵开关自检研究 [J]. 宇航计测技术, 2011, 31 (6): 57-60.
- [9] 朱宏飞, 杨 光. 基于 PXI 总线模块的智能测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2912-2914.
- [10] 郑魁敬, 袁 磊, 周 鑫. 基于 C/S 结构的数控设备网络监控系统 [J]. 机械设计, 2012, 29 (8): 5-10.

由图 9 可知, 管理系统所检测输出电流与实际加载电