

基于通用模块化的大型空间飞行器地面 供配电系统设计

李鸿飞, 谢志勇

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 地面供配电系统一直存在体积过于庞大、系统通用性稳定性差问题; 基于通用模块化的设计方案, 从基本功能实现模块的角度, 将系统划分为功率继电器模块、信号继电器模块、PXI 控制模块、地面电缆模块、软件实现模块等, 通过对这些模块的通用性设计及部分软硬件功能的整合, 实现了减少系统体积规模、加大系统集成化及小型化程度、提高系统间通用性及鲁棒性的目的。

关键词: 地面供配电系统; 模块化; 小型化; 鲁棒性

Design of Power Supply System for Huge Spacecraft Based on Universally Modularized Method

Li Hongfei, Xie Zhiyong

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Huge volume and terrible stability are the characteristic features of power supply system (PSS). An universally modularized method has been put forward to work out the trouble based on foundationally Modularization. PSS has been divided to several modules such as power relay module, signal relay module, PXI control module, ground cable module, software module etc. By universally modularized design and combination of software and hardware, miniaturization size, integration degree, robustness and universality between different aircrafts PSS are all enhanced and reinforced.

Keywords: power supply system; modularized; miniaturization; robustness

0 引言

地面供配电系统在综合测试中起到为航天器提供稳压供电通路、上行有线指令发送、下行状态量及模拟量采集处理的作用, 是航天器测试阶段对航天器进行控制和监视的第一道和最后一道屏障, 其重要性不言而喻^[1-2]。而各型号之间的供配电设备由于设备专用化的设计, 相同的功能模块不能通用。设备的改造又需要大量人力物力, 造成了资源的浪费^[3]。

目前关于地面供配电系统的研究主要集中在系统级通用测试方案^[4]及测试设备接口技术上^[5], 鲜有对供配电系统模块化设计的讨论。张洪光对供配电设备硬件模块化及软件配置化的思路进行了讨论, 但对软硬件功能的融合及减少系统体积等方面鲜有涉及^[6]。

在大型空间飞行器综合测试地面供配电系统研制过程中, 采用了基于通用模块化的设计方案, 将专用化设备采用通用模块化的设计, 以实现设备层面的专用化转换为模块层面的通用化, 同时尽可能多的由软件来替代以往硬件实现的功能。在缩减系统体积的同时提高系统集成化程度, 增强系统的鲁棒性及不同型号间的通用性。

1 现状分析

1.1 供配电系统组成

当前航天器使用的地面供配电系统一般由有线前端、集中供电及等效器三大部分组成, 设备包括 SGI 电源、供配电上位机、PXI 控制单元^[7]、集中供电接口机箱、信号调理箱、前端跳线箱、前端电源箱、火工品电源箱、等效器调理箱、等效器跳线箱、低频地面电缆网、太阳方阵模拟器 (SAS) 等, 可完成航天器供电通路控制、模拟量及状态量处理、指令发送、航天器信号模拟等功能, 见图 1。

在供配电系统中, 集中供电接口机箱负责控制供电通路; 信号调理箱主要完成下行模拟量及状态量信号的隔离、调理、不同信号的组合, 同时通过硬件逻辑电路的方式完成下行火工品信号的逻辑运算、锁存、信号转换及不同指令发送继电器的串联; 前端跳线箱则实现了信号的输入输出接口连接。上位机软件通过 PXI 控制单元完成对所有调理过的信号进行采集、对指令发送继电器进行控制的功能; 等效器信号则由调理箱进行模拟后, 通过跳线箱进行输出。而 SAS 用于太阳方阵模拟, 专用性较强, 不在本文讨论范围。

1.2 存在的问题

现有供配电系统存在设备众多、体积庞大、连接复杂易出错的问题, 如上节所述的前端跳线箱占据 12U 的机柜高度, 但只是完成了输入输出信号的分类、合并及接口的引出; 等效器跳线箱前面板有 66 个按钮及 63 个指示灯进行控制和显示, 占据 24U 机柜高度; 供配电系统 10 种设备累计需占用 3 个 2

收稿日期: 2017-05-21; 修回日期: 2017-06-07。

作者简介: 李鸿飞 (1980-), 男, 北京市人, 高级工程师, 主要从事载人航天器综合测试系统设计工作方向的研究。

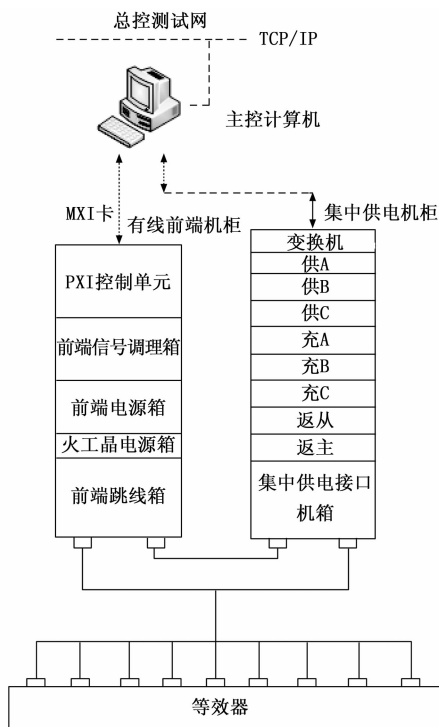


图 1 供电系统架构图

米高的标准机柜，每次转运时需拆接近 60 根左右的电缆及 120 个左右的不同插头。

同时，现有系统存在通用化集成化程度低、可拓展性差、维护不便的问题。系统中除 SGI 电源外所有设备均为专用设备，设备之间不能相互通用。如前端电源箱及火工品电源箱均为专用设计，每台设备均需占用 3U 的高度，集成化程度低；前端跳线箱使用硬件逻辑锁存电路只能完成近几十路火工品信号的合并、逻辑锁存运算且不可扩展。若同样的设备完成大型空间飞行器几百路火工品信号的处理，则体积会更加庞大。

2 通用模块化设计方案

2.1 设计思路

在大型空间飞行器综合测试地面供电系统设计之初，即引入模块化的思路，按照功能需求划分为功率继电器模块、信号继电器模块、PXI 控制模块、电缆及软件实现模块等。同时考虑通用化设计，如有线前端设备与等效器设备之间继电器模块、PXI 控制模块及软件实现模块的通用化，即时插拔使用等特点。

在系统整体设计中遵循集成化、小型化的设计原则，通过优化调理电路，优化跳线设计，提高集成度缩减接插件规模，来简化系统设计，缩减设备体积与规模。

2.2 功率继电器模块

考虑大型空间飞行器实际使用需求，设计继电器最大工作电压 140 V（不考虑降额，下同），额定电流不小于 40 A，在兼顾电压、电流、触点等指标的同时，选用某型号大功率继电器实现。由于其只有一对触点，同时为兼顾采样线通断控制和继电器状态采集的需求，在大功率继电器端并联 1 个继电器 2JB2-2 实现采样线通断和继电器状态采集，与大功率继电器

共用 1 路控制指令。2JB2-2 包括 2 路主触点和 1 路辅触点。选用 1 路主触点用于采样通路控制，选用 1 路辅触点用于继电器通断状态采集。

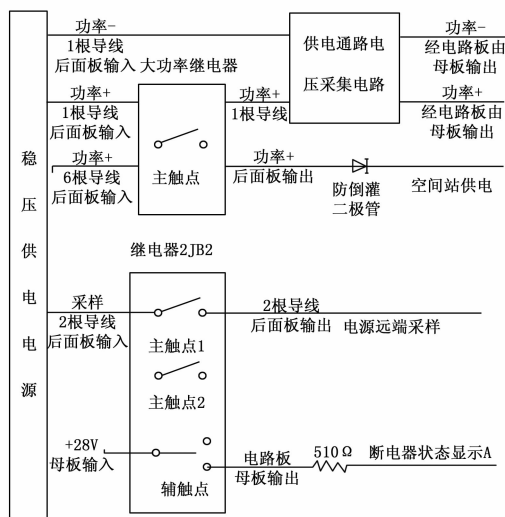


图 2 功率继电器硬件模块原理图

图 2 给出了功率继电器硬件模块的组成，模块中包括 1 个大功率继电器、1 个 2JB2-2 继电器，1 个防倒灌二极管，1 个电压采集电路及若干电阻电容等。同时此模块的将继电器所有接口引出，设计为标准接插件的形式，可通过模块间的组合使用。比如大型空间飞行器各个舱段均可使用若干个功率继电器模块并联的形式。各模块完全通用，相互之间可互换，可互为备份。同时，在满足电压电流降额要求的前提下，功率继电器模块也可使用在紧急关机通路及脱插落通路，用于通路通断的控制。

2.3 信号继电器模块

大型空间飞行器部分有线前端指令发送及等效器的状态量、模拟量信号控制均需使用磁保持继电器对 PXI 的控制指令进行扩展。选用松下公司 DS2E-SL2-DC12V 小型磁保持继电器，触点电压：30VDC，最大电流：2A，最大动作次数：500000 次，线圈电压规格：12 V，外形尺寸：20 mm × 9.9 mm × 9.9 mm；此种型号继电器已经使用于载人飞船及货运船的地面测试设备，稳定可靠。信号继电器模块原理如图 3 所示。

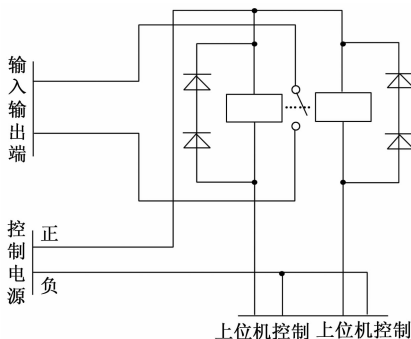


图 3 信号继电器模块原理图

信号继电器模块中包括 1 个 DS2E-SL2-DC12V 继电器、

4 个续流二极管及若干导线。同时此模块的将继电器所有接口引出, 设计为标准接插件的形式, 可通过模块间的组合使用。如若干个此种模块的组合用于等效器调理箱中状态量的模拟及模拟量的控制, 若干个此种模块的组合用于前端指令箱中地面扩展指令的发送。模块间完全通用, 相互之间可互换, 可互为备份。

2.4 PXI 控制模块

PXI 控制模块用于供电系统的有线前端及等效器的控制, 选用基于 PXIe 总线的 NI 公司通用货架产品实现, 一般由 PXIe 机箱、功能板卡及零槽嵌入式控制器三部分组成。为兼顾通用化需求, 有线前端与等效器选用相同型号的 18 槽 3U PXI 标准机箱 PXIe-1075 机箱、用于模拟量采集的 PXIe-4300 板卡、用于状态量采集的 PXI-6529 板卡、用于通断控制的 PXI-2520 板卡。各板卡功能如下:

1) 选用 PXIe-4300 模拟量采集板卡完成模拟量采集功能, 对大型空间飞行器下行的若干路模拟量进行采集, 同时用于等效器对输出电压电流进行采集。板卡输入电压范围 ±10 V, 同时各通路具备光隔模块、低滤波模块, 能够满足信号隔离、信号调理要求, 见图 4。

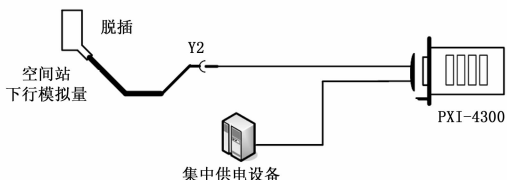


图 4 模拟量测量示意图

2) 选用 PXI-6529 板卡对大型空间飞行器下行若干路火工品信号及其它状态量信号进行采集, 并同时可用于等效器接收地面指令高电平信号的采集。大型空间飞行器有线前端采用基于 PXI-6529 板卡数字滤波及上位机软件锁存的方式实现载人二期火工品信号调理的功能。同时 PXI-6529 板卡通路具备光耦隔离功能, 可满足船地信号电气隔离需求, 见图 5。

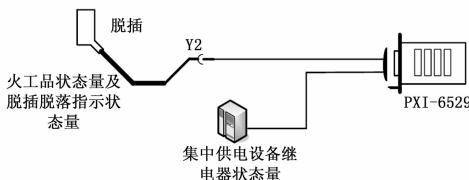


图 5 状态量测量示意图

3) 选用 PXI-2520 继电器板卡实现指令发送的通路通断控制, 同时可用于等效器模拟量及状态量的通路控制。最大切换电流 2A, 可满足需求, 如图 6 所示。

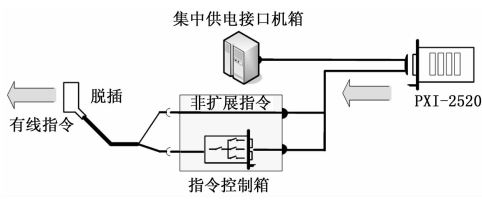


图 6 指令发送示意图

2.5 地面电缆模块

地面电缆模块是指供电系统设备到机房支架箱之间的低

频电缆网。大型空间飞行器地面供电系统在设计中, 为减少地面供电系统的体积, 将系统输入输出信号的分类、合并及接口的引出等功能融入进地面低频电缆模块之中, 取消了占高 12 U 的前端跳线箱的设计, 同时采用芯数更多的 J51-134 电连接器来整合更多的输入输出通路。

低频电缆模块的设计同时大大减少了地面测试设备间电缆的连接复杂度, 将每次联调时需拆接的近 60 根电缆减少到 35 根, 降低了连接时人员操作出错的概率。地面电缆模块单通路设计如图 7 所示。

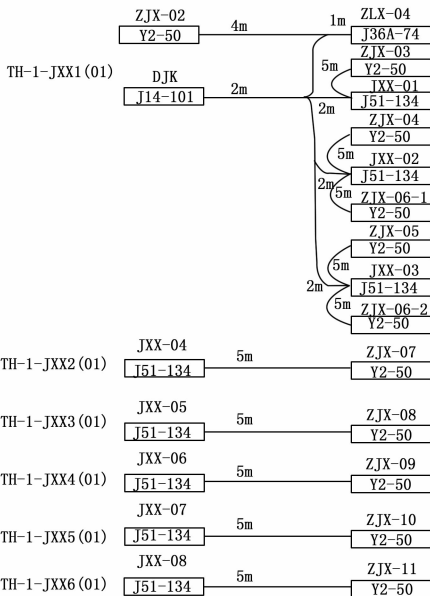


图 7 地面电缆模块单通路示意图

2.6 软件实现模块

为进一步减少地面供电系统的体积, 将有线前端及等效器的部分硬件实现功能统一由软件实现。如结合 PXI-6529 板卡具备的可过滤 200 ns 至 100 ms 噪声的底层硬件数字滤波能力, 使用上位机 LabVIEW 软件^[8]来实现近几百路火工品下行信号的数字滤波与软件逻辑运算, 以此来替代硬件锁存及逻辑运算, 从而减少设备体积。

同时, 在供电系统等效器的设计中, 则是用 LabVIEW 软件完全替代了占高 24 U 机柜高度的等效器跳线箱前面板的按钮控制与指示灯显示, 只保留了等效器调理机箱, 使等效器整体体积缩减了约 50%。

在软件编写过程中, 考虑到通用化设计, 供电系统有线前端上位机软件及等效器软件采用相同的“生产者-消费者”软件逻辑架构, 数据采集与继电器控制方面采用相同的子 VI 模块, 只是配置文件略有不同。通过更改配置文件即可实现软件的通用, 简化了系统的实现。

2.7 系统集成

系统集成设计过程中, 除了通过地面电缆模块及软件实现模块减少设备体积外, 还采用了 Agilent 公司 1 U 的通用电源产品代替专用电源箱, 进一步缩减系统体积。如图 8 所示, 有线前端设备最终集成在一个 1.6 M 高的标准机柜中, 体积由原先的 42 U 减小为 14 U, 而等效器部分因取消了等效器跳线

箱的设计，体积由原先的 32 U 同样减小为 14 U。

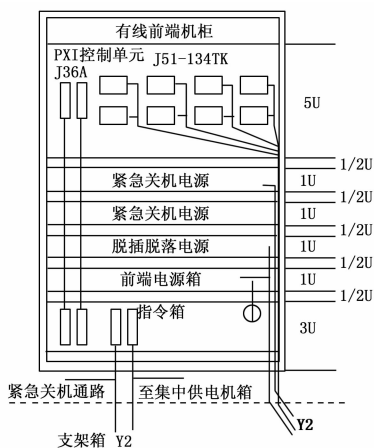


图 8 有线前端机柜集成示意图

3 试验结果与分析

3.1 集成化小型化程度高

采用基于通用模块化方案的大型空间飞行器地面供配电系统设计在实现功能需求翻倍的同时较大的缩减了系统体积，减少了接插件及设备间电缆的规模，简化了系统设计，且通过软件可实现所有硬件操控及测量功能，集成化程度高，易于运输。其与现有供配电系统的对比情况见表 1。

表 1 应用效果对比

项目	现有系统	通用模块化系统
状态量规模	几十路	几百路
设备种类	11	7
通用化设备比例	27.3%	57.1%
系统体积	3 个机柜共计 116U	三个机柜共计 70U
设备间电缆数量	60	35
接插件数量	120	75

(上接第 242 页)

不打开或新建数据文件，文件在新建时并不知道其大小，每隔 5 分钟关闭、打开一次，并将内存中数据转存到磁盘上，这时再计算文件大小，并写入目录头文件大小信息中。数据中的绝对时间是从网络数据中提取出来的，并打入数据包中，包括文件头的时间数据包和每个数据包中的时间标志。

4 系统应用效果

机载网络数据实时处理系统可直接与机载测试采集网络连接，完成机载网络数据包的解包，支持不低于 64 个点/秒 3000 个以上参数的实时提取和工程量转化以及参数实时转发等功能。工程量转换功能可完成多种类型参数信息校准，包括 ARINC429、1553B、422、664 等总线类型参数和加装传感器参数，可完成线性、多项式、双曲线、抛物线、点对等多种工程量转换算法。

机载网络数据实时处理系统已经过多个架次科研试飞验证，验证表明：系统稳定可靠，数据实时处理能力完全达到了现阶段试验机载测试系统数据处理性能的要求。解决了当前大客等型号机型体积大、测试参数多、测试参数分布散、系统

3.2 鲁棒性替代性效果好

基于通用模块化方案，供配电系统设备间的连接关系更加简单，容易维护，稳定性提高、鲁棒性增强，且可替代性及可扩展性比原有系统有较大提升。如现有通用化设备的比例由 27.3% 提高到了 57.1%，且专用设备之间采用的模块化设计思路，保证了专用设备间的可替代性及模块级相互备份，从而进一步提高了系统的鲁棒性。

4 结束语

采用通用模块化的设计方案可以减少系统重复性开发工作、提高型号间不同设备相同功能的模块级互换和重用，同时可以减少设备备份数量，提高系统的鲁棒性。本文所阐述的通用模块化设计思路已经在大型空间飞行器供配电系统中得到了应用，在实现功能的同时系统体积大幅减少、稳定性增强、效果显著。

参考文献：

- [1] 金星, 洪延姬, 王旭, 等. 发射场供配电系统可靠性分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25 (1): 119-120.
- [2] 赵岩, 杨友超, 张翔, 等. 航天器高可靠智能供配电系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2776-2781.
- [3] 管学兰. 卫星供配电测试设备设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学.
- [4] 张翔, 徐海运, 陈春燕, 等. 飞行器供配电系统通用测试方案设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 3126-3128.
- [5] 李立. 卫星供配电测试设备接口设计技术 [J]. 航天器工程, 2002, 11 (1): 66-72.
- [6] 张洪光. 航天器供配电测试设备硬件模块化、软件配置化设计思路 [J]. 航天器工程, 2010, 19 (1): 72-76.
- [7] 张黎明, 孙宁, 于慧亮, 等. 基于 PXI 的卫星综合测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (1): 27-29.
- [8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.2 程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

实时性要求更高等问题。

5 结语

经科研试飞验证，机载网络数据实时处理系统性能稳定，并具有良好的扩展性，在大客等大型飞机试飞中必将发挥重要的作用。

参考文献：

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] Lyons R G. Understanding digital signal processing [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.
- [3] 袁炳南, 张建琳. PCM 与网络数据采集系统技术分析 [J]. 测控技术, 2009, 28 (4): 29-31.
- [4] 段宝元, 穆永花, 穆永河. 以太网在新支线飞机试飞测试中的应用 [J]. 测控技术, 2011 (30): 91-93.
- [5] Stevens W R. UNIX 网络编程: 套接口 API [M]. 杨继张, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] Richter J. Windows NT 高级编程技术 [M]. 郑全战, 等译. 北京: 清华大学出版社, 1995.