

# 基于 1553B 总线的运载火箭供电测控系统设计

祝 伟, 张金刚, 张佳宁, 徐林丰, 张跃林

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 新一代运载火箭采用低温动力技术, 测量系统获取飞行过程遥测参数的同时, 需要完成火箭发射前低温推进剂加注期间压力、温度等关键参数的可靠获取; 相比传统火箭, 对测量系统在供配电和地面测控的可靠性设计、连续工作时间、测试性、扩展性和箭地接口设计提出了较高要求, 对此文中提出了一种基于 1553B 总线的供电测控系统, 介绍了系统的硬件和软件组成、功能和测控信息流向, 分析了系统设计的 4 项关键技术: 单机设备智能化设计、箭地接口简化设计、总线通信协议和高可靠 PXI 冗余备份设计; 设计的新型供电测控系统在新一代运载火箭各项大型地面试验中成功实现了工程应用, 系统方案设计的正确性得到了充分验证, 系统方案在其他项目中得到了推广。

**关键词:** 供电测控; 智能化设计; 1553B 总线; PXI 冗余备份

## Design of a Power Supply and Monitoring System for Space Launch Vehicle Based on 1553B Bus

Zhu Wei, Zhang Jingang, Zhang Jianing, Xu Linfeng, Zhang Yuelin

(Beijing Aerospace System Engineering Research Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** As Cryogenic Power System being used in the design of the new generation launch vehicle, more and higher requirements for reliability, continuous working time, testability, expansibility and interface relationship have been put forward to the design of power supply monitoring subsystem in the Measuring System of new launch vehicle. A new power supply monitoring subsystem design based on 1553B bus is proposed to achieve these requirements. In this article, the overall scheme hardware and software are shown, parts of the key technologies used in the system are discussed: intelligentizing of power equipments, interface design between space launch vehicle and ground-monitoring system, protocol of power supply monitoring subsystem and dual-PXIs redundant warm backup. This new power supply system has been successfully passed all the large-scale test for the new generation launch vehicle, and has been promoted in other projects.

**Keywords:** power supply and monitoring; intelligentizing; 1553B bus; dual-PXIs redundant warm backup

## 0 引言

传统运载火箭测量系统供电测控子系统(以下简称供电测控系统)箭地连接采用导线直连方式<sup>[1]</sup>完成测控信号的传递, 在供电测控系统需求简单、配电控制分路少、测试性要求有限的情况下, 能够满足系统供电测控的需求。采用这种方式的缺点是: 火箭对于供电测控需求多样化、配电控制路数增加、测试性要求更高时, 箭地供电测控电连接器、线缆的规模数量和复杂度都急剧增加。

新一代运载火箭采用低温推进技术, 发射前加注和飞行过程中测量系统较传统火箭承担了更多功能, 火箭总体对于测量系统性能的要求也越来越高, 主要体现在:

- 1) 满足运载火箭低温推进剂加注到起飞前关键参数的长时高可靠获取;
- 2) 能够对全箭分区域、分功能进行局部测量;
- 3) 火箭故障时能够提供可靠测量数据;
- 4) 能够兼顾后续其它构型的测量需求;
- 5) 箭地接口简化, 适应火箭减重需要;
- 6) 前后端远距离地面测发控。

为了满足总体要求, 供配电测控系统箭地间采用了基于

1553B 总线取代传统的大量配电控制和测量线路, 供配电设备进行智能化设计, 不同类型的单机通过统一的 1553B 总线接口接入供配电总线, 接收总线传来的供电控制指令, 完成配电任务; 同时, 将内部检测电路采集的信息编码后传给总线, 用于地面实时监测与控制。

系统需求的变化对供电测控系统测控功能变化可归纳为:

- 1) 传统的统一供电控制发展成按照区域、功能进行分路控制;
- 2) 箭上供配电设备信号监测由原来的直连导线地面测量变为由箭上单机内部采集电路完成, 箭地传输信号由模拟信号变成编码后的数字信号, 提高测试覆盖性的同时简化箭地接口;
- 3) 统一的测控接口为供电测控系统后续扩展提供可能。

供电测控系统由硬件部分和软件部分组成, 需要解决设备智能化、箭地接口、测控协议和 PXI(以下简称 PXI) 冗余备份设计等关键技术。

## 1 系统组成

### 1.1 硬件组成

基于 1553B 总线的供电测控系统组成见图 1, 系统主要由 BC(PXI) 和 RT(配电控制组合、配电器 1、配电器 2) 组成。

1553B 总线控制器 BC 由两台热备冗余的 PXI(1553B 板卡) 承担, PXI 作为地面测发控的前端供电控制主机, 通过冗余的以太网口接收后端测控主机发送的远程供电指令, 完成指令代码解析, 并根据指令要求通过 1553B 总线向箭地供配电

收稿日期: 2015-10-23; 修回日期: 2016-01-04。

作者简介: 祝伟(1983-), 男, 陕西乾县人, 工程师, 主要从事测量系统供配电和地面测控系统设计方向的研究。

设备发送供电控制指令。BC 同时周期性接收总线上不同供电设备终端采集传输的供配电状态信息数据，完成数据解析，并以约定的数据报格式打包，通过以太网向测量系统供配电测控主机进行转发。运行中的 PXI（主机）将采集的主机状态信息实时传给非运行状态的 PXI（从机），从机对主机数据进行存储，并实时进行故障判断，故障状态下无缝切换，接替故障主机完成总线系统管理。

箭上供配电单机设备配电器 1 和配电器 2 分别安装在火箭的一级和二级，具有统一的 1553B 接口，是箭上实现箭供配电控制与状态监测的关键设备。配电器内部设计 1553B 总线接口电路和控制电路，执行机构采用传统飞行试验的高可靠电磁继电器。在地面测试的各个阶段，处于火箭不同位置的配电器，接收 1553B 总线传来的供电控制指令，完成地面供电转箭上供电、断箭上供电等箭供电控制，对配电器内部采集的模拟量和状态量参数按照统一的供配电信息编码原则进行编码，编码后的数据信息通过 1553B 总线发送给 PXI。飞行过程中，通过设计箭供继电器自保持电路，确保箭上设备供电的可靠性。

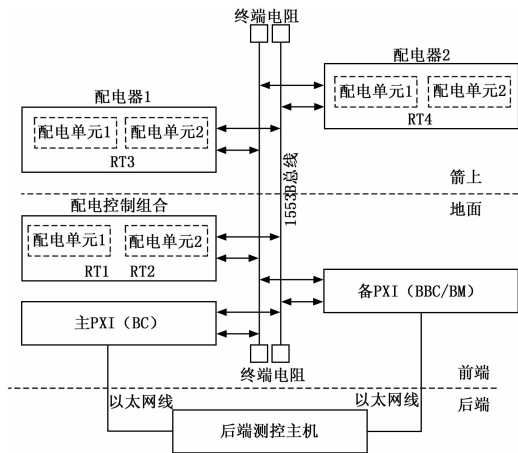


图 1 基于 1553B 总线的供电测控系统组成图

配电控制组合提供箭上设备地供供电控制，地面测试过程中还承担模拟箭供的转接任务，是传统的配电组合和控制组合进行一体化设计后的产品。为提高地供长时供电可靠性，配电控制组合内部设计冗余的两个 RT 接口电路，统一接入 1553B 总线系统，接收总线发送的供电控制指令，经判断正确后执行地供控制，为箭上不同负载提供分路供电。同时，配电控制组合内部的配电单元也进行冗余设计，两组配电单元的电磁继电器触点垂直安装，确保设备在发射过程中可靠工作。

1.2 软件组成

基于 1553B 总线系统的供电测控系统包含供电单机嵌入式软件和供电测控管理软件。

配电器 1、2 和配电控制组合内采用 DSP+CPLD 方式实现控制指令和测量信息的双向交互。DSP 运行的嵌入式软件在 TI 公司的 CCS 软件上开发完成，实现指令解析和数据编码；CPLD 运行的嵌入式软件使用 VHDL 语言编程开发，将 AD 采集信息的串行数据变换为并行数据并送 DSP 编码，并将 DSP 编码后的数据送 1553B 总线接口芯片，按照不同格式编码后送出；CPLD 嵌入式软件将 1553B 总线芯片的有效数据进行前期处理，并送 DSP 进行解析；收到 DSP 解析后的控制指令数据，送配电控制继电器的驱动放大部分完成放大，由继电器

实现指令执行。

供电测控软件由运行在前端（地面测发控前端）PXI 前置测控软件和运行在后端（地面测发控后端）的综合测控软件组成，PXI 前置测控软件和综合测控软件通过以太网口实现信息交互。

前置测控软件为基于 Microsoft Visual Studio2005 平台开发，采用 C++ 作为编程语言，设计功能为：

- 1) 总线 BC 的调度控制功能；
- 2) PXI 模拟量、数字量板卡数据采集编码；
- 3) 总线数据的采集功能；
- 4) 故障检测与诊断；
- 5) 故障状态下 PXI 冗余切换等功能；
- 6) 以太网通信功能。

综合测控软件基于集成化、支持二次配置的组态化软件平台进行开发，由配置文件编辑模块、实时测控模块和测试数据分析模块 3 部分组成。设计功能为：

- 1) 指令、判据、测试流程的自定义配置功能；
- 2) 通信协议配置功能；
- 3) 数据分析功能；
- 4) 网络通信功能；
- 5) 图形化显示功能。

2 系统关键技术

2.1 单机设备智能化设计

供配电单机设备智能化设计是实现基于 1553B 总线的供电测控系统的基础，以 1553B 总线为核心的新型供配电单机设备（配电器、配电控制组合）通用原理图见图 2。

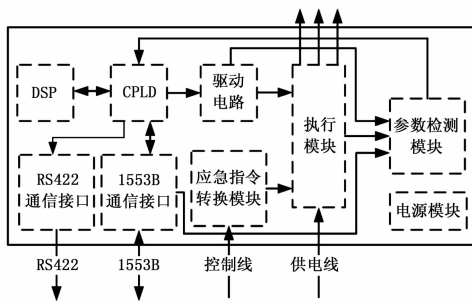


图 2 供配电单机设备原理图

供配电单机设备包含信息处理模块（DSP、CPLD）、总线通信模块（1553B）、驱动及执行模块、参数检测模块、电源模块和应急指令转换模块。

信息处理模块含 DSP 和 CPLD 两个部分，DSP 采用 TI 公司的 TMS320F2812 芯片，接收 CPLD 输入的数据进行指令数据和测量数据处理，处理结果送 CPLD 芯片进一步对外发送。CPLD 选用 ISPLSI1048（具体型号根据实际逻辑使用资源需求选用），CPLD 接收参数检测模块、1553B 总线、RS422 总线传来的串行数据，进行数据串并转换，并发送给 DSP 进一步处理；同时将 DSP 输出的并行数据转换成串行数据传给总线接口电路、参数采集模块和驱动电路。

1553B 总线通信模块选用 BU-61580 芯片，将 CPLD 传来的数据按照 1553B 总线协议规定的格式进行编帧，并完成编帧数据的发送；对 1553B 总线传来的数据帧解析，将传输的有效数据发给 CPLD。RS422 总线通信用于在火箭飞行过程

中将 DSP 和 CPLD 处理完成的信息数据按照 RS422 总线标准送出给其它数据综合设备。

驱动模块接收 CPLD 传输的解码后的指令数据, 通过 OC 门集成电路直接驱动固态继电器执行开关命令, 固态继电器内部驱动电路与开关执行电路具有隔离功能; 电磁继电器需要大于 100 mA 的驱动电流确保开关动作可靠执行, CPLD 输出的指令信号采用达林顿管进行驱动信号放大后驱动电磁继电器线圈, CPLD 与达林顿管之间采用光耦进行信号隔离。

执行模块在驱动模块的驱动下, 将地供母线分路或统一向箭上设备供应。

参数检测模块包含模拟量采集和数字量采集, 模拟量采集对象有电压量和电流量, 电流检测采用霍尔电流测量器件完成, 输出 0~5 V 的电压量。模拟量采集采用 ADI 公司的 16 位芯片 AD7656, 采样精度为 16 位, 最高采样频率 250 kHz, AD 采集数据经数字隔离器隔离后送 CPLD, 数字隔离器选用 ADI 公司的 AduM 系列芯片, 单片可实现 4 路数字信号隔离。模拟量采集后采用状态量采用光耦隔离方式实现隔离采集。

应急指令转换模块接收外部直连导线传输的控制信号, 直接驱动执行继电器的驱动部分电路, 独立于总线传输的指令完成紧急状态下的供电控制。电源模块向单机设备内部各模块设备进行供电。

### 2.2 箭地接口设计

箭地接口主要完成供电和信号传输作用, 与传统火箭相比, 由于采用了 1553B 总线作为箭地指令及测控信号传输的途径, 箭地接口需选用成熟的混装型分离电连接器进行电气连接, 该连接器包含了 2 个双同轴端子和多组低频端子, 双同轴端子用于传输 1553B 总线信号, 低频端子用于传输地面供电。

采用 1553B 总线后, 箭上测控信号传输线缆的复杂度和电连接器接点数量实现了最大程度地简化, 箭地接口电连接器的点数从方案设计的 512 点减少到 182 点, 有利于火箭减重。

### 2.3 测控协议设计

供电测控协议为 PXI 与配电器、配电控制组合之间的 1553B 总线协议。供电测控系统组成见图 1, 供电系统通过 1553B 总线实现各设备的拓扑连接。PXI 为 1553B 总线控制器 BC, 配电器、配电控制组合作为总线远程终端 RT, 供电系统可包含两台 PXI 设备和 3 台供电设备, 不同的供电设备分配不同的 RT 地址。

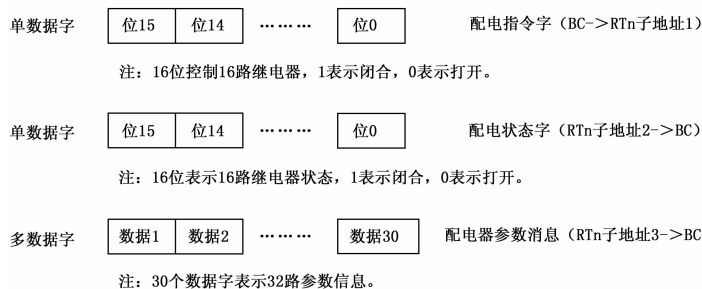


图 3 供电测控指令协议组成图

PXI 通过 1553B 总线向配电器、配电控制组合发送供电指令, 供电指令组成见图 3, 对于地址为 N 的 RT, 供电指令为 BC—>RTN 子地址 1 的消息, 该消息携带 1 个数据字, 数据字的 16 位分别控制该设备内部的 16 路供电输出继

电器, 1—闭合继电器, 0—打开继电器。PXI (BC) 发送配电指令时, 同一指令采取连续重发 7 次的方式, RT 对接收到的 7 条指令进行判断, 若相同指令数量大于 4 次, 则认为该指令有效并执行; 若少于 4 次, 认为该指令为无效指令, 向 BC 返回“指令错误”消息。

RT 将子地址 2 内的首个数据字作为供配电状态字, 在执行完供电指令后, 供配电状态字相应的位表征当前的供配电状态, 并返回给 BC。

单机设备内部的参数检测模块检测电路的工作参数, 并将参数数据通过 1553B 总线发送到 PXI。多 RT 的 1553B 总线系统, 为保证多个设备的时间同步, PXI 通过发送同步命令实现各设备的工作同步, 同步命令为 BC—>RTS 的广播消息, 该消息为时间同步方式消息。RT 在接收到该消息后, 启动一个周期的数据采集, 获取参数数据。RT 将采集的参数数据放置在子地址 3 起始的数据区中, 供 BC 读取。每个 RT 子地址内最多可包含 32 字数据, 如果每条参数信息占用 1 个字, 1 条消息可传输 32 个参数信息。如果 RT 设备测量参数大于 32 路, 参数数据可依次放置在子地址 4、子地址 5 等顺序子地址内。PXI 在供配电设备完成一个周期的数据采集后, 通过 RTN—>BC 消息获取 RTN 的参数数据。

### 2.4 PXI 冗余备份设计

PXI 作为 1553B 总线的 BC, 同时完成地面供配电设备的参数测量, 在特殊环境下需要承受十分苛刻的环境条件, 为了确保工作可靠性, 采用两台相同的 PXI 构成对等的主从式双机热备冗余测控系统<sup>[2]</sup>, 能够适应长时间工作时间的要求。双 PXI 热备冗余结构见图 4, 主从 PXI 之间通过冗余的以太网接口进行数据交互。

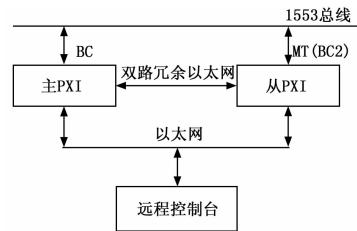


图 4 双 PXI 热备冗余测控体系结构图

系统工作起始, 先开机者作为主 PXI 承担 1553B 总线的 BC 功能, 完成供电控制任务, 同时接收供电检测信息, 重新编帧后向从 PXI 及远程控制台进行转发。当主 PXI 正常运行时, 从 PXI 启动时, 主 PXI 将实时数据及其本机监测信息发送到从 PXI, 完成实时数据的热备份, 然后主从 PXI 同步, 暂停主 PXI 数据向从 PXI 的记录工作, 从 PXI 将缺失的主 PXI 的历史记录文件通过网络拷贝到本地, 完成历史数据的热备份。历史数据文件备份完成后, 主从 PXI 转入正常工作状态。

正常工作时, 主 PXI 承担总线 BC 和地面供配电设备测试任务, 从 PXI 处于待机状态, 负荷较小。主 PXI 通过 1553B 板卡与 1553B 总线进行数据交换, 将采集到的历史数据记录在本机存储器中, 并产生报警和事件信息。从 PXI 监听总线上的数据传输情况, 同时通过以太网从主 PXI 获取实时数据和报警信息, 存储到本地存储器中, 而不产生自身报警信息。主 PXI 与从 PXI 每隔一段时间对本机工作状态进行循

环检测,并通过同步数据路径向对方发送状态良好性信息,同时接收来自对方的状态信息,若从 PXI 发送一段检测信号后,主 PXI 在一定时间内未应答,则视为主 PXI 出现故障,此时从 PXI 立即启用备份数据,切断与主 PXI 的网络数据传输,并接替主 PXI 的工作,成为新主 PXI。主从切换时,主 PXI 被屏蔽。此后,新主 PXI 还会定时监听故障机状态,一旦故障机恢复就进入热备状态,通过这种方式再次实现热备份。

### 3 试验结果与分析

使用负载等效器模拟箭上负载工作状态,对供电测控系统进行供电等效联调试验,试验内容包括:

- 1) 电源单机功能自检;
- 2) 电缆网短接和绝缘检查;
- 3) 网络功能检查;
- 4) 供配电总线功能自检;
- 5) 总线供电测控等效检查;
- 6) 手动及应急供电测控检查。

试验结果表明:

- 1) 基于总线的供电测控系统很好的实现了按照区域、功能进行分路供电控制功能;
- 2) 箭上单机由内部采集电路完成自身信号检查,数字信号的传输方式获得了更全面的状态监测信息,为自动化检测提供了数据基础;
- 3) 冗余备份设计极大提高了系统的平均无故障工作时

间,提供了供电测控系统长时间工作的可靠性;

(上接第 20 页)

### 4 传输层及应用层的实现

采集器采用 RS-485 接口读取单片机所采集的传感器数据,通过 LAN、WiFi、GPRS 等方式连入 Internet 并基于 TCP/IP 协议把数据传输并保存至云计算中心服务器中。在应用层面上实现对监测数据实时显示,显示大气温湿度,风向,风速,太阳辐射度,土壤的水分含量及温度。应用软件对监测数据进行处理,计算是否处在设定的报警条件区间内。通过客户端软件方便快捷的查看数据及设置报警参数等功能。应用层软件实现了数据实时查看、历史数据查询、报警信息的设置及显示。软件采用了 eclipse 平台使用 java 语言完成软件系统,用户在客户端登陆系统,输入用户名和密码。进入该环境监测系统设定报警参数,通过界面查看超出设定值的环境参数。通过查看历史记录,查看各参数的历史信息。

### 5 系统测试结果及分析

通过长期实际测试使用,以单片机为控制核心的数据采集系统对各类农业参数传感器的数据检测准确可靠,与数据采集器的通信稳定。具有低功耗,低成本,抗干扰能力强,工作稳定的特点,实现了感知层的数据检测与转换。通过多种通信方式能够及时有效的完成数据的传输,整个在线环境监测系统工作稳定,实现了在线农业环境监测系统中的监测数据实时显示、历史数据查看、报警信息查看及报警参数设置等功能。

### 6 结束语

本文所提出的在线环境监测站的设计方案,采用单片机作为感知层信息的采集转换控制核心,实现了数据可靠采集及转换。充分应用了物联网技术,实现了农业环境监测数据的采集、

间,提供了供电测控系统长时间工作的可靠性;

4) 成功建立了统一的测控接口和测控协议,为供电测控系统后续扩展提供可能,基于总线的供电测控系统较好的满足了新一代运载火箭对供电测控的需求。

### 4 结束语

基于 1553B 总线的供电测控系统通过采用供配电单机智能化设计、供电测控总线协议设计、箭地接口设计和 PXI 热备冗余设计,满足了总体对测量系统长时间高可靠性工作的要求,简化了箭地接口关系,大大减少了箭地测控电缆的重量,实现了对多路负载的分路供电,同时大大提高了系统的测试覆盖率,可靠性高,扩展性能良好。

目前该供配电测控系统已经在新一代运载火箭各项大型地面试验中发挥了重要作用,在其它型号研制中得到了推广,成为新型运载火箭测量系统供电测控子系统设计参考模型。

#### 参考文献:

[1] 王清利. 新型运载火箭遥测供配电系统设计与实现途径 [J]. 导弹与航天运载技术, 2000, (4): 5-12.

[2] 陈志红, 祝伟, 兰波, 等. 基于状态同步索引的 PXI 双机热备冗余技术 [A]. 第十九届测试与故障诊断技术研讨会 [C]. 张家界, 2010 (5).

[3] 周远林, 吴忠, 丑武胜. 基于 BU-61580 的 1553B 总线接口设计 [J] 计算机工程与应用, 2008 (35): 65-68.

显示、历史数据的分析、报警信息显示及设置,为传统农业向现代农业的转变提供了可行的低成本、高可靠的设计方案。

#### 参考文献:

[1] 孟雷, 张虎. 基于 DSP 的嵌入式农业环境远程监测系统设计 [J]. 安徽农业科学, 2010, 35: 20409-20410.

[2] 刘锦, 张岩, 张荣辉. 基于物联网架构的温室环境监测系统 [J]. 河北农业大学学报, 2013 (3): 115-119.

[3] 华驰, 姜彬, 王辉. 一种可联网的在线农业环境监测系统的设计与实现 [J]. 江苏农业科学, 2014, 04: 345-349.

[4] 付兵. 物联网精准农业系统在瓜果种植中的应用 [J]. 科技通报, 2014 (1): 106-109.

[5] 马国俊. 物联网在农牧业发展中的应用研究 [J]. 中国农机化学报, 2013 (1): 245-248.

[6] 张凌云, 薛飞. 物联网技术在农业中的应用 [J]. 广东农业科学, 2011, 16: 146-149.

[7] 郭秀明, 周国民, 丘耘, 等. 一种适宜于农业监测和控制的 WSN 应用框架 [J]. 农业化研究, 2014, 11: 199-203.

[8] 华驰, 韦康, 王辉, 等. 基于物联网的太阳能光伏组件监控系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2696-2700.

[9] 常超, 鲜晓东, 胡颖. 基于 WSN 的精准农业远程环境监测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2011, 16: 879-883.

[10] 陈克涛, 张海辉, 张永猛, 等. 基于 CC2530 的无线传感器网络网关节点的设计 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014 (5): 183-188.

[11] 阙杰, 张瑞端, 陈立平, 等. 基于 BP 神经网络的传感器网络动态采样模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (7): 2485-2487.

[12] 韩慧. 基于 RS-485 总线的温室环境监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2012 (3): 60-61.