

运载火箭地面一体化测发控系统的设计

韩亮, 张宏德, 彭越

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 现役运载火箭各分系统的测发控系统各自独立, 存在资源浪费, 兼容性差、信息传递低效等问题; 随着测控技术发展和火箭电气系统需求牵引, 新一代运载火箭地面测试、发射与控制通用化、集成化、智能化等方面提出了更高的要求; 通过梳理一体化设计的功能, 提出一种运载火箭地面测发控系统的体系架构, 整合传统运载火箭控制、测量、总控网等分系统的测发控共性需求, 在统一供配电、有线测控、无线调制解调、数据处理与分析 4 个功能层面进行设计, 包括系统组成、交互关系、重要单机(软件)的设计及其关键技术应用; 该设计在某型号完成了原理性试验和关键技术验证, 结果表明系统通用性强、集成度高、信息架构合理高效, 能够在确保可靠性安全性的情况下, 简化操作、提高效率、降低成本。

关键词: 一体化; 测发控; 软件系统

Design of Integrated Ground Test Launch and Control System of Launch Vehicle

Han Liang, Zhang Hongde, Peng Yue

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The test launch and control system of active launch vehicle is independent, there are some problems such as waste of resources, poor compatibility and low efficiency of information transmission. With the development of test and control technology and the requirement of launch vehicles, the ground test launch and control of new launch vehicles have put forward higher requirements in the aspects of generalization, integration and intelligentization. By analyzing the function of the integrated design, it puts forward a kind of ground test launch and control system architecture, effectively integrates the common requirements of subsystems of traditional launch vehicle. The design is carried out at four functional levels such as unity power supply, cable test and control, wireless mediation, data process and analysis, including the design and key technologies of the system composition, interaction, important equipment and software. In a certain model, the fundamental and key technology test show that the system has strong universality, high level of integration, efficient information architecture, it can simplify operation, improve efficiency and reduce cost while ensuring reliability and safety.

Keywords: integrated; test launch and control system; software system

0 引言

我国传统运载火箭各分系统各自独立, 测发控均使用单独的地面测试设备, 完成箭上系统的供配电、信号激励、状态控制、参数测量等测试、发射控制等功能。各分系统测发控功能重复、系统复杂, 存在资源浪费、兼容性差、信息传递低效等问题^[1-2]。随着测控技术的发展, 集成芯片与计算机系统跨越式进步, 测控设备更加集成化、小型化, 而云计算、故障诊断、自动化测试技术也为信息应用提供了更加先进的技术解决方案。与此同时, 未来新一代中型、重型运载火箭电气系统在通用化^[3]、集成化、智能化^[4]等方面也提出了更高的要求。因此, 结合某背景型号火箭测发控一体化的研制需求, 提出了一种运载火箭地面测发控系统的设计, 包括系统体系结构、关键单机及软件设计, 有效整合各分系统测发控功能, 合理规划数据及信息流向, 不

仅集成度高、通用性强, 也提高了火箭的测试效率。

1 系统结构及原理

地面一体化测发控系统拓扑架构如图 1 所示。系统按照前端、后端远距离测控进行布局, 其构成及原理如下:

1) 前端系统包括供配电设备、前端测控机、遥外测天线、前端光传设备, 完成箭上各系统的配电、测试状态控制、监测;

2) 后端测控设备主要包括交换机、服务器、磁盘阵列、射频送综合检测站、手动应急控制盒等。服务器采用云计算虚拟服务, 人机交互采用瘦客户机方式连接云上的虚拟化系统; 各项业务软件运行在该云平台上, 通过网络对箭上、地面设备进行控制, 完成对火箭箭上电气产品的测试和控制, 并与发射场相关系统配合, 完成火箭的测试和点火发射任务;

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-12-01。

作者简介: 韩亮(1982-), 男, 辽宁锦州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭综合测控、数据应用及计算机软件方向的研究。

引用格式: 韩亮, 张宏德, 彭越. 运载火箭地面一体化测发控系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 5-8, 34.

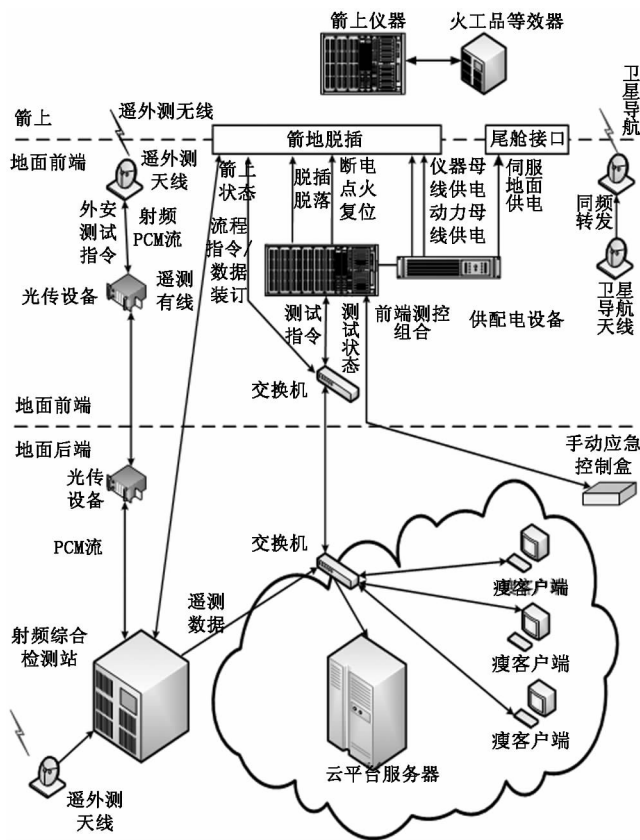


图 1 地面一体化测发控系统拓扑图

3) 箭上通过无线、有线传输将测试结果传输至地面。包括遥测 PCM 流、有线 PCM 流, 通过光传设备传输至射频综合检测站, 完成传统测量系统的遥测检测站、外安检测站等功能;

4) 箭地、地面均采用新型以太网通信, 实现箭地网络链路的融合; 地面在物理结构上分为前后端 2 个子网, 分别以配置光纤通信接口的网络交换机为中心, 在逻辑上形成一个统一的测发控数据通信网络^[5];

5) 手动应急控制盒通过电缆与前端测控机相连, 控制前端信号调理箱内部的继电器阵列, 完成关键时序信号(例如点火等)的手动控制。

2 系统设计方案

2.1 系统功能目标

2.1.1 统一供电

在地面测试阶段对箭上电气系统提供地面供电的功能, 包括箭上加电、转电、断电, 以及电压监测、漏电检查等功能。要求能够整合火箭各分系统电源种类, 兼顾火箭大功率的配电需求, 以集成度高、可靠性高、远程控制为目标, 实现统一配电控制。

2.1.2 有线测试及流程控制

按照火箭测试发射流程完成火箭功能和性能测试, 采集、处理、传输及显示箭上测试信息。能够将状态控制和系统测试集成在一种产品架构中, 实现原多系统独立并行

的测试的统一管理、集中调度与控制, 并能够简化发射操作和流程, 指挥完成火箭的发射任务。

2.1.3 无线调制解调

对遥测、安防、外测、导航等功能进行集成, 整合基带资源形成通用化综合射频测控设备, 完成箭上有线 PCM 流、遥测射频 PCM 流、BD-GNSS 信号接收、调制与处理。

2.1.4 数据处理与应用

通过有线测试、无线测试等途径全面、实时掌握各系统的测试数据, 确保测试数据有效融合、信息高效流转。能够实现火箭测试和发射控制数据的统一处理、诊断、显示、判读等工作, 为指挥员及各系统专业人员提供监视、决策和智能化分析服务。

2.1.5 其他功能

手动应急控制功能: 用于在地面测发控系统后端计算机、软件失效, 前后端网络故障等模式下的情况。手动应急控制指令由前端测控设备传递至箭上相应设备, 实现手动点火、断电。

2.2 统一供电设计

供配电的电源种类包括直流电源和中频电源两类, 由 3~4 个隔离独立的供电电源和调理箱组成: 直流电源 1 为箭上仪器母线供电, 以及给仪器电池、火工电池充电; 直流电源 2 为箭上火工品/电磁阀(动力母线)供电, 并辅助动力加温、电池加温; 中频电源 3 提供给箭上伺服母线供电, 并可给伺服电池充电; 根据前端地面设备自身的供电需求, 可另设单独的电源供电。调理箱通过脱插与箭上设备连接, 与地面电源和前端测控机一起完成地面电源对箭上产品的供电、充电及电池加温工作。

电源采用 $N+1$ 多模块均流供电, 1 个电源模块失效不会影响负载工作, $(1+N)/N$ 的功率容量冗余方式更加高效, 可根据火箭负载情况选择电源架构。另外, 为了满足远程控制需求, 电源具备网络通讯能力, 可向后端发送当前电压、电流等 BIT 信息, 并可接收后端远距离控制, 实现远控调压和开关控制。

上述电源配置模式、供电方式、电源冗余模式设计能够整合火箭各分系统供配电的共性需求, 具有体积小、集成度高、远程控制等优点。

2.3 有线测控功能设计

2.3.1 前端发控设计

逻辑控制与指令电路设计是前端发控系统基本的组成单元, 用于对完成供配电、箭上设备施加控制指令^[6]。具体由前端测控机与继电器电路实现, 进行各种开关控制、逻辑控制及信号采样, 通过以太网接收后端发送的测试发射指令, 共同完成火箭的测试、发射及控制过程。

一体化设计不再区分控制、测量、动力等分系统, 而是按照共性需求进行功能整合, 划分为模拟量采集(电压、电流、开关量)、数字量采集(总线)和开关量输出等种

类,按照信号种类进行集成设计。前端测控机采用 CPCI 总线,集成 CPU、KI、KO、AD、DA、RS422 等多种板卡,具有可靠性高、测试快速准确、操作简便及小型化等优点^[7]。

如图 2 所示,前端测控机在协同供电设备完成接通、断开地面供电、地面充电的同时,还完成箭上电气系统发送点火、复位、封锁、脱插脱落等 IO 指令,以及漏电检测、状态采集等功能。而继电器作为核心控制单元,通过前端测控机内 KO 板控制继电器及调理箱内继电器动作,完成关键控制信号的输出。

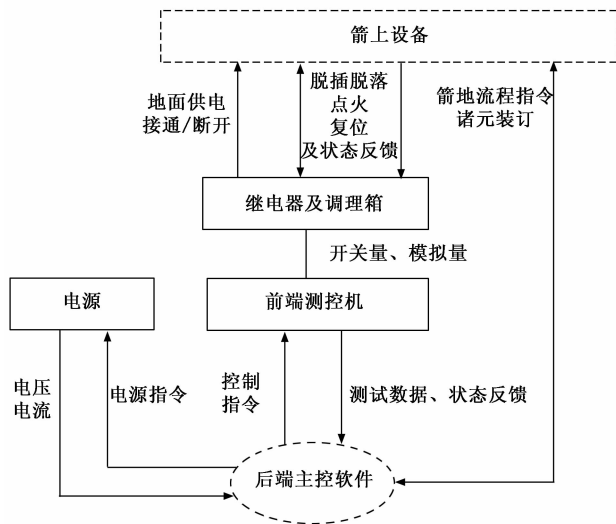


图 2 有线测控信息交互示意图

2.3.2 箭地及地面前后端通信

测发控通信网络未来发展趋势是采用实时以太网、标准以太网和无线网络的多网融合方案,根据网络数据的关键程度、实时性要求进行传输通路选择。因此,箭上、地面通信网络的一体化整合设计至关重要。在箭上仪器设备有以太网接口的前提下,采用标准以太网进行通信,可实现箭地统一网络接口互联,地面前端交换机设备作为地面通信接口,与箭上设备进行数据交换。如图 3 所示,该设计在消除单点故障的同时,能够简化箭地接口,实现箭地网络融合。

由于采用了冗余配置,在软件层面箭地通信采用双通道通信,对于重要的测控指令采用收发应答的三遍重传方式,可以有效地、准确地判断网络消息、滤除重复帧,从而进一步提高以太网通信的可靠性。

2.3.3 后端发控设计

后端有线发控系统主要由各类计算机、软件系统以及手动应急盒组成。其中,后端主控软件是系统流程控制与测试的核心,是所有控制指令的发起端,也是有回令属性指令的闭合端^[8]。实现对传统控制、测量、动力分系统地面后端统一与自动测发控,具体包括:向前端电源、前端测控机发送测控指令、接收并监测前端状态量、模拟量测

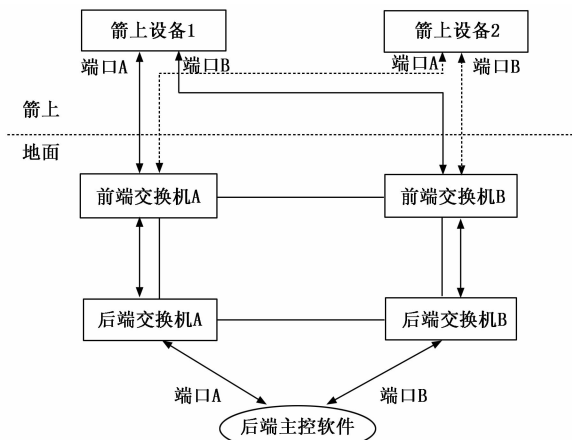


图 3 冗余网络模式箭地、地面前后端通信拓扑示意图

试数据;与箭上设备进行控制信息交互、上传诸元及程序文件;将测试流程信息转发给其他软件,并接收测发控流程所需的部分遥测参数及诊断辅助信息。

后端主控软件的核心功能是软件组态化技术、自动流程技术,其中:

1) 组态技术并不限于人机界面的定制和自动生成,还包括软件插件配置、测控参数配置、协议配置、流程配置等方面设计。组态技术可以满足用户灵活定制的需求,软件能够适应测发控领域各种任务需求,提高系统的适应性、兼容性和扩展性。

2) 自动流程技术支持主控软件对全部测试流程步骤、流程集的事先配置与录入,操作人员在测试过程中可以通过界面灵活的选择、重组各项测试步骤及进程,并能“一键”、“并发”执行多个测试流程,关键节点可手动干预。上述能力不仅提高了软件本身的重用性和适应性,也是整个测发控系统简化人员操作、提高火箭自动化测试水平的关键所在。

2.4 无线调制解调设计

传统的外测、地基测试设备,均为针对箭上单机分别设计,设备数量多,占用体积大,使用操作也不便利。在立足于现有的遥测、外测和安全测试的功能、性能指标的基础上,射频综合检测站采用综合化设计,以实现外测和遥测的无线系统测试功能为主,同时具备安控的测试能力。

射频综合检测站部署在一台测控机柜内,主要包含 3 个关键组合:遥测地检组合,多模导航外测组合,外安检测组合。每个组合单机模块设计为板卡形式,其功能完全独立,方便功能的组合、扩展和维修。各模块插入标准的机箱,模块之间通过标准的协议进行数据交换,并在软件的管理下实现整个系统的功能。主要设计如下:

1) 遥测地检组合完成箭上遥测信号的接收、解调和存储等功能。组合由系统板卡、中频基带板卡、上变频器板卡及下变频器板卡等构成;

2) 外安检测组合模拟脉冲应答机上行信号,接收并测

试脉冲应答机转发的下行信号,实现对脉冲应答机的自动化单元和系统测试,并集成外测射频光传输功能;

3) 多模导航外测组合主要由接收天线、遥测接收解调机、GNSS/BD 接收机、外测处理终端组成。实时接收地面基准接收机提供的 GNSS 和 BD 数据,处理数据后解算出差分修正值,实现对目标的差分定位。

2.5 数据处理与应用设计

2.5.1 云平台设计

传统后端测试设备需要多台服务器、指挥工作站、浏览微机组成。造成极大的硬件资源浪费,采用虚拟云平台的方案可以做到按需分配,有效避免浪费。配套组成包括服务器、磁盘阵列、若干瘦客户机、虚拟化基础架构软件及管理软件。

云平台为适用于现代运载火箭远距离测试和发射控制模式,系统构建在高速传输前端与后端网络上,将后端服务器、工作站等计算机运算资源一体化设计,实现各系统远距离测试发射控制需求^[9]。一方面,在资源层面利用虚拟化技术和调度算法,提供计算、网络、存储资源的弹性,提供负载均衡、故障重启以及对平台软件硬件资源的健康状态监控等基础设施服务;另一方面云平台将应用软件封装成容器,可完成应用软件的自动部署、回滚、更新和维护。

2.5.2 软件系统设计

在云平台基础上,地面测发控软件系统完成火箭测试数据的融合、处理、存储、发布及应用功能。传统运载火箭各分系统的软件功能重复、接口复杂,而且测试数据、状态信息分散在各分系统内部,给数据融合和共享带来很大难度。因此,如图 4 所示,软件设计从系统的控制流、遥测数据、地测数据 3 方面信息开始,按照任务需求和信息变化对软件功能进行划分和归类,形成发控类软件、数据处理类软件、实时诊断与浏览类软件、事后判读类、存储类软件等配置项,同时设置高效的数据流转中心,控制信息转发的目标、参数、频率及解耦消息的发送方和接收方,确保信息流高效、及时、可靠传递。关键配置项设计包括:

1) 数据综合处理软件:接收射频综合检测站的遥测原码数据,基于预先配置的遥测帧格式解析遥测帧,提取各类参数原码,基于参数处理公式进行计算解析,得出各参数的物理量结果并发送至网络,供其他软件存储、浏览、分析应用。软件能够将不同的处理方法封装为插件,增强其扩展性。

2) 通信与存储服务软件:作为整个软件系统的数据流转中心,通过以太网实时接收全箭的遥测数据、地测数据、控制指令、诊断信息等,并将全箭数据录入关系数据库(或文件系统)存储;另外,软件通过频率控制及参数挑选,控制转发其他软件所需要的测试数据。

3) 健康监测软件:对测试发射过程中各系统产生的数

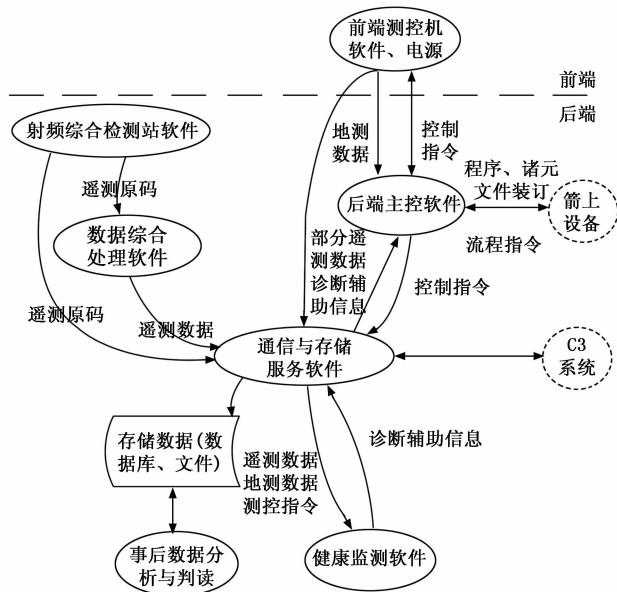


图 4 地面软件系统架构及信息流

据(包括箭上和地面的流程信息、控制指令、状态信息、图像信息、语音信息、模拟量等)进行实时监测和健康监测。一方面健康监测软件能够以 B/S 模式支持数据的发布与多用户的在线浏览,提供可视化的人机交互界面,以表格、曲线、图形等多种形式实时显示火箭测试状态及分析结果。另一方面,作为故障诊断技术的主要载体,采用基于知识库、模型、自学习等多种诊断方法的融合方案是实现运载火箭故障诊断的重要途径^[10],软件能够对异常参数进行故障诊断和分析定位,并完成推理判断,为测发控指挥人员提供有效的辅助流程决策信息^[11],从而提高系统的测试效率和智能化水平。

4) 事后数据判读与分析软件:软件支持全箭测试数据判读全过程,基于网络实现测试数据的查询、浏览、分析、判读、报告生成等功能,完成对各类试验数据的管理、判读与分析。软件支持人工判读和自动判读两种模式,自动判读技术是整个测发控系统便捷、智能的重要体现,其技术核心是判据描述语言设计。软件通过预先设置好的判据,实现各类参数的自动判读与专业报告生成,将设计人员从繁重的数据判读、故障分析和排查以及产品维护中解脱出来,减少或避免漏判及误判,提高判读效率。

3 结束语

文章提出的运载火箭地面测发控系统对硬件、软件、信息进行了一体化设计,已经应用在背景型号的研制中,完成了原理性试验和关键技术验证,该体系架构、设备及软件系统的设计具有通用强、集成度高、信息传递高效等优点,设备台套数压缩超过 50%,通用化率超过 80%,操作岗位压缩比例超过 50%,满足未来电气系统一体化测发控的任务需求。后续可在如何满足大型液体火箭低温动力测

(下转第 34 页)