

# 运载火箭测发控技术未来发展与展望

任月慧, 张宏德, 彭越, 徐利杰, 刘洋, 马小龙

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 工业电子、测试、测控、仪表、大数据、云平台等技术的发展, 为运载火箭测发控技术的发展提供了先进的技术途径; 运载火箭箭上电气系统一体化设计, 火箭快速测发、健康管理、子级独立测试、异地远程测试发射支持等需求, 给测发控系统研制及更新换代提出更高的要求; 通过对运载火箭地面测控系统供电、有线测控、无线测控、数传通信、测发控软件 5 个组成部分的演变及发展方向进行了论证分析, 并提出了后续测发控系统技术发展的规划路线; 同时结合未来运载火箭的发展需求和目前测发控系统现状提出了测发控系统后续发展的可实施途径; 最后提出顶层规范技术路径; 从型号牵引转变为装备化研制; 规范型谱产品研制、箭上地面同步发展的测发控系统设计新思路; 为未来运载火箭测发控系统研制提供方向。

**关键词:** 测发控系统; 发展

## Optimization for Commanding Mode of Unified Test and Launch Control

Ren Yuehui, Zhang Hongde, Peng Yue, Xu Lijie, Liu Yang, Ma Xiaolong

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

**Abstract:** With the development of industrial electronics, testing, measurement and control, instrumentation, big data, cloud platform and other technologies, it provides an advanced technical way for the development of launch vehicle test and launch control technology; the integrated design of launch vehicle electrical system, the requirements of rapid launch test, health management, sub level independent test, remote test launch support and so on, provide a reference for the development and upgrading of launch vehicle test and launch control system Higher requirements. This paper demonstrates and analyzes the evolution and development direction of the five components of the launch vehicle ground measurement and control system, including power supply and distribution, wired measurement and control, wireless measurement and control, data communication and measurement launch control software, and puts forward the planning route of the follow-up measurement launch control system technology development. At the same time, combined with the development needs of future launch vehicles and the current situation of the test launch control system, the feasible way of the follow-up development of the test launch control system is proposed. Finally, a new design idea of launch control system is put forward, which includes top-level standard technology path, transformation from model traction to equipment development, standard spectrum product development and synchronous development on the ground. It provides a direction for the development of launch test and control system of launch vehicle in the future.

**Keywords:** test and launch control system; development

## 0 引言

地面测发控系统是火箭各系统测试、发射前控制, 并实施发射的地面设备全称。地面测发控系统一般由供电设备、电气测控设备、动力测控设备、发控设备、信号采集传输设备、网络设备、计算机、应用软件等组成, 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, 为推进提升运载火箭测试发射能力, 本文对运载火箭地面测控系统的基本架构及发展方向进行了论证分析, 提出了后续技术发展规划路线, 并结合目前技术发展现状提出了可实施途径。

## 1 运载火箭测发控系统组成及演进概述

### 1.1 系统组成

地面测发控系统按照功能需求可以划分为 5 个部分,

分别为地面供电、有线测控、无线测控、数传通信及测发控软件<sup>[1-4]</sup>。

1) 地面供电功能: 主要负责在测试发射流程中接收加电、断电指令, 为箭上电气系统、动力系统负载以及前端地面测发控设备提供能源。技术要素主要包括供电方式、电源配置模式、电源冗余方式等, 具体是由直流电源和中频电源等组成。

2) 有线测控功能: 按照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数据、关键状态等信息, 并且要完成火箭点火时序输出、发射流程逻辑控制等。技术要素主要包括测控设备标准、测控模式、配电控制等, 具体是由电气测试发控设备、动力测发控设备、点火控制装置、应急控制装置、测控计算机、浏览计算机、

收稿日期:2021-02-19; 修回日期:2021-05-05。

作者简介:任月慧(1978-),女,硕士,高级工程师,主要从事运载火箭电气系统总体设计方向的研究。

引用格式:任月慧,张宏德,彭越,等.运载火箭测发控技术未来发展与展望[J].计算机测量与控制,2021,29(6):1-4,24.

各类等效器等组成。

3) 无线测控功能: 主要负责射频遥测信号的接收、解调、译码, 完成外测信号的发射及接收, 完成安全控制指令的发射, 同时装订试验码和战斗码。主要是由前端遥测、外测、天基检测站、光电转换设备等组成。

4) 数传通信功能: 主要实现前后端远距离网络/应急通信以及与发射场的数据传输, 处理、显示测试数据及状态信息, 采用高速以太网通讯、无线通信技术等。技术要素主要包括前后端网络通信等, 具体是由前后端网络交换机、数据转换及处理计算机等组成。

5) 测发控软件功能: 主要实现对运载火箭测试发射流程的控制、系统状态的监测和测试数据的处理, 提供各种测试状态下测试数据的自动判读和历史数据的分析比对服务。技术要素主要包括软件使用模式、健康管理功能、硬件平台等, 具体是由测控软件、健康监测软件、数据处理软件等组成。

## 1.2 系统演进

地面测发控系统方案的演进主要源自以下因素<sup>[5-8]</sup>:

1) 技术发展驱动: 工业电子、测试、测控、仪表等技术的发展为地面测发控系统的升级换代提供了更加高效率的解决方案。例如, 随着高速总线、BIT 自检测技术等数字技术取得了飞速发展, 尤其是集成芯片、计算机及其相关技术的跨越式进步, 为地面测试发控设备的小型化、集成化、数字化研制提供了技术保证; 无线通信技术的不断发展, 逐渐成为了有线通信的补充手段; 此外, 还有诸如大数据、云平台等技术发展, 也为火箭的信息应用提供了更加先进的技术途径。

2) 箭上电气方案驱动: 运载火箭地面测发控系统主要为配合箭上电气系统, 完成各阶段对箭上电气系统的测试工作。因此, 箭上电气系统方案对地面测发控系统设计有很大影响, 例如, 传统型号箭上按照分系统划分独立设计, 所以传统地面测发控系统针对箭上每个分系统都有对应的独立地面测试设备, 各分系统独立测试。而新研型号, 箭上采用电气一体化设计及自检测, 因此地面测发控系统也相应简化并采用一体化设计方案。

3) 功能需求驱动: 火箭型号研制对地面测发控提出了更多的功能需求, 例如使用一套地面设备, 即可满足多型火箭测发控需求, 提高地面设备通用化程度; 针对未来火箭高可靠、智能化、快速测发及无人值守、国产化自主可控、重复使用等应用特点, 地面测发控系统需要满足快速测试模式、自动化测试、健康管理、子级独立测试、异地远程测试发射支持等功能需求。

## 1.3 国内测发控系统发展

我国运载火箭地面测发控系统按照应用模式和技术特征, 演变如下:

1) 最早测发控系统地面设备就近布置在火箭发射工位附近, 各系统分别配置地面测发控设备, 箭地之间、设备之间通过点到点的模拟量电缆互联, 操作依赖人工, 设备

种类多, 规模庞大, 自动化程度低, 岗位人员数量多, 目前基本已经退役;

2) 随着以太网技术成熟发展, 测发控系统由近控实现了远控模式, 地面设备分成前后端部署, 中间通过光纤连接, 自动化测试和判读水平大幅度提升。但由于各系统仍就分开独立研制配套, 导致系统的设备复杂、规模庞大, 参与岗位人员多, 使用维护成本高, 数据判读、射前监测仍要人工确认, 设备定制化程度高。目前在现役型号中广泛应用;

3) 根据资源整合, 简化地面设备规模, 提升信息应用效率的需求, 经过论证提出了设备集成化、测试流程一体化、信息一体化的测发控系统。采用模块化、组合化、可配置技术, 支持积木式组合和箭地接口适配更换以满足不同型号地面测发控需求。目前该模式测发控系统正开展研制, 也是后续现役型号地面测发控系统更新改造的方向;

4) 未来的测发控系统, 由于无线供电与无线通信技术的发展, 箭地间将取消传统电缆连接实现无线测试发射, 同时需要通过灵活的设备组合和软件配置, 实现一套地面测发控设备同时适应子级独立出厂测试和全箭集成测试的需求; 此外, 增加发射场—总装厂—设计中心的异地远程发射支持功能, 进一步减少现场工作人员, 该模式测发控系统已经完成箭地无线供电、激光无线通信、多网融合等主要关键技术验证。

## 1.4 国外测发控系统发展

通过对美国 SLS、AresI、Falcon9、欧洲 Vega、日本 Epsilon 等国际主流运载火箭地面测试发射技术调研, 可以看出: 国外运载火箭地面测发控系统基本架构与我国基本一致, 也可分为地面供配电、有线测控、无线测控、数传通信及测发控软件等组成。普遍采用后端计算机+服务器, 前端采用供电+测控设备, 前后端采用网络连接的系统架构。从功能上一般分为指挥控制、应急控制和健康管理(故障诊断), 从地域上一般分为现场发射控制和远程技术支持<sup>[9-12]</sup>。

具体技术特征如下:

1) 供配电方面, 国外地面测发控系统对箭上供电采用统一供配电模式, 采用有线供电方式;

2) 有线测控方面, PLC 测控设备采用专用工业总线连接;

3) 无线测控方面, 采用多组无线测控设备对应箭上不同无线设备;

4) 数传通信方面, 国外火箭箭地接口相对简化, 主要由地面供电、数字通信及应急控制组成。地面前后端通信以太网为主, 并部分采用实时地面网络。国外均具备远程技术支持能力, 能够充分利用人力资源远程在线提供故障定位、指挥决策支持;

5) 测发控软件方面, 各国发射控制系统均具有完整的故障诊断系统, 对测试及发射过程中进行实时监控, 发生故障时能够及时自动终止发射流程;

6) 国外已经普遍采用自动化测试与发射技术,从而缩短发射测试准备周期;

7) 国外运载火箭已经基本实现射前流程的自动化和前端无人值守操作,确保了发射区操作安全性。

## 2 测发控系统发展规划及实施途径

### 2.1 设计理念

1) 坚持测发控系统设备通用化、标准化的统筹发展思路:硬件产品选用型谱化产品、货架式产品,并制定标准化接口;软件产品采用统一平台架构,通过不同配置项组合满足不同测试发射流程的需求;

2) 以技术为本,摒弃传统分工模式束缚:成立专项研制团队,基于产品化思路开展地面测发控系统的统型研制,实现地面测发控系统从型号牵引向产品化、装备化研制模式的转变;统一地面测发控系统的顶层架构,形成地面测发控系列标准规范及货架产品型谱;

3) 立足当前,目标长远,分步实施,逐步实现升级换代:现有的测发控系统升级改造采用设备和软件资源整合,提升产品的通用化程度,简化地面设备规模,提升信息应用效率,实现设备集成化、测试流程一体化、信息一体化。同时,采用模块化、组合化、可配置技术,支持积木式组合和箭地接口适配更换以满足不同型号地面测发控需求。未来增加子级独立测试,通过灵活的设备组合和软件配置,逐步实现一套地面测发控设备同时适应子级独立出厂测试和全箭集成测试的需求,并增加了发射场—总装厂—设计中心的异地远程发射支持功能<sup>[13-18]</sup>。

### 2.2 设计原则

#### 2.2.1 通用性原则

采用通用化思想,设计、建设地面测发控系统平台,按照“大量通用设备+少量专用设备+接口适配器”的使用模式可适应多型火箭的测试发射要求。硬件产品选用型谱化产品、货架式产品,制定标准化接口;软件产品采用统一平台架构,通过不同配置项组合满足不同测试流程的需求。

#### 2.2.2 可靠性原则

从系统整体可靠性出发,加强系统的软硬件可靠性设计。与最低发射条件相关的设备均采用冗余设计,确保发射时不存在单点故障模式。

#### 2.2.3 集成化原则

测发控系统设备在保证可靠性、通用性和可维护性的前提下,进一步采取小型化、集成化设计,以减小设备规模,方便设备移动和部署,提高系统恢复效率。

#### 2.2.4 智能化原则

地面设备逐步实现自测试、自诊断的能力,可智能判别自身健康状况,可实现自主故障切换,减少操作岗位和实现射前无人值守。对测发数据进行集中管理、综合应用,具备智能自动判读分析等能力,采用一体化测发流程,提升测发智能化程度和操作便捷度,减少监测和指挥人员。

#### 2.2.5 自主可控原则

在满足使用要求的前提下,元器件应选用技术成熟、

质量稳定、能够持续供应、有使用经验的主流元器件,控制进口元器件的选用,确保满足自主可控相关要求。

### 2.2.6 经济性原则

要充分考虑全寿命周期内的经济性,贯彻全寿命内效费比最优原则,利用先进技术、综合集成技术等开展总体优化设计,推进工业货架成熟产品的选用,优化配套数量和使用模式,在保证使用性能和可靠性的基础上,尽可能降低成本。

### 2.3 发展方向

根据地面测发控系统的架构组成,对地面供配电、有线测控、无线测控、数传通信、测发控软件5个功能的技术发展路线进行阐述。

#### 2.3.1 地面供配电发展方向

当前结合应用现状和发展趋势,针对负载特性稳定的地面直流稳压电源采用 $N+1$ 冗余技术,针对存在负载特性突变的采用 $1+1$ 电源冗余技术。中频电源采用控制+变频器模块实现对箭上中频电机的控制,通过切换软件实现不同型号的通用化。固态功率控制器(SSPC, solid state power controller)是配电技术的发展方向。随着未来火箭的箭体规模、用电设备功率的不断增大,有线供电技术将导致供电电缆重量过大,直接影响运载火箭运载能力。因此采用无线供电技术是实现未来运载火箭电气系统无缆化、无人值守的关键支撑技术之一。

#### 2.3.2 有线测控发展方向

有线测控集成设计能够减少部分设备种类,降低维护成本,可以有效简化测发控流程设计难度,提高测发控流程运行效率,压缩流程周期。当前提出的测控集成方案符合未来技术发展的方向,选用的工业系统总线最具代表性的是当前得到大量应用的PLC、PXI、CPCI等,目前在工业领域应用均非常成熟,采用PXI、CPCI等嵌入式开源计算机,并没有本质差异。未来运载火箭在设备小型化、环境适应性、电磁兼容性、可维修性等方面提出了新的测控要求,此外未来运载火箭VPX将作为箭上综合电子设备的标准。因此地面采用VPX标准可以和箭上共享成熟技术和标准化模块产品,可有效降低开发难度和设计成本。VPX总线继承了原VME标准中机械结构及导冷抗震方面的优势,在体积、集成度、电磁屏蔽、兼容性、互换性、维修性等方面有较大的优势,是一种新型的背板交换技术,不仅能够有效解决高速率数字信号的传输,而且该标准还能够有效解决振动、冲击以及电磁辐射等对电气产品可靠性造成影响的问题,能够很好的适应分布式测控对象的工作环境。

#### 2.3.3 无线测控发展方向

射频综合技术已成为降低机载、舰载等受限平台中信息系统体积、重量、成本,提高信息系统电磁兼容性、可靠性的主要发展方向。目前已经在飞机等空间受限平台得到广泛应用。后续也将用在火箭无线测控设备研发上。通过将火箭原有的遥测、安控、外测、导航和天基中继等功

能进行高度集成,将各自独立的基带资源进行整合,形成通用化综合射频测控设备,大幅度减少设备重量、体积和功耗,压缩操作岗位人员数量,提升系统效率。同时利用一套通用化的硬件系统,通过不同的软件配置满足多个型号测试需求。

#### 2.3.4 数传通信发展方向

我国现役火箭地面数据网络通信逐步形成了以前、后端网络交换机为核心,前后端大部分设备通过以太网接入的数据传输架构。未来的地面测发控系统须将发射场地面测控网络与异地远程发射支持网络一体化整合,实现发射场—设计中心—总装厂的多地协同测试发射,完成异地远程发射支持。根据火箭测试发射实时性要求,地面测发控网络系统未来发展的趋势是采用多网融合网络架构,通过采用实时以太网、标准以太网和无线网络的多网融合设计方案。此外,还将采用无线终端设备,部署灵活方便,避免因走线不方便而不能部署的问题;方便设备部署撤收,缩短设备恢复时间,有利于缩短任务周期。

#### 2.3.5 测发控软件发展方向

当前运载火箭各系统分别采用各自独立的地面测发控软件,部署在独立的服务器或工作站上,无法有效地共享运算资源。未来测发控软件采用统一平台构建,通过整合不同系统的测发控需求,实现了集传统多个分系统的指挥控制、显示、判读、分析等功能,并且通过软件配置及界面选择,可适用于多型号的测发控系统软件平台。通过应用测试数据自动判读技术,可在短时间内由计算机根据大量的测试数据信息自动判别出火箭各项测试参数及运行状态是否正常,可有效减少人为差错,提高测试效率。随着技术发展,利用科学方法建立对运载火箭测试数据自动判读、故障自动诊断、健康状态自动监测和管理的手段,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,提高测试、发射和产品维护效率,已经成为技术发展的必然趋势。随着计算智能的发展,基于数据驱动的故障诊断成为热门的研究领域<sup>[19-22]</sup>。

#### 2.4 实施途径

基于地面测发控系统的发展规划,坚持技术更新换代发展理念,对于近、中、远期工作分别提出了实施方案建议。

1) 近期:开展现役运载火箭地面测发控系统改造,研制可用于多型火箭的统型测发控系统,基于该系统架构,实现总装或靶场一套地面设备完成多个型号的测试或发射。在原系统基础上完成测发控设备集成化、测试流程一体化、信息一体化整合工作。采用模块化、组合化、可配置技术,支持积木式组合和箭地接口适配更换以满足不同型号地面测发控需求,目前该模式测发控系统正开展研制。

2) 中期:结合箭上一体化设计思路,地面供配电采用多台电源并联冗余模式;有线测控采用通用 CPCI+SSPC 模式;无线测控采用一体化遥外测检测站;数传通信采用箭地一体化网络设计思路,采用以太网作为箭地通信方式并逐步向实时以太网过渡;测发控软件部署于地面虚拟化

云平台上,采用一体化测发控软件+健康监测软件,具备健康监测功能,可实现自动流程。目前该模式测发控系统正开展研制。

3) 远期:未来地面测发控系统需要增加子级独立测试能力,需要通过灵活的设备组合和软件配置,实现一套地面测发控设备同时适应子级独立出厂测试和全箭集成测试的需求;由于无线供电与无线通信技术的发展,箭地间将取消传统电缆连接实现无线测试发射;采用以测控设备小型化、分散集成在配气台等测控对象的分布式网络测控体制,取代传统集中式测控体制;此外,前后端通信将采用有线以太网与无线物联网相结合的多网融合方式。目前已经完成方案论证和主要关键技术攻关工作<sup>[23-25]</sup>。

### 3 系统研制思路

#### 3.1 顶层规范技术路径,统一后续研制方向

加快研制进度,首先形成地面测发控系统统一化要求,指导系统、单机相关产品研制。加快统型地面测发控系统研制进度,与在役型号需求匹配。

#### 3.2 转变研制模式,实现从型号牵引向装备化研制的转变

按照装备化思路开展地面测发控系统的研制,后端设备进行统一配置,前端按照发射/测试工位进行配置,同一发射/总装测试工位采用一套地面测发控系统即可满足不同型号的测试发射需求。成立专项研制团队,基于产品化思路开展地面测发控系统的统型研制,实现地面测发控系统从型号牵引向产品化、装备化研制模式的转变。

#### 3.3 箭上地面同步发展,规范型谱产品研制

地面测发控系统与箭上电气系统的发展同步规划,统一后续型号箭上电气系统与地面测发控系统的顶层架构,形成电气系统(箭上和地面)系列标准规范及货架产品型谱,支撑后续各型号研制过程中的产品选用。

### 4 结束语

本文从国内外火箭地面测发控系统的发展现状分析、未来研制需求出发,总结了地面测发控系统的顶层架构和演进路线,最后对后续发展实施途径和步骤进行了初步规划,提出了顶层规范技术路径,统一后续研制方向;转变研制模式,实现从型号牵引向装备化研制的转变;规范型谱产品研制的未来研制思路,为地面测发控系统发展提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 张晨光,吕明,刘巧珍.基于云计算一体化测试发控系统设计与分析[J].导弹与航天运载技术,2018(3):114-118.
- [2] 宋征宇.新一代航天运输系统测发控技术发展的方向[J].航天控制,2013,31(4):3-9.
- [3] 谢明明,等.空间相机仿真测试数据自动判读系统的设计[J].计算机测量与控制,2010,18(6):1299-1279.
- [4] 张学英,易航,等.运载火箭测发控系统通用化设计[J].导弹与航天运载技术,2012(4):15-19.

(下转第 24 页)