

# 运载火箭新一代测量系统发展设想与关键技术分析

王国辉, 张金刚, 耿胜男, 周广铭

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 回顾了我国运载火箭测量系统的发展历程, 以设计要素为依据, 对运载火箭测量系统的发展进行了划代; 在当今航天发展的新形势、新要求下, 提出以“集成化、网络化、无缆化、高速化、智能化”为主要特征的新一代测量系统功能设想, 并重点对关键技术的实现进行详细阐述。

**关键词:** 运载火箭; 电气系统; 测量系统

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 01-0001-07

## Development Trend and Key Technologie of New Generation Measurement System for Launch Vehicles

WANG Guohui, ZHANG Jingang, GENG Shengnan, ZHOU Guangming

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

**Abstract:** This paper reviews the development history of the launch vehicle measurement system in China. Based on key design elements, development periods of the launch vehicle measurement system are defined. Under new situations and requirements of space activities nowadays, envisioning of new generation measurement system is proposed, characterized by integrating, networking, wireless, high speed and intelligent, and achievements of key technologies are discussed in detail.

**Key words:** Launch vehicle; Electrical system; Measurement system

### 0 引言

所谓运载火箭测量系统<sup>[1]</sup>, 指完成运载火箭的遥测参数测量、传输、处理以及运载火箭飞行外弹道的测量和安控任务的运载火箭分系统, 包括遥测子系统和外测安全子系统。测量系统的基本任务是获取飞行试验数据, 为运载火箭的性能评定、故障分析和改进设计提供全面、可靠的依据<sup>[2]</sup>。测量系统在运载火箭中承担的任务决定了测量系统的基本功能和特点:

1) 为了获取更精确的飞行数据, 测量系统必须具备较高的可靠性。一方面, 在运载火箭发生

故障的最坏情况下, 测量系统必须坚持工作到最后一刻, 获取故障时刻的宝贵关键数据; 另一方面, 若测量系统自身发生故障, 必须有可靠的隔离措施, 确保不影响其他系统的正常工作。

2) 为了能更准确地获取被测对象的飞行参数, 测量系统需要更好地理解总体的应用需求, 掌握被测对象的状态, 这就不可避免与型号总体、电气、环境、结构等总体专业以及控制、动力、执行等被测对象各专业之间存在较多的输入输出关系, 系统设计和协调工作量大, 是典型的系统工程。

3) 为了能更全面地获取相关飞行信息, 测量

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-06

作者简介: 王国辉 (1973-), 博士, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体设计。

系统设置的测量参数多、测点多,这使得测量系统产品数量多、种类多、参与研制的专业多、单位多,是涉及通信工程、信息技术、电路与系统、计算机技术、自动化、仪器科学与技术等专业的多学科、多领域交叉的复杂系统。

测量系统实现的功能和发挥的作用使其成为运载火箭的必备系统之一。当前,国内外所有在役、在研运载火箭均装配有测量系统或功能相当的系统/设备<sup>[3-9]</sup>。

## 1 运载火箭测量系统发展历程

我国航天事业起步时,早期飞行试验任务并未装配遥测系统,虽然飞行成功,但因为缺乏数据,无法对后续的改进提供指导。因此,在之后的任务中,遥测系统成为飞行试验的必备系统。

在历史发展过程中,遥测系统和外测安全系统统称为测量系统,在历次的飞行任务中,不断地改进、完善<sup>[10-11]</sup>,逐步形成了较为完备的测量系统设计要素,主要包括系统传输体制、系统拓扑结构、系统传输容量、系统测量精度、无线链路指标、数据传输协议、系统供配电体制。

当上述几个设计要素的技术指标有重大进展或突破时,可作为测量系统向下一代发展跨越的标志<sup>[12-13]</sup>。以此为依据,对我国运载火箭测量系统的发展进行划代分析,可以划分为三代:

第一代:以遥测 PAM、PACM 体制为代表,遥测容量在几百 kbit/s 内,外测采用连续波测量,安控采用 PCM-BPSK-FM 体制,以分立模拟电路为主,系统集成度较低,基本满足型号测量需求,解决了“有无”的问题;

第二代:以遥测 PCM-FM 体制为代表,遥测容量达到 2Mbit/s,在频率与体制上与 IRIG 标准一致,外测采用连续波测量+脉冲测量,安控采用 PCM-BPSK-FM 体制,数字化集成电路大规模应用,远程测发控开始应用,系统主要指标与国际接轨;

第三代:以我国新一代运载火箭 CZ-5、CZ-7 等型号上的应用为代表,遥测采用 PCM-FM 体制,但在二次数据综合的拓扑架构下遥测码率可达 10Mbit/s,外测采用脉冲量测量+卫星定位测量为主,安控采用高可靠主字母安控,实现了总线式自动化供配电测控,并且开始应用了天基测控技术,在 CZ-5/YZ-2 Y1 任务中,首次使用遥控指令完成上面级弹道重规划,确保了载荷准确入

轨,系统整体达到国际先进水平。

## 2 运载火箭新一代测量系统

### 2.1 研制背景

#### 2.1.1 高密度航天任务下高质量、高效率、高效益的研制需求

随着我国航天事业进入高密度任务时期,传统测量系统越来越暴露出一些局限,主要体现在系统架构灵活性不足,产品种类多,产品化水平难以提高,在研制过程中表现为“一型号一设计,一状态一方案”,难以适应高密度任务的快节奏需求。如何提高质量、提高效率、提高效益,是摆在新一代测量系统面前的迫切问题。

#### 2.1.2 运载火箭电气系统综合化发展趋势的研制需求

随着电子技术的不断发展,现代军事电子装备系统集成已经进入了一个崭新的时代——综合化、模块化系统集成时代。在该领域,尤其以航空综合模块化电子系统(IMA)集成发展最为迅速。采用可重构的通用模块构建复杂的电子系统有助于提升系统的可用性,增加系统的成功率,大幅减小系统的体积、质量、功耗及全寿命周期的成本。

随着运载火箭的电气系统功能愈加复杂,对全系统资源优化设计的需求也变得愈发迫切。从国际航天来看,美国 SLS 重型火箭箭上电子设备充分借鉴航空 IMA 集成模块化电子系统思想,采用模块化、组合化、集成化设计,采用设备内部的背板总线完成设备模块间的通信<sup>[14]</sup>。欧洲在研制的下一代运载火箭航电系统-Avionic-X 计划中,针对模块化数据处理(Modular Data Handling Block, MDHB-X)使用了遵循 VITA46 标准的 VPX 3U 架构<sup>[15]</sup>。可以看出,国外运载火箭已经由设备独立、接口专用、软硬件紧耦合的联邦式架构逐步升级为体系架构标准化、集成化程度高、软硬件分离、接口通用的分布式综合电子架构,核心电气设备均采用功能模块集成/复用的综合电子设备方式,设备种类显著减少,核心产品具有较强的继承和复用性。这种发展趋势是运载火箭电气系统多年发展的结果,有它的合理性、优越性和必然性。因此,功能划分更加合理、资源配置更加优化的综合电子系统将成为未来运载火箭电气系统发展的方向。

在设备模块化、系统综合化的趋势下,如何既保证运载火箭电气功能的实现,又能确保在故障条件下测量数据获取高可靠性,成为一个新的命题。为满足即将到来的重型运载、载人登月、深空探测、可重复使用天地往返运输等全新航天任务的需求<sup>[16-19]</sup>,在既有的基础之上,充分借鉴国内外电气领域的创新成果,新一代测量系统呼之欲出<sup>[20-28]</sup>。同时,以新一代测量系统的建设为契机,探索我国运载火箭电气系统下一代的发展方向也是新一代测量系统更深刻的使命和内涵。

### 2.1.3 运载火箭走向智能化的发展需求

当前,人工智能已经成为国际竞争的新焦点,世界各大国高度重视人工智能的发展,纷纷出台了相应的政策和规划。美国、欧盟等国家和组织纷纷加快在人工智能领域的筹划布局,自2016年起先后发布了《国家人工智能研究与发展战略规划》(美国)、《欧洲人工智能》(欧盟)等人工智能发展规划。我国也于2017年8月发布《新一代人工智能发展规划》及《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018—2020年)》,其中明确指出“以信息技术与制造技术深度融合为主线,以新一代人工智能技术的产业化和集成应用为重点,推进人工智能和制造业深度融合,加快我国的制造强国和网络强国建设”。智能制造的最主要特点是引入信息系统,通过大数据智能、人机混合增强智能、群体智能等,使系统具有强大的自我感知、计算分析与控制能力<sup>[29]</sup>。

当人工智能技术与运载火箭相结合,可以使运载火箭具备自我诊断、自主导航、故障预测、故障重构等智能化的特性。从人工智能技术的发展来看,计算能力、算法以及海量数据对智能技术的实现至关重要,尤其是海量数据,可以称得上“智能之源”。对于运载火箭来说,智能化之源在于数据,海量数据对智能算法进行训练和优化是关键性的因素,而测量系统就是运载火箭获取海量数据的途径。因此,运载火箭走向智能化的需求对测量系统提出了更高的要求,新一代测量系统必将成为智慧火箭的基础。

## 2.2 总体方案设想

新一代测量系统以高质量、高可靠为出发点,按照功能集中式规划、信息集中式管理、设备分布式组合的“集中-分布式”原则,实现统一数据传输与管理、统一供配电,实现了系统拓扑结构、

传输体制、传输协议、容量、供配电体制等多项设计要素的重大变革。

新一代测量系统在功能上表现为以“信息流、能量流”为主线进行顶层一体化设计,具体表现为:

1) 在信息流上采用有线骨干网+无线区域子网的异构方式构建智能弹性架构,有线骨干网以基于实时以太网的高可靠信息互联冗余与容错技术为基础,实现设备的弹性扩展,自由入网;无线区域子网采用一种基于时分分频的动态接入技术和开放的无线通信协议体系,使得传感器节点可以动态接入、自动组网,消除大量的末端电缆,解决运载火箭内部成百上千只传感器大规模测量带来的电缆网复杂、质量大、连接操作复杂、设计更改困难等问题;

2) 在能量流上表现为采用统一的高低压混合母线架构,其中仪器母线为DC 28V规格低压母线,为箭上电气系统仪器设备提供一次供电;高压母线为DC 270V规格高压母线,为大功率动力负载进行一次供电;270V高压母线通过电压隔离变换输出DC 28V动力母线,为箭上火工品、动力系统电磁阀等负载进行供电。高低压混合架构解决了常值功率和峰值功率的兼容问题,形成标准化的供电接口,满足运载火箭常值、脉冲、感性负载种类越来越多的应用需求。

新一代测量系统的功能拓扑包括了通信骨干电缆和供电主干电缆,电缆网拓扑结构简单,枝干清晰,数量少,不再呈现传统测量系统如蛛网般的系统电缆网,不仅可以大幅减小电缆网质量,而且针对传统需要人工操作或存在分离需求的界面采用了无缆化连接的技术,可以大幅减少人为操作,提高连接可靠性。

## 2.3 关键技术分析

新一代测量系统的突出特征表现为“集成化、网络化、无缆化、高速化、智能化”,其中集成化表现为分布式综合电子技术、综合射频技术;网络化表现为异构融合的动态自组网技术;无缆化表现为无线区域自组网、无线供电等新技术;高速化表现采用Ka频段天基、无线激光测控等高速数传技术;智能化表现为火箭大数据多源融合与挖掘技术。

此外,新一代测量系统还不断推动着基于CCSDC规范的空间数据系统、高动态组网数据链、

多目标测控、态势感知等前沿技术、新领域的研究和应用。

### 2.3.1 分布式综合电子技术

新一代测量系统采用分布式综合电子技术,在功能上将数据采集、数据综合、数据接口、通信、控制、供电等功能进行综合设计,实现硬件资源的标准化和通用化、功能的软件化和集成化。在硬件上采用通用 VPX 板卡+定制化背板的一体化方案,对传统各个独立单机进行通用化、模块化、板卡化设计,模块采用统一的标准化结构和电气接口,组合内各模块间通过高速背板总线进

行连接;取消各独立单机的电源模块,由组合内的电源控制模块通过背板进行二次电源的统一供电和配电控制;功能模块采用统一的 I<sup>2</sup>C 总线和自检检测协议实现加电自检功能,自检检测电路采用独立的电源与总线,与主功能电路隔离,可以实现在主功能电路故障情况下的高可靠自检。

新一代测量系统通过分布式综合电子技术显著减少了设备数量、种类,实现资源的高效整合,如图 1 所示,多台单机通过模块化的组合形成了智能检测组合。

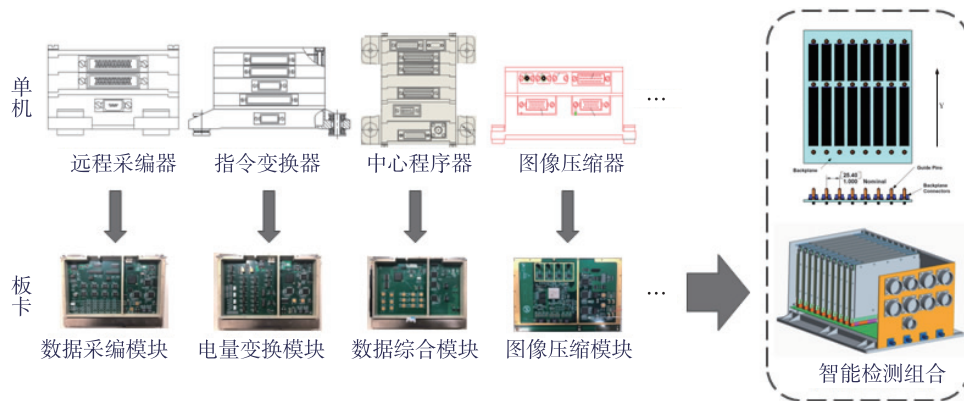


图 1 分布式综合电子技术

Fig. 1 Distributed integrated module avionic

### 2.3.2 宽带综合射频集成技术

随着无线测控技术的快速发展,遥测、外测和安控的实现途径不断丰富和完善,在提升测控可靠性的同时也带来了射频设备数量增多、设备间电磁环境复杂、系统体积庞大、测试操作维护工作量大、人员需求多等困难。箭上射频系统天线种类多、数量多,不仅带来总装、测试的不便,而且对箭体的结构强度、热防护、气动特性带来影响。

为解决上述问题,新一代测量系统突破了传统按功能划分模块的方式,采用基于综合射频按照信号处理流程划分的方式,对完成相同或类似信号处理的电路进行整合优化。综合射频设备划分为电源模块、综合接口模块和若干个信道模块以及若干个信号处理模块。除必要的电源模块和综合接口模块外,可按需选择。综合射频设备集成了原脉冲相参应答机、安控指令接收机、导航接收机的功能,体积仅与原一台应答机相当,实现了射频类设备的高度集成。

### 2.3.3 异构融合的动态自组网架构

新一代测量系统采用有线骨干网+无线区域子网的异构方式实现箭上设备的互联互通。

有线骨干网采用基于时间触发的实时以太网,其协议层次结构与标准以太网的层次结构类似,物理层可支持多种不同传输介质或方式(如双绞线、光纤等),数据链路层中的 MAC 层基于 IEEE 802.3 标准,增加了高精度时钟同步、网络通信调度管理及网络可靠性设计,实现对标准以太网协议的兼容。有线骨干网既可以实现控制指令、动作时序等对时间敏感数据的实时精确传输,又可以兼容大容量数据的高带宽传输需求,如高清图像、场测量数据的采集传输。

无线区域子网采用基于时分分频的动态接入技术,简称为 TFD-MAC,支持频段为 915MHz 或 2.4GHz 的多信道分频传输。在火箭舱段内实现箭上环境参数采集的全部无缆化,种类涵盖冲击、振动、过载、压力、温度、热流等参数类型,实现大规模、大容量稳定组网。

### 2.3.4 高速天基测控技术

为了满足运载火箭全程高速天基测控的需求,新一代测量系统采用 Ka 频段 QPSK 调制 LDPC 编码的天基数传技术,针对运载火箭返向天线通信速率高、波束窄、运载姿态变化快的难点,突破高精度的自跟踪测角算法,采用自适应跟踪中继卫星技术,由程序跟踪和自跟踪配合实现高精度的跟踪瞄准。

为了实现多弹道、故障弹道以及高动态、多姿态下的全程天基链路的建立与通信,采用多天线切换和多星切换策略,最终可以实现全程下行遥测速率 50Mbit/s,上行遥控速率 50kbit/s 的天基测控系统,满足后续运载火箭大容量数传以及在线指令注入等测控需求。

### 2.3.5 高效无线供电技术

运载火箭普遍采用脱插、脱拔等机械电连接器作为电气系统箭地接口,但传统的脱插、脱拔等机械电连接器存在设计及操作使用约束多、操作复杂、消耗较多人员和时间、对辅助设备依赖程度高、无法自动对接等难点。

面对下一代运载火箭电气技术发展和无人值守等要求,新一代测量系统提出了实现无缆化自动连接的无线供电/通信集成方案,突破高效谐振拓扑网络、复杂金属环境下的耦合线圈设计、电能与信号同距传输等关键技术,实现了供电功率 1000W、传输距离 30cm、传输效率 92%、通信速率 1Mbit/s 的无线供电接口,能够实现对运载火箭的无线供电以及指令和信息的无线测发控。

### 2.3.6 智能数据挖掘与第三方评估

长期以来我国对于运载火箭遥测数据的挖掘和利用存在不足,主要体现在:一是对于已有丰富的飞行试验历史数据开发利用程度不高,对发次之间的数据关联性和规律性挖掘不足;二是现有数据分析手段仍停留在人工判读、阈值判读等低层级水平,尚不具备对大数据进行人工智能深度挖掘、建模与分析能力,对于参数之间的关联性研究不足,对于隐藏在表层数据背后的大量有用信息尚无法有效开发和利用。

新一代测量系统提出了基于火箭大数据的遥测信息融合与应用平台,着眼于提高全系统数据应用及正确决策的能力。数据源自现役在飞型号的成功数据、故障数据、异常数据等,具有复杂性、多源性、离散性等特点。新一代测量系统开发了基于深度学习、神经网络、回归分析等的人工智能遥测数据处理算法,进行算法优化与数据训练,建立了遥测参数评估模型,利用丰富的历史飞行试验数据开展遥测数据关联性分析,进行特征再提取和分类判别,完成了参数的关联性分析,实现了火箭飞行状态参数的实时预测。图 2 是对某过载参数的预测结果(橙色是实际数据,蓝色是预测结果),可以看出,基于模型的预测值与实际飞行数据结构吻合较好,同时也准确挖掘出与过载参数关联性较强的其他参数,揭示出利用传统人工判读方法无法发现的参数之间隐藏的相关关系,为进一步的数据分析和应用提供了依据。

新一代测量系统对数据预测与分析的工作将使测量系统的角色发生重要变革,由数据获取变为对信息的第三方评估,为我国运载火箭的智能化探明了方向。

## 3 结论

运载火箭测量系统诞生于中国航天事业起步之初,在近 60 年的发展历程中,历经上千次飞行任务考核,在飞行结果评定、故障定位与分析、总体优化设计中发挥了极其重要的作用,测量系统自身也在不同历史阶段完成了三代技术变革。当前,在重型运载、载人登月、深空探测、可重复使用天地往返运输等全新航天任务的需求下,新一代测量系统以“集成化、网络化、无缆化、高速化、智能化”为主要特征开启了新一轮的技术变革,多项性能及技术指标达到了国际领先水平。新一代测量系统的总体功能架构不仅是测量系统的新一代变革,同时也是在综合电子的发展趋势下,运载火箭下一代电气系统的方案基础,对我国运载火箭电气系统的下一步发展具有重要的指导意义。

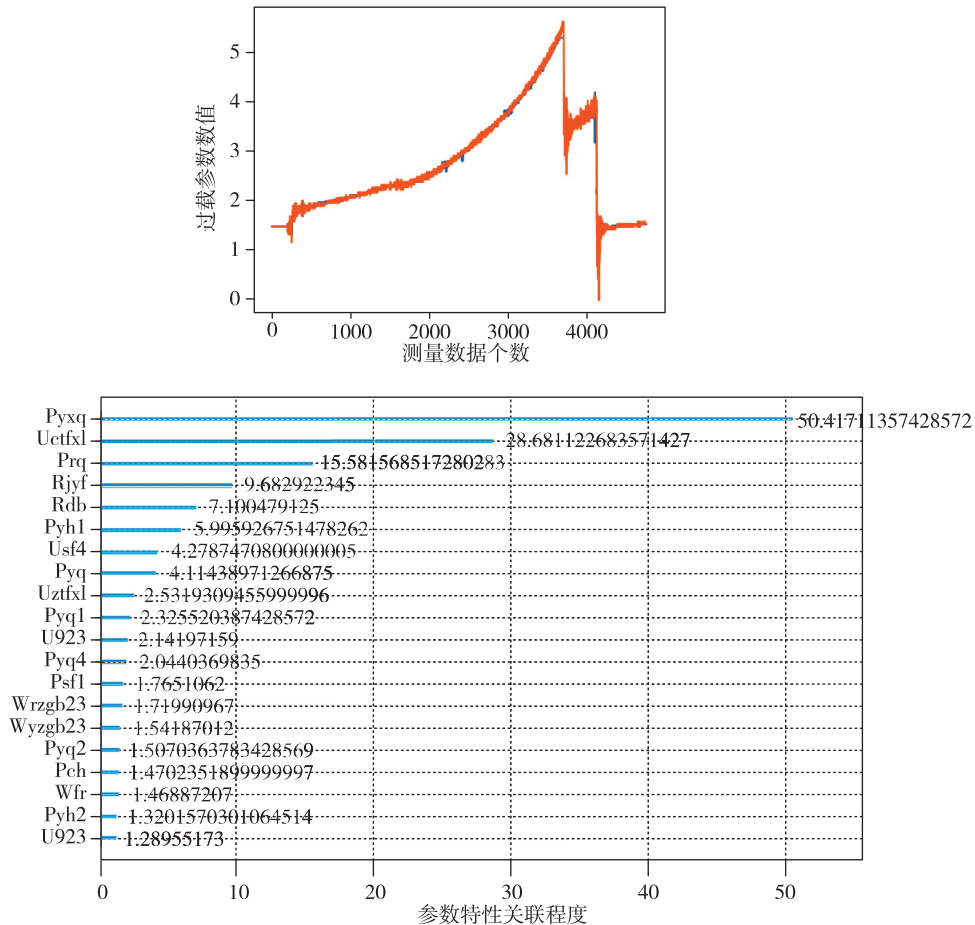


图2 数据预测与参数关联性

Fig. 2 Information prediction and parameter correlation analysis

## 参考文献

- [1] GJB 2496A-2015. 载人航天工程术语 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2015.
- [2] 陆寿茂, 蓝鲲. 遥测系统再认识 [J]. 遥测遥控, 2006, 27 (5): 65-72.
- [3] 林涓, 贺峥光. 载人火箭的遥测系统 [J]. 导弹与航天运载技术, 2006 (4): 5-10.
- [4] 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017 (3): 1-5.
- [5] 刘建忠, 李聘. 长征三号丙运载火箭 [J]. 中国航天, 2008 (8): 11-13
- [6] 范瑞祥, 马忠辉, 容易, 等. 阿里安 6 运载火箭方案及对中国运载火箭发展启示 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (6): 27-30.
- [7] 陈海鹏, 罗恒, 刘熾, 等. 国外运载火箭发展趋势分析及启示 [J]. 航天工业管理, 2015 (11): 34-37.
- [8] 解晓芳, 才满瑞. 美国“航天发射系统”重型火箭研制进展 [J]. 国际太空, 2016 (12): 36-41.
- [9] 徐利杰, 陈晓飞, 陈海鹏, 等. 印度新型运载火箭技术方案剖析 [J]. 国际太空, 2017 (9): 22-27.
- [10] 龙乐豪, 李平岐, 秦旭东, 等. 我国航天运输系统 60 年发展回顾 [J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (2): 1-6.
- [11] 秦旭东, 龙乐豪, 容易. 我国航天运输系统成就与展望 [J]. 深空探测学报, 2016, 3 (4): 315-322.
- [12] 王雪梅, 秦旭东, 王小军. 基于聚类分析的运载火箭划代研究 [J]. 航天工业管理, 2013 (11): 4-6.
- [13] 秦旭东, 容易, 王小军, 等. 基于划代研究的中国运载火箭未来发展趋势分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (1): 1-4+38.
- [14] Donahue B, Sigmon S. Space launch system; Block 1B configuration; development and mission opportunities [C]. 53<sup>rd</sup> Joint Propulsion Conference, 2017.
- [15] Monchoux D, Gast P, Sangare J. Avionic-x: A demonstrator for the next generation launcher avionics [J]. Embedded Real-Time Software and Systems (ERTS 2012), 2012.
- [16] 刘竹生, 孙伶俐. 航天运输系统发展及展望 [J].



- 中国科学: 技术科学, 2012, 42 (5): 493-504.
- [17] 龙乐豪, 郑立伟. 关于重型运载火箭若干问题的思考 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (1): 8-12.
- [18] 何巍, 刘伟, 龙乐豪. 重型运载火箭及其应用探讨 [J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (1): 1-5.
- [19] 陈海鹏, 张兵, 徐文彬. 对我国运载火箭高密度发射应对措施的一点思考 [J]. 中国航天, 2015 (12): 34-36.
- [20] 夏国江, 宋锐, 田园园, 等. 运载火箭测控系统中的信号兼容性设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (5): 68-70.
- [21] 夏国江, 韩明, 王星来, 等. 飞行器高码率网络化无盲区测控需求与技术 [J]. 遥测遥控, 2018, 39 (2): 1-8.
- [22] 张金刚, 王星来, 吴燕茹, 等. 箭载电子设备供电接口统一化研究 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (2): 20-25.
- [23] 耿胜男, 冯辉, 王星来, 等. 航天器智能结构与先进传感技术 [J]. 遥测遥控, 2017, 38 (5): 44-48.
- [24] 路娟, 王颖, 刘丙太, 等. 基于火箭测量系统的无线传感器网络技术研究 [J]. 宇航计测技术, 2015, 35 (4): 44-47.
- [25] 陈伟, 王志有, 李晓斐. 航天运载器外测系统精度鉴定技术发展展望 [J]. 导弹与航天运载技术, 2016 (6): 40-44.
- [26] 陈明, 厉智强, 梁晨光. 卫星中继测控无线链路研究与方案设计 [J]. 遥测遥控, 2013, 34 (4): 18-21.
- [27] 万端华, 蓝鲲. 网络技术在箭载测量数据综合技术中的应用研究 [J]. 遥测遥控, 2012, 33 (6): 48-52.
- [28] 张佳宁, 吴燕茹, 祝伟, 等. 新一代运载火箭一体化供电测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 39-42.
- [29] 王柏村, 臧季原, 屈贤明, 等. 基于人-信息-物理系统 (HCPS) 的新一代智能制造研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20 (4): 29-34.

**引用格式:** 王国辉, 张金刚, 耿胜男, 等. 运载火箭新一代测量系统发展设想与关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (1): 1-7.

**Citation:** Wang G H, Zhang J G, Geng S G, et al. Development trend and key technologie of new generation measurement system for launch vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4 (1): 1-7.