

# 快速机动测发控技术在智慧火箭中的应用

徐 昕 徐 玮 于大海 潘东梅 张新伟

(上海航天电子技术研究所, 上海, 201109)

**摘要:**智能测试发射技术是智慧火箭概念的关键环节,快速机动是实现智能测试发射的重要发展方向。针对我国运载火箭测发周期较长、地面测试设备复杂、缺乏机动发射能力的情况,CZ-6 运载火箭测发控系统以可靠、简易、快速、集成为主要特征。通过采用“总线为主、无线为辅、有线配合”的综合测试模式,结合军用方舱结构形式、高集成度测发设备、大流量数据传输与实时判读等关键技术,配合火箭总体实现了 CZ-6 运载火箭 7 d 快速简易测发的目标,为未来智慧火箭的智能测试发射打下了技术基础。

**关键词:**快速机动;测发控系统;BIT;方舱

中图分类号:V554

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)S1-0006-06

## Application of Fast Maneuver Test Launch Control Technology in Intelligent Launch Vehicle

XU Xin, XU Wei, YU Dahai, PAN Dongmei, ZHANG Xinwei

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai, 201109, China)

**Abstract:** Intelligent test and launch technology is the key link of the concept of intelligent launch vehicle. Fast maneuver is an important development direction for intelligent test and launch technology. Aiming at situations of the long test and launch period, the complex ground test equipment, and the lack of maneuverability for the launch vehicle in China, the test launch control system of CZ-6 launch vehicle should have the main features of the reliability, simplicity, fast and integration. By using the method of “gave priority of the digital bus, assisted by the telemetry, cooperated with wired test”, combined with the key technologies of shelter structure, high integration equipment, large flow data transmission and real time interpretation, the goal of the 7 d rapid launch is achieved, which provide a technical foundation for the intelligent test and launch technology of intelligent launch vehicle in future.

**Key words:** fast maneuver; test launch control system; build-in test(BIT); shelters

智慧火箭的核心概念是在全寿命周期研制模式下,运载火箭具备相当的智能化水平,其内涵包括智能自主控制、智能信息应用、智能测试发射、智能信息传输等诸多方面<sup>[1]</sup>。其中智能测试发射直接反映一型火箭的测发便捷度、人箭交互友好度等智能化水准,是智慧火箭概念的关键环节。地面测试发射控制系统(以下简称测发控系统)是运载火箭的重要组成部分,用于实现运载火箭在分系统综

合试验、全箭集成综合试验及发射场飞行试验的整体测试需求,并在发射场飞行试验中最终实施点火发射的功能,在火箭测试发射环节中有着举足轻重的地位,其先进程度同样反映了火箭的智慧程度。

从 Falcon9, Epsilon 等国外运载火箭来看,其从箭上到地面、从单机到系统各层次的自主智能化测试能力逐步成熟,带来测发控系统设备不断简化,基本实现了快速机动测试发射能力。目前,国

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:徐昕,男,高级工程师,E-mail:nix\_xu@163.com。

引用格式:徐昕,徐玮,于大海,等.快速机动测发控技术在智慧火箭中的应用[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S1):6-11. XU Xin, XU Wei, YU Dahai, et al. Application of fast maneuver test launch control technology in intelligent launch vehicle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 6-11.

内运载火箭电气设备的单机自检测(Build in test, BIT)能力、全箭自动测试和自动故障诊断能力不足,导致测发控系统体积庞大、环节复杂,并缺乏机动能力,测发周期长达 20~30 d,无法满足未来智慧火箭快速进入空间的要求。研制快速机动、适应性强、可靠性高、经济性好的智慧火箭测发控系统,已成为当务之急。

## 1 智慧火箭快速机动测发控系统的需求与特点

相对现役常规运载火箭一个月左右的测发时间和固定发射场发射模式,若需满足智慧火箭在短时间内完成测发流程和适应简易发射场机动发射的需求,测发控系统需具备可靠、简易、快速、集成的特征<sup>[2]</sup>。

作为国内快速机动运载火箭的典型代表,CZ-6 运载火箭定位为“简易、快速机动、低成本、高可靠”的新一代液体运载火箭。CZ-6 运载火箭由中国航天科技集团公司第八研究院抓总研制,其测发控系统由上海航天电子技术研究所(即上海航天 804 研究所)承制。为适应 CZ-6 火箭特点和满足总体要求,上海航天电子技术研究所对适应快速机动火箭的新型测发控系统进行了技术与攻关,总结出快速机动运载火箭测发控系统的特点如表 1 所示。

表 1 适应快速机动运载火箭的测发控系统特点分析表

Tab. 1 Characteristics analysis of fast maneuver test launch control system

序号	特性	现役运载火箭	以 CZ-6 为代表的快速机动运载火箭
1	测发模式与周期	仅在发射区开展测试项目,周期 1 个月左右	在技术区、发射区均开展测试,周期不大于 7 d
2	测发体制	地面激励—箭上反馈—地面采集的模拟量传输测发体制	箭上单机智能自检测(BIT)配合无线遥测数据的测发体制
3	箭地接口	脱落插头数量较多,箭地间信号传输多为模拟量形式	箭地通讯采用 1553B 总线,主要箭地连接关系为 2 个脱拔
4	测发控设备放置形式	前端放置于固定塔架工作间,后端位于测发大厅内	能适应简易发射塔架,并能在技术区、发射区之间转运
5	测发控设备数量与体积	对设备数量、体积无较高限制	要求设备布局尽可能精简,体积尽可能缩小
6	测试数据判读形式	实时自动判读与事后人工判读相结合	测试数据量大,数据要求实时自动判读

由表 1 中内容可知,以 CZ-6 测发控系统为代表的快速机动运载火箭测发控系统需采用简易快

速机动设计的关键技术,使系统方案在借鉴现有长征系列运载火箭地面测发控系统的成熟技术同时,又能适应快速机动运载火箭新的需求:布局精简,内部连接关系简化,能实现快速展开恢复;采用军用方舱作为载体,实现系统设备的便捷转运;采用大流量网络数传和实时判读技术,确保测试可靠性与判读快速性。

## 2 关键技术概述

通过对 CZ-6 为代表的快速机动运载火箭测发控系统的特点分析,可总结出以下几项关键技术内容。

### 2.1 “总线为主、无线为辅、有线配合”的综合测试思路

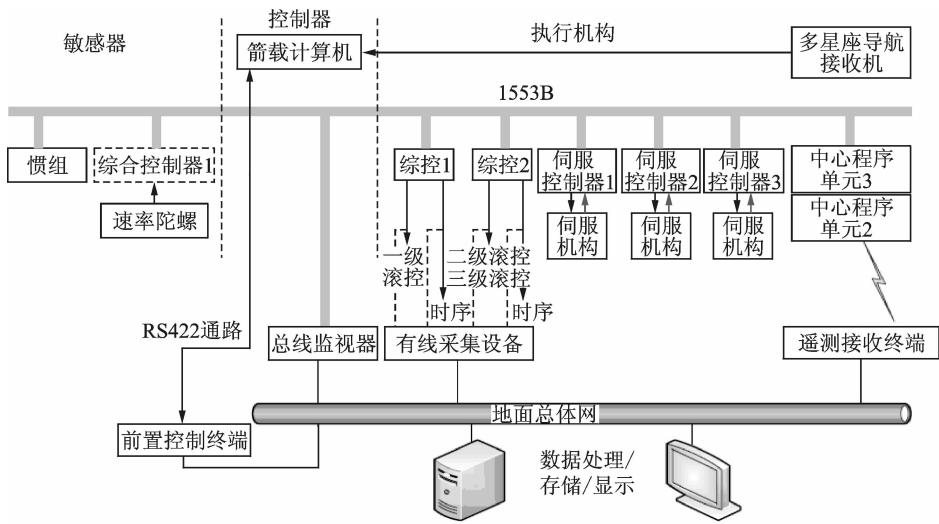
为了适应快速机动火箭简易、快速的测发模式,改变地面测试设备体积庞大,测试连接电缆繁多,电缆、接插件检查等工作项目多、效率低,系统恢复时间长的状况,CZ-6 运载火箭测发控系统在测试时充分利用箭上智能单机具备 BIT 自检测能力,将测试数据以数字量形式通过箭地 1553B 总线传输;以及利用箭上测量系统本身具有检测点采样率高、多路分时采样、串行数据流形式输出的特点,采取“总线为主、无线为辅、有线配合”的综合测试体制。

以 CZ-4B/C, CZ-2D 为代表的现役运载火箭控制系统采用模拟电路搭建,测试采取地面激励—箭上反馈—地面采集的体制<sup>[3]</sup>。测发控系统前端设备采用体积较庞大的 VXI 总线系统,用于发出模拟量激励信号,并对箭上单机的模拟量反馈信号进行采集(图 1)<sup>[4]</sup>。

CZ-6 运载火箭采用 1553B 总线技术,通过与 1553B 总线上的单机进行通讯和箭上计算机的控制,地面主控计算机可以直接知道接下来得到的测试数据是哪一项测试的结果,而不再需要程控开关控制继电器的切换,决定通路采集的情况。总线上传输的数字信号也不再需要 A/D 转换装置进行转换。总线技术的使用为测发控系统前端设备精简创造了有利条件,地面测发控系统设备减少,系统内部连接关系简化。

### 2.2 精简测发控设备,提高系统集成度

CZ-6 测发控系统的发控部分简化了发控逻辑功能,主要应用 PLC 可编程逻辑控制器技术,在前端利用 PLC 的开关量输入/输出模块实现发控逻辑指令的发出和执行结果检测,同时利用 PLC 的 A/D 采样模块实现地面电源重要参数(电压、电流等)的循环检测。后端 PLC 通过以太网接收主控计算机的发控流程指令,并将指令传送给前端 PLC<sup>[5]</sup>。

图1 CZ-6 运载火箭综合测试模式示意图<sup>[4]</sup>Fig. 1 Test pattern sketch of CZ-6 launch vehicle<sup>[4]</sup>

针对 CZ-6 测发控系统的测控部分,在总线传输的机制下,只有少量一些非总线传输类数据,如时序信号等仍需要通过测试电缆引至地面进行检测,这些数据由小型化、性价比高的 PCI 测试板卡实施采集。PCI 板卡的体积不到 VXI 模块的一半,其传输速度却提高了 4 倍以上,且摒弃了 VXI 测试系统必须配备的机箱、零槽等大体积设备,既精简了测试设备的体积,又提高了测试数据的吞吐量。

在地面电源配置方面,CZ-6 测发控系统对地面直流电源进行了归并,并采取了小型化设计,两组直流电源的主、副机可在一个机柜内实现。针对火箭一级、二级伺服机构需要的中频电源,不再采用庞大的中频电机形式,研制了数字化中频逆变电源,在满足中频电源各项性能指标的同时,还能够减少体积、简化控制、降低噪声、提高转换效率,满足了系统需要。由于 CZ-6 运载火箭共有 4 组直流电源和 1 组中频交流电源的需求,CZ-6 测发控系统仅用 4 个机柜就实现了全箭的供电,比现役运载火箭减少 50%,进一步提高了系统的集成度。

### 2.3 基于军用方舱的结构设计

同现役运载火箭型号相比,快速机动运载火箭快速和简易发射的特点对测发控系统提出两个新要求:

(1)测发控系统需在发射场技术区和发射区之间灵活转运;

(2)测发控系统能适应火箭在无固定塔架的简易发射工位进行发射。

根据 CZ-6 火箭对测发控系统的需求,军用方舱成为实现该需求的必要条件。CZ-6 测发控系统使用军用方舱作为设备载体,实现系统便捷转运的

目标。

CZ-6 运载火箭测发控系统设备采用方舱作为承载媒介,提高了系统的集成度,便于设备的转运。测发控系统前端设备包括前端电气方舱,用于实现火箭的地面供电及测试;后端设备包括后端电气方舱,用于控制测试流程、判读测试数据。此外测发控系统还包括用于系统自检的等效器设备,以及实现火箭时序信号测试的时序测试设备。由于时序测试设备和等效器设备并不参与最终的发射工作,因此可以不采用方舱形式,而以便携式机柜形式实现,使用时安放在固定位置,运输时则借用前端电气方舱内的空间放置。

军用方舱在武器型号中已经有较为成熟的应用,通过与武器型号的对比以及目前测发控系统使用状况进行分析,运载测发控系统军用方舱技术的关键点主要是军用方舱使用的可行性及其对发射场地和环境的适应性,以及测发控系统使用的测试设备对军用方舱的适应性。由此延伸出如下几项主要研究内容:

(1)方舱设计及制造,了解方舱制造工艺及其对运载火箭发射环境的适应性;

(2)方舱内机箱、机柜的设计及制造;

(3)方舱内各单机、组合间电缆的布局与走向,以及方舱对外接口关系;

(4)人机操作环境、舱内岗位人员分配;

(5)舱内设备可维修性的考虑。

针对快速机动运载火箭测发控系统对军用方舱的需求,笔者对方舱的结构形式进行了详细设计。图 2,3 分别为前端电气方舱俯视图、透视图,图 4,5 分别为后端电气方舱俯视图、透视图。

军用方舱结构形式是首次在运载火箭测发控

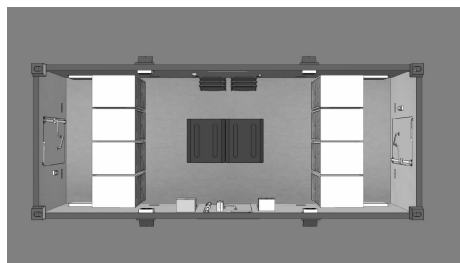


图 2 CZ-6 测发控系统前端电气方舱俯视图  
Fig. 2 Top view of CZ-6 front electrical shelter

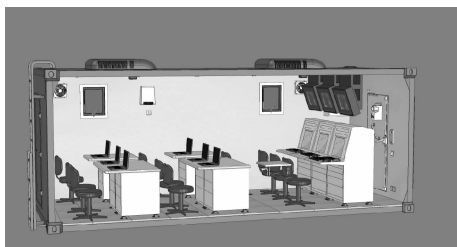


图 5 CZ-6 测发控系统后端电气方舱透视图  
Fig. 5 Perspective view of CZ-6 rear electrical shelter



图 3 CZ-6 测发控系统前端电气方舱透视图  
Fig. 3 Perspective view of CZ-6 front electrical shelter



图 4 CZ-6 测发控系统后端电气方舱俯视图  
Fig. 4 Top view of CZ-6 rear electrical shelter

### 2.4 大流量数据传输与实时判读技术

以 CZ-6 火箭为代表的快速机动运载火箭测发控系统采用了总线+无线+有线的体制,虽然在硬件上进行了简化,但测试数据量却大量增加。以 CZ-6 运载火箭方案阶段电气系统综合试验的数据为例,1553B 总线 BM 软件接收总线消息最高速率为 0.7 MB/s,最短时间间隔为 0.03 ms。BM 软件到显示终端软件和判读终端软件以 UDP 方式通讯固定帧长,最高速率为 5.92 Mb/s。遥测终端到服务器以 TCP 方式通讯固定帧长,固定时间 500 ms 一帧,源码数据量 1.96 Mb/s。考虑目前 CZ-6 运载火箭预计飞行时间 980 s 左右,再加上起飞前的测试数据,全程测试数据的数据量为 6.72 Gb 以上。

为了适应这种情况,CZ-6 运载火箭测发控系统中采用千兆以太网、双冗余千兆光纤通讯等技术,同时具备智能化故障诊断和数据综合处理能力,以实现测试数据实时判读、数据传输快速可靠的目标。测发控系统由主机控制测试流程,测试信息集中判读、显示,对火箭进行统一的测试、发射控制。整个测发控系统中各终端均使用千兆星形以太网通讯,箭地之间采用 1553B 总线和 RS422 总线进行通讯(图 6)。

系统中使用。通过对方舱应用技术的研究,证明军用方舱可以满足快速机动运载火箭测发控系统的需要,确保测发控设备的安全性、可靠性,便于测发控设备的灵活转运。

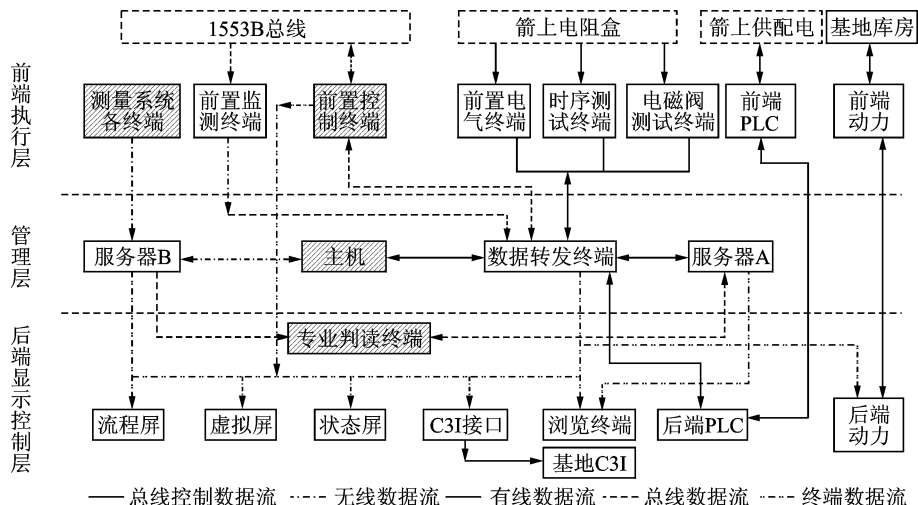


图 6 CZ-6 测发控系统软件信息流示意图

Fig. 6 Sketch map of CZ-6 software information stream

测试数据自动判读技术在 CZ-2D, CZ-4B/C 等为代表的现役型号中都有不同程度的应用, 尤其 CZ-6 运载火箭需要满足快速测发流程, 提高测试数据判读自动化程度越来越重要。要进一步提高判读效率必须开发更先进的软件算法, 对测试数据进行滤波, 自定义有针对性的判读算法, 保证判读数据的完整性, 还要保证不误判, 不影响测试正常流程。

CZ-6 测发控系统中还配备有通讯监测设备和硬件防火墙设备, 可对整个测发控系统网络数据流情况进行实时监控及故障诊断, 并防止病毒在总体网络中的传播, 从而提升了系统内数据传输的可靠性。

针对 CZ-6 运载火箭测发控系统大流量网络数传及实时判读方案, 在方案阶段进行了软件设计和试验验证。经电气系统综合试验验证, 测发控系

统在采用了大流量网络数传和实时判读技术后, 系统测试数据判读时间进一步缩短, 数据传输可靠性进一步提高。

### 3 智慧运载火箭快速机动测发控系统的工作流程

在采用了以上几项关键技术后, 以 CZ-6 火箭为代表的快速机动运载火箭的测发流程与现役运载火箭有着明显的区别。运载火箭测发控系统采取“缩短测发周期, 集成测发设备于方舱内, 随箭体在技术区、发射区均进行测试”的方案。CZ-6 运载火箭进入发射场后, 测试发射为周期 7 d, 其中技术区 5 d、转场 1 d、发射区 1 d(图 7)。

CZ-6 运载火箭在总装厂房测试完成后, 所有三级箭体整体运输至发射场。测发控系统方舱则进行整体封存, 直接运往发射基地。抵达基地后直

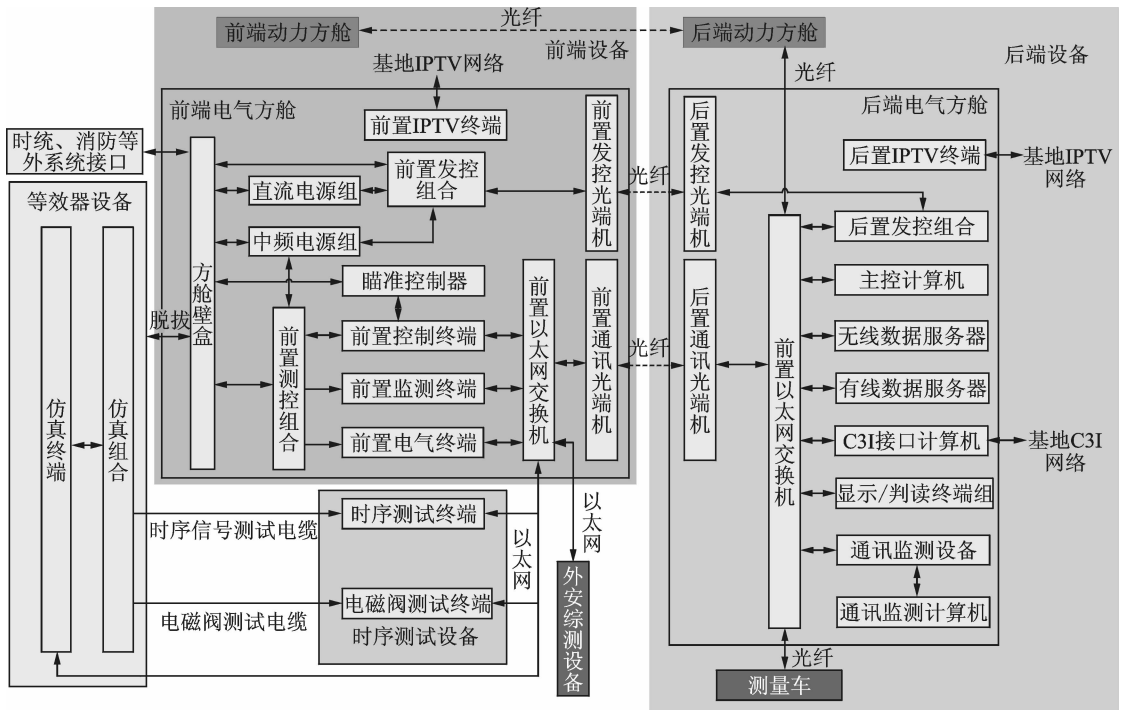


图 7 CZ-6 运载火箭测发控系统组成示意图

Fig. 7 Component diagram of CZ-6 test launch control system

接在发射场技术区进行等效器测试。由于各方舱内部设备的电缆连接关系在运输时没有断开, 恢复工作仅需连接各方舱之间的电缆, 从而大大节省了系统展开恢复时间。

等效器测试结束后, 测发控系统即在技术区与水平状态下的火箭对接。发射场技术区水平测试为运载火箭在发射场最完整的测试状态。以 CZ-6 运载火箭在 25 基地测发的流程为例, 技术区水平测试时, 前端电气方舱、时序测试设备就位技术阵地测试大厅室内, 后端电气方舱就位发射区后端测发大厅附近。图 8 为 CZ-6 运载火箭测发系统与

火箭连接示意图。此时测发控系统前端电气方舱的箭地数据通讯主要依赖箭地 1553B 总线通讯和测量系统无线信道, 有线数据主要包含箭地 422 总线数据和发控信号、供配电信号。总线数据、有线数据均通过脱拔与前端电气方舱内的设备进行交互。火箭的时序信号(包括外安分系统时序、电爆电路信号、电磁阀信号等)则通过时序测试电缆由时序测试设备(图 8 中虚线部分)采集。

在技术区水平测试完毕后, 断开箭地连接电缆, 火箭与卫星整体水平转运至发射区, 并完成起竖。前端电气方舱也整体转运至发射阵地, 与垂直状态

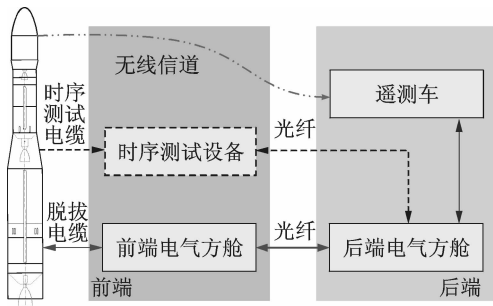


图 8 CZ-6 运载火箭测发控系统方舱与火箭连接关系图  
Fig. 8 Connection diagram of CZ-6 launch vehicle and shelters

下的火箭对接之前进行简化等效器自检测试。时序测试设备及相关电缆则不再运至发射区使用。发射场发射区垂直测试时,测发控系统方舱与火箭之间只有两个脱拔的连接关系,其他测试电缆不再连接。测试信息主要通过脱拔和测量系统无线信道传输。

根据 CZ-6 运载火箭总体工作流程安排,CZ-6 测发控系统靶场 7 d 工作安排见表 2。

表 2 CZ-6 测发控系统测发流程安排表

Tab. 2 Process schedule of CZ-6 test launch control system

序号	测发控系统 工作内容	系统工作 阶段	工作 时间/d	天数/ d
1	组织人员卸仪器设备、生活箱和资料箱	卸车、转载	0.5	
2	前端电气方舱、等效器及时序测试设备就位技术区,后端电气方舱就位发射场后端	设备展开 就位	0.5	1
3	状态准备、电缆检查、单机自检	测试准备		
4	等效器测试		0.5	
5	参加电气系统综合检查	技术区水平 测试	0.5 1	2 3
6	参加 3 次总检查		0.5	4
7	箭地电缆撤收、前端电气方舱整体封存	转场	0.5	
8	前端电气方舱转运至发射区		1	5
9	状态准备,电缆检查,测发控系统简易自检,箭地脱拔电缆连接	发射区垂直 测试	1	6
10	测发控系统加电			-3 h
11	参加电气系统功能检查			-1.5 h
12	发出允许点火指令,发射	发射		0 h

CZ-6 测发控系统通过采取各种技术手段,进一步增强了系统集成度,并使得设备可以在技术区和发射区之间灵活转运,从而适应火箭简易快速测发流程。

## 4 结束语

与现役运载火箭测发控系统相比,以 CZ-6 运

载火箭为代表的运载火箭快速机动测发控系统采取适应火箭总体测发体制、精简系统布局、缩短测发流程、结合军用方舱载体等关键技术,在确保测发可靠性的前提下压缩测试项目及时间,实现了测发设备的灵活转运,从而满足了 CZ-6 运载火箭快速简易测发的需求,为快速机动测发控技术在未来智慧火箭中的应用做出了初步尝试与探索。

随着新一代信息与制造技术的不断发展,未来的智慧火箭将进一步融合云计算、大数据、移动互联等新领域<sup>[6]</sup>,以更高的可靠性、更快的测发周期、更便捷的测发流程,在运载火箭测发控领域实现革命性的技术革新,创造出新的航天发展生态。

## 参考文献:

[1] 李洪. 智慧火箭发展路线思考[J]. 宇航总体技术, 2017,5:1-7.  
LI Hong. The developing roadmap of intelligent launch vehicle[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017,5:1-7.

[2] 徐昕. CZ-6 运载火箭简易快速机动地面测发控系统关键技术研制总结报告[R]. 上海:上海航天电子技术研究所,2010.  
XU Xin. The key technology research and summary report of CZ-6 fast maneuver test launch control system[R]. Shanghai: Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, 2010.

[3] 蔡远文,王华,彭明伟. 测试发射技术及其在军事航天中的应用与发展[J]. 航天控制,2003,1:59-64.  
CAI Yuanwen, WANG Hua, PENG Mingwei. Development and application of test launch and control technology in military aerospace[J]. Aerospace Control, 2003,1:59-64.

[4] 龙乐豪. 我国航天运输系统发展展望[J]. 航天制造技术,2010,3:2-6.  
LONG Lehao. Space transportation system development prospect in China[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010,3:2-6.

[5] 陈海东,沈重,张冶,等. 航天数字化应用技术的发展与趋势[J]. 导弹与航天运载技术,2008(3):23-27.  
CHEN Haidong, SHEN Zhong, ZHANG Ye, et al. Development and trend of digital technology in aerospace engineering application[J]. Missiles and Space Vehicles, 2008(3):23-27.

[6] 刘梅,刘洋,刘晓松. “互联网+”对航天传统制造业的挑战与机遇[J]. 航天工业管理,2016(1):19-21.  
LIU Mei, LIU Yang, LIU Xiaosong. “Internet+” for the traditional manufacturing industry challenges and opportunities[J]. Aerospace Industry Management, 2016(1):19-21.