

文章编号: 2097-1974(2024)06-0063-06

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240610

# 快速响应火箭星箭接口优选模式研究

潘亮, 李成, 杨晓论, 潘建平, 张智宇  
(太原卫星发射中心, 太原, 030031)

**摘要:** 星箭接口是影响快响发射成功与否的重要因素, 以快速响应固体火箭为研究对象, 在提出快速响应火箭星箭接口总体要求的基础上, 对其星箭接口特别是机械接口和电气接口展开分析, 探究适合快速响应火箭的星箭接口优选模式, 得出采用记忆合金驱动的点式星箭连接解锁装置和无线充电不预留充电接口的结论, 并对如何推广运用快速响应火箭星箭接口优选模式提出建议, 可为提高快响发射的可靠性和工作效率提供借鉴和参考。

**关键词:** 快响发射; 快响火箭; 星箭接口; 机械接口; 电气接口

中图分类号: V19

文献标识码: A

## Research on the Optimal Mode of Satellite-rocket Interface for Rapid Response Rocket

PAN Liang, LI Cheng, YANG Xiaolun, PAN Jianping, ZHANG Zhiyu  
(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, 030031)

**Abstract:** The satellite-rocket interface is an important factor affecting the success of rapid response launches. Rapid response solid rocket is taken as the research object. On the basis of proposing the general requirements of the satellite-rocket interfaces for rapid response rocket, the satellite-rocket interface is analyzed focusing on mechanical interface and electrical interface, the optimal mode of satellite-rocket interface for rapid response rocket is explored. It is concluded that the memory alloy-driven point satellite-rocket connection unlocking device and wireless charging do not reserve a charging interface. The research provides suggestions on how to promote the use of optimal model of satellite rocket interface for rapid response rocket, and provides reference for improving the reliability and efficiency of rapid response launches.

**Keywords:** rapid response launch; rapid response rocket; satellite rocket interface; mechanical interface; electrical interface

### 0 引言

星箭接口是火箭与卫星之间进行连接、通信和数据传输的界面。选择合适的接口, 既能确保星箭安全可靠的分离, 又能保证信号传递的准确性和稳定性, 从而降低不必要的干扰和风险。快速响应(以下简称“快响”)发射对星箭接口的要求很高, 尤其对标准化、模块化星箭接口有着强烈需求。目前, 不同类型的航天任务对接口的需求各不相同, 卫星存在多种型号, 而批量生产的火箭难以满足不同卫星的接口要求, 只能根据各颗卫星的需求进行适配, 再加上卫星与火箭之间尚无系列化通用标准接口, 导致卫星基本均需与火箭制定独立接口协议, 并确定连接分离机构的形式, 在通用性、兼容性、操作性和贮存维护等方面无法满足快响发射需求, 迫切需要提出既能保证星箭产

品接口可靠性又能契合快响发射操作便捷性的星箭接口优选模式, 以提升快响发射的可靠性和工作效率。

### 1 快响火箭星箭接口总体要求

快响发射要求在短时间内将特定卫星送入预设轨道, 完成组网补网任务。其特点一是响应时间短, 二是载荷大多为小卫星。为了实现这个目标, 需要预先确定火箭的类型。近年来, 固体火箭以其快速响应、灵活便捷和费用合理等特点得到市场的广泛认可, 成为发射小卫星的主力军。与液体火箭相比, 固体火箭具有操作维护简单、测试时间周期短、发射保障要求低、发射地点灵活的突出优点, 能够更好地满足快速、灵活进入太空的要求, 成为快响发射的首选。

快响火箭类型确定后, 还需要明确星箭接口的要

求。星箭接口要求是星箭之间在技术接口协调方面的重要内容,其规范性、全面性和先进性直接关系到发射任务的成败。传统火箭采用的是“研制—生产—发射”模式,可以针对每次发射任务对星箭接口进行适应性改进设计。但在快响发射任务中,需要的是“研制一批产—贮备—发射”的模式,对星箭接口的精简化和统一性要求更高。

根据快响发射现状并考虑未来需求,提出快响火箭星箭接口总体要求如下:以固体火箭发射小卫星为出发点,紧盯快速对接、快速测发、安全可靠等特性,重点关注星箭机械接口连接解锁装置和电气接口充电模式,实现操作设备数量少、操作程序简捷、操作时间短、线路铺设少的目标,使星箭接口进一步规范化、标准化和模块化。

## 2 快响火箭星箭接口模式分析

根据接口的作用和性质,星箭接口涵盖机械接口和电气接口两大类型。机械接口分为火工和非火工两种连接解锁模式,具体包括点式、包带、立方星轨道部署器(PicoSatellite Orbital Deployer,POD)、记忆合金解锁器等多种方式。电气接口分为有线和无线两种模式,主要包括电源接口、信号接口、数据接口、通信接口。

### 2.1 机械接口

机械接口是卫星和火箭之间通过机械连接实现物理和力学联系的结构,确保两者在发射和运行过程中能够紧密结合。机械接口要求具有足够的强度和稳定性,能够承受航天任务过程中的振动和冲击,同时要具备良好的耐久性,确保接口在长期使用过程中不易损坏或失效。作为快响火箭机械接口的重要组成部分,星箭连接解锁装置主要用于卫星与火箭的可靠连接,分离前保证星箭连接完好,卫星入轨后实现星箭的可靠解锁及分离,因此本文以星箭连接解锁装置为分析对象,探究快响火箭机械接口的模式。

星箭连接解锁装置对承载与冲击性能要求不断提高,国内外连接解锁装置正在按照“强连接、弱解锁”的设计思想进行优化,即一方面提高大承载条件下的解锁可靠性,另一方面尽可能减小解锁驱动力与驱动能量,以降低解锁对卫星的冲击<sup>[1]</sup>。从连接解锁的角度来看,机械接口连接解锁装置分为火工和非火工两大类型,涵盖点式、包带、POD、记忆合金解锁器等多种方式。

### 2.1.1 火工连接解锁装置

据统计,目前绝大多数的卫星采用火工连接解锁。它是利用火药发生爆炸或者燃烧产生巨大的能量,拉断或者剪断连接销,实现星箭解锁。优点是:a)体积小,结构简单,作用可靠;b)可长期存储能量,在极端温度和真空条件下保持稳定性;c)功耗小,电路简单;d)作用时间短(几毫秒至几十毫秒),同步性好,某些火工装置还具有延时特性。缺点是:a)在释放过程中,释放冲击特别大,最大可达20 000g,对卫星有潜在影响,特别是对小卫星影响更大;b)一次性作用,不能重复使用;c)包含爆炸材料,存在安全性和污染问题;d)往往需要安装多个爆炸螺栓同时使用,对同步起爆的要求非常高,降低了星箭分离的可靠性。

点式分离和包带是火工连接解锁的两种主要方式。点式分离装置主要包括爆炸螺栓和分离螺母两种形式,有两点式、三点式、四点式等多种配置方案,优点是结构简单、适应性强,缺点是星箭对接面需要多个爆炸螺栓或分离螺母才能保证连接强度和刚度,解锁时所有螺栓螺母必须全部正常工作才能保证卫星可靠分离,因此可靠性不高,冲击力很大,不能满足卫星对解锁冲击环境提出的越来越严格的要求<sup>[2]</sup>。包带则主要适用于尺寸和质量较大的卫星( $\geq 300$  kg),有火工连接解锁和非火工连接解锁两种方式,目前大多使用火工连接解锁方式。

### 2.1.2 非火工连接解锁装置

与火工连接解锁装置相比,非火工连接解锁装置的优点:a)冲击小,由火工品的1 000~20 000g降低为3 000g以下;b)去掉了火工装置中的防电磁干扰、防静电等措施,减轻了装置的质量;c)不存在火药的安全防护问题,取消了火药在制造、运输、贮存、试验等一系列过程中的安全措施;d)不存在火药爆炸产生的有害气体或碎片,不会对卫星造成影响,也不会污染周围环境;e)性能易于检测,试验成本低,产品在试验后可部分或完全重复使用,更有利于保证分离装置的可靠性<sup>[3]</sup>。缺点是需保证解锁机构的同步性,响应时间受温度和电流影响较大。点式分离、包带、POD和记忆合金解锁器是非火工连接解锁的主要方式。

#### a) 点式分离。

鉴于非火工连接解锁所具备的优点,各国正在对点式分离装置进行改进,采用通用化、模块化等设计,使用记忆合金拔销器替代传统的爆炸螺栓和分离螺母,并在星箭分离面采用冲击隔离抑制技术,力图

解决传统点式分离装置冲击力大的难题，提高载荷分离的安全性。四点式分离机构如图1所示。

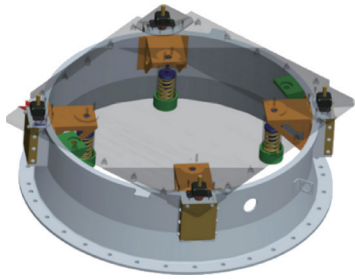


图1 四点式分离机构  
Fig.1 Four-point separation mechanism

b) 包带。

包带非火工连接解锁的工作原理为：处于星箭连接状态时，在包带的两端施加预紧力，使包带内侧V形块与星箭对接框紧密配合。星箭分离时，分离元件解锁后，加载在包带上的预紧力突然消失，使包带与V形块在应变能作用下沿径向向外运动，当V形块与星箭对接框完全脱离后，捕获装置将包带和V形块捕获，通过内部垂向压缩弹簧弹力释放实现星箭分离操作。相对于火工连接解锁而言，包带的非火工连接解锁装置具有承载力大、可靠性高、连接刚度好、解锁冲击低、污染少等优势。目前，国内外正在开展非火工包带技术研究，解锁方式包括熔断式、形状记忆合金式、热电螺母式、直流电机驱动式等，非火工包带式分离技术已成为包带解锁的热门发展方向<sup>[4]</sup>。包带式分离机构如图2所示。

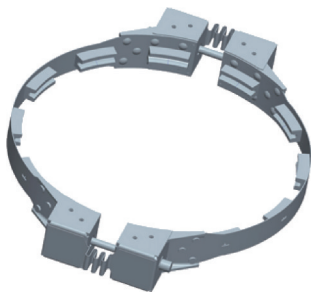


图2 包带式分离机构  
Fig.2 Clamp-band separation mechanism

c) POD。

POD采用类似于集装箱装货的形式，将立方星封装在矩形金属箱结构的分离释放机构内。当收到分离信号后，采用火工切割器、电磁铁、记忆合金分离螺母、记忆合金拔销器等结构进行舱门解锁，使用分离弹簧将卫星弹射出来，具有设备小巧、接口简单、安装便捷的优点。立方星以1U（10 cm×10 cm×10 cm）

为基本单位，可进行模块化扩展，常见的有1U、2U、3U、6U、12U，星箭接口可以做成相应大小的“箱子”，形成星箭接口货架。优点为：a) 无质量残留，分离后所有装置均留在火箭上，星上无任何残留质量；b) 冲击小，解锁冲击不直接作用于卫星，而是通过框架—导轨传递，对星上载荷影响较小。POD分离机构如图3所示。

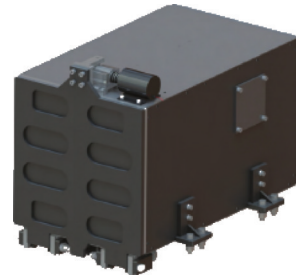


图3 POD分离机构  
Fig.3 POD separation mechanism

d) 记忆合金解锁器。

记忆合金解锁器的原理是利用形状记忆合金材料受热后恢复形状驱动触发机构，将电能转换为热能，通过位移及驱动力放大结构实现大承载及大行程解锁。按照使用方式与实现原理可大致分为飞轮螺母、缺口螺栓、分离螺母、记忆合金拔销器4种。飞轮螺母的特点是将卫星连接解锁时的弹性势能转化为飞轮的旋转动能，优点是承载能力极强、分离冲击小，缺点是结构复杂且质量及外形尺寸大。缺口螺栓的特点是通过胀断连接螺栓实现分离，优点是承载能力极强、结构简单、可靠性高，缺点是功耗大、不可重复使用、分离时间长、分离冲击大。分离螺母的特点是通过花瓣螺母等解锁结构进行螺栓分离，优点是接口通用性好、承载范围大、承载能力强，缺点是结构复杂、可靠性受限。与前者相比，记忆合金拔销器通过弹簧机构实现销缩回，缺点是对解锁的同步性要求很高，优点是体积小、质量轻、功耗低、响应快、复位简单、冲击小（通常100g）、环境适应性好（对温度、湿度、真空、静电均不敏感）、可重复使用、可靠性高，拥有较好的耐磨性与抗腐蚀性，工作稳定，有较长的疲劳寿命，尤其是使用方便，无需特殊岗位、特殊工具、特殊操作，螺钉直接安装<sup>[5]</sup>，对接流程简单，可提前与卫星安装成整体，对接时直接与火箭接口连接即可，更适合小卫星的解锁与分离，在快速性、简便性、安全性方面符合快响发射的要求。

2.2 电气接口

电气接口是卫星和火箭之间通过电子连接进行信

号和电能传输的接口,主要用于电力传输、数据传输和信号控制,可确保卫星正常运行并与地面控制系统保持通信。

快响火箭电气接口的类型主要有:a)电源接口,用于传输火箭各系统所需的电能,如电池与各用电设备之间的接口;b)信号接口,包括传感器信号、控制信号等的传输接口,如分离控制信号接口与分离测量信号接口;c)数据接口,用于传输大量数据,如遥测数据接口;d)通信接口,保障火箭与地面控制中心等进行通信联络的接口,如射频通信接口。

快响火箭电气接口需要实现以下要求:a)满足电流、电压、信号传输速率及精度等特殊要求,具备防水、防尘能力,确保系统正常运行;b)可靠性,确保在恶劣的太空环境和复杂工况下稳定工作,减少故障风险;c)兼容性,兼容箭上其他设备及系统的接口,保持工作协同;d)质量和体积,尽量选择轻巧紧凑的接口,以减轻火箭整体质量,优化布局;e)抗干扰能力,可有效抵抗太空辐射、电磁干扰等不良影响;f)可维护性,便于安装、检测、维护和更换。

快响火箭电气接口正在朝下列方向发展:a)标准化和规范化,通过制定和推广国际标准,规范电气接口的设计和制造,提高接口的兼容性;b)智能化和自动化,采用人工智能和自动化技术,实现电气接口的智能化和自动化控制,提高自适应能力和故障诊断能力,减少人工干预;c)集成化和小型化,通过数据采集、处理、传输、控制等多种功能的集成,采用先进

的材料和工艺,实现更高效的信息传输与处理,减轻火箭的质量和体积,从而提高火箭的整体性能。

在信号传输方面,快响火箭电气接口保留分离控制信号接口与分离测量信号接口,以保障信号传输效率、抗干扰能力和安全性。从电能传输的角度来看,快响火箭电气接口分为有线充电和无线充电两种模式。目前,快响火箭星箭对接后,卫星充电和测试均采用有线模式,铺设加装专用电缆。

### 2.3 快响火箭星箭接口优选模式

#### 2.3.1 机械接口

快响火箭星箭连接解锁装置分为火工和非火工两大类。表1以爆炸螺栓和记忆合金拔销器为例,从快响发射比较关注的11个方面对火工与非火工连接解锁装置作性能对比。从表1数据来看,非火工连接解锁装置在自身质量、分离解锁可靠性、解锁冲击、分离姿态精度、电磁兼容性、机动运输、贮存要求、安装操作等方面比火工连接解锁装置更加方便快捷、安全可靠。虽然目前航天任务还是以火工连接解锁装置为主,但火工连接解锁对卫星本体冲击大、火药的保存和起爆存在安全隐患、火工品的安装操作需要专业人员等不利因素决定了其不适合运用于快响发射领域。但这并不意味着火工连接解锁装置全面落后,而是非火工连接解锁装置所具备的优势更符合快响发射快速安全可靠的要求。因此,非火工连接解锁成为快响火箭机械接口的优选。

表1 火工与非火工连接解锁装置性能对比

Tab.1 Performance comparison of pyrotechnics and non-pyrotechnics connection unlocking devices

项目	火工解锁装置(爆炸螺栓)	非火工解锁装置(记忆合金拔销器)
适配卫星质量	吨级	1~20t
装置自身质量(以50kg以下卫星为例)/kg	5~9	1~2
分离解锁可靠性	0.9999(置信度0.85)	0.999999(置信度0.95)
可重复使用次数	1	>20
解锁冲击/g	≥1000	≤700
分离姿态精度/(°·s <sup>-1</sup> )	≤3	≤1
电磁兼容性	场强不大于7V/m时,爆炸螺栓不起爆	不含电子元器件
机动运输	专用包装箱	普通铝制包装箱
贮存要求	安全防爆	无特殊要求
安装操作	接口较多,对人员和操作空间要求高	接口简单,对人员和操作空间要求低
太空污染	有	无

选定非火工连接解锁装置后,再对其涵盖的4种方式作进一步优选分析。表2从卫星质量、质量占比、残留质量、可靠性、分离姿态、对接流程、机动

运输、贮存要求、安装操作等适合快响发射要求的9个方面展开比较,可以看出:a)包带的缺点是自身质量大、结构相对复杂、安装操作要求高、分离动态

包络较大。b) POD的缺点是自身质量大,且POD采用框体舱将卫星完全包裹进行支撑和固定,质量占比一般较大;摩擦干扰大,卫星需沿舱内导轨推出,完全分离行程较长,卫星与导轨间的摩擦影响分离角速度;适用卫星单一,POD要求卫星提供较长的导轨对接面,因此仅适用于框架结构的立方星,不适合其他承力形式的卫星。c)与包带和POD相比,点式和记忆合金拔销器在上述方面则拥有明显优势。

表2 非火工连接解锁装置性能对比

Tab.2 Performance comparison of non-pyrotechnics connection unlocking devices

项目	点式	包带	POD	记忆合金拔销器
卫星质量	5~500kg	≥200kg	≤20kg	1~20t
质量占比	小	大	大	小
星上残留质量	小	大	无	小
可靠性	高	高	高	高
分离姿态	同步	动态包络大	导轨摩擦	平稳
对接流程	简单	复杂	简单	简单
机动运输	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求
贮存要求	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求
安装操作	对人员要求高	对人员要求高	对人员要求高	安装操作简单

综合考虑快响发射任务需求、星箭贮存/维护/管理规范,兼顾可靠性和安全性以及操作人员的素质水平能力,对快响火箭星箭连接解锁装置提出优选建议如下:“点式+记忆合金拔销器”组合方式,即采用记忆合金驱动的点式星箭连接解锁装置,把机械对接接口、解锁装置、作动器、行程开关集成为一个转接装置,操作简便,无火工品,贮运安全,对比其他连接解锁装置具有明显优势,更适合快响发射。记忆合金拔销器四点式分离机构如图4所示。

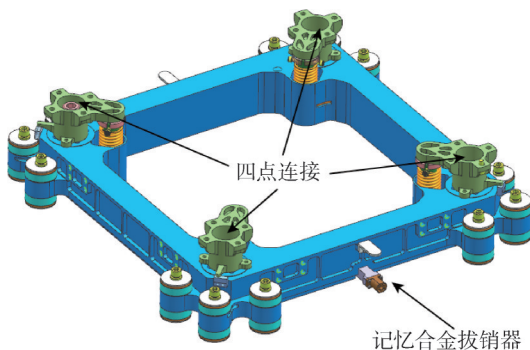


图4 记忆合金拔销器四点式分离机构

Fig.4 Memory alloy pin puller four-point separation mechanism

### 2.3.2 电气接口

根据星箭接口总体要求,为了实现操作设备少、操作程序简单、操作时间短、线路架设少的目标,有三种电气接口充电方案可供选择。

一是星箭对接后卫星基本无操作,即卫星与火箭之间不预留充电接口,对接后卫星供电由自带电池提供,扣罩后至发射前卫星不安排测试,不进行外部充电。二是星箭对接后卫星的充电和测试均通过无线模式完成。三是精简合并卫星和火箭各自现有的线缆数量,星箭对接后卫星与火箭共用插口和线缆完成充电、测试等相关工作。

第一种方案不充电,适用于正常发射状态,既可实现火箭统一状态批量生产后与卫星的快速对接发射,又能简化快响测试操作流程。第二种方案是无线充电,适用于突发紧急情况导致发射推迟,但发射任务并未取消,仍处于待发状态,此时快响火箭和卫星的充电和测试通过无线模式开展,无需连接外部电缆或拆动星箭外体。第三种方案是有线充电,适用于星箭一体化组装完成后,处于长期贮存状态下卫星与火箭的测试与充电,此时星箭利用尾插和共用线缆展开测试和充电工作。

虽然三种方案分别适用于不同的任务环境,但从快响发射的目标和发展趋势来看,“第一种方案+第二种方案”,即无线充电不预留充电接口的方式是快响火箭电气接口的优选模式。具体而言,当任务正常进行时,卫星不进行充电;如果发射推迟而卫星电量损耗超过限额时,则采用无线充电以保证卫星处于正常待发状态,无论哪种方案,火箭与卫星之间无需预留充电接口。

## 3 推动快响火箭星箭接口优选模式广泛运用的举措

为了加速快响火箭星箭接口优选模式的推广和应用,需要在以下方面继续努力。

### 3.1 做好顶层设计,出台国家标准

近年来,国内外相继颁布了一些与星箭接口相关的标准,如ISO14303—2002《航天系统——运载火箭与航天器接口》、BSISO15863:2003《航天系统——航天飞机与运载工具间接口的控制文献》、GB/T32302—2015《运载火箭和航天器接口要求》等,但只是对火箭与卫星的接口提出了通用性要求,没有对快响火箭星箭接口做出具体规范。因此需要加强快响火箭星箭接口的顶层设计,制定出台国家级标准,实现

以火箭快速对接、人员操作简化为目的,采用功能化集成、标准化生产、模块化组装的方式,优化接口设计,形成可插拔式即插即用的火箭接口模块,提升火箭对接效率和设备可靠性。标准既要考虑到简化、自动化、智能化的快响未来发展方向,又要兼顾目前固体火箭的性能参数,对火箭接口的数量要简单明确,满足“火箭批量生产、平时贮存、用时发射”的快响发射样式。

### 3.2 优化集成产品,广泛应用记忆合金拔销器连接解锁方式

记忆合金拔销器不是一个单独的产品,只有与火箭适配器配合使用才能发挥效用。未来的火箭适配器应实现标准化,经过简单的机械适配即可与不同型号的快响火箭连接,具备良好的通用性和可移植性,避免卫星与特定型号火箭绑定,从而提升快响发射效率,降低发射成本。同时,记忆合金拔销器应与火箭适配器实现高度集成,作为触发装置在预紧力、连接力、分离冲击、分离时间、尺寸及质量等性能方面满足解锁要求。集成后的连接解锁装置采用记忆合金致动方式、多级临近死点的连杆式压紧释机构以及多点连接构型,完成火箭非火工解锁分离,具备“宽承载、快响应、高可靠”的特点。目前,记忆合金拔销器已在多次航天发射任务中得到应用。下一步建议将此连接解锁方式广泛应用于快响发射领域。

### 3.3 发展无线技术,助力快响发射

发展固体火箭无线测发和无线充电技术,既可以减少火箭内外部电缆的数量,提高产品的可靠性,又可以在不拆卸火箭组合体的情况下完成对卫星的电量补充,突显操作的简捷性,是快响发射技术未来的发展方向之一。无线测发应秉承集成化、智能化、自主可控等原则,开展统一设计,简化测发流程,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,减少测发控设备的数量和体积,选用稳定可靠的国产元器件,实现自测试、自诊断、数据自动判读分析,在确保可靠性的前提下,增强设备的可移动性和快速展开部署能力,最终实现减少操作岗位甚至无人值守的目标。磁感应与磁谐振无线充电技术是目前相对成熟且较为适配快响火箭的两种方案。它们的工作功率较小,不会过多影响箭体的电磁兼容,也基本不会对工作区域的人员身体造成损害,同时具备能量传输效率高、损耗小、成本低等优点。磁感应技术成熟,工程化难度较低,其弊端是工作距离近,需要将充电器与卫星贴合才能以较高效率工作,这可能需要拆除整流罩,不利于快响发射。磁谐振有效工

作距离可达10 m,且对箭体摆放以及充电场地的要求宽松,但其工程化难度高,技术没有磁感应无线充电成熟。因此,磁感应无线充电是目前及未来一段时间内快响火箭无线充电的首选方案。

## 4 结束语

为满足快响固体火箭火箭接口的总体要求,使火箭接口进一步规范化、标准化和模块化,其机械接口连接解锁装置优选非火工模式,且采用“点式+记忆合金拔销器”组合方式,电气接口充电则优选无线充电不预留充电接口的模式,从而在保证火箭产品接口可靠性和快响发射操作便捷性的基础上,显著提升快响发射的工作效率。

### 参 考 文 献

- [1] 陈虹百,叶耀坤,丁锋,等.分瓣螺母解锁机构关键参数设计研究[J].载人航天,2021(4):451-457.  
CHEN Hongbai, YE Yaokun, DING Feng, et al. Investigation on design of key parameters of release device with segmented nuts[J]. Manned Spaceflight, 2021(4): 451-457.
- [2] 张健,武鹏飞,王亚坤,等.国外火箭连接解锁装置技术与应用研究[J].航天器工程,2023(4):125-126.  
ZHANG Jie, WU Pengfei, WANG Yakun, et al. Technology and application research of foreign satellite-launching-vehicle connection and unlocking devices[J]. Spacecraft Engineering, 2023(4): 125-126.
- [3] 胡星志.小卫星火箭分离系统设计、分析与优化研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.  
HU Xingzhi. Research on design, analysis, and optimization of separation systems for small satellites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [4] 盖玉先,梁潇,杨帅,等.非火工包带式火箭分离技术研究进展[J].机械设计与制造,2018(5):136-139.  
GAI Yuxian, LIANG Xiao, YANG Shuai, et al. Research progress of non-pyrotechnic clamp-band separation technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(5): 136-139.
- [5] 杨斌久,肖龙,盖玉先.包带式火箭分离非火工解锁装置研究进展[J].机械设计与制造,2018(Z2):178-180+184.  
YANG Binjiu, XIAO Long, GAI Yuxian. Research progress on non-pyrotechnic unlocking device of clamp-band separation for satellite and rocket[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(Z2): 178-180+184.

### 作 者 简 介

潘亮(1977—),男,高级工程师,主要研究方向为航天测试发射。  
李成(1979—),男,研究员,主要研究方向为航天测试发射。  
杨晓论(1968—),男,研究员,主要研究方向为航天测试发射。  
潘建平(1971—),男,高级工程师,主要研究方向为航天测试发射。  
张智宇(1993—),男,助理工程师,主要研究方向为航天测试发射。