

北斗三号卫星直接入轨专用平台设计研究

张旭, 周耀华, 丛飞, 嵇景全, 孙冠杰

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 针对北斗三号 24 颗中轨道 (MEO) 卫星组批研制、快速组网的任务要求, 提出了一种适于一箭多星发射、直接入轨的北斗卫星专用平台的方案并研究了平台关键分系统的核心技术。研究表明, 北斗卫星专用平台采用先进的桁架式结构以及综合电子体系架构, 具有集成度高、承载效率高、功率质量比大、卫星布局好等特点, 不仅有力支持了北斗三号卫星导航系统的建设, 对扩展卫星平台型谱, 提升宇航能力, 拓宽应用前景也具有重大意义。

关键词: 直接入轨; 桁架式; 专用平台

中图分类号: V412.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 06-0001-08

Research of the Dedicated Platform for Beidou-3 Satellite Directly into Orbit

ZHANG Xu, ZHOU Yaohua, CONG Fei, JI Jingquan, SUN Guanjie

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: There are 24 MEO (Medium Earth Orbit) satellites in the Beidou-3 satellite navigation system. In order to quickly complete the construction process, a dedicated platform was designed for Beidou satellites. The dedicated satellite platform was suitable for one mission to launch multiple satellites directly into orbit. In this paper, we also studied the key subsystems of the platform. The research shows that the dedicated satellite platform features high integration, strong carrying efficiency, high power-to-mass ratio, and good satellite layout.

Key words: Direct injection satellite; Truss-type; Dedicated satellite platform

0 引言

北斗三号卫星导航系统由 3 颗地球同步轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星、3 颗倾斜地球同步轨道 (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 卫星和 24 颗中轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星组成, 其中 24 颗 MEO 卫星构成全球卫星导航核心星座。与北斗二号 MEO 卫星相比, 新增星间链路、自主导航、搜索救援等功能, 导航精度等性能指标进一步提高, 功能进一步增强。运载火箭上面级具备轨道机动转移能

力^[1], 可以直接将卫星送入工作轨道。为满足组批生产、快速组网的任务要求, 工程总体决定北斗三号 MEO 卫星采用一箭多星发射、直接入轨的方式完成星座部署。性能提升、功能聚合、一箭多星、直接入轨的新要求对卫星平台提出了挑战。

通过调研和研究, 包括前期北斗二号一箭双星发射的 MEO 卫星^[2]在内的国内现有中小型卫星平台在平台构型、控推方式、热控方式、供电能力和在轨寿命等方面均无法满足北斗三号工程任务的新要求。为此, 提出了一种适于—箭多星发射、直接入轨的北斗卫星专用平台的方案并对平台关键分系统的核心技术进行设计。研究表明,

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-10-14

作者简介: 张旭 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为导航卫星总体设计。E-mail: zhangxu_cast@163.com

北斗卫星专用平台方案在机械、电气、热方面具有高承载比、高扩展、高自主、高可靠、长寿命的特点，其核心技术指标优于国外类似导航卫星平台。该平台的设计与研发，填补了我国桁架式直接入轨卫星平台的空白，对提升航天领域多星快速进入中高轨空间能力、扩展卫星平台型谱及提升宇航能力等都具有重要意义。

1 卫星平台选用分析

1.1 平台任务约束

在快速组网的约束下，为满足多载荷功能配置及性能实现，满足长期自主运行的需求，对卫星平台的需求如表1所示。

表1 北斗卫星专用平台需求

Tab. 1 The requirements of the dedicated satellite platform

指标	要求
最大承载能力/kg	$\leq 1\ 100$
平台主结构质量/kg	≤ 155
有效载荷/kg	≥ 280
有效载荷布局能力/m ²	≥ 8
有效载荷散热能力/W	$\geq 1\ 300$
供电能力/EOL W	$\geq 3\ 000$
姿态控制精度/(°)	滚动俯仰: ± 0.1 , 偏航: ± 0.5
寿命/a	10

1.2 平台需求

(1) 先进性

①需要先进高效能源系统，适应小型化、集

成化的要求，实现高质量功率比；能够实现中高轨卫星多模式能源自主管理策略，同时要实现卫星与运载/上面级之间的电气接口设计；

②需要采用先进的结构形式，实现高质量承载能力比，实现布局面积扩展；

③需要先进的综合电子体系架构，实现卫星的高效信息综合，实现卫星与卫星间信息的高效自主处理。

(2) 通用性

①国产化元器件与部件应用约束；

②批产化对设计和工艺一致性、稳定性、易于实现性的约束；

③高可靠、长寿命对卫星设计的约束。

(3) 专用性

①需要实现倾斜轨道对日定向偏航控制；

②需要实现对轨道连续性的保证，尽量减少喷气对导航任务的影响；

③需要采用简化的推进系统，以适应直接入轨方式；

④需要兼顾超过3 h的上面级转移轨道的热控需求，以适应直接入轨方式；

⑤需要满足导航卫星系统长时间自主运行要求。

1.3 已有平台选用分析

从运载能力及整流罩包络空间的基本约束考虑，与北斗三号直接入轨 MEO 卫星要求相近的卫星平台如表2所示。

表2 性能接近的卫星平台主要技术指标

Tab. 2 Key indicators of similar satellite platforms

卫星平台系列	CS-L3000A	CAST968 平台	DFH-3 平台
平台尺寸/mm	1 780×1 980×1 300	1 200×1 200×1 050	2 000×1 720×2 000
平台主结构质量/kg	240	65	175
最大承载能力/kg	2 000	1 000	2 320
布局面积/m ²	4	2. 8	6
散热能力/W	1 200	800	1 500
有效载荷/kg	300~800	350	230
供电能力/EOL W	2 300	1 000	1 800
姿态控制精度/(°)	0. 1	0. 3	滚动俯仰: ± 0.15 ; 偏航: ± 0.5
姿态机动能力	$\pm 4^\circ$ 侧摆机动	无	有
寿命/a	5	3	8

经过分析比较，现有中小型卫星平台很难同时满足直接入轨卫星在承载能力、布局面积、散热能力、供电能力以及寿命要求，即使做适应性改造，其代价也非常高。由于无合适成熟平台选用，必须研制适于—箭双星直接入轨发射的高集成度、长寿命、小型化的 MEO 卫星平台。

2 北斗卫星专用平台设计方案

2.1 平台方案

(1) 平台电子系统设计

卫星平台电子系统一般分为集中式和分布式

两种体系结构^[3]，针对姿轨控、能源、热控、载荷等星上任务高效可靠的管理和控制需求，经综合分析评估，北斗卫星专用平台采用分布式综合电子系统结构。该体系结构主要由硬件平台和软件平台组成。

硬件平台基于模块通用化、接口标准化的设计理念，采用分级分布式总线架构，主要包括负责星务管理、计算任务的中心管理单元，负责遥测遥控、星间数据处理的数据路由单元，负责星载设备接口的综合接口单元等硬件设备，如图 1 所示。

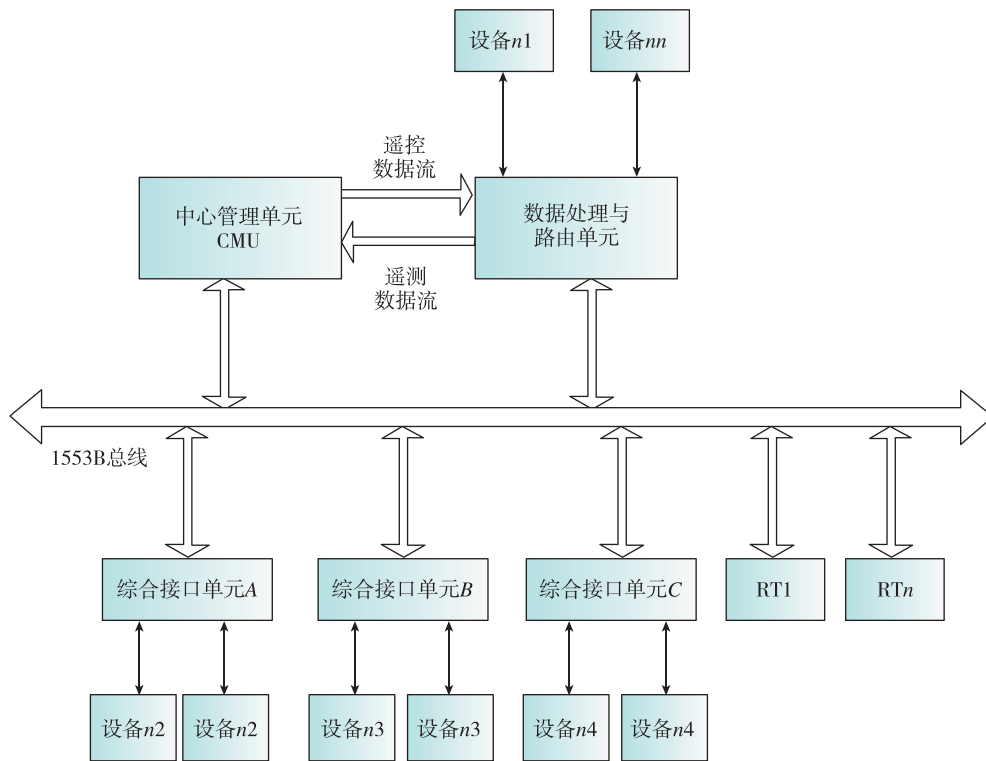


图 1 北斗卫星专用平台电子系统拓扑关系

Fig. 1 Topological relationship of electronic system of Beidou satellite dedicated platform

软件平台采用分层设计，包括硬件层、中间层和应用层^[4]，如图 2 所示。硬件层建立在星载硬件设备、模块和处理器上，具备统一的实时操作系统内核，向软件中间件层、应用软件开发提供标准化的系统调用接口；中间件层是位于硬件层操作系统平台和应用层之间的通用服务系统，具有标准的程序接口和协议，可实现不同硬件和操作系统平台上的数据共享和交互支持；应用层实

现最终的系统功能，专注于功能的逻辑特性。

(2) 构型布局设计

与其他卫星类似，北斗卫星专用平台结构主要用于承载全部设备，并承受运载火箭/上面级各级发动机工作产生的过载，保证卫星各产品的飞行状态。平台构型布局的约束条件主要包括两个方面，一个是运载/上面级约束，另一个是整星设备布局的约束，如表 3 所示。

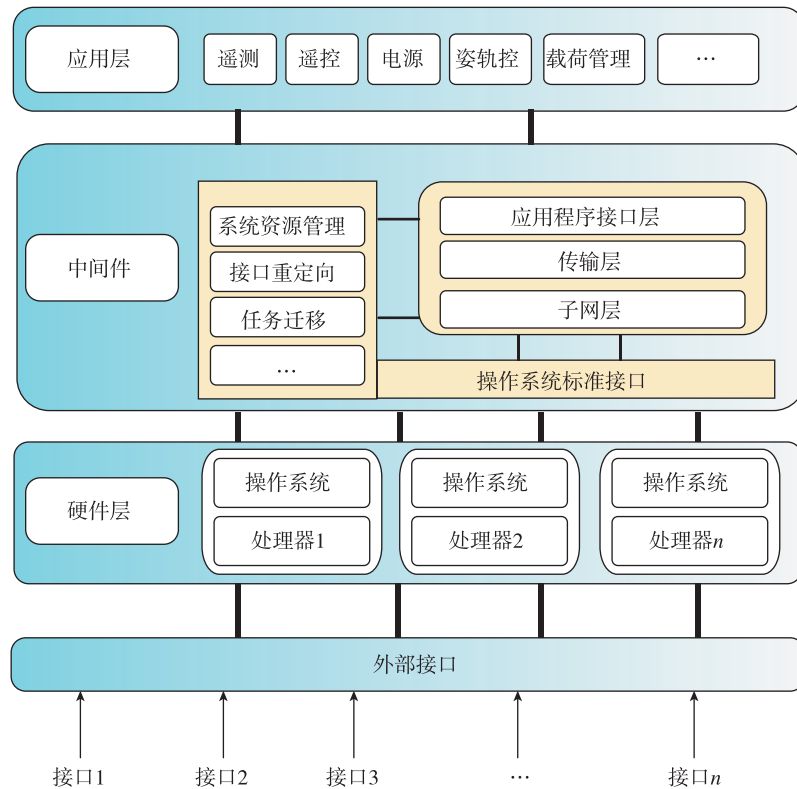


图2 综合电子软件体系结构

Fig. 2 Integrated electronic software architecture

表3 构型布局的约束条件

Tab. 3 Constraints on configuration layout

约束条件	项目要素	要求/指标
运载火箭/ 上面级 约束条件	运载能力	满足运载最大承载要求
	运载包络尺寸	满足整流罩内包络要求
	运载刚度要求	满足对卫星基频要求
设备布局 约束条件	散热	满足卫星有效散热
	设备安装位置	满足设备安装与散热
	视场	视场、太阳翼受照不能遮挡
	羽流	羽流的热、力不影响卫星工作
质量特性		满足运载和卫星控制系统要求

针对运载/上面级和设备布局约束等要求，卫星总体比较了承力筒式、板架式、桁架式等卫星构型方案^[5]，经综合分析评估，决定采用桁架式结构作为北斗卫星专用平台的主承力结构，如图3所示。卫星的构型由桁架结构和连接在桁架上的蜂窝夹层结构板组成，具有刚度高、装配简单、加工精度易保证、质量小等特点，满足批量化投产和快速研制的要求。考虑最优的传力路径和承载要求，星箭连接方式采用点式爆炸螺栓。

在基于载荷功能分区及组批生产的指导思想

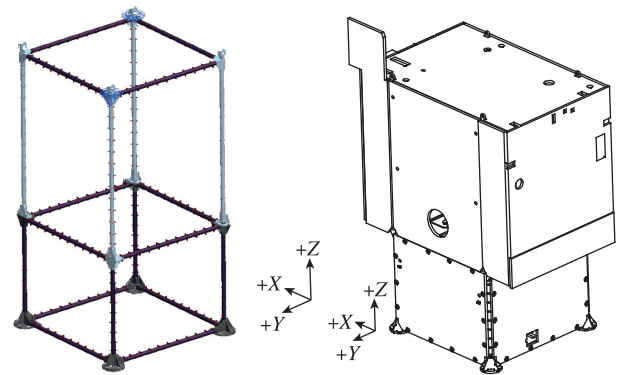


图3 北斗卫星专用平台构型

Fig. 3 Configuration of the Beidou satellite dedicated platform

下，北斗卫星专用平台的布局设计，按照先星外、后星内的原则。首先，划分星外载荷功能区，满足星外天线、太阳翼等大部件及推力器等的安装要求；其次，划分舱内功能区，以满足分系统/系统性能为首要目标进行设备布局，按照产品的成熟度及地面测试需求，由内向外布局，成熟度低的产品，靠近星外，便于拆装，地面测试需要操作的产品，靠近星外，便于操作；最后，复核整星质量特性，微调舱外及舱内设备布局，完成布局设计工作，如图4所示。

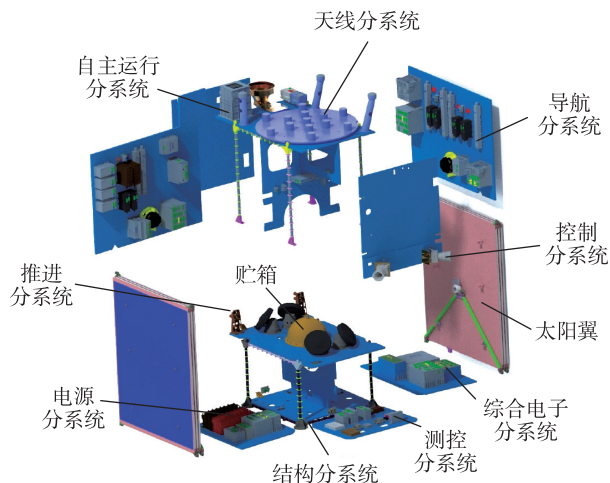


图 4 北斗卫星专用平台布局图

Fig. 4 Layout of the Beidou satellite dedicated platform

2.2 专用平台关键分系统核心设计

北斗卫星专用平台主要包括结构、姿轨控、综合电子、电源、热控、测控等分系统组成，在直接入轨的约束下，为满足卫星长期自主运行，重点对平台姿轨控、电源等有特殊需求的关键分系统进行详细介绍。

(1) 姿轨控设计

姿轨控分系统通过对卫星不断测量、计算和控制，使得卫星获得比较理想的轨道和姿态。北斗三号 MEO 卫星对在轨偏航机动、自主运行的需求大幅提升，且在自主运行期间，卫星不能进行轨控、姿态控制。

相对于北斗二号卫星，北斗三号卫星专用平台控制分系统设计时引入了星敏感器定姿^[6]，新增了基于星敏感器定姿的模式和方式，从而使卫星的姿态确定精度有了明显的提升；采用三轴全轮控设计，在轨工作期间 3 个及以上轮子工作，实现三轴主动控制，保持偏航机动、推力器不工作，通过优化控制器参数、规划偏航轨迹等措施，实现较高的控制精度。控制分系统从北斗三号星座构型保持出发，实现星上自主轨道控制；在综合电子系统架构下，控制分系统信息获取、数据处理能力大幅提升，形成了系统-部件两级的自主故障诊断、处理体系，实现了故障自主诊断自主处理与系统自主重构等功能，满足在轨自主运行要求。

其控制分系统组成如图 5 所示，推进分系统组成如图 6 所示。

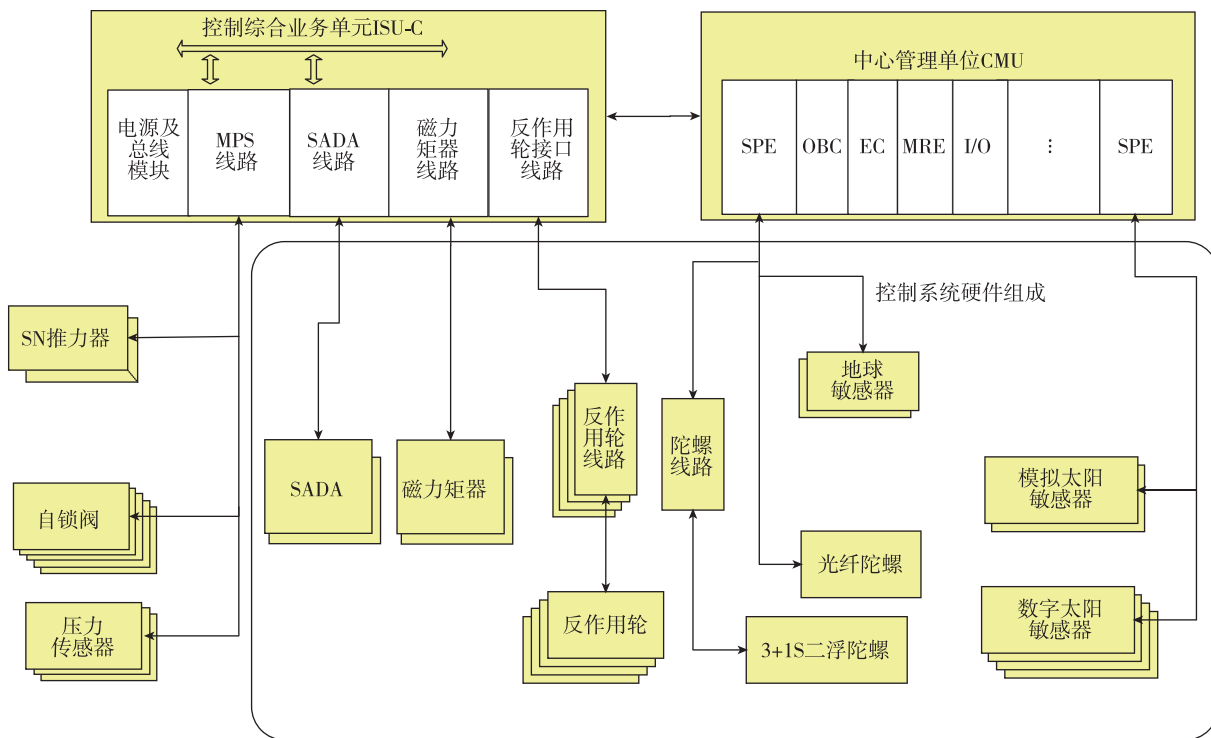


图 5 北斗卫星专用平台控制分系统组成

Fig. 5 The composition of the control subsystem of the Beidou satellite dedicated platform

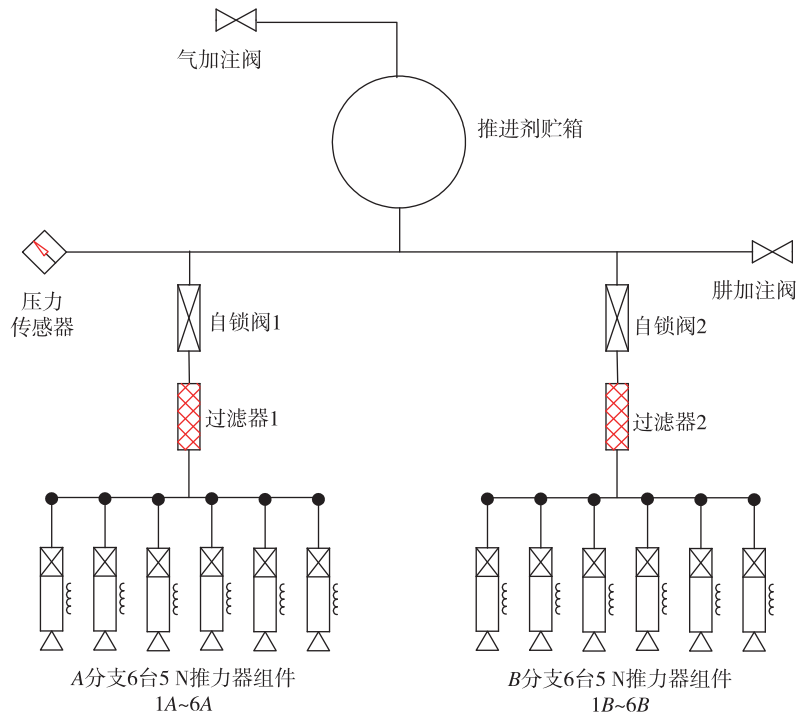


图6 北斗卫星专用平台推进分系统组成

Fig. 6 The composition of the propulsion subsystem of the Beidou satellite dedicated platform

按照直接入轨的要求，推进分系统作为姿轨控的执行机构，在卫星与上面级分离后，为整星提供相位捕获、相位保持、相位调整及姿态控制所需要的推力及控制力矩。在设计上，推进分系统以实现系统简洁、高可靠为目标。单单元化学推进方案，结构简单、系统干重小、可靠性高、比冲适中，广泛应用于国内外中小型卫星领域^[7]。

(2) 能源设计

能源分系统承担着整星供电和配电的功能。北斗三号 MEO 卫星能源设计要求安全可靠、能适应新增的上面级转移轨道段及正常工作的供电需求，又要能源系统质量小满足整星发射质量要求，需要从拓扑结构、太阳能电池阵及蓄电池组等多方面开展，实现高的功率质量比。

能源分系统采用直接能量传输、全调节单母线方式^[8]、S3R 拓扑结构，母线电压 42 V，通过主误差放大器 MEA 实现分流、充电、放电等工作模式下的母线电压调节，母线电压稳定，有利于卫星负载的使用，而且各功能均采用模块化设计，扩展性好，有利于批量生产。为适应上面级直接入轨的需要，优化上面级供电拓扑、箭内星用电池等设计，既满足转移轨道段可靠、安全用电需求，又降低了星上蓄电池组容量及质量。

能源系统的质量主要由太阳能电池阵、蓄电池

组以及功率调节与控制装置、电缆网等组成。为了满足质量要求，选用平均光电转换效率超过 28% 的三结砷化镓太阳电池，可以增大功率的同时减少布片，进而减小整星质量；选用电压平台、比能量更高、发热量更小的锂离子电池，电池组功率密度高、体积小、质量小；采用集分流、充放电、管理和通信等功能于一体的高功率密度、模块化的电源控制器。在配电设计上，通常低频电缆网质量占整星干重的 3%~10%，北斗三号卫星实现了接插件、导线选型优化、屏蔽及电缆网走向布局优化等。设计结果表明，MEO 卫星功率质量比提高至 17 W/kg。

能源系统工作原理图如图 7 所示。

3 北斗卫星专用平台主要特点

3.1 构型新颖，星箭接口简单可靠

实现了满足一箭多星、直接入轨发射方式的桁架平台构型，桁架式主承力可分舱式的卫星构型实现了高承载效率、高设备布局面积、可分舱总装、满足一箭多星发射及点式星箭连接方式的卫星构型及主结构，主要设计指标如承载效率、载荷平台质量比、功率质量比等优于国外类似导航卫星平台。

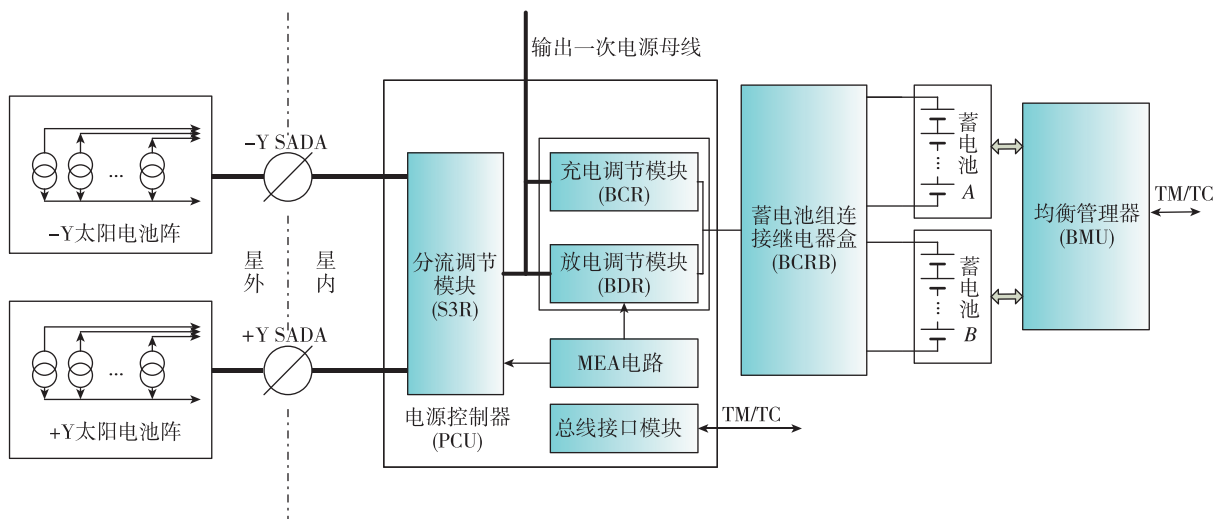


图 7 北斗卫星专用平台电源分系统组成

Fig. 7 The composition of the power subsystem of the Beidou satellite dedicated platform

实现了适用于一箭多星（上面级）直接入轨发射的星箭接口技术，适于多星底部支撑并排放置的点式连接、星箭火工分离的爆炸螺栓连接的全新星箭机械接口形式，以及适于上面级转移轨道段的全新星箭电气和热接口形式。

3.2 灵活可扩展

在机械、能源、热控等方面，采用集成优化设计方案，在桁架式主承力可分舱卫星构型的基础上，实现了满足一箭多星发射需求和点式星箭连接方式的结构特性、传力路径、高承载能力、基于结构板和板架的灵活适应多种增量构型设计的能力，以及包络化、柔性工装接口设计；实现了对多种增量载荷灵活组合的扩展适应。

3.3 信息流一体化

北斗卫星专用平台从系统角度采用信息流一体化设计，实现了星地、星间、星内各类数据格式的统一兼容，具备测控通道、载荷通道、星间通道的互联互通功能，提高了系统信息流传输的可靠性。

4 平台应用情况

截至目前，应用北斗卫星专用平台成功发射 16 颗 MEO 卫星。在轨飞行结果表明，卫星结构设计满足运载火箭主动段过载载荷，平台能力均满足整星工作要求。

在布局设计上，在整星 T 字构型的基础上，通过结构扩展、次级结构等措施实现了载荷布局面积的提升，有效布局能力达到 8 m^2 ，散热能力

最大达到 $1\,500 \text{ W}$ ，支撑了多种不同有效载荷配置状态的整星设计实现。在结构设计上，应用桁架式结构及星箭接口冲击响应缓冲技术^[9]，如图 8 所示。在轨实测数据表明，星箭界面及星内振动环境数据在地面试验环境的包络范围内^[10]。

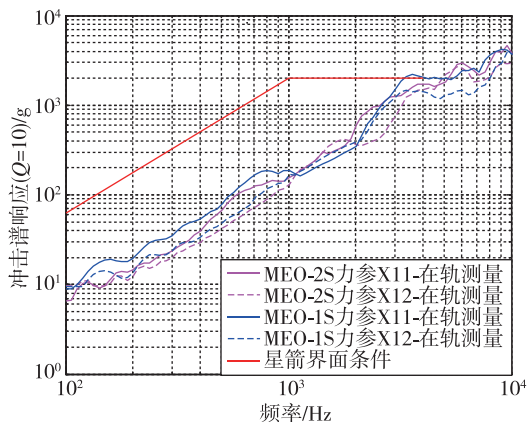


图 8 MEO 卫星星箭分离时刻星箭接头冲击响应
Fig. 8 Shock response of the satellite joint at the moment of separation

运载火箭主动段及卫星在轨飞行状态表明，在能源设计上，专用平台与上面级供电接口既满足了卫星与上面级分离前 5 h 以上的用电需求，又最大限度减小了能源系统的质量；光照期太阳电池阵实际输出功率达到 $4\,000 \text{ W}$ ，地影期蓄电池放电深度不超过 20%，满足有效载荷及整星工作需要。在信息流设计上，整星遥测数据、遥控数据、有效载荷业务数据、星间链路数据等传输可靠、稳定，星座连续运行稳定。

5 结论

本文针对北斗卫星专用平台的设计特点进行了总结,简要介绍了北斗卫星专用平台的设计思路。从发展的眼光来看,北斗卫星专用平台与当今最先进的卫星平台还有差距,但它的成功研制为我国北斗全球卫星导航系统组网建设任务做出了巨大贡献,其桁架式结构、综合电子集成化设计、模块化设计理念等为我国批产卫星的研制、多星发射等总体类设计过程提供了应有的技术支持。后续还需要进一步挖掘北斗卫星专用平台的能力,突破高承载结构、智能综合电子、高精度推进等关键技术,为我国下一代导航卫星的设计打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 唐军刚,陈塞崎,陈益,等.国内外运载火箭上面级发展现状分析[J].中国航天,2012(9):5-10.
- [2] 范本尧.卫星导航系统及其在空天安全中的重要作用[J].航天器工程,2011,20(3):12-19.
- [3] 刘帅,王虎妹.卫星综合电子系统体系结构总体技术研究[J].空间电子技术,2015,12(6):90-94.
- [4] 常克武,贾卫松.北斗导航试验卫星综合电子软件研制管理经验与启示[J].航天器工程,2016,25(4):108-112.
- [5] 肖伟,陈忠贵,钱志英.一箭多星发射直接入轨的卫星构型研究[J].航天器工程,2012(1):43-47.
- [6] 蒙艳松.导航卫星技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018.
- [7] 何永英,王倩,杨芳芳.星用单元肼推力器工作性能分析及飞行验证[J].上海航天,2019(S2):56-60.
- [8] 陈世杰,孙世卓,付大伟,等.上面级直接入轨卫星火箭供电接口设计与验证[J].航天器工程,2019,28(1):84-89.
- [9] 谢军,王金刚.北斗-3卫星的创新和技术特点[J].国际太空,2017(11):4-7.
- [10] 朱剑涛,刘晨,钱志英,等.一箭多星发射的卫星振动环境分析与验证[J].航天器环境工程,2017,34(3):277-283.
- 引用格式:张旭,周耀华,丛飞,等.北斗三号卫星直接入轨专用平台设计研究[J].宇航总体技术,2020,4(6):1-8.
- Citation: Zhang X, Zhou Y H, Cong F, et al. Research of the dedicated platform for Beidou-3 satellite directly into orbit [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(6): 1-8.