

北斗三号卫星与上面级供电相关接口分析及验证

曾毅¹, 贾蒙杨², 鲍恩竹¹, 陈世杰¹, 杜卓林¹, 陈定辉³

- (1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;
3. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094)

摘要: 卫星采用运载火箭上面级发射入轨期间, 经历了由大椭圆轨道至圆轨道的过程, 飞行姿态经历了变轨、慢旋、分离后巡航等多个阶段。在太阳翼展开前, 卫星要经历比自身变轨更为恶劣的高低温环境及能源紧张等供电风险。在分离时刻的太阳翼碰撞或干涉安全性也需要重点关注和分析。针对北斗三号一箭双星采用上面级直接入轨方式的特点, 分析了卫星与上面级间的供电和热设计接口, 并从双星分离安全性角度考虑, 分析影响卫星与上面级接口安全性的主要要素, 并对应用和验证情况进行总结。

关键词: 上面级; 直接入轨; 星箭电源接口; 转移轨道

中图分类号: V423.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 06-0056-06

Analysis and Verification of the Electrical Power Interface Between Beidou-3 Satellites and Upper Stage

ZENG Yi¹, JIA Mengyang², BAO Enzhu¹, CHEN Shijie¹, DU Zhuolin¹, CHEN Dinghui³

- (1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
3. Troops 61741 of PLA, Beijing 100094, China)

Abstract: When two Beidou satellites are carried by upper stage from large ellipse orbit to round orbit, the flight attitude experiences the orbit maneuver, the slow rotation, the cruise after separation and so on. Before the deployment of solar wings, the satellites experience more severe temperature environment than traditional orbit maneuver by itself, and power supply shortage such as battery over discharge. And the collision or interference safety of the solar wings at the moment of separation also needs to be focused on and analyzed. This paper analyzes the power supply and thermal design interface between the satellite and the upper stage according to the characteristics of the direct orbit entry mode of the upper stage, and analyzes the main factors affecting the safety of the interface between the satellite and the upper stage from the perspective of the safety of the separation of the two satellites, and summarizes the application and verification.

Key words: Upper stage; Direct orbit injection; Satellite-rocket power interface; Transfer orbit

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-10-15

作者简介: 曾毅 (1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星电源总体设计。

E-mail: zengyi02@tsinghua.org.cn

0 引言

上面级是在常规基础级运载火箭上增加的相对独立的一级运载工具,是航天器运输系统的重要组成部分,具有较强的任务适应性^[1]。相对于常规的基础级运载火箭,上面级具有自主飞行、多次启动、较长时间在轨工作等显著特点,能够实现一箭多星发射和轨道部署^[2]。美国从第六代GPS导航卫星开始,便采用上面级直接入轨策略^[3]。欧空局利用俄制Fregat上面级完成了伽利略卫星的发射^[4]。中国从第三代导航卫星开始,采用一箭双星上面级直接入轨方式。

北斗三号卫星采用一箭双星上面级直接入轨方式,受可展开空间和变轨期间安全性的限制,上面级和基础级分离后,卫星无法对太阳翼进行展开操作,仍需依靠蓄电池作为主要能源。由于转移轨道段时间较长,如果该过程中全部能源由蓄电池组提供,蓄电池组设计容量大于在轨实际所需容量,增加了卫星的起飞质量,同时造成在轨应用资源的浪费。按照一个功率等级3 kW的中地球轨道卫星全部由卫星自带蓄电池组供电,蓄电池组的容量需要增加20%,质量增加12 kg,给卫星设计带来负担^[5]。转移轨道段采用上面级供电方式,既可以降低卫星的起飞质量,也可以解决上面级转移轨道段至星箭分离时卫星用电难题,对提升卫星转移轨道段用电的可靠性和安全性有着重要意义。

卫星采用运载火箭上面级发射,与上面级组合体飞行时间约4 h,卫星与上面级分离后约40 min后帆板展开,这一过程同采用自身变轨的导航、通信卫星有较大差别。在这期间,卫星飞行轨道经历了由大椭圆轨道至圆轨道的过程,卫星的飞行姿态经历了变轨、慢旋、分离后巡航等多个姿态。星箭对界面的温度是卫星和上面级内设备工作温度的分析基础,其中分离电连接器所处的环境最为恶劣。双星采用起旋+弹簧弹射方式进行同时分离,在分离时刻的碰撞或干涉安全性风险也需要重点关注和分析。

本文针对北斗三号一箭双星上面级直接入轨方式的特点,分析了卫星与上面级间的供电和相关热接口,并从双星分离安全性角度考虑,分析影响卫星与上面级接口安全性的主要要素,并对应用和验证情况进行总结。

1 接口安全性设计原则

北斗三号采用一箭双星上面级直接入轨方式,其接口设计难点主要包括3个方面:1)两个系统之间电接口的电接口匹配性问题,设计时应确保系统供电潜通路不会对供电安全性和遥测准确性造成影响,防止出现母线电压不匹配或负载剧烈变化导致双星相互影响的问题;2)在上面级转移轨道阶段,卫星要经历更为恶劣的高低温环境,需要确保分离电连接器在产品安全裕度内,确保可靠分离;3)到达目标轨道后,双星采用起旋+弹簧弹射方式进行同时分离,需要重点关注双星分离时刻的碰撞或干涉风险。

2 供电接口设计分析与验证

2.1 系统供电原理

为了确保整个发射入轨过程中卫星能源安全,并为故障处置留有足够的供电余量,上面级直接入轨发射过程中由上面级向卫星供电,以节省卫星自身携带的能源,并降低卫星散热的压力。卫星自身采用高性能的全调节母线供电设计,因此上面级向卫星供电也必须是略高于卫星供电电压的高品质电源。上面级向双星供电的系统关系如图1所示^[7]。

从射前准备阶段到双星与上面级分离,星上设备供电需要从地面供电转换到上面级供电,再转入卫星自身供电,需要设计合理的切换顺序。经历多次一箭双星发射后,结合上面级和卫星射前准备工作的优化,整个供电转换时序也不断优化。整星加电至射前2 h,双星采用地面电源供电;射前2 h至卫星与上面级分离,采用上面级电源供电;卫星与上面级分离至卫星太阳翼展开前,卫星由自身携带的蓄电池组供电。为确保3种供电系统的安全性,在地面电源、上面级电源和卫星电源的电压输出端都设置隔离二极管,确保3类电源都不会发生电流倒灌故障。

2.2 系统供电潜通路影响分析

虽然卫星和上面级均设计为电源母线回线单点接地,但双星与上面级对接后,整个组合体将有3个供电回线接地点,供电电流回路存在潜通路,如图2所示。卫星1与卫星2基准地之间通过卫星支架与井字梁相联,则卫星1与卫星2一次回线间将存在一条潜通路,卫星1功率回线可能通过

上面级结构流向卫星 2 功率回线，然后回到上面级供电控制器；卫星 2 功率回线也可能通过上面级结

构流向卫星 1 功率回线，然后回到上面级供电控制器。

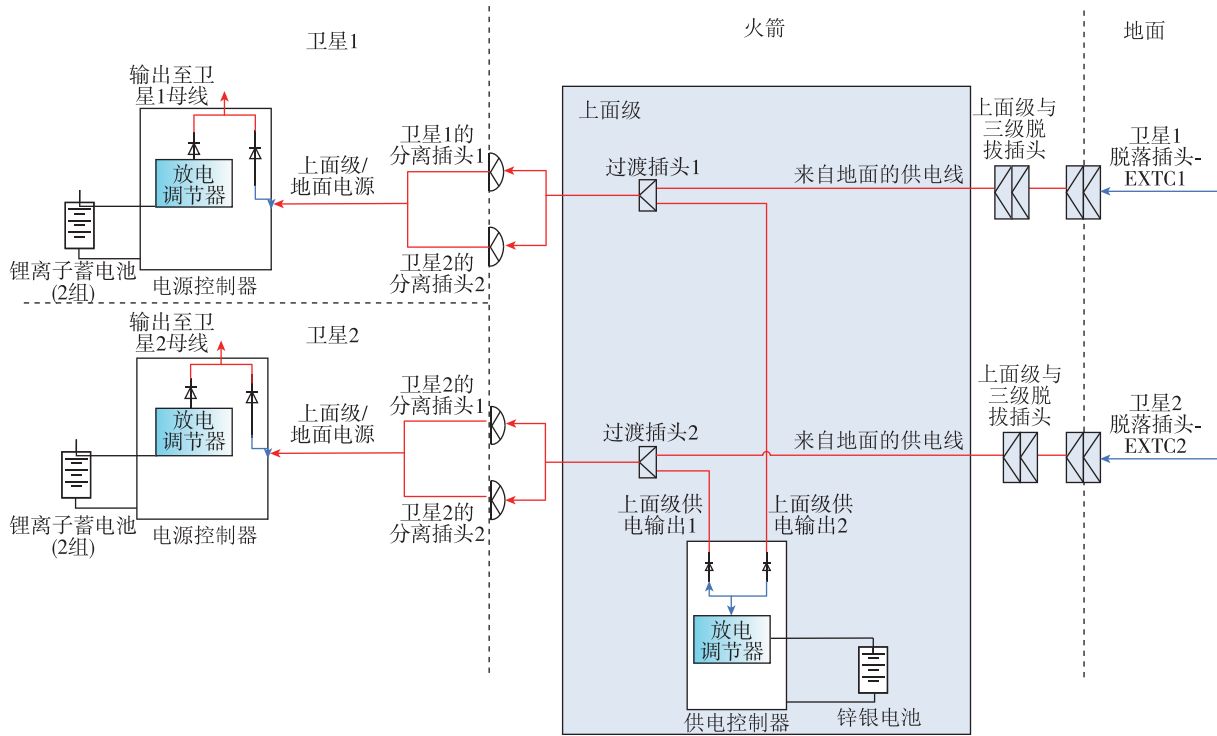


图 1 地面、上面级和卫星 3 种电接口关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three electrical interfaces of ground, upper stage and satellite power

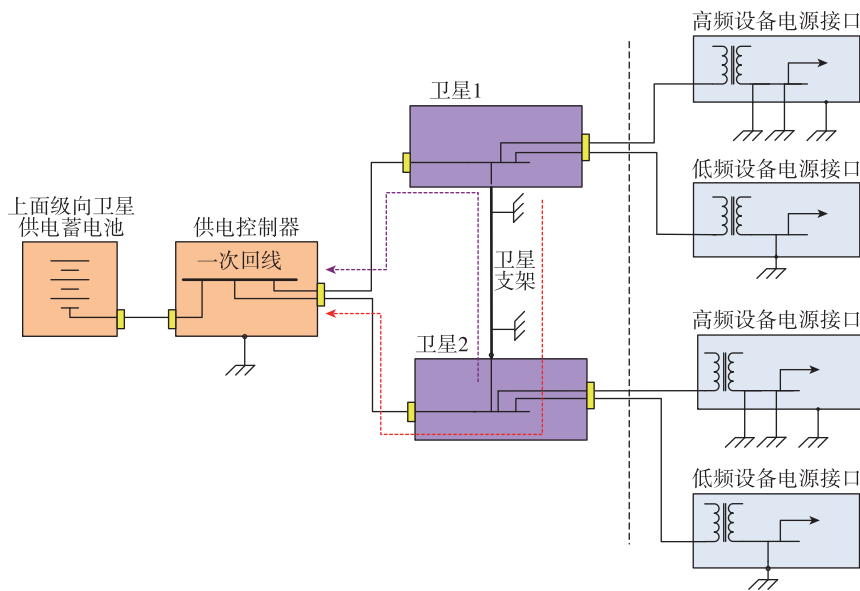


图 2 上面级接地潜通路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of upper stage grounding sneak circuit

由于供电的耦合特性，双星供电电流回线通过卫星支架连接，供电阻抗和负载电流的不同导致潜通路电流必然存在。经试验验证，双星负载电流差异越大，潜通路电流越大。负载差异 10 A，

潜通路电流 2 A。双星电源控制设备设计时，电源控制设备和电缆通路可以承受最大 10 A 的潜通路电流，确保该电流不会对供电安全性和遥测准确性造成影响^[6]。

2.3 上面级转卫星供电瞬态特性分析与验证

上面级供电输出到卫星母线的电压设计为 43~45 V，高于卫星电源系统调制电压，上面级为卫星供电输出，卫星 PCU 工作于分流域的最上端，供电不输出。当上面级切换为卫星供电时，上面级电源突然切断，卫星端电源系统开始调制，由于卫星电源系统 PCU 采用 S3R 三域调节技术，PCU 需要从分流域最上端经过分流域、充电域、放电域才能完成稳定的母线电压输出，由于此时上面级已不输出，PCU 调节过程会导致卫星母线电压出现一定幅度的下跌。PCU 需要从分流域最上端经过分流域、充电域、放电域从而建立母线电压，是大幅度的跨域调节，对 PCU 控制系统的稳定性是一个考验，在设计上需要关注。上面级转卫星供电时 PCU 工作点示意如图 3 所示。

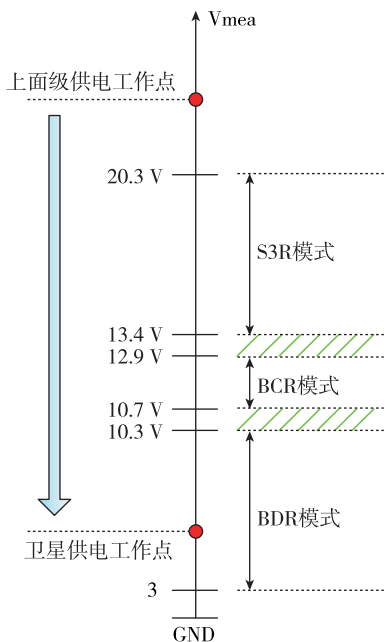


图 3 上面级转卫星供电时 PCU 工作点示意

Fig. 3 Working point of PCU during power supply switch from upper stage to satellite

经试验验证，在上面级转卫星供电过程中，母线下跌最大幅度不超过 6 V，恢复时间小于 10 ms，母线最低电压大于 37 V，在此过程中，平台单机工作稳定，没有单机发生欠压保护或复位的现象，可以保证整星供电安全。上面级转卫星供电母线瞬态波形如图 4 所示。

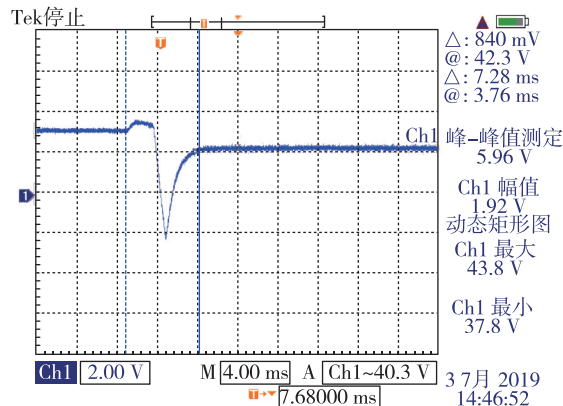


图 4 上面级转卫星供电母线瞬态图

Fig. 4 Transient diagram of power bus from upper stage to satellite

3 热接口分析与验证

3.1 分离电连接器热分析与验证

北斗二号采用卫星自身变轨方式，分离电连接器在射前 10 min 转卫星蓄电池供电后就不参与整星工作，因此分离电连接器的温度情况就不需要关注。北斗三号在上面级转移轨道阶段，上面级通过分离电连接器给卫星供电，分离电连接器的分离特性关系到星箭能否正常分离的系统间接口，必须保证可靠分离。分离电连接器安装在卫星-Z板外表面，所处的空间环境较为复杂，考虑到分离电连接器结构较为复杂，出于突出主要矛盾、简化热分析模型的目的，进行如下合理的简化假设：

- 1) 忽略与分离电连接器相连的电缆和周边的支架对分离电连接器温度的影响因素。
- 2) 为简化模型，将上面级转移轨道所经历的不同轨道段处理为一个统一的轨道参数。

通过热分析和在轨验证，分离电连接器低温工况下分离电连接器最低温度不低于 10℃，高温工况下分离电连接器最高温度不大于 70℃，满足产品的安全裕度。转移轨道分离电连接器温度变化如图 5 和图 6 所示。

3.2 星箭对接面热分析与验证

卫星采用运载火箭上面级发射与上面级组合体飞行时间约 4 h，卫星的飞行姿态经历了变轨、慢

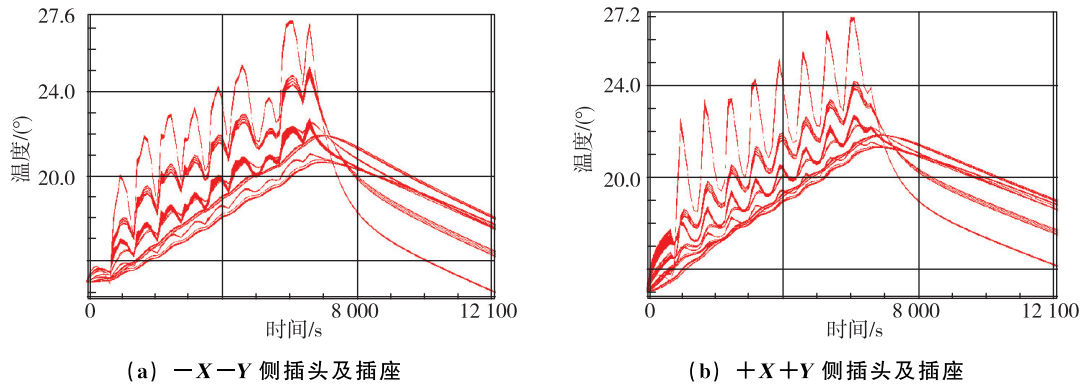


图 5 低温工况分离电连接器温度变化曲线

Fig. 5 Temperature change of separated electrical connector under low temperature condition

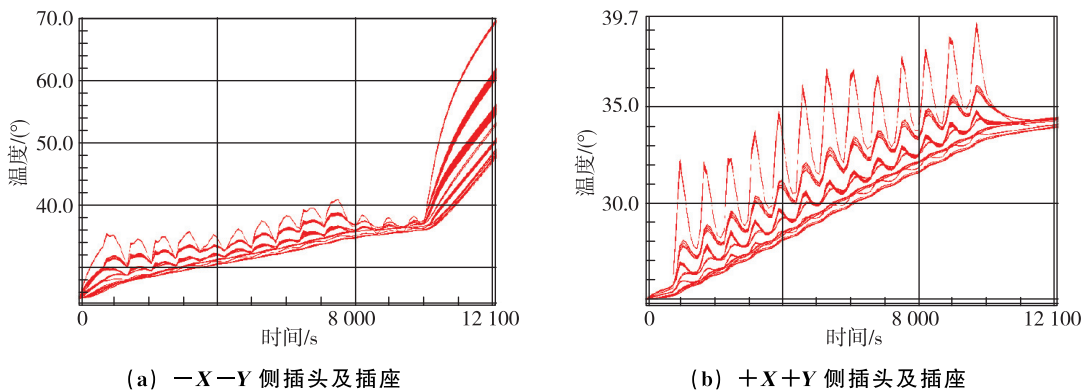


图 6 高温工况分离电连接器温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change of separated electrical connector under high temperature condition

旋、分离后巡航等多个姿态，星箭对界面的温度是卫星和上面级内设备工作温度的分析基础。星箭对接处的温度主要受上面级卫星支架、分配器及卫星服务舱的影响。其热设计状态主要如下：

1) 整个分配器支架的外表面均为散热面，喷涂 KS-Z 白漆，分配器支架上端面粘贴聚酰亚胺薄膜镀铝二次表面镜，仪器安装板下面板喷涂 SR107 白漆；

2) 分配器支架上端面包覆一层 50 μm 厚的聚酰亚胺薄膜，外面再粘贴一层 25 μm 防静电聚酰亚胺薄膜镀铝二次表面镜压敏胶带；

3) 卫星支架包覆 10 单元多层隔热组件，最外层为 25 μm 防静电 F46 镀银二次表面镜。

通过热分析和验证，其在低温工况和高温工况时的温度分别如图 7 和 8 所示。从上述图可以看出，卫星支架上星箭对接处在低温工况的温度在 -12~+15℃ 范围内，在高温工况的温度在 +5~+25℃ 范围内，满足卫星支架星箭对接处提出的温度指标要求为 -15~+30℃。

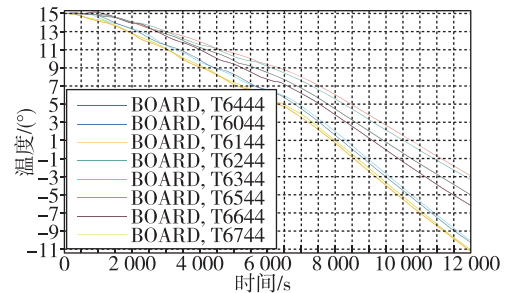


图 7 低温工况卫星支架上星箭对接处温度

Fig. 7 Temperature of satellite and rocket docking on satellite support under low temperature condition

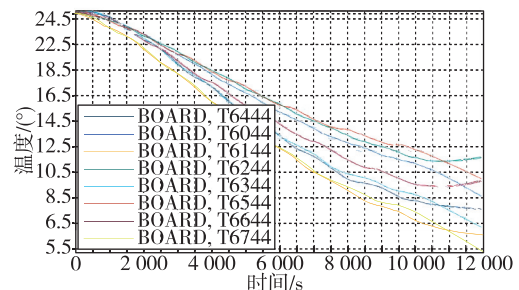


图 8 高温工况卫星支架上星箭对接处温度

Fig. 8 Temperature of satellite and rocket docking on satellite support under high temperature condition

4 分离时刻太阳翼安全性分析

常规的卫星采用一箭一星发射方式,不需要考虑分离时刻卫星的碰撞情况。采用一箭双星直接入轨发射方式,由上面级将卫星直接送入工作轨道高度,双星采用起旋+弹簧弹射方式同时分离。分离时刻两卫星质心最小距离及太阳翼展开最小安全时刻直接关系到分离时刻整星的安全,要避免发生碰撞或干涉风险。两卫星的太阳翼展开状态最远点之间距离变化随着时间变化而扩大。

通过动力学模型分析验证,两颗卫星分离过程中不会相互接触,分离过程是安全的。在分离1 min后双星质心距离大于16 m,可满足双星同时展开太阳翼无碰撞风险的要求。目前太阳翼展开时机是与上面级分离后35 min,满足上述条件要求,可以确保整星分离安全。

5 结论

本文针对北斗三号一箭双星上面级直接入轨方式特点,分析了接口安全性设计原则,并通过实际飞行结果进行了验证。综合全文,可以得到如下结论:

1) 上面级与双星两个系统之间供电潜通路不会对供电安全性和遥测准确性造成影响,在上面级转卫星供电过程中,电压下跌幅度小于6 V,平台单机工作稳定,可以保证整星供电安全。

2) 在上面级转移轨道阶段,对系统安全最重要的分离电连接器所处的温度环境在产品安全裕度内,确保分离可靠展开。

3) 采用一箭双星直接入轨发射方式,双星采用起旋+弹簧弹射方式进行同时分离,两颗卫星分离过程中不会相互接触,分离过程是安全的。

参考文献

- [1] Kloster K W, Yam C H, Longuski J M. Saturn escape options for Cassini Encore Missions[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2009, 46(4):874-882.
- [2] Kerslake W R, Ignaczak L R. Development and flight history of the SERT II spacecraft [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993,30(3): 258-290.
- [3] Caveny L H, Geisler R I, Ellis R A, et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the united states [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003,19(6): 1038-1066.
- [4] 崔波,曾毅,张晓峰. Galileo 导航卫星电源技术概述 [J]. 航天器工程, 2010,19(6):115-120.
- [5] 曾毅,崔波. 一种新的航天器电源系统拓扑 [J]. 航天器工程, 2009,18(5):95-100.
- [6] 陈世杰,孙世卓,付大伟,等. 上面级直接入轨卫星星箭供电接口设计与验证 [J]. 航天器工程, 2019,28(1): 84-89.
- [7] 张明,曾毅,刘奕宏,等. 一种直接入轨卫星变轨阶段的供电方案 [J]. 航天器工程, 2014,23(1):63-68.

引用格式: 曾毅,贾蒙杨,鲍恩竹,等. 北斗三号卫星与上面级供电相关接口分析及验证 [J]. 宇航总体技术, 2020,4(6):56-61.

Citation: Zeng Y, Jia M Y, Bao E Z, et al. Analysis and verification of the electrical power interface between Beidou-3 satellites and upper stage [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(6): 56-61.