

面向北斗短报文的在轨卫星健康监控体系

张海威¹, 侯波², 车斌¹, 张国龙¹, 邢楠¹

(1. 西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 2. 陆军航空兵研究所, 北京 101121)

摘要: 针对我国在轨卫星数量迅猛增长、健康状态复杂各异、测控管理难度日趋增大的态势, 提出了面向北斗短报文的在轨卫星健康监控体系。分析了北斗短报文的应用现状, 构建了“用户→北斗卫星→在轨卫星”前反向数据流向。考虑到北斗短报文的容量限制, 优化设计了测控数据传输格式和内容; 针对北斗短报文单向传输特性, 探讨了可靠通信技术; 针对星座大规模安全传递分发数据需求, 研究了通用掩码技术。以北斗三号系统为对象, 仿真计算了在轨卫星前反向数据时间特性。结果表明: 基于北斗短报文的在轨卫星健康监控技术, 可以为提高在轨卫星科学使用和寿命的精细化管理提供参考。

关键词: 北斗短报文; 在轨卫星; 健康监控; 可靠信息传输; 数据掩码

中图分类号: V 557 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.007

Health Monitoring System for On-orbit Satellites Based on Beidou Short Message

ZHANG Haiwei¹, HOU Bo², CHE Bin¹, ZHANG Guolong¹, XING Nan¹

(1. State Key Laboratory of Astronautics Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, Shaanxi, China;
2. Research Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China)

Abstract: In view of the situations that the number of on-orbit satellites in China is increasing rapidly, the health status of on-orbit satellites is complicated and different, and the monitoring and control management of on-orbit satellites is becoming increasingly difficult, a health monitoring system for on-orbit satellites based on Beidou short message is proposed. The application status of Beidou short message is analyzed, and the forward-backward data flow for “user→Beidou satellites→on orbit satellites” is established. Considering the capacity limitation of Beidou short message, the telemetry, telecommand, and data transmission format is designed and optimized. Based on the one-way transmission characteristics of Beidou short message, the reliable communication technology is discussed. In order to meet the secure deliver distribution data requirements of constellations, the universal mask technology is studied. The Beidou-3 system is taken as an object, and the time characteristics of the on-orbit satellite forward-backward data flow are simulated and calculated. The results show that the health monitoring system for on-orbit satellites based on Beidou short message can provide references for improving the scientific service and meticulous management for on-orbit satellites.

Key words: Beidou short message; on-orbit satellite; health monitoring; reliable information transmission; data mask

0 引言

随着我国军民融合政策不断推进, 民商类在轨卫星呈现爆发式增长, 虽然涌现出如天链、驭星等一大批民营航天测控企业, 但是传统的地面测控服务需要巨大的站网资源建设投入, 并且现有地面测控资源无法满足未来大规模星座的测控管理需求

(如鸿雁星座、“五云一车”项目、“吉林一号”遥感星座等)。杨天社等^[1]探讨了低轨卫星天基测控的可行性, 但是考虑到天基测控资源(如中继卫星、天通卫星等)的有限性, 采用北斗短报文进行在轨卫星测控, 具有终端小巧、成本低廉和覆盖全面等特点。

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61502523)

作者简介: 张海威(1984—), 男, 博士, 主要研究方向为航天器测控总体技术研究。

2020 年 7 月,我国全面建成北斗导航系统。北斗卫星具有独立的双向通信功能,保密性好,覆盖范围大,同时具有兼容导航功能和组网方便等优点,具备卫星无线电定位转发和通信转发能力,可以为双向授时、报文通信及地面测运控系统之间的时间同步与数据传输提供转发信道。

国内较早开展了基于北斗短报文的研究和应用工作。何雨帆等^[2]开展了通过遥感九号搭载北斗短报文终端进行测控试验。关新锋等^[3]研究了基于北斗短报文的星基测控方法,进行了系统总体方案设计和测控数据流程设计。刘保国等^[4]分析了北斗三号全球导航系统短报文用于低轨卫星测控的基本能力。朱向鹏等^[5]提出在中国周边与亚太地区使用区域短报文进行实时测控,在其他区域使用全球短报文进行准实时测控。陶德桂等^[6]利用北斗短报文通信技术研制了地面北斗便携站和机载 BD 安控器,实现了北斗短报文指令被动安控功能。唐庆辉等^[7]基于北斗短报文通信功能,设计了一种炮兵装备远程保障技术方案。雷思磊等^[8]设计了自主可控的北斗短报文可靠传输协议、数据传输格式以及双北斗终端乒乓使用机制。本文在上述工作的基础上,结合北斗短报文的特点,综合考虑了在轨卫星(星座)运行特点,优化设计了卫星信息传输方法,提出了面向北斗短报文的在轨卫星结构健康监控体系,对提高在轨卫星的精细化使用管理,具有重要的应用价值和现实意义。

1 北斗短报文应用现状

北斗系统的定位、通信与授时使用同一信道,其报文数据包为可变长度数据帧,可有效满足通信信息量较小但短时突发数据处理要求较高,且大量用户同时使用的各类应用需求,具有良好的加密功能,可保证用户数据通信安全^[9]。

综合考虑北斗系统具有全天候、全方位、并发处理能力强和安全性好等特点,提出构建面向北斗短报文的在轨卫星健康监控应用场景,主要包括:

1) 作为辅助测控手段,解决国内测控资源紧张,导致卫星健康状态缺乏实时监控和资源支持的问题;

2) 解决低轨卫星发生故障后,卫星境外长时间无测控资源支持导致无法及时处置的问题;

3) 提高卫星执行任务和故障处置的实时性和

时效性。

在此基础上,设计了“用户→北斗卫星→在轨卫星”前反向数据流向,如图 1 所示。

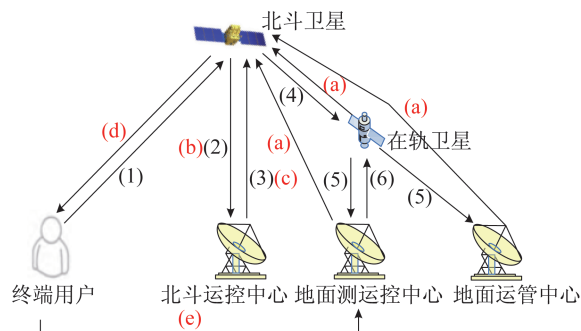


图 1 基于北斗短报文的卫星健康监控数据流

Fig.1 Health monitoring data flow of satellites based on Beidou short message

在轨卫星健康状态监控前向过程(终端用户→北斗卫星→在轨卫星)流程如下:

1) 终端用户将测控需求(包括终端 ID、指令等)通过短报文数据加密后发送到北斗卫星。

2) 北斗卫星将接收到的数据转换后传送至北斗运控中心。

3) 北斗运控中心处理接收到的数据,经解密和再加密后,将其加入到持续广播的出站电文中,发送给北斗卫星。

4) 北斗卫星将加密后的数据转换后广播给低轨卫星上的终端;卫星接收信号,解调解密电文,按照收到的指令完成相应动作,完成一次点对点通信;针对具备星间链路的卫星星座,则可以通过星间分发功能,实现星间通信,完成一次点对面通信。

5) 在轨卫星进入地面可见弧段,由地面测运控中心或地面运管中心对卫星状态进行综合评估确认。

6) 地面测运控中心通过可用的上行链路,对卫星在轨状态进行调整。

在轨卫星健康状态监控反向过程(在轨卫星→北斗卫星→终端用户),即当卫星需要向地面用户发送数据时,其流程如下:

1) 地面测运控中心、运管中心(卫星在地面可视弧段内)或在轨卫星(境外或境内均可)任意一方通过故障诊断系统,对卫星自身的健康状态进行分析评估。上述三方将分析结果通过短报文系统,主动发给北斗星座中的某一卫星(包括终端 ID、健康状态信息等)。

2) 北斗卫星通过短报文转发给运控中心。

3) 北斗运控中心将消息进行解密、解码后,重新封装发送给某一北斗卫星。

4) 北斗卫星通过短报文转发给终端用户,由用户对卫星健康状态进行进一步分析评估。

5) 终端用户根据卫星状态,待卫星进入地面测控中心可视圈次时,进一步进行卫星健康状态综合分析并评估。

通常情况下,在轨卫星健康状态监控过程配合使用,可以由前向或反向任意一方发起。

2 关键技术分析

2.1 在轨卫星关键结构和部件健康状态分析技术

随着卫星自主计算处理能力和星上智能化水平不断提高,对于在轨卫星的健康状态,可以采用星上自适应诊断的方式进行。针对卫星各分系统采集的遥测数据,采用星上计算机进行预处理,通过“自主诊断+主动故障隔离”的方式实现。对出现异常结果的数据(尤其是需要即刻处理的异常)采用适应短报文明流限制的特定数据格式进行单独组帧下传。

基于北斗短报文的遥测信息采集,主要遵循以下原则:1) 正常情况下,通过北斗短报文采集分发的遥测数据,应涵盖卫星各个分系统的关键参数(如测控、电源、姿轨控、载荷等),主要采集各主要部件的健康状态信息,完成组帧后进行存储,视情传输;2) 当卫星某部件出现异常时,则重点采集其故障信息,并尽快完成组帧下传。

2.2 在轨卫星上下行数据格式设计

在不影响北斗系统导航、定位和授时的主任务,充分考虑北斗短报文数据传输速率和内容的资源约束限制,有效减轻数据传输压力,提高卫星处置异常情况的处置效率,通过北斗短报文回传的卫星健康状态监控内容应该与常规遥测有较大区别。

参考目前常用的北斗用户机数据接口要求(4.0 协议),其民用短报文通信协议格式如图 2 所示^[9]。其中,“指令/遥测”表征终端或地面识别当前报文类别的标志;“报文长度”表征整个报文的字节长度,包含从指令到校验和的短报文消息总长度,可用来判断接收的报文数据是否缺失;“用户地址”表

征报文传输时使用当前终端 ID 号;“报文内容”表征传送或接收的用户数据信息;“校验和”表征从前 4 部分进行校验运算,以保证数据的正确性。

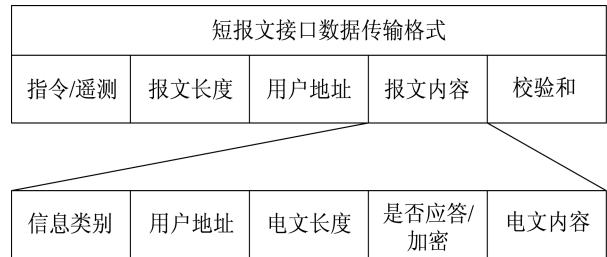


图 2 民用北斗短报文通信协议格式

Fig.2 Communication protocol format of civilian Beidou short message

“报文内容”主要包含 5 部分:1) “信息类别”表征传输信息的紧急程度、传输方式为汉字或代码等;2) “用户地址”表征目标用户的 ID 号;3) “电文长度”表征电文内容中的数据长度;4) “是否应答/加密”表征地面依据此标志是否进行应答和解密;5) “电文内容”表征实际上注的数据内容。

通过对数据交换层的协议进行约定,完善卫星上下行数据组帧方式,实现基于北斗短报文信息传递的通用化和规范化。

2.2.1 遥测/遥控数据的使用

对于基于北斗短报文的遥测/遥控数据的使用,需遵循以下原则:1) 主要适用于卫星境外不可见圈次;2) 不与正常测控工作相冲突;3) 采用特定格式编排,以减少数据量,提高信息传递效率和安全性,采集遥测数据以各分系统的关键状态信息为主,以模拟量数据为辅;4) 对正常状态的遥测数据、不影响卫星正常使用的异常和非需要即刻处置的故障,采用按需进行存储和下传;对影响卫星正常使用的异常、需要即刻处置的重大故障,需要卫星立刻进行通过短报文下传相关信息,如有必要,地面终端可通过短报文进行卫星操控。

2.2.2 遥测数据编排

鉴于北斗短报文通信能力限制,下行遥测数据编排方法如下:

1) 考虑到卫星遥测编排的一致性,建议遥测格式采用 CCSDS AOS 推荐的信道访问数据单元(CA-DU)格式,包含虚拟信道数据单元(VCDU)附加同步序列两部分,共同组成短报文的“电文内容”。

2) 卫星遥测模式设计过程中,增加北斗短报文

下传模式,仅在需要通过北斗短报文传输数据时,占据测控物理信道,完成数据采集、存储和分发。

3) 遥测组帧采用星上主动采集各分系统工作状态信息,进行主动存储,如无下传需求,则可定时由新数据进行自主覆盖。

4) 原则上,通过短报文传输的关键遥测,帧长不超过每次短报文发送的最长限制。

5) 正常下传数据中应包含卫星状态、姿态等关键正常信息。

6) 卫星异常数据通过一帧数据即可以完全表征,通过一次下传即可以明确表征异常部位的工作状态;异常数据中应包含故障时间、故障部位和故障等级等关键信息。

2.2.3 简化指令设计

鉴于卫星遥控指令的一致性,对图 2 中的“报文内容”进行编排,通过“方式字”进行北斗短报文指令识别。采取的方法如下:

1) 采用“星上存储+地面触发”方式,大幅简化通过短报文中上注指令的长度和内容。

2) 通过短报文发送的遥控指令,帧长不超过每次短报文发送的最长限制。

3) 通过设计优化星上自主执行动作指令序列,如构建故障条件下自主转对日巡航状态等指令链,通过北斗短报文发送触发指令,实现星上调姿、业务操作、安全控制等动作,优化卫星自主工作过程。

2.3 可靠信息传输技术

北斗短报文通信从本质来说属于不可靠通信,在连续发送多条短报文后,存在丢包现象,并且接收端不发送回执信息,无法确定报文是否被成功接收或传输数据出错等因素,发送端不能明确得知报文是否发送成功。相关研究表明,北斗短报文通信单数据包的传输成功率约为 95%^[9]。

在应急情况下,信息交互的准确性显得至关重要。为此,可以采用如下两种方式进行数据校验。

2.3.1 数据接收正确性校验

为了让通信双方能够知晓信息发送结果,充分利用北斗双向通信的性质,采用最原始的逐条反馈机制,对接收到的每一个数据包都发送一个反馈数据包。接收端接收到数据包后,首先对其进行差错检验,然后根据检验结果,向发送端发送反馈信息,

告知发送端数据包是否发送成功,数据传输是否完整,以便发送端采取相应的措施。反馈信息可以实时发送,也可以延时发送。

2.3.2 数据执行正确性校验

逐条反馈的信息验证方式,会过多占用本就不宽裕的北斗通信信道,并且由于北斗频段的公开性,频繁的双向通信增大了信息被截获的概率。为此,可以采用星上正确执行指令的效果反馈方式进行。优点:1) 前反向传输的短报文信息内容不一致,降低了被解密的风险;2) 通过多次遥控上行而仅反馈一次遥测下行的方式,减少北斗短报文双向传输过程,降低通信频次,减少数据传输过程产生的误码和校验,减轻北斗通信压力;3) 为保证数据正确接收,可以设置接收的反馈时间节点,如果星上未正常接收,则地面可以及时重发。

2.4 数据传输掩码技术

从北斗短报文的传输过程可以看出,数据直接由终端发出,虽然有一定的防护手段,但是在北斗调制频率、信息传输格式等信息均公开的条件下,用户数据存在泄漏、被篡改和被窃取的风险,具有安全隐患。

传统意义上的加解密技术,主要是针对单个卫星进行“一星一密”的星地配套使用,对于大规模星座尤其是存在星间链路的卫星来说不适用。综合北斗短报文安全系统现状,对大规模传递分发数据可以采用掩码技术,如图 3 所示,通过区块链“地面私钥+星间公钥”加密算法,增强卫星随遇接入和星间信息传递的通用性、安全性和可靠性^[10-13]。

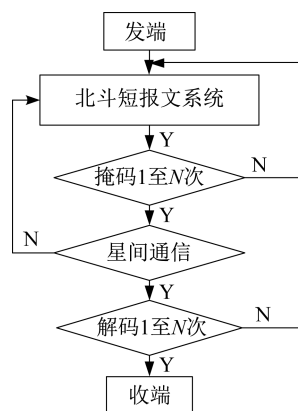


图 3 北斗短报文信息掩码过程

Fig.3 Mask process of Beidou short message information

2.4.1 对全部信息进行掩码

掩码信息是收发双方约定好、在符合北斗短报文信息要求的基础上进行指定编码,对短报文信息传输不造成影响。掩码信息不对所有用户公开,只有接收数据的用户才可以正确地接收使用数据。考虑到北斗短报文自身存在一定的加密手段,因此,通过“掩码+北斗短报文加密”双重加密的方式,实现数据信息的准确传递和便捷通信。通过对北斗短报文全部信息进行掩码,以星上存储特定的提取码在特定时间进行更新,确保星地双方掩码信息同步。

2.4.2 对数据内容进行二次/多次掩码

为保证加密后的数据能够在短报文系统中实现用户数据安全传输,可以对报文内容中的电文内容进行二次/多次掩码,并可以有选择地对“电文长度”部分进行二次/多次掩码。通过在发端和收端的协议进行规范化设计,实现短报文系统在不同用户终端间信息的安全交互。

3 分析与验证

以北斗三号系统(3GEO+3IGSO+24MEO)为例,进行半长轴为 500 km 高度的太阳同步轨道卫星的可见性及单向信息传输时延分析(不需要遥测与遥测信息比判),如图 4 和图 5 所示,仿真计算结果见表 1。

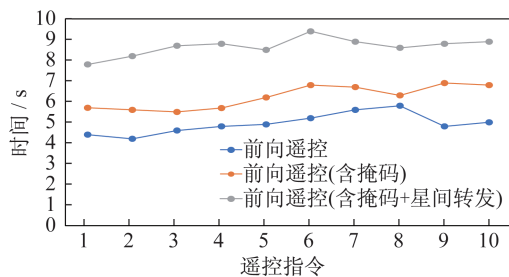


图 4 前向遥控指令发送时间

Fig.4 Transmission time of forward telecommand data

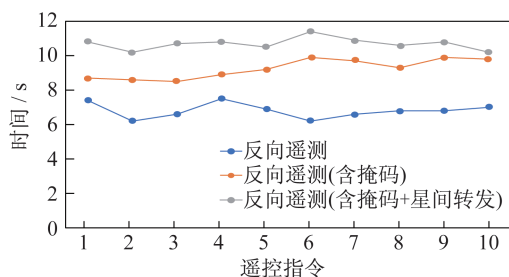


图 5 反向遥测接收时间

Fig.5 Reception time of backward telemetry data

表 1 前反向数据流传输时间统计

Tab.1 Transmission time of forward-backward data flow

方式	前向遥控		反向遥测	
	最大时间/s	平均时间/s	最大时间/s	平均时间/s
无掩码+无星间	5.8	4.93	7.4	6.73
掩码+无星间	6.9	6.24	9.8	9.14
掩码+星间	9.4	8.67	11.6	10.57
误码率	$>10^{-6}$	$>10^{-6}$	0	0

3.1 指令上行处理时间特性

上行时间指终端用户通过北斗短报文系统将特定的指令发送给卫星,主要包括以下过程:

$$T_u = t_{ucs} + t_{ubl} + t_{usg} + t_{ug} + t_{ugs} + t_{ub2} + t_{uss} \quad (1)$$

式中: T_u 为上行总时间; t_{ucs} 为终端用户至北斗卫星的时间; t_{usg} 为北斗卫星至北斗地面运控系统的时间; t_{ug} 为地面运控系统处理信息的时间; t_{ugs} 为北斗地面运控系统至北斗卫星的时间; t_{uss} 为北斗卫星至目标卫星的时间; t_{ubl} 为北斗卫星处理终端用户数据的时间; t_{ub2} 为北斗卫星处理地面运控中心数据的时间。

3.2 遥测下行处理时间特性

下行时间指在轨卫星通过北斗短报文系统将特定的遥测数据发送给终端用户,主要包括以下过程:

$$T_d = t_{dss} + t_{db1} + t_{dsg} + t_{dg} + t_{dgs} + t_{db2} + t_{dcs} \quad (2)$$

式中: T_d 为下行总时间; t_{dcs} 为北斗卫星至终端用户的时间; t_{dsg} 为北斗卫星至北斗地面运控系统的时间; t_{dg} 为地面运控系统处理信息的时间; t_{dgs} 为北斗地面运控系统至北斗卫星的时间; t_{dss} 为北斗卫星至目标卫星的时间; t_{db1} 为北斗卫星处理终端用户数据的时间; t_{db2} 为北斗卫星处理地面运控中心数据的时间。

通过上述过程可见,对星间交互的遥测遥控时延特性,可以满足测控需求。采用北斗三号系统短报文通信可以对卫星实现全天时不间断的健康监控。

4 结束语

借助星载北斗终端可以在地面和卫星之间以短报文方式交互卫星状态、位置和时间等信息,实现了“用户→北斗卫星→在轨卫星”的在轨卫星健

康状态监控前反向数据交互流程;设计优化了基于北斗短报文限制的在轨卫星上下行数据格式,提出了用于保证信息传递安全的通用数据传输掩码方法;仿真计算了基于北斗短报文的信息传输时间特性,为用户、测运控中心通过短报文方式及时处置异常提供通道,可以方便及时地监控在轨卫星健康状况。

参考文献

- [1] 杨天社,董小社,席政.低轨航天器天基测控方法研究[J].空间科学学报,2007,27(3):245-249.
- [2] 何雨帆,王家松,陈建荣.基于北斗一号的近地卫星天基测控技术及应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(4):441-444.
- [3] 关新锋,范竞往,王小岛.一种基于北斗 RDSS 短报文的天基测控方法[J].航天器工程,2019(3):20-26.
- [4] 刘保国,张国亭,郭永强.北斗三号短报文低轨卫星测控应用研究[J].遥测遥控,2021,42(1):1-6.
- [5] 朱向鹏,党超,刘涛.基于北斗短报文通信系统的低轨航天器天基测控设计[J].航天器工程,2020,29(5):19-25.
- [6] 陶德桂,刘关心.基于北斗短报文通信的无人机安控系统[J].电光与控制,2018,25(6):98-101.
- [7] 唐庆辉,边少锋,李厚朴.基于北斗短报文通信的装备远程保障平台[J].舰船电子工程,2016,36(6):96-98.
- [8] 雷思磊,贺文宝,李剑青.基于北斗短报文的卫星通信车快速组网方案设计[J].全球定位系统,2018,43(4):53-58.
- [9] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)[R].2019.
- [10] 周一廷.北斗卫星导航系统短报文加密技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [11] 杨储华,周航帆,马军.基于国密算法的北斗短报文安全防护系统的研究与实现[J].计算机与现代化,2019(4):108-113.
- [12] 何丽,刘茹,屈冬红.一种基于北斗短报文通信的动态组网技术[J].科学技术与工程,2015,15(13):149-152.
- [13] HOLMES K. Spread spectrum system for GNSS and wireless communications [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.

(上接第 39 页)

参考文献

- [1] 宋汉文.星箭耦合环境动力学与地面模拟试验技术[C]//2007 年全国结构动力学学术研讨会.2007:145-152.
- [2] 邱吉宝,黄波,陈凯.星箭耦合动态响应分析方法研究[C]//2009 年全国结构动力学学术研讨会.2009:52-63.
- [3] 邱吉宝,黄波,陈凯.星箭耦合双控方程研究[C]//2009 年全国结构动力学学术研讨会.2009:64-71.
- [4] 陈力奋,崔升,柳征勇,等.基于传递函数的星箭耦合载荷分析[J].振动与冲击,2010,23(6):84-87.
- [5] 涂奉臣,陈照波,李华,等.新型整星隔振平台的被动隔振性能及星箭耦合特性分析[J].航空学报,2010,31(3):538-545.
- [6] 张茜,刘盼,蔡国平.捆绑式运载火箭的一体化模型降阶[J].导弹与航天运载技术,2012(5):1-6.
- [7] 邱吉宝,张正平,李海波,等.动态子结构法在航天工程中的应用研究[J].振动工程学报,2015,28(4):510-517.
- [8] 贾海涛,马洪亮,吴清文,等.超单元在大型复杂航天相
- 机结构中的应用[J].微计算机信息,2009,25(24):161-163.
- [9] 冯纪生.资源一号/长征四号星箭耦合分析综述[J].航天器工程,2003,12(1):19-22.
- [10] 邱吉宝,张正平,李海波,等.星/箭耦合动态响应分析新方法研究[J].强度与环境,2011,38(3):1-9.
- [11] 张忠,李海波,任方,等.星箭耦合系统多状态模型修正技术研究[J].强度与环境,2012,39(6):22-29.
- [12] 尹家聪,谢伟华,陈曦,等.模态综合法在航天器结构动力学分析中的应用研究[J].宇航总体技术,2018,2(1):49-55.
- [13] 史纪鑫,曲广吉.可变构型复合柔性结构航天器动力学建模研究[J].宇航学报,2007,28(1):130-135.
- [14] 钱志英,罗文波,阮剑华.MSC.NASTRAN 子结构法在航天器结构动力学分析中的应用[J].航天器工程,2011,20(5):55-60.
- [15] 谢伟华,尹家聪,林勇文,等.卫星星箭耦合力学分析模型二次缩聚方法[J].航天器环境工程,2019,36(4):330-334.