

导航卫星在轨管理与服务系统^①

白东炜,杨 慧,翟君武,李 懿,潘 鑫

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘 要:针对北斗卫星导航系统卫星数量多,连续、稳定运行要求高的特点,卫星系统建设了导航卫星在轨管理与服务系统,旨在加强在轨数据管理与分析,提升卫星系统服务能力,开展了故障诊断、故障及对策验证、健康评估与维护几方面工作,丰富了在轨卫星监测手段,加强了卫星系统与用户之间的沟通协调。该系统目前已应用实践,有效提升了卫星系统对用户的技术支持水平,可为探索大型星座系统的在轨管理与服务模式提供借鉴。

关键词:北斗导航;卫星;在轨;管理;服务

中图分类号:V747

文献标识码:A

文章编号:1674-7135(2021)02-0016-07

D O I:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.02.003

Navigation satellite in-orbit management and service system

BAI Dongwei, YANG Hui, ZHAI Junwu, LI Yi, PAN Xin

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: BeiDou Navigation Satellite System has a large number of satellites and High continuity and stability requirement. Navigation satellite in-orbit management and service system was built, to strengthen the data management and analysis, to improve the capacity of satellite system service. Fault diagnosis, fault and countermeasure verification, health assessment and maintenance were developed, the satellite monitoring means were enriched, the communication and coordination between designers and users was strengthened. The system has practical application, which effectively improves the technical support level for users, provides reference for exploring in-orbit satellite management mode of large constellation system.

Key words: BeiDou navigation; satellite; in-orbit; management; service

0 引言

北斗卫星导航系统是我国第一个大型星座航天系统,可提供高精度、全天候、全天时的导航、定位、授时服务,并兼具短报文通信能力。2012年12月27日,向亚太地区提供服务,2018年12月27日,提供全球基本服务,至2020年初,已成功发射五十多颗北斗导航卫星,2020年完成全部工程建设工作,将在测绘、电信、减灾救灾等诸多领域产生显著的经济效益和社会效益,推动卫星导航在国民经济社会各行业的广泛应用^[1-2]。

北斗卫星导航系统连续、稳定运行的要求很高,

这就对在轨运行管理工作提出了很高的要求。从国外一些大型星座系统,像GPS系统、全球星系统(Globalstar)的运行管理模式来看,整个星座的在轨运行管理由控制段来完成,负责整个星座系统的监测、指挥和控制^[3-5],国内在北斗卫星导航系统星地一体化运行管理方面也开展了一些系统架构方面的研究^[6-7]。综合来看,导航星座的在轨管理工作非常复杂和重要,对于我国的北斗卫星导航系统,整个系统的控制段是由运控系统、测控系统和卫星系统3方共同完成的,运控系统负责服务业务的运维,测控系统负责工程业务的运维,卫星系统则负责为运

^① 收稿日期:2020-03-23;修回日期:2020-03-17。

基金项目:国家自然科学基金基于多功能卫星平台的空间信息网络关键技术集成验证(编号:92038320)

作者简介:白东炜(1980—),男,高级工程师。从事卫星总体设计工作,卫星在轨管理研究。**E-mail:**bdw601@126.com

控系统和测控系统提供技术支持服务。对于卫星系统来说,如何做好卫星在轨管理工作,为用户提供及时有效的技术服务保障是一项非常重要的工作。在此背景下,卫星系统建设了导航卫星在轨管理与服务系统,旨在提高卫星系统的管理与技术服务水平,加强卫星系统与用户之间的沟通协调手段,确保北斗卫星导航系统在轨稳定、可靠运行。

文章主要从系统需求论证、系统建设方案和启示及建议 3 个方面对该系统进行介绍。

1 系统需求论证

做好导航卫星在轨管理与服务工作,关键是要综合卫星在轨数据信息,做好卫星的健康评估工作,并根据卫星的健康状态,做好在轨维护工作;在卫星故障情况下,能够快速诊断,及时恢复,确保卫星安全。因此需要建设故障诊断子系统和健康评估和维护子系统。

故障诊断子系统:能够及时、准确的发现故障,快速、有效的处理故障,使卫星恢复正常,并且能够推出诊断的过程信息、诊断结果和处置预案。

健康评估与维护子系统:分级评估卫星单机、分系统和整星的健康状态,并进一步形成星座完好性、可用性和连续性评价,在此基础上形成卫星的日常维护策略、应用控制方案,优化故障处置策略,并反馈给用户,以更好的评估星座的运行状态和风险,提供卫星使用建议。

对于卫星的在轨故障,有些是没有发生过的、未知的,并没有相应的故障处置策略,需要根据实际情况在地面仿真验证并形成相应的处置策略,这就需要建设故障及对策验证子系统。

故障及对策验证子系统:是一套半物理仿真验证系统,对于原因不清楚,恢复策略不明确的未知故障,通过开展充分的地面仿真和验证,完成故障的快速复现、模拟验证、准确定位,实现故障恢复策略的地面仿真验证,保证故障恢复策略的合理、可行和安全。

测控系统和运控系统对卫星的在轨监测是任务模式驱动的,而且测控和运控的监测也是分开的,为了丰富在轨监测手段,有必要建设一套辅助信号监测子系统,形成针对特殊事件的监测模式,并且能够同时同地对测控和导航信号进行监测。

辅助信号监测子系统:具备对卫星测控和导航信号的监测、接收、处理和评估能力,能够有针对性地、持续地跟踪、监测指定卫星的测控和导航信号,同时不影响运控系统、测控系统对卫星的日常监测和管理,成为导航星座监测和管理的有益补充手段。

为了能对测控系统和运控系统来的数据进行接收、处理、分析、显示、存储和查询,同时能够对整个系统进行监控和调度,需要建设管理与监控子系统。

为了加强运控系统、测控系统和卫星系统 3 方的沟通协调,能够方便的实现 3 方的信息交互和联合办公,需要建设信息交互子系统。

2 系统建设方案

2.1 系统组成

根据第 1 章的需求分析论证,导航卫星在轨管理与服务系统由管理与监控、信息交互、信号监测、故障诊断、故障及对策验证以及健康评估与维护共 6 个子系统构成,具体见图 1,图 1 中,运控系统和测控系统是和该系统有接口的 2 个外部系统。在后文中针对每个子系统的功能特点分别进行介绍。

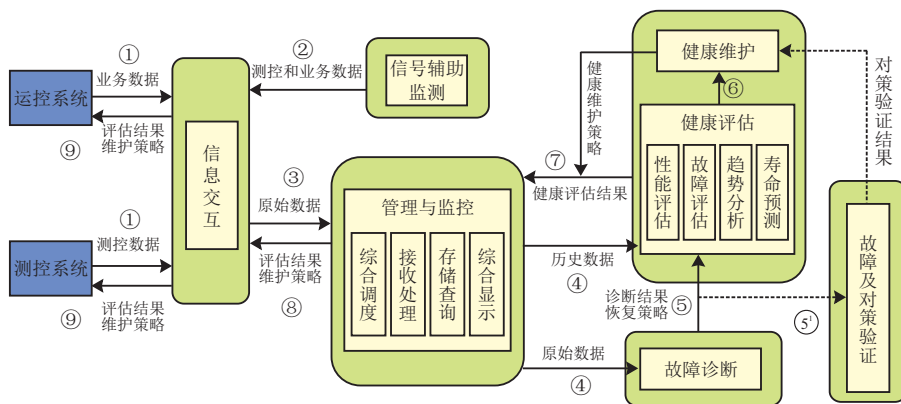


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the system

2.2 系统工作流程

导航卫星在轨管理与服务系统的工作流程见图1。具体工作流程如下:

1)信息交互子系统接收来自运控系统的业务数据、来自测控系统的测控数据。

2)辅助信号监测子系统完成单颗导航卫星测控和导航信号的监测、接收、处理和评估,并将原始数据和处理结果送往信息交互子系统。

3)信息交互子系统将接收到的来自运控系统、测控系统和辅助信号监测子系统的数送往管理与监控子系统。

4)管理与监控子系统将接收到的原始数据经过预处理后实时送往故障诊断子系统进行实时的故障诊断,同时送往健康评估与维护子系统进行健康评估。

5)对于故障诊断子系统的诊断结果和恢复策略,如果是原因清楚,恢复策略明确,则直接发给健康评估与维护子系统的故障评估模块,否则发给故障及对策验证子系统,经过验证后给出对策及验证结果。

6)健康评估与维护子系统完成整个星座性能评估、故障评估、趋势分析和寿命预测,并根据健康评估结果给出健康维护策略。

7)健康评估与维护子系统将健康评估结果和健康维护策略送给管理与监控子系统。

8)管理与监控子系统将接收到的健康评估结果和健康维护策略送给信息交互子系统。

9)信息交互子系统将健康评估结果和维护策略送给运控系统和测控系统,由运控系统和测控系统对卫星实施健康维护操作。

2.3 各子系统方案

2.3.1 管理与监控子系统

管理与监控子系统完成整个系统的监控与调度;接收、处理和存储多渠道来源的测控、导航等信息数据,并提供查询、显示功能;能够提供丰富、可扩展的数据分析功能。

为突出星座健康管理的特点,能够提供整个星座的健康态势显示,分三级进行显示。

第一级显示:星座三维显示,包括星座构型显示,卫星结构布局显示、控制姿态显示,卫星变轨机动显示,敏感器视场显示,执行机构动作显示,星下点轨迹显示,实时DOP值显示等。

第二级显示:星座健康状态显示,包括星座及各卫星健康状态显示,评估结果显示,报警信息显示,故障诊断信息显示等。

第三级显示:卫星具体的遥测数据及曲线显示。

2.3.2 信息交互子系统

信息交互子系统主要完成运控系统、测控系统和卫星系统3方的信息交互,主要是信息的中转传输,并要具备保密安全要求。能够接收辅助信号监测子系统、测控系统、运控系统发来的在轨卫星导航数据、测控数据,并将接收到的数据和信息转发给管理与监控子系统。接收来自管理与监控子系统的在轨数据分析结果、故障处理策略、日常维护信息以及应用控制方案等信息并转发给运控系统和测控系统。

信息交互子系统提供支持多方远程协同工作的集同办公环境,具备远程电子表单审批、远程语音调度、视频会议等功能,这样运控系统、测控系统和卫星系统三方可以在异地开展视频会议,快速传递操作指令单,开展卫星故障会诊,及时处理在轨异常,大大缩短了三方在轨管理的空间距离,提高了在轨管理的效率。

2.3.3 辅助信号监测子系统

辅助信号监测子系统是作为运控系统和测控系统监测手段的有益补充,能够在不影响其主要任务的情况下有针对性的对有一颗卫星进行连续监测,特别是在某颗卫星有突发异常的时候。其由测控、导航共用窄波束大天线,导航专用宽波束小天线,射频组件,导航、测控监测接收机、信号分析与评估单元、信号存储单元以及远程监控单元组成,其具体组成框图见图2。

能够对所有北斗导航卫星下行军民导航信号进行接收、电文解调和信号监测;能够对原始导航电文进行解析和比对、导航电文分类提取、卫星工况信息(上行测距值、工况、轨控、姿态等)分类提取。能够对信号在相关域进行分析评估的能力,包括对称性分析、平滑性分析、相关损耗分析等;能够对信号在测量域进行分析评估的能力,包括载噪比、伪距合理性、码载波相干性、通道一致性、导航数据正确性等。

根据任务特点,辅助信号监测子系统有3种工作模式:正常监测模式、卫星故障监测模式、特殊任务监测模式。

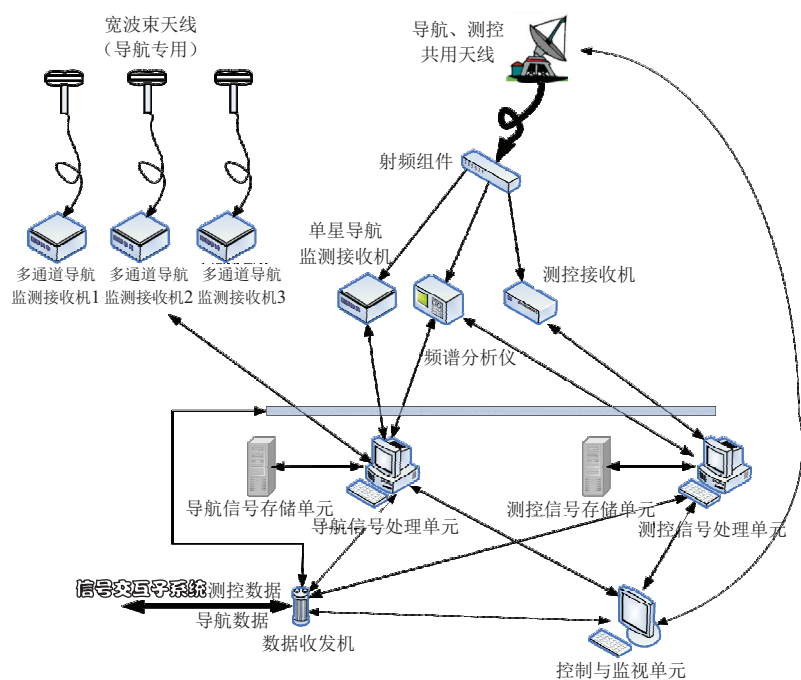


图 2 辅助信号监测子系统组成框图

Fig.2 Block diagram of signal detection sub-system

1) 正常监测模式下实现对所有在轨卫星测控信号和导航信号的循环监测。

2) 卫星故障监测模式是某颗卫星工作异常时,集中对故障卫星的测控信号、导航信号以及重点关注项目进行实时连续跟踪监测,为故障分析、诊断和处理提供依据。

3) 特殊任务监测模式,是指地面监测系统根据特殊任务需求,需要对某刻或某几颗卫星进行部分项目的重点监测,如某些轨道的空间环境恶化时,需要对相应轨道的在轨卫星进行连续或高频率的监测评估。

2.3.4 故障诊断子系统

故障诊断子系统采用基于多 Agent 的智能诊断技术,将各个功能独立、诊断算法不同的 Agent 系统有机地结合在一起,充分利用其各自的优点,协同完成卫星在轨的诊断任务,可扩展性好、专家知识的可重用性好,大大提高了故障诊断的准确性和效率^[8-10]。

故障诊断子系统主要有各分系统诊断 Agent、指令执行诊断 Agent、系统关联诊断 Agent、系统通路诊

断 Agent、过程监测诊断 Agent、管理 Agent、诊断知识库、人机接口等组成,具体组成框图见图 3。

各分系统诊断 Agent 应用各种故障诊断算法,完成各子系统的故障诊断,并向管理 Agent 提供诊断结果,如果状态信息不完整或没法完成诊断任务时,向其它 Agent 发出协作请求。

指令执行诊断 Agent 主要完成指令是否正确发送、是否正确执行、执行效果是否正确的诊断。

系统关联诊断 Agent,主要完成系统级关联故障诊断,系统级关联故障诊断的关键就是识别由于供配电、测控和控推 3 个分系统的故障引起的延伸故障;系统通路故障主要是通过信息流分析,识别由于通路故障引起的系统级故障^[11];过程监测诊断用于监视航天器的某个工作过程是否依照预先设定的过程进行,比如卫星位保过程、地影过程,并完成诊断报警。

管理 Agent 负责综合诊断 Agent 的诊断结果,并形成最终的结论以及实现诊断 Agent 间的协调及协作,通常还要承担不同工作组 Agent 间的通信任务。

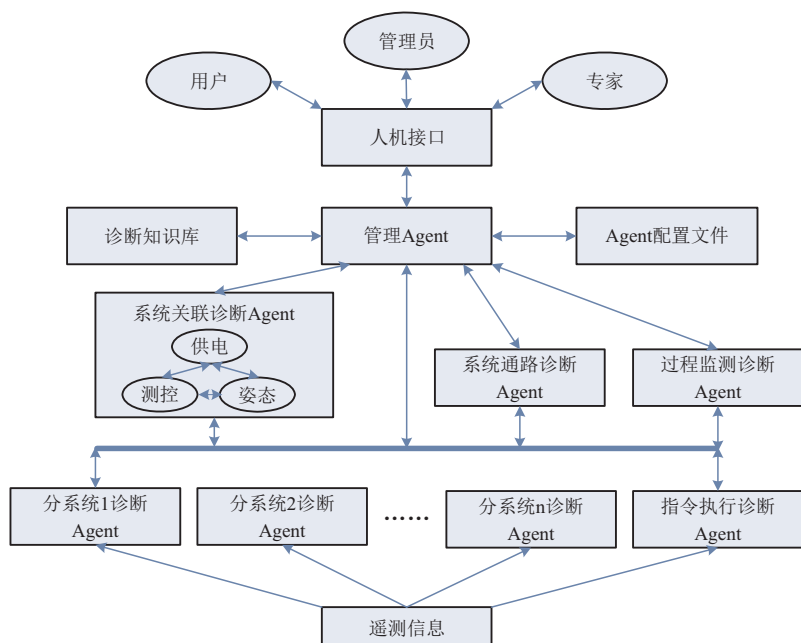


图3 故障诊断子系统组成框图

Fig. 3 Block diagram of fault diagnosis sub-system

2.3.5 故障及对策验证子系统

故障及对策验证子系统主要由卫星全数字仿真软件、卫星半物理仿真设备、各分系统故障设置与分析模块、主控模块、接口模块、遥测遥控收发模块以及局域网组成。故障及对策验证子系统的构建需要遵循以下几个原则：

1) 故障及对策验证尽可能覆盖卫星主要分系统,特别是在轨故障预案中所列的全部故障以及在轨多发问题的分系统或单机设备。

2) 故障及对策验证根据在轨故障预案、实际在轨故障、以及系统可扩展的要求确定各分系统采用全数字模式或者半物理模式,根据需求确定以全数字模式为主,对重要单机设备采用半物理模式。全数字软件留有硬件扩充接口,后续可逐步扩展至半物理模式。在方案中,控推和导航分系统采用半物理仿真模式,其它分系统采用全数字仿真模式。

3) 全数字软件与在轨卫星飞行状态保持一致,同时考虑故障注入和故障检测功能,保证卫星在轨故障设置的多样化,获取更多的故障信息,更好地完成故障的快速复现和准确定位。

2.3.6 健康评估与维护子系统

导航星座的健康评估采用分级法,由星座级、单星级、分系统级和设备级四级来完成,星座健康状态

由各单星健康状态信息综合形成,而单星健康状态又由各分系统、设备的健康状态所决定。每一级的健康评估是在综合来自运控系统、测控系统和辅助信号监测子系统的卫星工程遥测、业务遥测、导航信号的基础上,借助各种方法来实现。

健康评估与维护子系统组由单星健康评估模块、星座健康评估模块、健康维护模块3个功能模块组成。具体组成框图见图4。

1) 单星健康评估模块

单星健康评估模块主要从性能评估、故障评估、趋势分析和寿命预测4个方面对每颗卫星进行全面评价,形成每颗卫星的在轨运行健康履历。

其中性能评估主要评估影响卫星性能指标的项目,主要包括太阳电池阵总功率,整星负载功率,整星温度运行水平,卫星姿态控制精度,陀螺常值漂移,帆板跟踪精度,原子钟精度等。寿命预测主要评估影响卫星使用寿命的项目,包括太阳电池阵输出功率预测,蓄电池组容量衰减预测,推进剂剩余量预测,行波管寿命预测,原子钟性能退化预测等。

故障评估按照航天器故障模式、影响及危害性分析的方法对故障进行分析和评估,文献[12]给出了相关介绍和方法。

趋势分析通过研究卫星在轨遥测数据变化规

律,对遥测数据进行趋势预测,并依据预测数据对卫星状态和性能进行提前预警,可以在早期及时发现卫星状态参数的异常变化,以便及时有效地进行处理,避免可能发生的重大故障。本系统根据不同的遥测参数类型采用了不同的预测模型,取得了很好的效果,具体方法及效果形成了相应的文章,见文献[13]。

2) 星座健康评估模块

星座健康评估模块主要从卫星完好性、可用性、连续性和星座构型分析4个方面对整个星座的运行状态进行健康评估。

星座构型分析主要是根据卫星在轨健康使用状态动态分析导航定位精度因子DOP值,最终来动态分析定位精度水平。完好性、可用性、连续性是大系

统指标,需要综合各方信息才能综合分析评估,卫星系统要提供卫星相关影响因素的分析和评估,文献[14-15]给出了评估方法。

3) 健康维护模块

健康维护模块针对单星及星座健康评估的结果制定维护策略和使用建议,包括日常维护信息,应用控制方案,故障处理策略等,为在轨操作提供参考依据,并将新的健康维护策略存储在维护策略库中,不断丰富和完善维护策略库,为后续健康维护工作提供支持。

卫星系统提出的健康评估结果和卫星使用建议最终提供给运控系统和测控系统,由运控系统和测控系统负责对卫星实施具体操作。

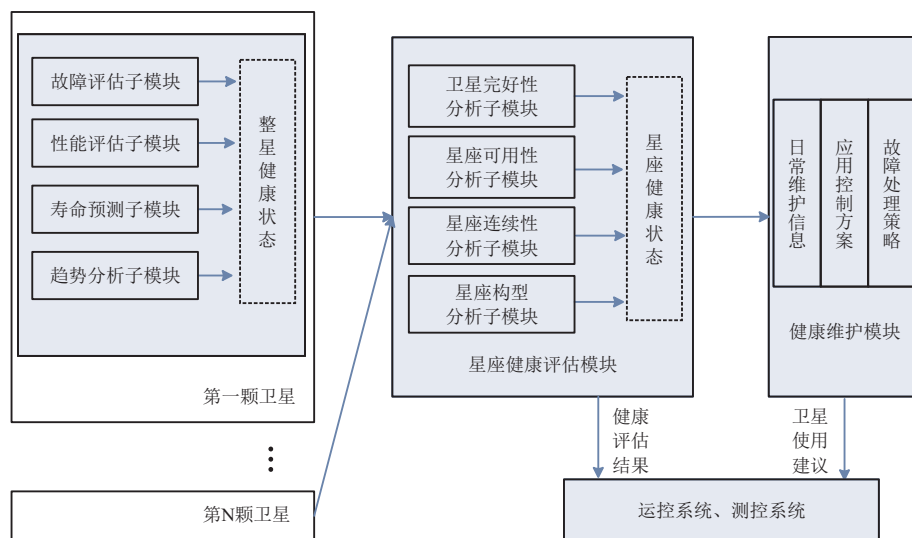


图4 健康评估及维护子系统组成框图

Fig.4 Block diagram of health assessment and maintenance sub-system

3 启示及建议

1) 根据共享技术的进步,构建多方信息共享云平台,实现运控系统、测控系统和卫星系统的信息智能高效共享,提高星座系统信息利用效率。

2) 通过不断开展在轨数据积累、分析和挖掘,摸清导航卫星以及各部件、单机的在轨工作特性,为卫星产品的设计改进提供建议,加强宇航型号系统及产品的设计能力和成熟度的提升。

3) 进一步加强星座完好性、连续性和可用性分析,不断摸索大型星座在轨管理模式,为下一代导航星座的设计改进提供建议。

4 结束语

导航卫星在轨管理与服务系统目前已经应用实践,在轨应用的效果很好,完善了在轨信号监测手段,使得在轨信号监测更加灵活高效,数据更加丰富;改进了在轨处理实施方案的验证手段,提高了对在轨故障的及时发现及快速诊断能力,大大缩短了卫星在轨故障处置的时间,提高了卫星的可用性;通过开展在轨数据积累与分析,加强了星座健康状态评估,能够为用户提供优化的卫星在轨维护策略和使用建议,提高了卫星的稳定性;加强了运控、测控和卫星系统三方的信息交互和协调沟通手段,提高

了在轨管理的效率。

该系统的建成有效提升了卫星系统对导航星座在轨管理的技术支持能力,强化了系统稳定性保障手段,有利于导航星座系统的长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 国务院新闻办公室. 白皮书:中国北斗卫星导航系统[R]. 2016.
- [2] 中国卫星导航定位协会. 白皮书:中国卫星导航与位置服务产业发展[R]. 2018.
- [3] BRADFORD W P, JAMES J S. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I [M]. American: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002:100-389.
- [4] DAN Smith. Operations Innovations for The 48-Satellite Globalstar Constellation [C]//AIAA-96-1051-CP: 537-542.
- [5] KAPLAN E D. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红,译. 第二版. 北京:电子工业出版社,2007.
- [6] 李平京. 长期在轨卫星的天地一体化运行管理系统框架研究[J]. 飞行器测控学报,2007,26(6):1-6.
- [7] 李菊芳. 北斗二号卫星导航系统星地一体化运行管理系统架构研究[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集,2010.
- [8] FAN Xianfeng. Research of Multi-Agent System Based Satellite Fault Diagnosis Technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2002,9(3):16-20.
- [9] 左万里. 基于多 Agent 的智能故障诊断系统研究[J]. 计算机与现代化,2003,10(8):4-6.
- [10] BAI Dongwei, TANG Jungang, PAN Xin. Research on Satellite Fault Diagnostics Technology Based on Combination of Several Methods[J]. Aerospace China,2016,17(1):30-36.
- [11] 白东炜,杨慧. 卫星在轨故障定位的系统分析方法[J]. 空间电子技术,2019,16(6):39-43.
- [12] 彭成荣. 航天器总体设计[M]. 第二版. 北京:中国科学技术出版社,2011.
- [13] 张弓,翟君武. 导航卫星遥测数据趋势预测技术研究[J],航天器工程,2017,26(3):70~77.
- [14] 帅平,曲广吉. 卫星导航系统性能指标与评估方法[C]//全国第十二届空间及运动体技术学术年会论文集,2006.
- [15] 谢军,王海红. 卫星导航技术[M]. 第一版. 北京:北京理工大学出版社,2018.