

航天器在轨运行段遥控作业规范化设计与实现

张国云, 王大鹏, 曹继宏, 王 谦, 魏 亮
(航天器在轨故障诊断与维修重点实验室 西安 710043)

摘要: 针对当前航天器长期运行段遥控作业中人工干预环节较多、自动化智能化水平较低、流程标准化较低、要素不完整、事后工作不完整等问题, 在分析形成遥控作业规范化需求的基础上, 对遥控作业运行流程、功能模块、异常报警处置策略进行设计与规范。将遥控作业分为遥控上行前、中、后三个阶段, 在现有基础上增加启动时机合法性自动检测、状态自动判别、时间条件自动驱动、注入结果自动评估、事后安全处置、自动退出、异常情况下循环报警推送处置策略等模块, 完成遥控作业编写的规范性设计。最后, 选取 50 颗在轨卫星对规范后的遥控作业进行验证, 并与已有的作业进行了量化对比, 结果显示, 规范化遥控作业显著提升了上行工作的安全性、可靠性和运行效率, 可提高航天器在轨稳定运行性。

关键词: 航天器; 运行段; 遥控作业; 规范化; 安全管控

中图分类号: V556.1; TP311 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0056-05

Design and realization of normalization on telecommand program for spacecraft in operation section

ZHANG Guoyun, WANG Dapeng, CAO Jihong, WANG Qian, WEI Liang

(Key Laboratory for Fault Diagnosis and Maintenance of Spacecraft in Orbit, Xi'an 710043, China)

Abstract: Aiming at the problems of many manual intervention links, low level of automation and intelligence, low standardization, incomplete elements and incomplete work after the event in the telecommand operation of the long-term spacecraft operation section, the thesis designs and standardizes the operation process, function module and abnormal alarm disposal strategy of telecommand operation based on the analysis of standardization requirements. The telecommand operation is divided into three stages: before, during and after the remote control uplink. On the existing basis, the modules such as automatic detection of start-up timing legality, automatic state discrimination, automatic driving of time conditions, automatic evaluation of injection results, post event safety disposal, automatic exit, and cyclic alarm push disposal strategy are added to complete the normative preparation of telecommand operation design. Finally, 50 satellites in orbit are selected to verify the standardized telecommand operation and compared with the existing operation. The results show that the standardized telecommand operation significantly improves the safety, reliability and operation efficiency of the uplink work, and improves the stability of the spacecraft in orbit.

Key words: Spacecraft; Operation section; Telecommand program; Normalization; Safety control

引 言

当前, 航天器在轨长期运行段遥控作业在完成日常平台运维和控制载荷工作正常开展方面发挥了重要作用^[1,2], 实现了遥控上行事件自动化运行^[3]。随着在轨航天器数量的持续增多, 上行测控事件日益频繁, 上行安全管控面临严峻挑战。目前, 国内外具有代表性的航天器作业主要有国外的基于 HAL/S、Timeliner 和国内的基于 SCL 语言三种。HAL/S 由 NASA 设计, 适用于航空、航天实时领域。Timeliner 于 1982 年开发, 在国际空间站、日本空间站及轨道快车计划中取得了成功应用, 可以与联合手动的人工程序结合。HAL/S 优点为较强的实时性支持, 但由于需要为每一种目标机进行精确开发, 通用性支持不强。Timeliner 将执行器嵌入到目标系统中, 提供了很好的通用性和一定的实时机制, 但

对星上系统要求较高^[4]。SCL 语言通过对遥控指令控制命令的显式支持，解决了遥控作业操作模式问题，但随着航天任务高密度发展，自动化智能化水平较低、流程标准化不高、要素不完整、事后工作不完整等问题逐渐突出，当前相关研究主要集中在遥控作业功能架构设计^[5,6]，需要对面向新的航天任务需求的遥控作业规范性进行研究，提高上行工作的安全性、可靠性、通用性及自动化水平。

本文在提出航天器在轨运行段遥控作业编写规范需求的基础上，对规范作业运行流程进行针对性设计与实现，并将规范前后遥控作业流程进行比对分析，最后对新设计的规范性遥控作业进行了在轨验证。

1 运行段遥控作业规范需求分析

现有遥控作业结构相对简单，功能单一，且需人工参与整个任务过程实施，结构组成及运行流程如图 1 所示^[2]。基于现有流程，规范化需求主要表现在：

- ① 开启遥控作业时机和开启后是否具备上行条件依赖于人工判断，增加了操作风险，降低了管理效率，需增加自动判断条件；
- ② 各类数据注入或指令发送失败后作业仅是暂停，需增加可用于快速研判的有效告警信息和处置策略提示；
- ③ 各类数据注入或指令发送完毕后未对执行效果（是否正常完成预定上行工作）进行提示，需增加注入结果完整性具体提示；
- ④ 进行特殊事件的管理如固定指令、密钥更换等工作时机依赖于人工判断，存在管理风险，需增加时间自动驱动模块。

综上所述，目前上行遥控模式难以与大量卫星精细化管理的要求相适应，需要进一步规范。

2 运行段遥控作业编写规范构建

针对原有航天器运行段遥控作业存在的不足，在对遥控作业实现任务功能分析的基础上，设计出规范化的功能模块。通过分析上行任务中各模块间时序关系，由这些功能相对独立的模块协同完成上行任务^[7,8]。据此，提出构建运行段遥控作业编写规范，应综合考虑上行工作中各种因素及星地状态，运行段遥控作业可划分为三个阶段，即上行遥控前、上行遥控中和上行遥控后。

- ① 上行遥控前：考虑遥控作业启动的合法性、天地基跟踪测控模式、航天器平台健康状态、地面任务环境安全性；
- ② 上行遥控中：重点关注指令和数据发送的时间、条件等约束内容以及每条指令每块数据的执行情况；
- ③ 上行遥控后：完成善后安全处置，如数据注入的完整性和结果的正确性检查，天基测控时关机停发遥测，已上注完成数据文件清除，用于驱动遥控作业运行的相关遥控参数无效处置等。

对比图 1，规范后的遥控作业组成及运行流程如图 2 所示。

3 规范化前后遥控作业模块对比分析

正常情况下，规范化的遥控作业进行启动时机合法性自动检测、状态自动判别、时间条件自动驱动，注入结果自动评估、事后安全处置，自动退出，全流程自动运行无人参与；异常情况下循环报警

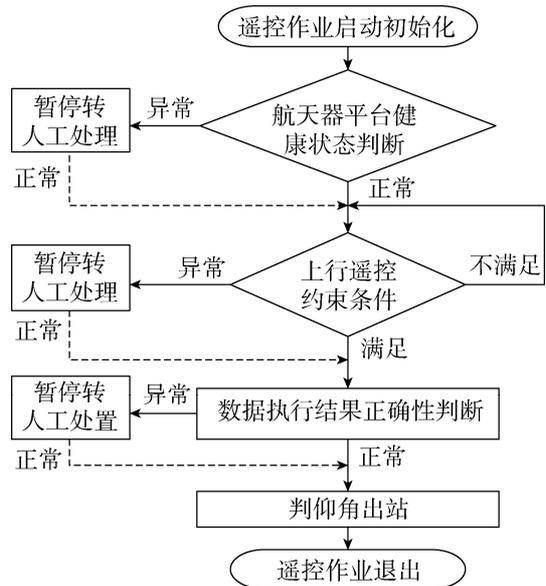


图 1 原遥控作业组成及运行流程
Fig. 1 Composition and operation process of original telecommand program

推送处置策略, 对授权异常智能判断自动处置, 以提高处置效率, 避免单靠人工判断处置带来的卫星管控风险。原遥控作业和规范化的运行段遥控作业对比分析如表 1 所示。

4 在轨验证

日常平台运维中, 上行测控事件主要有姿态控制类的轨道数据注入、测控管理类的星载应答机开/关机时间表注入(测控星历)、载荷管理类的用户载荷开/关机数据注入、星时管理类的时钟校正数据注入以及数据管理类的进/出站常规指令链发送等。上行遥控限制条件多样, 如有些低轨航天器要求在侧摆时禁止注入轨道数据, 有些则要求载荷数据不能重复注入, 有的要求注入时机; 同时, 天地基测控模式不同处置方法也不一样。

为验证规范化遥控作业的运行效率, 选取了 50 颗卫星(包含测控星历卫星 20 颗、天基可测控卫星 30 颗)进行了为期 90 天的测试: 每星每天安排 2 圈地基进行上行工作(共计 9000 圈), 其中 1 圈上注载荷控制数据, 1 圈上注平台运维数据; 30 颗天基可测控卫星每周安排 2 圈(共计 26 圈), 应用于在轨卫星运行控制任务。对原遥控作业和规范化遥控作业就遥控上行工作的安全性、可靠性和运行效率等紧密相关的启动时机错误次数、上行任务地面环境状态建立检查时间、天基测控星历卫星测控时无遥测人工处置次数、卫星健康状态检查用时、授权异常处置时间、单圈上注数据量以及数据漏注次数共 8 个指标进行了统计分析, 结果如表 2 所示。

根据表 2 的数据可以得出如下结论:

- ① 遥控作业启动合法性检查模块解决了遥控作业开启过早或太晚导致的星地状态误判和指令数据注入结果无法判断的问题, 该问题发生概率同比降低了 100%。
- ② 上行任务地面环境安全检查模块能够及时检测上行任务地面链路可用状态、星地遥控明密状态匹配性和用户数据通道选择等执行任务所需条件建立状态, 检查时间同比减少了 75%。
- ③ 天地基测控模式判断及处置模块和测控星历控制航天器无遥测情况下处置模块, 分别使天基测控模式下无遥测处置次数、资源变更后无测控星历需人工处置的次数减少了 100%, 该问题得到解决。
- ④ 航天器平台健康状态判断对关键分系统核心参数健康检查用时和异常处置检查用时降低了 60%, 时效性显著提高; 上行遥控约束条件判断模块实现了数据注入条件、时间等约束信息的自驱动, 提高了注入效率, 数据注入最大量可提升 1.9 倍, 同时, 有效避免了单靠人工判断处置带来卫星管控的安全风险。
- ⑤ 对于跟踪过程中出现的授权异常, 规范化遥控作业可以实现对授权异常处置时机智能判断自动处置, 授权异常处置效率提升 3 倍。
- ⑥ 数据注入完整性检查模块避免了低仰角强制退出或剩余时间不够时出现数据漏注问题; 事后

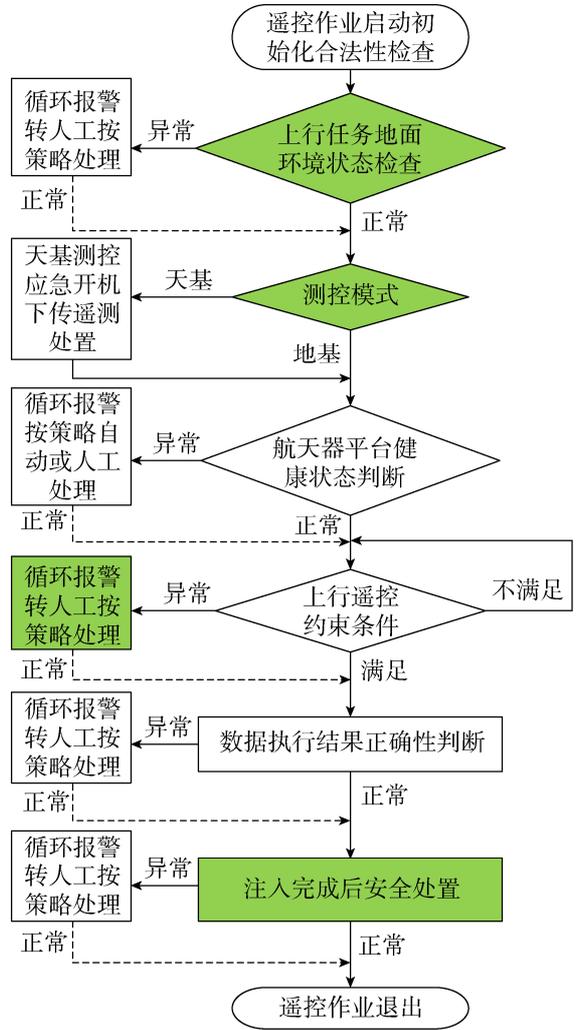


图 2 规范化遥控作业组成及运行流程
Fig. 2 Composition and operation process of standardized telecommand program

安全处置模块有效规避了数据的重复注入。

综上所述,规范化遥控作业显著提升了上行工作的安全性、可靠性和运行效率,可提高航天器在轨运行稳定性。

表 1 规范化前后遥控作业模块对比分析

Table 1 Comparative analysis of telecommand program module before and after normalization

模块	原遥控作业	规范化遥控作业	对比分析
遥控作业启动合法性检查	无	有	增加对圈次启动时机合理性和数据注入所需时间窗口合法性判断,防止遥控作业开启过早或太晚导致的星地状态和指令数据注入结果错误性判断。
上行任务地面环境安全性检查	无	有	增加自动检查地面链监信息、遥控明密状态、天基跟踪时前向用户数据通道标志、任务进程状态、异常自动处置或循环报警等功能模块,确保上行任务地面环境安全。
天地基测控模式判断及处置	无	有	增加自动识别天地基测控模式,天基模式下,应急开关中继应答机上传或停传遥测功能,解决天基测控模式下无遥测需人工处置的情况。
测控星历控制航天器无遥测情况下处置	无	有	增加自动盲发指令传遥测,以应对资源变更后无测控星历控制无法下传遥测需人工处置的情况。
航天器平台健康状态判断	有	有	增加对航天器异常后循环报警,授权异常处置时机智能判断自动处置,非授权异常待人工干预,同时给出辅助处置策略。
上行遥控约束条件判断	有	有	原遥控作业对上行遥控条件判断仅限于仰角符合、应答机锁定情况,规范化遥控作业增加了数据注入条件、时间等约束条件的自驱动,异常循环告警处置策略推送,避免了单靠人工判断带来的卫星管控风险。
数据执行结果正确性判断	有	有	原遥控作业对指令和数据执行正确性判据只是遥控前端计数增加即可,未判断真实遥测值变化,对不可重注数据只是暂停待人工处置。规范化遥控作业以真实遥测值变化作判据,增加对不可重注数据异常后自动判断处理,提高了数据注入安全性。
数据注入完整性检查	无	有	规范化遥控作业增加对本次数据注入完整性检测,发现漏注数据,智能判断自动补注或转人工处置,避免低仰角强制退出时出现数据漏注问题。
事后安全处置	无	有	增加注入完毕后清除已上注数据文件,置遥控平台相关参数无效值,规避了数据的重复注入。

表 2 遥控作业运行情况统计分析

Table 2 Statistical analysis of telecommand program operation

影响上行要素	原遥控作业	规范化遥控作业	分析结果
遥控作业启动时机错误次数(次)	12	0	↓100%
上行任务地面环境建立检查时间(秒)	120	30	↓75%
天基测控卫星无遥测处置次数(次)	26	0	↓100%
测控星历卫星无遥测处置次数(次)	52	0	↓100%
航天器平台健康状态检查用时(秒)	50	20	↓60%
授权异常处置时间(秒)	180	60	↓67%
单圈数据注入量(块)	16	30	↑1.9(倍)
数据漏注次数(次)	10	0	↓100%

5 结束语

对航天器运行段遥控作业运行流程、功能模块以及异常处置策略等进行规范化设计, 并且在在轨航天器上进行了长期管理实践。规范化的遥控作业快速高效地完成了日常平台运维和控制载荷工作等各类控制任务, 有效解决了航天器日常管理中遥控上行限制条件多、执行效果无法评估、数据重注漏注等需要人工判读操作的问题, 实现了航天器遥控上行工作管理闭环控制。

规范化的遥控作业降低了系统间交互时间, 实现了全流程自动化运行, 提高了空间信息支援效率和异常处置的时效性, 显著提升了上行工作的安全性、可靠性和运行效率, 确保了航天器在轨稳定运行。

参考文献

- [1] 杨永安, 余培军, 张武光, 等. 面向航天器控制的专用语言及编译程序设计[J]. 计算机工程, 2006, 32(12): 247-249.
YANG Yongan, YU Peijun, ZHANG Wuguang, et al. Design of spacecraft control oriented special language and compiler[J]. Computer Engineering, 2006, 32(12): 247-249.
- [2] 李景超, 张国云, 洪涛, 等. 基于 SCL 的低轨卫星自动化上行遥控方法[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(5): 469-474.
LI Jingchao, ZHANG Guoyun, HONG Tao, et al. Automated telecommand method for LEO spacecraft based on SCL language[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014, 33(5): 469-474.
- [3] 李建成, 杨开忠, 任登高, 等. 基于航天器控制语言的东三平台卫星遥控作业设计与实现[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(1): 86-89.
LI Jiancheng, YANG Kaizhong, REN Denggao, et al. Design and implementation of DFH-3 satellite control procedure based on space control language[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2006, 25(1): 86-89.
- [4] 李磊, 高永明, 刘磊. 航天器控制语言编译技术研究综述[J]. 软件, 2013, 34(4): 169-172.
LI Lei, GAO Yongming, LIU Lei. Research on compilation technology of spacecraft control language[J]. Software, 2013, 34(4): 169-172.
- [5] 王宝华, 王恒, 方东. 中心遥控作业的设计研究[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(1): 68-71.
WANG Baohua, WANG Heng, FANG Dong. A disquisition about telecommand program in XSCC[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2003, 22(1): 68-71.
- [6] 杨永安, 余培军, 陈建平, 等. 基于 SCL 的航天器遥控操作平台设计与实现[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 438-441.
YANG Yongan, YU Peijun, CHEN Jianping, et al. Design and realization of telecommand operation platform based on spacecraft control language[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 438-441.
- [7] 杨永安, 余培军, 冯祖仁, 等. 一种基于航天器控制语言的遥控作业操作模式设计[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(6): 14-17.
YANG Yongan, YU Peijun, FENG Zuren, et al. Design of telecommand job operation mode based on spacecraft control language[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2007, 26(6): 14-17.
- [8] 何耀强, 杨仁宝, 张武光. 航天器控制高级语言的程序与实现[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 62-65.
HE Yaoqiang, YANG Renbao, ZHANG Wuguang. Design and implementation of high-level language for spacecraft control[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(3): 62-65.

[作者简介]

- 张国云 1977 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。
王大鹏 1989 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。
曹继宏 1980 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。
王 谦 1993 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。
魏 亮 1976 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。