

面向一体化测试与运管的航天器指令技术研究

杨同智, 刘廷玉, 王 杰, 于 畅, 余灵峰
(上海卫星工程研究所 上海 201109)

摘要: 现有的航天器测试与运管程序通过 word 文档采用自然语言的方式进行描述, 需要人工录入、集成、整合和校验, 既浪费人力、时间, 又容易因人为原因出错, 不利于测试与运管程序在多用户间的快速交互, 且存在安全隐患。针对该问题, 借鉴 NASA 及 ESA 的 PLEXIL、PLUTO、Timeliner-TLX、SCL 等航天器指令设计经验, 研究了面向航天器地面测试与在轨运管的航天器指令技术, 该指令架构具备层次化、模块化、抽象化等高级程序特点, 且具备对航天器进行工作过程监测与异常状态处置能力, 便于航天器测试与运管程序的人机交互、数字化设计、交换共享与解译执行, 可作为国内航天器测试与运管程序一体化设计的技术参考。

关键词: 测试与运管; 指令程序; 计划表; 事件; 过程监测

中图分类号: V554+.3; TP315 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0001-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221227001

引用格式: 杨同智, 刘廷玉, 王杰, 等. 面向一体化测试与运管的航天器指令技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 1-9.

Research on spacecraft instruction technology for integrated testing and operation management

YANG Tongzhi, LIU Tingyu, WANG Jie, YU Chang, YU Lingfeng
(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The existing spacecraft testing and operation management procedures are described in natural language through word documents. Not only it requires manual input, integration and verification, and is a waste of manpower and time, more importantly, it prone to errors due to human reasons, and is not conducive to rapid interaction of the management program among multiple users. In response to this problem, drawing on the experience of spacecraft instruction design such as PLEXIL, PLUTO, Timeliner-TLX, and SCL of NASA and ESA, the spacecraft instruction technology for spacecraft ground testing and on-orbit operation management is studied. The instruction has modularization, abstraction and other high-level programming language features, and has the ability to detect the working process of the spacecraft and handle abnormal states, which is convenient for the human-computer interaction, digital designing, data sharing, interpretation and execution of spacecraft testing and operation management programs. The instruction also can be used as technical reference for spacecraft testing and operation management programs' designing.

Keywords: Test and operation; Instruction program; Schedules; Event; Process monitoring

Citation: YANG Tongzhi, LIU Tingyu, WANG Jie, et al. Research on spacecraft instruction technology for integrated testing and operation management[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 1-9.

引 言

航天器指令程序是用于航天器地面综合测试、试验鉴定与在轨运管系统的控制命令组合。指令程序可用于在轨航天器操控, 也可用于地面航天器 AIT、试验鉴定与发射场测试。随着航天器大量

研制装备被使用, 航天装备逐步由科研试验性质转向装备应用性质, 通过文献[1-6]研究: 美国已将试验鉴定作为检验军事能力、推动装备提升的重要手段。试验鉴定包括地面试验鉴定与在轨试验鉴定两大阶段。地面试验鉴定主要依托航天器研制单位的试验测试开展, 在轨试验鉴定由用户

开展, 为提升试验测试程序在多用户间的互操作性, 迫切需要实现地面试验与在轨试验一体化的指令程序设计。为提升装备研制能力, 实现全周期试验数据采存管用, 航天领域积极推动装备试验数据工程^[7,8]。指令程序是一类重要的数据, 脱离测试指令, 仅分析测试采集数据, 无法有效评估试验效能, 因此也需要实现全周期一体化的指令程序设计, 服务全周期试验数据分析。随着大型星座网络的发展, 对在轨管理的时效性提出更高要求^[9-12]。为了提升航天器在轨管理效率、快速处理突发异常, 也迫切需要打通航天器研制单位与测运控单位的指令程序通道, 实现地面测试与在轨运管指令程序一体化。

标准高效的航天器指令程序设计在国外已展开应用, 美国对象管理组织(Object Management Group, OMG)的空间领域任务工作组(Space Domain Task Force, STDF)制定了 SOLM(Satellite Operations Language Metamodel, 航天器操作语言元模型), 实现与 Command Control Language(CCL, 命令控制语言)、SpacePython 程序之间的映射, 并与 XTCE(XML Telemetric and Command Exchange, 基于 XML 的遥测遥控信息交换标准)标准相结合, SOLM 负责程序流程设计, XTCE 负责遥测、遥控指令加工, 实现了完备的航天器指令程序设计环境^[13]。ESA 发布了《Space engineering-Test and operations procedure language》等测试与操作程序语言规范^[14], 应用于 SCOS 2000II 测试系统, 采用规范化的测试脚本驱动测试流程; NASA 也通过类似技术途径, 制定了 PLEXIL、Timeliner-TLX、SCL 等航天器指令程序, 开发了相应的编辑器、编译器与执行器, 实现地面各阶段测试与在轨运管程序的一体化设计管理, 大大提升了从航天器地面测试到在轨任务操控的效率与准确性, 实现测试及运管程序设计与执行的无缝衔接, 提升航天器测试与在轨操作效率, 广泛应用于国际空间站、深空探测、近地卫星等领域, 如克莱芒蒂娜(Clementine, 环月轨道探测器)、远紫外分光探测器(FUSE)、国际空间站、EO-1/自主科学实验(ASE)、RADARSAT-2 卫星、好奇号火星车等航天器^[15]。

当前国内的航天器测试与运管程序通过 WORD 文档、纸质文档采用自然语言的方式进行描述, 需要人工录入成软件自动化测试与操作程序集, 存在编制效率低、易出错、可移植性差、

不易裁剪等问题, 不能很好地满足航天器短平快集成测试与快速任务管控需求。传统的指令程序交互模式已不能适应航天器数量高增长的任务需求, 需要开展航天器指令程序技术研究, 实现测试与运管流程的设计即产出, 提高航天器的整体研制与运控效率。针对以上问题与需求, 研究构建测试与运管一体化的航天器指令程序, 指令具备模块化、层次化、抽象化特点, 支持数字化指令程序设计与交换共享, 具备灵活多样的指令调度执行方式、过程状态监测与异常处置能力, 增强指令程序的执行自主性与安全性。

1 航天器一体化测试与运管程序原理

美国、欧洲航天产业化较为成熟, 出于统一设计、降本增效的考虑, 欧美测试系统从整星综合测试到在轨应用测试均采用一套系统, 比如美国 NASA 的 EPOCH2000 测试平台、ESA 的 SCOS 2000 电气地面支持设备系统, 如图 1 均采用标准测试/操作指令程序进行统一的行为描述, 实现一体化的自动化测试与在轨操作。

为了适应各类地面测试与在轨事务的自动化管理, 通过测试与运管程序的多层管理架构, 实现复杂测试与运管程序的构建、管理与调度。在轨运管中, 设计了基于日程表(Acquisition Policy)、计划表(Schedule)和过程程序(Procedure)的三层运控管理构架; 在地面测试中, 按照测试流程表、测试计划表、测试程序三级管理。测试与运管操作采用规范化的航天器指令程序描述, 通过高级指令程序实现地面测试与运管程序的一体化设计与重用、多用户间快速交互与共享。

如图 2 中, 运管日程表采用三层架构, 日程表用于描述需要执行的事务, 如飞行圈次的状态监视、数据接收、时间同步、轨道修正等等, 计划表面向日程表中的事务, 规定了每个事务的执行时间表, 如时间同步事务的建立连接、发送指令、状态监视、结果归档等步骤, 这些步骤又用操作指令程序表示^[16]; 日程表包含多个计划表, 计划表包含多个过程程序, 计划表、过程程序均可串行或并行执行。如图 2 测试流程表所示, 航天器地面测试也采用三层架构, 总体与在轨运管相似, 测试程序与运管程序存在一定的重用性, 但地面测试一般没有执行时间约束。

指令程序是航天器测试与运行管控的基石,

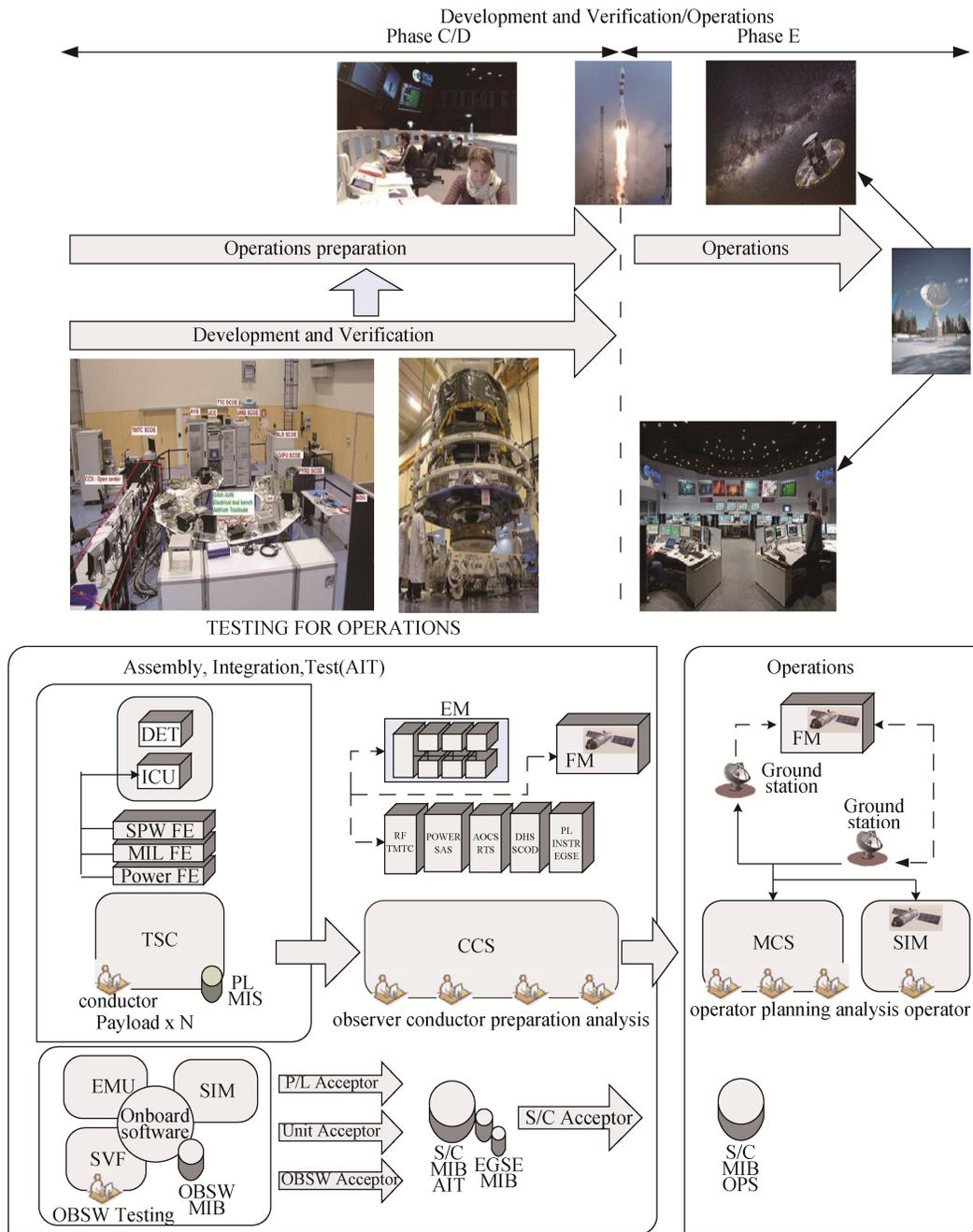


图 1 ESA 航天器测试与在轨运管一体化流程

Fig.1 ESA spacecraft test and on orbit operation management integration process

是测试计划与运管计划的具体内容，指令程序的执行计划可在航天器上(如深空探测的自主任务计划)与在地面上产生。在深空探测等领域，允许飞行段和地面段使用相同的软件架构，在地面上开发的测试脚本可以重复使用，并能移植到在轨航天器飞行系统上，航天器飞行系统可自主进行闭环控制。如图 3，美国火星探测使用的 PLEXIL (Plan Execution Interchange Language，计划执行交

换语言)，既可以在地面进行任务计划，也可以在航天器上进行自主任务计划^[7]。这种模式的转变减少了对地面人员的需求，并且降低了航天器集成测试与在轨运管成本。

如图 4 所示，航天器测试与运管程序计划执行系统主要包括程序设计器(Planner & Translator)与执行器(Final Controlling Element)，此外还包括程序设计与执行所需的测控知识库、规则库及专家

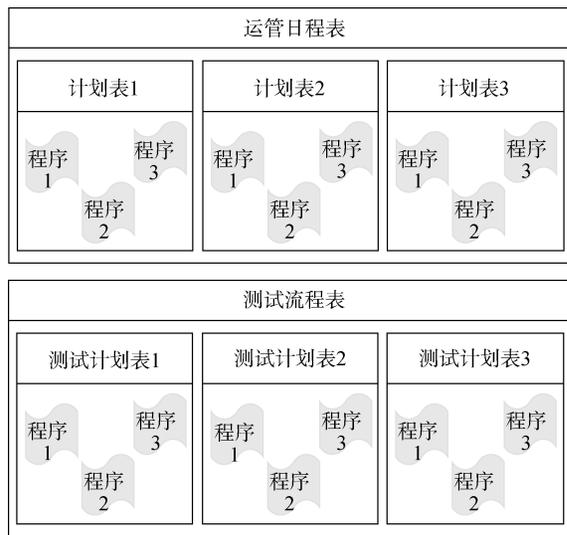


图2 测试与在轨操作三层架构

Fig.2 Three tier architecture for test and on orbit operation

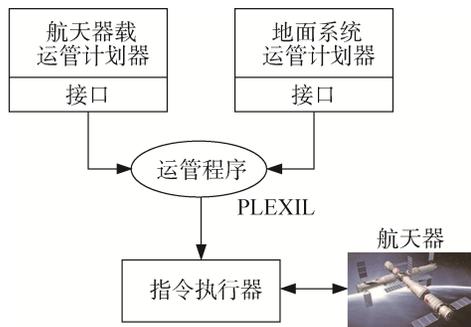


图3 天地一体化测试与运管场景

Fig.3 Space-ground integrated test and operation management scenarios

系统等^[18]。程序设计器负责设计测试与操作程序序列, 并编译为程序执行文件; 执行器负责解译执行设计器生成的指令程序。

规范化的航天器指令程序能够表示高级程序的概念, 包括一个程序域描述、指令类型、扩展及约束等。指令程序语义清晰, 有很强的执行控制表达能力, 可以表示简单的分支、浮动分支、循环、时间和事件驱动的活动、并发活动、序列和时间约束。指令的核心语法简单而统一, 使得航天器任务计划解释简单而有效, 同时支持验证和测试技术的应用。在指令程序设计时, 可以参考通用程序, 设计全新的航天器指令, 如 Pluto、PLEXIL、Timeliner-TLX 等, 也可以基于通用程序进行专业领域扩展, 如美国 Harris 公司即基于 Python 设计了 SpacePython, 用于描述与执行航天器

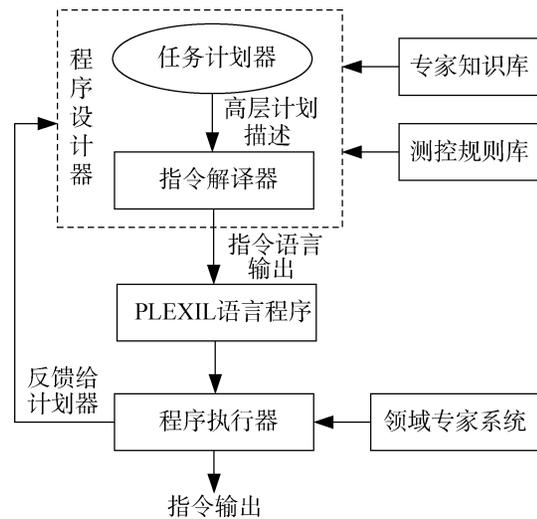


图4 程序计划与执行系统的工作流程

Fig.4 Workflow of program planning and execution system

指令程序^[19]。

2 航天器一体化测试与运管指令程序研究

2.1 指令程序结构

借鉴国外高级航天器指令程序的成功经验, 并基于航天器测试与运管任务需求, 设计面向测试与运管一体化的指令程序架构。如图5所示, 所构建的航天器指令程序应包括程序声明、前提检查、指令主体、过程监测、确认检查五个部分。程序声明用于定义事件、变量等信息; 前提检查用于程序调用时的执行准许条件检查, 确保程序执行时的航天器状态复核要求; 指令主体负责描述具体测试与在轨运管流程的执行, 支持时间触发与事件触发; 过程监测负责监视并处置程序执行过程中的异常; 确认检查用于程序执行完毕后的执行效果检查, 确认整个程序是否达到执行预期。

2.2 程序声明与前提检查

程序声明部分用于定义程序中用到的变量(航天器遥测参数、遥控指令、地面设备指令及参数等)、事件。该部分可与航天器遥测遥控知识库、规则库关联索引, 获取航天器的遥测、遥控指令信息。定义的事件会在执行过程中被发布, 各事件订阅方(如待触发的指令、异常处置程序等)会响应事件。

前提检查部分定义了程序执行需满足的条件, 常用 Wait Until 等条件进行前提检查, 条件根据航天器具体任务及产品工作特性进行制定, 如红外载荷执行开机成像任务前, 需确认制冷机温度条件等。

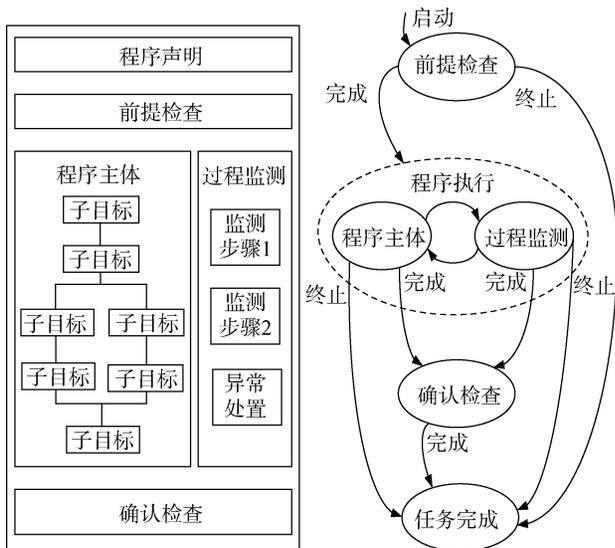


图5 测试与运管程序总体结构

Fig.5 Test and operation management program structure

程序的循环结构。

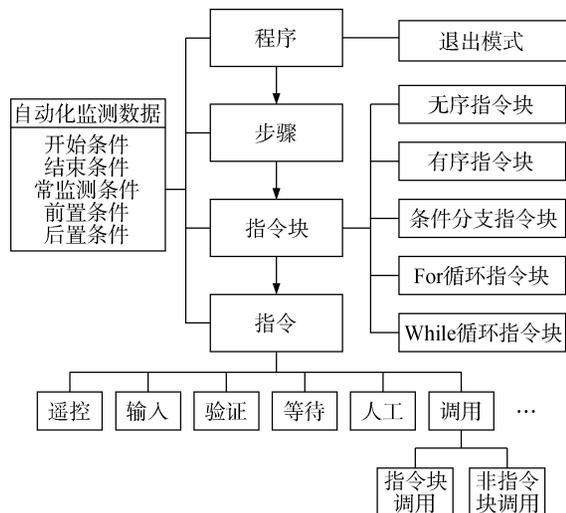


图6 程序分层结构

Fig.6 Program hierarchy

2.3 指令主体

指令主体是指令程序的主要部分，如图6所示，划分为程序、步骤、指令块和指令四级，程序是一个包含步骤的结构容器，步骤本身也是指令块的容器，并以特定的顺序调度执行，指令块是一组指令集合。通过程序、步骤、指令块的索引调用，从而实现程序集的组合重用。

步骤的执行顺序为3种：

① 隐式顺序：此类执行程序通常被称为清单程序，步骤按照列出的顺序依次执行。

② 显式顺序：此类执行程序通常被称为流程图过程。首先执行列出的第一步，后续步骤由步骤末尾计算的条件分支确定，每个分支指定一个条件，该条件将执行定向到指定的步骤，或退出过程。

③ 无序触发：所有步骤的执行完全是条件驱动的。每个步骤指定一个启动条件，并且各步骤存在潜在的并发性。

指令块(Block)负责多条指令的调度执行，指令块可以包含其他指令块或指令的任意组合，指令块构成指令主体的叶子操作。Block有几种类型：

- ① 顺序块(Ordered Block)指定顺序操作。
- ② 无序块(Unordered Block)指定潜在的并发操作。
- ③ 条件分支块(If Then Else Block)指定条件操作。
- ④ 循环块(While & For Each Block)指定了传统

指令程序使用XML Schema作为核心样式表示，依托XML样式可以构建友好的人机交互界面，便于人们阅读、理解与设计。美国深空探测领域开发了PRL(Procedure Representation Language, 程序描述语言)与PLEXIL两种程序，基于XML的PRL偏重于人机交互，基于高级程序的PLEXIL偏重于底层执行。通过转换程序将PRL的抽象语法映射到PLEXIL的抽象语法，在设计人员和自动化程序执行之间架起桥梁。指令程序的人机交互转换流程如图7所示：PRL(XML样式)被解析，创建它的抽象语法树(AST)；再被翻译成一个扩展的PLEXIL AST；扩展的PLEXIL AST转换为Extended PLEXIL 程序脚本；最后，将Extended PLEXIL 编译成Core PLEXIL 执行^[20]。



图7 程序转换流程

Fig.7 Program conversion process

在程序设计层面，采用人机交互良好的分级指令主体设计；在执行层面，层次化的程序主体会分解为由节点结构组成的子任务，便于底层程序执行。如图8所示，将设计端的PRL映射为执行端的PLEXIL，打通测试与运管程序的人机鸿沟，提升指令程序的可读性与交互性。

图9描述了指令程序节点执行流程。节点构成

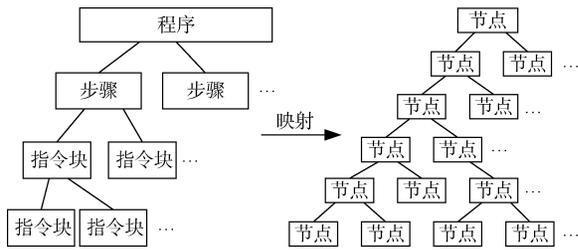


图 8 人机交互程序转化为执行程序

Fig.8 Conversion of human-computer interaction program into execution program

指令程序的叶子, 用于变量分配、命令、更新、调用和空操作。指令程序主体是一个节点树, 通过节点聚合进行组织, 每个节点的执行完全由条件驱动。指令程序可查询外部状态(例如遥测)、内部状态, 如其他节点的执行状态和结果(成功或失败), 基于查询状态进行条件判断, 驱动节点执行。开始条件和结束条件分别决定何时开始和结束执行。重复条件允许迭代和循环, 前置条件、后置条件和不变条件分别在执行之前、之后和执行期间进行检查, 如果节点失败, 则检查为 false, 触发异常事件, 进入异常处置流程。

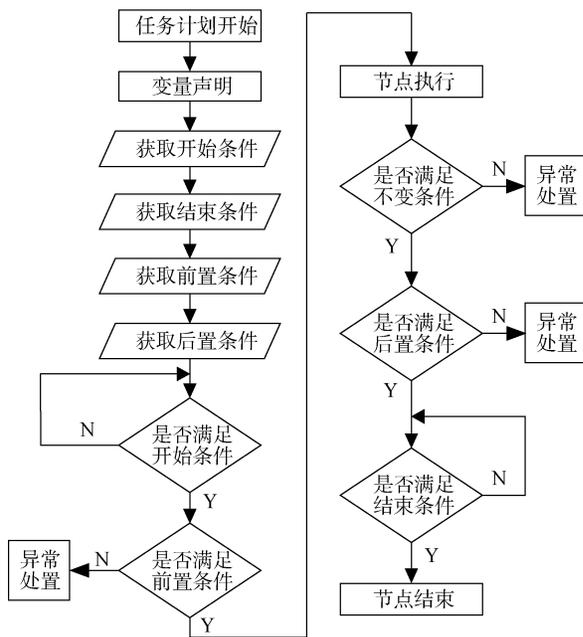


图 9 执行程序节点流程

Fig.9 Executor node flow

2.4 过程监测与异常处理

过程监测主要依托测控条件检查实现, 条件检查支持自增运算、变化值计算、阈值判断、状态判断、遥测值显示(由用户进一步判断)等方法; 同时

支持多个遥测基于规则的联合判断方式。当前置、后置和不变条件检查异常时, 可以提醒用户人工确认, 也可发送异常事件触发, 跳转到遥测条件超差的异常处置函数。常用的遥测检查方法如下:

① 自增运算: 针对一直按特定规律变化遥测进行的监视判断, 示例:

TMC001(实时帧计数)=TMC001+1 in 32 F; // 实时帧计数在 32 帧内每次加 1。

② 变化值计算: 针对遥测当前值与之前值的变化量进行判断, 示例如下:

Δ TMN001(母线电流 A)<2A in 64 F; // 母线电流在 64 帧内最大变化量小于 2 A。

③ 阈值判断: 给遥测代号指定正常范围, 判断是否在范围内, 示例:

18 V<TMN003(蓄电池电压)<31 V; // 蓄电池电压范围为: [1 831]V。

④ 状态判断: 判断状态遥测是否处于要求状态, 示例:

TMK001(姿态控制模式)=2(飞轮控制模式);

⑤ 显示遥测值: 把遥测结果展示给用户, 由用户进一步判断, 示例:

Show(TMC001); // 执行到该事件时, 将会显示为 TMC001=XXX。

⑥ 多个遥测联合判断: 关联多个遥测进行组合判断, 示例:

TMN001(母线电流 A)+TMN002(母线电流 B)<4.1 A;

⑦ 条件检查还支持超时检查, 支持超时判断时间的编辑(不编辑则填写默认值, 同时, 默认值可由用户统一修改), 超过配置时间一直无法满足后判遥测时, 软件报警提示, 可选择由用户确认是否继续, 也可发送超时事件, 跳转到超时的异常处置。

程序可以以多种方式终止, 如异常事件终止、超时终止、确认检查完成终止。当步骤分支到退出模式时, 流程图过程终止; 这些过程有一个或多个退出模式, 该模式指定一个表示成功或失败的布尔结果, 以及在过程终止时返回到执行系统的消息字符串。

2.5 确认检查

确认检查用于程序执行完毕或终止时的总体执行结果检查, 一般通过一系列遥测参数状态进行检查, 如单机开关遥测、姿态遥测等; 也可定义更为深层次的执行结果评估方法, 如任务执行

的时长、耗电量、燃料损耗、姿态稳定度、遥控精度等。对于异常终止的指令程序，可以检查确认执行程度、终止点及原因，并进行呈现。

3 在航天器测试中的应用

传统的航天器综合测试中，测试设计与测试执行是割裂的，人工编写测试细则，人工配置自动化测试程序，严重影响了试验测试效率及测试

指令信息的追溯与分析。针对该问题，在型号研制中，基于规范化的航天器指令程序架构，开展卫星数字化测试设计应用研究，构建了测试流程一体化管理平台，支持时间驱动与事件驱动的测试流程设计，支持测试程序与测试细则的同步设计与生成，实现测试设计与测试执行的一体化，提升了研制效率。

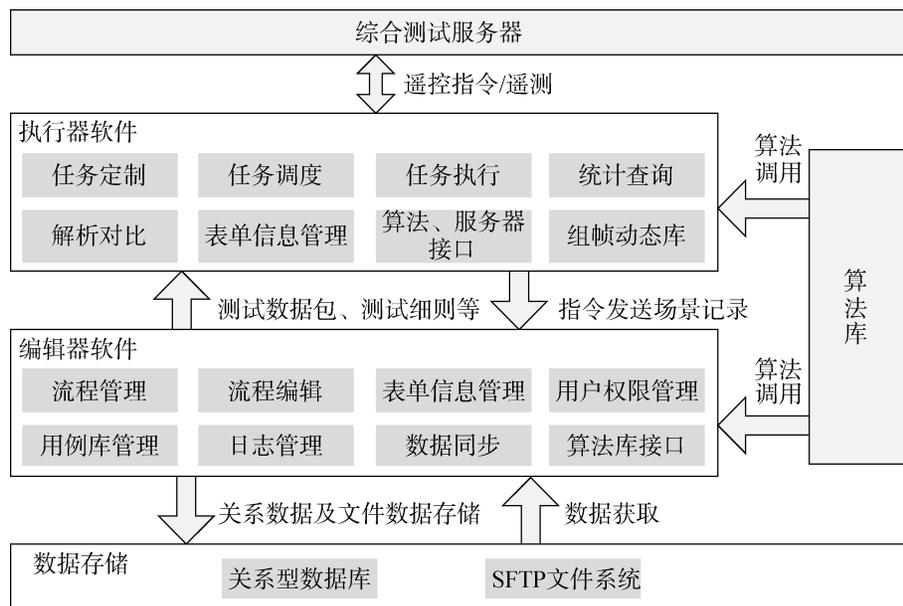


图10 测试流程一体化管理平台总体架构图

Fig.10 Overall architecture of test process integrated management platform

软件总体架构如图10所示，测试流程一体化管理平台主要包括测试程序编辑器软件、执行器软件以及数据库三个核心组成部分，并通过综测服务器进行遥控指令和遥测的数据交互，同时提供服务器接口和算法库等外部接口完成算法库的运算算法的调用和向航天器或地面设备发送命令。

软件以图形化的形式实现测试程序的数字化设计，流程编辑模块包含基础图元库、设计面板、节点编辑(设计)、保存提交、程序细则导入、程序细则导出和锁定与解锁(锁定下只有当前用户可以编辑)等功能。基础图元库主要是存放各节点类型的图元控件，各节点类型控件包括开始控件、结束控件、遥测驱动控件、指令驱动控件、指令块控件、程序步骤控件，以拖拽的形式通过连线方式对程序流程进行设计。如图11所示，采用基于图元的程序流程，实现了测试程序的数字化建模与自动

化执行调度，该设计也可推广至在轨运管任务。

指令程序新旧模式前后对比如表1所示，测试与运管一体化指令程序已经在航天器数字化测试设计、自主调度执行以及异常处置方面发挥作用，将航天器测试指令程序设计时长缩短50%，实现指令程序重用与交换共享，人工干预的执行异常处置时间减少50%。

4 结束语

高效统一的航天器指令程序技术有助于规范不同航天器研制单位及相关用户的交互格式，减少由于航天器测试与运管细则描述格式不同引起的软件更改、调试、验证及错误，提升不同航天器的测试与运管程序信息在多用户间平滑交互的能力。本设计借鉴国外航天器指令程序的成功经验，设计了层次化、模块化、抽象化的指令程序架构，并在航天器研制过程中，构建了测试流程

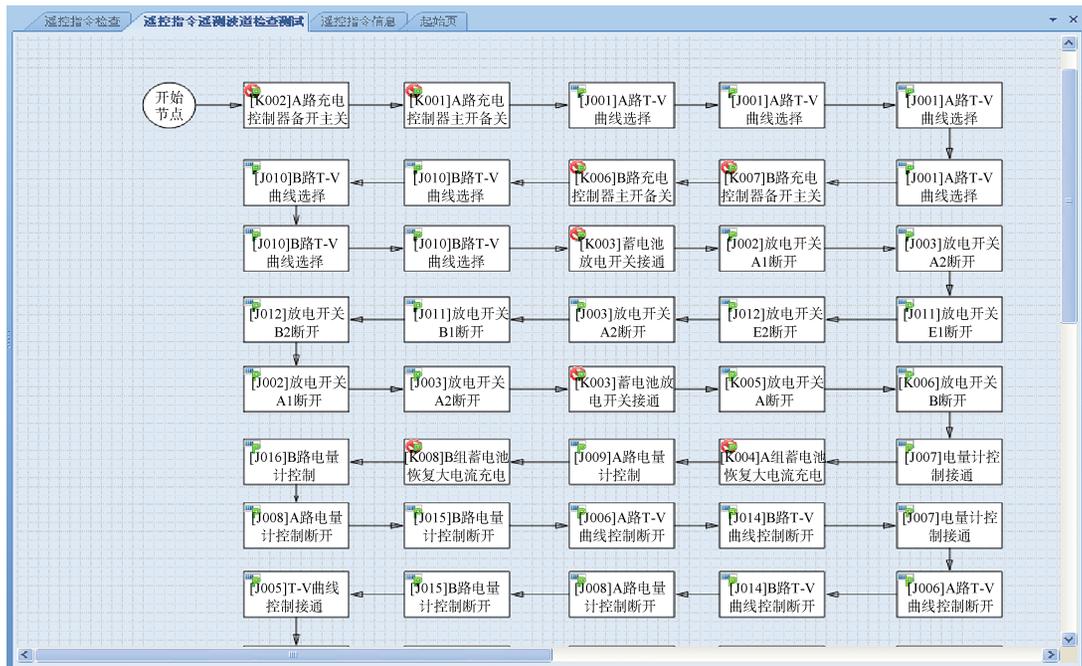


图 11 图形化设计与自动化任务调度执行

Fig.11 Graphical design and automated task scheduling and execution

一体化管理平台, 实现航天器测试设计与测试执行的一体化无缝衔接, 提升航天器集成测试的效率; 同时指令程序也是航天器测试与管控过程智

能化的重要技术组成, 为航天器智能测试与智能管控提供了技术保障。后续将进一步在指令程序并行化、自主化方面开展研究。

表 1 指令程序新旧模式对比

Table 1 Comparison of new and old modes of instruction program

项目	原模式	新模式
指令程序设计	依据纸质细则人工配置, 人工校正	数字化设计, 指令结构自动检查, 电子细则与指令程序同步设计、相互转化
指令程序交换共享	采用扁平指令程序结构, 无法模块化重用、分层组织, 需要人工重新配置	模块化重用, 分层嵌套组织, 快速构建大型指令程序, 支持测试与运管程序一体化设计、重用与共享
指令程序执行	顺序执行	支持顺序执行、无序触发、条件执行及循环执行等多种调度方式, 支持时间与事件触发执行
过程监测与异常处置	简单前后判断	支持多遥测组合判断、超时判断、确认检查等过程监测, 支持异常事件触发, 提供异常处置函数功能

参考文献

[1] 郭亚飞, 权晓伟, 刘力懂, 等. 美军试验鉴定评估发展与启示[J]. 中国航天, 2021(9): 62-65.
 GUO Yafei, QUAN Xiaowei, LIU Litong, et al. Development and enlightenment of US Military test and evaluation[J]. Aerospace China, 2021(9): 62-65.

[2] 权晓伟, 张灏龙, 龚茂, 等. 美军军事智能试验鉴定技术发展态势研究[J]. 中国航天, 2021(2): 62-65.
 QUAN Xiaowei, ZHANG Haolong, GONG Mao, et al.

Research on the development trend of military intelligent test and evaluation technology in the us army[J]. Aerospace China, 2021(2): 62-65.

[3] 张宝珍, 尤晨宇, 吴建龙, 等. 从美国国防部试验鉴定科技计划看美军试验与测试技术发展重点[J]. 测控技术, 2020, 39(10): 1-8.
 ZHANG Baozhen, YOU Chenyu, WU Jianlong, et al. Focus areas of US military test technology development in the light of US department of defense test & evaluation/science & technology program[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(10): 1-8.

- [4] 金前程, 姜江, 杨克巍. 基于知识图谱的试验鉴定研究综述[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 37-41.
JIN Qiancheng, JIANG Jiang, YANG Kewei. Review of test and evaluation based on knowledge graph[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(8): 37-41.
- [5] 赵勋, 古先光. 美军试验鉴定体制改革分析及启示[J]. 国防科技, 2021, 42(4): 99-102.
ZHAO Xun, GU Xianguang. Analyzing reforms in the testing and evaluation system of the US military[J]. National Defense Technology, 2021, 42(4): 99-102.
- [6] 李永哲, 李大伟. 美军装备试验鉴定发展历程分析及启示[J]. 国防科技, 2021, 42(2): 47-53.
LI Yongzhe, LI Dawei. Analysis of equipment tests and evaluations by the US military[J]. National Defense Technology, 2021, 42(2): 47-53.
- [7] 虞业烁, 施敏华, 邓洛凤, 等. 卫星装备试验鉴定数据质量评价技术及实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 233-237.
YU Yeluo, SHI Minhua, DENG Luofeng, et al. Quality evaluation technology and implementation of satellite equipment T&E data[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(8): 233-237.
- [8] 龚昕, 庞亮. 基于多维度的装备试验数据工程标准体系构建研究[J]. 标准科学, 2020(3): 109-114.
GONG Xin, PANG Liang. Research on the construction of equipment test data engineering standards system based on multi-dimensional perspective[J]. Standard Science, 2020(3): 109-114.
- [9] 高括, 刘会杰, 刘磊, 等. 星座卫星在轨长期管理测控策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(7): 1-4.
GAO Kuo, LIU Huijie, LIU Lei, et al. Research on TT&C strategy of long-term management of constellation satellites in orbit[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(7): 1-4.
- [10] 赵辰, 王晓晨, 张香燕, 等. 多航天器在轨管理模式建立与实践[J]. 航天器工程, 2019, 28(1): 124-128.
ZHAO Chen, WANG Xiaochen, ZHANG Xiangyan, et al. Establishment and practice of multiple spacecraft in-orbit management mode[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(1): 124-128.
- [11] 鄂炜, 赵宁, 明建. 航天器在轨运行状态管控模式建立与实践[J]. 航天器工程, 2020, 29(4): 115-119.
E Wei, ZHAO Ning, MING Jian. Establishment and practice of management and control mode for spacecraft in-orbit operation status[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(4): 115-119.
- [12] 白照广, 陆春玲, 左莉华, 等. 卫星在轨任务管理技术研究[J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 1-6.
BAI Zhaoguang, LU Chunling, ZUO Lihua, et al. Research on on-orbit satellite mission management technology[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(1): 1-6.
- [13] OMG. Satellite operations language metamodel (SOLM) v1.0[S]. Needham: OMG, 2012.
- [14] ECSS Secretariat. ECSS-E-ST-70-32C Space engineering-test and operations procedure language[S]. Paris: ESA Requirements and Standards Division ESTEC, 2008.
- [15] FRANK J. Automation for operations[C]//San Diego, California: Proceedings of the AIAA Space Conference and Exposition, 2008.
- [16] 刘玉荣, 穆勇, 阎镇, 等. 基于PLUTO的卫星自动化运控系统及应用[C]//海南: 第二十六届全国空间探测学术研讨会, 2013.
- [17] BASKARAN V, DALAL M, ESTLIN T, et al. Plan execution interchange language (PLEXIL) version 1.0[R]. Washington D.C.: NASA Technical Memorandum, 2007.
- [18] FRANK J. When plans are executed by mice and men [C]// Big Sky, MT: IEEE Aerospace Conference, 2010.
- [19] KORTENKAMP D, VERMA V, DALAL M, et al. A procedure representation language for human space flight operations[C]// Los Angeles, CA: 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation for Space, 2008.
- [20] DALAL M, FRANK J. Bridging the gap between human and automated procedure execution[C]//Big Sky, MT: 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010.
- [作者简介]
杨同智 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器总体设计、综合测试与在轨管理。
刘廷玉 1990年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器综合测试。
王 杰 1988年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器综合测试。
于 畅 1994年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器综合测试。
余灵峰 1985年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器综合测试。
- (本文编辑: 潘三英)