

一种卫星任务解译闭环仿真验证系统的设计与实现

何铭俊, 陆文高, 曾 鸿, 姬云龙

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 卫星任务解译闭环仿真验证系统, 有效解决了目前卫星任务规划的验证仿真、修改反演等关键环节, 能够保证卫星任务规划的正确实施, 替代传统星务测试床, 将任务块解译为星务主机可执行的指令集合; 另外可通过本系统对任务块中的参数、任务块的设置进行修改、重新生成任务块并对其进行迭代分析以保证正确性, 提高任务块生成的效率及可靠性, 将最终生成的正确任务块的解译结果与任务规划系统生成的动作序列进行对比, 可验证任务规划的正确性及合理性; 减少岗位人员及人工操作, 缩短了测试所需时间, 提高了测试效率; 高效测试方案已应用于卫星地面测试中, 应用效果良好。

关键词: 卫星; 任务解译闭环仿真验证; 测试系统

Design and Implementation of a Closed-Loop Simulation Verification System for Satellite Mission Interpretation

He Mingjun, Lu Wengao, Zeng Hong, Ji Yunlong

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094)

Abstract: The system effectively solves the key links of current satellite mission planning, such as verification, simulation, modification and inversion, etc. It can ensure the correct implementation of satellite mission planning and replace the traditional satellite test bed. It can interpret the task block as a set of executable instructions for the satellite host. In addition, the parameters in the task block and the setting of the task block can be modified by the system. The task block is regenerated and analyzed iteratively to ensure its correctness, improving the efficiency and reliability of task block generation. The system aligns the resulting interpretation result with the action sequence generated by the task planning system, verifying the correctness and rationality of task planning. Reducing the number of personnel and manual operation, shorten the time required for testing, improved testing efficiency. The high-efficiency test scheme has been applied to the satellite ground test, and the application effect is good.

Keywords: small satellite; closed-loop simulation verification system for satellite mission interpretation; test system

0 引言

随着航天的快速发展, 航天图像在各个行业开始逐步应用并深入发展, 用户对图像的质量要求也越来越高, 这就需要更加快速灵活的图像生成模式, 敏捷卫星正是为了适应这种需要而产生。敏捷卫星在机动速度和多自由度姿态机动方面远远高于传统地对地卫星, 支持复杂成像模式^[1]。然而, 任务数量众多, 成像模式复杂, 指令序列繁多, 传统简化的任务执行模式显然不适用, 因此, 任务规划技术成为了发展敏捷卫星成像的瓶颈和关键技术。国内外学者在该领域开展了广泛的研究。Beaumont等^[2]针对复杂成像模式提出了一种敏捷卫星成像规划算法; Kucinskis等^[3]在星上软件和数据接口提出了一种面向任务的概念, 而Pralet等^[4]提出了一种新型模型以便优化卫星星上状态数据实时传输策略; 航天东航红卫星公司的伍保峰等^[5]可以将传统卫星单条指令优化成星上卫星批指令执行; 贺仁杰等^[6]提

出了一种多星任务规划的算法。然而, 以上文献仅从单个方面提出或优化了卫星任务管理问题, 不能有效解决目前敏捷卫星所面临的挑战。另外受限于星载计算机的计算能力等资源有限原因, 目前还无法真正实现星上自主任务规划, 而地面任务规划系统因为具备诸多优点而得到初步应用。

在实际应用中, 设计人员需要根据具体任务, 通过地面任务规划系统实现卫星任务和动作的合理安排, 地面任务规划系统首先生成规划后的星上动作序列, 然后根据动作序列, 以任务数据块的形式生成待上注的星上数据块。但是如何验证地面任务规划系统, 如何保证敏捷卫星任务规划的正确实施目前还没有一套完整的方法供参考。

1 系统方案

1.1 总体结构

任务上注闭环仿真验证系统功能主要包括三大方面: 任务块仿真解析、任务块验证和任务规划修改反演功能。

任务块仿真解析主要功能是对地面任务规划系统生成的任务数据块进行星上任务仿真解析, 根据上注数据块格

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-07-16。

作者简介: 何铭俊(1979-), 男, 北京人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事卫星综合测试设计与开发方向的研究。

式，将任务数据块最终解析成指令序列及指令开始执行时间。同时，系统将上注任务数据块进行格式反演，反演成星载系统所能识别的格式信息。

上注任务块验证主要功能是对上注任务块仿真解析之前，对上注数据块进行任务块验证，主要验证上注任务数据块格式、上注任务姿态机动数据块、上注任务包含的数据及载荷指令参数信息。

任务规划修改反演功能主要是对任务规划内容进行修改，并再次生成任务数据块。

如图 1 所示，任务解译闭环仿真验证系统三大功能，将和地面任务规划系统生成的任务数据块组成闭环迭代功能。

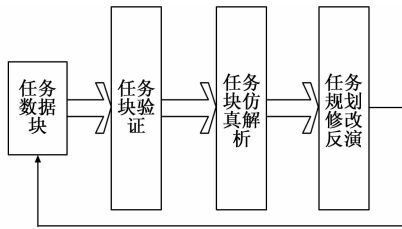


图 1 系统总体架构图

1.2 功能模块设计

任务上注闭环仿真验证工具模块主要包括：中心控制单元，星上模板定义单元，参数验证规则定义单元，数据格式定义单元，通用逻辑处理单元，数据接收处理单元，任务块仿真解析数据输出单元和任务规划修改反演数据输出单元。系统模块结构图如图 2 所示。

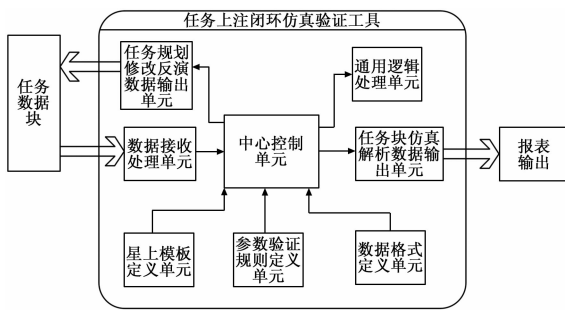


图 2 系统模块结构图

(1) 星上模板定义单元主要进行敏捷卫星上相对程控指令模板的定义。敏捷卫星在轨运行阶段，为提高卫星可操控性及灵活性，对载荷的操作控制采用地面上注任务数据块形式，星上星务主机自动调用模板进行解译生成指令的操作控制方式。星上模板定义单元定义的主要字段及结构包括：指令代号、指令名称、执行时间、标识、段标识、指令执行所需时间、是否带参数指令、指令执行时间 ΔT 、参数长度。

(2) 参数规则定义单元主要定义上注任务姿态机动数据块、上注任务包含的数传载荷批处理指令参数规则定义信息。系统支持将任务块中参数单独提取并进行详细解析

功能。同时，系统也支持反向生成功能，如将特征码值，有效数据等参数修改后，重新生成数据块。

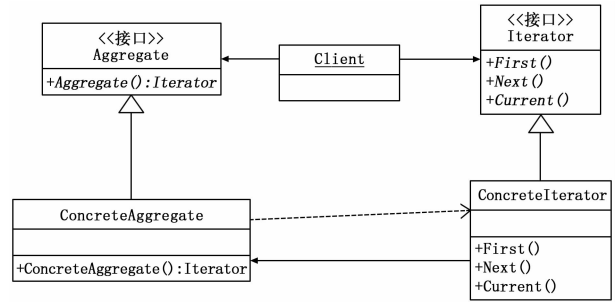


图 3 迭代器模式类图

不同卫星型号，对于参数规则的定义可能会不同，系统需要适应此种变化而不会出现大的改动，这就需要引入一种迭代器模式 (ITERATOR)。迭代器模式提供了一种方法顺序访问一个聚合对象中各个元素，而又不需要暴露该对象的内部表示。迭代器模式类如图 3 所示。通过迭代器模式，可以实现参数规则定义的动态变化调整。如图 4 所示，进行具体的参数规则验证时，系统首先调用迭代器，获取目前定义的所有参数规则定义单元。获取所有规则定义单元后，根据具体的规则定义单元，通过调用统一的接口方法，参数规则验证单元进行具体的参数规则验证操作，从而实现动态验证参数规则过程。

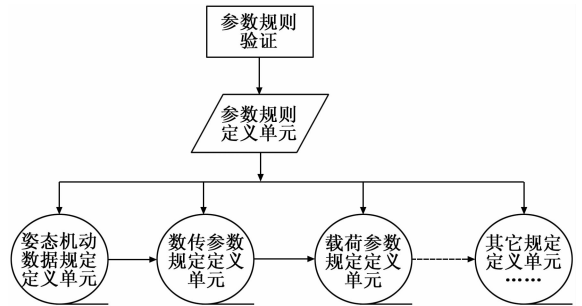


图 4 参数规则动态验证实现流程图

(3) 数据格式定义单元主要定义上注任务数据块所需要的格式信息。典型的数据格式信息包括任务块头、元任务个数、元任务号、元任务开始时间、任务属性、元任务持续时间、包含的模板个数、模板编号、模板启动相对时间、模板各段执行标识、段间隔时间、模板参数长度及参数信息字段。

如图 5 所示，对于数据格式定义单元的验证，采用迭代器模式，从而适应数据格式定义单元的变化调整。进行具体的数据格式验证时，系统首先调用迭代器，获取目前定义的所有数据格式定义单元，之后根据具体的数据格式定义单元，通过调用统一的接口方法，数据格式验证单元进行具体的数据格式验证操作，从而实现动态验证数据格式的过程。

(4) 数据接收处理单元的主要任务是任务数据块的输入及相关逻辑处理，是整个系统的数据输入模块。

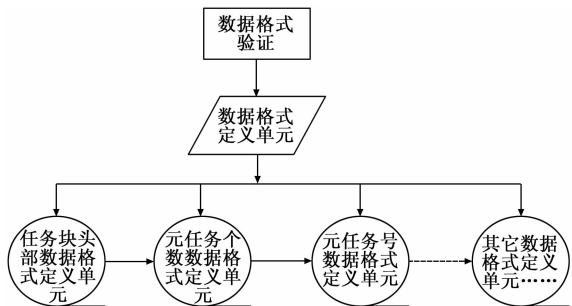


图 5 数据格式动态验证实现流程图

(5) 通用逻辑处理单元主要完成系统逻辑单元的处理, 以供系统进行调用, 比如对输入数据块进行字符统一转换处理, UTC、北京时间和格林威治时间的转换等逻辑处理单元。

(6) 任务块仿真解析输出单元, 输出解析后的报表格式, 报表格式包括: 指令序列和格式反演序列。其中指令序列包括: 星箭分离时 UTC 值, 任务块码字, 元任务个数, 最后处理的元任务号, 最后处理的元任务开始时间, 最后处理的元任务属性和元任务任务持续时间, 最后处理的元任务包含的模板个数、指令名称、指令参数、指令开始执行北京时间, 指令开始执行格林威治时间、指令开始执行 UTC 时间、姿控星时; 格式反演序列包括: 数据内容、码字、说明、指令块号、元任务号、模板编号、其他信息或错误信息。

(7) 任务规划修改反演数据输出单元, 进行任务规划反演操作, 重新生成修改过的任务数据块, 对修改后的任务数据块可以重新进行验证和仿真解析处理。

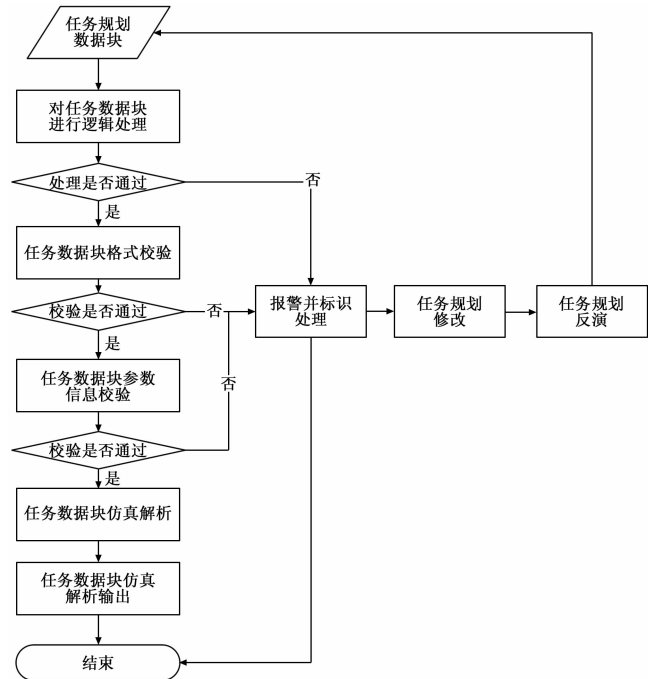


图 6 中心控制单元处理任务数据块仿真解析流程图

(8) 中心控制单元是系统主要核心模块, 负责调用各个系统模块。对于典型的任务数据块仿真解析流程如图 6 所示: 系统首先对通过数据接收处理单元接收的任务数据块进行逻辑处理, 如果逻辑处理有问题, 系统将进行报警并标识处理。通过逻辑处理单元后, 进行任务数据块格式校验, 同时将格式校验结果进行输出显示, 便于设计人员核对。在校验过程中, 一旦处理格式错误, 系统将报警并标识处理。数据块格式校验后, 系统将对格式校验通过的数据块中包含的参数信息进行校验, 如果出现异常, 系统将进行报警并标识处理。全部通过后, 系统将进行任务数据块仿真解析处理, 同时调用任务块仿真解析输出单元将解析处理后的结果进行报表输出。对于系统报警并标识处理的地方, 卫星系统设计师可以根据报警类型进行任务规划修改, 修改完成, 可以进行任务规划反演操作, 重新生成修改过的任务规划数据块, 对修改后的任务规划数据块进行重新验证和仿真解析处理, 从而完成敏捷卫星任务解译闭环流程。

1.3 系统运行流程

任务解译闭环仿真验证系统的整体运行流程如图 7 所示。

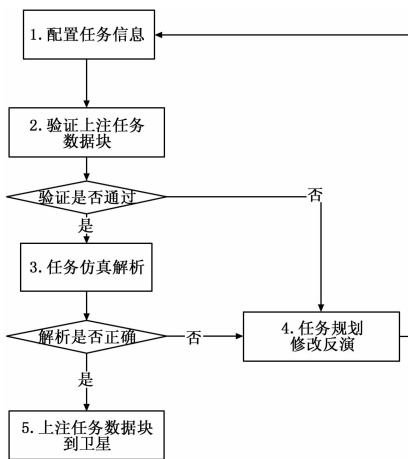


图 7 系统运行流程图

(1) 配置任务信息, 对任务数据块进行任务解译仿真之前, 需要进行任务信息配置, 不同的任务类型, 灵活定制不同的任务信息, 这些任务信息包括: 星上模板定义, 参数验证规则定义, 数据格式定义;

(2) 验证上注任务数据块, 对任务数据块进行格式验证, 包括数据长度验证、数据头验证、校验码字验证、元任务号冲突验证、元任务时间验证、任务属性验证、模板参数验证、模板属性验证、姿态机动数据格式验证; 同时, 模拟星上处理单元对上注任务数据块进行九大错误模式处理, 包括①超过了最大允许元任务数量; ②上注的任务数据块内部包含的元任务超过了最大允许个数; ③某元任务的模板超过了最大字节数; ④多个元任务没有按照时间先后顺序排列; ⑤模板没有按照时间先后顺序排列; ⑥前一

个元任务的结束时间比后一个元任务的结束时间大；⑦插入数据块最后一个元任务的开始时间大于插入位置的起始时间；⑧插入数据块最后一个元任务的结束时间大于插入位置的结束时间；⑨其他错误；如果验证上注任务数据块完全正确，则进入步骤（3）；如果验证不通过，则根据验证失败类型进行提示，跳转到步骤（4）；

（3）任务仿真解析，首先，对地面任务规划系统生成的任务数据块进行星上任务仿真解析，根据任务数据块格式，将任务数据块最终解析成指令序列，自动判读任务块解译结果并将异常信息输出，避免错误任务块上注卫星。其次，将任务数据块进行格式反演，反演成敏捷卫星系统所能识别的格式信息，同时将最终生成的任务数据块的解译结果与任务规划系统生成的动作序列进行比对，验证任务规划的正确性及合理性；最后，根据元任务号，对任务数据块中的批指令和姿态机动数据块进行详细解译处理，进一步细化处理结果；任务仿真解析结束后，进入步骤（5）；如果卫星系统设计师对解析结果产生异议，需要修改任务数据块，则进入步骤（4）；

（4）任务规划修改反演，一旦地面任务规划系统生成任务数据块有误，能够通过人机交互界面对任务块中的错误参数进行修改、重新生成任务块并对任务块进行迭代分析以保证正确性，避免手动编排任务块带来的风险，提高任务块生成的效率及可靠性；如果修改完成，此时进入步骤（1）；

（5）如果任务解译闭环仿真正确，则此任务数据块将提交到地面测控站，上注到卫星进行具体任务执行，结束；如果卫星系统设计师出现任务疑问需要修改，则进入步骤（4）。

2 应用效果与分析

任务解译闭环仿真验证系统已经应用于某高分辨率对地观测卫星的工厂测试、各类大型试验、应用对接测试等多个场景。首先，地面任务规划系统根据用户需求和星上状态数据，生成卫星任务数据块提交卫星研制方，然后，卫星测试人员将卫星任务数据块输入本系统，系统首先验证数据块，验证无误后根据 UTC 时间自动生成卫星指令序列及卫星指令参数信息等，之后，测试人员进行确认，确认无误上星运行卫星指令数据块。生成的序列一旦存在指令或者指令参数信息错误或调整需求，测试人员可以即时更正，重新生成卫星所需要的任务数据块。全部修改完毕后，反馈至地面任务规划进行修改。通过此种方式，测试效率大大提高，将过去 3 个人 10 天的验证工作量缩短为 1 人半天，同时，大大缩短了卫星与地面任务规划的交互周期。

该系统与现有技术相比，具有以下优点：

（1）星务仿真。目前还没有现成的技术进行参考，比较通用的做法是进行星务测试床试验模拟。但是星务测试床对任务规划数据块格式验证程度有限，只能进行部分验证，一旦验证不通过，无法进行任务修改反演。另外，星

务测试床对第三方验证对象无法覆盖，比如无法验证姿控机动数据块，无法验证载荷批处理指令等。

（2）闭环反馈。本系统是一个闭环迭代过程，将任务数据块经过任务块验证、任务块仿真解析、任务规划修改反演之后，重新生成地面任务规划系统输出的任务数据块。避免手动编排任务块带来的风险，提高任务块生成的效率及可靠性。

（3）精确比对。本系统不仅可以进行仿真解译处理，而且能够生成设计师直观看到的指令序列、格式反演序列，方便任务规划设计师进行直观修改。同时将最终生成的正确任务块的解译结果与任务规划系统生成的动作序列进行比对，可验证任务规划的正确性及合理性。

（4）批指反解。可以对数传载荷批处理指令参数、姿态机动数据块进行实时详细解译，对数据块正确性的判读更加直观；支持自动生成数传、载荷批处理指令参数、姿态机动数据块，重新生成任务数据块更加精准便捷。

（5）应用灵活。可以进行灵活配置。系统引入了设计模式中的迭代器模式，可以动态适应不同的参数规则定义及数据格式定义，不同的型号，通过配置不同的参数规则定义及数据格式定义，就可以适应不同任务类型的需要。同时，可以针对不同型号或者任务类型定制不同的模板，实现任务类型的灵活调整，适应更多的型号需要。

3 结束语

通过任务解译闭环仿真验证系统的实现，有效解决了目前敏捷卫星任务规划的验证仿真、修改反演等关键环节，保证了敏捷卫星任务规划的正确实施。系统完美支撑模飞、运控对接、热试验等对上注任务块验证和修改的需求的场景。同时，系统应用贯穿卫星测试、飞控和在轨服务等多个环节。

参考文献：

- [1] 张新伟, 戴 君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究 [J]. 航天器工程, 2011, 20 (4): 32-38.
- [2] Beaumet G, Veffaillie G, Charneau M C. Feasibility of autonomous decision making on board an agile earth-observing satellite [J]. Computational Intelligence, 27 (1): 123-139, 2011.
- [3] Kucinskis F N, Ferreira M G V. Planning on-board satellites for the goal-based operations for space missions [J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11 (4): 1110-1120.
- [4] Pralet C, Gerard V. Dynamic online planning and scheduling using a static invariant-based evaluation model [A]. 23rd International Conference on Automated Planning and Scheduling [C]. Rome, Italy, Jun. 10-14, 2013.
- [5] 伍保峰, 李志刚, 李军予, 等. 面向任务的小卫星自主指令设计 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (4): 68-71.
- [6] 贺仁杰, 高 鹏, 白保存, 等. 成像卫星任务规划模型、算法及其应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31 (3): 411-412.