探月三期月地高速再入返回飞行器全任务飞行过程验证策略设计与实践

富小薇*, 宋世民, 赵阳, 傅晓晶, 崔帆, 白崇延, 张伍

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: xwfusmile@vip.sina.com

收稿日期: 2014-12-03; 接受日期: 2014-12-24

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 探月三期月地高速再入返回飞行器是我国首次开展地外航天器跳跃半弹道再入式返回, 飞行过程新, 系统集成度高. 本文首先依照全过程中不同阶段的飞行特点, 采用静态映射的方式完成飞行任务剖面的划分; 然后在此基础上开展用例场景的识别; 最后生成相应的测试用例. 形成了完整的面向全任务飞行过程的验证策略设计思路. 该方法已在实践中得到应用, 可作为后续工作的参考.

关键词

探月三期
月地返回
高速再入
飞行剖面
用例场景
验证策略

1 引言

月地高速再入返回飞行器是我国首次深空再入返回的航天器. 其总体设计是一个复杂的创造性过程^[1]. 该任务飞行过程复杂、阶段多, 验证难度大, 给系统级测试设计提出了需深入探讨的课题.

航天器电测工作主要发生在航天器全寿命周期的总装和试验阶段, 即 AI&T(assembly integration & test)阶段. 如果把测试任务实施之前的工作划分为四部分, 即测试设计、文件编写、软硬件生产和设备调试与验证的话, 粗略估计测试设计及分析的工作量占 40%^[2]. 当前深空飞行器 AI&T 阶段, 测试设计仍主要围绕各项要求展开, 而该现状已无法满足复杂航天器测试覆盖性及有效性对测试设计的要求, 迫切需要寻找更多的方法来完善和丰富当前的测试设计思路.

本文基于面向对象的测试设计思路, 把“飞行任务剖面”概念及软件测试方法引入飞行器复杂系统的测试验证中, 提出把飞行任务的描述文件“飞行程序”引入到测试设计之中, 展开面向全任务飞行过程的测试设计. 该方法首先面向“飞行任务剖面”对飞行过程进行分解, 然后面向“飞行任务剖面”进行用例场景的识别, 最后面向每个场景生成测试用例的三步走验证策略. 为实现飞行器全任务飞行过程验证提供支持.

2 面向全任务飞行过程验证策略设计

飞行器制造部门在标准轨道条件下, 根据航天器任务的需求, 安排一个理想的控制事件序列, 形式是相对时的控制事件时序表, 命名为飞行程序^[3]. 飞行程序设计是深空飞行器方案设计阶段的重要工作

引用格式: 富小薇, 宋世民, 赵阳, 等. 探月三期月地高速再入返回飞行器全任务飞行过程验证策略设计与实践. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 139–144
Fu X W, Song S M, Zhao Y, et al. Design and practice for the full mission flight process validation strategy (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 139–144, doi: 10.1360/N092014-00466

之一,也是各分系统进行后续设计的重要输入条件.飞程序,可认为是为完成某项特定任务,而执行的具有时序关系特性的一系列连续动作,即飞行过程.

飞行器测试设计阶段初期,以任务目标为指引,就应把“飞程序”作为顶层输入文件,全面开展面向全任务飞行过程的分析工作.提高测试用例的针对性及有效性的同时,也使得飞行器测试人员与设计人员的工作目标以及工作角度得到了一定程度的统一.

2.1 飞行任务剖面分解

面对复杂飞行过程,首先需要对其进行有效的分解.GJB450A《装备可靠性工作通用要求》对“任务剖面”的定义为,产品在规定的任务时间内所经历的事件和环境的时序描述,其中包括任务成功或致命故障的判断准则.而飞行过程是具有时序关系特性的一系列连续动作,两者存在相关性.所以,在飞行过程分析阶段,本文选择面向“飞行任务剖面”对其进行分解.分解思路为,自上而下,由大到小,由飞行过程直至分解至某一个分系统或者多个分系统联合完成的特定任务.具体分解过程如下所述.

本文使用概念“飞行状态向量 P_t ”来表征飞行器某时刻 t 下的状态.如仅从飞行器电性能系统级的测试需求考虑,“飞行状态向量”仅由器上各个分系统状态参数组成.

飞行器根据采用的轨道特性,飞行过程一般分为多个“飞行阶段 $F(T1,T2)$ ”.每个飞行阶段,飞行器根据预定飞程序,完成一系列的飞行任务.本文将每个飞行任务称为“飞行单元 $f(t1,t2)$ ”,其可由“起始飞行状态向量 P_{t1} ”,“终止飞行状态向量 P_{t2} ”以及“任务单元 G_{t1t2} ”(该飞行单元时间范围内飞行器完成的功能)组成的三元式表达.任务单元 G_{t1t2} ,是面向飞行过程测试分析的基本单元,即“飞行任务剖面”.

综上所述,面向飞行过程的分解过程中,逐层次分解产物的数学表达式如下:

1) 飞行状态向量: $P_t = \eta(S_{0t}, S_{1t}, \dots, S_{mt})$. t 为飞行程序中的相对时间; S_{mt} 为分系统 S_m 在时间 t 下的状态;

2) 飞行阶段: $F(T1,T2)$. $T1, T2$ 分别为飞行程序中该飞行阶段的起止相对时间;

3) 飞行单元:

$$f(t1, t2) = (P_{t1}, G_{t1t2}, P_{t2}), P_{t1} = \eta(S_{0t1}, S_{1t1}, \dots, S_{mt1}), \\ P_{t2} = \eta(S_{0t2}, S_{1t2}, \dots, S_{mt2}). P_{t1}$$

为起始飞行状态向量, P_{t2} 为终止飞行状态向量, G_{t1t2} 为任务单元; $t1, t2$ 分别为飞行单元所在飞行程序中的起止相对时间;

4) 任务单元(飞行任务剖面): $G_{t1t2} = S_n(t1, t2)$ 或 $S_1 S_2 L S_n(t1, t2)$; $S_n(t1, t2)$ 为某个分系统任务单元, $S_1 S_2 L S_n(t1, t2)$ 为多个分系统联合任务单元;

依据上述方法,对月地高速再入返回飞行器的飞行过程进行分解,过程如图 1 所示.

2.2 识别用例场景

场景(Scenario)是一个描述性的用例实例,是用例集的子集,用于描述行为按特定顺序排列的动作^[4].飞行器飞行过程一般是由事件触发的飞行逻辑及过程控制流程.事件触发时的情景便形成了场景,而同一事件不同的触发顺序和处理结构就形成了事件流^[4].这种在软件设计方面的思想也可以引入到系统级测试设计中,可以比较生动地描绘出事件触发时的情景,有益于描述飞行器正常工作轨迹,以及出现异常后,如何通过状态转移,最终回到基本事件流的过程.有利于设计测试用例的同时,也使得测试用例更加容易理解和执行.

本文面向分解飞行过程得到的飞行剖面,进行用例场景的识别.识别过程如下^[4]:

1) 采用有向图来描述用例事件流的具体步骤.其中,有向图的主干为基本流,描述了用例的一个典型事件流.有向图的支干为备选流,描述了异常或者出现错误时会发生的事件流(其中 B 点为用例开始点,状态为该飞行剖面的起始飞行状态向量 P_{t1} , E 点为用例结束点,状态为该飞行剖面的终止飞行状态向量 P_{t2});

2) 搜索有向图的所有可能路径(顶点 B 到顶点 E 之间的路径),并用树的方式表示出来(只考虑有向图中的环执行一次的情况);

3) 对树进行搜索直至搜索出所有以根节点 B 开始,叶子节点 E 结束的所有路径,即可得到所有用例场景.

规范化的识别过程描述有利于用例场景的自动生成.该方法能够有效覆盖飞行任务剖面中的所有典型场景以及故障场景,保证了逻辑验证覆盖的完备性.

依据上述方法,分别对图 1 中分解得到的 3 个典

图 1 飞行器面向飞行过程分析图

图 2 UTC 校时飞行剖面用例场景识别过程

(a) 用例有向图; (b) 搜索树; (c) 识别场景

型飞行任务剖面进行场景识别. 图 2 为“UTC 校时飞行剖面”的场景识别过程. 其中, 步骤①为获取时间

差; 步骤②为进行校时, 并进行校时结果的判断, 如果校时正确, 本用例终止. 否则进行步骤①, 重复进行校时.

图 3 为“推力器电磁阀主动排气飞行剖面”的场景识别过程. 其中, 步骤①为地面发送指令组 1, 打开电磁阀; 步骤②为监视是否推进分系统进行排气, 如果正常排气, 则进行步骤③. 否则, 进入步骤④, 地面补充发送指令组 1 中的每条指令; 步骤③为监视推进系统排气结束后, 是否自主执行指令组 2, 关闭电磁阀. 如果正常关闭, 则本用例终止. 否则, 进入步骤⑤, 地面补充发送指令组 2 中的每条指令.

图 4 为“第一次惯性处理单元(IMU)标定及数据下传飞行剖面”的场景识别过程. 其中, 步骤①为安全数据记录器加电. 如果加电后, 设备自检正常, 则进行步骤②. 否则进行步骤⑥, 对安全数据记录器进行

图 3 管路排气飞行剖面用例场景识别过程

(a) 用例有向图; (b) 搜索树; (c) 识别场景

图 4 IMU 标定飞行剖面用例场景识别过程

(a) 用例有向图; (b) 搜索树; (c) 识别场景

断电及再加电操作; 步骤②为控制与导航(GNC)转标定模式. 如果状态正常, 则进行步骤③. 否则, 进行步骤⑦GNC 控制器(GNCC)切机操作. 切机后, 进行步骤⑧, GNC 转标定模式, 如果状态正常, 则进行步骤③. 否则, 则本用例终止. 等待下次 IMU 数据标定; 步骤③为开始 IMU 标定, 标定结束后, 进行步骤④; 步骤④为打开数传通道, 准备下传标定数据. 如果通道打开成功, 则进行步骤⑤. 否则, 进行步骤⑨, 切备份数传通道; 步骤⑤为开始下传标定数据, 下传结束后, 本用例终止.

2.3 生成测试用例

在 2.2 中得到的场景, 每个场景都需要确定测试用例. 测试用例可以采用矩阵或决策表来确定和管理. 一旦确定了所有的测试用例, 则应对这些用例进行复审和验证以确保其准确且适度, 并取消多余或等效的测试用例. 对于每个测试用例, 一般都会包括测试用例 ID, 条件(或说明)、测试用例中涉及的所有数据元素以及预期结果. 具体方法, 可借鉴正交表分析^[5]、等价类划分法^[5]、边界法^[5]等多种测试用例设计思路.

3 面向全任务飞行过程验证实践

3.1 系统级详细测试设计应用

在系统级详细测试设计阶段, 以飞行任务为指引, 把层层分解及分析后的产物, 融合到使用传统方法识别的测试用例库中, 使得测试用例的有效性得到显著提高, 即更加完备的同时又具备一定的针对性. 完善后的测试用例库, 将在飞行器模飞测试前, 更加有效地完成系统级功能测试以及系统级匹配及兼容性验证. 从而使得尽早地发现飞行器中的问题, 尤其是深层次的异常问题成为可能.

以图 1 中的 3 个典型飞行任务剖面为例, 介绍生成测试用例与传统方法识别得到的测试用例库相融合的方法.

1) 作为已有测试用例的新分支: 如飞行任务剖面#1 对应的测试用例, 在数管分系统校时功能检查

时, 除了对集中校时星地时差的边界值进行验证以外, 也对实际应用中的星地差值(U_1-U_0)进行测试;

2) 作为更有效的新用例替换已有多个用例: 如飞行任务剖面#3 对应的测试用例, 可替换掉已有的“安全数据记录器存储及数据下传功能检查”以及“IMU 标定功能检查”两个完全独立的测试用例, 提高测试效率;

3) 作为全新用例加入到已有的用例库: 如飞行任务剖面#2 对应的测试用例, 从系统级而非分系统角度, 增加该测试用例, 进行推力器电磁阀主动排气功能检查.

3.2 模飞测试设计应用

在模飞测试设计阶段, 首先需要根据飞行任务的特点, 在飞行过程分析阶段, 按照“飞行程序”中规定的相对时间, 依次提取典型飞行任务剖面, 形成典型飞行任务剖面序列. 从而在保证测试完备性的前提下, 有效缩短测试用时; 其次, 由于在系统级详细测试阶段, 已经基于场景分析, 对每个飞行任务剖面的典型事件流及故障事件流进行了完备的测试. 所以, 本阶段可采取主要验证典型飞行剖面序列中的典型场景的策略. 根据具体需求, 再挑选典型飞行剖面序列中的若干重大故障场景进行测试, 加以补充.

4 总结

本文提出的“飞行任务剖面分解”、“用例场景识别”、“测试用例生成”三步走验证策略, 在月地高速再入返回飞行器 AI&T 阶段, 得到了充分的实践和验证. 测试数据表明, 该方法在缩短测试用时的同时, 有效保证了复杂系统逻辑验证覆盖的完备性; 能够使得故障高发期提前, 失效率变化曲线快速收敛, 从而提升测试可靠性; 能够对复杂过程的典型场景以及故障场景进行合理的测试, 保证了测试结果的可信性. 为发射场测试零故障, 在轨飞行零故障提供了有力支持. 今后进一步的工作主要是对典型飞行任务剖面的提取方法、用例场景优化等方面进行更深入的研究.

参考文献

- 1 张伟. 深空探测总体技术. 上海航天, 2012, 6: 280–282
- 2 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程. 北京: 中国科学技术出版社, 2009
- 3 韩威华, 姜萌哲. 深空探测器的飞行控制工作模式. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十次学术会议. 张家界, 2007. 173–179
- 4 潘建勇, 陈邦兴. 基于场景的测试用例设计方法研究. 通信技术, 2011, 12: 77–80
- 5 陈能技. 软件测试技术大全—测试基础、流行工具、项目实践. 北京: 人民邮电出版社, 2008

Design and practice for the full mission flight process validation strategy

FU XiaoWei, SONG ShiMin, ZHAO Yang, FU XiaoJing, CUI Fan, BAI ChongYan & ZHANG Wu

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

The circumlunar free return and reentry flight vehicle of the 3rd phase of China lunar exploration program is the first mission of jump reentry out of the earth in China, which has the attribute of high-integration and new-flight process. This paper presents a three-step method, which is a full-scale means and ways of full-mission flight validation. Firstly, the full-flight process is divided into some mission profiles according to their characters. Secondly, the case scenarios are identified against the profiles. Lastly, the test cases collection is achieved. This method has been put into practice and has good effect.

3rd phase of China lunar exploration program, circumlunar free return, reentry, flight mission profile, case scenario, validation strategy

doi: 10.1360/N092014-00466