

# 可重用航天器返回后电性能综合测试方法研究

谢志勇, 潘顺良, 赵铮

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 航天活动的日益增多必然会带来可重用航天器的发展, 在可重复使用航天器返回后如何对其进行全方面的电性能评估是一个重要的研究方向; 结合某型号可重用飞船返回舱返回后的测试经验及方法, 研究了可重用航天器返回后的电性能综合测试方法, 从设备状态识别、测试用例固化、状态变化比较、剩余寿命分析、测试项目缩减等方面给出了全新的思路参考; 采用新型的测试方法可以进一步缩短测试周期、优化测试流程、提高测试效率、降低测试成本。

**关键词:** 可重用航天器; 返回后; 综合测试

## Research on Comprehensive Test Method of Electrical Performance of Reusable Spacecraft after Return

Xie Zhiyong, Pan Shunliang, Zhao Zheng

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The increasing number of space activities will inevitably lead to the development of reusable spacecraft. How to evaluate the electrical performance of reusable spacecraft after its return is an important research direction. Combining the test experience and methods of the return spacecraft, a comprehensive test method for the electrical performance of the reusable spacecraft after return was studied. It was provided a brand new test idea from the aspects of equipment status identification, test case solidification, status change comparison, remaining life analysis, and test item reduction. Using new test methods can further shorten the test cycle, optimize the test flow, increase test efficiency, and reduce test costs.

**Keywords:** reusable spacecraft; after return; comprehensive test method

## 0 引言

随着航天技术的发展, 天地往返将成为常态, 为了进一步降低航天发射成本, 提高发射效率, 发展可重复使用航天器是必然选择。可重复使用航天器采用可重复使用技术, 实现单次飞行的低成本与高效益。

在可重复使用航天器返回后, 依据可重用设计, 通过更换隔热结构、火工品装置等部件, 可使其具备再次飞行的物理状态。但在再次上天飞行前, 必须经过电性能综合测试, 验证航天器各单机飞行返回后的设备状态及工作情况, 验证各功能系统设备的供电情况、电气及信息接口、系统功能性能指标、系统间接口匹配情况等。基于航天器重复发射飞行的特点, 传统的动辄 1~2 年的长周期测试流程及方法已经不再适用于可重复使用航天器返回后的电性能测试需求<sup>[1-3]</sup>, 亟需探索一种新的适用于可重用航天器返回后的电性能综合测试方法。

## 1 问题分析

### 1.1 测试目的

不同于一般航天器出厂前电性能综合测试流程及方法<sup>[4-6]</sup>, 可重复使用航天器返回后的电性能综合测试的目的是为了验证所有电性能设备的工作状态是否依然正常, 比较在经历了火箭发射、在轨飞行、着陆返回等过程后各设备加电后输出信号的状态变化, 分析航天器各功能系统间电气接口的协调匹配情况, 评估电性能设备的剩余寿命是否满足再次飞行任务需求。同时, 在完成上述工作的基础上, 尽可能地缩小小测试周期、缩减测试成本, 从而提高可重复使用航天器的经济效益<sup>[7]</sup>。

### 1.2 需求分析

根据可重复使用航天器返回后电性能测试的目的, 梳理出测试需求及需解决问题主要包括以下几点:

1) 提供相对固化的测试用例, 采用自动化的方法<sup>[8-9]</sup>, 得到设备状态的相对稳定的数据比较及状态评估;

2) 采用定量比较的数学方式简单快速的比较出各电性能设备发射前至返回后的电性能状态、信号输出状态、接口匹配状态变化, 从而验证航天器再次发射前的设备电气

收稿日期: 2018-05-20; 修回日期: 2018-06-18。

**作者简介:** 谢志勇(1988-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事载人航天器综合测试设计、综合测试流程优化、地面供电系统设计等方向的研究。

性能;

3) 有效地对电性能设备进行剩余寿命计算, 判定是否满足再次飞行需求;

4) 合理安排测试项目, 优化测试流程, 采用尽可能少的测试用例完成对所有电性能设备工作状态的覆盖, 从而缩小测试周期。

## 2 测试方法研究

### 2.1 设备状态识别

可重复使用航天器最大的特点在于经历了发射、飞行、返回等各种严酷的环境条件, 容易造成航天器内电性能设备接插件松动、电路板焊接件短路等情况, 因此, 可通过在整个航天器加电测试前通过对各台电性能设备正负供电端、信号输入输出端、接地端等端口进行负载阻值测试的方法识别电性能设备状态, 之后采用加权比较的方法, 引入发射场测试结果及出厂前测试结果的两次量值, 通过赋予不同的权重来评估电性能设备的阻值结果。

如阻值测试结果为  $R$ , 发射前阻值测试结果为  $R_m$ , 出厂前阻值测试结果为  $R_n$ , 则加权比较方法为:

$$e = |1 - R / (0.8R_m + 0.2R_n)|$$

若  $e < 0.05$ , 则认为阻值测试结果正常, 否则, 认为设备异常。

### 2.2 测试用例固化

随着航天器的重复发射使用, 航天器的测试也由“小作坊”式的模式向“量产”模式逐渐过渡。为了能够在航天器返回后再测试过程中有相对固定的测试方法及测试用例, 可以采用对单个测试项目使用基于在轨飞行程序测试指令序列的方法固化测试用例, 同时固化不同指令间的发送时间间隔, 形成一套完整的测试序列<sup>[10]</sup>, 在进行不同的设备测试时采用相对应的测试序列, 便于整个航天器的差异化比较。

### 2.3 状态变化比较

#### 2.3.1 均值极值比较

可重复使用航天器与其他航天器最大的区别在于经历了一次正式上天飞行, 故真实在轨数据为返回后再次测试提供了比较的基准, 基于在轨较为恶劣的环境, 其供电检查数据的包络应该大于在地面良好的空间环境下测试的数据包络, 可采用供电检查中均值极值比较的方法确定电性能设备状态。

对电性能设备的供电检查中的诸如电压、特征电流<sup>[11]</sup>、转速、流量等平台参数, 进行基于在轨飞行数据的极值比较, 比较方法为:

地面供电检查测试中参数的极大值为  $A_{\max}$ , 极小值为  $A_{\min}$ , 均值为  $A_{\text{avr}}$ ; 在轨飞行时加电序列中参数的极大值为  $Z_{\max}$ , 极小值为  $Z_{\min}$ , 均值为  $Z_{\text{avr}}$ , 若同时满足以下 3 个条件, 则认为设备加电工作正常:

$$A_{\max} < Z_{\max}$$

$$A_{\min} > Z_{\min}$$

$$(A_{\text{avr}} / Z_{\text{avr}}) < (A_{\max} + A_{\min}) / (Z_{\max} - Z_{\min})$$

#### 2.3.2 曲线拟合

在采用固定的测试指令序列对相同设备进行加电测试后, 可采用基于先验知识的曲线拟合系数比较的方法来比较相同输入条件下的不同输出变化, 从而比较电性能设备状态变化, 定位设备问题。

在可重复使用航天器返回后电性能综合测试中, 如将指令序列执行过程中整器电流的变化情况, 或将地面测试序列的模飞过程中整器温度变化的曲线, 之后可以将类似曲线与在轨及出厂前的相同序列的先验知识曲线进行曲线拟合<sup>[12]</sup>, 将曲线拟合系数矩阵相比, 通过比较矩阵奇异值的大小, 从而得出曲线系数差异, 进一步确定各电性能设备的状态变化。

对在功能匹配测试中各电性能设备诸如电流、温度等参数进行基于在轨飞行数据及出厂前数据等两次先验知识的曲线拟合系数比较, 从而确定各电性能设备的状态变化。比较方法为: 利用最小二乘法对本次测试数据、出厂前数据、在轨飞行数据进行曲线拟合, 之后进行拟合曲线系数比较, 设本次测试数据曲线拟合系数为  $[A_1, A_2, A_3, \dots, A_i]$ , 出厂前数据曲线拟合系数为  $[B_1, B_2, B_3, \dots, B_i]$ , 在轨飞行数据位  $[C_1, C_2, C_3, \dots, C_i]$ , 则若矩阵:

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_i \\ B_1 & B_2 & \dots & B_i \\ C_1 & C_2 & \dots & C_i \end{bmatrix}$$

的奇异值小于某个数值, 则可认为各电性能设备状态无变化。

### 2.4 剩余寿命分析

可重复使用航天器中返回后测试中, 对含有继电器等特定寿命要求的电性能设备进行剩余寿命分析, 采用给定寿命减去实际使用寿命之后, 将电性能设备阻值测试结果作为一个权重值引入到剩余寿命计算的过程中, 使阻值与寿命产生耦合关系, 更加细致的考量电性能设备的剩余寿命。

如继电器给定寿命为  $N$  次, 发射前动作  $M_1$  次, 在轨动作  $M_2$  次, 再次飞行所需动作  $P$  次, 若满足下列条件, 认为满足可重复使用寿命要求:

$$P < (1 - 10 * e) * (N - M_1 - M_2)$$

其中:  $e$  为 2.1 节中的设备加权比较值。

### 2.5 测试项目缩减

相比较于一般的航天器飞行任务, 可重复使用航天器在经历了首次测试及飞行任务之后, 状态相对固定, 与各大系统间接口、飞行程序、故障预案等已经经过验证, 且软件已经落焊, 在保证各电性能设备工作正常的情况下上述功能不会发生变化。同时, 基于每次飞行任务侧重点的不同及通过测试比较出来的各电性能设备状态的轻微变化, 可以安排部分重点设备的强化测试, 同时降低部分非重点

设备的测试次数, 以达到对所有电性能设备的测试覆盖, 同时缩减测试周期, 降低测试成本。

### 3 测试流程及步骤

图 1 是可重复使用航天器返回后电性能综合测试流程图, 如图 1 所示, 可重复使用航天器返回后电性能综合测试方法, 包括以下步骤:

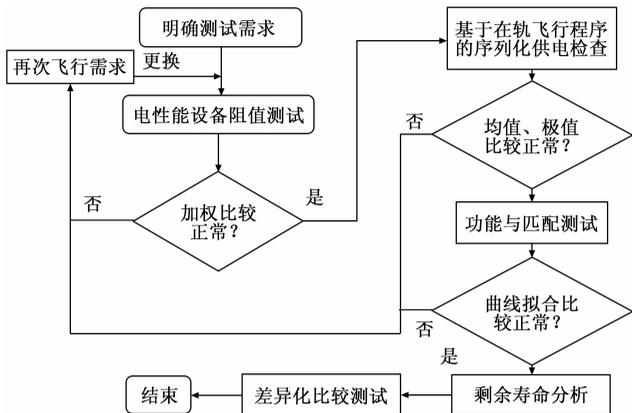


图 1 可重复使用航天器返回后电性能综合测试流程图

1) 根据再次飞行任务需求明确测试需求: 根据再次飞行任务需求明确测试需求, 确定测试项目大类, 同时进行差异化比较, 区分哪些设备需要重点测试检测, 哪些设备只需验证接口, 哪些设备可以弱化测试次数。结合某型号可重用飞船返回舱实际飞行返回后再次执行飞行任务的需求, 明确了以试验验证设备有效性为主, 确定需进行全部设备验证的测试项目大类为电源、总体电路、测控通信、数管等平台分系统, 对于 GNC、推进、结构机构等辅助分系统只要进行主要核心关键设备测试验证, 而对于部分载荷分系统则不再进行设备电性能测试。

2) 对电性能设备进行各个端口的阻值测试: 根据 1) 所确定的测试需求, 在整船加电前, 从返回舱配电器上进行平台分系统所有设备的端口阻值测试, 主要排除电性能设备接插件松动、电路板焊接件短路等情况, 对电源配电器、测控应答机及数传机、数管 CMU、GNC 控制器、推进控制器等电性能设备正负供电端、信号输入输出端、接地端等端口进行负载阻值测试, 识别电性能设备的状态。

3) 将阻值测试结果与发射前、出厂前数据进行加权比较: 根据步骤 2) 的测试结果, 引入各个单机设备发射场测试结果及出厂前测试结果的两次量值, 通过赋予不同的权重来评估电性能设备的阻值结果, 形成单机设备阻值测试矩阵表, 根据加权比较的结果来判定设备是否正常工作。

4) 对整个航天器进行基于在轨飞行程序的序列化供电检查:

依据航天器在轨飞行程序中实际电性能设备加电顺序, 固化为地面测试序列, 并依此序列对整个航天器加电, 进行各电性能设备的供电检查测试序列测试。在某型号返回

舱返回后地面测试过程中, 采用的是基于在轨正常飞行程序的设备开关机顺序, 不考虑测控弧段及飞行轨道变化的情况下只对单机设备进行序列化的供电检查。

5) 对电性能设备供电检查平台参数进行基于在轨数据的均值、极值比较: 在实际测试中, 选取了总体电路、测控、热控等分系统的设备电压、母线电流、风机转速等平台分系统关键参数作为考察对象, 按照 2.3.1 节中基于在轨飞行数据的极值比较的方法, 判定设备加电工作是否正常。

6) 依据测试项目, 选择相应的电性能设备进行对应功能匹配测试:

依据步骤 1) 中由再次飞行任务所明确的测试项目的需求, 选择平台分系统设备及 GNC、推进分系统进行对应的功能匹配测试, 包括 GNC 与测控功能匹配、GNC 与推进功能匹配、GNC 与总体电路功能匹配、GNC 与数管功能匹配、推进与数管功能匹配测试等。验证经过上天飞行后分系统之间接口的工作状态, 考察设备工作稳定性及设备之间功能的匹配性。

7) 对电性能设备参数进行基于先验知识的曲线拟合系数比较, 确定状态变化: 测试过程中, 选取了正常飞行程序模飞中母线电流的变化情况及返回舱内某个测温点温度变化的曲线, 将此处两条曲线变化与在轨及出厂前的相同序列的先验知识曲线进行曲线拟合, 将曲线拟合系数矩阵相比, 按照 2.3.2 节中所述的方法比较矩阵奇异值的大小, 得出曲线系数差异, 为进一步确定各电性能设备的状态变化提供决策参考。

8) 对电性能设备进行基于在轨数据及供电检查结果的剩余寿命分析: 对于有确定时间寿命要求或继电器动作次数要求的设备, 如机械陀螺及母线控制继电器等设备, 可按照实际使用情况评估剩余寿命。对于其余的电性能设备, 参照了 2.4 节给出的剩余寿命分析方法进行剩余寿命分析, 明确各分系统设备的可用工作时间。

9) 进行差异化比较测试: 基于某型号可重用飞船返回舱再次飞行为试验验证的性质, 在实际测试过程中, 安排了测控应答机、数传机、电源电池、数管 CMU、总体电路配电器、GNC 控制器、推进控制器等设备的强化测试, 同时降低部分非重点设备的测试次数, 以达到对所有电性能设备的测试覆盖的目的。

### 4 结束语

本文基于某型号可重用飞船返回舱返回后的实际加电测试情况, 提出了一种针对我国可重复使用航天器返回后再次发射飞行前的电性能综合测试流程及方法, 通过合理安排测试项目、优化配置测试资源、使用自动化数据分析判读方法, 达到了验证可重复使用设备工作情况、缩小测试周期、降低测试成本的目的。

(下转第 104 页)