

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1680

QJ 20534.1—2016

月球探测器地面试验 第 1 部分：悬停、避障及缓速下降 地面试验方法

Ground tests of lunar probe—
Part 1: Test method for lunar landing in hovering,
hazard avoidance and constant low velocity descent

2016—01—19 发布

2016—03—01 实施

国家国防科技工业局 发布

前 言

QJ 20534《月球探测器地面试验》分为九个部分：

- 第1部分：悬停、避障及缓速下降地面试验方法；
- 第2部分：着陆冲击地面试验方法；
- 第3部分：着陆稳定性地面试验方法；
- 第4部分：月面移动地面试验方法；
- 第5部分：月面采样及样品封装、转移地面试验方法；
- 第6部分：月面起飞上升地面试验方法；
- 第7部分：月球轨道交会对接地面试验方法；
- 第8部分：月球返回高速再入试验方法；
- 第9部分：器间分离试验方法。

本部分为QJ 20534的第1部分。

本部分由中国航天科技集团公司提出。

本部分由中国航天标准化研究所归口。

本部分起草单位：中国航天科技集团公司第五研究院总体部，中国航天标准化研究所，中国航天科技集团公司第五研究院第五〇八研究所。

本部分主要起草人：马继楠、任德鹏、谭 梅、吴学英、泉浩芳、李 飞、许映乔、唐明章。

月球探测器地面试验

第1部分：悬停、避障及缓速下降地面试验方法

1 范围

本标准规定了月球探测器在月球软着陆过程中悬停、避障及缓速下降地面试验的目的、试验原则、试验原理、试验系统组成及要求、试验条件及试验工况设置原则、试验程序、成功判据、中断处理、安全性要求、试验数据记录和保存、试验文件及评审等内容。

本标准适用于月球探测器在月球软着陆过程中悬停、避障及缓速下降的地面模拟试验。其他的深空探测软着陆任务相关地面模拟试验也可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GJB 421—1997 卫星术语

QJ 20001—2011 月球探测工程术语

3 术语和定义

GJB421—1997 和 QJ 20001—2011 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

避障 hazard avoidance

探测器在下降过程中逐步逼近安全区域的过程或操作。

3.2

缓速下降 constant low velocity descent

探测器在月面安全区域上方以较低的速度，匀速下降的过程或操作。

4 试验目的

悬停、避障及缓速下降地面试验的主要目的包括：

- 模拟月面的反射特性和探测器的运动，考核导航敏感器在整器状态下的动态工作性能；
- 模拟探测器着陆过程的运动学特征，验证自主导航控制算法；
- 采用与着陆过程相关 GNC 和推进分系统产品参试，验证探测器制导、导航与控制（GNC）和推进分系统的协调工作能力；
- 模拟悬停、避障、缓速下降段真实的飞行过程，全面考核着陆过程方案设计、飞行程序设计的正确性。

5 试验原则

试验应遵循以下基本原则:

- a) 试验方案能够对着陆试验器进行充分验证;
- b) 在满足试验目的的基础上, 试验方法应简单、安全、可靠;
- c) 试验边界条件应不低于探测器真实的环境经历, 能够对探测器起到加严考核的目的;
- d) 试验工况能够覆盖所有考核内容, 在此基础上尽量以较少的试验次数覆盖所有考核内容。

6 试验原理

采用具有真实的几何特征、质量特性、GNC 和推进相关产品的着陆试验器，在地面模拟悬停、避障及缓速下降过程中着陆器的受力状态，并保证其运动自由度，模拟月面地形地貌特征及其对微波、激光的反射特性，模拟真实飞行过程。具体包括：

- 通过试验塔架吊绳悬吊着陆试验器,控制吊绳拉力平衡着陆试验器的部分重力,并依靠变推力发动机的输出推力调节,使试验中着陆试验器受到的合力与月面软着陆过程一致,从而模拟真实过程中探测器的运动特征;
- 通过吊绳的水平随动功能,保证着陆试验器的水平运动自由度,吊绳保持一定的垂直角度,避免着陆试验器水平运动中吊绳拉力的水平分力对试验产生干扰作用;
- 着陆试验器配有万向吊具,吊具的一端连接至着陆试验器的质心附近,另一端与试验塔架的吊绳连接,试验中能够提供着陆试验器的俯仰、滚动和偏航的运动自由度;
- 模拟月面地形地貌状态和微波、激光反射特性,满足着陆敏感器的需求。

7 试验组成及要求

7.1 试验系统组成

悬停、避障及缓速下降试验整个系统主要由着陆试验器子系统、着陆试验架子系统、模拟月表子系统、地面测量子系统、指挥控制子系统和试验保障子系统组成,如图 1所示。除着陆试验器外,其他组成部分统称为“试验场系统”。

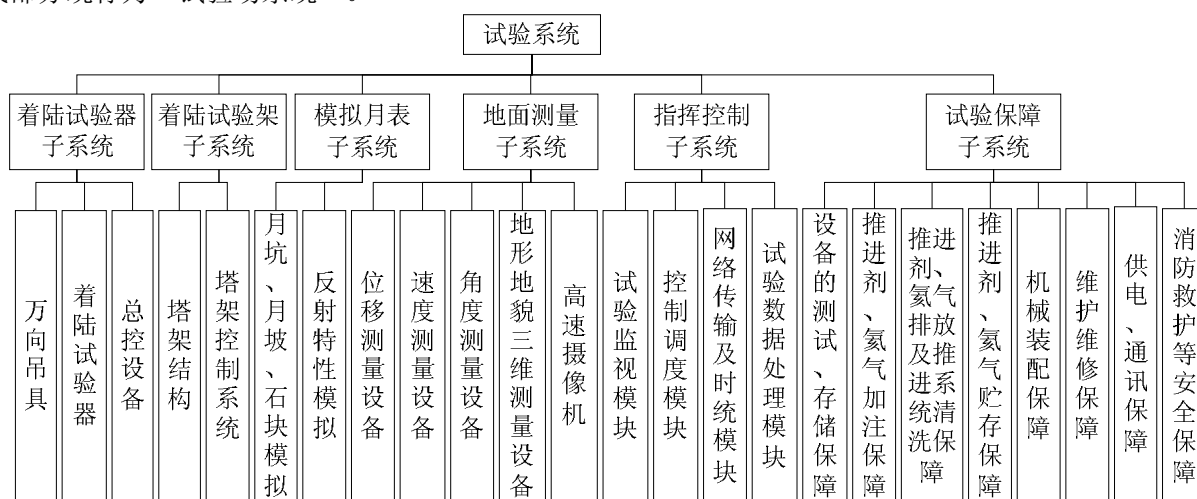


图 1 试验系统组成图

7.2 试验系统要求

7.2.1 着陆试验器子系统

试验中采用着陆试验器参试，其技术状态描述如下：

- a) 着陆试验器与真实的探测器系统有相同的几何特征与质量特性；
- b) 着陆试验器采用的GNC、推进分系统需包含了分系统中所有与着陆过程相关的产品，且状态与真实产品状态一致，为适应地面大气下工作，对推进发动机真实产品进行适应性改造，各产品安装要求及相互间接口关系均与探测器飞行状态一致；
- c) 着陆试验器安装有万向吊具，能够提供试验中着陆试验器姿态运动的自由度；
- d) 着陆试验器配有地面供电辅助设备，为着陆试验器提供外部供电，内部供电由在器上安装的蓄电池组提供，外部供电用于地面综合测试和试验准备期间为着陆试验器供电；内部供电用于试验过程中为着陆试验器供电；
- e) 着陆试验器可通过有线传输建立与地面的通信链路；
- f) 着陆试验器配有地面总控设备，试验前着陆试验器的电测、试验中着陆试验器的控制均由地面总控设备完成，总控设备与试验场指挥控制子系统间存在通信接口。

7.2.2 着陆试验架子系统

着陆试验架子系统用于提供试验所需的空間、配合着陆试验器的空間运动，其技术状态描述如下：

- a) 着陆试验架子系统由塔架结构、塔架控制系统组成，其中塔架结构还包括吊绳、随动装置等设备；
- b) 塔架结构用于提供模拟试验空間，并承载着着陆试验器系统的重量；塔架上安装有万向吊具的锁紧、解锁装置；塔架上装备货梯，用于运送设备和人员，并需安装照明光源，满足夜间的视觉观测和拍摄要求；
- c) 吊绳在塔架控制系统的控制下为着陆试验器施加垂直向上的固定拉力，抵消其部分重力；
- d) 塔架控制系统测量吊绳的拉力，将吊绳拉力控制在精度要求范围内；在着陆试验器水平运动的过程中，塔架控制系统控制随动装置满足跟随要求，且保证过程中吊绳垂直度的要求，不会产生过大的水平干扰力。

7.2.3 模拟月表子系统

模拟月表子系统用于模拟月面地形地貌状态和微波、激光反射特性，其技术状态描述如下：

- a) 模拟月面的月坑、月坡和月岩等地形地貌状态，可实现快速构造；
- b) 模拟月面对激光、微波的反射特性。

7.2.4 地面测量子系统

地面测量子系统用于对着陆试验器的位移、速度、姿态角度进行测量，对模拟月面地形地貌进行三维数据测量，为试验提供外测数据。主要包括位移测量设备、速度测量设备、角度测量设备、模拟月面地形地貌测量设备和高速摄像机。

7.2.5 指挥控制子系统

指挥控制子系统用于除着陆试验器外的所有试验设备控制，其技术状态描述如下：

- a) 指挥控制子系统由试验监视模块、控制调度模块、网络传输及时统模块、试验数据处理模块组成；
- b) 试验监视模块在试验中收集着陆试验器地面总控设备、塔架控制系统及地面测量各设备的数据，将其投影显示，并能够监视和记录整个试验系统的操作和试验影像信息；

- c) 控制调度模块能够对整个试验系统各操作岗位进行调度;
- d) 网络传输及时统模块负责整个试验系统的数据传输并产生统一的时间码,试验前负责对着陆试验器地面总控设备、塔架控制系统及地面测量子系统统一进行校时;
- e) 试验数据处理模块能够将试验中产生的各种试验数据及信息进行分类存储,并具备将同时产生的各种数据进行综合分析的能力。

7.2.6 试验保障子系统

试验保障子系统提供试验保障条件,主要包括参试设备的地面测试、存储保障、着陆试验器推进剂存储、加注保障、着陆试验器机械装配、维修、维护保障、试验供电保障和消防救护等安全保障条件。试验过程中所需用的试验保障设备应满足设备技术要求,并在检验有效期内。

8 试验条件及试验工况设置原则

8.1 参试系统要求

试验中各参试系统的要求如下:

- a) 各参试系统完成功能、性能测试和对外接口测试,经评审通过具备试验条件;
- b) 对试验过程中的关键操作、应急处理、消防救护等方面进行演练;
- c) 试验场所技术安全检查符合要求,各测试设备由第三方检验合格,并在检验有效期内。

8.2 气象条件

试验对气象条件的要求如下:

- a) 试验时,在试验所需高度范围内风速: $<3.5\text{m/s}$;
- b) 试验时地面能见度: $>5000\text{m}$;
- c) 试验时要求晴朗、无异常天气状况;
- d) 地面气温要求: $-10^{\circ}\text{C}\sim+30^{\circ}\text{C}$ 范围内。

8.3 试验工况设置原则

工况设计应遵循以下原则:

- a) 试验首先应该设定不同的试验阶段,采用相对容易、安全的试验工况将悬停、避障、缓速下降复杂的控制过程进行分解验证,最后再逐步实现综合考核;
- b) 可结合各试验工况穿插设置模拟月面地形地貌的不同状态,且应覆盖月面地形地貌的分布特征,即需实现月球坑与月岩的组合、月球坑与月坡的组合、月坡与月岩的组合,月球坑与月岩、月坡的综合;
- c) 设计不同的试验工况,分别重点验证各种导航敏感器的工作性能;
- d) 试验中应设置不同的运动轨迹,覆盖探测器软着陆过程中真实的运动特性,并需对导航敏感器及 GNC 算法进行动态验证;
- e) 试验工况设计应能够考核着陆试验器的极限工作能力,并提高试验验证效率,确保试验的安全。

9 试验程序

9.1 概述

9.2~9.4 给出了悬停、避障及缓速下降全过程验证工况的试验程序。对于其他的试验工况,可依据实际情况对该程序进行删减或增补。

9.2 试验前准备

试验前的准备工作包括：

- a) 消防救护等安全防护准备就位；
- b) 模拟月面地形地貌及状态确认；
- c) 着陆试验器初始状态确认，运至试验场准备区，与试验塔架对接；
- d) 着陆试验器加电及状态设置；
- e) 试验场测量着陆试验器的姿态、位置数据；
- f) 地面注入初始姿态、设置着陆试验器控制参数；
- g) 塔架将着陆试验器吊至初始位置处，上升速度不大于 1m/s；
- h) 着陆试验器升至一定高度后，引入相关敏感器转工作状态；
- i) 推进发动机状态设置；
- j) 试验场系统给出外测高度和姿态数据；
- k) 试验塔架状态检查确认，设置运动参数和安全高度，确认吊绳的拉力值设置正确；
- l) 各参试系统状态检查确认。

9.3 试验过程

试验操作过程如下：

- a) 试验开始，推进发动机点火；
- b) GNC 调整变推力发动机推力输出至预设值，并维持稳定；
- c) 试验塔架进入随动控制模式，同时具备应急控制模式；
- d) 试验塔架完成转入随动控制模式，着陆试验器开始向下加速运动，器塔分离；
- e) 器塔分离信号产生，着陆试验器控制系统启动，转入悬停模式；
- f) 着陆试验器在 GNC 的控制下进行悬停、避障及缓速下降工作；
- g) 当满足关机条件时，着陆试验器转入无控模式，关闭发动机；
- h) 推进发动机关机后，进行管路残余推进剂吹除。

9.4 试验后处理

试验操作结束后应完成下列后续处理工作：

- a) 着陆试验器各设备断电，恢复初始状态；
- b) 着陆试验器与转运车固定后，与试验塔架分离，运至试验厂房存放区；
- c) 地面总控设备断电；
- d) 蓄电池状态确认。

10 成功判据

试验同时满足以下条件可视为试验成功：

- a) 试验过程满足试验大纲要求，全面验证试验目的；
- b) 获得的试验数据真实、有效、全面；
- c) 试验过程中不发生安全、危险事故。

11 试验中断处理

在试验过程中若出现中断，需要按照以下过程处理：

- a) 试验塔架随动装置立即停止运动，确保着陆试验器安全；
- b) 地面控制着陆试验器的 GNC 转入无控状态，同时使主发动机关机，并关闭推进剂管路上的阀门；
- c) 试验塔架子系统将着陆试验器安全平缓地降到地面；
- d) 对着陆试验器进行状态确认和恢复，并视情况进行推进剂加注补充或排放；
- e) 排除试验中断原因；
- f) 重新进行试验。

12 安全性要求

试验过程中的安全性要求如下：

- a) 应保证着陆试验器在任何情况下不会坠落地面。
- b) 应保证发动机的推进剂不泄漏、不爆炸。
- c) 试验指挥控制子系统应提供塔架、推进剂等危险报警功能，提供对安全功能的监视能力。提示地面试验人员及时采取应急措施，预防危险事件的发生，指挥控制子系统对试验过程具备紧急停止的能力。对人员采取的安全防护措施应有救护预案，并进行演练。
- d) 试验的电子设备应具有一定的抗外界电磁干扰的能力，避免使用永磁材料，地面辅助电子设备不应是电磁干扰源。
- e) 防止故障传播：试验过程中，一旦发生故障，应防止故障的传播，塔架应有防爆冲击能力。

13 试验数据记录和保存

13.1 试验记录包括原始试验数据、影像资料和人工记录及文字资料（试验时间、试验工况、试验状态）。出现故障、异常时应及时记录，包括故障和异常现象、产品性能参数（电流、电压和其他有关参数）及试验设备状态等。

13.2 应保存试验的原始数据，以便对各参试设备、组件的性能做出评价。对试验故障和异常现象出现时的数据进行分析，判断诱发故障或异常现象发生的原因，为故障或异常现象诊断提供依据。

14 试验文件及评审

14.1 试验文件

14.1.1 试验文件包括试验前和试验后文件，试验文件通过评审后存档。

14.1.2 试验前文件包括试验任务书、试验方案、试验大纲、试验实施细则、试验实施方案、试验技术流程、试验质量保证大纲、试验计划流程。

14.1.3 试验后文件包括试验报告（包括试验数据和影像资料）、试验总结报告。

14.1.4 试验方案由送试方编写，试验方案一般包括如下内容：

- a) 试验原理；
- b) 试验组成及状态；
- c) 试验过程设计；
- d) 试验要求；

- e) 接口设计;
- f) 可靠性、安全性设计;
- g) 可行性分析与验证;
- h) 试验工况设计;
- i) 试验程序设计;
- j) 试验风险分析与控制。

14.1.5 试验大纲由送试方编写，试验大纲一般包括如下内容：

- a) 试验目的;
- b) 试验产品技术状态;
- c) 试验产品试验状态;
- d) 试验设备、数据采集、记录设备及配置设备要求（能力、精度）;
- e) 试验技术条件、试验工况和试验要求;
- f) 试验产品性能及功能测试要求;
- g) 试验数据记录要求;
- h) 试验安全性要求;
- i) 试验程序（技术流程）;
- j) 试验中断和故障处理;
- k) 试验成功判据;
- l) 试验分工。

14.1.6 试验实施方案由承试方编写，试验实施方案一般包括如下内容：

- a) 试验目的;
- b) 试验设备（能力、精度）;
- c) 数据采集、记录设备（能力、精度）;
- d) 试验控制（控制原理及控制方式）;
- e) 试验程序;
- f) 试验安全性要求和措施。

14.1.7 试验结束后各参试系统应编写与本系统有关的试验报告，包括承试方编写的试验报告、试验实施总结报告和送试方编写的试验总结报告。报告内容一般包括：

- a) 试验目的;
- b) 试验产品技术状态和试验状态;
- c) 试验技术条件;
- d) 试验过程描述;
- e) 试验结果数据分析;
- f) 试验故障、异常现象的描述和处置;
- g) 试验结论。

14.2 试验评审

14.2.1 试验前的文件评审

试验前需要评审的文件包括试验大纲、试验实施方案、试验技术流程、试验质量保证大纲、试验计划流程等。参加评审的人员应包括各主要参试单位有关方面的技术负责人、专家。评审通过后的文件应作为试验的依据文件。

14.2.2 试验后的评审

试验结束后应及时进行试验评价，评价试验是否达到试验大纲规定的试验要求和试验目的，试验数据是否完整、有效。在此基础上各参试单位应编写本系统试验报告，提交总体汇总完成整个试验的总结报告，并提交评审。评审后修改的总结报告应作为型号转阶段评审和出厂评审时的备查文件。

中华人民共和国航天行业标准

月球探测器地面试验 第1部分：
悬停、避障及缓速下降地面试验方法

QJ 20534.1—2016

*

中国航天标准化研究所出版

北京市丰台区小屯路 89 号

邮政编码：100071

中国航天标准化研究所

印务发行部印刷、发行

版权专有 不得翻印

*

2016 年 2 月出版

定价：22 元