

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1610

QJ 20069—2012

航天器验证通用要求

General requirements for spacecraft verification

2013—01—04 发布

2013—05—01 实施

国家国防科技工业局 发布

目 次

前言.....IV

引言.....V

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语和定义.....1

4 一般要求.....1

4.1 验证目的.....1

4.2 验证的作用.....1

4.3 验证的基本要求.....1

4.3.1 基本项目.....1

4.3.2 验证工作计划.....2

4.3.3 验证工作与其他计划工作的协调.....2

4.3.4 权衡技术途径.....2

4.3.5 试验条件的控制.....3

4.3.6 信息管理系统.....3

4.4 验证的过程.....3

4.4.1 验证流程.....3

4.4.2 验证产品装配级.....3

4.4.3 验证方式或技术途径的选择.....3

4.5 验证的方法.....4

4.5.1 概述.....4

4.5.2 分析.....4

4.5.3 试验.....4

4.5.4 检验.....4

4.5.5 演示.....5

4.5.6 相似性.....5

4.6 验证的模型.....5

4.6.1 通则.....5

4.6.2 原理样机.....5

4.6.3 研制模型.....5

4.6.4 综合匹配模型.....5

4.6.5 结构模型.....5

4.6.6 热控模型.....5

4.6.7 工程模型.....6

4.6.8 工程鉴定模型.....6

4.6.9	鉴定模型	6
4.6.10	飞行模型	6
4.6.11	定向的功能模型	6
4.6.12	训练模型	6
5	验证策略和实施	6
5.1	概述	6
5.2	验证要求的确定	7
5.2.1	概述	7
5.2.2	验证要求的特征	7
5.2.3	验证要求的关键程度	7
5.2.4	验证内容	8
5.2.5	验证矩阵	8
5.3	验证方法、产品装配级和阶段的选择	8
5.3.1	验证方法的选择	8
5.3.2	验证装配级的选择	9
5.3.3	验证阶段的选择	10
5.4	验证模型的选择	11
5.4.1	概述	11
5.4.2	模型选择原则	11
5.4.3	模型的适用性	11
5.4.4	硬件矩阵	12
5.5	验证计划	12
5.5.1	验证计划的内容	12
5.5.2	验证大纲的考虑因素	12
5.6	验证的实施和监控	12
5.6.1	概述	12
5.6.2	验证数据库	13
5.6.3	验证工具的确认	13
5.6.4	验证过程的监控	13
5.6.5	再验证	14
5.6.6	验证的有效性	14
6	试验验证	14
6.1	试验大纲的制定	14
6.2	试验要求、试验技术规范、试验程序和试验报告	15
6.2.1	试验要求	15
6.2.2	试验技术规范	15
6.2.3	试验程序	15
6.2.4	试验报告	16

6.3 实验室试验..... 16

6.3.1 实验室试验的作用..... 16

6.3.2 实验室试验的类型..... 17

6.3.3 实验室试验的计划..... 18

6.4 外场试验..... 19

6.4.1 外场试验的作用..... 19

6.4.2 系统合练..... 19

6.4.3 性能考核试验..... 19

7 分析验证..... 20

7.1 分析大纲和分析报告..... 20

7.1.1 分析验证的作用..... 20

7.1.2 分析大纲..... 20

7.1.3 分析报告..... 20

7.2 分析技术或方法..... 21

7.2.1 建模..... 21

7.2.2 分析过程..... 21

7.3 相似性..... 22

7.4 设计评审..... 22

7.5 模拟/仿真..... 22

7.5.1 模拟/仿真的作用..... 22

7.5.2 模拟/仿真的类型..... 23

前 言

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：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通信卫星事业部、中国航天科技集团公司第五研究院东方红卫星公司。

本标准主要起草人：张小达、朱凤梧、张永维、杨晓明、冯铁惠。

引 言

本标准的制定主要参考了 ECSS-E-ST-10-02C《空间工程 验证》、NASA/SP-6105 Rev1《NASA 系统工程手册》、MIL-STD-1540D《运载器、上面级和航天器的产品验证要求》、MSFC-HDBK-2221《验证手册》，本标准的制定还考虑了我国多年来航天器各型号研制的实践经验。

航天器验证通用要求

1 范围

本标准规定了航天器验证工作的一般要求、验证策略与实施、试验验证和分析验证等。

本标准适用于航天器各研制阶段组件、分系统和系统的验证工作。

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 卫星术语

GJB 1027A-2005 运载器、上面级和航天器试验要求

GJB 2496 载人飞船航天工程术语

3 术语和定义

GJB 421和GJB 2496确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

验证 verification

采用分析、试验、检验、演示、相似性等方法提供客观证据，确认交付使用的航天器组件、分系统和系统符合规定的功能、性能和设计要求的過程。

4 一般要求

4.1 验证目的

验证的主要目的是：

- a) 验证产品的设计是否满足规定的要求，并具有规定的设计余量；
- b) 验证制造过程所生产的产品能够满足规定的要求；
- c) 保证交付的产品（包括硬件和软件）与经过鉴定的设计相一致，不存在工艺或其他潜在的缺陷。

4.2 验证的作用

验证是航天器研制过程的基本组成部分，用于帮助产品研制人员发现设计和制造缺陷并验证纠正措施的有效性，也是项目采购部门和管理部門进行项目阶段管理和决策的有效工具，用于为决策部门提供可靠的数据和资料，以便进行综合分析和判断，调整各项基本要求，降低项目的风险。验证的主要作用如下：

- a) 降低项目的技术风险；
- b) 控制和减少项目的费用和进度风险；
- c) 为转阶段决策提供依据；
- d) 为用户提供技术支持。

4.3 验证的基本要求

4.3.1 基本项目

应明确项目的基本验证要求，并建立相应的验证准则。根据项目的技术要求和运行要求确定验证工

作的基本项目和要求。验证工作的基本项目主要包括：

- a) 航天器平台性能；
- b) 有效载荷性能；
- c) 接口；
- d) 制造工艺；
- e) 环境适应性；
- f) 可靠性；
- g) 电磁兼容性；
- h) 系统匹配兼容性；
- i) 测试性；
- j) 维修性；
- k) 安全性。

对于所规定的验证项目，应确定验证工作应达到的目标和通过或不通过的判别准则。在确定验证准则和评价标准时，应强调采用定量的衡量标准。

4.3.2 验证工作计划

在研制过程的方案阶段应当策划验证工作并制定验证工作计划。随着研制过程的进程，验证工作计划应逐步修订、补充和完善。

经过审定和批准的验证计划，更改时应经批准。

4.3.3 验证工作与其他计划工作的协调

验证工作应贯穿于研制和在轨运行过程，并与研制计划相协调。为了减少研制各阶段的技术风险，全面、准确、及时地评估航天器的性能，需要在研制和在轨运行中不断地开展各种验证工作。从方案阶段开始，就应开始进行验证工作，以评估各种方案。在工程研制阶段，验证工作是支持工程设计和研制、确定系统技术性能和使用效果、进行研制目标管理的有效手段。在生产部署和使用保障阶段，验证工作用于进行产品质量控制、能力评定和系统改进。

由于验证工作的结果是研制过程转阶段审查的主要依据，因此，验证工作的进度安排应当与阶段审查的日程相协调。

4.3.4 权衡技术途径

在研制过程的方案阶段通过对所需要验证的要求的分析和综合权衡确定验证的技术途径，在验证要求分析中应综合考虑下列因素：

- a) 设计特性；
- b) 可选用的解决方案；
- c) 具有继承性的组件和分系统的鉴定状况；
- d) 验证工具的适用性和成熟性；
- e) 试验和分析方法；
- f) 计划上的约束；
- g) 风险管理过程；
- h) 费用和进度；
- i) 可允许的性能偏差范围。

4.3.5 试验条件的控制

对于研制过程中的试验，应根据实际需要和可能，从严选择和严格控制试验的条件。试验应在特定的可控条件下进行，而运行试验应尽可能在接近运行的条件下进行，以确保航天器能够可靠地运行。

4.3.6 信息管理系统

建立完善的验证工作信息管理系统。为了保证验证工作的结果有效地应用于航天器的研制，需要保证验证工作的信息全面、准确、及时地在有关部门之间传递，为此，需要建立验证工作信息管理系统，并制定信息的收集、传递、反馈、分析、处理等必要的程序和管理要求。

4.4 验证的过程

4.4.1 验证流程

验证过程涉及到系统的所有组成部分，运用连贯的自下而上积木式概念并应用不同验证方法的适当组合，以逐步增加的形式在系统的各装配级以及研制和运行的各阶段进行。

验证过程的流程包括下列主要步骤：

- a) 对需要验证的各装配级要求进行标识和分类，并分配到下属的各装配级；
- b) 对于所确定的验证要求，选择验证方式和准则，包括研制阶段、验证方法、产品装配级等；
- c) 制定相关验证工作的计划；
- d) 使用方的认可；
- e) 进行验证工作的准备，包括：编制验证文件，准备分析所需的模型、软件和数据库，准备试验计划和程序，研制检查工具与方法；
- f) 进行验证工作和验证控制；
- g) 完成验证控制并得到验证最终的证据；
- h) 评价验证结果须进行评审和认可。

4.4.2 验证产品装配级

验证工作需要不同的装配级上进行，验证的装配级的数量和类型取决于产品的复杂性和特性。航天器的典型装配级包括：

- a) 组件；
- b) 分系统；
- c) 系统。

通常，验证工作是从较低装配级到较高装配级的金字塔形结构形式进行。

4.4.3 验证方式或技术途径的选择

验证方式或技术途径的选择是一个基于技术、成本和进度考虑的综合权衡过程，其应解决下列问题：

- a) 确定一组能够用于验证过程的相容的可检验的计划要求；
- b) 选择验证的方法、装配级和相关的模型；
- c) 选择工具/设备；
- d) 确定所需要的资源；
- e) 确定实施验证的阶段和活动。

当使用方和研制方基于适当的文件化证据确认已对要求进行了验证并且已完全达到相应的验证目的时，应当认为验证过程完成。如果在某个或某些装配级上没有完成验证规定的要求，则需要研制方与使用方共同确认和解决。

4.5 验证的方法

4.5.1 概述

验证可以通过下列方法实施：

- a) 分析；
- b) 试验；
- c) 检验；
- d) 演示；
- e) 相似性；
- f) 上述方法的适当组合。

4.5.2 分析

分析是指采用经过试验证实的公认的分析技术对产品进行理论的或经验的评估方法。分析技术包括系统的、统计的和定性的设计分析、建模和计算模拟。

对于产品工程研制过程的验证，分析方法一般与试验方法相结合。

4.5.3 试验

4.5.3.1 概述

试验是指在各种模拟的或真实的使用环境下测量产品的性能或功能的方法，从试验中得到的各种数据的分析也是试验的一个组成部分。试验可能需要专门的设备、仪器和模拟技术。

4.5.3.2 试验分类

试验的目的是协助产品的工程设计和研制，并证实所研制的产品符合技术性能规范。试验一般包括：

- a) 研制试验；
- b) 鉴定试验；
- c) 验收试验。

4.5.3.3 试验目的

4.5.3.3.1 研制试验目的

研制试验的主要目的是验证设计方案的正确性，暴露设计中存在的缺陷或隐患。研制试验也是获取产品设计中所使用的各种数据的主要手段。研制试验通常在产品的设计过程（方案阶段和研制阶段的前期）中进行，其项目和要求取决于具体型号的要求，以及所采用的分系统和设备的技术成熟程度。

4.5.3.3.2 鉴定试验目的

鉴定试验的主要目的是验证按照设计文件、制造工艺和验收大纲所生产的产品能够满足各项技术性能规范的要求。设计鉴定试验通常在产品的工程研制或初样制阶段进行。鉴定试验的条件应当能够充分考核产品的设计安全余量。

4.5.3.3.3 验收试验目的

验收试验的主要目的是证实交付的每一件产品没有潜在的材料和制造工艺缺陷，能够运行使用。验收试验在产品的正样阶段进行。

4.5.4 检验

检验是指采用目视与仪器测量方式判定产品的物理特性（例如构造特征、外观、标识等）、接口、设计图样、工艺要求是否一致的方法。

使用检验方法进行验证通常用于产品的制造、鉴定、验收、总装和使用前检查等阶段。

4.5.5 演示

演示是指采用带有模拟器的真实硬件或软件或者在模拟的运行状态下进行产品工作性能和要求检查的方法。

4.5.6 相似性

相似性是指通过证明所需验证的产品相似于另一个已经按等效的或更严格的要求进行过验证的产品，从而确认所需验证的产品满足要求的方法。相似性验证方法包括对以前的试验数据、硬件技术状态和使用情况的评估与审查，其中包括以前的试验量值与新的特定要求之间的比较。对于技术状态、使用情况或试验条件的差异，一般需要进行分析和补充试验，以完成采用相似性方法进行的验证工作。

4.6 验证的模型

4.6.1 通则

在验证过程中，通常采用各种模型来确定验证要求是否得到满足。对于航天器的验证，通常采用两类模型：物理模型（实物模型，包括正式产品）和数学模型（分析模型）。前者主要用于试验验证，后者主要用于分析验证。本标准主要针对物理模型。

4.6.2 原理样机

原理样机主要用于支持总体分析和设计、构型设计和评估、接口控制和定义、人因影响评估、操作程序评定、布局优化等。

原理样机的典型特性包括：构型、布局、接口等。

4.6.3 研制模型

研制模型主要用于支持研制过程的物理模型，目的是验证设计的可行性。

通常，对于需要新设计和重大改进设计的产品或部件，研制模型是必要的。

研制模型适合于任何类型的产品，如机箱机柜、机构、结构部件、温控设备等，并且可能受到功能测试和环境试验的影响。

典型的研制模型有：机械、电性能、热性能等模型。

4.6.4 综合匹配模型

综合匹配模型主要用于功能和接口试验以及故障模式研究，目的是支持功能研制、软件研制和方法/程序确认。

典型的综合匹配模型有：卫星模拟器、模拟应答机等。

4.6.5 结构模型

结构模型主要用于结构设计的鉴定和结构数学模型的检验与修正。通常，系统的结构模型由按照飞行产品的结构参数制造的代表性结构以及仪器设备的结构配重构成。结构模型也包括其他分系统的具有代表性的机械部件，如伺服机构等。

结构模型也可用于试验设备/地面支持设备和相关程序的最终确认。

4.6.6 热控模型

热控模型代表最终产品的所有热性能/温度特性。

热控模型用于产品热设计的鉴定和热分析数学模型的检验与修正。

通常，系统的热控模型由按照飞行产品的热参数制造的代表性结构以及仪器设备的发热量相同的模拟仪器构成。热控模型也包括其他分系统的具有代表性的热控部件。

4.6.7 工程模型

工程模型代表了飞行产品的形式、匹配和功能，但一般不使用完整的冗余功能和高可靠性元器件。

工程模型主要用于除冗余验证之外的功能/性能鉴定，故障-生存演示和参数漂移检查。

工程模型也可用于试验设备和地面支持设备以及相关程序的最终确认。

4.6.8 工程鉴定模型

工程鉴定模型完全反映了最终产品的设计，只是选用元器件的质量等级标准可能有所不同，可按相关规定执行。

工程鉴定模型主要用于设计和接口的功能性技术规格鉴定（包括故障检测程序的验证，故障隔离、恢复和冗余管理的确认等）以及电磁兼容性试验。

4.6.9 鉴定模型

鉴定模型按正式飞行产品相同的设计和工艺生产，反映最终产品设计和制造的各个方面。鉴定模型应从可用于飞行的正式产品中抽样得到或正样产品的首件鉴定。

鉴定模型主要用于最终产品设计的功能/性能和环境等鉴定试验。

4.6.10 飞行模型

飞行模型是用于飞行试验或正式交付使用的产品。

飞行模型需要进行验收试验。

4.6.11 定向的功能模型

定向的功能模型专门用于特定的功能要求验证。

定向的功能模型代表最终产品对于有限的验证要求所需要的特性。这些模型的定义取决于项目的特征和验证要求。

定向的功能模型的实例如：

- a) 软件确认设备；
- b) 气动模型；
- c) 自动控制模型。

4.6.12 训练模型

训练模型专门用于产品使用操作方法/程序的研制与培训。对于航天器，这些模型的典型代表性是具备所有功能的飞行模型，但飞行模型需要进行适当修改以适应地面操作的要求。

训练模型可用于培训操作人员、研制和检验操作程序、进行基线数据收集。

5 验证策略和实施

5.1 概述

根据型号的实际情况，应制定验证策略，并对验证过程进行有效的规划和监控。

根据航天器型号的研制总要求确定验证要求，并且要根据型号的设计方案进行细化，分解到产品不同的装配级。在所有装配级上的各种验证要求之间均需要进行权衡，以确定与具体型号研制和使用最相适应的验证项目和要求。

验证策略的选择是针对所需要验证的具体型号的实际情况，选择合适的验证方法、验证装配级、验证阶段和所使用的验证模型。

验证策略（验证方法、验证装配级、验证阶段和所使用的验证模型）的选择需要综合权衡成本、计划进度、产品性能、技术可行性、相关的风险。

验证过程的实施涉及到诸多方面的问题，因此，需要制定详细的工作计划或验证大纲。在制定和实施验证大纲时，一般应考虑以下各方面：

- a) 对每个验证要求规定通过或不通过的准则；
- b) 验证对产品设计的影响和要求，如模块化设计、测试性设计、可达性设计等；
- c) 通过不同的装配级实现验证要求的技术途径；
- d) 保证关键项目的早期验证，以降低后期故障识别的风险；
- e) 优化验证用软硬件的使用；
- f) 避免重复工作以降低成本和加快进度；
- g) 验证结果的及时反馈；
- h) 覆盖界面的验证要求；
- i) 采用可能降低整个验证成本的新技术、新方法；
- j) 提供足够的客观证据。

5.2 验证要求的确定

5.2.1 概述

对于航天器的验证工作，应当确定具体型号所需要验证的项目和要求（功能、性能等），并对各项要求进行分类。

验证项目和要求通常按照自顶而下的方式产生和分配到产品的各装配级，从而形成树形结构的完整的产品验证要求。

5.2.2 验证要求的特征

在确定验证要求和分配到产品的各装配级的过程中，应保证所规定的每一项验证要求符合下列特征：

- a) 验证要求应当具有可追溯性；
- b) 验证要求应当具有唯一性，并有相应的适当的标识；
- c) 验证要求应当是独立的，不应是几个要求的合并；
- d) 验证要求应当是能够用一种或几种经过确认的验证方法进行证实的；
- e) 验证要求应当是明确的，不应有歧义性；
- f) 验证要求应当能够在需要时被其他要求所引用。

通常，对于每一项验证要求，应当规定一个标题。为了有效地进行验证工作的管理，验证要求应当形成相关的技术文件，如产品技术规范、接口控制文件等。

验证要求的确定是验证过程的基础，对于航天器型号的成功验证起始于建立一组完整、可行的工程验证要求。每一项验证要求均应当作为验证过程的出发点和结论，同时，每一项验证要求也应当被视为型号研制的基本技术要求。

5.2.3 验证要求的关键程度

验证要求是多种多样的，不同的验证要求在技术、计划进度和成本等方面的影响是各不相同的。同样，不同的验证要求对于最终产品的总体技术性能和使用性能的影响也是各不相同的。验证要求的关键程度主要是根据对验证实施的技术、计划进度和成本的影响进行评估。验证要求是采取验证策略的基础，而其关键程度是在验证策略的选择中起决定性影响的因素之一。因此，应当在验证要求制定过程中尽早地开展包含对其关键程度的评估工作。

5.2.4 验证内容

为了合理地规定验证策略和有效地管理验证过程，应当对需要验证的各项要求进行分类。验证要求进行分类的一个主要作用是可能对同类验证要求采用相似的验证策略，从而提高验证过程的效费比，增加验证结果的可信度。

验证要求的分类取决于项目的特征和构成。对于航天器，典型的系统级验证要求分类如下：

- a) 飞行任务；
- b) 配置；
- c) 功能；
- d) 结构；
- e) 防热；
- f) 制导和控制；
- g) 推进；
- h) 电源；
- i) 环境适应性和可靠性；
- j) 电磁兼容性；
- k) 接口；
- l) 运输；
- m) 飞行操作；
- n) 地面操作；
- o) 后勤保障和维修。

5.2.5 验证矩阵

验证矩阵是在确定验证要求和进行验证要求管理时经常采用的一种工具，其用矩阵形式表示在可适用的验证阶段和不同的装配级中对每项验证要求所选择的验证方法，即按照方法/装配级/阶段的形式规定每项产品要求的验证策略。

5.3 验证方法、产品装配级和阶段的选择

5.3.1 验证方法的选择

5.3.1.1 概述

在确定了需要验证的各项要求之后，应根据每个具体要求从一系列可能的验证方法中选择可适用的方法。

对于航天器的验证，试验是最基本的验证方法。相比而言，用试验的方法所得到的结果具有更高的置信度，从而有效地减少项目的风险。如果试验方法在技术上和经济上是可行的，并且是安全的，则应作为验证过程的首选方法。在考虑验证要求的重要程度、效费比和计划进度的情况下，也可能选择其他的替代方法，但应充分考虑这些替代方法所带来的风险。由于技术、成本和其他的原因，绝大多数需要采用多种验证技术的组合方法，如试验和分析的组合方法。由于试验受到相关条件的局限，大多数验证要求在使用试验验证方法的同时，需要用分析验证方法予以补充。

如果几种验证方法都是可能的，而且所得到的验证结果具有相同的置信度，则验证方法的选择可考虑使得实现验证过程所需要进行的工作最少。

5.3.1.2 选择验证方法的准则

在选择验证方法时，应当对候选方法的可行性进行评估，评估过程中应考虑下列准则：

- a) 验证方法在技术上是可行的；
- b) 验证所需要的设备和场地等条件是适用的；
- c) 验证方法能够以合理的真实性、精确性和有效性达到足够的置信度；
- d) 验证方法对人员、产品和设备等所带来的风险是可以接受的；
- e) 验证对计划进度的影响是可以接受的；
- f) 验证的成本是可以接受的。

5.3.1.3 设计、制造工艺、安全性等验证的考虑

对于航天器的设计和相关制造工艺的验证，除了下列情况以外，一般应依靠试验方法完成：

- a) 经过验证的分析方法可以适用于具有较大设计余量大的简单设计；
- b) 设计要求很容易通过检验或演示方法进行验证；
- c) 通过全面的分析和审查证明设计可用相似性方法进行验证。

对于所有与安全性有关的关键功能，应当采用试验方法进行验证。

5.3.1.4 分析验证的考虑

当航天器的飞行条件不能用地面试验精确模拟或者模拟完整飞行条件的地面试验因成本过高而不可行时，分析方法通常是验证过程的一种有效的选择。在这种情况下，对于所采用的分析方法本身应当进行充分的试验验证。

5.3.1.5 软件的验证

对于航天器的验证过程，不仅包括硬件产品的验证，也包括软件产品的验证。对于软件的验证，应当包含在其实际使用的硬件环境下的测试。

5.3.2 验证装配级的选择

通常，对于大系统的验证，采用金字塔型的分级验证策略，即从组成系统的低层次装配级开始验证，再进行较高层次的装配级验证，最后进行系统的验证。这样可以将问题在较低层次上尽早暴露，从而有效地降低成本和计划进度上的风险，同时，验证方法在技术和资源上也更容易实现。

验证要求是自上而下分配到各装配级，形成树形结构的验证要求体系。从理论上说，下一装配级的验证要求的综合应当完全覆盖上一装配级的验证要求，但实际上却不容易实现，这里不仅有技术上的原因，也有管理上的原因。

对于验证装配级的选择，主要是决定所规定的验证项目和要求应当在哪个或哪些装配级上进行验证，或者说，在自上而下分配的树形结构验证要求中，哪些要求需要进行验证。在确定验证要求和进行自上而下的分配时，需要尽可能完整地包含各装配级的所有验证项目和要求，但在进行验证时，却不一定需要对所列的每一个项目和要求都进行验证，原因是不同装配级的验证要求之间一般存在着冗余，而且在有些装配级上进行特定要求的验证在技术上、成本上或计划进度上存在困难。

通常，在选择验证装配级时应考虑下列因素：

- a) 可适用的验证方法；
- b) 标准化的软硬件装配级；
- c) 研制或使用现有产品的决策；
- d) 成本（包括降低管理费用）；

- e) 计划进度;
- f) 风险;
- g) 承制方和分承制方的责任。

在选择验证装配级的过程中,应当保证在所有装配级上进行的各项验证所得到的结果的综合,能够完全覆盖系统的所有顶层验证要求。如果再下一装配级上忽略了某些验证项目和要求,则在上一装配级或更高的装配级的验证中,应当完全覆盖这些验证要求。

通常,低装配级的验证不能完全代替高装配级的验证,但利用低装配级的验证结果可以有效地降低高装配级的验证过程在技术、成本和进度等方面的风险。在许多情况下,高装配级如(系统级或分系统级)的试验验证受到试验技术、资源和成本等诸多方面的限制,例如,试验设备的尺寸研制、试验代表性的限制、昂贵的试验成本的限制等,借助于低装配级的验证结果,可能使高装配级的验证过程绕过这些试验验证的困难。对于系统的特定验证要求,一种可行的验证策略是选择组合验证方法进行系统的验证,在低装配级采用试验验证,而在高装配级采用分析验证,通过对低装配级验证结果的综合分析,保证高装配级验证结果的置信度。

在高装配级上进行某些环境适应性要求的试验验证可能是不可行的或成本过于昂贵,在这种情况下,可在低装配级上进行环境试验验证,利用其结果进行分析,论证与较高装配级的环境适应性验证要求是一致的。

对于产品内部或外部接口的验证,验证装配级的选择应当考虑到验证过程能够有效地区分与接口有关各方的责任。在进行接口验证时,如果条件许可,应尽可能采用真实的接口进行试验。如果采用模拟器进行接口试验,应当分析模拟器与真实接口之间是否存在显著的差异以及差异所带来的影响。

通常,较低装配级的验证工作应当在相关的较高装配级验证之前完成。从成本和进度的角度考虑,应当避免在不同的装配级上进行重复的验证工作。为了最大限度地保证项目的可行性和合理性,对于项目中指定产品的所有物理和功能要求,宜在其特定的产品装配级上进行验证。

5.3.3 验证阶段的选择

航天器的验证生产过程通常是分阶段进行的,对于每个不同的阶段,需要设定不同的研制目标。因此,航天器的验证过程也是分阶段完成的。通常,在每一阶段中所完成的验证项目及其结果,是评价这一阶段的研制任务是否达到预期目标和要求,并决定项目能否转入下一阶段的重要依据。

对于航天器的每一验证项目和要求,需要确定实施相应验证工作的阶段。通常,验证工作应尽可能早地开展,以便更有效地控制项目的成本和计划进度。在选择验证阶段时,应考虑下列因素:

- a) 项目的技术特征;
- b) 项目各阶段的目标和计划安排;
- c) 项目的阶段投资强度和资源配置情况;
- d) 所采用的验证方法。

阶段选择与验证方法所采用的模型密切相关。在研制过程的不同阶段,所能提供用于验证的模型有很大的差异。对采用试验方法进行验证的要求,阶段选择受模型的影响更大。

在验证阶段选择时,在下一阶段开始之前,与本阶段有关的所有验证项目和要求均应完成。其中,特别注意的是,在研制过程中,产品的鉴定应当在产品的验收之前完成。

5.4 验证模型的选择

5.4.1 概述

在验证过程中，模型的选择直接影响验证结果的置信度。应对验证所需要模型的类型和数量进行优化，在综合权衡计划进度、成本和风险的情况下，使得产品的验证结果达到较高的置信度。

5.4.2 模型选择原则

对于航天器的验证，一般需要采用多种类型的模型，包括物理模型和分析模型，因此，在验证策略中需要建立满足总体验证要求的模型体系。模型体系规定了对于每个验证项目和要求在不同验证装配级和验证阶段所使用的模型。

模型体系的确定需要考虑多方面的因素，一般采用反复迭代的处理方式。在规定模型体系时，应当综合考虑下列各方面：

- a) 项目的约束：
 - 1) 计划进度和成本；
 - 2) 评审；
 - 3) 接口。
- b) 验证策略：
 - 1) 验证要求分类；
 - 2) 验证方法；
 - 3) 验证装配级；
 - 4) 验证阶段。
- c) 综合与试验大纲：
 - 1) 试验要求；
 - 2) 试验顺序；
 - 3) 试验配置；
 - 4) 试验设备。
- d) 研制状态：
 - 1) 新技术的使用；
 - 2) 设计鉴定；
 - 3) 产品继承性；
 - 4) 可能的供应商。

模型体系应当在项目的前期确定并尽快冻结，原因是模型体系对项目的实施有重要的影响。

5.4.3 模型的适用性

在前面给出了一些可供选择的验证模型的主要特征。在航天器的验证过程，需要从各种类型的验证模型中选择出可适用的模型。模型的适用性取决于特定项目的要求，在选择验证模型时，一般需要考虑下列准则：

- a) 应尽量减少验证模型的数量，并且尽量在不同的验证装配级之间重复使用模型，以有效地降低验证成本；
- b) 为了使相互独立的试验验证工作适当分离，可使用平行的模型，从而减少计划进度延迟的风险；
- c) 应当对代表产品最终配置的硬件和软件进行设计验证（鉴定）；

- d) 应当对最终交付使用的产品进行工艺验证（验收）；
- e) 在得到用户认可的情况下，对于选定的设计参数可采用研制模型进行验证。

5.4.4 硬件矩阵

型号产品的验证状态通常分为四类：

- a) A 类产品：完全继承已经通过鉴定的产品，在设计、制造、元器件、材料、工艺、生产单位等方面没有更改，其设计规范和技术要求（包括性能、可靠性、设计寿命、环境条件等）均不高于被继承产品，符合 GJB 1027A-2005 中相似性鉴定的 8 项要求，只需进行验收试验；
 - b) B 类产品：继承已经通过鉴定的产品，在设计、制造、元器件、材料、工艺、生产单位等方面没有较大更改，当继承产品的使用环境和性能要求不高于被继承产品时，需进行验收试验或准鉴定试验，当继承产品的使用环境和性能要求高于被继承产品时，需进行准鉴定试验或补充鉴定试验；
 - c) C 类产品：继承已经通过鉴定的产品，在设计、制造、元器件、材料、工艺、生产单位等方面有较大更改，需要进行相应的补充鉴定试验或全面的鉴定试验；
 - d) D 类产品：新研制的产品，需要进行全面的鉴定试验；
- E 类产品：引进产品，按照上述 A、B、C 和 D 四类产品的分类方法进行分类，分别为 E-A、E-B、E-C 和 E-D 类。

5.5 验证计划

5.5.1 验证计划的内容

为了保证验证工作能够有效地达到预定的目标，应当制定一个完善的验证计划。通常，验证计划应规定下列内容：

- a) 验证工作的项目和要求（包括验证准则）；
- b) 验证的方法、装配级和模型；
- c) 验证工作的计划进度；
- d) 验证工作的资源配置；
- e) 验证工作的责任部门。

5.5.2 验证大纲的考虑因素

在验证大纲的制定过程中，应当考虑下列因素：

- a) 产品的树形结构（从最低的装配级开始）；
- b) 可适用的模型；
- c) 获取/设计/制造每个验证模型所需要的时间和费用等；
- d) 模型的使用（与模型体系相符）；
- e) 模型综合所需要的时间和费用等；
- f) 在不同装配级上所选择的试验程序和顺序，以及所需要的时间和资源；
- g) 在验证策略中适当综合的分析、设计评审和检验等验证工作，以及所需要的时间和资源；
- h) 与获取所需要的验证工具有关的活动、时间和费用等；
- i) 项目的阶段和相关的验证输出。

5.6 验证的实施和监控

5.6.1 概述

为了保证验证结果的有效性和客观性，应当按照持续验证控制的概念对验证实施过程进行监控。验

证过程监控的重点是确定可能存在的问题,从而达到有效地减少成本增加和计划进度拖延的风险的目的。

5.6.2 验证数据库

为了便于验证过程的管理与监控,应当建立验证数据库,以支持验证过程的实施。通过使用数据库,实现下列要求:

- a) 对每一验证装配级上的所有验证要求的系统的可追溯性;
- b) 在不同产品和装配级之间进行一致性检查的可能性;
- c) 在整个项目寿命期内对验证过程进行监控;
- d) 在较低装配级验证期间要求或危险程度变化的情况下,确定对各个装配级的影响;
- e) 直接和灵活地汇报数据,以支持项目验证文件的准备工作;
- f) 使重复工作达到最小程度;
- g) 消除错误;
- h) 将较低装配级的验证数据综合到较高装配级中。

5.6.3 验证工具的确认

在验证过程中,涉及到各种类型的验证工具。例如,在进行试验验证时,需要使用各种试验设备和测试仪器;在进行分析验证时,需要使用计算机软件。为了保证验证结果的有效性和正确性,在这些验证工具使用之前,应当使用正式的验证方法和程序确认其能够满足相关验证过程的使用要求,并提供相应的证据。

对于航天器,软件是系统的重要组成部分,如飞行控制软件等。在软件的验证过程中,软件确认工具提供了一个测试平台用以支持系统中各种软件在所有验证阶段的测试和确认。软件确认工具在软件研制工作期间将软件集成到目标硬件之前使用,作为支持独立的软件确认以及软件维护的工具。通常,软件确认工具应当支持:

- a) 软件使用环境的建模;
- b) 使用非插入方法进行使用条件下的软件验证;
- c) 软件的调试和查错。

软件确认工具应当通过对试验模拟工作的结果与所要求的技术性能的比较进行确认。

在航天器验证中,模拟器是一种在所有装配级验证中经常采用的验证工具,其通常在系统集成和产品测试期间用于模拟部件、功能、条件或接口,以替代真实的硬件和软件。对于模拟器的确认应当证明其特性符合所支持的测试的要求。

在航天器验证中,软件工具经常用于进行各种分析验证工作。对于用于验证过程的分析软件工具,应当对其有效性和正确性进行确认。分析软件工具的选择应当充分考虑其成熟性,首选已经过相似的应用所确认的软件,并且评估所选软件对预期应用的适用性。对于没有进行过验证的分析软件,应当在使用之前进行全面的考核和确认。

5.6.4 验证过程的监控

验证过程应当在完全受控的状态下进行,必要的情况下,使用方应对重要的验证过程实施监督。

为了保证验证过程处于完全受控状态,应对验证过程进行文件化管理。验证过程的典型文件包括:

- a) 验证矩阵;
- b) 试验/分析要求技术规范;
- c) 组装集成和验证计划;

- d) 验证控制文件;
- e) 试验技术规范;
- f) 试验程序;
- g) 试验/分析/检验报告;
- h) 设计评审报告;
- i) 验证报告;
- j) 其他文件,如试验配置列表、试验记录、故障分析报告、操作手册和说明书等。

验证过程的文件应保证过程的可追溯性,并作为提供给使用方的书面证据。

为了保证验证工作的有效性,应当对参与验证工作的人员进行必要的培训。

5.6.5 再验证

通常,对于每一验证要求,只需要进行一次验证。但在下列情况下,应当进行再验证:

- a) 在发生故障并采取纠正措施之后;
- b) 在分解或重新组装之后;
- c) 延寿的产品;
- d) 翻新、维修或设计更改之后;
- e) 在初步验证之后有关要求发生了变化。

5.6.6 验证的有效性

对于航天器的每项验证,特别是试验验证,应当进行评估以考虑特定的验证方法和程序在检测潜在故障方面的能力(验证的有效性)。

在优化验证工作的过程中,应当考虑相关的成本和计划进度的约束。

通常,试验验证有效性的评估应当基于统计的数据。这一有效性评估是基于下列事实:在地面试验中检测到的故障仅是航天器早期致命性故障的一部分,某些故障可能在地面试验中没有发现,但可能在初期的飞行中出现并导致飞行失败。因此,为了减少初期飞行过程中的故障率,应当选择最有效的试验方法和程序。

6 试验验证

6.1 试验大纲的制定

试验大纲是型号试验验证工作的监督管理的主要文件,用于规定型号试验验证的项目和计划、试验目的和要求、试验对象、试验场地和设备、时间进度、经费预算、参与人员和职责、保障条件等。

对于航天器的试验大纲,应当综合考虑研制试验、鉴定试验和验收试验,并且应当明确规定研制试验需要验证的关键技术特性和使用试验需要验证的关键使用问题。

试验大纲的制定应当以对于不同的验证要求分类所确定的验证策略为基础,并与所选择的验证方法和验证模型相一致。在制定试验大纲时,应当考虑下列准则:

- a) 关键件、关键特性和接口应当尽早安排试验;
- b) 应当考虑相关试验验证的替代途径的可能性(特别是在计划和经费限制的情况下);
- c) 在试验流程中,应当尽可能减少重复试验工作;
- d) 应当尽可能考虑模型、模拟器和试验支持设备的再利用;
- e) 应当尽早安排对试验可行性的确认工作;

一旦制定了试验大纲,应当立即准备下一个阶段的详细试验计划。在详细的试验计划中,主要试验

阶段、航天器装配级和试验项目按 GJB 1027A-2005 执行。

6.2 试验要求、试验技术规范、试验程序和试验报告

6.2.1 试验要求

试验要求是一个应用于产品所有验证装配级的系统支持技术规范，其通常包含在相关产品的技术规范中（如系统、分系统和组件/单机的技术规范）。

试验要求规范包括产品的通用试验要求，如：

- a) 试验的类型和项目；
- b) 试验的顺序；
- c) 试验余量；
- d) 试验量级；
- e) 试验持续时间；
- f) 试验容差；
- g) 筛选策略和方法。

对于不同类型的产品，其试验要求也不相同。

6.2.2 试验技术规范

试验技术规范用于规定特定的试验验证项目的各项要求。典型的试验技术规范通常包括下列内容：

- a) 试验的目的和用途；
- b) 试验件的技术状态和数量；
- c) 选择的试验方法和程序；
- d) 试验条件；
- e) 试验装置描述；
- f) 试验场地、设备；
- g) 测量项目和要求；
- h) 数据处理要求；
- i) 产品失效与合格判据；
- j) 试验开始和预期完成的时间；
- k) 试验中涉及的单位、职责和接口关系；
- l) 相关试验方法标准/规范中规定的资料；
- m) 对试验报告的要求。

试验技术规范反映了试验计划与特定的试验程序及实施之间的试验过程确定中的一个中间步骤。根据不同的工程项目要求，试验技术规范也可与其他文件（如详细的试验计划）合并。

6.2.3 试验程序

试验程序是对具体试验的实施要求和过程进行完整、精确和详细的说明，以指导试验人员正确地实施和完成试验。试验程序有时也称为试验方案或实施细则。

典型的试验程序通常包括下列内容：

- a) 试验目的；
- b) 适用的文件和规范；
- c) 试验件的技术状态、数量和标识；

- d) 试验条件;
- e) 试验场地;
- f) 试验仪器设备清单;
- g) 试验测试、检测和记录要求;
- h) 试验件的安装;
- i) 试验方法和描述;
- j) 试验流程;
- k) 试验准则和合格判据;
- l) 试验顺序和时间进度;
- m) 数据处理、分析技术和统计准则;
- n) 参试单位、人员和职责。

6.2.4 试验报告

试验报告用于记录产品试验的技术要求,试验的观察信息、数据和结果,根据试验要求所做出的结论。

典型的试验报告通常包括下列内容:

- a) 试验目的;
- b) 试验项目和有关试验的准则;
- c) 试验件的说明;
- d) 试验条件的说明;
- e) 试验原理、试验方法、试验仪器设备和试验程序的说明;
- f) 试验中获得的观察现象、数据和结果;
- g) 试验数据分析;
- h) 试验中的故障和异常现象说明;
- i) 试验结论。

6.3 实验室试验

6.3.1 实验室试验的作用

实验室试验是在实验室内利用专门的设备模拟所需要的使用条件,对产品进行的各种技术性能/功能测试和检查。与飞行试验和外场试验相比,实验室试验具有下列特点:

- a) 能够比较准确地控制试验条件,试验结果的重复性较好;
- b) 能够比较精确地测量各种参数,且允许测量的各种参数数量较大;
- c) 试验不受自然环境条件的限制;
- d) 试验费用较低,试验周期较短;
- e) 可以适用于产品的各种装配级。

但是,实验室试验也有其局限性。由于技术发展的限制,目前在实验室试验中尚不能完全模拟飞行过程和在外场使用过程的各种使用环境条件,只能采用一些简化的处理方式。这可能导致实验室试验得到的验证结果与实际使用的验证结果之间存在一定的偏差。另外,对于航天器的全系统试验,实验室试验需要规模庞大的设施和复杂的模拟设备,往往在技术上和经济上带来很大困难。

对于航天器的验证,尽管实验室试验得到的结果可能与实际使用的结果不完全一致,但其最大的优

点是能够在飞行试验之前对产品进行必要的考核，充分暴露产品的各种潜在缺陷并采取相应的改进措施，从而有效地降低产品研制项目在技术、成本和计划进度上的风险。因此，虽然实验室试验不能完全代替飞行试验和外场试验所进行的验证，但充分的实验室试验可以有效地补充飞行试验和外场试验的验证结果，从而减少飞行试验和外场试验的数量，并保证飞行试验和外场试验的成功率。

实际上，对于实验室试验不能完全模拟航天器飞行过程的各种使用环境条件问题，是可以采取一定的技术措施予以弥补的。目前工程上采用的主要方法是在实验室试验中对相应的试验条件增加安全余量，这样可能会因为过试验加大了产品研制的技术难度，但能够有效地降低产品在使用过程中偏离预定技术战术要求的风险。

随着试验技术的发展，在航天器的验证中，实验室试验所占的比重逐步增大，其验证结果的有效性也在逐步提高。目前，对于分系统级、组件级以及更低的装配级的验证，实验室试验已经成为主要的验证方法，而对于系统级的验证，实验室试验也在逐步发挥更大的作用。

6.3.2 实验室试验的类型

6.3.2.1 按试验目的分类

按试验目的和阶段划分，实验室试验有以下类型试验：

- a) 工程研制试验；
- b) 鉴定试验；
- c) 准鉴定试验；
- d) 验收试验。

以上几种类型的试验大部分需要在实验室内完成对产品的试验验证。不同类型的试验在不同的阶段进行，且有不同的试验目的。在试验前应根据试验目的制定试验方案、试验大纲、试验条件，配备试验设备。所使用的试验方法应能有效地暴露产品的设计缺陷、工艺缺陷以及材料和元器件的质量缺陷。研制试验虽然不是合同规定的正式试验，然而，新研制的产品应经过研制试验。充分的研制试验是提高产品固有可靠性并保证产品能通过鉴定试验的基础。

6.3.2.2 按实验目的分类

按实验项目划分，实验室试验有以下类型试验：

- a) 性能/功能测试；
- b) 力学试验；
- c) 真空/热试验；
- d) 压力/检漏试验；
- e) 电磁兼容性试验；
- f) 磁试验；
- g) 寿命试验；
- h) 其他试验。

以上试验项目是产品典型的试验验证项目，一般在产品的试验矩阵中规定。不同装配级别的产品、不同专业类型的产品在不同的研制阶段试验项目是不同的，需要根据任务需求和试验项目确定。在实验室内对产品进行试验验证与外场试验验证不同之处是使用实验室内固定的试验设备在规定的试验状态下，对产品施加规定的试验应力，包括环境应力和工作应力，获得该试验项目所需要的试验应力，以达到验证产品的目的。

6.3.2.3 按试验环境分类

按试验环境分类，实验室试验有单项环境试验和综合环境试验。

环境适应性是航天器对预期使用过程中所经受的各种环境的适应能力。通常，航天器所经受的环境条件是较为严酷的，特别是飞行过程的环境条件。在以往各种型号的航天器的使用和飞行中，由于环境因素造成的故障和飞行失败占了很大的比重。为了保证航天器在各种复杂严酷的环境下保持应有的能力，对其进行环境适应性的验证是必不可少的。

从验证要求的角度看，环境适应性的重要特点是特别关注航天器在预期使用过程的极端环境条件下的适应能力。这类极端环境条件一般在次数较少的飞行试验和外场试验中很难遇到，主要是通过实验室中使用专用设备模拟的方式实现。

航天器在使用过程所经历的环境因素主要包括：

- a) 气候环境（如真空、温度（温度循环、温度冲击）、湿度）；
- b) 力学环境（如加速度、冲击、振动、声）；
- c) 空间环境（如重力场、中性大气、地球磁场、高能粒子辐射、等离子体、太阳辐照、空间碎片、空间污染）。

单项环境试验每次仅模拟一个环境因素，因此，用于环境模拟的设备相对比较简单，试验费用也较低。但单项环境试验最大的问题是与实际使用环境差异较大，实际使用环境大多是多种环境因素的综合作用，在大多数情况下，多种环境因素共同作用所造成的复合效应具有更大的危害性。对此，工程的解决方法是加大单项环境试验的环境条件余量，并通过合理安排各种环境试验的顺序进行补偿。

综合环境试验将几种环境因素的共同作用在同一试验过程中进行模拟，增加了环境试验的真实性和可靠性。但因为技术和设备复杂，目前只能进行少数几种环境因素的综合试验，主要有：温度、湿度、振动综合环境试验；温度、湿度、振动、加速度、低气压综合环境试验；温度、振动、噪声综合环境试验。

6.3.2.4 按产品可靠性分类

按产品可靠性分类，实验室试验有以下类型：

- a) 可靠性研制/增长试验；
- b) 环境应力筛选。

可靠性试验是产品研制全过程中为满足可靠性保证要求进行的全部试验，主要包括方案阶段和初样阶段进行的可靠性研制/增长试验和正样阶段进行的环境应力筛选。航天器一般一次只投产一件或几件，不具有大批量的特点，因此，航天器产品的可靠性试验只包括可靠性工程试验，即可靠性研制/增长试验和环境应力筛选，不包括可靠性统计试验，即可靠性鉴定试验和可靠性验收试验。

航天器产品的可靠性试验主要在初样和正样阶段完成，覆盖了 6.3.2 规定的各种类型试验。可靠性试验中有相当一部分内容是环境试验。环境试验需要解决产品的环境适应性问题，即在产品研制阶段的初期首先解决产品能否在极限预示条件下正常工作。从产品可靠性观点看，需要对产品施加环境应力和工作应力，经过“试验-分析-改进”（TAAF）过程不断提高产品的固有可靠性，最终用鉴定试验验证产品的环境适应性是否满足设计要求。它不需要回答可靠性定量指标，只需要得出“通过”还是“不通过”的定性结论，这不仅是环境试验要解决的问题，同时也是可靠性试验要关注的问题。

6.3.3 实验室试验的计划

在航天器的验证过程中，实验室试验是试验类型和数量最多、涉及验证装配级和验证阶段最多、使

用的试验模型（试验件）类型最多的验证工作，而且不同的试验项目的试验目的、技术要求和试验条件也有显著的差异。为了保证各项实验室试验与项目的总体验证要求协调一致，从而保证实验室验证结果的有效性，需要制定详细的试验计划。

对于实验室试验，详细的试验计划主要涉及下列问题：

- a) 确定研制各阶段在产品的不同装配级上所需要进行的各项试验以及试验的类型和进度安排；
- b) 对于每项试验，规定试验的用途（例如，性能、环境适应性、安全性、可靠性评定等）和目的（例如，验证是否满足性能要求或环境要求）；
- c) 对于每项试验，确定试验是一系列试验序列中的一部分还是独立的试验。如果是试验序列中的一部分，应给出受试产品的试验顺序和该试验在试验顺序中的位置；
- d) 对于每项试验，规定所要求的试验件技术状态和受试产品的数量，以及试验件是否需要特殊的安全考虑；
- e) 对于每项试验，规定试验条件、试验的监控和测量要求、产品失效或合格判据以及相关试验方法标准中规定的资料；
- f) 对于每项试验，说明试验是否需要专用设备或专用技术保障条件；
- g) 对于每项试验，说明所使用的试验方法及其满足产品验证要求方面的任务和局限性。

在制定试验计划时，应注意各项试验之间的相互协调，并与验证要求相一致，避免试验项目和要求重复与遗漏。

6.4 外场试验

6.4.1 外场试验的作用

外场试验是指在自然环境条件下进行的地面试验。航天器外场试验一般分为系统合练和飞行性能考核试验。

外场试验主要用于系统级，大多数是针对整个航天器系统与运载火箭系统或着陆场系统的联合试验，如回收试验和安全逃逸试验。与实验室试验相比，外场试验一般在试验规模、成本、周期等方面要大得多，因此，主要用于验证由于技术、设备等原因无法通过实验室试验解决的总体方案正确性、系统协调性和系统级技术性能等要求。而与飞行试验相比，一方面，外场试验更为经济，并可获得更多的测量数据；另一方面，外场试验可以进行飞行试验中难以充分考核的验证要求。

同样，外场试验也需要制定详细的试验计划。

6.4.2 系统合练

系统合练是在发射场联合模拟的发射飞行程序，包括航天器在发射场的组装、测试检查，装载、转运，发射塔架的起竖、射前测试检查和模拟发射等。其目的是检查整个航天器系统（包括航天器、运载火箭和地面设备）各部分之间的协调性、验证航天器飞行程序的协调性和地面测控系统的适用性、训练指挥和操作人员等。

系统合练既可作为飞行试验之前必要的技术准备工作，也可作为飞行试验的一个组成部分。

6.4.3 性能考核试验

航天器的飞行性能考核试验的目的是验证航天器、运载火箭及其地面设备在实际或接近实际飞行条件下的性能，是返回式航天器和载人航天器必不可少的鉴定性试验。

飞行性能考核试验主要包括：

- a) 航天器飞行功能/性能试验。着陆试验、逃逸试验等。

- b) 发射准备时间试验。

7 分析验证

7.1 分析大纲和分析报告

7.1.1 分析验证的作用

分析验证是采用数学分析/计算方法或经验分析方法验证产品的设计是否满足规定的要求。尽管在航天器验证中大多采用试验方法，但由于试验方法有一定的局限性，往往需要用分析方法予以补充。

分析验证方法具有下列特点：

- a) 由于不使用产品的实物模型，因此，验证工作可在产品设计的初期开始进行；
- b) 便于进行多种设计方案的比较，以进行优化；
- c) 可以用于指导试验设计和试验结果评定；
- d) 可以充分利用以往的验证数据和结果，减少验证工作的重复；
- e) 可以通过对较低装配级的验证数据的综合分析给出较高装配级的验证结果；
- f) 可以用于扩展试验验证结果的适用范围。

但分析验证也存在局限性，其中，最大的局限性是分析验证往往难以得到具有高置信度的结果。因此，分析验证的方法和结果往往需要得到相关试验数据和结果的支持。

对于航天器，分析验证可以用于各种验证装配级。

7.1.2 分析大纲

分析大纲用于规定型号分析验证的项目和计划、分析验证的目的和要求、分析验证的对象和输入、分析工具、时间进度、经费预算、参与人员和职责、保障条件等。

分析大纲的制定应当以对于不同的验证要求分类所确定的验证策略为基础，并与所选择的验证方法和验证模型相一致。在制定分析大纲时，需要注意下列问题：

- a) 所采用的分析技术和工具应当经过确认。分析验证的有效性取决于分析技术（方法）的质量和对这些分析技术与工具的使用经验；
- b) 应当说明所使用的建模系统，并证明其使用是正确的；
- c) 应当规定分析对象的产品配置/构型；
- d) 应当规定所有的边界条件；
- e) 应当规定用于分析的所有假设；
- f) 应当考虑研究的领域和验证结果的适用范围；
- g) 应当考虑分析的不确定度；
- h) 分析应当覆盖正常和最坏情况的条件。

分析方法除了用于验证产品设计以外，也可用于支持产品的试验（如试验设计、试验结果分析等），对此，在分析大纲中应予以说明。

7.1.3 分析报告

分析报告用于记录产品分析验证的技术要求，分析模型和方法，分析数据和结果，根据分析要求和结果所做出的结论。

典型的分析报告通常包括下列内容：

- a) 分析的对象和目的；
- b) 分析项目和有关准则；

- c) 分析对象的描述;
- d) 分析假设和输入条件的说明;
- e) 分析技术/方法、分析工具的说明;
- f) 分析得到的数据和结果;
- g) 对分析结果的评估 (结果的不确定性等);
- h) 分析结论。

7.2 分析技术或方法

7.2.1 建模

在分析验证中,建模是分析工作的基础,所建立的模型与分析对象的符合程度直接影响分析验证结果的正确性和有效性。建模的方法和所得到的模型类型取决于验证对象和目的。对于航天器的分析验证,常用的建模方法包括:

- a) 解析方法;
- b) 数值方法;
- c) 统计方法;
- d) 经验方法。

为了保证分析结果的有效性,应当对所建立的分析模型进行验证。分析模型的验证通常是以试验数据作为参照和支持的。当分析需要得到试验数据支持时,应当对具有代表性的物理(实物)模型进行试验。

近年来,经常采用分析与试验综合建模的方法,或以试验结果修正分析模型。在试验结果能够正确反映验证对象的特征的情况下,这种综合技术有效地提高分析模型的可信程度。

由于建模过程中不可避免地引入各种假设,可能导致模型与实际产品之间的偏离。因此,在分析建模过程中,应当对所采用的假设的合理性及其所导致的偏离的影响进行评估。

7.2.2 分析过程

在建立了分析模型后,分析验证过程通常是通过对模型施加规定的输入条件,将得到的输出结果与验证要求相比较而实现的。分析过程大多基于一定的分析工具,如计算机软件,同样,这些分析工具也应当经过适当的验证。在可能的情况下,应尽量选择技术成熟、可靠的分析工具。

分析模型的输入条件来源于产品的预期使用条件。在规定输入条件时,可能需要进行一些简化处理,以适应分析的要求。在进行简化处理时,需要注意简化后的输入条件对实际使用条件的覆盖程度,必要时,应考虑同时采用几种不同的输入条件以覆盖整个使用条件。

在对输出结果进行分析和评价时,应当考虑分析的输出结果与真实产品的输出结果之间的偏离。造成偏离的原因可能有:

- a) 分析模型带来的偏离;
- b) 输入条件带来的偏离;
- c) 分析工具带来的偏离。

如果分析的输出结果中存在偏离,应当确认造成这些偏离的原因,以及这些偏离可能对验证结果产生的影响。在确认这些偏离不会造成分析验证结果明显与真实状况不符的情况下,将分析验证结果与验证的验证要求相比较,以确定产品的设计是否满足要求。

分析验证的一个显著优势是在确定了产品设计不符合验证要求的情况下,可以比较容易地确定产品

改进设计的方向。在分析验证中,通过改变有关设计参数,能够以较低的成本对不同设计改进方案进行比较,从而得到优化的设计结果。

7.3 相似性

相似性验证可以认为是一种经验的分析验证方法,如果证明产品 A 和产品 B 的技术状态和使用条件等相似,则可根据产品 A 的验证结果确定所需要验证的产品 B 是否满足要求。

由于产品技术状态和使用条件等的任何差异可能导致产品在使用过程中出现明显区别,因此,在使用产品相似性验证方法时应特别谨慎。相似性验证应满足下列准则:

- a) 与作为参照的产品 A 相比,所需要验证的产品 B 仅有很少的变化,例如,更换了一些具有相同性能和可靠性的零件或材料;
- b) 产品 A 和产品 B 完成相同的功能,并且产品 A 比产品 B 具有相同或更长的工作周期或使用寿命;
- c) 产品 A 和产品 B 采用相同的工艺和设备制造,并且在制造过程中采用相同的检验要求;
- d) 与产品 B 预定的使用环境验证要求相比,产品 A 在使用过程中所经历的环境条件相同或更严酷;
- e) 产品 A 已经过充分的实际使用或试验考核,并且没有采用相似性方法进行鉴定。

在使用相似性验证方法时,需要对两种产品的技术状态和使用条件进行逐项比较,并且对作为参照的产品 A 的验证情况(包括实际使用情况和试验情况)和相应的数据进行严格的审查和评估。如果产品 A 和产品 B 的比较和审查结果出现偏离上述准则的差异,则应对不满足的验证要求进行试验或采用其他分析方法的补充验证。

相似性验证主要适用于相似性鉴定,不适用于产品验收。因为要产品验收使用环境应力筛选原理,100%的产品需要施加环境应力暴露产品潜在缺陷。

7.4 设计评审

设计评审通常是研制过程中进行质量控制的一种手段。在某些情况下,设计评审也可认为是一种经验的分析验证方法。作为一种分析验证方法,设计评审通过对产品设计文件以及相关的检验、试验、计算分析报告/记录的审查和确认验证产品设计是否满足预定的要求。

在将设计评审作为验证方法时,需要考虑下列要求:

- a) 设计评审应当包括对设计文件与规定的产品要求的一致性的审查;
- b) 设计评审应当包括对产品设计的工艺可行性的审查;
- c) 在需要的情况下,设计评审应当包括对产品所属部分在较低装配级上所进行的验证情况(如试验情况等)的审查。

7.5 模拟/仿真

7.5.1 模拟/仿真的作用

航天器的验证过程实际上主要是模拟和评价航天器在预期使用环境中的各种规定的性能/功能,其中,发射和飞行过程的各种性能/功能是验证的重点。随着航天器的任务和使用环境越来越复杂,以及航天器的技术性能越来越先进,研制过程中为数有限的飞行试验不能满足全面验证航天器各种技术性能的要求。为了适应这种情况,发展了模拟/仿真技术,作为模拟航天器在各种典型使用环境下技术性能的辅助手段。相比较而言这是一种低成本的验证方法,在合理和慎重使用的情况下,可以得到有价值的结果。

除了航天器发射和飞行试验之外，模拟/仿真是目前唯一可以用于验证航天器运行全过程工作状况的手段。同时，模拟/仿真也可用于分系统的验证。尽管模拟/仿真不能代替航天器的发射和飞行试验，但能够提供航天器验证所需要的大量数据。在航天器的验证中，模拟/仿真的主要作用如下：

- a) 支持试验设计和规划；
- b) 支持试验的实施；
- c) 支持试验结果的分析；
- d) 扩充试验结果的适用范围；
- e) 用于操作程序验证和训练。

7.5.2 模拟/仿真的类型

对于航天器的验证，模拟/仿真试验主要包括下列两种类型：

- a) 数学模拟/仿真（解析或数值模拟/仿真）；
- b) 半实物模拟/仿真。

数学模拟/仿真以产品的数学模型为基础，一般采用计算机模拟产品在各种输入条件作用下的工作状况。典型的数学模拟/仿真如轨道模拟、分离模拟等。数学模拟/仿真结果的有效性取决于所采用的模型的有效性。在航天器型号研制的初期，数学模拟/仿真能够提供用于产品评估的大多数信息。

半实物仿真是在模拟/仿真系统中用一部分产品硬件代替数学模型。随着航天器的更加先进和更加复杂，数学模型的有效性更难以保证。通过包含实际硬件的模拟/仿真，可有效地提高模拟/仿真结果的可信程度。

对于模拟/仿真结果，应当通过与试验结果的比较进行验证和评定。

中华人民共和国航天行业标准

航天器验证通用要求

QJ 20069—2012

*

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

*

2013 年 5 月出版

定价：30 元