

# 航天装备一体化试验模式创新构想探讨

杨春周<sup>1</sup>, 王曼曼<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 太空领域战略博弈和竞争成为未来作战形式的研究热点, 航天装备作为新质作战能力的重要组成部分, 对未来太空资源的争夺和保护起着不可小觑的作用, 而航天装备试验鉴定是检验航天装备作战能力的重要手段和方法; 针对现行航天装备试验鉴定与航天装备发展要求之间存在不够匹配、研制周期偏长、试验效率低以及试验成本高等问题, 借鉴美国航天装备一体化试验模式和特点, 对比我国航天装备发展现状及存在的问题, 运用“5W1H”的分析方法, 构建了“面向需求, 基于能力”的一体化试验框架模式, 提出了航天装备一体化试验运行机制可行性建议, 探索设计出适合我国航天装备的一体化试验流程, 为下一步航天装备一体化试验模式的顶层设计、统筹规划、决策建议研究提供技术参考。

**关键词:** 航天装备; 一体化试验; 组织架构; 流程设计

## Discussion on Innovative Conception of Space Equipment Integrated Test Mode

YANG Chunzhou<sup>1</sup>, WANG Manman<sup>2</sup>

(1. College of Aviation Foundation, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. College of Coastal Defense, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The strategic game and competition in the space field has become a research hotspot in the future combat form. As an important part of the new quality combat capability, space equipment plays an important role in the competition and protection of future space resources. The test and appraisal of space equipment is an important means and method to test the combat capability of space equipment. In order to solve the problems of insufficient matching, long development cycle, low test efficiency and high test cost between the current space equipment test and evaluation and the development requirements of space equipment, this paper uses the integrated test mode and characteristics of American space equipment for reference, compares the development status and existing problems of China's space equipment, and uses the "5W1H" analysis method to build the "demand oriented test model". Based on the "capability based" integrated test framework mode, this paper puts forward feasible suggestions for the operation mechanism of the integrated test of space equipment, explores and designs the integrated test process suitable for China's space equipment, and provides technical reference for the next top-level design, overall planning and decision-making suggestions of the integrated test mode of space equipment.

**Keywords:** space equipment; integration test; organization structure; process design

### 0 引言

伴随着航天技术的迅猛发展, 太空领域争夺作战热点的研究愈演愈烈, 我国对航天装备的需求和依赖也日益强烈, 我国航天装备面临着由“试验型”转变为真正“装备型”的挑战<sup>[1]</sup>。航天装备试验鉴定是检验航天装备综合能力的重要手段和方法。航天装备的试验鉴定与一般武器装备相比, 具有试验子样极少、试验成本高昂、试验环境限制性较强, 试验准备时间长、要求高、组织协调面广, 试验对测试的要求高、技术新导致试验保障和效能评估难度增大等特点, 对于其试验鉴定策略和方法的构建提出了极大

挑战<sup>[2]</sup>。当前我国航天装备试验鉴定存在研制周期偏长、试验数据融合不充分、研制试验和作战试验分离化<sup>[3]</sup>、作战试验导向作用不够、试验效率不高等问题。针对这些问题, 一体化试验提供了新的解决思路<sup>[4]</sup>。课题通过分析美国航天装备一体化试验模式和特点, 运用“5W1H”的分析方法, 构建“基于能力”的一体化试验框架, 提出针对一体化试验组织架构的合理建议, 并针对某型卫星装备全寿命周期管理设计出合适的一体化试验流程, 为下一步航天装备一体化试验模式的顶层设计、统筹规划、运行机制、决策建议研究提供技术参考。

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2021-01-18。

作者简介: 杨春周(1974-), 男, 山东烟台人, 博士, 副教授, 主要从事装备管理方向的研究。

通讯作者: 王曼曼(1996-), 女, 河南商丘人, 硕士, 助理工程师, 主要从事装备发展论证方向的研究。

引用格式: 杨春周, 王曼曼. 航天装备一体化试验模式创新构想探讨[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 238-244.

# 1 美国一体化试验模式及特点分析

## 1.1 美国航天装备一体化试验模式内涵理解

美国国防部在 2008 年 12 月发布的 5000.2 中再次给出了一体化试验鉴定的定义<sup>[5]</sup>: 一体化试验鉴定是指在试验鉴定过程中所有利益攸关方共同协作, 在试验过程中通过试验数据的融合分析处理, 对所有试验类型、事件和资源进行协调管理, 以形成一个有效的连续统一体, 避免进行单一试验和重复性试验, 提高研制效率<sup>[5]</sup>, 缩短研制时间, 降低采办风险, 节省研制经费。由此可见, 美国一体化试验核心是数据共享, 但是为了保证数据共享的可信性和真实性而颁布实施的一系列管理政策和活动才是关键。通过对美国 5000 系列文件的研读以及对美国装备试验鉴定过程的考察, 我们将会发现美国的一体化试验是试验设计的概念而不是新的试验类型, 对其内涵有以下几个方面的理解:

- 1) 各层级部门、政府机构、工业合作方共同规划试验项目、共享试验信息、独立分析评估。
- 2) 合理规划试验资源, 充分利用试验环境, 研制、作战、实弹试验有机结合, 提高试验效率。
- 3) 一体化试验包含所有试验活动, 各试验活动分段实施, 无缝衔接, 分散试验风险。
- 4) 一体化试验与评估包含多个方面的一体化: 包括试验方法的一体化、分系统试验的一体化、装备全寿命周期的一体化、科研和定型试验阶段一体化。

通过对美国一体化试验内涵的理解, 结合对美国航天装备试验鉴定体制的综合考察, 我们可以发现美国的一体化在比较高的层次上运行, 而保证其运行顺畅的关键离不开完善的政策制度、完备的组织架构、合理的资源规划。

## 1.2 美国航天装备一体化试验模式特点分析

1) 完善的政策制度: 美国自大力推行一体化试验模式以来, 先后出台了例如 DoDI 5000.2 《国防采办系统运行》AFI 10-1202 《空间试验项目管理》AFPAM 38-102 《美国空军总部组织机构及职能》AFI 99-109 《试验资源计划》MIL-STD-785B 《系统和设备研制生产可靠性项目》等关于试验管理、组织实施、技术标准、产品规范等涵盖各个领域的政策和指令文件, 保证了一体化试验的顺利运行, 做到有法可依, 有章可循。

2) 完备的组织架构: 美军航天装备试验鉴定的组织管理是在国防部全军装备试验鉴定组织管理模式的基础上开展的<sup>[6]</sup>, 主要施行组织层面的试验鉴定政策制定与监督, 多军种作战试验鉴定工作协调, 以及项目层面的试验鉴定执行。

组织层面, 美国国防部、空军总部、空军航天司令部、空军作战试验鉴定中心等构成了由顶层政策制定至具体操作实施的航天装备试验鉴定指令链条, 由国防部负责研制试验鉴定的国防部助理部长帮办和国防部作战试验鉴定局/局长两个顶层机构分别制定并协调适用于全军装备的作战试验鉴定和研制试验鉴定的政策; 由空军试验鉴定主管机构——空军总部试验鉴定局制定适用于空军各类装备的试

验鉴定政策; 一般由空军航天司令部和空军作战试验鉴定中心具体负责航天装备试验鉴定策略和方法的拟定。

项目层面, 按采办组织管理系统执行“采办执行官—项目执行官—项目办/项目经理”的纵向管理模式<sup>[7]</sup>。美军航天装备采办由国防部分管采办、技术和后勤的副部长负责, 是国防项目采办执行官, 是重大国防采办项目里程碑决策者。空军负责采办的助理部长是空军采办执行官, 负责空军的所有采办事务<sup>[7]</sup>。在一个具体航天装备采办项目中, 建立有系统项目办及项目经理; 特别对于试验鉴定工作, 建立有一体化试验组、指定研制试验主管部和参试机构、选择并指派作战试验部门等。在项目初期由系统项目办组织建立 ITT, 并由 ITT 负责制定项目试验鉴定的总体规划、试验鉴定主计划, 并统筹组织开展项目的研制试验鉴定和作战试验鉴定工作。同时, 还有航天装备的实际用户(如国家侦察办公室、空军重要司令部等)、航天装备试验鉴定咨询办公室、负责航天装备研制的具体承包商和分包商、国防部联合作战司令部以及与特定航天装备作战相关的部门与机构等, 共同完成试验鉴定工作。美国航天装备试验鉴定组织架构管理体系示意分别如图 1、图 2 所示。

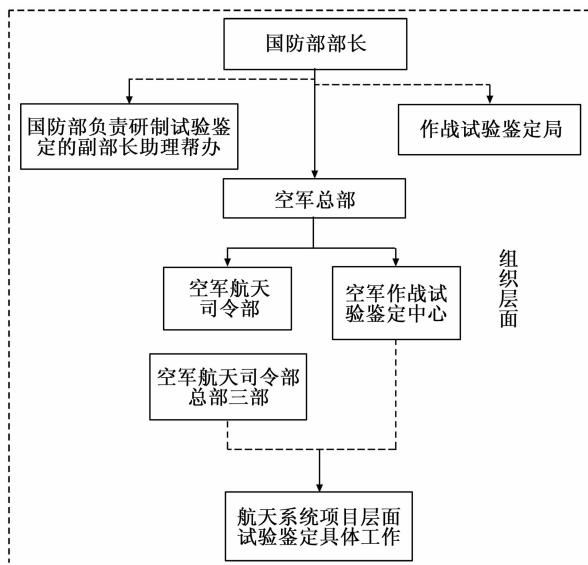


图 1 美国航天装备一体化试验组织层面组织架构

3) 合理的资源规划: 美国将航天装备试验鉴定方法和资源分为 6 大类, 即: 建模仿真、测量设施、系统集成办公室、硬件在环、系统总装试验设施和真实环境试验场。对于鉴定方法和资源的选择和规划使用是保证航天装备试验鉴定顺利实施的重要组成部分<sup>[1]</sup>。这些方法和资源分别分布在美国空军及其他相关军兵种所属的试验基地、发射场、实验室等; 政府非军事部门的试验设施; 工业部门、航天企业公司试验设施等。大多数的空军基地、重点实验室等试验资源会包含多个试验资源类别<sup>[1]</sup>。这些资源由航天装备试验鉴定客户咨询办公室负责统筹并协调, 以现有资源优先规划使用为主, 当现有试验资源无法满足需求时, 航天装备试验鉴定客户咨询办公室可协助项目办或综合试验

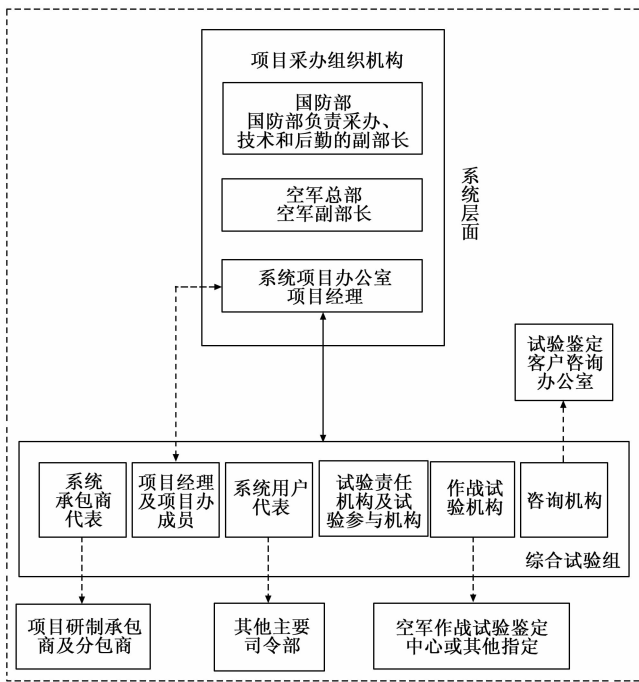


图 2 美国航天装备一体化试验系统层面组织架构

组通过试验投资计划和规划申请建立必要试验资源的经费。

## 2 我国航天装备一体化试验发展现状及存在的问题

### 2.1 我国航天装备试验鉴定发展现状

深化国防和军队改革之后，军委装备发展部颁布的《关于改进加强装备试验鉴定工作的意见》中明确指出，新研装备批准立项后，在装备全寿命周期内，将整个试验工作区分为 3 个阶段：第一阶段为性能试验——状态鉴定；第二阶段为作战试验——列装定型<sup>[8]</sup>；第三阶段为在役考核——改进升级。新研航天装备项目，通常按照性能试验、状态鉴定，作战试验、列装定型，在役考核的基本程序开展试验鉴定，装备完成列装定型后正式交付部队<sup>[9]</sup>。根据需要可以统筹性能试验、作战试验和在役考核开展综合试验，综合试验和鉴定定型安排在试验总案中明确。

组织管理方面，我国航天装备试验鉴定形成了包括领导决策层、组织管理层、试验实施层 3 个层面的组织机构。在试验资源及技术方面，航天系统部虽没有专职的试验基地，航天科技集团、科工集团、电科集团等航天装备研制部门以及中科院、国防科大等科研院所建有相关的性能考核条件，具备开展大部分单机、系统综合、大系统对接等试验鉴定能力。航天工程研究所，各基地，卫星通信中心、航天飞控中心等航天装备科研试验等相关机构，建立了质量保证体系，建有可用于试验鉴定的运载火箭综合测控网、C 频段同步卫星测控网和 S 频段航天测控网等科研试验条件。其中，某些基地还长期承担战略、战役和战术导弹武器系统靶场飞行部分试验工作。

经过近 50 年的发展建设，目前我国在航天产品研制与

试验等方面积累了雄厚的物质基础、技术基础、人员基础和管理基础，为航天装备一体化试验模式可行性打造坚实基础。

### 2.2 我国航天装备试验鉴定存在问题

目前，我国在航天装备试验与鉴定方面存在的主要问题有：一是航天装备系统越来越复杂，性能指标越来越高，价格越来越高，各分系统研制经费与试验消耗、研制周期与试验进度的矛盾越来越突出；二是“铁路警察、各管一段”的试验组织管理模式，试验信息交流不充分，综合使用率低，严重影响试验效率；三是由于体制、技术保密等原因，各分系统工业部门提供给试验单位的技术资料、文件和记录等不充分或不及时，一定程度上影响试验各方的互信与合作，影响仿真分析模型和试验结果的采纳和评定；四是在研制试验与作战试验分离化、试验环境条件理想化、战术背景简单化等条件下考核，复杂、边界和对抗条件考核不全面；五是重视设计定型基地试验，对设计定型部队试验的要求和标准不高；六是大多数航天装备作战试验，是在系统发射后才开展，即使发现问题也难以得到修正，造成资源浪费，达不到降低采办风险的目的。

因此，一体化试验的优势值得借鉴，针对航天装备的一体化试验研究非常迫切。考虑到航天装备的特殊性，我国需要尽快形成一体化试验理论体系，探索航天装备一体化试验机制，优化设计航天装备一体化试验流程，积累一体化试验经验。通过对现有试验鉴定模式的改革和创新，达到提高试验效率、降低采办风险、节约试验经费、提高作战试验主导能力的目的。

## 3 基于能力的一体化试验框架和管理框架构建

### 3.1 基于能力的一体化试验框架构建

美国国防部指出，能力是在确定的指定需求下，通过将不同手段和使用方式有机组合完成一组关键任务，达到预期目标或结果的持续本领<sup>[10]</sup>。分析美国一体化试验内涵和运行机制特点之后发现，一体化试验鉴定活动主计划也是在“基于能力”模式下制定的，并且以不断验证各系统、分系统、组件等装备能力水平来判断基于能力的需求是否得到满足，一体化试验整个过程都体现了“基于能力”模式的影子。我国航天装备试验鉴定最终目的就是要不断推进航天这一新质作战能力生成，检验试验鉴定成果的最合适标准就是检验新研装备的综合能力。由此可知，基于能力的分解既可以作为试验活动的开端也可以作为试验鉴定活动的基线。分析能力定义可知，能力采用了“5W1H”分析法进行描述，即从何因 Why、何事 What、何地 Where、何时 When、何人 Who、何法 How 这 6 个方面提出<sup>[16]</sup>，如表 1 所示。

由此表建立的“基于能力”的一体化试验框架如图 3 所示。

图 3 所示的框架属于一体化试验项目层面的总体框架，框架整体体现了能力需求自顶向下逐层分解的原理，明确了研制试验、作战试验和一体化试验之间的联系和区别，也

表 1 对“能力”生成的分析

5W1H	能力定义组成
what	航天装备一体化试验鉴定计划中的试验事件
why	预期通过航天装备一体化试验达到的持续能力
when	在航天装备一体化试验鉴定活动中,在试验任务牵引下设置专门的组织管理机构组织实施具体试验事件,属于已知条件,不参与鉴定
where	
who	参与试验鉴定的系统、子系统、组件等装备对象
how	各种试验鉴定技术手段和试验资源的合理规划

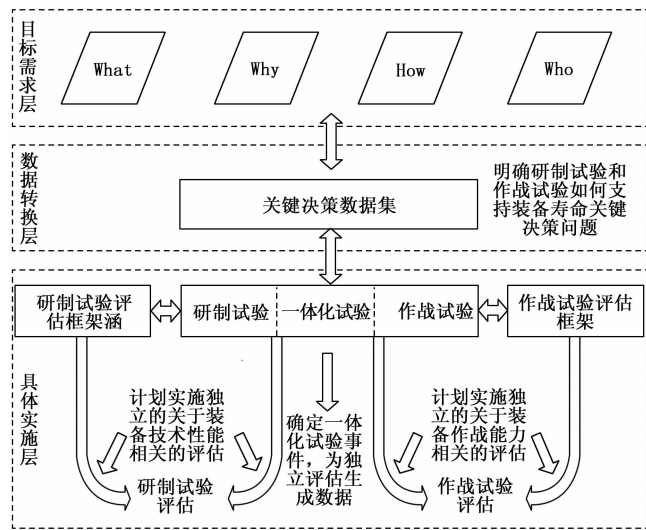


图 3 一体化试验框架

体现了试验和评估相互影响各自独立的特点。解析此框架框架,框架顶层,基于能力定义的“5W1H”构成一体化试验的目标需求层,基于数据融合处理分析的中间层构成数据转换层,底层的试验鉴定构成具体实施层。在目标需求层,基于能力的分析将通过制定一体化试验计划转化为装备试验和评估的装备战技指标,指标将进一步转换为一体化试验数据库关键决策数据集需求。在数据转换层,基于能力的需求分析将通过关键决策数据集根据数据结构和特点转化为一一体化试验、研制试验和作战试验和评估的具体事件。该关键决策数据集将由试验过程数据、报告、计划等结构化、非结构化、半结构化所有支持关键决策的数据组成。在具体实施层,由研制试验评估框架、研制试验、一体化试验、作战试验和作战试验评估框架相互交叉又分别独立,体现了一体化试验是新的试验概念而不是新的试验方法这一理念<sup>[11]</sup>,同时也说明一体化试验是试验阶段一体化、试验内容一体化、试验方法一体化的特点<sup>[12]</sup>。试验阶段一体化指的是试验内容贯穿装备全寿命周期,各试验项目紧密联系、相互交融、相互影响。试验内容一体化指的是航天装备试验目的是在于接近实战条件下全面考核被试装备的战术技术性能和作战使用性能,试验内容目的一致都是检验装备综合性能和作战能力。试验方法一体化是指针对不同的试验项目应该有相对应的一体化试验方法,

包括试验设计、试验数据处理方法、性能验证方法、性能状态鉴定方法、作战效能评估方法以及作战适用性评估方法。3个层面自顶向下逐层分解,但是此框架并不是一成不变的,当具体试验评估事件完成后,会衍生新的试验数据通过灵活的报告逐层从底部反馈给上一层直至能力需求层,能力需求层根据反馈信息不断更新。这一迭代过程将反复实施直至能力需求目标完成<sup>[13-15]</sup>。

### 3.2 基于能力的一体化试验管理框架构建

航天装备试验鉴定决策确定后,需要组织协调相关资源落实决策意图,并对落实过程实施管理和监督。这是一项承上启下的工作,是联系领导层和实施层的桥梁,关系到航天装备试验鉴定能否履行好使命,就需要有一个精干、高效、顺畅的组织管理体系,负责航天装备试验鉴定各项工作的组织、协调、指导、管理和执行监督。这个问题就是基于能力分析方法中的“when”和“where”具体研究内容<sup>[16-19]</sup>。

航天装备一体化试验鉴定的组织管理体系设置由航天装备试验鉴定的领导管理体制决定,与试验目的、试验规划、试验事件、试验资源等因素密切相关<sup>[20-21]</sup>。针对“when”和“where”的问题,美国航天装备试验鉴定确实形成了一套成熟的基于项目管理理念的做法。其项目管理的做法核心理念就是基于试验目的,通过试验组织管理的灵活调整,结合试验规划内容,选择并调整各自试验领域内的专家和机构制定计划、执行实施和监督管理具体的试验活动。结合我国试验鉴定现行领导—管理—实施框架,建议成立如图 4 所示设想航天装备一体化试验管理框架:在确定一体化试验鉴定的基本原则理念与目标的基础上、在完成装备论证之后装备方案设计之前、在能力分析中“why”的装备战技指标初步确立后成立一体化试验项目组。该项目组应该由参与试验或评估的作战试验部门、研制试

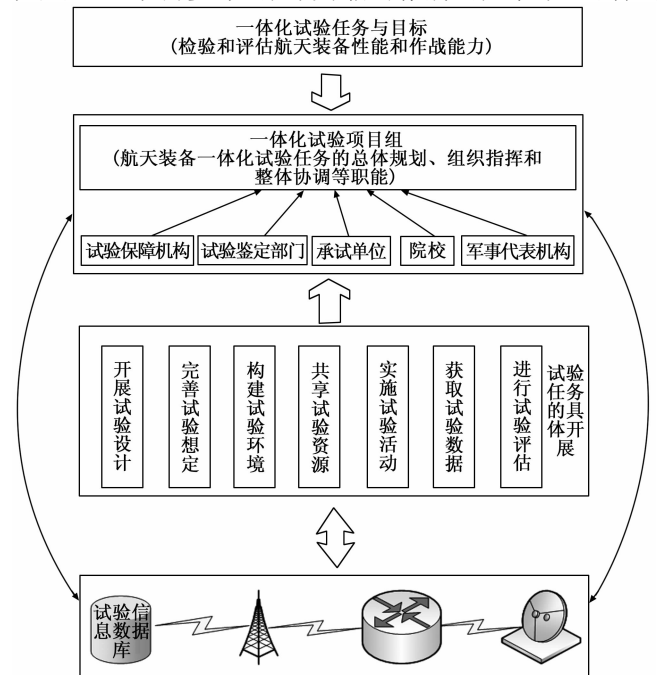


图 4 开展一体化试验的组织框架构想

验部门、试验保障机构、承试单位、院校、军事代表机构和作战使用方等组成，其主要职能为：一体化试验任务的总体计划制定、试验资源的协调规划、试验鉴定事件的组织实施和监督管理、促进试验专门技术、仪器仪表、设施、仿真和模型的应用、明确一体化试验要求、按照装备研制验收规定检验研制航天装备的综合能力（需要注意的是，一体化试验组成员并不是一成不变的，在试验过程中可以根据试验需求申请更换）。一体化试验项目组的成立将试验参与的核心人员及部门聚集在一起，通过早期的任务规划和协调管理，探索执行项目定制化的试验鉴定组织管理模式，不断提升试验鉴定执行力，实现跨部门、跨系统的协同工作，有助于解决航天装备试验鉴定问题中的“烟囱”问题，保障一体化试验实施的高效运行从而达到提高试验效率，节约试验经费的目的<sup>[22-24]</sup>。

现阶段军队领导管理体制发生了重大调整，全军装备试验鉴定的管理体系也进行了相应的调整。航天装备一体化试验项目组应该以航天装备试验鉴定领导体制为指导，航天装备发展论证要求为原则，航天装备试验任务为牵引，按照项目管理的理论和核心思想组建起来。在航天装备一体化试验中遵循装备试验鉴定管理条例要求和装备质量验收相关管理规定等文件政策将复杂的航天装备试验鉴定简

单化、条理化、标准化和再优化是一体化试验项目组的总体目标和行动准则，为达到上述目标离不开航天装备一体化试验的流程优化<sup>[25-26]</sup>。

#### 4 基于框架的航天装备一体化试验模式流程设计

航天装备一体化试验鉴定的开展应以一体化试验能力需求生成过程为主线。在试验筹划准备阶段、试验实施阶段和试验评估阶段，须按照统一的一体化试验任务计划协同组织实施，并依据统一的原则标准抓好一体化试验任务的数据分析和结果评估工作。通过对一体化试验框架和管理框架的建立，如何将研制目的需求、组织机构建立、试验评估实施、信息数据管理有机连接起来需要对航天装备试验评估流程进行设计优化。这里针对某型卫星系统，基于其现有寿命周期管理及决策点，设计以能力需求建设为目的的一体化试验评估流程，如图 5 所示。

如图 5 所示，一体化试验流程从 3 个方面描述，即需求能力生成过程、试验评估过程和装备全寿命周期信息管理。

1) 需求能力生成过程就是一体化试验评估目标层面，即为能力分析中“why”从提出至完成的文件生成过程，这个过程以能力需求生成从提出不断迭代不断更新贯穿航天装备全寿命周期为主，初始能力需求论证将与航天装备需求论证中得到，之后将从试验评估关键决策点中获得支持

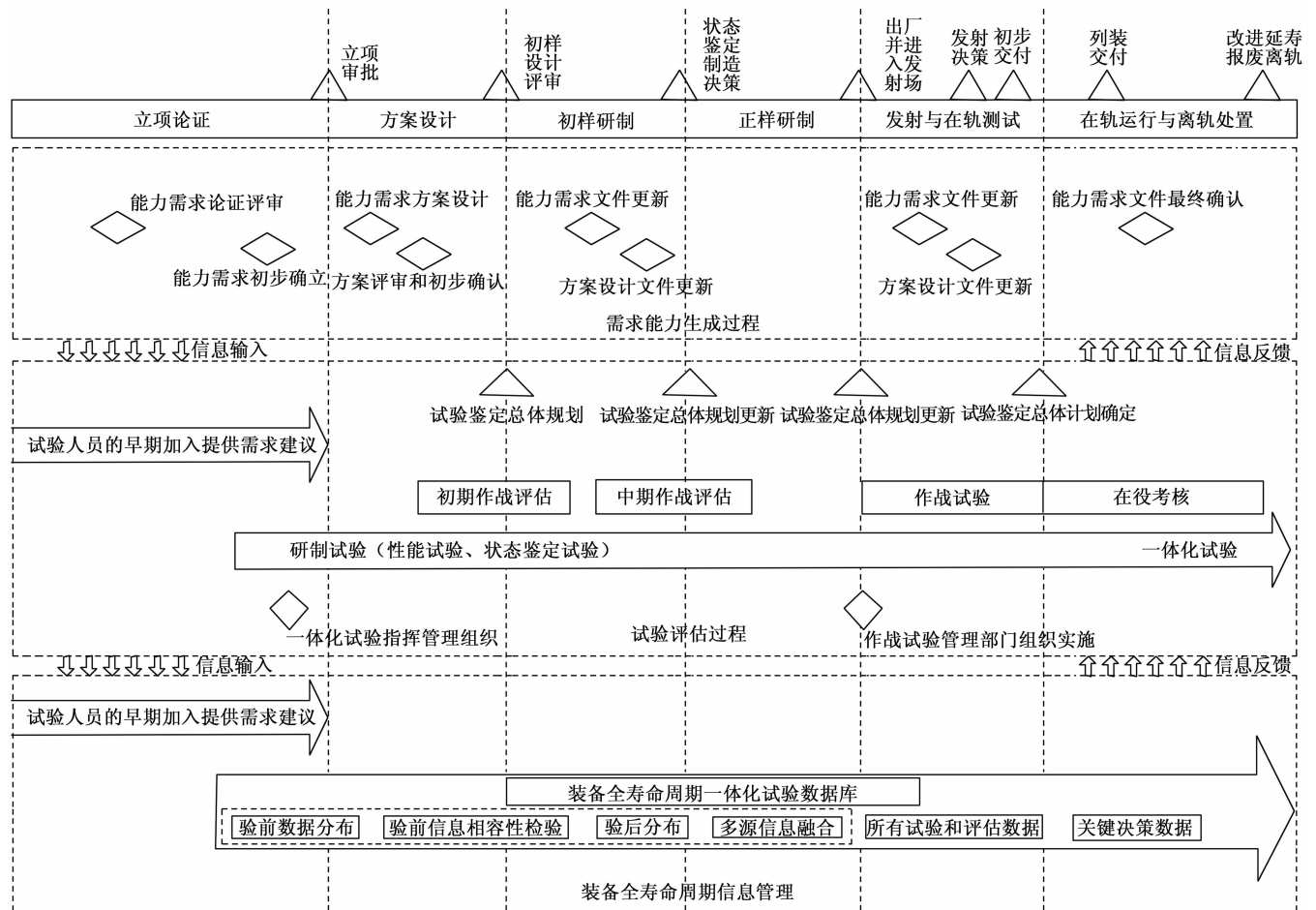


图 5 航天装备一体化试验模式流程

信息更新并反馈指导试验评估的实施,在这个过程中能力需求的迭代更新内容将通过方案设计、评估报告、能力需求文件等形式留存下来,方便后期试验结果检验,发现问题环节。

2) 试验评估过程层是一体化试验中试验事件的组织管理层,即为能力分析中“what”、“where”、“when”、“how”的具体体现,是航天装备一体化试验的关键过程。在此过程中,由于测试人员的早期加入可以更早地对装备战技指标生成需求提供可行建议并对试验内容做早期规划,不仅如此,一体化试验项目组将伴随战技指标生成过程同步建立。一体化试验项目组将在装备立项论证阶段利用可行的研制试验和早期作战评估尽可能完善装备初始战技指标的形成,之后制定试验鉴定总体规划,规划内容主要包括何时用何种方法开展何种类型的试验评估,并积极协调整合试验资源,减少重复试验类型,降低试验资源浪费。同时,通过能力分析建设的一体化试验框架,一体化试验项目组将根据能力需求生成要求合并、整合性能试验和作战试验类型、内容和方法,更早地加入作战试验并贯穿装备的全寿命周期,这将进一步提高作战试验在航天装备试验鉴定的主导作用。这个过程一体化试验项目组将会不断更新试验鉴定总体规划文件,直至完成装备质量验收形成全套的试验鉴定总体规划最终版,这份文件将会为同类型装备或不同类型装备相同系统的下一代试验活动开展提供技术参考。

3) 装备全寿命周期信息管理是实现试验数据和能力转换的中间桥梁,即为能力分析中的“关键决策数据集”层面。此过程中,由于航天装备小子样特点,通过对试验数据进行验前数据分布、验前信息相容性检验、验后分布以及多源信息融合等数据融合处理分析,建立融合数据库,并筛选关键决策支持数据形成关键决策数据集,以支持试验评估,同时将评估反馈的结果指导试验实施和能力需求更新。这一层是一体化试验的数据核心层。

4) 信息流转回路,由图5可见,信息的输入和反馈,在能力需求层、试验评估过程层和装备全寿命周期信息管理3个层面之间流转,形成闭合回路。整个过程将遵循航天装备试验鉴定管理规定的总体要求、航天装备验收管理规定的验收标准以及一体化试验鉴定的计划安排,这样整个流程才能满足将一体化试验框架、管理框架和具体的试验实施有机衔接起来,真正以解决问题为目的,促进一体化试验研究成果落地落实。

图5设计的一体化试验模式流程以满足需求、生成能力为目的,数据融合为锁链,一体化试验鉴定为桥梁,贯穿装备的全寿命周期过程,形成了以能力需求—战技指标需求—数据需求反馈链条的装备试验鉴定回路。根据设计流程,结合设想的组织架构的分工合作,依据颁布的装备试验鉴定规章制度和验收规定,装备试验各项活动将大概率有机结合、无缝衔接、高效实施,进而距离“节约试验鉴定经费、缩短研制周期、降低采办风险、提高试验鉴

定效率”的目标更进一步<sup>[27]</sup>。

## 5 结束语

近年来,一体化试验鉴定作为试验鉴定的发展方向已经得到了较广泛的认可<sup>[14]</sup>。想要解决我国航天装备试验鉴定不同阶段试验之间、不同性质试验之间缺乏统筹,试验评估效率偏低,研制周期偏长等问题,一体化试验给了我们新的研究思路。课题通过对美国一体化试验模式分析,总结归纳其特点,结合我国航天装备一体化试验现状及存在问题,运用“5W1H”的分析方法,构建“基于能力”的一体化试验评估框架和组织管理框架,结合框架设计以某型卫星系统为例的一体化试验流程,为下一步航天装备一体化试验模式的顶层设计、统筹规划、运行机制、决策建议研究提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] 周思卓,刘宝平,彭洪江,等. 美军航天装备试验鉴定体系发展现状研究 [J]. 装备学院学报, 2016, 27 (6): 65-68.
- [2] 王涛,孙治国,范静. 卫星移动通信系统试验鉴定的实践与思考 [J]. 航天器环境工程, 2019, 36 (3): 301-306.
- [3] 朱文振,叶豪杰,王昊. 水中兵器一体化试验总体设计探讨 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10): 285-288.
- [4] 张逸波. 卫星虚拟振动试验技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [5] 雷帅,丁士民. 基于一体化试验鉴定发展的试验鉴定发展规律 [J]. 国防科技, 2011, 32 (4): 36-39.
- [6] 柯宏发,祝冀鲁,徐勇. 美军装备试验鉴定的组织实施及启示 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31 (2): 5-10.
- [7] 董菲. 美国国防采办体制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [8] 杜彦昌,曹金霞. 美军装备“定型”阶段试验与鉴定工作探讨 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20 (5): 32-36.
- [9] 杨继坤,贺荣国,谢德光,等. 新型驱护舰定型考核总体规划与方案设计 [J]. 兵工自动化, 2019, 38 (4): 1-5, 44.
- [10] 杨晨光,贾贞,刘志. 基于联合使命线路的装备作战效能度量指标构建 [J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41 (4): 85-90.
- [11] 汪新,李飞. 试验鉴定研究中若干问题探讨 [J]. 装备学院学报, 2017, 28 (2): 84-87.
- [12] 洛刚,黄彦昌,康丽华,等. 关于推进我军装备一体化试验的思考 [J]. 装备学院学报, 2015, 26 (4): 120-124.
- [13] 周锐,蒋觉义,乔丽. 综合传动装置一体化模型评价与验证研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 246-250.
- [14] 张宝珍. 美军武器装备试验与鉴定策略的发展演变 [N]. 中国航空报, 2019-01-15 (7).
- [15] 王国盛,洛刚. 美军一体化试验鉴定分析及启示 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21 (2): 95-98.
- [16] 陶东兴,王晶,裴一飞,等. 基于仿真技术的光学遥感卫星性能验证试验方法研究 [J]. 质量与可靠性, 2019 (2): 11-14.
- [17] 杜智远,廖学军,黄昊. 美军武器装备联合试验的发展与启示 [J]. 军事运筹与系统工程, 2018, 32 (1): 73-80.

[18] 张金荣, 詹家峰. 美国核力量运用政策的制订 [J]. 国际资料信息, 2007 (11): 16 - 21.

[19] Defense Acquisition University. Test and evaluation management guide [M]. 6<sup>th</sup> ed. Virginia: The Defense Acquisition University Press, 2012.

[20] Department of Defense. DoD 5000. 2 - R. Mandatory procedures for major defense acquisition programs and major automated information system acquisition programs [M]. Washington: Department of Defense, 2002: 56 - 73.

[21] Department of Defense. DoDI 5000. 2, Operation of the defense acquisition system [M]. Washington: Department of Defense, 2008: 50 - 56.

[22] Darlene Mosser - Kerner. Test and Evaluation Policies and

Practices: A New Emphasis [J]. ITEA Journal, 2008, 29: 157 - 159.

[23] 乔 浩, 战仁军, 林 原. 面向使命任务的武器装备体系能力规划方法 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (8): 2042 - 2048.

[23] 白洪波, 李雄伟, 张旭光. 开展多靶场联合试验的思考 [J]. 装备学院学报, 2016, 27 (3): 125 - 128.

[25] 谷亚辉, 程中华, 白旭华. 合成旅战时装备维修保障效能评估指标研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 258 - 261.

[26] 王 灿. 联合试验平台试验方案设计软件开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[27] 魏东涛, 刘晓东, 吴诗辉. 武器装备体系的经济可承受性成熟度评估 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (7): 126 - 131.

(上接第 205 页)

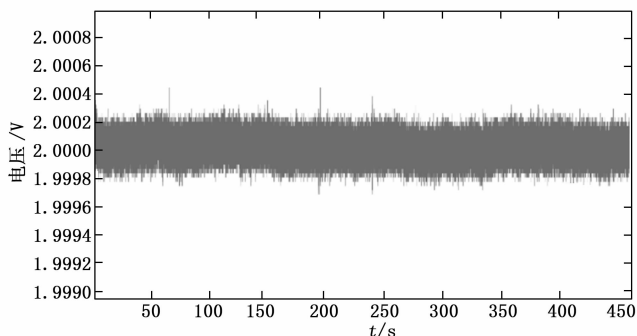


图 8 采集系统精度测试

差为 400  $\mu\text{V}$ , 可以满足被采传感器的精度要求。对 ZigBee 无线网络的接受和发送距离测试采用有障碍和无障碍测试, 有障碍测试是在教学楼楼道中进行, 测试结果表 3 所示, 以下都是测得 6 组后取得的平均值。

表 3 ZigBee 接收有无障碍对比

实验序号	测试距离/m	发送包数	接收包数	有无障碍	丢包率/%
1	100	1 000	1 000	无	0
2	150	1 000	1 000	无	0
3	200	1 000	1 000	无	0
4	300	1 000	997	无	0.3
5	20	1 000	1 000	有	0
6	50	1 000	1 000	有	0
7	70	1 000	998	有	0.2
8	100	1 000	992	有	0.8

根据测试结果显示, 在空旷无障碍区域, 两个 ZigBee 模块可以再 200 m 以内正常通信, 无丢包现象。而在有障碍的情况下, 两模块之间在 50 m 内能正常通信, 大于 50 m 逐渐出现丢包现象。所以根据煤矿井下情况的不同, 合理布置 ZigBee 通信节点以达到降低数据丢失的目的, 来提高数据传输的准确性和可靠性。

### 5 结束语

本文首先介绍了系统的设计目的, 随后介绍了采集电

路的总体设计思路, 详细阐述了系统的硬件电路设计和 FPGA 的软件程序设计, 并且通过程序仿真和实物验证充分证明了设计的可行性和稳定性。设计中采用 FPGA 为主控芯片使得系统的扩展性得到提高, 处理数据能力更强, 避免数据的冗余, 增强了井下环境监测系统的可靠性。同时该电路具有非常灵活的移植性, 适用于各种高精度和多通道的数据采集环境, 包括弹载数据采集, 大棚温控等诸多测控领域。

### 参考文献:

[1] 余世刚, 胡月娥, 赵 宇, 等. 基于无线通信和传感器的动力电池在线监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 57 - 61.

[2] 崔星华. 基于单片机的船舱温度临界报警系统 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (20): 85 - 87.

[3] 齐笑笑. 煤矿本质安全监测数据采集系统研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.

[4] 郑杰辉. 基于 FPGA 的遥测系统数据存储控制模块设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (8): 94 - 98.

[5] 黄玉岗, 秦 丽, 李 杰, 等. 基于 FPGA 的弹载数模混合采集存储系统设计 [J]. 传感技术学报, 2016, 29 (8): 1210 - 1216.

[6] 周文鑫. 井下高温气体传感器测试系统的研究与设计 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2015.

[7] 李伟华. 一种低静态电流高稳定性的低压差线性稳压器 (LDO) 设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

[8] 刘秀锋, 李 杰, 刘一鸣, 等. 半捷联惯性测量系统多路采集数据对齐方法 [J]. 传感技术学报, 2015, 28 (9): 1373 - 1378.

[9] 邓登峰. 一种嵌入式视频系统及其低功耗设计与研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.

[10] 张 强. 矿用低压选择性漏电保护装置的研制 [D]. 葫芦岛: 辽宁工程技术大学, 2012.

[11] 王 浩. 200MSPS 任意波形发生器信号调理电路设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

[12] 王本金. 动态多通道肺音采集系统的设计与研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.