

基于霍尔模型的航空发动机成附件试验验证体系设计方法研究

Research on the Test Verification System Design Method for Aero Engine Accessories Based on the Hall Model

■ 刘文兴 刘海年 郑宁 谷艳萍 / 中国航发沈阳发动机研究所

航空发动机成附件试验验证的完整性和有效性直接决定了成附件交付的质量和使用安全，因此，研究建立基于霍尔模型的航空发动机成附件试验验证体系对提升成附件试验验证能力、保证航空发动机使用安全具有重要的工程意义。

航空发动机配套成附件产品的可靠性直接影响着发动机的使用安全。据统计，国内航空发动机在外场使用过程中因成附件问题导致的故障占整机故障的70%~80%^[1]，严重地影响了发动机的飞行安全和用户体验。试验验证是成附件需求验证的重要方式，国内航空发动机行业已着手研究建立完整、有效的发动机成附件试验验证体系。本文针对国内航空发动机成附件试验验证过程中存在的试验流程执行不规范、试验验证项目不完整、试验方案设计不准确等问题，应用系统工程V模型^[2]理念，建立了基于霍尔模型的航空发动机成附件试验体系架构，并从时间维、逻辑维和知识维全面阐述了成附件试验验证全生命周期、全过程和全层级验证的要求和方法，为规范航空发动机成附件试验验证过程，提升成附件试验验证的系统完整性和准确性提供有效支撑。

基于霍尔模型的成附件试验验证体系

霍尔模型理论

霍尔模型是美国系统工程专家

霍尔于1969年提出的一种系统工程方法论^[3]，将系统工程整个活动过程分为不同的阶段和步骤，同时结合这些阶段和步骤所必备的专业知识和技能，形成了由时间维、逻辑维和知识维所组成的三维模型。其中，时间维表示系统工程活动按时间顺序排列的过程；逻辑维是基于系统工程的V模型明确需要完成的工作或者活动；知识维则描述工作或活动执行过程中需要用到的专业知识

和方法工具。

霍尔模型提供了一种分析复杂系统的有效工具，很多复杂问题均可利用立体空间的3个维度进行分析和解决，而航空发动机成附件试验验证体系通过霍尔模型可对复杂问题进行系统性的剖析，从而有利于成附件试验验证工作的实施。

成附件试验验证体系架构

发动机成附件试验验证是一项复杂的系统工程，图1根据霍尔模型

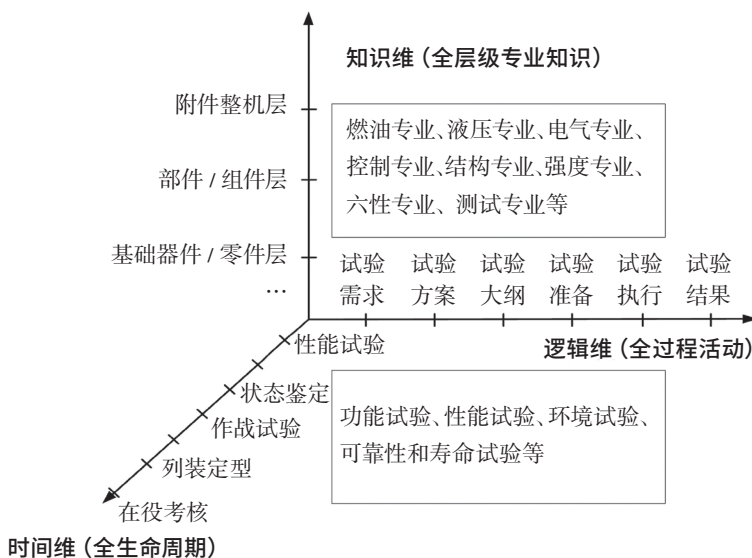


图1 基于霍尔模型的成附件试验验证架构

表1 航空发动机成附件全生命周期试验验证内容

	性能试验	状态鉴定	作战试验	列装定型	在役考核
主要工作内容	完成性能验证、装机前试验和首飞安全性验证	完成成附件性能鉴定试验	完成成附件极限使用条件、复杂电磁环境、极端自然环境等作战条件下试验考核	完成成附件产品列装定型	验证成附件产品的作战效能和作战适用性
试验层级	器件/部件/组件层	附件整机层	附件整机层	附件整机层	器件/部件/组件层；附件整机层
试验类型	功能、性能、环境、可靠性、寿命试验	功能、性能、环境、可靠性、寿命试验	功能、性能、环境、可靠性、寿命、安全性试验	环境、可靠性、寿命、安全性试验	环境、可靠性、寿命、安全性试验

理论，从时间维、逻辑维和知识维3个维度建立了涵盖发动机成附件全生命周期、全过程和全层级的试验验证体系架构，可以实现对发动机成附件试验验证科学、统一、完整的管控，保证成附件试验验证的完整性和准确性。

成附件试验验证体系建设方法

在构建成附件试验验证体系架构的基础上，针对成附件试验验证体系的建设方法从成附件全生命周期试验验证、全过程试验验证流程活动和全层级试验验证专业知识3个维度进行详细阐述，保证成附件试验验证体系建设的完整性和有效性，为实施成附件试验验证体系的建设提供参考。

全生命周期试验验证

成附件全生命周期试验验证(时间维)主要涵盖成附件研制的性能试验、状态鉴定、作战试验、列装定型以及在役考核的全生命周期试

验验证项目，保证试验验证的完整性^[4]。根据成附件试验验证的目标和工作内容分别实施不同类型的试验验证，如表1所示。

全过程试验验证流程活动

成附件全过程试验验证流程活动(逻辑维)代表发动机成附件产品试验验证从试验需求到获得试验

结果的试验执行全过程，如图2所示，涵盖发动机试验需求分析、试验方案设计、试验大纲编制、试验准备、试验执行以及试验结果分析的试验全过程流程活动，是系统工程V模型思想的核心体现，保证试验执行过程的完整性。

试验需求定义活动依据成附件技术协议，按照《以需求为牵引的航空发动机正向设计方法研究及应用》^[5]中需求定义的方法，完成成附件需求定义，并在DOORS软件中对成附件需求进行编号和分类，形成成附件试验需求清单，例如，航空发动机燃油泵-调节器需求清单如表2所示。

试验需求分析活动主要以成附件技术协议为需求分析的输入，条目化分析技术协议中需求的可行性，并明确各项需求的试验验证项目，形成试验验证策划；试验策划报告的主要内容应包含概述、验证方法、验证内容、试验环境和工具、试验准入和准出标准等内容。发

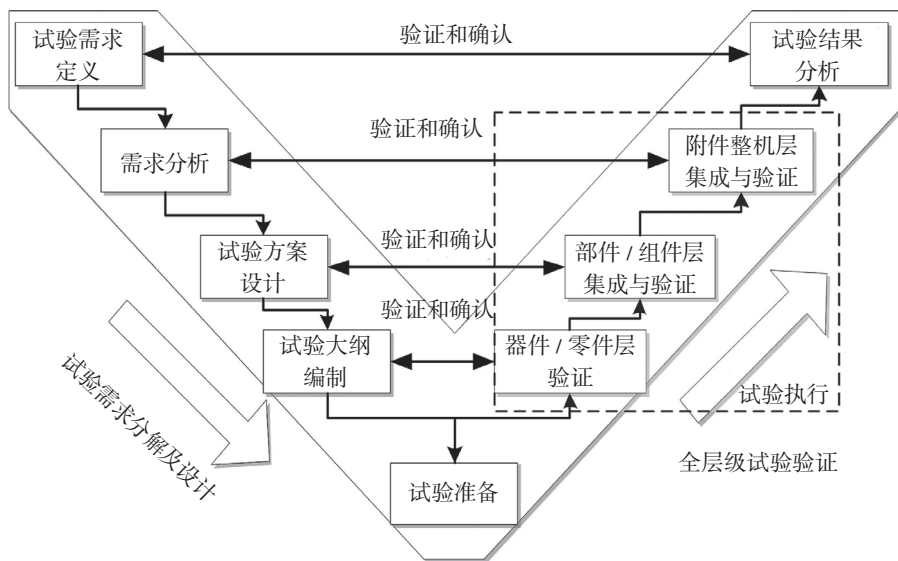


图2 成附件试验验证全过程V模型

表2 航空发动机燃油泵-调节器需求清单

需求编码	需求内容	需求分类	责任专业	责任人
RYB_R001	通过离心级对飞机油箱的来油进行一级增压后提供给齿轮级、伺服燃油泵	功能	控制专业	×××
RYB_R002	通过齿轮级对提供主燃油控制装置的燃油进行二级增压	功能	控制专业	×××
RYB_R003	通过带有旁通功能的油滤组件对供给齿轮级和伺服燃油泵的燃油进行过滤	功能	控制专业	×××
RYB_R004	通过压差传感器实时采集油滤前后压差并反馈给电子控制器	功能	控制专业	×××
RYB_R005	齿轮级最小流量不小于×××，最大流量不大于×××	性能	控制专业	×××
RYB_R006	产品不同研制阶段分别完成燃油泵-调节器的功能、性能、环境、可靠性和寿命等试验，并满足××要求	试验	控制专业	×××
RYB_R007	按照《流体污染试验》进行试验，其中污染流体类别中，燃油介质暴露程度为“浸渍”及“喷洒”，其余流体介质暴露程度为“喷洒”	试验	控制专业	×××
RYB_R008	按照《高温试验》进行试验，高温储存为循环储存，7个高温工作日循环共计168h	试验	控制专业	×××
...

表3 航空发动机主轴承试验验证策划

试验项目	试验类型	主轴承需求
主轴承性能试验	科研试验	ZZC_R0019主轴承转速能够按发动机最大允许稳态转速的××持续运转××min；ZZC_R0025保持架应避免共振条件，从而不发生过大的响应和结构破坏
主轴承滑油中断试验	科研试验	ZZC_R0034在不向滑油泵进口供油的情况下，发动机能以中间状态推力工作××s，在此滑油中断期间及以后的工作期间，主轴承不发生损坏
主轴承耐久试验	科研试验	ZZC_R0036主轴承设计使用寿命×××h，中间及以上状态工作时间不低于×××h。应保证在规定的设计使用寿命周期结束时，主轴承仍能正常的工作
风车运行试验	科研试验	ZZC_R0041在润滑系统故障（无滑油供应）条件下，主轴承应能风车状态运行至少××h不发生严重损坏导致发动机出现抱轴
...

动机主轴承试验验证策划如表3所示。

试验方案设计活动主要由试验人员根据试验策划和试验任务书的要求，设计验证试验的具体方案，试验方案主要包括试验件样本量、试验时间、试验方案、参数数据处理方法、试验中断处理与恢复、试验组织及分工、试验安全（风险及处理预案）等内容，保证试验方案的可行性。

试验大纲编制活动主要说明试验操作的具体步骤、检查指标或判断依据；试验大纲主要内容应包含任务来源、试验时间、试验地点、试验名称、试验性质与目的、试验内容、试验产品技术状态、测试系统技术状态、试验准备技术状态、试验程序、试验风险和控制措施、试验结果评定准则等，保证试验方法的正确性和可执行性。

试验准备活动主要包括试验件安装、设备改造或调试、试验环境搭建、测试设备校准、试验前检查等工作，通过检查后进行试验执行和实施。

试验执行活动主要按照试验大纲和试验卡片的要求和步骤，完成试验的运行、关键过程和试验风险的管控，以及试验数据的记录和收集，保证试验测试数据与过程信息的准确、可靠和详实。

试验结果分析活动主要完成试验数据确认及汇总，根据试验目标完成试验结果分析，编制试验结果分析报告和试验报告，确定试验是否满足目标要求；同时，针对试验过程中出现的问题，明确试验结论、存在问题与改进建议，为后续进行产品设计改进或优化提供输入。

表4 成附件试验验证知识矩阵

	试验需求	试验方案	试验大纲	试验准备	试验执行	试验结果分析
附件整机层	场景分析方法 需求分析方法 DOORS软件应用方法 需求管理方法	可靠性试验 方案设计方法 试验剖面(温度、压力、转速等)设计方法	试验用例 编制方法 试验大纲 编制方法	试验测试方案设计方法 试验设备设计方法 试验改进设计方法 试验校准方法	设备操作方法 试验状态监控方法 试验数据有效性识别方法 风险管理方法	试验数据统计方法 试验报告编制方法 试验结果分析方法
部件/组件层	场景分析方法 需求分析方法 DOORS软件应用方法 需求管理方法	可靠性试验 方案设计方法 试验剖面(温度、压力、转速等)设计方法 功能试验	试验用例 编制方法 试验大纲 编制方法	寿命仿真分析方法 蒙特卡洛仿真分析方法 电磁环境仿真分析方法 强度寿命仿真分析方法	设备操作方法 试验状态监控方法 试验数据有效性识别方法 风险管理方法	试验数据统计方法 试验报告编制方法 试验结果分析方法
基础器件/零件层	场景分析方法 需求分析方法 DOORS软件应用方法 需求管理方法	元器件失效 模式分析方法 元器件筛选方法	试验用例 编制方法 试验大纲 编制方法	寿命仿真分析方法 蒙特卡洛仿真分析方法 电磁环境仿真分析方法 强度寿命仿真分析方法	设备操作方法 试验状态监控方法 试验数据有效性识别方法 风险管理方法	试验数据统计方法 试验报告编制方法 试验结果分析方法

全层级试验验证专业知识

成附件全层级试验验证专业知识(知识维)主要是指构建能够覆盖基础器件/零件、部件/组件、成附件整机全层级研发对象试验验证全过程所需的全部专业知识和技能,如燃油专业、液压专业、电气专业、控制专业、结构专业、强度专业、六性专业以及测试专业;实现对试验需求分析、试验方案设计、试验准备、试验执行,以及试验结果分析等全过程试验流程活动均有完备的方法和工具做支撑,保证试验的顺利执行。

本文以成附件全层级试验验证专业知识为例,构建成附件试验验证知识体系。首先,依据试验策划,定义全层级试验项目;其次,以试验项目为牵引,按照试验全流程活动,逐项分析全层级试验项目所需的专业方法和技能等所涉及的统计

学、力学、热学、电磁学、结构、质量特性等多学科多技术;最后,基于成附件试验知识矩阵构建成附件试验知识体系,如表4所示。需要强调的是成附件试验知识体系随着实践的发展不断更新完善,随着实践创新和经验技术的集成,不断动态更新变化,可持续为试验验证体系的有效运行提供所需的多学科知识和技术。

结束语

航空发动机成附件试验验证体系的建设需要长期的积累和坚持,通过总结型号研制经验并纳入成附件试验验证体系,持续提升成附件试验验证的完整性和有效性,最终实现航空发动机成附件试验验证能力和产品研制质量的有效提升。

(刘文兴,中国航发沈阳发动机研究所,高级工程师,主要从事航

空发动机控制系统研究及成附件项目管理工作)

参考文献

- [1] 刘海年, 栾旭, 吴新, 等. 航空发动机成附件研制程序研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(9): 48-52.
- [2] 吴颖, 刘俊堂, 郑党党. 基于模型的系统工程技术探析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 69-73.
- [3] 张宇, 程中华, 连光耀, 等. 基于霍尔三维结构的装备测试性验证试验框架设计[J]. 测控技术, 2023, 42(3): 44-49.
- [4] 张瑞明, 赵颖颖, 刘春生, 等. 典型航天装备鉴定定型工作研究与工程探索[J]. 航天工业管理, 2023(8): 11-14.
- [5] 刘海年, 王艺, 柳鑫, 等. 以需求为牵引的航空发动机正向设计方法研究及应用[J]. 军民两用技术与产品, 2022, (11): 41-47.