

商用航空发动机飞行台飞行试验构型管理研究

Configuration Management Study of Commercial Aero Engine Flight Test

■ 张艳丽 宋云峰 陶金 尹春冬 赵晨 李健 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

飞行台飞行试验是商用航空发动机研制最重要的试验和测试手段之一，具有风险性高的特点，通过科学合理地运用构型管理，可以确保试验测试结果的准确性和可靠性，从而推动我国商用航空发动机在适航取证的道路上大步向前迈进。

飞行试验是商用航空发动机取证及型号合格审定的必经阶段，是发动机研制初期方案对比、确定选型，以及研制过程中故障排除、效果验证最直接的手段。但是，处于飞行试验阶段的发动机，由于技术状态尚未完全固化、技术成熟度不高、关键系统和关键技术都需要进一步验证和优化，使得故障率仍处于较高水平。因此，发动机飞行试验具有较高的风险性。飞行台飞行试验是整个飞行试验的第一阶段，其基本任务是对发动机进行飞行调整，目的是尽早暴露问题和获取测试数据^[1]。目前，国内商用航空发动机

飞行台飞行试验没有成熟的经验可以遵循，也没有现成的体系可以应用，需要运用现代系统工程的科学创新驱动战略进行策划和管理。构型管理贯穿于设计、制造、试验、试飞直至客户服务的全生命周期，是商用航空发动机研制成功的重要保证，也为其配置、改型和发展延续奠定了基础^[2]。有效地、科学地应用系统工程的构型管理理论和方法管理发动机飞行台飞行试验构型，厘清构型差异并最终支撑取证工作势在必行。

构型工作策划

开展商用航空发动机飞行台飞行试

验需要进行缜密的构型工作策划，根据工作分解逻辑，需要重点梳理如下几个维度的内容，构型工作架构如图1所示。

首先，应根据项目发布的试验管理和保障手册或相关文件为指导，规划总的工作机制原则并明确支撑飞行台飞行试验构型管理人员的配置。再进一步细化分工，明确试验支撑人员具体的工作方向、工作界面、信息交互以及协同方式。在此基础上制定支撑工作运行机制，为试验构型工作的开展提供人力资源的保障。

其次，飞行台飞行试验由于其

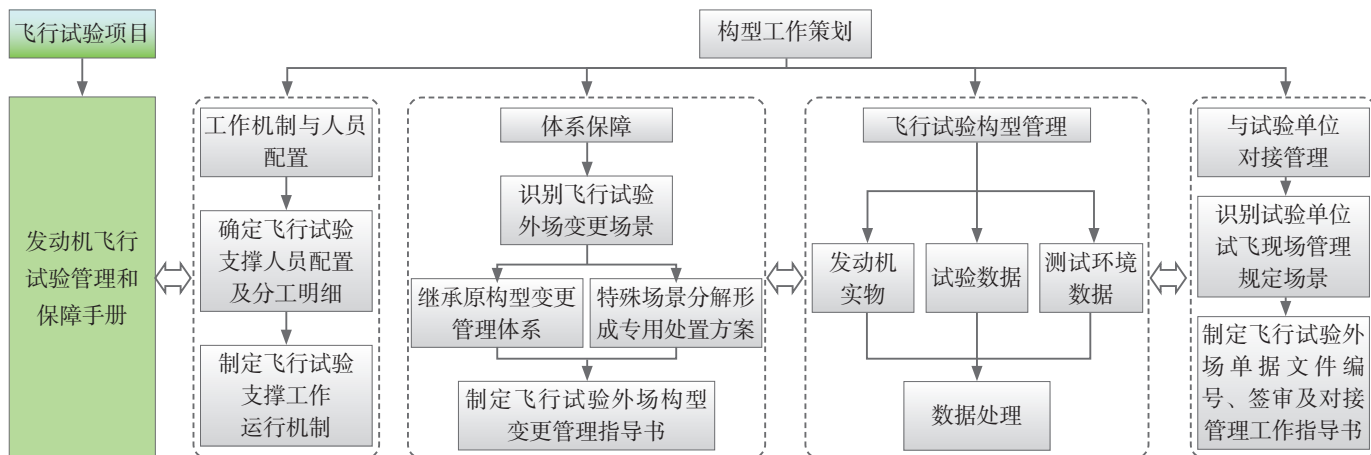


图1 飞行台飞行试验构型工作架构

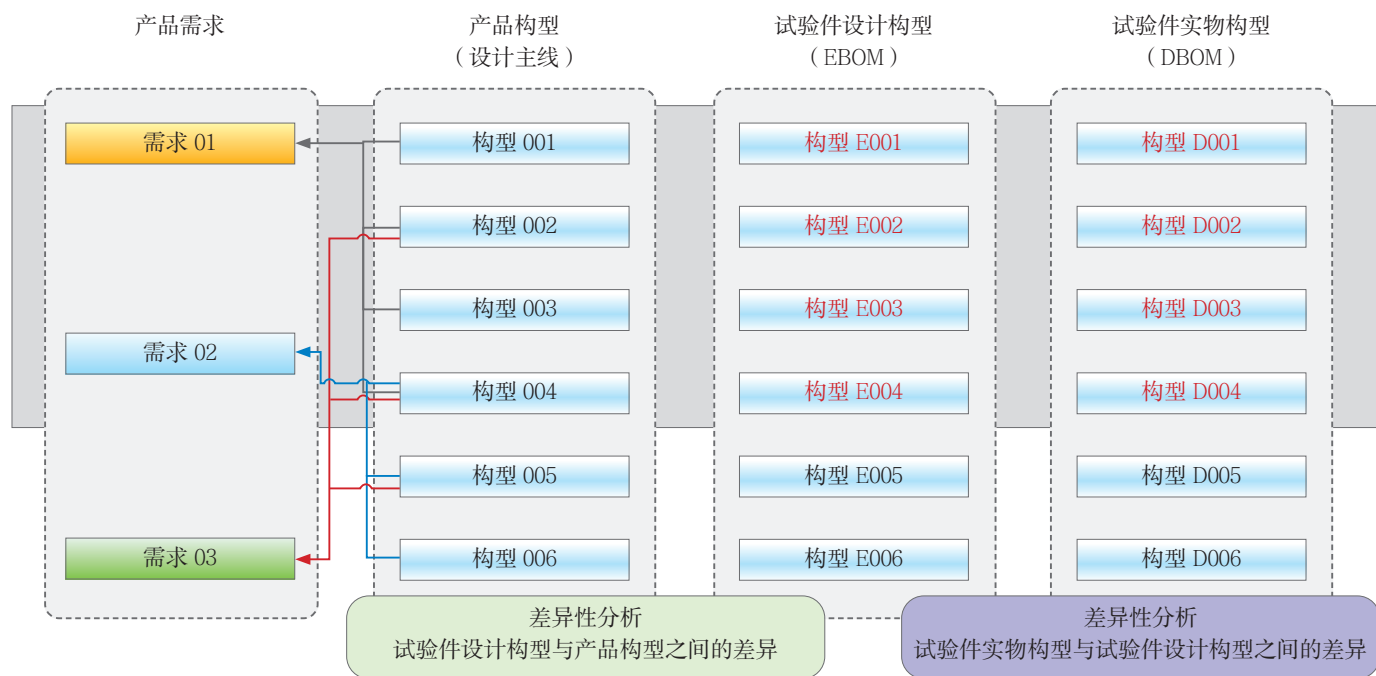


图2 试验发动机构型状态

特殊性，需要审视体系支撑的完整性以及覆盖的包容性，充分识别试验外场变更的场景。对目前流程体系中已经包含的场景，检查其使用范围是否涵盖飞行试验外场场景；对目前流程体系中包含不全的场景进行补充，新增的场景进行体系的完善。

再次，试验过程中发动机的构型会因为不同的试验目的或者测试改装等原因产生变更，飞行台的测试环境也不会一成不变，不同试验科目产生的试验数据与发动机构型和测试环境密切相关。三者的数据管理必须当成一个集成的复杂系统并建立“基线”，即建立对比或更改的基础，不能孤立地单项处理。对应不同发动机构型和测试环境下获取的试验数据应建立“快照”，清楚描述不同试验数据与发动机构型和测试环境的对应关系，以便支撑后续数据的有效性、关联性和对比分析工作。

除此之外，在试验构型工作策划中还应该考虑与试验单位的接口管理。飞行台飞行试验的现场管理区别于发动机露天台试验和高空台试验，具有其特殊性和保密性。所以在策划工作中要充分考虑现场管理的对接场景，梳理对接盲点对于保障试飞工作非常必要。针对试验制定外场文件和对接管理工作指导书，为后续试验的开展提供体系保障。

试验前构型状态确认

对于航空发动机研制而言，由于设计、制造、试验过程中的各种复杂因素，构型管理的一致性要求存在逐步贯彻的过程，构型信息之间会存在差异。以图2为例，产品构型与试验件设计构型、试验件实物构型存在客观的构型差异，由于从产品构型到试验件的设计开发需要跨越一个较长的时间维度，这期间存在试验件设计构型的演变，以及整机

核心机或零组件在需求验证过程中的产品构型设计迭代以及修正，在此过程中，试验件设计构型的长周期零组件已经开模、加工或试制，导致试验件设计构型与产品构型之间存在差异^[3]。在产品研制阶段的试验中，试验发动机的设计构型与产品构型（设计主线）之间的差异分析和评估工作在决策选取试验台份时已完成。本文关注的试验件实物构型与试验件设计构型差异，需从物料清单（BOM）视图的角度，充分利用信息化的手段，应用试验件的工程BOM（EBOM）和实物交付BOM（DBOM）辅助分析发动机在交付给试验方之前的构型状态，梳理试验发动机的实物构型和设计构型之间的差异，可以为试验后总结提供数据支撑。

构型管理实施

飞行台飞行试验根据发动机挂装飞

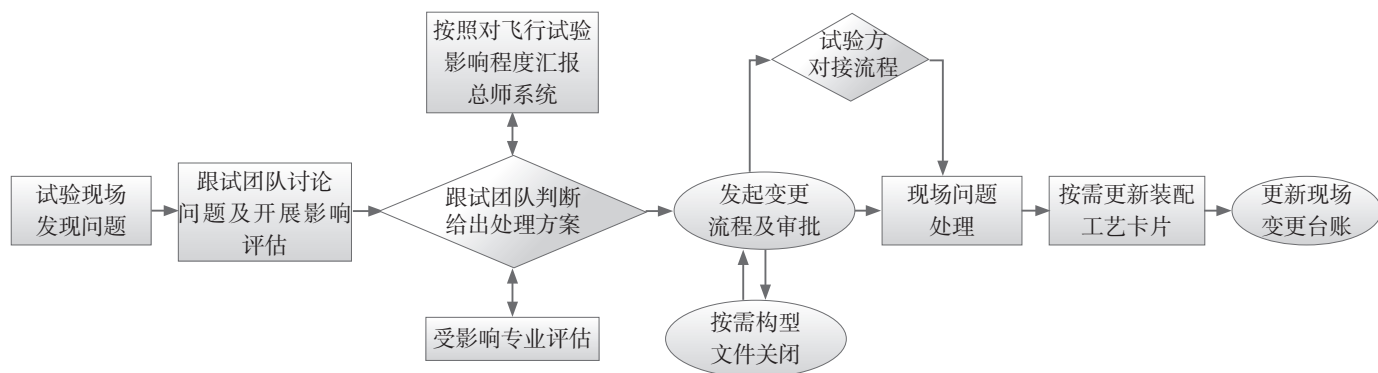


图3 飞行试验现场发动机问题处置流程

行台以及飞发联合调试的需求，在发动机交付试验方后，仍然会对发动机适配飞行台进行具体的适配改装和测试调试，这就导致发动机的构型不是一成不变的。在试验过程中，不同的试验科目对应的实物构型也可能存在差异。梳理和分析构型差异，是支撑试验结论分析的基础，也是适航取证的要求。

构型变更管理

基于目前国内商用航空发动机飞行台飞行试验验证的资源限制和试验的重要性及意义，发动机主机厂均配备了专业性强、技能全面的跟试队伍。针对试验现场的构型变更，在试验现场开展发现问题、讨论问题、影响评估、给出方案、发

起流程、审批流程、问题处理、更新工艺和更新台账的处理流程（见图3）。构型跟试主管从现场发现问题环节介入，从源头明确问题定位和背景，由于受到试验安全、资源调度和试验窗口等因素影响，在处理方案选择上会不同于普通试验任务中问题的处置，为变更方式的选择提供了多种思路，构型代表需要深度介入影响评估以及处置方案的选择，结合目前构型管理体系中对于构型变更的处置机制，监督变更流程的发起和审批，确保问题描述清晰和流程正确。现场变更台账，是目前国内军机飞行台飞行试验中记录变更采用的方式，构型跟试主管对现场变更台账的管理，有利于

全面详实记录试验过程中的全部变更，为后续构型差异分析、试验数据处理以及与试验方的接口管理奠定基础。

构型差异分析

对于管理体系完备、流程完善的构型变更管理机制，通用的变更梳理方法是对产生变更的构型单据进行统计和追溯，并逐条进行构型差异分析，最后综合汇总差异分析结论。如表1所示，在统计周期内风扇增压级对比试验交付构型产生一个技术通知单，涉及一个零件，经确认该技术通知单为落实测试改装要求对实物构型无改变，不影响飞行安全以及试验验证结果。其他部件系统的分析依此类推，最后汇总

表1 试验发动机构型差异分析矩阵

部件或系统	I类工程更改数量	II类工程更改数量	技术通知单数量	偏离单数量	超差单数量	代料单数量	涉及零件数量	构型差异分析
风扇增压级	0	0	1	0	0	0	1	落实测试改装要求，不影响飞行安全以及试验验证结果
燃烧室	0	0	1	0	0	0	1	协调任务，不影响飞行安全以及试验验证结果
高压涡轮	0	0	0	0	0	1	2	同类材料不同标准代料，对比标准差异判断，不影响飞行安全以及试验验证结果
...

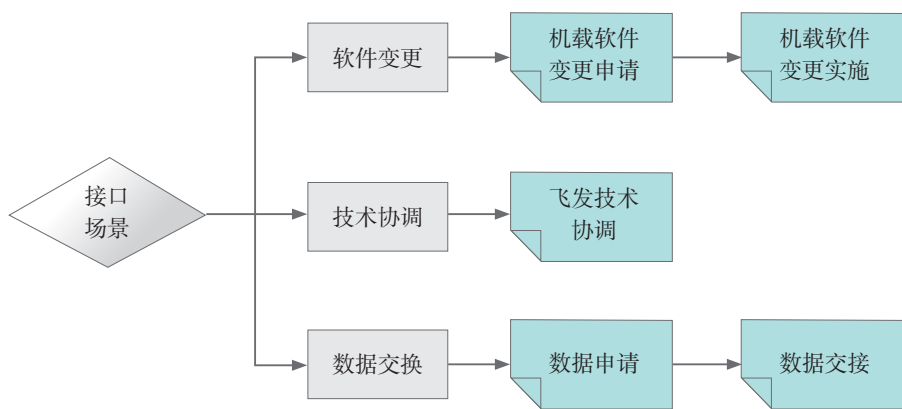


图4 发动机飞行台飞行试验典型接口单据使用场景

形成发动机整机的相对构型差异，并评估综合影响。

根据中国民用航空局相关程序条款要求，用于需求符合性验证的试验件与产品之间允许存在构型差异，型号合格证的申请人在提交符合性报告时，要包括试验产品的构型及偏离、制造符合性检查及试验产品构型偏离的影响评估等^[4]。

飞行台飞行试验现场构型变更管理是在发动机交付构型的基础上开展工作，工作的起点是发动机交付试验方。根据表1构型差异分析矩阵，针对每个试验科目按照部件系统进行构型差异梳理和分析。之后综合评估所有部件系统的差异影响，并考虑多个部件系统差异的叠加耦合影响，给出综合影响评估结论。以此建立不同试验科目和发动机实物构型的关联，完成每个试验科目所对应的实物构型与试验交付构型的差异以及影响分析，为试验数据的获取和分析提供构型保障。

试验数据与试验设备的管理

试验设备的构型是产生试验数据的保障，对适航取证有着非常大的影响。发动机飞行台飞行试验，由于承载试验的设备是飞机，因此

涉及的接口复杂。相比于高空台和露天台试验管理难度更大，需要在试验策划的早期对飞行台的试验设备信息进行收集和整理，在试验过程中通过接口管理飞行台的变更，掌握飞行台的状态。建立试验科目、发动机实物构型、试验数据和飞行台试验设备四者之间的关联，对试验数据分析意义重大，为后续推导试验结论奠定基础。

与试验方接口单据的构型管理

发动机飞行台飞行试验的开展，需要发动机设计方与试验方紧密配合。发动机交付试验方后，涉及发动机构型变更的典型场景有发动机机载软件的变更，软件变更会影响发动机的控制策略，进而影响飞发控制接口，因此，必须要在变更前充分验证从而把对试验乃至飞行安全的影响降到最小。发动机机载软件变更必须向试验方提出变更申请，得到试验方同意后，双方配合开展软件变更机上实施。除发动机机载软件变更之外，飞发协调中还存在大量的技术沟通与协调，技术协调将涉及发动机构型或飞行台构型的调整，从而影响试验数据结果，需要针对性地开展构型管理工作。典

型接口单据使用场景包括但不限于软件变更、技术协调和数据交换，如图4所示。

结束语

飞行台飞行试验是集科学性、实践性、风险性于一体，投资巨大、技术复杂的系统工程，在国防和经济建设中具有举足轻重的作用，世界上所有的航空强国无不重视飞行试验的发展^[5]。我国商用航空发动机的自主研制工作起步晚，对于飞行台飞行试验的认知和管理经验不足。随着发动机详细设计和飞行试验验证工作的推进，积极探索和沉淀构型管理在已经开展的商用航空发动机飞行台飞行试验中取得的经验，对于后续新阶段试验的开展具有重要的借鉴和参考意义。

航空动力

（张艳丽，中国航发商用航空发动机有限责任公司，工程师，主要从事商用航空发动机的构型管理工作）

参考文献

- [1] 丁凯峰, 屈霖云, 马明明. 航空发动机飞行试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2022:3-17.
- [2] 孙楠, 贺璐. 民用飞机供应商构型管理体系审核 [J]. 民用飞机设计与研究, 2014 (4): 83-86.
- [3] 张成武, 郝朝杰. 民用航空发动机构型差异管理分析 [J]. 航空发动机, 2022, 46(4): 8-13.
- [4] 中国民用航空局. 型号合格审定程序 [EB/OL]. [2023-12-06]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202312/t20231223_222437.html.
- [5] 周自全. 飞行试验工程 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2022:11.