

基于系统工程的压气机调节机构精益研发

Lean Research and Development of Compressor Adjusting Mechanism Based on Systems Engineering

■ 张学宝 张一彬 孙登科 陈维苇 李子为 张少平 / 中国航发涡轮院

基于系统工程方法和精益思维，以需求为牵引对发动机的压气机静叶调节机构进行改进研发，提高了产品精度和可靠性，将该方法固化至流程中可支撑研发体系的建设。

通过压气机调节机构调节静子叶片的工作角度，是保证压气机在各种飞行工况下稳定工作的有效措施。但由于调节机构零件数量多，传动链长，配合关系复杂，工作环境恶劣，使得可调叶片实际工作角度与设计预期存在一定偏差。若压气机调节机构在工作过程中失效或调节精度不足，可能导致失速、喘振，使发动机性能迅速恶化，甚至造成发动机损坏，严重影响飞行安全。创新团队通过分析压气机调节机构的传统研发模式，发现研发活动仅包含“设计—制造—集成验证”环节，缺少系统的需求分析和验证策划。因此，创新团队运用系统工程方法（见图1），对发动机压气机调节机构的研发活动进行了全流程梳理，从需求出发开展了设计及验证。同时，对各研发子环节进行精益改进，突破了研发过程中的关键技术。最终，打通了调节机构正向研发全流程，提高了调节机构可靠性和设计成熟度。

基于系统工程的精益研发方案

创新团队以需求为牵引，从需求分析、设计仿真、制造协同、分级验

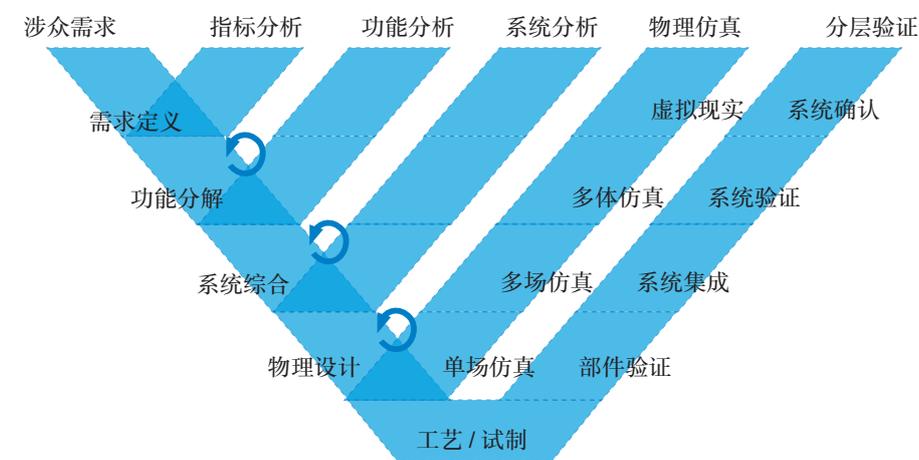


图1 系统工程方法示意

证多个方面进行研发梳理，对各子环节进行精益改善，最终完成了流程重构。具体内容包括：基于顶层需求和使用场景完成调节机构需求收集、捕获和分解；针对需求进行关键因素分析，找出影响调节机构精度及可靠性的关键环节、技术难点、解决途径和验证手段；针对梳理出的关键因素，分析研制流程，填补现有研制流程中的缺失环节，突破相关设计仿真、装配检验和分级验证技术；对研发过程进行提炼、梳理与重构，建立基于系统工程的压气机静子叶片调节机构研发流程。调节机构改进及验证总体方案如图2所示。

需求分析

创新团队对压气机调节机构开展了基于使用场景的需求分析，由原先的强度需求拓展出刚度和精度等需求，再向纵深拓展出间隙、阻力等需求。具体包括基于场景进行需求分析的思路，系统地梳理功能、性能、强度、工艺、“六性”等方面的需求；按照功能逐层分析分解的原则，对梳理出的需求进行逐级分解；需求识别和分解完成后，采用卡诺分析方法，将所有的需求进行分析和综合，确定了改进工作的基本方向。

基于需求分析结果，创新团队针对压气机调节机构研制需求及研发过程中暴露的问题，将需求沿技

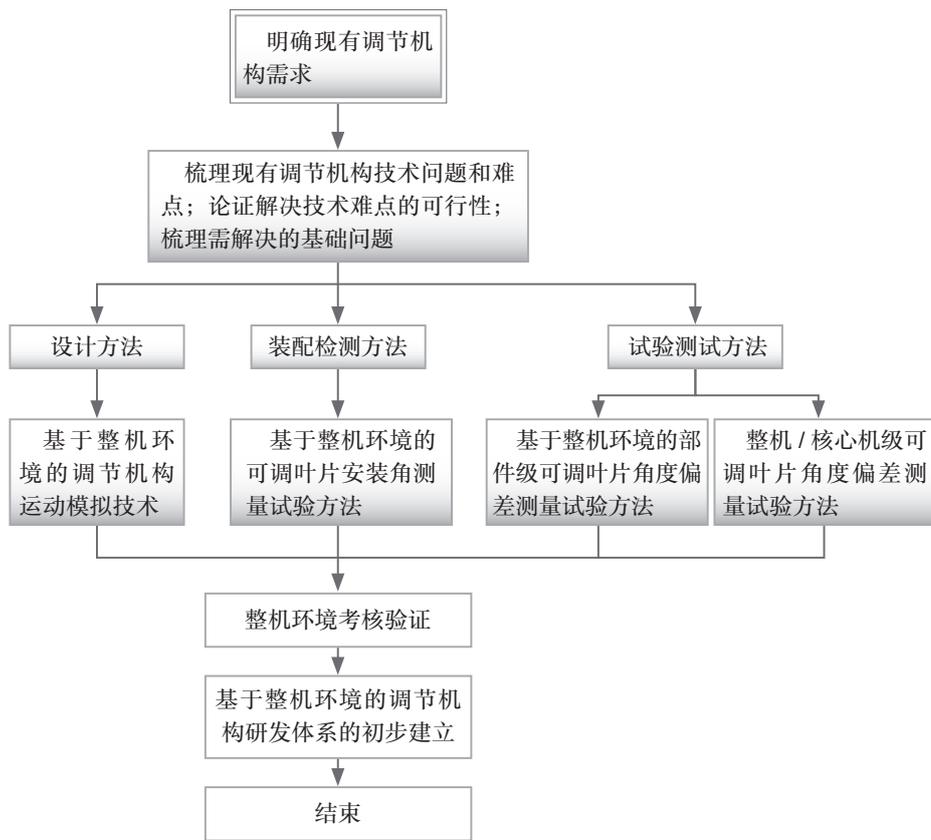


图2 调节机构改进及验证总体方案

术路径转化为功能要求、技术要求和结构要求。经评估，共识别出3项关键技术要素，分别是调节机构强度、刚度和间隙。同时，初步给出对应技术要素的设计标准，以便进行迭代设计，如图3所示。

设计仿真

针对识别出的强度、刚度、间隙等关键技术要素和初步设计标准，创新团队对调节机构全传动链的零件进行了改进设计。首先，更换主承力件的材料及优化结构，增强刚性，改进包含的零件，改进前后对比如图4所示；其次，对运动副间隙进行优化，降低空程；最后，系统开展变形分析，避免运动干涉，降低运动负载等。

为初步验证改进设计的有效性，降低后续实物验证的成本和风险，创新团队基于需求分析得到仿真边界，通过二次开发软件，完成了“固”“力”“热”3场耦合的机构整体多体动力学仿真，获得了集成环境温度、材料弹性模量、气动力、运动副间隙等多种因素下的调节机构仿真结果。该仿真结果较传统的机构运动学仿真和单体有限元仿真，更准确地模拟了调节机构的真实工作环境，整体仿真精度提升约60%，提高了设计精度和迭代效率。

厂所协同

在试制环节，创新团队与工艺人员开展点对点联系，并基于面向制造的设计（DFM）思想，深入开展设计与制造的协同工作。改变了在传统模式下设计仅关注功能、性能，工艺仅关注产品合格率的现象。设计充分考虑产品的可制造性和装配

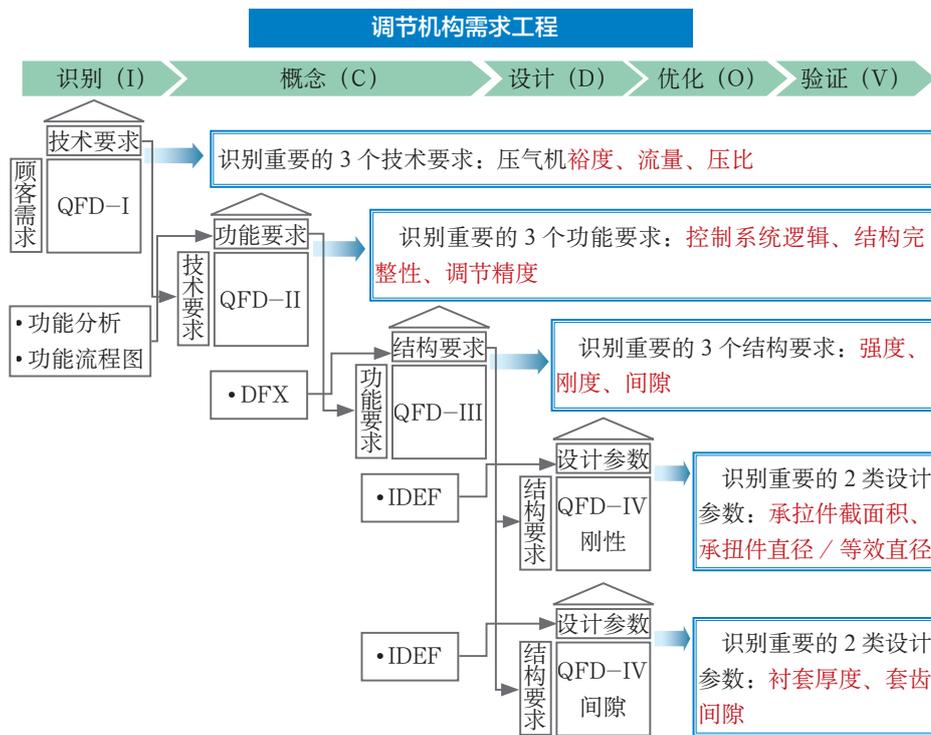


图3 关键技术要素分析过程示意

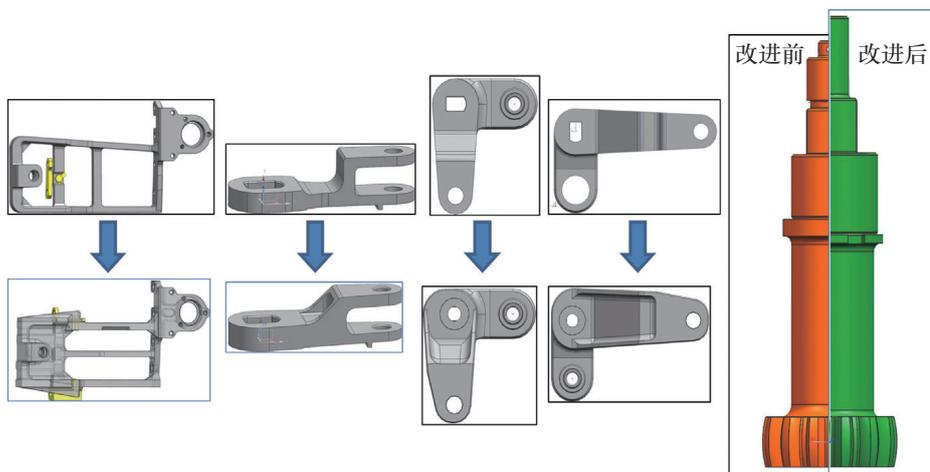


图4 调节机构结构改进示意

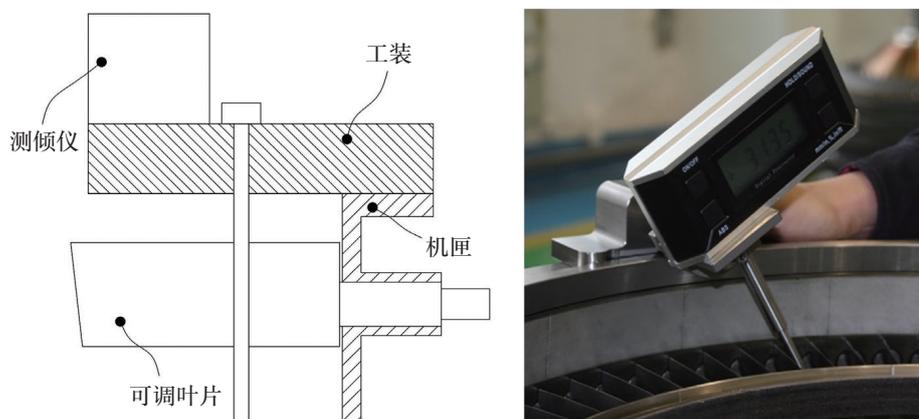


图5 基于倾角仪的叶片安装角测量方案示意

性，工艺关注设计需求及使用场景，共同确保设计、制造和装配一次成功。

创新团队通过设计过程与制造过程分阶段、并行开展，同时按照首件包和“四新”（新结构、新材料、新工艺、新供方）验证管理办法等管控研制过程，实现了设计、制造和装配的协同及过程质量管控。通过以上改善，设计和制造周期可缩短约30%，实现了更改单、超差单数量“双归零”，确保了试制一次做对。

分级验证

创新团队以需求为牵引，进行压气

机调节机构分级验证策划，从零组件级—部件级—核心机级—整机级的自底向上验证思路开展验证工作。通过逐级验证需求和计划、实施、检查、行动（PDCA），提高验证效率，降低了系统研制风险。

调节机构叶片角度测量验证

为了验证结构初始状态下的精度需求符合性，降低基准偏差对集成验证的影响，创新团队自主设计了基于倾角仪的叶片安装角测量装置，如图5所示，实现了部件状态叶片角度的快速量化和控制，为设计制造迭代提供了数据支撑，大大降低了研发成本。

调节机构零部件验证

为了能够在部件状态下获取调节机构的刚度和间隙对精度的影响，创新团队开发并首次完成了调节机构刚度试验，成功捕获了影响机构精度的薄弱环节，验证了需求分析的合理性，同时也验证了改进设计的需求符合性。

此外，研发团队还举一反三，在刚度试验方案基础上，开发出调节机构间隙、阻力和摩擦系数等测试方法，为支持调节机构改进提供了重要支撑。

调节机构集成验证

为进一步验证调节机构在真实工作环境下的工作能力，创新团队按系统工程逐级验证思路，开展了核心机平台叶片工作角度测量技术开发，以进一步提高验证效率，降低验证风险。

通过在核心机试验中，测量可调叶片角度，实现了试验状态下的叶片角度实时测量和记录。在获取了可调叶片真实工作角度的同时，还额外捕获了调节机构精度影响因素，如作动筒支架刚性、套齿间隙等影响较大的因素，增加了需求捕获的完整性，为调节机构改进迭代提供了强力支撑，如图6所示。

核心机验证完成后，随整机进行了长时间试验验证，试验结果表明，按照系统思维精益改进后的调节机构，可满足功能、性能等需求，前期因调节机构异常导致故障的试验参数信号未再出现。

目前，改进后的压气机静叶调节机构已完成刚度试验、角度测量试验及整机验证，试验结果表明系统综合刚度符合设计预期，叶片工作角度精度明显提高，满足设计需求。

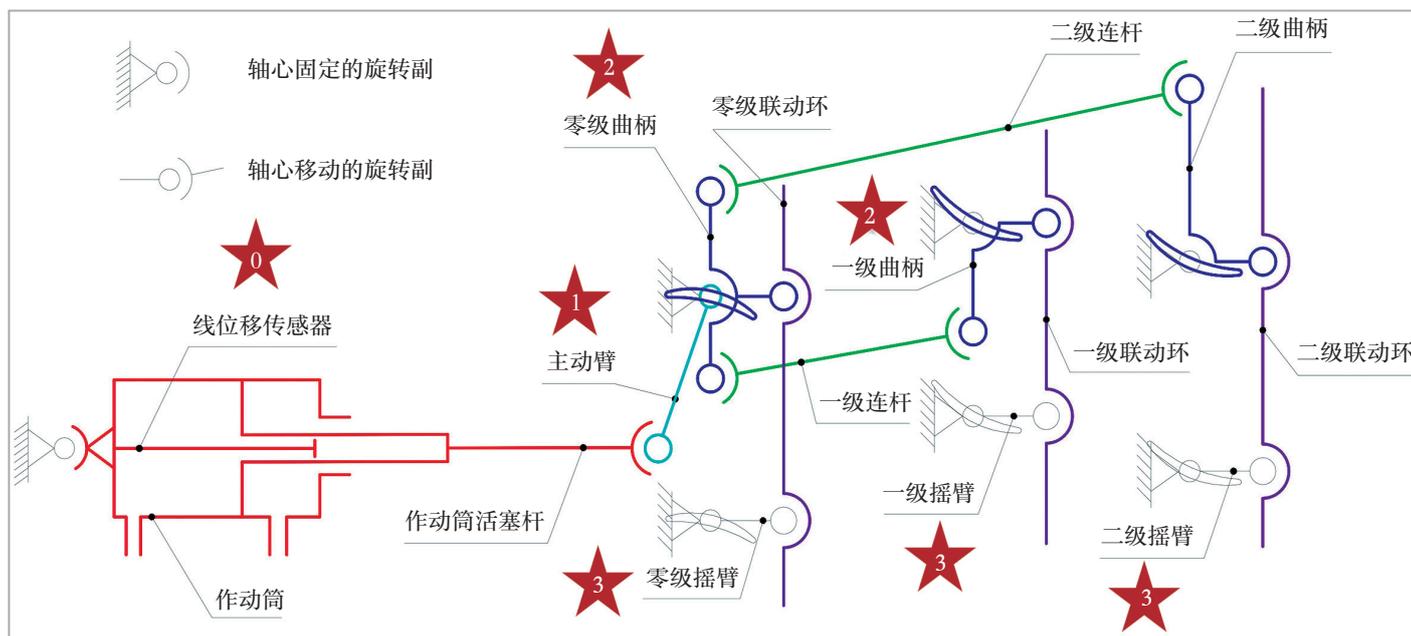


图6 压气机可调叶片角度测试示意

流程重构

研发流程是产品研究的指导地图，是项目顺利实施的保障和管控依据。创

新团队依据系统工程理论，以“正向设计驱动产品创新”为指导战略，开展研制流程分析，重构压气机静叶调

节机构研制流程。新的调节机构研发流程，以需求为导向，逐级分解需求并验证需求，贯彻PDCA和精益改进思想，较传统的研发流程补充了精度分析、动力学仿真分析、工艺控制和分级验证环节，如图7所示。

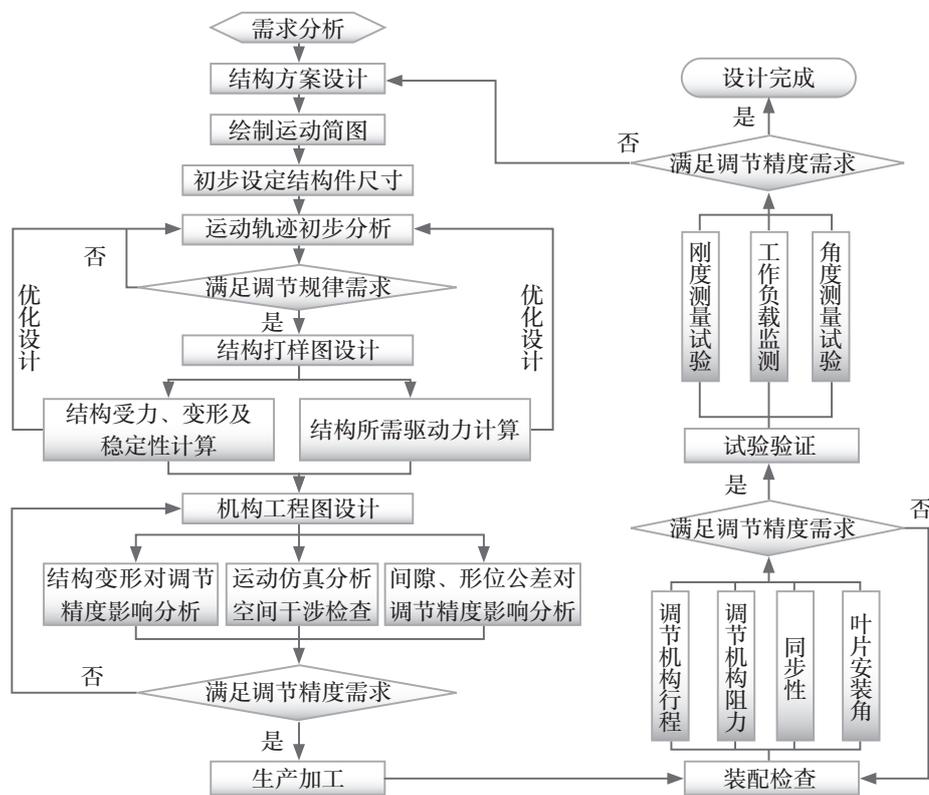


图7 调节机构研发流程

结束语

创新团队通过系统工程的方法和精益研发的思想，以压气机调节机构为研究对象，开展需求分析、设计仿真、厂所协同、分级验证等方面研究，突破了设计仿真和分级验证领域的多项关键技术，使发动机压气机调节机构精度提升了60%，并通过了发动机考核验证。同时，创新团队总结项目成果，重构调节机构研发流程，总结出了一系列设计标准、指南和规范，为研发体系建设提供了有力支撑。

航空动力

(张学宝，中国航发涡轮院，高级工程师，主要从事航空发动机压气机设计技术研究)