

航空发动机设计过程质量提升模式研究与实践

Research and Practice on Design Process of Quality Improvement Mode for Aero Engine

■ 于海涛 乔志 申万江 刘海年 / 中国航发沈阳发动机研究所

航空发动机系统结构复杂，使用环境苛刻，对产品质量要求高。设计、制造等过程质量决定了发动机产品固有的质量水平和产品的适用性，后续一切的质量活动都是为了保证产品质量的实现而开展的，其重要性不言而喻。

质量管理专家朱兰提出的“质量二八法”认为，80%的产品质量问题都可以在设计阶段进行预防和消除，设计工作起着基础性、决定性的作用，因此设计过程质量管理的重要性得到了越来越多的关注。但航空发动机设计过程相对于制造过程更为抽象，传统的设计过程质量管控模式往往于后端发力，无法实现有力的管控效果。自推行研发体系建设以来，新型航空发动机研制过程遵循新的产品开发模式，尚无成熟、可借鉴的设计过程质量管理经验；与传统的型号研制相比，新型航空发动机产品往往构型多、技术状态不断迭代、质量风险高，亟须构建一套适用于新型航空发动机产品开发特点的设计过程质量提升模式。

为了进一步提升航空发动机设计源头质量，强化设计过程质量管控，本文通过分析航空发动机产品开发特点、总结当前设计过程质量管控方法存在的不足，以问题为导向，创新提出了一种基于计划、执行、检查和处理（PDCA）循环理论的设计过程质量提升模式，并在型号设计过程中开展了应用实践，取得了预期效果，为后续航空发动机产品

设计过程质量提升提供借鉴和参考。

航空发动机产品开发特点

自推行以研发体系为核心的中国航发运营管理体系（AEOS）以来，航空发动机研制主要基于系统工程模型开展正向设计，目前很多航空发动机型号/项目包含着预先研究产品和型号研制产品的双重特点，研发周期往往比较紧张，设计难度也更大。与传统的航空发动机正式立项产品相比，有一定的相同点，也具备其特殊性。

在相同点方面：一是外部要求相同，设计过程均需要满足国军标（GJB）9001C、军方要求，以及合同监管协议等外源性要求；二是设计活动相同，整个产品实现过程中，均包含了系统分析与设计、结构开发、软件开发、成附件开发等设计活动；三是设计交付物相同，均需按照合同要求输出发动机整机、核心机以及成附件相关的设计文件、图样等；四是产品线组织阵型相同，均需按要求组建设计师系统。

在特殊性方面：一是产品构型多，技术线与产品线交叉，设计过程构型不断迭代；二是设计遵循的产品开发程序尚处于试点阶段，研

制管理经验尚不成熟，设计过程质量管理风险大，可借鉴案例少。

设计过程质量管理薄弱环节分析

当前航空发动机研制过程构建了产品质量保证（PQA）和研发域质量保证（RQA）的质量体系，深入开展了设计过程质量管理，包括产品质量策划、技术评审点（PTR）评审、质量评估和问题归零等活动。但在实际运行过程中，现有的设计过程质量管控活动存在不够细致、不够深入的情况，主要包括以下几点。

一是产品质量策划没有“腿”，策划内容主要停留在产品层级，未分层落实到具体设计层，与具体设计工作联系不紧密，质量目标缺乏支撑。

二是质量控制要点不完整，未深入专业、活动、交付件，偏重于事后改进，事前预防、事中控制不充分，缺少专业级的管控活动。

三是质量保证（QA）人员配备不足，如项目研发域设计团队共约300人，只配置1名研发QA人员，无法深入开展研发域各系统、部件、专业的质量控制。

四是质量问题归零的纠正措施

没有完全落实到设计准则、流程的规范、指导书以及检查单中，问题重复发生风险高。

模式构建总体思路

探索建立适合航空发动机产品开发模式的设计过程质量提升模式。以“技术提升+产品实现”为目标，遵循PDCA模式，在原研发体系质量管理流程基础上，采取标杆分析法，进一步诊断、识别当前设计过程质量管控模式问题。在质量策划、过程和交付件检查、质量组织及能力、质量改进等维度开展研究，形成一套有效的设计过程质量提升做法，进一步提升设计过程质量管理能力。

模式构建主要举措

质量策划

在研发体系质量管理流程中原有的产品质量策划、研发质量策划活动基础上，新增专业质量策划活动，形成产品三层质量策划体系（见图1），从而实现研发质量策划覆盖到业务最底层各专业。产品质量策划、研发质量策划和专业质量策划中质量目标层层分解和相互支撑，确保最终产品质量目标达成。

在产品质量策划方面，由产品开发团队（PDT）承接研制合同、合同监管协议、GJB 9001C等顶层质量要求，结合研制特点，策划专项质量管控活动，开展产品质量策划。在研发质量策划方面，研发领域结合本领域研制特点和要求，承接、分解产品质量策划，明确研发质量目标、质量管控活动、质量控制要求、质量改进工作，开展研发质量策划。在专业质量策划方面，各研发专业结合具体研发活动，承接、分解产

品质量策划和研发质量策划，明确专业内研发活动、交付件质量管控要求，开展专业质量策划，支撑研发质量管控、产品质量管控。

在目标管理方面，通过“成功树”方法，识别影响各层质量目标达成的成功要素，对照要素逐层分解出研发域、专业级质量目标，并与各专业流程活动关联，保证各专业均能围绕目标开展工作。

过程和交付件检查

基于系统工程霍尔模型，从产品全设计过程、研发对象全层级、研发全专业3个维度构建检查单“三全”架构，基于“有设计，有检查”的原则，多维度识别设计过程关键活

动，层层分解，形成检查单全景视图，涵盖从整机—部件系统—典型零部件的检查单全景清单，实现产品全设计过程、研发对象全层级、研发全专业所需检查单全覆盖，如图2所示。

明确检查单的完整性要求、检查项要求（研发体系要素、问题历史经验教训、通用质量特性等）、颗粒度要求，以及评审发布要求等检查单建设规则，组织产品相关的各设计专业编制过程和交付件检查单，如图3所示。

以研发阶段流程活动为牵引，构建“应用计划—型号应用—问题跟踪记录—完善检查单”的应用机制。业务人员在开展设计活动过程

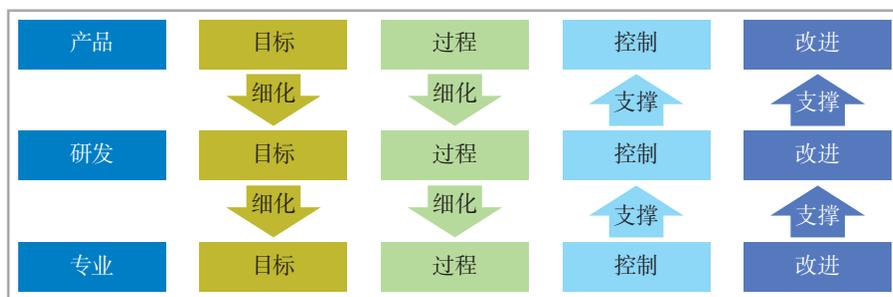


图1 3层质量策划体系



图2 过程和交付件检查单构建过程

完整性要求：
从产品设计全流程、产品分解结构（PBS）全层级、全专业维度梳理检查清单，保障清单的完整性

检查项要求：

- 型号研制的经验需提炼成检查项（从活动指导书、型号最佳实践等总结提炼）
- 前期发生故障和质量问题需提炼为检查项
- 产品设计准则形成检查项，准则尽量细化到参数取值范围
- 检查单需包含过程检查项、交付物的检查项

颗粒度要求：

- 最底层检查单对应到单一个人执行活动或任务的颗粒度
- 可根据各专业的工作实际，检查单按类别进行整合（如盘、叶片、轴）

图3 过程和交付件检查单编制要求

中全面应用检查单开展自查，实现设计过程检查单全覆盖，质量控制前移到设计端。同时构建收集—分析—处理—闭环的问题闭环管控机制，全过程跟踪和记录检查单应用效果和存在的问题，实现检查单的规范化应用和全过程闭环管控，实现基础要素的动态更新，提升检查单检查项的完整性和可操作性。

质量组织及能力建设

在原有的PQA、RQA质量组织阵型中，增设一级专业QA人员，构建PQA人员、RQA人员、专业QA

人员的分层分级质量管理阵型，如图4所示。在PDT的各个专业设置兼职专业QA人员，专业QA人员来自各专业，主要负责专业设计过程质量管控。

明确专业QA人员在质量策划、质量控制、质量评估等方面的主要职责，重点开展专业质量策划、检查单应用情况核查、流程遵从度检查等活动，明确专业管控要点，实施专业质量控制，确保设计人员按照流程规定及文件要求规范开展工作。

明确专业QA人员的任职条件，

建立部门推荐—资质审核—赋能培训—发文聘任的认证流程，确保选拔的QA人员符合任职资格条件及能力要求。建立QA能力认证知识地图，对专业QA人员进行赋能培训，确保专业QA人员具备履职能力。针对专业QA人员责权利以及兼职人员问题，建立可激活QA人员工作积极性且能保证相对独立性的激励管理机制。定期对专业QA人员履职情况进行考核，结合具体情况给予专业QA人员一定绩效倾斜、绩效补贴以及质量专项奖励，实施荣誉管理，激发QA人员积极性。

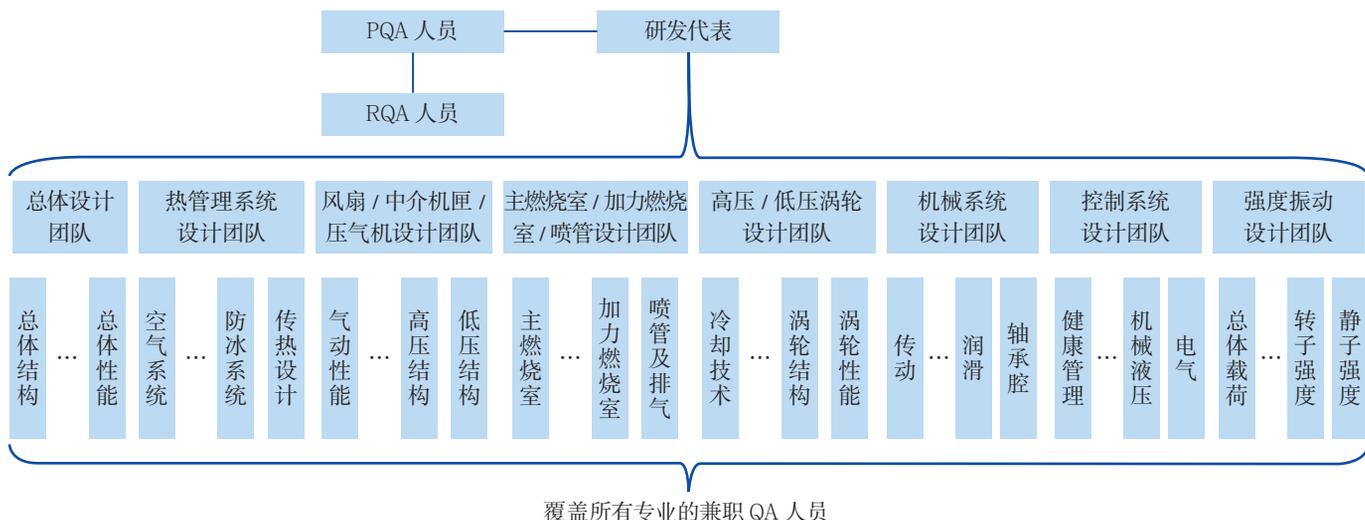
质量回溯

针对已归零故障，提炼出设计、工艺、制造、试验等方面明确的、可执行的方法、规范、流程等体系要素，沿着研发流程活动分析引入点，将体系要素导入至对应活动标准、规范、指导书和检查单中，规避问题的再次发生，如图5所示。

实施效果

总体实施效果

针对建立的设计过程质量提升



覆盖所有专业的兼职QA人员

图4 PQA、RQA、专业QA3级质量组织阵型

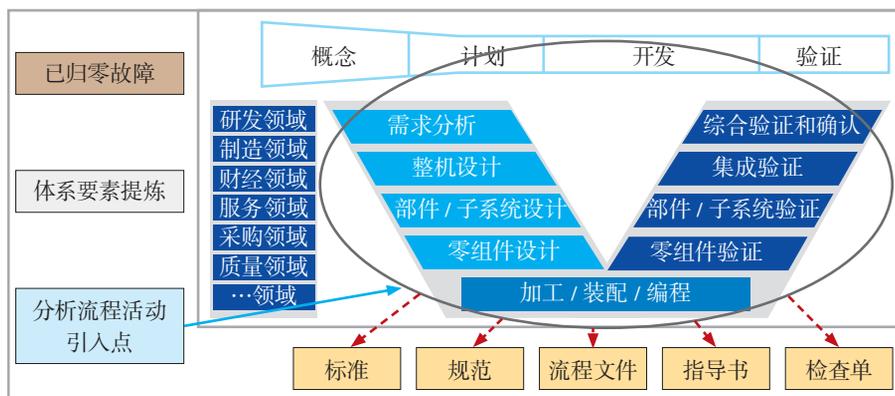


图5 质量回溯主要思路

模式，开展了试点应用，共计解决设计过程问题30余项。如压气机性能专业，通过开展专业质量策划，将型号质量目标分解至专业层，梳理本专业全流程活动并根据重要程度制定针对性管控措施，真正做到对本专业全生命周期研发活动“心里有数、有的放矢”；高压压气机一级整体叶盘设计过程中，通过应用《整体叶盘结构开发检查单》，发现零件图样中未明确“叶尖不允许有叶盆到叶背方向的纹理”的要求，避免了设计要求不全面；总体性能专业QA人员依据《需求捕获指导书（试行）》，对需求捕获活动进行流程遵从度检查，发现未充分按指导书要求，开展发动机热天包线的协调，以确定发动机热天的飞行包线，并将问题反馈至设计人员进行补充完善。通过专业质量策划、过程和交付件检查、专业QA流程遵从度检查等活动，实现了设计过程的精细化质量管控，将质量控制融入到专业流程活动中。

项目成果的深入应用，对提升交付件质量、降低试制过程风险，加快研制进度等方面也起到了重要作用。通过项目成果试点应用，大

大提升交付件质量，顺利通过了项目PTR2~4评审，评审累计提出问题共计10项，较其他型号同类型评审问题数量大幅度降低；通过PTR4阶段检查单的有效应用，详细设计图样的工艺可行性显著提升，在进行工艺会签、协调和生产准备过程中，工艺部门提出意见明显减少，提前完成了首台试制交付，交付周期提前30天。

具体实施效果

在质量策划方面，试点项目开展专业质量策划，输出专业质量计划，形成目标策划52项，过程策划192项，控制策划29项，改进策划26项。通过质量策划将专业QA人员的标准动作予以计划、落实，实现了对专业流程活动的全面管控。

在过程和交付件检查方面，项目各专业按照过程和交付件检查单应用计划开展了检查单应用，在设计过程中以及交付件完成后使用检查单开展自查，提前识别问题。共发现问题20项，其中过程类问题11项，交付件问题9项。按问题类型分类，整机/部件系统类问题4项，结构开发类问题12项，材料工艺类问题4项。共发放设计更改单数量315

份，其中订正错误类32份，产品改进类184份，方便工艺类99份，从设计前端规避设计风险，大大提升了设计质量。

在专业QA人员履职方面，专业QA人员根据专业质量策划制订的质量管控计划，定期开展流程遵从度检查，过程和交付件应用核查，确保业务人员按照流程规定和文件要求开展工作；定期开展专业质量评估，形成评估报告，对专业质量目标、研发活动、交付件等实现或开展情况进行质量评估；持续收集过程和交付件检查单存在的问题，识别并提出研制流程中存在的问题和研发体系改进建议，推动体系持续改进。型号专业QA人员累计检查流程活动154项，累计发现过程和交付件检查单应用核查问题1项，流程遵从问题10项，流程改进建议3项，收集检查单本身存在问题24项。

在质量回溯方面，各专业对已归零质量问题进行再审视，再审视问题数量31项，修订完善标准、规范、指导书、研制要求、图样等共计52份，为型号正向设计提供支撑。

结束语

设计质量决定着产品的固有质量。由于新型航空发动机产品特殊的产品开发模式，探索适用于其产品开发特点的设计过程质量管理方法尤为重要。通过分析产品设计过程特点、总结设计过程质量管控方法存在的不足，探索有效的设计过程质量提升模式，为后续航空发动机产品设计过程质量管控提供借鉴和参考。

航空动力

（于海涛，中国航发沈阳发动机研究所副所长，高级工程师，主要从事航空发动机质量管理研究）