

航空发动机评审体系建设

The Construction of Aero Engine Review System

■ 李昌红 宁怀松 / 中国航发动动力所

航空发动机研制需要开展分阶段、分层级的技术评审以识别存在的问题，把控制研制风险。开展评审体系建设有助于实现技术评审由主观到客观，由定性到定量的转变。

航空发动机研制技术异常复杂、研制周期长、投入经费高，必须加强对研制成效进行评估和控制。为解决国内航空发动机行业技术评审存在的问题，切实起到把控制研制风险的作用，本文结合发动机研制特点，针对评审体系架构、评审点、评审检查单、

评审流程开展相关研究，构建航空发动机评审体系。

评审要求分析

通过对多项研制程序、研制标准的评审点在各阶段的具体评审时机开展分析，形成了各研制阶段的评审要求，如图1所示。评审要求包括军

方组织和承研方组织两大类，军方组织的评审又分为转阶段评审和技术审查。军方要求的各类评审，在型号研制内部审查过程中须承接、落实。

评审体系架构建设

基于霍尔模型和双V模型耦合的发动机评审体系架构建设方法，充分

| 转阶段评审 | 装备研制基本程序 (2021) | 立项论证 | | 工程研制 | | | | 列装定型 | | |
|-------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------|------|--------|------|
| | | 综合论证 | 立项报批 | 方案设计 | 样机研制及性能验证试验 | 性能鉴定试验 | 状态鉴定 | 作战试验 | 定型审查 | 定型报批 |
| 转阶段评审 | 武器装备研制程序 | 论证 | | 方案 | 工程研制 | 设计定型 | 生产定型 | | | |
| | GJB 2993 | 总体技术方案评审 | | 转阶段评审 | 工艺评审 | CDR | 转阶段评审 | | | |
| | GJB 1362A | | | | | | 设计定型审查 | | 生产定型审查 | |
| | GJB 3273A | | SRR | SRR SFR PDR PDR | CDR FLTRR FTRR | | PCALIPRR FTRR | PCA | | |
| 技术审查 | MIL-3024 | | SRR SFR PDR | CDR FRR FFR | | ISR | OCR | | | |
| | DoD | ASR | SRR SFR PDR | CDR TRR | | FCA SVR PRR | OTRR | PCA | | |
| | GJB 1310A | | 设计评审 | 设计评审 | 设计评审 | 设计评审 | 设计评审 | 设计评审 | | |
| 承研方评审 | GJB 1269A | | | | 工艺评审 | 工艺评审 | 工艺评审 | | | |
| | GJB 907A | | | | 产品质量评审 | | 产品质量评审 | | | |

注：① ▲ 军方组织 ◆ 承研方组织； ② CDR—关键设计审查，SRR—系统需求审查，SFR—系统功能审查，PDR—初步设计审查，PCA—物理构型/技术状态审查，ISR—使用服役审查，ASR—备选系统审查，TRR—试验准备审查，FCA—功能构型/技术状态审查，SVR—系统验证审查，PRR—生产准备审查，OTRR—使用试验准备审查，FLTRR—首次大型试验准备审查，FTRR—定型试验准备审查，FRR—飞行准备状态审查，LIPRR—小批量试生产准备审查，OCR—工作能力许可。

图1 评审要求

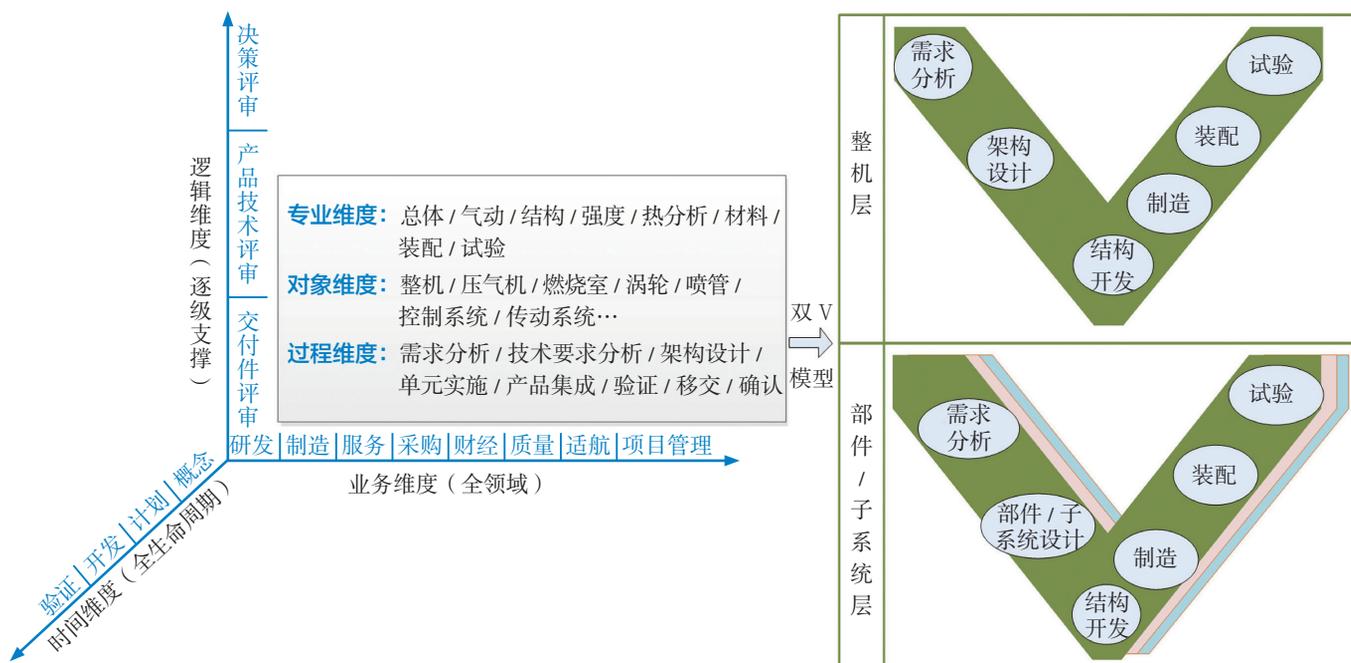


图2 评审体系架构

采用系统工程及集成产品研发 (IPD) 理念, 形成产品开发全生命周期、全领域、多层级的评审体系架构。该架构适应发动机研制技术特点, 落实正向研制管控需要, 覆盖不同类型的评审要求。霍尔模型中的全生命周期指覆盖产品开发“概念—计划—开发—验证”的研制成效评估; 全领域指拉通研发、制造、服务、采购、市场、适航、质量、构型等各领域, 确保齐头并进, 及时纠偏; 多层级指逐级支撑、分层分责。双V模型中的实体V涵盖整机、部件、零部件各实体层级, 逻辑V覆盖需求分析、架构设计、结构开发、制造、装配、试验等全过程。技术评审体系架构如图2所示。

评审体系第一层是决策评审, 是集成产品开发团队管理产品投资的重要手段, 站在投资商的角度进行评审, 决策产品是否能够进入下一个阶段, 并批准相应的投资, 形成分阶段

投资的模型。

评审体系第二层是产品技术评审, 由系统工程师主导, 各功能领域代表和专家负责评审把关。目的是提前发现问题并形成对策, 确保项目团队已经识别了所有的风险, 并在产品设计中充分考虑以满足规定的产品需求, 避免下游阶段对前期隐藏的缺陷无法纠正或者被迫耗费巨大的人力、物力和时间; 将各功能领域拉通, 对产品质量进行全面把关。主要审查交付件评审的结论, 一般不审查具体材料、技术细节, 各领域代表对领域内的问题负全责。

评审体系第三层是交付件评审, 关注具体的交付件质量, 把控技术方向和技术风险。一般情况下对重要节点的关键交付件或交付件集设置评审点, 面对研发对象的整体视角 (如综合考虑性能、结构、强度、通用质量特性等) 审视相应评审点的交付件或交付件集, 确保协调、

一致、正确。

各层级评审点设置

通过分析研究形成对象维度、时间维度、层级维度的全三维评审点逻辑支撑设置方法, 构建不同层级评审点。充分考虑各层级评审关注重点及差异, 在薄弱环节, 或对后续活动的方向、质量、进度、经费等起到重大影响的节点设置评审点, 支撑和覆盖外部评审点。设置的评审点能够满足发动机领域协同、专业协同等要求, 并与不同层级的流程活动相匹配, 有效管控重要节点的技术、进度、成本等风险, 显著提升分节点、分层把控的能力, 评审点设置情况如图3所示。

决策评审点设置

对发动机产品进行分阶段的决策评审, 以实现分阶段的投资及风险管控。根据决策评审的定位, 对评审点进行设置。

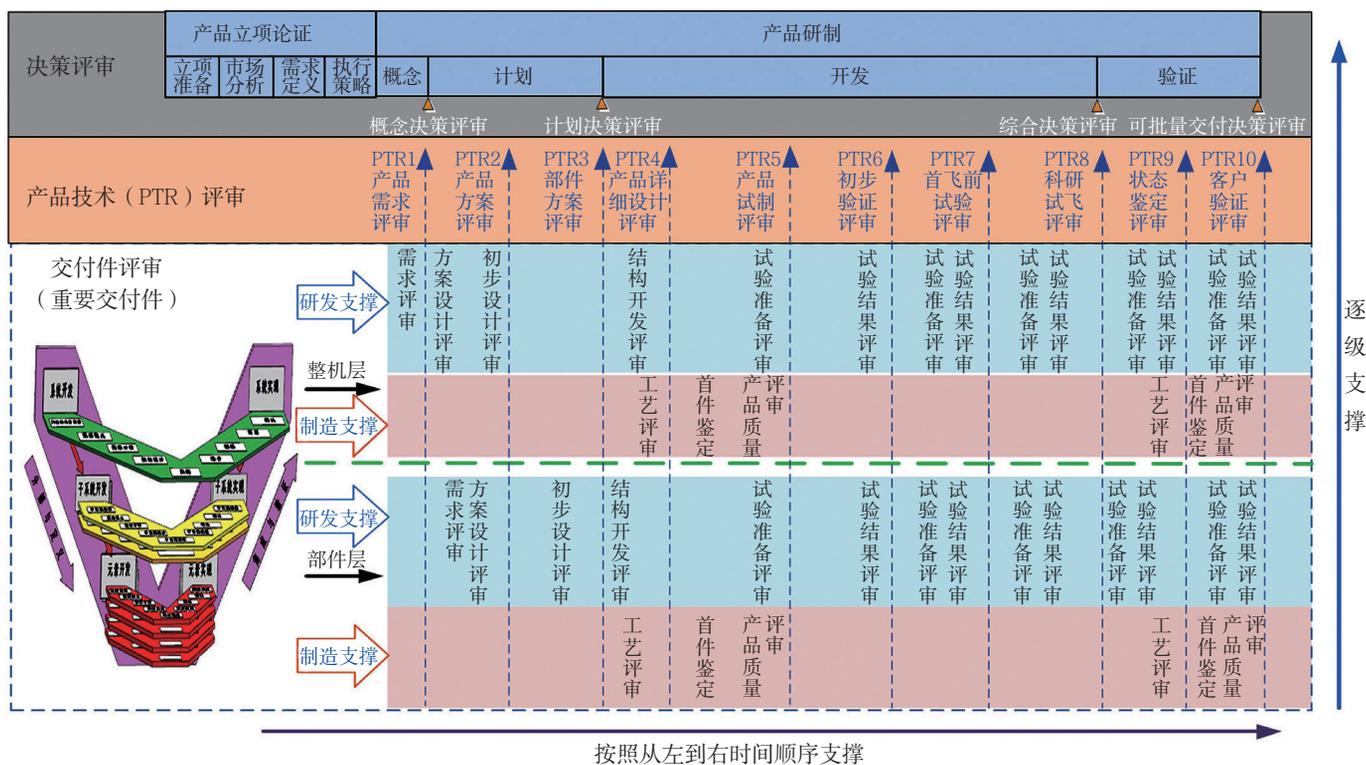


图3 评审点设置

在产品研制的概念、计划、开发、验证各阶段结束时，启动下一阶段工作前，为减少投资风险，避免不必要的资源浪费，对后续的活动进行决策，设置第一层的评审点，识别并控制产品研制风险，保障产品研制成功。

在概念阶段开展系统需求分析，提出产品初步策划，制订实现方案，为产品研制指明方向，在阶段结束时需进行决策评审，评估项目团队、识别所有的项目风险并制订改进计划，判断后续工作所需的资源投入。

在计划阶段完成产品架构设计、部件/子系统设计、工艺总方案的制订，进行成本、质量和周期的承诺，对产品研制成败起到关键作用，决定了投入和产出的费效比，在阶段结束时需进行决策评审，评估项目团队识别所有的项目风险并制订改进计划，判断后续工作所需的资源投入。

在开发阶段完成发动机产品开发和试制，进行初步功能、性能和试飞验证，阶段结束时需进行决策评审，评估产品成熟度、试验结果的符合性，判断后续鉴定工作的风险及所需的资源投入。

在验证阶段完成产品鉴定、小批量生产，在制造、服务、采购等领域完成进入产品批量生产和服务保障阶段的准备工作，在阶段结束后需进行决策评审，审视产品的成熟度、需求实现程度，判断是否具备进入后续阶段的条件。

为适应军民航空发动机其他转阶段决策评审，以及特殊情况下的决策评审要求，还可设置临时决策评审。当项目资源、重要指标、里程碑进度和研制费用等发生严重偏离时，或者客户要求、市场和竞争环境等发生了重大变化时，组织

开展临时决策评审。

产品技术评审点设置

产品技术评审是产品开发经理管控项目内部研制风险的抓手，评审点应满足产品研制的客观过程，在关键节点进行设置，实现各领域的拉通、纠偏，识别技术风险，须综合考虑对军方、典型型号飞机方要求的评审支撑等。

在研制早期，产品技术评审的首要重点是评估驱动设计开发活动的需求，从而确保技术的先进性、可行性。产品方案对后续研制起到决定性的作用，要确保顶层的设计方案满足用户需求。因而需在产品需求分析、产品方案设计完成后分别设置相应的评审点。

根据研制进展情况，后续技术评审关注分系统及以下层级的设计满足分配需求的情况，确定分配基

线，因而在完成部件方案设计后应设置相应的评审点。

在研制中期，产品技术评审关注评估产品在费用、进度和风险目标约束下的详细设计结果能够满足需求、制造的可行性，后续涉及经费及人员的大量投入，并且需评估实物符合性，用于后续的试验验证。因而需设置产品详细设计评审、产品试制结果评审。

在研制后期，产品技术评审关注实物产品与设计要求的一致性验证。具体设置的试验验证相关的评审点数量与产品研制的复杂度、工作环境等密切相关。由于航空发动机的高温、高压、高振动、结构复杂等特点，应充分开展试验验证工作，且验证工作需分层级开展，试验类别应涵盖功能、性能、强度、可靠性、寿命考核等，试验环境需由地面到高空台、再到飞行/航行验证等，逐步逼近真实工作环境。鉴于上述分析，需分步设置多个关键的试验验证评审点，如初步功能性能验证、首次大型试验前、科研试飞试验、鉴定试验、最终的客户验证等，以起到分阶段把控研制风险的作用。

交付件评审点设置

发动机评审体系第三层及以下的研制活动为领域内的活动，又可进一步细分为跨专业的协同活动和专业内的活动，原则上可针对每一个活动的交付件开展评审，也可针对一系列交付件集开展评审，用于评价交付件集的正确性以及交付件相互之间的协调性。根据领域内评审的目的和定位，以研发领域为例明确需要开展的评审点设置方法如下。

主要针对研发支撑流程，具体为系统分析和设计流程、结构开发

流程、系统集成与验证流程。研发对象包括整机、高压压气机、燃烧室、高低压涡轮、控制系统、传动系统、润滑系统等，选取重点研发活动或活动集设置相应的评审点。对于涉及多专业协同研发、技术难度较大的情况，需重点在把控各专业之间耦合关系的交付件或交付件集设置相应的评审点。交付件对后续研发活动的质量、进度等有着重大影响，与下一步研发活动的开展联系较大的交付件需设立评审点。

评审检查项建设

形成纵向基于领域协同，横向基于七问分析法的评审检查项建设方法。充分考虑使用场景，并提炼性能、结构、强度、通用质量特性等专业技术知识和型号故障经验，落实外部要求、流程要求，按照不同维度进行分类，形成完整、显性、客观、量化的检查项。针对每项评审问题，编制相应评审说明，提高可操作性。

制定检查项的具体要求：依据相应评审层级领域拉通的定位，检查项应覆盖总体情况，以及项目管理、质量、研发、制造、采购、服务、财经、市场、适航等各领域；评审检查项要体现发动机的特点，尽可能地给出相应的可执行、可参照的评审说明，帮助被审查单位进行资料准备和自查、专家对评审检查项的满足情况进行判定；不同层级评审点的检查项、颗粒度要与评审层级定位、活动相匹配，将重点关注的评审内容涵盖到评审检查项中；明确评审检查项的验收角色或专家专业，提高可操作性。评审检查项应系统、贴切地反映活动的关键要求，既无遗漏，也无冗余；应无歧义，

内容清楚、准确、相互协调；必须为封闭式的，即正常情况下回答为“是”或“否”即可。针对技术验证机、工程验证机和原型机特点，建设的评审检查项应涵盖相应的关注重点；要逐条分析相关国军标评审要求，并进行分解落实。评审检查项要根据评审点的开展顺序进行递进。

评审流程建设

研究建立适配集成产品开发流程的各层级评审流程；明确不同层级评审角色职责、关注重点、过程要求、结果管控等，规范过程、保证效果；明确检查单使用要求，牵引审查的全面性，促进正向设计要求的落实；给予专家充足的时间进行资料审查，充分利用专家经验与智慧，对发现的问题提出改进措施建议；增加评审过程定量评价，有助于评估和治理。

结束语

本文基于霍尔模型和双V模型耦合的发动机评审体系架构建设方法，提出对象维度、时间维度、层级维度的全三维评审点逻辑支撑设置方法，构建了纵向基于领域协同、横向基于七问分析法的评审检查单建设方法，建立适配集成产品开发流程的各层级评审流程，实现了“分类审查、流程规范、以审促研”。依据上述方法建立的评审体系解决了评审层级不清晰、评审点设置不完整、评审工具缺失等问题，已在多个型号项目开展全面应用，起到了有效识别项目研制风险的积极作用。

航空动力

（李昌红，中国航发动力所，高级工程师，主要从事研发体系相关工作）