

航空发动机技术审查研究

Study on Technical Review of Aero Engine

■ 卢硕 单浩昆 刘子奇 闫文辉 王桂华 / 中国航发研究院 栾旭 王艳丽 隋岩峰 邱明星 / 中国航发动力所
李敏 宋宏海 / 中国航发科技委

技术审查是研发过程的关键节点，对研发活动进行把关和控制。基于系统工程理论，结合航空发动机技术特点，研究并提出军民航空发动机技术审查框架，能实现对科研项目研制过程的有效管控，切实降低科研项目研制风险。

众所周知，航空发动机投资额度高、研制周期长、技术难度大，为避免出现“涨、拖、降”现象，实施航空发动机全生命周期管理至关重要，技术审查是一种有效的管理和控制手段。技术审查（Technical Review）是在航空发动机全生命周期中的关键节点，由技术审查团队进行一系列正式的审查，对航空发动机的研发活动进行管理和把关，确保满足预期需求，实现阶段性目标，技术方向正确与恰当，项目风险可控。航空发动机技术审查，是实施系统工程管理的重要途径，是规范研发工作的重要手段，是科学决策的重要支撑。

查点。经过多年发展和应用，装备采办项目全生命周期管理方法和工作程序逐渐完善，审查组织模式趋于成熟，技术审查在提高研制项目管理水平、促进武器装备建设发展等方面发挥了重要作用。

美国国防部发布了一系列系统工程管理工作和审查工作相关的政策性文件，美国国防部令5000.02《国防采办系统运作》明确规定，重大装备采办项目必须实施技术审查。美国海军航空司令部非常重视技术审查工作，认为技术审查是一个结构化的技术评

估过程，有严谨的组织模式和审查程序，标准化的审查方法和格式化的审查记录文件。美国海军航空系统编制了NAVAIRINST 5000.24《系统工程政策》和NAVAIRINST 4355.19《系统工程技术审查过程手册》等文件，用于指导技术审查工作；其中，《系统工程技术审查过程手册》详细规定了初步设计审查（PDR）、详细设计审查（CDR）等主要技术审查点，审查目的、开展时机、准入准则、审查策划、正式审查和退出准则等，并编制了相应的项目风险评估检查单。

技术审查研究进展分析 美国国防部技术审查经验

美国国防部非常重视对高技术武器装备研发、生产、采购、使用保障以及退役处理等全生命周期过程管控，采用基于系统管理方法，将采办过程划分为若干阶段并设置里程碑节点，实现分阶段的审查和决策。如图1所示，在2008年版采办项目的全生命周期管理框架中，明确了三个里程碑，划分了5个研制阶段，并设置了一系列技术审

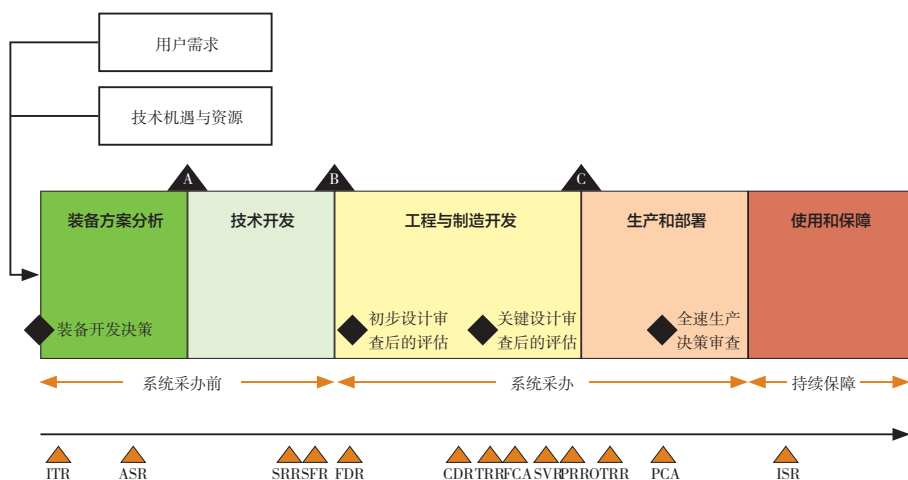


图1 美国国防部全生命周期模型示意图

罗罗公司全生命周期管理和审查

罗罗公司按照新产品导入 (NPI) 程序和全生命周期管理制度, 由专门的审查团队开展工程技术审查, 实施产品全生命周期监管。罗罗公司针对发动机项目, 制定了专门的审查规范, 根据不同阶段的研制工作, 明确相应的审查内容和需要提供的审查材料、技术文档等。罗罗公司审查工作流程清晰, 包括事先消化资料、审查会上评议、会后讨论并形成审查意见三个过程。每次审查准备时间充分, 审查组人员专业能力强, 审查结论中所提到的问题比较全面并且具有针对性和权威性, 审查专家跟踪和参与问题的后续解决。经过多年的工作积累, 形成了完整的商业评估和工程技术审查指标体系、问题库, 涵盖了各个研制阶段, 各个系统层级, 以及各个专业领域, 确保审查工作规范、科学。

GE公司的全生命周期管理和审查

NPI程序是GE公司管理研发项目、保证研发质量和进度的重要工具。将项目从发起、计划、执行和完成全过程, 细化为10个阶段门(评审点), 细化项目目标和研发活动, 以结构化方式设置评审点, 对项目提供从始至终的支撑。GE公司开展两大类审查, 包括项目审查和产品技术审查。GE公司认为项目是包含需求、计划和成本等工作范围的有机整体, 项目审查不仅关注技术, 还关注进度、风险以及可行性; 而产品技术审查关注产品的需求, 产品技术审查的结论一般作为项目审查的输入。

空客公司新产品开发流程和审查

空客公司新产品开发模型定义了全生命周期主要活动, 如图2所示。空客公司顶层里程碑覆盖了商业和技术方面, 与最高层级的项目决策

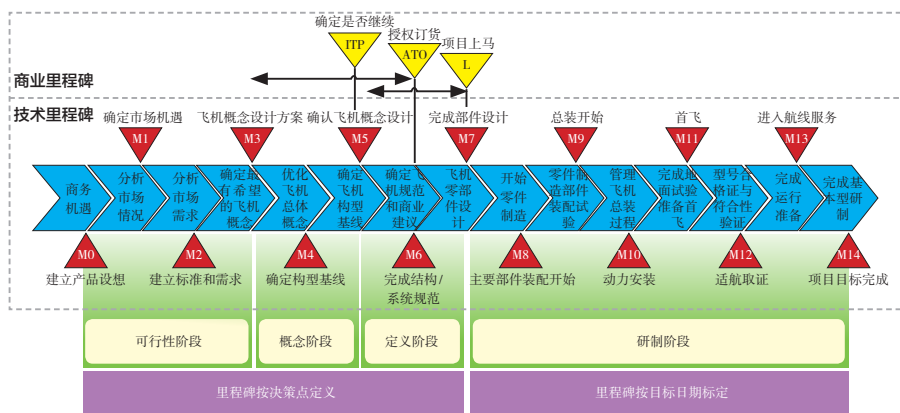


图2 空客公司新产品开发全生命周期模型

紧密关联; 设置了三个商业里程碑, 规定了关键的商务活动和工作要求; 设置了14个技术里程碑, 规定了各里程碑的主要研发活动, 明确了出口审查标准。在各个里程碑节点实施检查和评估, 规范产品全生命周期的研发活动。

我国技术审查现状分析

从美国国防部采办系统以及一些标杆企业的最佳实践来看, 在产品全生命周期关键节点开展工程技术审查, 是基于系统工程的项目管理的必然选择, 是保障研发过程顺利开展的重要手段。

我国军方吸收借鉴国外系统工程管理和审查有关文件, 在总结武器装备研制工作经验基础上, 制定了一系列武器装备研制管理制度文件和标准等, 对研发阶段和审查活动也做出了不同程度的规定。其中, GJB2993—1997《武器装备研制项目管理》、GJB1362A—2007《军工产品定型程序和要求》、GJB1310A—2004《设计评审》和GJB3273—1998《研制阶段技术审查》等, 明确了研制过程管理和技术审查的有关要求。

中国航发各单位在航空发动机

研制过程中也开展了各类审查, 例如, 可行性论证审查、方案审查、六性审查等, 并编制了相应制度。然而与标杆企业相比, 航空发动机技术审查工作还存在一定差距, 具体表现为: 第一, 航空发动机全生命周期的审查框架尚不清晰; 第二, 审查组织模式尚不成熟, 研发过程中审查策划不充分; 第三, 审查内容不完整, 技术指标或需求验证的评估不够充分, 对于经费、风险评估、技术管理等内容审查相对薄弱; 第四, 尚未建立科学、系统的审查问题清单; 第五, 审查过程不规范, 审查前对于审查资料的检查不充分, 审查后对发现问题整改情况的跟踪还需加强。

综上所述, 在航空发动机技术审查体系建设和审查方法研究过程中, 迫切需要在航空发动机全生命周期模型中, 清晰定义审查层级、类别, 明确审查点设置; 明确航空发动机研制各阶段的审查要求; 在具体审查工作中, 建立科学合理的问题清单。针对上述问题, 应以系统工程思想为指导, 深入开展研究工作, 建立航空发动机全生命周期

技术审查框架。

基于系统工程的全生命周期模型和技术审查

全生命周期通用模型和决策门

在国际系统工程学会 (INCOSE) 编写的《系统工程手册》(第4版)中,全生命周期定义为某事物(系统或制造的产品)所经历的一系列阶段。定义系统全生命周期的目的是以有序、高效的方式为全生命周期建立一个满足利益攸关者需求的框架。通过定义全生命周期阶段,采用决策门来确定阶段工作的成熟程度,控制研发活动从一个阶段进入下一个阶段。决策门(又称为控制门)又被称为里程碑或审查点,是项目周期内的审批事件,由项目经理、行政管理人员和客户在研发过程中定义并实施。决策门的批准依据是有资质的专家和所涉及的利益攸关者的审查,以符合审查准则的有力证据为基础。

系统工程过程与技术审查

按照 GJB8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》,通用的系统工程过程模型如图3所示。系统工程过程,包含技术过程和技术管理过程,是系统工程管理的核心。航空发动机全生命周期内,系统工程过程不断循环迭代。其中,技术审查(也就是研制成效评估),作为技术管理过程之一,与技术过程同步开展,用以控制和评估研制过程。

技术审查或技术审核是在研制进度中的关键时间点上评估其研制情况,度量研发进展状况和成熟程度,技术审查通过以下工作控制研发过程并降低项目的风险,主要包括:评估研制过程的成熟程度;进

一步明确设计要求;评估设计及有关过程;对照设计要求、客户需求和系统要求,检查技术状态;评定技术状态;提供讨论机会,促进所有职能机构和产品研发团队之间的沟通协调和综合等。技术审查的深度与被审查系统、分系统或技术状态项的复杂程度有关;对于复杂产品项目或应用新技术的产品项目,应进行更加深入和详细的审查。审查是一个确认的过程,正式的技术审查不是解决问题,而是为了证实问题是否已经得到解决。

综上所述,系统工程有关文件,对于全生命周期模型、研制阶段、决策和审查等做出了明确定义,结合系统工程过程,对于技术审查进行了详细阐述。上述内容,为构建航空发动机全生命周期模型奠定了理论基础,

为建立航空发动机审查架构提供了指导。因此,以系统工程理论为出发点,借鉴标杆企业工作经验,结合国内现状,研究并提出军、民用航空发动机全生命周期审查层级和类别,明确审查点设置要求,为技术审查体系建设奠定基础。

军用航空发动机审查框架

根据 GJB 8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》、GJB 3273—1998《研制阶段技术审查》和 GJB 2993—1997《武器装备研制项目管理》的要求,军用航空发动机研制过程划分为论证、方案、工程研制、设计定型、生产定型、批量生产和使用保障共7个阶段,如图4所示。研制过程的主要审查,可以分为:决策点审查、转阶段审查、专题技

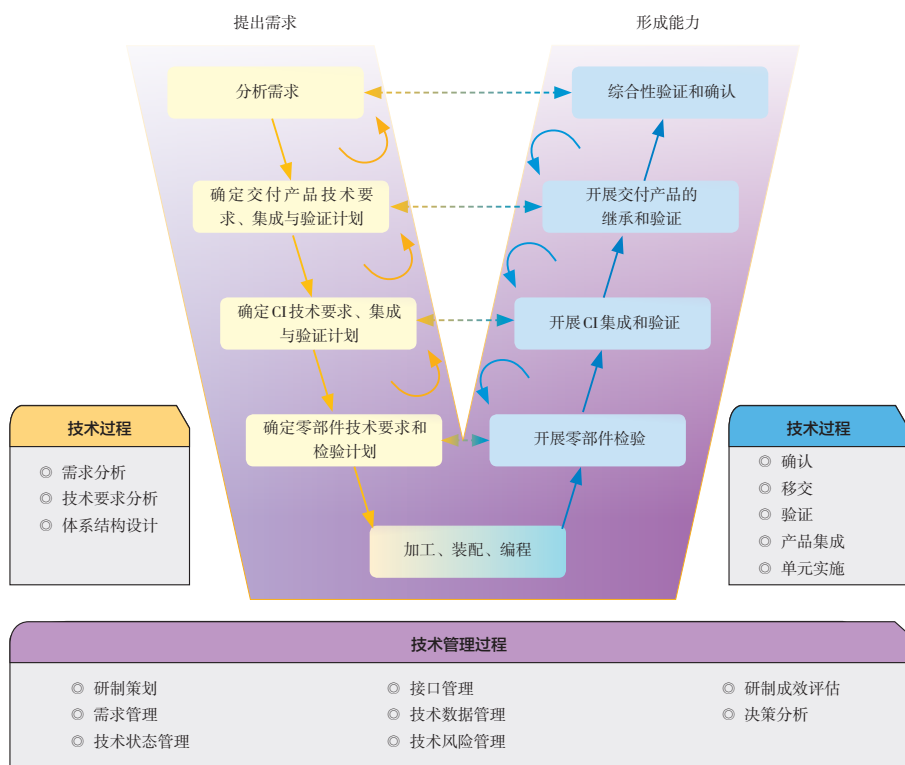


图3 系统工程过程模型(来源:GJB 8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》)

术审查和专项审查等几类审查。其中，决策点审查通常由军方或用户组织，与合同签署、重要文件审批等决策密切相关；为支撑决策点审查，集团组织开展内部转阶段审查，若获得军方许可，也可与军方合并开展审查；转阶段审查对本阶段工作情况进行综合确认和评估，回顾本阶段专题技术审查和专项审查的有关内容；专题技术审查，是在研制过程的关键节点进行评估和控制；专项审查是针对技术问题开展专门审查。决策点审查和转阶段审查主要针对产品级。而专题技术审查和专项审查，根据需要可进一步分层级开展审查。

决策点审查

决策点审查主要由用户或决策机构，根据投资和决策的需要，组织实施。决策点审查是科研项目的重要审查点。

决策点审查，是指用户或决策机构根据技术成熟度、风险控制、经济性分析等要求和评价准则，通过“批准或不批准”的决策，实施对科研项目的控制，避免不必要的浪费。

决策点审查一般设在重要研制阶段结束前，少量设置在转批次前；具有标志性的决策点，一般称为里程碑决策点。军用航空发动机研制过程中的主要决策点包括：装备研制决策，确认是否启动装备研制工作。方案论证决策，又称为里程碑A（MSA），设在论证阶段结束后，依据论证阶段审查结论，按照军方有关规定和具体要求，上报有关文件，确认是否签订合同。工程与制造研制决策，也称为里程碑B（MSB），设在方案阶段结束后，依据方案阶段审查结论，按照军方有关规定和具体要求，上报有关文件，确认是否签订合同。原型机研制决策（PDD），在实际的研制过程中，依据验证机试验和验证结果，确定是否转入原型机研制工作。设计定型试验决策，设在工程研制阶段工作完成后，依据工程研制阶段审查结论，按照军方有关规定和具体要求，上报有关文件。小批量生产决策也称为里程碑C（MSC），设在设计定型结束后，依据设计定型阶段的审查结论，按照军方有关规定和

具体要求，上报有关文件，确认是否签订合同。大批量生产决策，在生产定型阶段完成后进行，依据生产定型阶段审查结论，按照军方有关规定和具体要求，上报有关文件，确认是否签订合同。

转阶段审查

转阶段审查是为了支撑用户和集团决策，由集团从项目管理和技术管控等方面，组织开展审查。

转阶段审查是在科研项目研制过程的各阶段，为确定阶段性工作和交付物是否达到阶段目标，是否满足既定要求，开展的评估和控制活动，确认本阶段工作完成情况以及后续工作计划和安排等，判断是否可以转入下一阶段。必要时，也可针对批次工作的完成情况，开展转批次审查。

转阶段审查中，应对本阶段所包含的专题技术审查主要内容进行全面的回顾和评估，也应对专项审查的结论性内容，进行检查和评估。

专题技术审查

专题技术审查是根据系统工程管理要求，在研制过程设置的一系

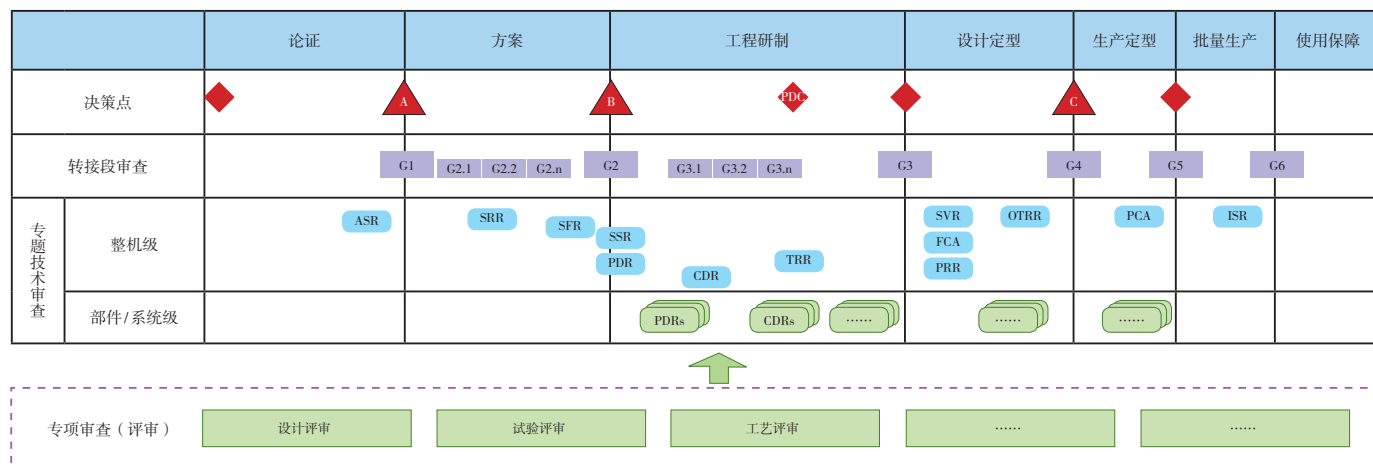


图4 军用航空发动机研制阶段和审查点示意图

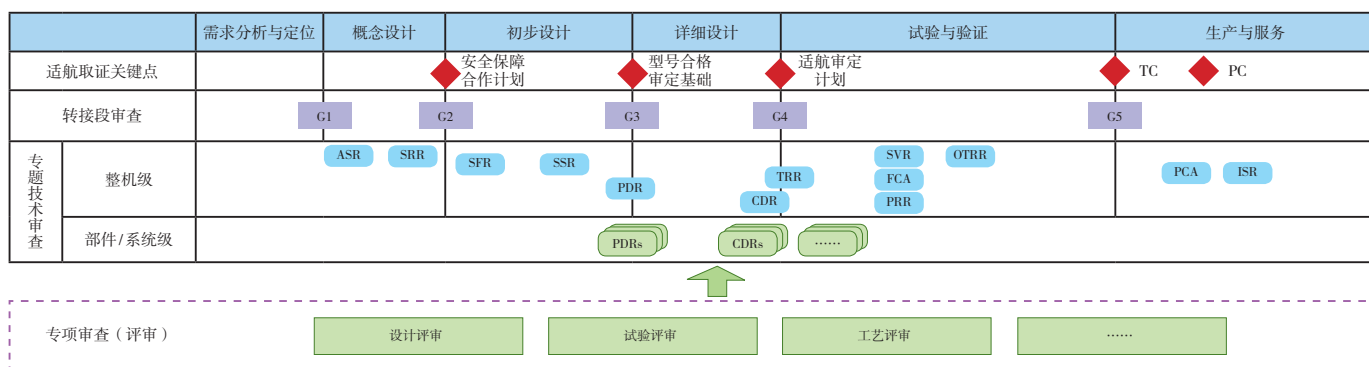


图5 民用航空发动机研制阶段和审查点示意图

列审查；其审查结论为转阶段审查和决策点审查提供支撑。

专题技术审查是在科研项目研制中的关键事件点，为控制科研项目风险，开展系统、规范的评价，评估科研项目的研制情况是否达到相应规定的要求，为后续研制工作提供建议并为决策提供支撑。

依据GJB 3273—1998《研制阶段技术审查》和GJB 8113—2013《武器装备研制系统工程通用要求》有关要求，在航空发动机研制过程中，技术审查伴随着系统工程技术过程，同步开展。

专题技术审查一般包括：备选系统审查(ASR)、系统需求审查(SRR)、系统功能审查(SFR)或系统设计审查(SDR)、初步设计审查(PDR)、软件规格说明审查(SSR)、关键设计审查(CDR)、试验准备审查(TRR)、系统验证审查(SVR)、功能构型/技术状态审核(FCA)、生产准备审查(PRR)、使用试验准备审查(OTRR)、物理构型/技术状态审核(PCA)和使用服役审查(ISR)等。

产品级技术审查可以视情安排，也可结合转段审查开展。在审查实施过程中，根据科研项目的具体特点和审查点的审查内容，可以在必

要的层级针对性地重复开展审查。

专项审查

专项审查是指科研项目研制过程中为降低风险，针对性解决某些技术问题开展的设计、试验、工艺等方面的审查。

民用航空发动机审查框架

民用航空发动机主要研制阶段包括：需求分析与定义、概念设计、初步设计、详细设计、试制与验证、生产与服务。民用航空发动机研制阶段和技术审查点如图5所示，民用航空发动机研制过程中，设置了转阶段审查、专题技术审查和专项审查等。

民用航空发动机研制的特点是适航审定部门的介入，适航法规要求的落实及在各阶段的验证审查工作。在概念设计阶段完成时，需制订安全保障合作计划，并获得适航审定部门的批准；在初步设计阶段完成时，需制定型号合格审定基础，并获得适航审定部门的批准；在详细设计阶段完成时，需制订适航审定计划，并获得适航审定部门的批准；在试制与验证阶段完成时，需获得发动机的型号合格证(TC)；在生产与服务阶段前期，需获得发动

机生产许可证(PC)。

结束语

技术审查是实施航空发动机全生命周期管理的重要手段和措施。系统工程有关文件对全生命周期管理、决策和审查进行系统地阐述，特别是结合系统工程过程，规定了一系列技术审查点，实施研发过程的把关和控制；美国国防部以及标杆企业，贯彻了系统工程理论，构建了全生命周期模型和审查体系，积累了丰富的理论和实践经验。在研究系统工程理论，分析标杆企业审查经验基础上，结合航空发动机技术特点，研究并提出了军民航空发动机技术审查框架。以此为基础，推动航空发动机技术审查体系建设，持续开展科研项目技术审查实践和应用，不断总结实践经验，改进技术审查方法和工作模式，优化审查框架和审查点设置，构建和完善审查问题清单，提升审查工作效率和把关作用，实现对科研项目研制过程的有效管控，切实降低科研项目研制风险。

航空动力

(卢硕，中国航发研究院，高级工程师，主要从事研发体系和技术审查相关工作)