

# 航空发动机系统工程策划研究

## Research on the System Engineering Plan for Aero Engine

李昌红 张德志 谈梦妮 王常亮 / 中国航发动力所

航空发动机研制是一项复杂的系统工程，合理地开展系统工程策划来统筹技术及技术管理方法应用，有助于厘清研制工作主线，提前识别并规避风险。通过在研制初期投入的系统工程相关工作，可降低后期研制故障的数量。成本超支和进度延期与型号开发活动中应用的系统工程工作量呈逆相关。

航空发动机研制具有先进性、引领性、高难度和高风险的特点，为此要积极开展系统工程工作策划，促进型号研制工作顺利开展。系统工程策划是动态变化的文件，反映出型号当前和进展中的系统工程策略以及整个技术管理工作的关系。早在型号研制的方案阶段（即技术验证机阶段）就开始系统工程策划并持续地更新，根据项目研制进展不断地改进计划的精确性和强调的重点，因此，系统工程策划是一个完善、综合的技术计划，反映项目在可接受的风险范围内达到其目标的策略。本文研究了航空发动机系统工程策划应涵盖的内容、顺序流、工作项等，为发动机后续型号顺利研制奠定基础。

### 系统工程工作内容及顺序流

按照GJB 8113《武器装备研制系统工程通用要求》，项目研制系统工程过程分为技术过程和技术管理过程，二者有机结合，按照科学的逻辑顺序开展工作，保证项目研制顺利进行。

#### 技术过程

发动机研发过程是根据产品分解结构从整机到部件/系统再到零组件的自上而下的需求分解及设计实现过程，以及由零组件到部件/系统

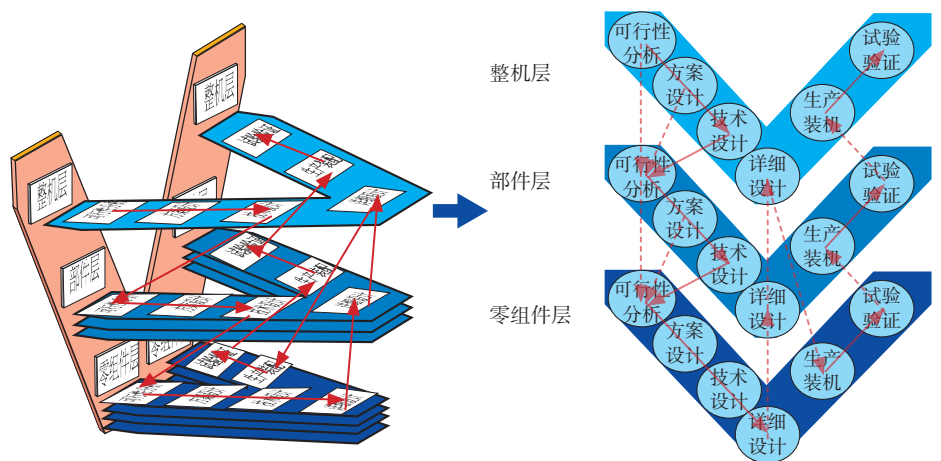


图1 航空发动机研制技术过程

再到整机的自下而上的集成验证过程，如图1所示。技术过程的实现是靠研制能力保证的，技术过程的研制活动按照技术流程开展。

#### 技术管理过程

根据GJB 8113《武器装备研制系统工程通用要求》规定，技术管理工作包括研制策划、需求管理、技术状态管理、接口管理、技术数据管理、技术风险管理、研制成效评估（技术评审）和决策分析过程。其中，研制策划是明确系统工程过程的具体活动和工作分解；需求管理是记录需求分析、分解分配和变更，进行表单管控；技术状态管理是识别技术状态项，按照国军标要求管

理基线文件，开展系统规范、研制规范和产品规范的编制工作；接口管理明确各组成单元之间的接口定义，与需求管理一同进行；技术数据管理可使用产品数据管理（PDM）系统进行管理；技术风险管理开展技术风险评估、应对和监控工作；研制成效评估是在研制过程中开展技术评审；决策分析主要是进行针对技术的决策分析，在设计过程中进行权衡优化，使之融入技术过程。

#### 工作重点分析

通过对GJB 2993《武器装备研制项目管理》的工作项和系统工程过程的分析，结合航空发动机研制特点，在明确产品分解结构（PBS）后，

确定所处研制阶段的工作分解结构 (WBS), 其中应包含设计、制造、装配、验证等各类工作。由于WBS与技术过程是契合的, 因此其包含了应开展的技术活动项。由于型号研制初期存在需求不明确且多变等问题, 首先需要进行深度的需求分析, 并持续开展需求管理。为便于对项目的基线

状态进行管控, 应结合研制阶段特点开展系统规范/研制规范/产品规范的编制工作。由于型号的先进性和引领性, 有一些关键技术需要突破, 为此需开展关键技术识别及成熟度评价。由于新研型号具有高难度、高风险的特点, 为了保证发动机产品研制质量和周期, 需要对过程的风险进行识别

和控制; 同时应通过技术评审监控技术研发质量、严格把控风险, 从而保证最终交付高质量的产品。

### 工作顺序流

发动机技术及技术管理工作按照一定的逻辑顺序开展, 互相之间具有支撑及输入输出关系, 如图2所示, 详细说明见表1。

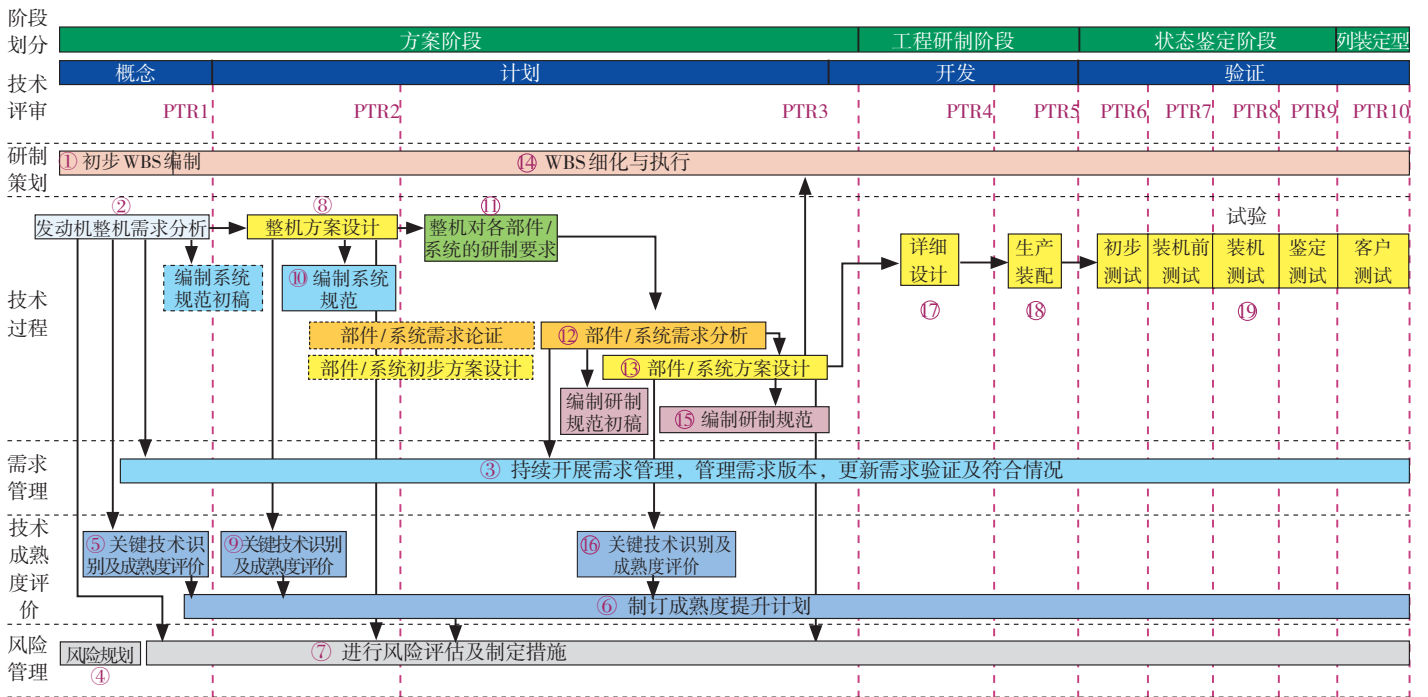


图2 航空发动机技术及技术管理工作流图

表1 航空发动机技术及技术管理工作流说明

序号	活动名称	含义	输入	输出
①	初步WBS编制	研制初期结合立项论证的需求及标准WBS, 编制初步的WBS, 用于初步的费用和进度估算	<ul style="list-style-type: none"> <li>论证需求</li> <li>标准WBS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>初步WBS</li> </ul>
②	发动机整机需求分析	整合立项论证要求和军方、飞机方、适航要求等, 开展整机层面的需求分析工作, 为整机方案设计奠定基础	<ul style="list-style-type: none"> <li>立项论证要求</li> <li>军方要求</li> <li>飞机方要求</li> <li>适航要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>整机需求分析报告</li> </ul>
③	需求管理	需求捕获、分析并经需求评审确定后, 后续在软件平台里定期更新、维护需求, 结合项目研制进展管理需求变更, 更新需求的验证及符合情况信息, 需求管理是持续开展的工作, 涉及整机、部件及重要零部件等	<ul style="list-style-type: none"> <li>需求及其验证及追踪矩阵</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不同版本的需求及其追踪、验证、变更等信息</li> </ul>
④	风险规划	明确风险评估准则, 包括风险发生的可能性等级准则、风险后果严重性等级准则、风险接受准则、风险排序准则等, 给出风险登记册、风险分析报告、风险应对报告模板等	<ul style="list-style-type: none"> <li>立项论证报告</li> <li>GJB/Z 171《武器装备研制项目风险管理指南》</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>风险规划</li> </ul>

未完, 转下页

接上页

序号	活动名称	含义	输入	输出
⑤	关键技术识别及成熟度评价	结合立项论证、整机需求分析开展关键技术识别及成熟度评价,对成熟度不达标的关键技术制订提升计划,作为风险评估的来源之一,并落实到研制策划中	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 立项论证报告</li> <li>● 整机需求分析报告</li> <li>● 关键技术识别标准</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 关键技术清单</li> <li>● 关键技术成熟度评价结果</li> </ul>
⑥	制订成熟度提升计划	对关键技术进行成熟度评价后,对于成熟度不达标的关键技术,列入成熟度提升计划中	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 关键技术成熟度评价结果</li> <li>● 项目总体进度安排</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 成熟度提升计划</li> </ul>
⑦	进行风险评估及制定措施	按照风险规划,定期开展风险评估并制定相应措施。一般在整机需求分析、整机方案设计、部件方案设计以后,或依据更新的成熟度提升计划以及需求验证过程识别出风险项,形成的应对措施纳入WBS管控。风险识别是持续、迭代的过程	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机需求分析报告</li> <li>● 整机方案报告</li> <li>● 部件方案报告</li> <li>● 成熟度提升计划</li> <li>● 需求验证</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 风险登记册</li> </ul>
⑧	整机方案设计	依据整机需求分析结果,开展整机方案设计工作	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机需求分析报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机方案设计报告</li> </ul>
⑨	关键技术识别及成熟度评价	在整机方案设计过程中,会识别出一些新的关键技术,结合评价结果视情落实到成熟度提升计划中	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机方案设计报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 更新的关键技术清单及评价结果</li> </ul>
⑩	编制系统规范	依据整机需求分析结果,形成系统规范初稿,完成整机方案设计后,形成确定的系统规范	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机需求分析报告</li> <li>● 整机方案设计报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 系统规范</li> </ul>
⑪	整机对部件/系统提研制要求	依据整机方案设计结果,对部件/系统提出研制要求,用于部件/系统开展需求分析使用	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 整机方案设计报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各部件/系统的研制要求</li> </ul>
⑫	部件/系统需求分析	各部件/系统依据整机提出的研制要求,按相关指导文件,开展需求分析工作,为方案设计奠定基础	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各部件/系统的研制要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各部件/系统的需求分析报告</li> </ul>
⑬	部件/系统方案设计	依据部件/系统需求分析结果,开展部件/系统方案设计	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各部件/系统的需求分析报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各部件/系统的方案设计报告</li> </ul>
⑭	WBS细化与执行	参考标准WBS,依据本型号整机及部件方案设计过程中逐渐明晰的需求、PBS、成熟度提升计划、风险应对措施等,形成细化的WBS,包括设计、生产、装配、试验等方面工作	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 标准WBS</li> <li>● 整机及部件的需求及验证计划</li> <li>● PBS</li> <li>● 成熟度提升计划</li> <li>● 风险应对措施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 细化的WBS</li> </ul>
⑮	编制研制规范	依据部件/系统需求分析结果,形成研制规范初稿,完成部件/系统方案设计后,形成确定的研制规范	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 部件/系统需求分析报告</li> <li>● 部件/系统方案设计报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 研制规范</li> </ul>
⑯	关键技术识别及成熟度评价	在部件/系统方案设计过程中,会识别出一些新的关键技术,结合评价结果视情落实到成熟度提升计划中	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 部件/系统方案设计报告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 更新的关键技术清单及评价结果</li> </ul>
⑰	详细设计	开展整机及部件/系统的详细设计,准确反映研发对象的设计结果,并能够指导后续的生产、装配、试验等	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技术及方案设计报告、打样图</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 详细的图样、操作指导书和维修手册</li> </ul>
⑱	生产装配	依据详细设计输出的图样文件完成研发对象的生产或集件,经过产品检验后对研发对象进行组装	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 详细设计的图样</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 实物</li> </ul>
⑲	试验	对需求进行相关试验,并根据试验结果进行需求符合性评估,包括初步验证、综合验证、鉴定验证、客户验证等环节	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需求验证计划</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 验证结果</li> </ul>

## 系统工程工作策划

系统工程工作项主要包含技术过程及技术管理过程。技术过程靠研制单位的技术流程及研制能力保证；技术管理过程主要基于研制策划、需求管理、系统规范/研制规范/产品规范、技术成熟度评价、技术风险管理、技术评审等工作。

### 技术过程

技术过程一般分为整机层、部件层、零组件层的设计过程。而设计过程一般包括可行性分析、方案设计、技术设计、详细设计、生产装配、试验验证过程。各过程的具体研制活动由研制单位的技术储备、正向设计能力保证，与技术管理过程结合、有序进行。

### 研制策划

针对项目各阶段研制任务特点，研制策划的重点工作是根据研制需求和目标，编制不同阶段项目WBS，通过WBS的制定为科研计划、资源统筹、风险评估、接口协调、经费评估提供基础。根据各

阶段的研制需求和目标，制定发动机的WBS。依据发动机PBS、标准WBS，结合型号需求识别、分析结果，考虑新增及存在风险的需求项牵引出的工作编制WBS，应包含设计、制造、装配、验证等类型。根据以上工作内容，梳理出研制策划的工作项清单，基于PBS的WBS构建流程如图3所示。

### 需求管理

根据发动机PBS划分情况，确定需求分析对象及层级，自顶向下、逐层开展需求分析工作，应重点考虑的需求包括：立项论证报告中的技术要求、飞发协调过程中产生的新需求、前一阶段验证过程中出现的需求不符合项、方案设计迭代产生的需求、GJB 241A《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》中相关要求、适航规定中相关要求、制造/装配/使用保障等过程中产生的需求。

基于需求管理软件平台，搭建需求管理架构层级如图4所示，可实现整机、部件、零组件的需求管理工

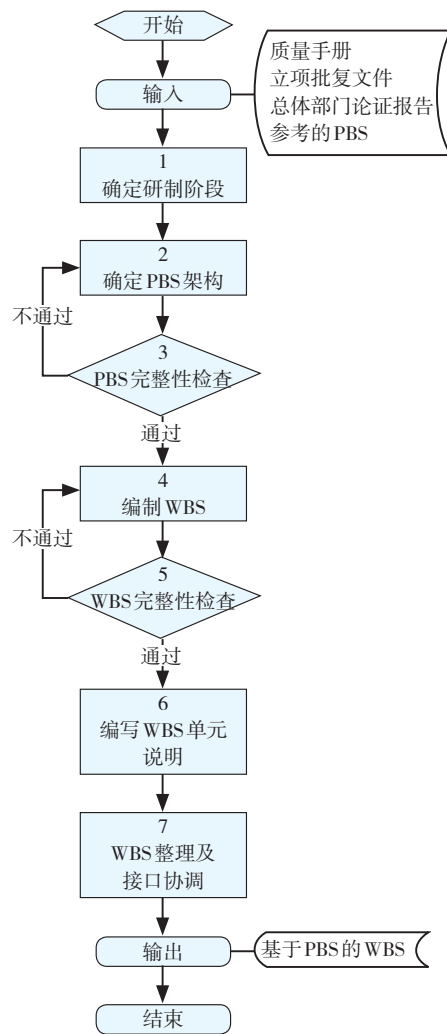


图3 基于PBS的WBS构建流程图

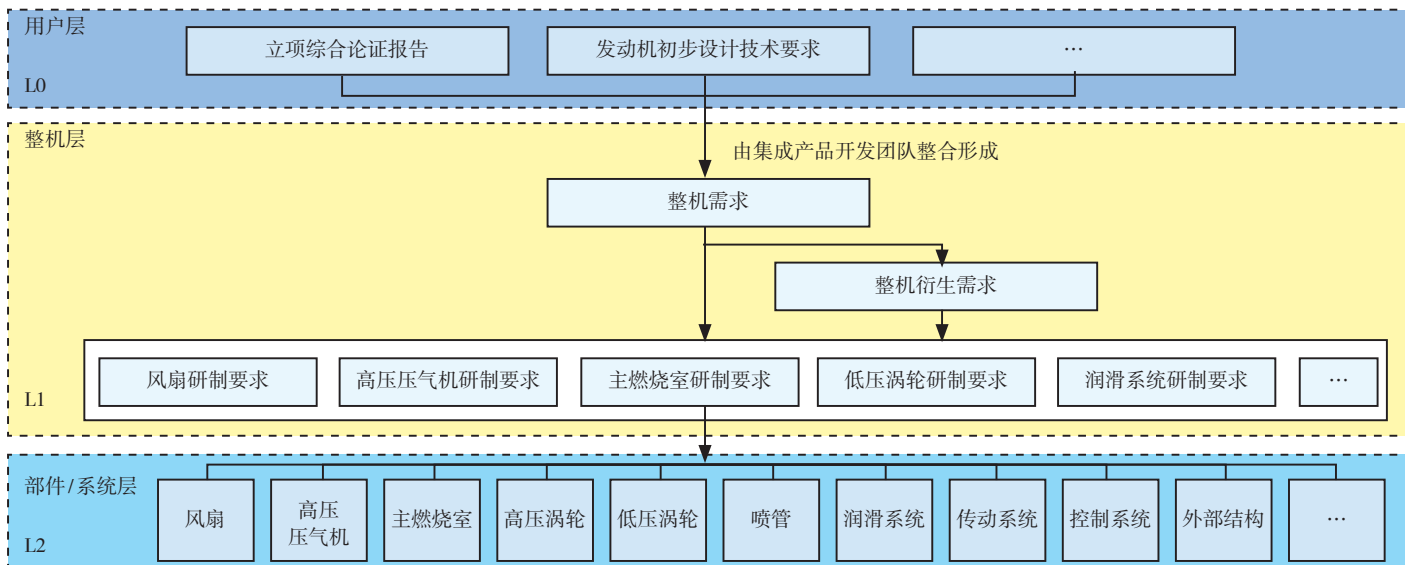


图4 航空发动机需求管理层级

作，基于软件平台实现需求的版本及变更控制，可以完成需求分析报告的定制输出，减少设计人员的工作量。

项目研制在需求捕获、分析后，经评审确定需求，在软件平台里进行维护，更新需求的验证及符合情况信息，在决策点或转阶段评审点形成不同的基线版本，支撑项目顺利通过评审。

### 系统规范、研制规范、产品规范编制

系统规范为型号产品层需求分析的结果。研制规范为部件/系统层需求分析的结果，只包含确定下来的需求及其验证方式、方法，不包含确定需求的过程信息。产品规范通常规定了功能特性、物理特性、验证要求和/或主要的制造要求，可用作产品研制、生产及检验的技术依据，是保证产品质量、指导交付验收的依据性文件。型号专用规范是技术状态文件，其内容选择及排序均与需求分析结果保持一致。

型号专用规范中技术要求内容与该对象的需求分析报告中输出的技术要求基本一致。在软件平台的需求分析结果上，增加系统规范、研制规范、产品规范编制功能，整合利用相同属性资源，减少设计人员技术要求填写的工作量，自动继承相同属性列，只需在特有属性上进行补充。定制开发专用规范输出模板，实现文本数据的输出，技术人员只需要在后期进行局部修改即可，减少设计人员文本编辑的工作量。

### 关键技术成熟度等级评价

技术成熟度评价方法是一种基于技术发展成熟规律、采用标准化测量等级对技术成熟程度进行测评的系统化过程和程序，能有效量化

项目所采用技术的成熟程度，尤其是针对“目标明确、研发周期长、资金投入大”的复杂产品研制，是促进技术成熟、确保装备研制质量、支持里程碑决策的重要工具之一。

航空发动机研制系统工程工作需开展关键技术识别、技术成熟度等级确定、关键技术成熟度评价、技术成熟度评价结果处理等工作。基于航空发动机技术树，按关键技术筛选原则，识别发动机的关键技术，形成关键技术清单；根据航空发动机各阶段研制任务特点，以及项目验收要求，确定发动机各阶段技术成熟度等级要求；依据技术成熟度等级标准及评价过程，完成关键技术的成熟度等级评价。

依照航空发动机所处阶段的技术成熟度等级要求，对照各关键技术的技术成熟度评价结果，筛选出不满足要求的关键技术，作为项目所处阶段存在的技术风险的主要内容。为管控技术风险，对这些不满足技术成熟度等级要求的关键技术，需采取以下措施中的一种：采用另一种符合技术成熟度等级要求的成熟技术；或是带入下一阶段，但同时提交一份技术成熟度提升计划，并将计划内容落实到项目风险管理计划或科研计划中。

### 风险管理

航空发动机研制过程中的风险主要包括技术风险、经费风险和进度风险。风险管理的主要过程为风险规划—风险评估—风险应对—风险监控。其中，风险评估、应对和监控3个过程要在型号全生命周期中不断循环迭代。

根据航空发动机所处的阶段和研制特点，制订风险管理工作规划，

明确风险管理流程、职责分工、要求、风险评估准则，包括风险发生的可能性等级准则、风险后果严重性等级准则、风险接受准则、风险排序准则，给出风险登记册、风险分析报告、风险应对报告等报告模板。

风险评估包括风险识别、风险分析和风险评价。风险评估是风险管理工作的关键环节，随着型号进展，动态的风险评估工作应持续开展、不断深入，整机需求分析、整机方案设计、部件方案设计以及生产、验证过程均可能产生不同的风险，因此风险评估工作需贯穿整个型号研制过程。当型号重大里程碑节点之前、型号技术状态发生重大更改后、型号年度计划有较大调整时，应由项目团队组织开展系统全面的风险评估，更新风险登记册。

风险识别针对需求实现、设计验证活动和试验验证活动等牵引出的技术、经费、研保条件等风险，以及依据技术树以技术成熟度评价结果为判据识别风险。对识别出的风险，从风险发生可能性和后果严重性两个方面进行风险分析。结合航空发动机特点，在国军标基础上制定适用于发动机的风险发生可能性准则和后果严重性准则，在发动机上开展应用。依据风险管理工作规划中的风险评估准则，根据风险发生可能性等级和后果严重性等级，计算得出风险指数，确定风险等级和风险区域。根据风险接受准则，制定相应的风险应对措施。其中，处在不可接受区域的风险，包括主要风险和严重风险，要由风险责任部门编制详细的风险应对方案，明确风险应对责任人、应对措施、完成日期等，由责任人组织风险应对

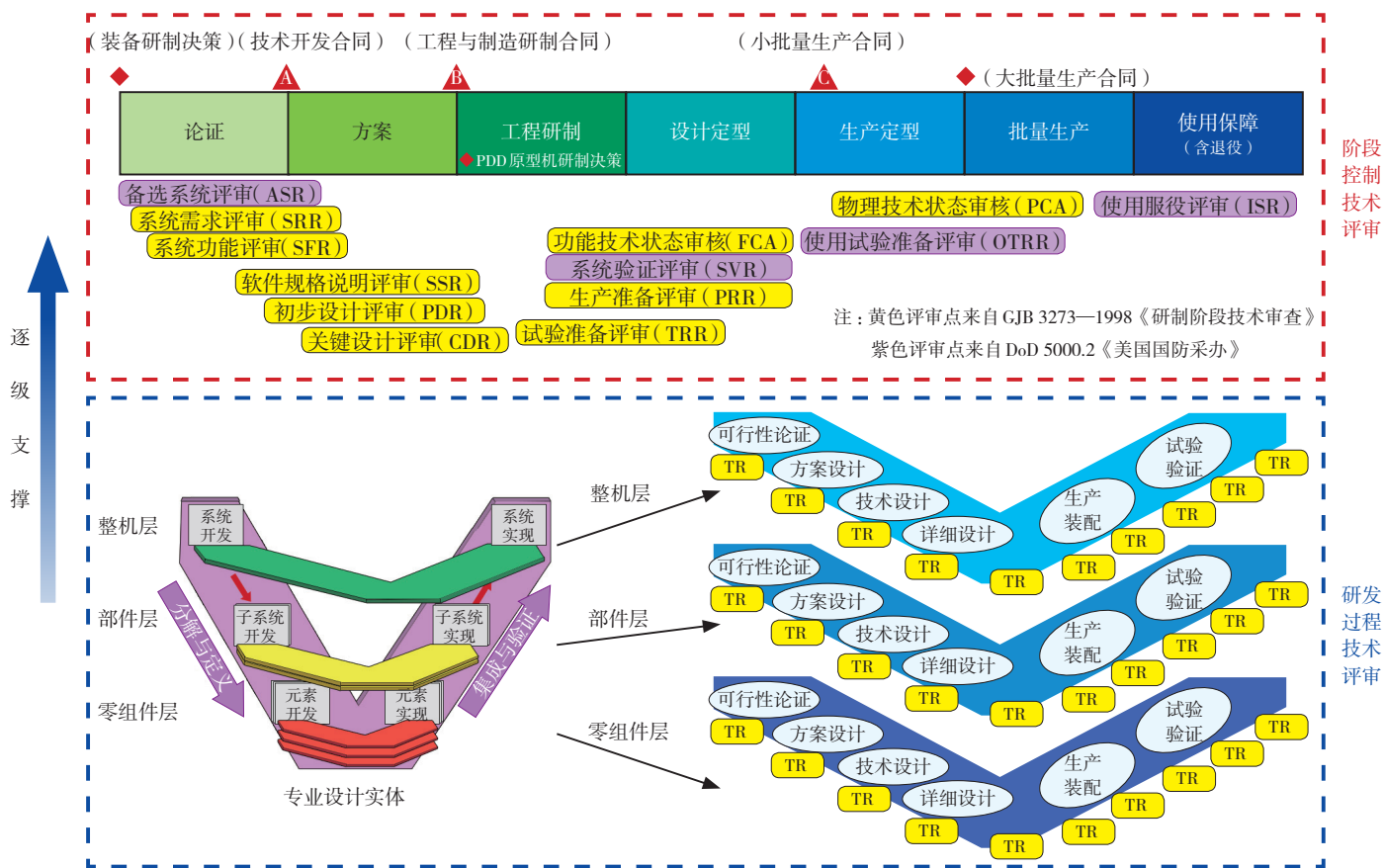


图5 航空发动机评审点设置

工作；处在中间区域的风险，包括中等风险，不需制订详细的风险应对方案，但也要有具体的应对措施、责任人和应对计划，并记录在风险登记册上，由责任人组织风险应对工作；处在风险可接受区域的风险，包括一般风险和较低风险，可不采取专门的风险应对活动，在风险登记册上记录并持续关注风险状况变化即可。

在风险管理过程中，型号的技术团队和管理团队按照风险应对措施的时间节点，对风险应对措施的实施情况进行跟踪和评价，如果未达到预期目的，则需再次进行风险评估，重新制定并实施新的风险应对措施。

项目管理团队要对风险应对措施的执行情况进行密切跟踪，及时、准确地反馈相关信息，适时重新组织专家进行评估，对风险应对措施的实施情况进行评价，并将相关问题及时上报型号总师决策。

### 技术评审

技术评审 (TR) 是针对航空发动机研发过程实施监督的一种有效手段，客观、系统地开展技术评审工作，能够更好地识别潜在的技术问题和技术风险。结合航空发动机研制进展及阶段特点，依据技术评审点裁剪策略设置具体型号的评审点，一般包括阶段控制评审点和研发过程技术评审点，评审的层级与发动机所包含的物理架构层级一致，

评审点设置示意如图5所示。

### 结束语

系统工程工作策划主要包含技术过程及技术管理过程。技术过程靠研制单位的技术流程及研制能力保证；技术管理过程主要基于研制策划、需求管理、系统规范/研制规范/产品规范、技术成熟度评价、技术风险管理、技术评审等工作。聚焦研发实践，提出发动机相关工作策划，综合考虑发动机的研制现状及后续工作规划，对型号研制顺利开展起到积极作用。

航空动力

(李昌红，中国航发动力所，高级工程师，主要从事研发体系建设相关工作)