

以需求为牵引的航空发动机型号问题分析方法研究及应用

Aero Engine Problem Analysis Method Based on the Requirement and Its Application

■ 刘海年 / 中国航发动力所 柳鑫 / 中国人民解放军93128部队

发动机的研制和使用过程中会暴露大量的故障和问题，严重影响发动机的使用安全，明确发动机产品研制需求以及研发活动的完整性和符合性，是提升发动机研制质量的有效方法。

航空发动机正向研发是一项复杂的系统工程。传统的航空发动机研制通常采用“设计—试验验证—修改设计—再试验”反复迭代的串行研制模式^[1]。我国航空发动机研制初期，由于技术认知和研制能力有限，在研发体系不完备的条件下开始了型号研制，产品研制过程中存在需求内容、设计活动和验证活动不完整，需求符合性不确定等问题。伴随“两机”专项工作的落地实施，航空发动机自主研发能力得到持续提升，产品研发流程持续完善，支撑流程活动运行的流程文件（规范、指导书、检查单和模板）持续丰富。通过以需求为牵引的航空发动机型号问题分析方法，应用产品研发体系建设的最新成果，全面审视以往型号研发过程的完整性和符合性，分析产品研制过程中的型号问题，对产品进行改进和专项攻关，可以全面提升产品研制质量。

现状分析

自20世纪80年代以来，欧美航空企业先后引入了全生命周期管理理念，

建立了基于系统工程方法和集成产品开发理念的产品研发体系，显著提升了产品研制质量和研制效率。例如，空客公司提出基于需求的工程，并借助于IBM DOORS RMF需求管理平台，在A380/A350等飞机研制中进行应用，实现了基于需求的产品设计和验证，在减少研制后期的缺陷、减少额外费用、提高客户满意度方面取得了良好的效果^[2]；GE公司建立了完整的产品设计流程体系，强调需求驱动，基于产品需求开展设计和验证^[3]；罗罗公司依据INCOSE系统工程手册制定了系统工程能力框架，产品研发过程中以需求为牵引实现了从航空动力系统到子系统再到部件的需求定义、分解和验证^[4]。

2010年，国内航空工业开始推进基于系统工程的产品正向研发工作，逐步建立了飞机需求分析、功能分析和架构设计等正向设计方法^[5-6]，并在型号研制中得到应用。“十三五”期间，中国航空发动机集团有限公司大力推进运营管理体系（AEOS）建设，旨在打造全集团统一的高效产品研发体系。在实践过程中，通

过引入系统工程方法和集成产品开发理念，建立了完整的研发体系架构，完成了产品研发主流程、基础支撑流程和职能支撑流程建设^[7]，推进了集成产品研发团队（IPT）和信息技术（IT）系统建设，集团内部各研究院所也开展了发动机研发所需的规范、指导书、检查单和模板等流程文件建设，并尝试在重点型号中推进需求管理^[8]，航空发动机自主研发能力得到显著提升，为复查以往型号研制中存在的型号问题奠定了基础。

航空发动机型号问题分析方法

航空发动机型号问题分析方法主要依据发动机各层级研发对象的需求清单，分析需求和技术活动的完整性和符合性，识别型号存在的问题，通过型号设计改进提升产品研制质量。首先，基于各研发对象的通用需求清单和发动机研制需求（型号规范、技术要求等），梳理形成各研发对象的型号需求清单；其次，依据产品研发流程，梳理需求实现所需开展的设计活动、设计验证活动

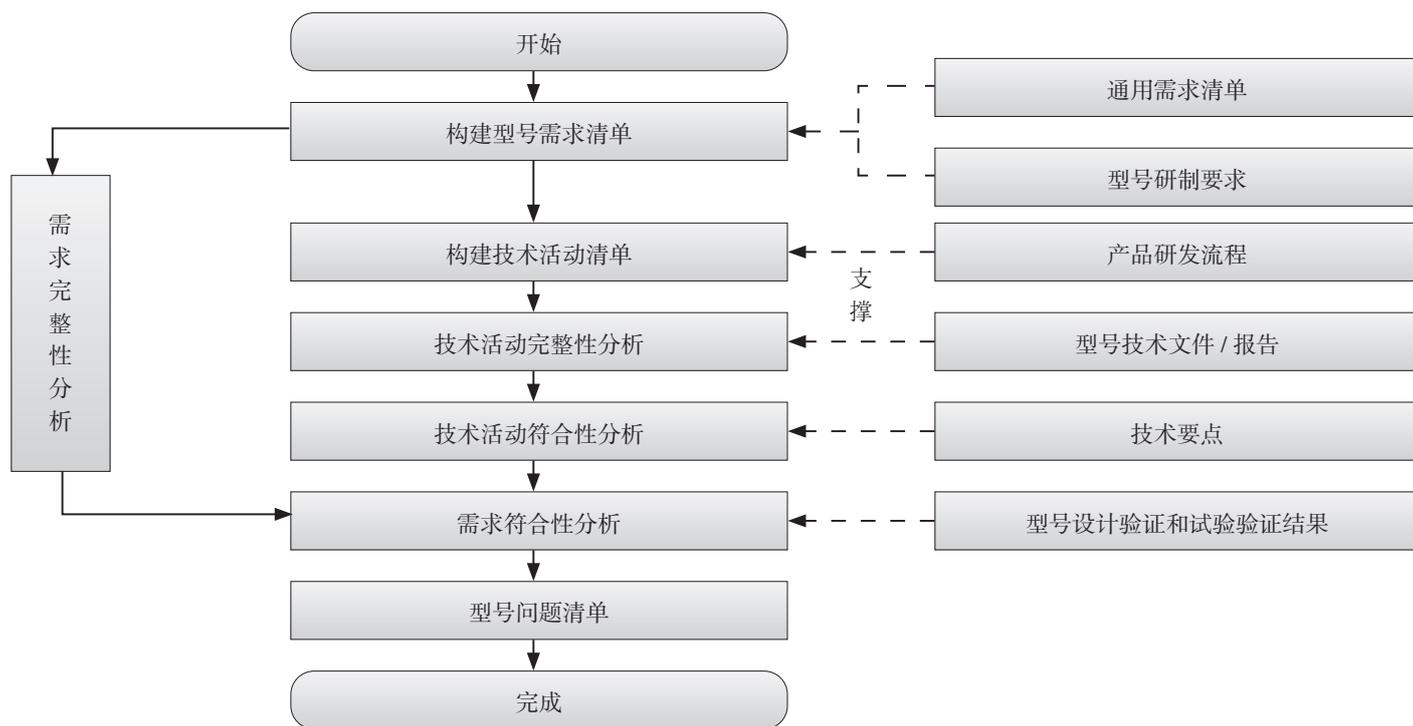


图1 航空发动机型号问题分析工作流程

和实物验证活动，形成型号的技术活动清单；再次，复查型号研发过程中的技术活动的完成情况并进行需求完整性分析；最后，依据型号的设计结果和验证结果，分析需求的符合性，形成型号问题清单，支撑型号的设计改进。航空发动机型号问题分析工作流程如图1所示。

构建型号需求清单

首先，需要构建研发对象通用需求清单。需求定义的完整性直接影响产品设计活动和验证活动的完整性，最终决定了产品交付是否满足用户要求。为了保证尽可能地捕获完整的需求，通过总结型号的研制经验、整理外文标准和资料、对外合作经验、解读发动机适航标准和军标要求等方式对需求内容进行总结和提炼，从发动机功能、性能、结构完整性、可靠性、安全性和保障性等22个方面形成发动机各研发对象的通用需求清单，各

研发对象通用需求清单中需求项统计结果如图2所示。

其次，构建研发对象型号需求清单。依据发动机各研发对象通用需求清单，结合型号发动机的研制特点，分析通用需求清单的适用性，针对不适用的通用需求内容说明不适用的原因；同时，依据发动机的型号规范和发动机整机对部件系统的技术要求，明确各通用需求项的技术指标和具体要求，形成型号需求清单。

型号需求完整性分析

需求完整性分析主要基于通用需求清单适用性分析的结果，针对型号研制要求中缺失的需求内容，结合型号的设计和验证结果，开展需求符合性分析，针对不符合的需求内容分析型号存在的问题。

型号技术活动梳理

型号技术活动梳理基于各研发

对象的型号需求清单，建立需求和产品研发流程中技术活动的关联关系，明确需求实现所需开展的设计活动、设计验证和实物验证活动。其中，设计活动主要是实现需求本身需要开展的计算分析活动；设计验证活动主要是通过计算、仿真分析和类比的方式验证需求的符合性；实物验证主要通过试验验证、装配验证、检测和产品使用等方式确认验证需求的符合性。

技术活动梳理过程中要综合考虑设计活动是否足够支撑由需求到方案的实现过程，基于需求梳理的设计验证活动是否能够有效支撑对需求的设计验证，基于需求梳理的实物验证活动是否体现了从零件到部件再到整机的不同层级验证方式。

型号技术活动完整性分析

型号技术活动完整性分析主要基于型号技术活动的梳理清单，逐

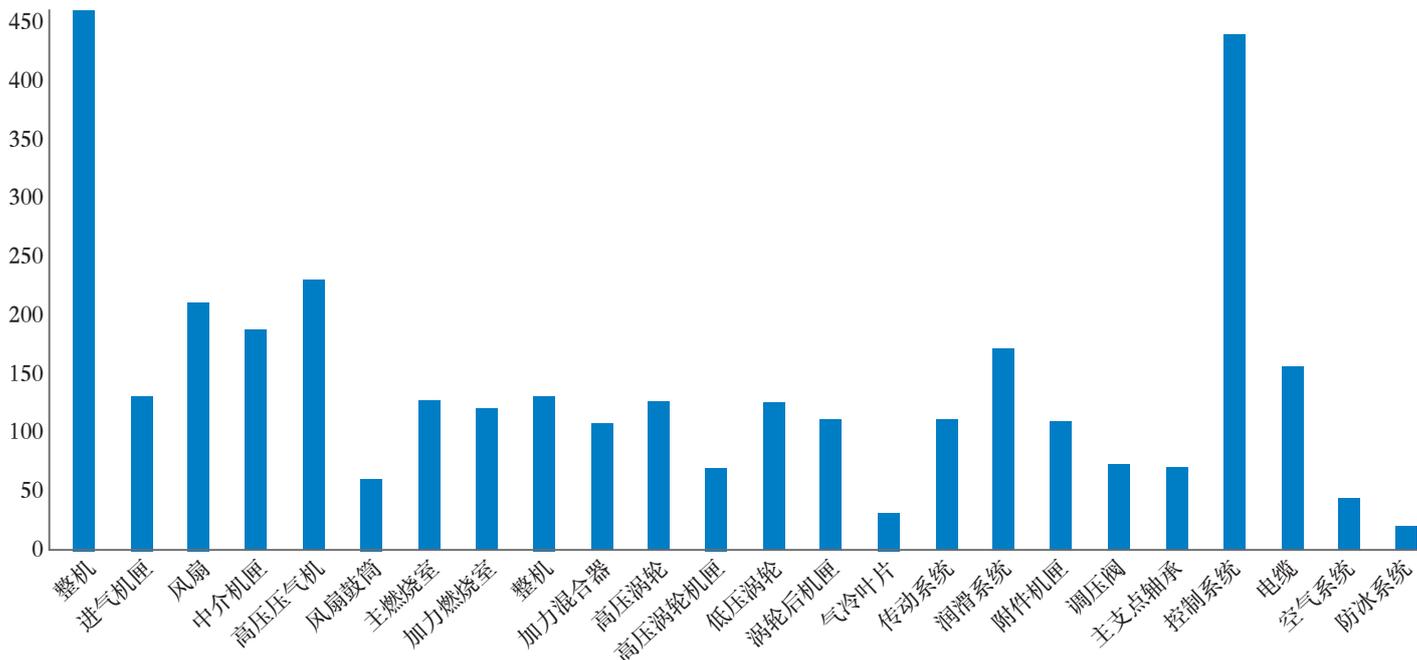


图2 各研发对象通用需求项统计结果

项分析需求实现所需完成的技术活动是否开展，针对已经开展的技术活动，需要提供技术活动开展的证明文件，分析技术活动的符合性分析结果；针对没有开展的技术活动说明可能存在的问题。

型号技术活动符合性分析

首先，要明确技术活动的技术要点。技术要点是完成技术活动所需掌握的重要、关键的方法和准则，是否按照方法要求和准则开展技术活动是判断技术活动实施符合性的依据。依据技术活动的规范或指导书，从设计方法/准则、计算模型准确性、试验件状态准确性、试验模拟条件准确性等方面提炼总结技术要点，才能有效保证技术活动的符合性，为开展技术活动的符合性分析提供支撑。

然后，依据技术活动对应技术要点的梳理结果，针对已经开展的技术活动分析是否满足规范要求，是否考虑了全部的技术要点，判断技术活

动的符合性，在DOORS软件中完成技术活动符合性分析，针对技术活动符合性分析结果为不符合的技术活动分析存在的问题和风险。

型号需求符合性分析

需要形成需求的验证准则，需求的验证准则是证明需求满足的标准，产品研发过程中必须遵循该验证原则确保需求的符合性，主要包括设计验证准则和实物验证准则，明确各项需求对应的设计验证和实物验证准则，为评估需求的符合性提供有效支撑。依据产品设计、试验规范，逐项分析并确定型号研制需求的设计验证准则和实物验证准则。

以发动机零件的高周疲劳寿命需求为例，该项需求的设计验证准则为“依据发动机强度设计规范，采用有限元的静频和动频计算方法以及线弹性应力分析方法计算组件的振动特性，避免发生常用停留转速下的组件低阶共振”。实物验证准

则为“常温或加温条件下构件振动疲劳试验，确保构件具有可靠的疲劳强度”。以此为例，逐条完成发动机型号需求的验证准则，为开展需求的符合性分析奠定基础。

需求符合性主要对照型号需求清单，基于型号的设计和验证结果，证明对设计验证准则和实物验证准则的满足情况，说明各研发对象需求的设计验证和实物验证的符合性结果，并针对设计验证结果或实物验证结果不符合的需求内容，说明可能存在的问题，提出处理意见。

型号问题清单编制

基于型号需求和技术活动符合性分析结果，针对需求的不符合项和技术活动的不符合项，从发动机功能、性能、可靠性、使用安全和维护保障等方面明确型号研制中存在的问题，分析问题可能产生的影响，明确后续的改进措施，完成型号问题清单编制。

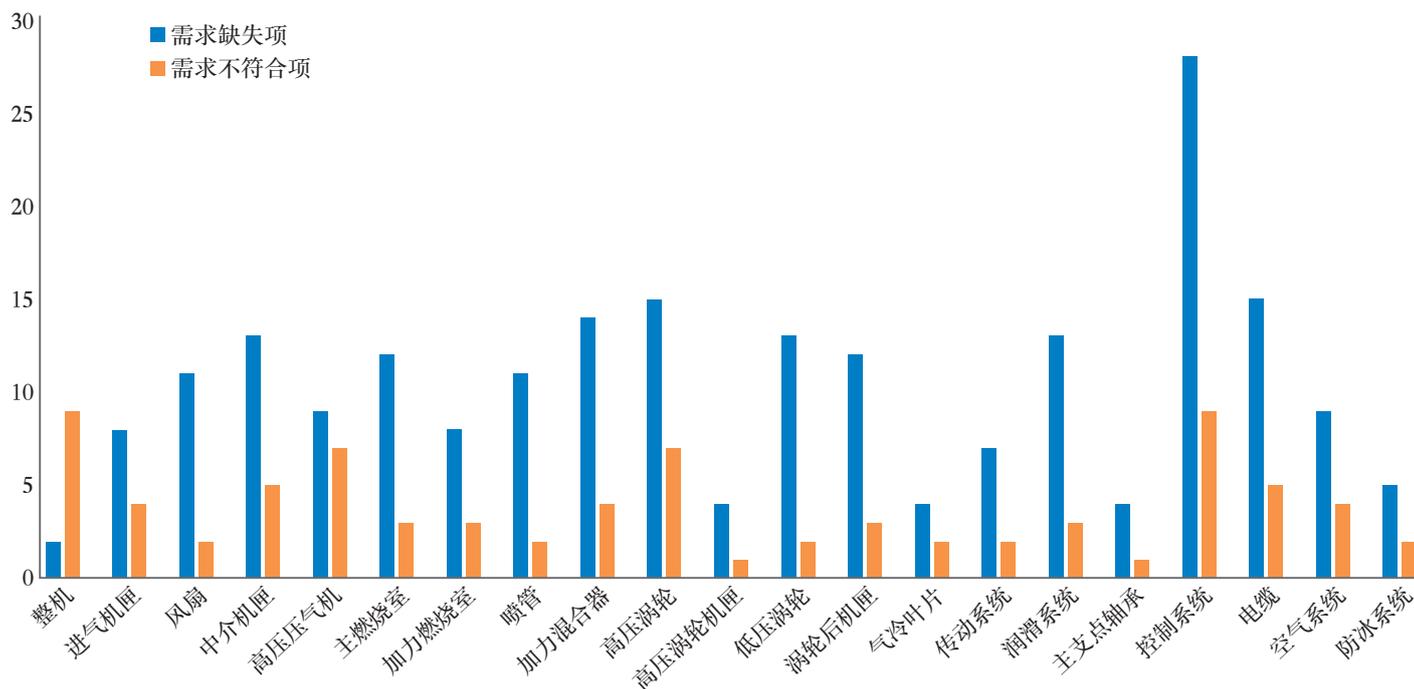


图3 需求完整性和符合性分析结果

应用效果

为了对航空发动机型号问题分析方法进行验证，针对已经交付使用的发动机开展了型号问题分析工作。按照发动机全层级的研发对象，发动机研发单位完成了涵盖发动机整机、全部部件/系统和典型零组件的24个研发对象的型号问题分析；需求完整性和符合性分析方面，形成全层级研发对象型号需求清单2800余项，识别需求缺失项217项，需求不符合项80余项；技术活动完整性和符合性方面，识别技术活动缺失项280项，技术活动不符合项95项；针对需求和活动不符合项进行型号问题分析，识别145项型号问题，明确了型号问题的改进措施，为支撑型号设计改进奠定基础。

需求完整性和符合性分析结果

发动机全层级各研发对象需求完整性和符合性分析结果如图3所示，在需求完整性方面，部件系统

层主要缺少进气机匣焊接应力控制要求、风扇可调叶片超调和响应时间等需求；零组件层主要缺少轴承不对中、错度等需求。在需求符合性分析方面，整机层面主要存在可靠性指标、推力响应速度指标等不符合需求；部件系统层存在控制系统控制精度指标不符合需求；零组件层主要存在叶片寿命指标不满足要求等。

技术活动完整性和符合性分析结果

发动机各研发对象技术活动完整性和符合性分析结果如图4所示，在技术活动完整性方面，整机层主要缺少整机热分析、整机安全性设计等技术活动；部件系统层缺少运动机构仿真分析和耐久性验证等技术活动；零件层面主要缺少轴承承载能力评估及验证、轴承腔温度场分析等。在技术活动符合性分析方面，整机层面主要存在接通、切断

加力性能计算等技术活动不符合；部件系统层主要存在故障模式影响及危害性分析（FMECA）等技术活动不符合；零组件层主要是极限载荷条件下寿命点评估等技术活动不符合。

型号问题分析结果

分析发动机需求和技术活动的不符合性，累计识别型号问题145项，如图5所示，整机层主要存在推力瞬变过程推力响应慢、可靠性低等问题；部件系统层主要存在进气机匣焊缝裂纹、涡轮部件掉块、烧蚀等问题；零组件层主要存在叶片寿命不足等问题。型号问题的分析结果与发动机整机试车和外场使用过程中暴露问题基本一致，验证了本文提出的型号问题分析方法的有效性。

结束语

建立以需求为牵引的航空发动机型号问题分析方法，一方面能够加强

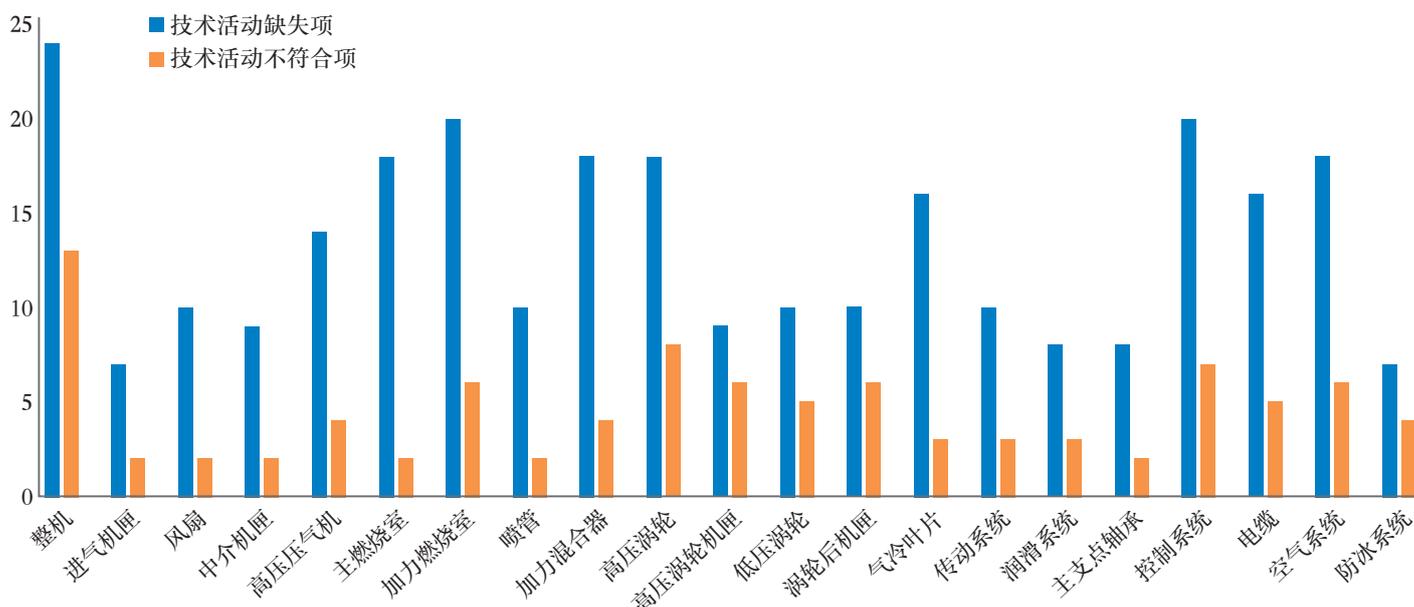


图4 技术活动完整性和符合性分析结果

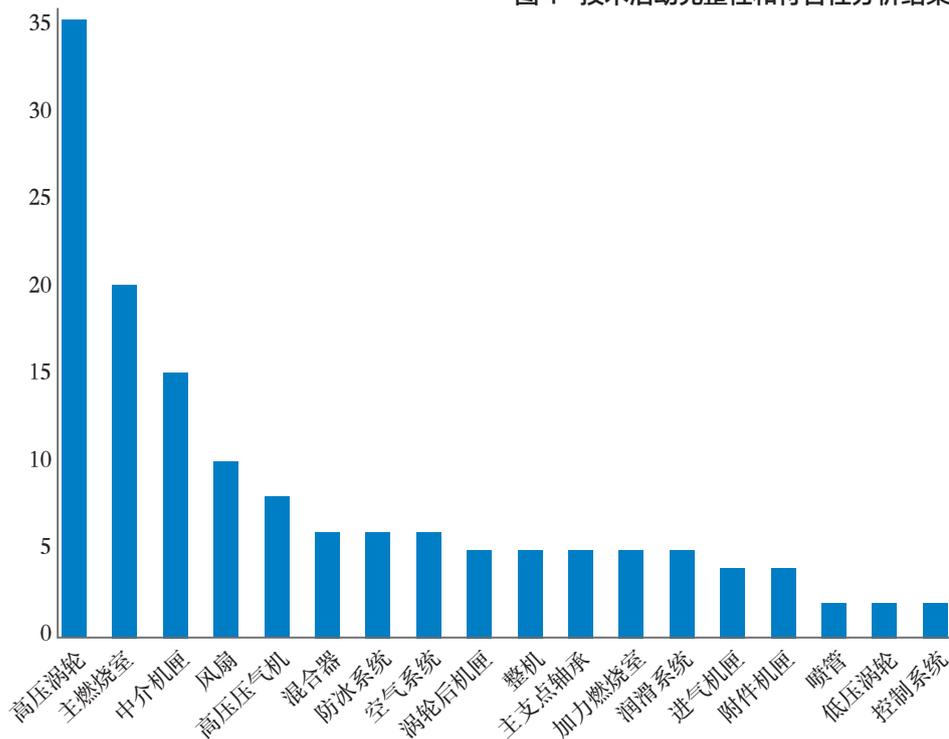


图5 发动机型号问题统计结果

研发人员对产品研发需求的关注，有利于提升产品研制需求的完整性；另一方面基于产品研制需求开展型号研发，有利于提升型号研发活动的完整性，最终为提供满足用户需求的高质量航空发动机产品提供有力

支撑。

航空动力

（刘海年，中国航发动力所，高级工程师，主要从事航空发动机系统工程方法研究及研发体系建设工作）

参考文献

- [1] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5):961-970.
- [2] 董亮,刘看旺.空中客车公司需求管理应用综述[J].航空科学技术,2017,28(10):73-78.
- [3] 张玉金.商用航空发动机系统工程及实践[M].北京:科学出版社,2021,32-34.
- [4] 朱静,杨晖,高亚辉,等.基于模型的系统工程概述[J].航空发动机,2016,42(4):12-16.
- [5] 董亮,刘俊堂.航空产品研制条目化需求管理应用发展探讨[J].航空科学技术,2017,28(11):5-9.
- [6] 李浩敏.大型客机设计中的功能分析[J].民用飞机设计与研究,2018,130(3):1-5.
- [7] 韩秋冰,栾旭,宋柳丽,等.航空发动机产品开发流程阶段划分[J].航空动力,2020(3):48-50.
- [8] 史妍妍,王桂华,刘庆东,等.航空发动机需求管理方法研究[J].航空发动机,2017,43(1):91-94.