

需求管理在民用航空发动机研制中的应用

The Application of Requirement Management in Civil Aero Engine

■ 季雁 李志敏 / 中国航发商发

在竞争日趋激烈的市场环境下，市场、客户、适航等相关利益方的需求对民用航空发动机研制牵引的重要性日益凸显，也对研发者基于需求驱动的正向设计研发能力提出了更高的要求。在此背景下，引入基于系统工程思想、结合民用航空发动机研制特点的需求管理体系显得尤为必要。

在《民用飞机及系统开发指南》（SAE ARP 4754A）中，提出了在民用飞机及其系统研制过程中应制订需求管理策划，并提出了通用的需求捕获、分配、确认及验证的要求。民用航空发动机具有高可靠性、高安全性、低耗油率、低污染、低噪声、长寿命等技术特点，使得研制的技术难度高、项目投入大、开发周期长、服役时间跨度大，发动机的研发应借鉴民机研制对需求管理的经验，结合发动机研制的特点消化吸收，对客户、市场及适航法规等外部利益攸关者的要求进行持续地捕获、分析和管理，确保产品的研制过程始终遵循正确的需求，避免因需求问题引起研制进度拖延、经费增长、设计反复或开发出不符合市场需求的产品等被动局面。

需求管理的通用活动和总体框架

需求管理工作贯穿于产品研发的全生命周期，其主要目的是实现从需求的引出到最终被验证的全过程动态管理。需求管理活动通常包含需求的捕获、分析、定义、确认、分解/分配、验证、变更以及状态跟踪等（如图1所示），各项活动的主要目的如下。

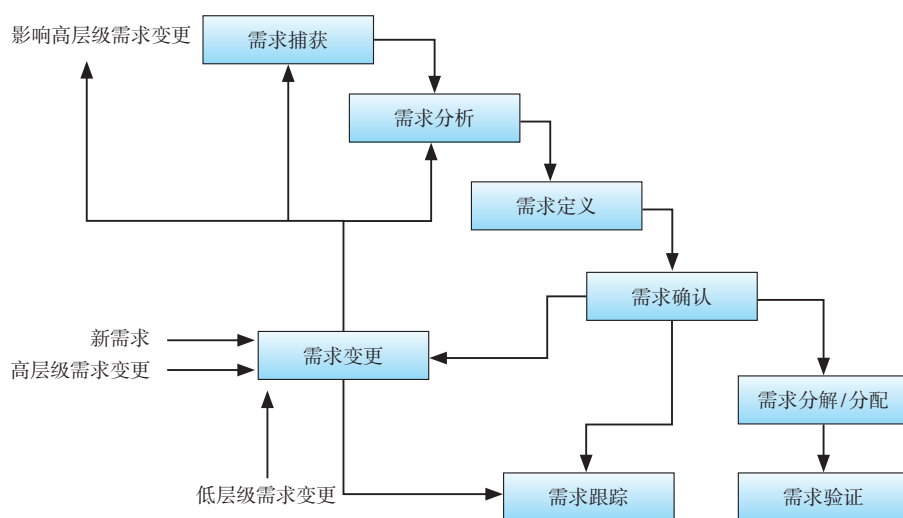


图1 需求管理活动示意图

一是需求捕获，保证需求完整性的重要活动，一般要求在项目初期应识别与项目有关的所有利益相关方，并获取利益相关方对产品的要求。二是需求分析，实现将利益攸关者期望视角的要求转换为产品设计的视角的需求。三是需求定义，撰写需求文档，通过规范、适宜、清晰的需求描述，保证需求能被正确、唯一地理解。四是需求确认，确保需求的正确性、必要性、完整性，即保证所设计即所需。五是需求分解/分配，将产品/系统需求分解并分配到物理架构，传递到

各个子系统中。六是需求验证，通过验证活动表明需求的符合性，获得向利益相关方表明需求符合性的验证证据。七是需求跟踪，动态跟踪不同层级需求之间的追溯关系，确保需求自上而下逐层分解并被承接，同时跟踪需求的验证、确认及变更状态，管理需求的状态及满足情况。八是需求变更管理，评估需求的变更内容是否合理、变更影响是否被充分分析以及变更的可实现性，支持和管理变更的可追溯性。

在上述活动开展之前，需求管理策划是产品或系统开发过程中所

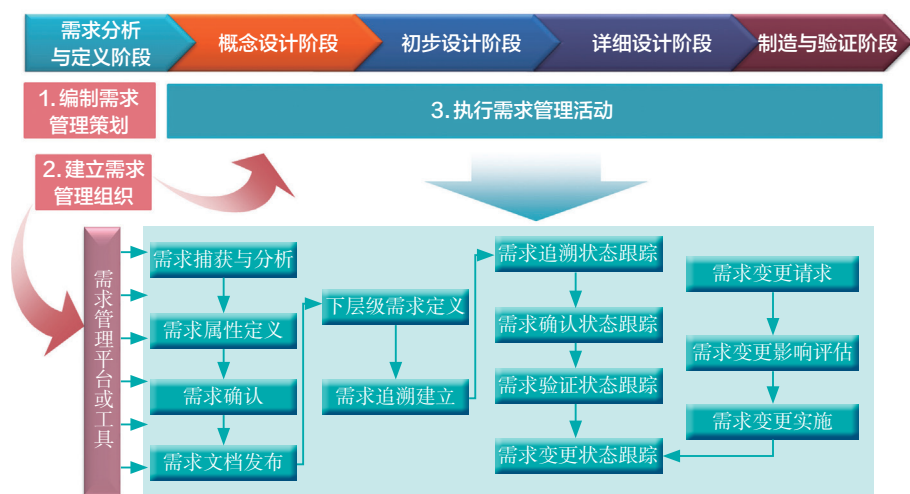


图2 需求管理总体框架

有需求管理工作开展的顶层依据，就是在项目研制初期，通过制订需求管理策划，明确需求管理的组织和职责、使用的需求管理工具或平台、明确项目的需求层级架构，从而达到规范化地开展需求管理活动的目的。

结合需求管理策划和通用活动，大致可以确定民用发动机产品研发各阶段的需求管理工作的框架（如图2所示）：在需求分析与定义阶段，主要开展发动机整机的需求分析与定义；在概念设计阶段，主要开展部件及系统级的需求分析与定义；在初步设计及详细设计阶段，主要开展部件及系统级需求验证及确认；在制造与验证阶段，主要开展产品整机级需求的验证及确认。在产品的整个研制过程中，需求与产品的设计紧密耦合，需求的变更也将贯穿于整个研制过程。

需求管理的要素

需求管理组织机构

需求管理组织机构是实施需求管理的责任主体，在型号设计开始

时就对组织机构的职责权限以及组织中的角色与职责予以明确，对于需求管理的顺利实施十分重要。需求管理的组织机构一般可以有两种不同的设置方式：一种是定义一个统一的组织对各层级需求实施管理；另一种是可以分层级定义不同需求，分别对各层级需求实施管理，并定义各层级需求管理组织的职责、权

限和接口。

需求管理组织中的角色通常包含需求管理员、需求编制人、需求审核人、需求批准人及需求验证人员等，主要职责如下：需求管理员负责需求管理工具软件的使用，如编辑、查阅等权限设置；需求编制人负责需求的撰写、需求的追溯性建立，以及提出需求变更申请；需求审核人负责需求管理整体工作策划，审核需求及所有属性内容以及需求链接的正确性、完整性；需求批准人负责需求文档的批准与发布；需求验证人员负责需求验证工作的策划，以及需求的可验证性检查。

需求定义

需求作为发动机研制的设计输入，具有明确、清晰、唯一、一致、独立和可验证属性。需求的质量直接影响设计研发活动的有效性和研发产品的质量，在需求定义过程按照需求撰写要求（见表1）逐条检查，以获得条目化、结构化、规范化的

表1 需求撰写基本要求

不可分割性	每一项需求应该是一个单独的需求
完整性	每一项需求包含了所要实现的系统功能的所有必要信息，包含需要实现的性能程度
简洁性	每一项需求应该简单且清楚地陈述应实现什么。对于发动机各个利益攸关者，应容易阅读和理解
一致性	需求之间不能是相互矛盾和重复，保证使用一致的术语
正确性	每一项需求应该是所定义的系统的正确的需求
实现自由性	每一项需求应该陈述目标是什么，而不是如何实现它
必要性	每一项需求应该陈述一个必要的、特性或质量因素
追溯性	每一项需求应该被唯一标识，并且容易追溯到较低级的需求、设计和测试
无二义性	每一项需求应该只有一种解释
可验证性	每一项需求的实现应该是可以被验证的，应该是可量化的并包含适当的公差
可行性	每一项需求应该是可以被实现的，实现后可以被使用，并且对整个系统是有作用的

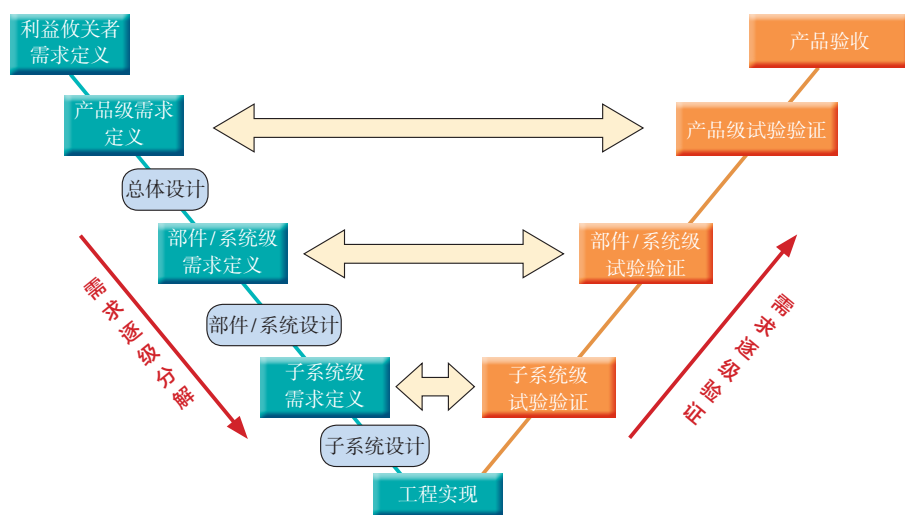


图3 需求层级架构

发动机需求。

需求追溯管理

对于民用航空发动机这类高度集成的复杂系统，无法直接基于顶层需求完成设计。因此，在获取顶层需求后，须在发动机整机层面通过需求分析、分解和向下分配形成对下一层部件/系统的需求；同样，在部件/系统层也应开展需求捕获、分析等设计活动，进而构成向下一层系统传递的底层需求，依次逐层分解直至最底层产品，形成需求的层级架构。在此过程中，可利用层

级框架（如图3所示）定义利益攸关者需求、产品级需求、发动机部件/系统级需求以及子系统需求，必要时可继续向下分解，分解的层级应以便于管理追溯为目标。

对于不同层级的需求，通过建立需求追溯链接，显性化地定义每项需求与上层级需求之间的关系，确保需求均有依据，从而达到消除不必要的需求、降低设计成本的目的。一般情况下，一条上级需求可以对应由多个下级需求来满足。反之，当多条上级需求由某一条下级需求满足时需特

别关注，应检查这些上级需求是否冗余、独立，该条下级需求是否为一简单需求（即检查该条需求的描述是否隐含多条需求）。建立需求追溯的准则为：从一个需求（记为A）分解出需求（记为B），应建立从需求B向需求A的链接。

需求确认与验证矩阵

建立需求确认矩阵的主要目的是合理策划需求的确认方法、分析需求的来源（可追溯性），以确保需求是正确的、完整的，便于后续追踪、管理需求的确认状态，表明需求的成熟度。在民用航空发动机研制过程中，应动态跟踪需求在各阶段的确认状态（一般的需求确认矩阵见表2），直至项目研制结束时需求最终被全部确认及满足。

需求验证矩阵的主要目的是拉通需求与验证之间的关系、对标需求策划的验证方法、建立每条需求与各项验证活动之间的追溯关系，使得验证与需求之间一一对应，为后续在产品研制各阶段跟踪、检查需求的验证状态提供验证证据。对于民机产品而言，借助需求验证矩阵（建议的民用航空发动机需求验证矩阵见表3）获取适航符合性验证

表2 需求确认矩阵

需求编号	需求正文	需求类别	需求状态	确认方法	确认通过准则	确认证据	需求来源
定义需求 唯一编号	需求描述	功能性需求/ 非功能性需求	已确认/ 未确认	逐条定义需求的确认方法，民机一般采用SAE ARP 4754A中定义的方法	逐条定义确认 准则	描述需求确认的相应证据	对需求的来源方面进行描述，如属于客户需求，或衍生需求的产生依据

表3 需求验证矩阵

需求编号	需求正文	需求类别	需求状态	验证方法	验证通过准则	验证证据
定义需求 唯一编号	需求描述	功能性需求/ 非功能性需求	已验证/ 未验证	策划需求的验证方法，通常有仿真检查、分析、试验、评审等手段	明确需求验证通过的准则	填写需求验证的相应证据

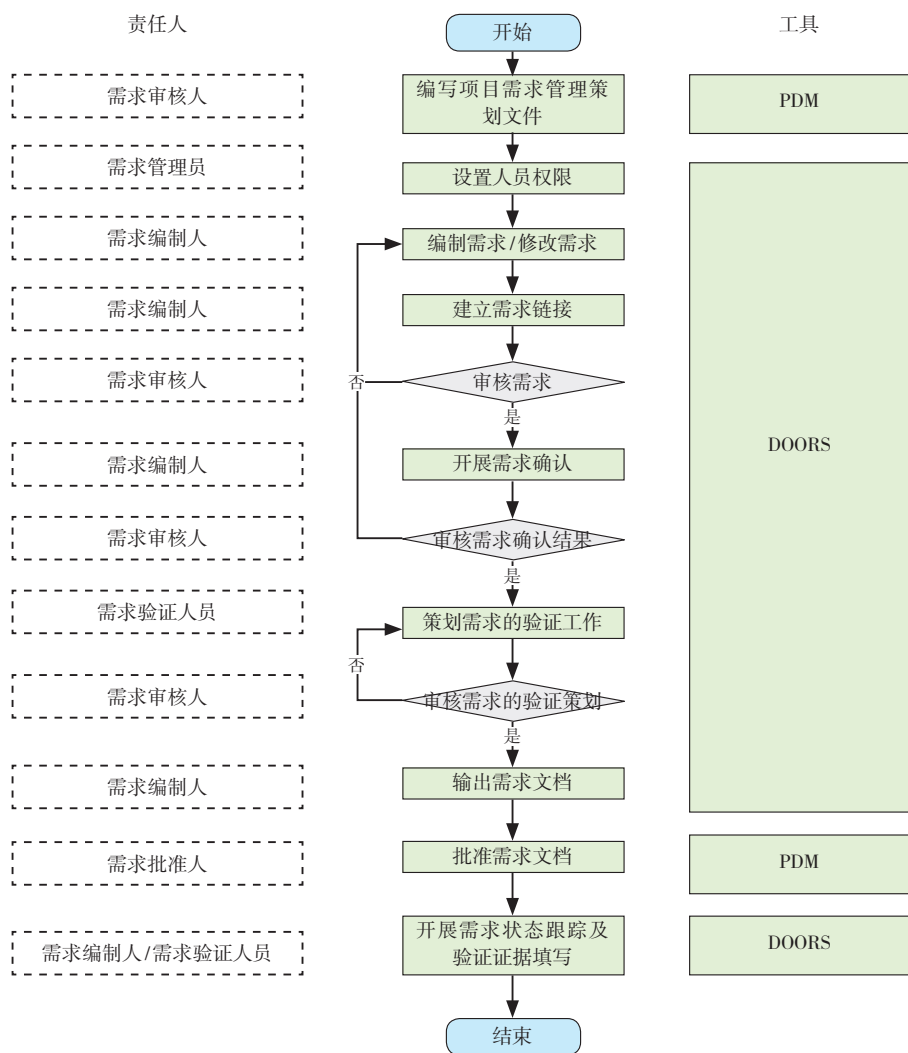


图4 需求管理各角色工作过程

证据链具有重要意义。

需求变更管理

当需求完成确认并获得批准后，发布相应的需求文档。发布后的需求文档纳入构型管理的范畴，如需变更，应开展需求的变更管理。变更管理包含评估需求变更的内容是否合理、识别变更产生的影响，以及评估变更的可实现性。需求变更管理的要求通常包含以下几方面：对需求以及需求变化进行记录；确定需求的基线，做好版本控制；建立需求变更的控制流程，评估需求

变更的影响；跟踪变更对产品/系统的影响。

需求管理实施应用

本文以一型民用航空发动机型号项目的需求管理为例，对需求管理的实际操作加以说明。该项目的需求管理使用IBM公司成熟的商用软件（DOORS）作为需求管理的数据库。在项目中需求管理的实施应用主要包含以下两个核心工作：一是利用DOORS平台实现研制需求的集中管控，结构化存储利益攸关者需

求、发动机级需求、部件/系统需求、验证计划等信息；二是实施需求、设计、验证文档之间的全流程追溯跟踪，建立“需求→设计→实现”以及“需求→验证”之间的双向追溯关系，对项目需求进行精细化管理。

该型号项目的需求管理组织设置统一的需求管理员，各层级分别配备需求工程师，包含需求编制人、审核人、验证人员、批准人。由项目整机层级的需求审核人编写顶层需求管理策划，描述在项目各阶段需求管理的工作内容和要求。需求管理员负责设置DOORS软件中需求管理相关角色的读取、修改、创建和删除权限。需求编制人负责规范化的撰写需求条目，开展需求确认并发布需求文档。需求验证人员负责基于需求开展验证策划，跟踪需求验证状态。使用DOORS软件作为需求数据库，需求文档的批准发布后存储于产品数据文档管理系统供设计人员查看使用。该型号需求管理的工作过程如图4所示。

结束语

在民用航空发动机产品研发领域，通过引入需求管理，在产品全生命周期内开展需求的捕获、分析、分解、确认与验证等，对需求条目实施精细化管理，建立需求与设计、验证测试等数据之间的追溯关系，驱动基于需求的正向设计，确保产品开发过程中“做正确的事”，对保证产品开发的质量、进度及要求的符合性均具有重大意义。

航空动力

（李雁，中国航发商发，工程师，主要从事民用航空发动机的需求管理方法研究以及应用）



图2 串列离心叶轮

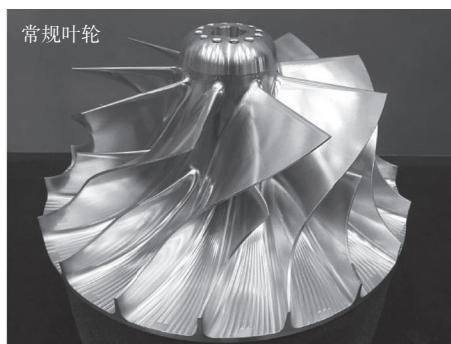
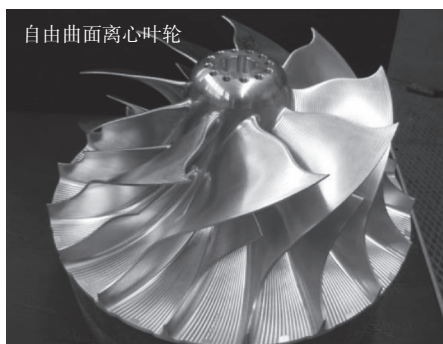


图3 自由曲面离心叶轮与常规叶轮

机研制的需求。自由曲面离心叶轮沿着叶片高度方向的厚度是可变的，增加了叶轮造型设计的维度，有利于叶轮内部流动的控制以及提高叶轮效率^[2]。图3给出了自由曲面离心叶轮与常规叶轮对比图。

复合弯掠叶轮

GE本田航空发动机公司的一型发动机高压比跨声速离心叶轮如图4所示。由于该种叶轮进口尖部的超声速气流流动呈现出强烈的三维效应，借鉴轴流压气机转子复合弯掠设计理念，可在离心叶轮进口导风轮部分采用复合弯掠特征实现对叶片表面二次流动的抑制，进而提高叶轮性能。

多重分流叶片

该技术叶片在高负荷跨声速离心压气机中具有显著优势，一方面多重分流叶片可显著改善叶轮进口由于超声导致的尖部堵塞以及叶轮叶片数量多导致加工困难的双重难题；另一方面由于多重分流叶片数较多，有利于实现气流的有效约束，提升叶轮的做功能力。日本三菱重工的一型涡轴发动机用高压比离心叶轮^[3]如图5所示。

反方法叶轮

相比于传统设计方法，反方法控制沿着流向涡量的偏导数实现对压

气机叶片载荷的精细控制。德国航空航天研究院(DLR)已经将该技术成功应用于单级压比6:1的离心压气机设计中，图6给出了DLR设计的离心叶轮三维模型。

管式扩压器

采用串列叶轮并匹配管式扩压

器的离心级模型^[4]如图7所示。相比于传统扩压器，由于其扩压器通道为一系列管道，超跨声速不均匀来流经过管式扩压器大前掠结构的梳理，在平直的喉道内进一步整流后，经过锥形扩压器区和鱼尾扩压区进一步减速，在扩压通道内没有传统



图4 GE本田公司高压比离心叶轮

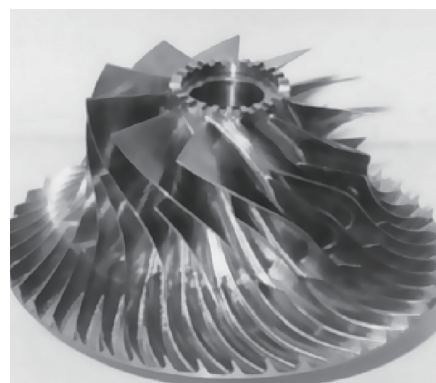


图5 三菱重工高压比离心叶轮



图6 DLR反方法设计叶轮

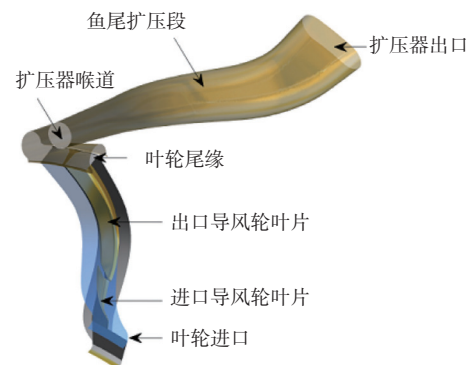


图7 管式扩压器离心级模型

叶片铣削或焊接后形成的角区，气流顺畅，扩压效果良好，适用于叶轮出口绝对 $Ma0.95 \sim 1.2$ 的超跨声速离心级中。

三维叶片式扩压器

早期径向扩压器叶片通常为单圆弧或者多圆弧中弧线的二维叶片，由于高压比离心叶轮出口跨间隙的泄漏流与主流掺混后形成的射流尾迹效应非常强，导致叶轮出口根部到尖部的气动参数变化非常剧烈，特别是出口的绝对气流角。三维叶片扩压器是针对不同叶高截面进行匹配设计，可有效削弱在超跨声速不均匀来流下对扩压器性能的不利影响，提高压气机效率。

楔形扩压器

楔形扩压器是APU中应用较为广泛的一种扩压器，该种扩压器的设计理论与方法非常成熟。工程应用中，采用该种扩压器主要考虑两方面因素：一方面是结构传力的需要，扩压器叶型比较厚，这样可以穿过螺栓，由叶片传递较大的载荷；另一方面是加工工艺成熟，对于成本控制具有显著优势。美国国家航空航天局（NASA）的高效率离心压气机楔形扩压器^[5]如图8所示。



图8 高效率离心压气机楔形扩压器

宽裕度高效率负载压气机设计技术

负载压气机的主要作用是提供高压气体用于飞机环境控制、主发动机起动以及其他需要气源的场合。负载压气机的工作特点表现为：使用过程中需要频繁切换不同工况，满足不同场合的使用需求，压气机不但需要在不同引气流量下高效地工作，而且还要防止极端使用条件下负载压气机发生意外喘振。因此负载压气机除去高效率特征以外的技术特征表现为：一方面需要具备导向叶片调节结构或结合其他扩稳手段保证负载压气机具备非常宽的稳定工作流量范围；另一方面需要具备防喘控制能力。

可调导向叶片

可调导向叶片是调节压气机特性的重要手段，负载压气机引气过程中通常需要根据引气压力以及引气换算流量对导向叶片进行自适应调节。当负载压气机不引气的时候，导向叶片关闭到最小位置，保证负载压气机不喘振时的功耗最小。

机匣处理扩稳

机匣处理具有结构简单、可靠性高、抑制叶尖间隙泄漏等明显优

点。传统的机匣处理起到扩稳效果的同时也带来效率和压比的损失^[6-7]。为了兼顾压气机的稳定工作裕度和等熵效率两项主要性能指标，设计出一种称为自循环的机匣处理结构，可以在不降低绝热效率的同时拓宽其稳定工作范围。自循环机匣处理扩稳作用机理为在接近喘点时气流通通过叶轮尖部放气槽往回流腔迁移，气流经进口回流槽再次吸入压气机，然后再经过叶轮尖部的放气槽进行循环，由于进入压气机进口的总流量并未实质性减小，压气机进口尖部的气流迎角得到极大改善，因此可以获得压气机裕度提升。已有试验结果表明，在跨声速离心叶轮上采用自循环机匣处理结构形式，离心压气机的工作裕度在不损失效率的情况下有所增加^[8]。自循环机匣与传统机匣结构对比如图9所示。

防喘控制

负载压气机在使用过程中由于频繁切换工作状态，为满足不同天气温度的引气需求，需要通过导向叶片来调节不同温度下压气机的出口引气流量和压力，避免因极端情况导致负载压气机喘振。其基本原理是在负载压气机扩压器进出口设

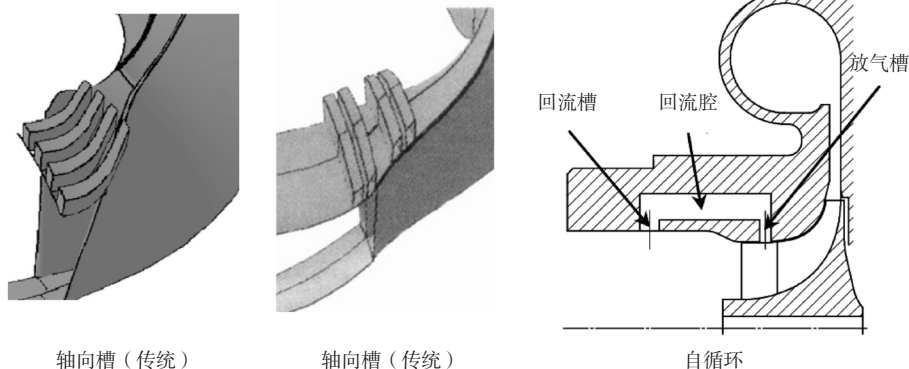


图9 自循环机匣与传统机匣

置压差传感器,根据压差与压气机出口换算流量的关系提前设定好工作范围,若超过预警值,则负载压气机集气蜗壳下游防喘阀打开,使负载压气机快速退出喘振状态,保证使用安全。

结构设计技术要求

根据中国民航局2014年颁布的CTSO-77b,大型客机APU不仅注重安全性、可靠性以及环境适应性等要求外,同时还要兼具经济性、较长的使用寿命和易于维修等特点,这些需求对于压气机转动件的强度、寿命、包容性等均提出了要求,大型客机APU的压气机结构方面需要以先进的结构设计技术作为支撑。

长寿命叶轮

成熟的APU平均翻修间隔为10000h以上,叶轮作为冷端部件中的关键件,必须具有极高的寿命。离心叶轮设计中需要充分考虑气动性能,叶轮强度寿命、振动、变形控制以及装配性等因素,在众多约束下获得满足寿命要求的离心叶轮。

叶轮包容

在CTSO-77b中明确要求对APU转子的结构设计要充分考虑叶片失效断裂或者轮盘失效断裂后产生的高能碎片脱离轨迹,应设计专门的包容结构,保证在极端条件下的包容性需求。

叶轮进口抗外物损伤

由于APU工作过程中可能会吸入异物,例如,冰块、沙石以及其他异物,为保证使用安全,离心叶轮叶片的设计必须要考虑抗外物损伤,CTSO-77b中也有相应要求,设计中叶轮通常采用叶片前缘增厚、大后掠等措施,避免因叶片前缘击

伤导致叶片断裂失效,提高APU工作安全性。

压气机变形与间隙控制

由于大型客机用APU的结构特点是负载压气机和动力压气机设置在同一根细长转轴上,离心叶轮叶片和外罩之间的工作间隙对压气机性能影响非常显著,设计中需要考虑压气机叶轮受到温度载荷、压力载荷、轴向预紧力以及离心力、转子窜动等的共同作用对叶轮尖部变形的有效控制,并通过试验确认最佳工作间隙。

引气污染控制

负载压气机提供的压缩气体在环境控制引气条件时,将气体提供给飞机的空调系统以供飞机座舱乘客正常呼吸,CTSO-77b中规定APU进气道在满足防火要求下,进气道不会释放危险量的有毒气体到引气中。压气机专业需要注意的是防止负载叶轮背腔封严篦齿滑油泄漏到负载压气机主流道中引起呼吸不适。

结束语

随着APU性能指标需求的提升,针对采用负载压气机引气构型的主流大型客机APU,一方面要求其核心机压气机的压比不断提高,另一方面要求负载压气机满足不同引气环境下高效工作,降低燃油消耗量提高经济性,同时针对APU结构设计方面还需要对接相关技术标准规定,保证APU的安全与可靠。由此可见,先进的压气机设计技术对于支撑未来大型客机辅助动力装置的研制具有重要作用。

航空动力

(谢建,中国航发动研所,高级工程师,主要从事叶轮机械气动热

力学研究)

参考文献

- [1] 胡晓煜.IHPTET/JTAGG美国未来直升机发
动机计划进展顺利[J].国际航空,2001,(3):59-
60.
- [2] Hazby H,Robinson C,Casey M.et al.
Free-form versus ruled inducer design
in a transonic centrif-ugal impeller[R].
Charlotte,NC, USA:ASME TurboExp.
GT2017-63538.
- [3] Higashimori H, Hasegawa K, Sumida K.
Detailed flow study of mach number 1.6
high transonic flow with a shock wave in
a pressure ratio 11 centrifugal compressor
impeller[R]. ASME GT2004-53435.
- [4] Bourgeois J A, Martinuzzi R J, Roberts D.
Experimental and numerical investigation of
an aero-engine centrifugal compressor[R].
ASME, GT2009- 59808, 2009.
- [5] Medic G, OPSharma O P, Jongwook J.et al.
High efficiency centrifugal compressor for
rotorcraft Applications[R]. NASA/CR-2014-
218114.
- [6] Jansen W,Carter A F,Swarden M C.Improvement
in surge margin for centrifugal compres-
sor[C].Centrifugal compressor, flow
phenomena and performance. AGARD
conference proceed-ings No. CP-282, 1980:
296-301.
- [7] Peng G,Wuli C,Yanhui W,et al. Numerical
analysis of the unsteady flow and casing
treatment in a low speed centrifugal
compressor[C].Proceedings of the
Sino-Russian conference on aerospace
technology, 2006: 563-570.
- [8] Tamaki H. Effect of recirculation device
on performance of high pressure ratio
centrifugal com-pressor[R]. ASME
GT2010-22570.

风扇/压气机增材制造技术的应用与发展趋势

Additive Manufacturing Technology for Fan and Compressor

■ 冀国锋 李俊励 杨进飞 / 中国航发贵阳所

增材制造作为开拓制造业发展前景的新兴技术，在航空航天等高精尖领域不断开拓创新，将传统加工与智能化技术融为一体，将会为这些行业带来深远影响和重大变革。

为了减轻质量、提高寿命、降低制造成本，航空发动机结构中整体金属构件的使用越来越多，也使得航空发动机关键零部件加工难度大、特殊材料利用率低等长期以来制约航空发动机发展的因素更加凸显。直接利用增材制造生产金属零件的技术构想，是由美国联合技术研究中心(United Technologies Research Center, UTRC)在1979年首先提出，其

应用对象主要是针对航空发动机的核心部件——涡轮盘。但受当时工业激光器功率及数控技术水平的限制，该项技术并未立即引起太多的注意。自20世纪90年代起，GE、罗罗、普惠等企业和研究机构对金属增材制造技术及其在航空发动机领域的应用开展了大量研究工作，提出了可通过增材制造技术生产的航空发动机零部件，如图1所示。截至目前，高性能金属增材技术已经带来了

诸多效益，例如，实现了发动机新型号的快速研发、零部件的质量减轻、显著节约了昂贵的金属材质、实现了结构的多样化、延长了部件的寿命和降低了修复成本等。当前，航空发动机领域增材制造技术的应用需求和研究热点，主要集中在降低材料与机加工成本、缩短研制周期、拓宽设计自由度以制造复杂结构整体部件，而风扇/压气机研制所用到的钛合金构件激光熔化沉积增材制造

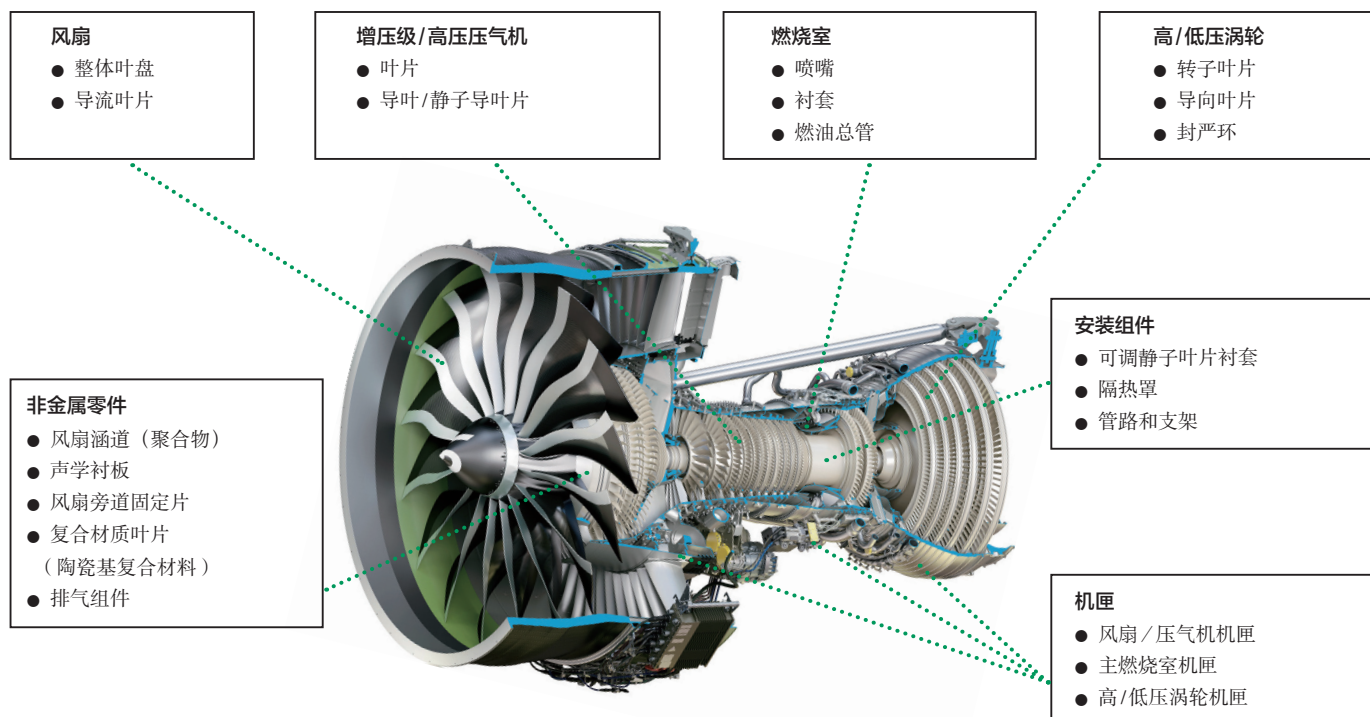


图1 可增材制造的发动机零部件

技术更是其中的研究重点。

增材制造在风扇/压气机的应用

整体叶盘

20世纪80年代中期，在航空发动机结构设计中出现了一种称为“整体叶盘”（blisk）新构型，如图2所示。整体叶盘把发动机转子的叶片和轮盘制造成一体，省去了榫头、榫槽及锁紧装置等连接件，使发动机整体结构大为简化、结构质量减轻、零件数量减少。例如，美国F414发动机第二级、第三级风扇及前三级高压转子改用整体叶盘后，零件减少484个、发动机推重比由7.5:1提高到9.0:1；消除了榫头与榫槽间的气流损失，提高气动效率；避免了由于装配不当造成的磨蚀，尤其避免了榫头、榫槽间的微动磨损，使发动机的工作寿命和安全可靠性大大提高。整体叶盘技术代表了第四代、第五代高推重比航空发动机技术的发展方向，成为高推重比发动机的必备结构，是先进航空发动机研制必须采用的核心关键技术之一。

整体叶盘增材制造技术将高性能钛合金材料制备与复杂零件直接近净成形有机地融为一体，与发动机钛合金大型整体叶盘传统制造工艺相比，具有成分均匀、组织细小、生产工序少、制造流程短、材料利用率高、制造周期短、成本低等优点，能够实现整体叶盘零件的低热影响、低变形修复。钛合金整体叶盘增材制造技术已在EJ200、F119、F414、F110等军用和GE90、遛达900、PW300、BR715等民用航空发动机风扇及压气机转子上得到广泛应用。MTU、罗罗、GE、普惠等航



图2 增材制造钛合金整体叶盘

空发动机公司从整体叶盘增材制造技术的提出和应用开始，就将有关整体叶盘的技术列为对外高度保密的核心关键技术，积累了几十年的研制经验。

风扇/压气机机匣

1994年，罗罗公司与克兰菲尔德大学合作，开始探索航空发动机机匣的激光立体成形（LSF）制造技术。2016年，罗罗公司和吉凯恩（GKN）航宇公司达成协议，扩展

双方在遛达XWB-84发动机项目上的合作，GKN宇航公司负责为遛达XWB发动机设计提供高性能中间级压气机机匣，采用了包括增材制造工艺和新的焊接技术等最新设计方法和制造技术，如图3所示。这种由衬套、壳体、肋板等特征形式制造出的薄壁结构的零件还包括航空发动机叶片、燃烧室等，若采用传统的铸造、锻造、焊接、机加等工艺制造，则有周期长、材料利用率低



图3 遛达XWB-84发动机中间级压气机机匣



(a) 宽弦空心风扇叶片



(b) 钛合金空心导流叶片

图4 增材制造的钛合金空心叶片

等弊端。相比而言，增材制造能够比较容易地实现大型深径比薄壁结构的制备，可节约更多的研制成本及缩短研制周期。

宽弦空心风扇叶片

风扇叶片是涡扇发动机的核心零件之一。罗罗公司于1968年开始设计、制造宽弦风扇叶片，并在RB211-535E4发动机上成功应用。随着气动设计技术、结构技术、材料技术和增材制造技术的不断发展，宽弦空心风扇叶片在航空发动机上的应用更加广泛，罗罗、普惠、GE、斯奈克玛等公司均在各自的发动机产品上推广使用，如F119、遄达800等。宽弦空心叶片的应用改变了流道，减轻了风扇质量，并提高了发动机的推力。受此启发，伴随着材料工艺和增材技术的进一步融合发展，带新型气膜冷却结构的叶片、碳纤维复合风扇叶片、可调节导流叶片的增材制造技术也日趋成熟，如图4所示。

轴承相关件

增材制造技术对轴承相关件的制造工艺主要集中在磨损故障的维修与力学性能的防护上。通过专用

金属粉末对轴承、轴承座进行激光增材技术修复，以实现报废品的再生制造能力，节约了成本并缩短维修时间。罗罗公司的遄达XWB-97发动机采用的直径达1.5m的前轴承腔就是通过增材制造技术生产的，如图5所示。

其他零部件

T25高压压气机温度传感器的外壳是GE公司商用发动机上首个获得美国联邦航空局（FAA）批准的增材制造零件，如图6（a）所示。传感器外壳主要用于保护温度传感器脆弱的电子元器件，防止结冰或

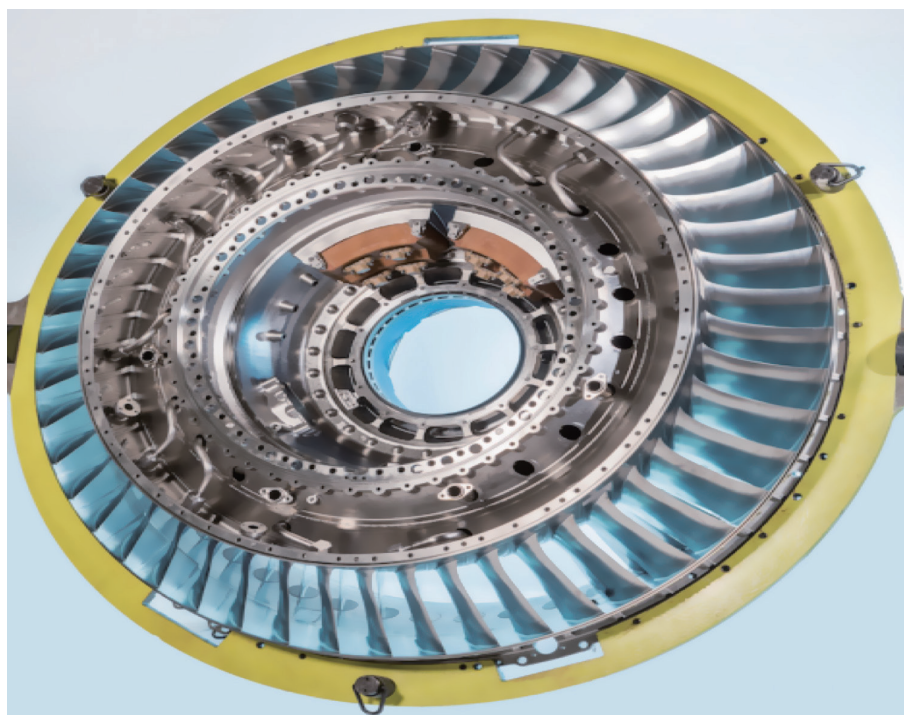


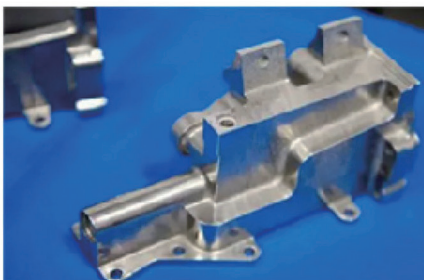
图5 遄达XWB-97发动机前轴承腔



(a) 温度传感器壳体



(b) 管道件套筒



(c) 同步环支架

图6 航空发动机增材制造的部分其他零部件

被急速气流损坏。GE公司生产的T25传感器外壳于2014年10月完成最终设计，2015年2月通过FAA认证，在第二周就投入了使用，目前有超过400台GE90-40B发动机加装了用增材制造技术生产的T25传感器外壳。

普惠公司在齿轮传动涡扇发动机开发过程中，采用增材制造技术生产压气机静子和同步环支架，如图6(b)和图6(c)所示。借助增材制造技术，普惠公司可以将部件制造成任何形状，这就意味着未来将有更多零件，甚至整个发动机都可能通过增材制造技术制备而成。

增材制造技术发展趋势

尽管增材制造在航空发动机领域的应用探索已历经数十年，但在实际应用和推广方面仍处于起步阶段，以下几个方面是今后发展的重点。

专用高性能材料的研发

当前，限制增材制造在航空发

动机上应用的关键不是制造工艺，而是材料研发。其中，高性能合金、非金属聚合物，耐高温、防腐蚀、高韧性极限服役环境材料是航空发动机进行增材制造必不可少的原料，也是增材制造大规模应用的瓶颈所在。因此，增材制造专用高性能材料的研发将成为航空发动机领域的重要研究方向。

建立完备的数据库与标准体系

经过多年探索发展，各国的增材制造技术正在逐渐从理论研究走向工程应用，而完备的数据库和标准体系的建立是其中的关键。例如，以国际自动机工程师学会(SAE)、美国材料与试验协会(ASTM)和国际标准化组织(ISO)为代表的研究机构综合多年的研究成果，建立了完备数据库和标准体系，形成了系统的研究方法。增材制造是一个多学科交叉、跨领域合作的热点技术，在未来研究中，需要加强基础理论的预先研究，建立各领域交

流合作的共享平台，利用各学科优势互补创新，突破技术难题，形成基础研究和预研技术的体系化发展与规划，建立完备的数据库与标准体系是增材制造技术快速发展的基础条件。

复杂结构的修复与再制造

航空发动机的研制是一个漫长的过程。一代发动机的研制需要10~20年甚至更长的时间，其服役工作的苛刻环境决定了对零件制造的要求极高。在很长一段时间里，金属增材制造的重点是航空发动机零部件的修复。因此，不仅要利用增材制造的特殊工艺研制出高性能的发动机产品，还应利用增材制造技术修复已失效的发动机零件，快速实现低成本的再生制造，延长发动机的寿命，同时节约一定的研制成本。

结束语

面对航空发动机对轻质量、高性能、长寿命、高可靠、集约化的迫切需求，目前基于增材制造并面向系统级、性能高效的功能集成化设计方法仍不健全，批量化增材制造产品稳定性难控制，制约着增材制造在高端动力装备的规模化应用。这也意味着基于增材制造技术，构建稳固创新设计、新型复合材料、特殊工艺制造、修复与再制造全流程技术体系，已成为促进该技术实现增材制造在动力装备规模化应用的重要发展途径。可以预见，随着研究的不断深入和行业的发展，增材制造技术必将给航空发动机制造业带来革命性的变化，机遇与挑战并存。

航空动力

(冀国锋，中国航发贵阳所，研究员，主要从事航空发动机气动力学研究)