

基于增材制造的控制系统复杂构件研发快速迭代技术

Rapid Iteration Technology in R&D of Complex Components for FADECs Based on Additive Manufacturing

■ 陈静 侯伟 周毅博 王修专 储松林/中国航发动控所

增材制造（AM）是一种兼顾精确成形和高性能成形的一体化制造技术，因其具有高柔性、快速成形、不受零件形状复杂程度的约束等优势，可使得设计迭代变得更加快速，研制周期大大缩短。

由于控制对象的复杂性和控制参数的多样性，航空发动机控制系统复杂构件在研发过程中仍面临着设计约束多、加工难度大、迭代周期长等问题。中国航发动控所针对航空发动机控制系统复杂构件（如燃油泵壳体、调节器壳体）的研制，采用基于数字化模型驱动和选择性激光熔化（SLM）增材制造（3D打印）技术相融合的方法，实现了研发效能的大幅提升，大大缩短了复杂控制构件的研制周期。

数字化模型驱动的正向研发快速迭代

面向航空发动机控制系统复杂多腔内流道构件的研制需求，建立基于数字化模型驱动的正向快速研发模式，如图1所示，打通“设计—仿真—制造—验证—认证”一体化迭代流程，实现系统级产品功能和性能最优化。该“双V”快速研发模式的核心，就是从需求概念级模型到真实物理级实体是完全基于增材制造（3D打印）使能的模型驱动式数字线程

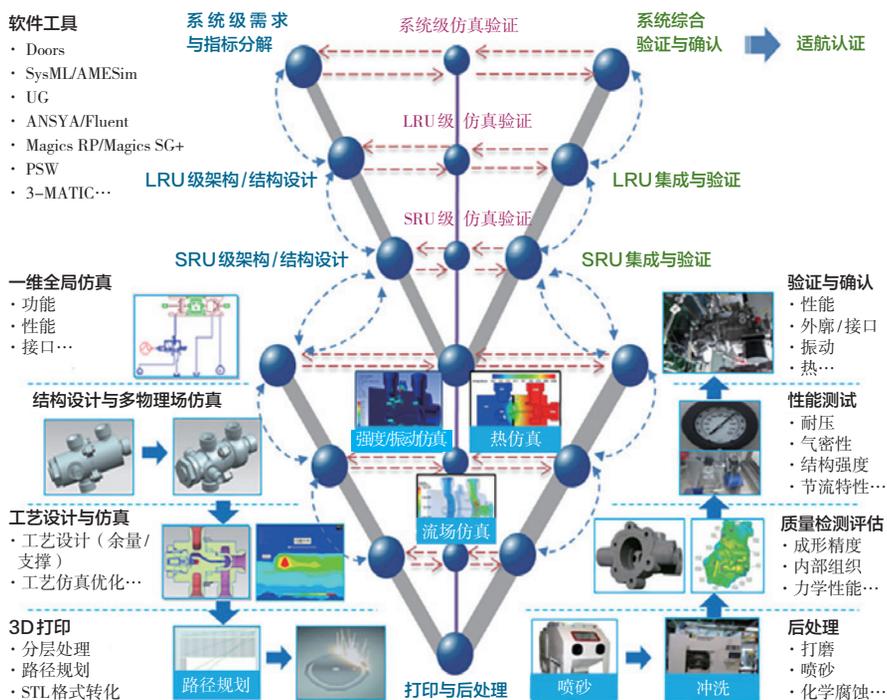


图1 基于数字化模型传递的快速研发模式

来实现的，数字线程中包括需求信息、设计信息、材料、工艺、加工以及测试验证数据等信息。

由虚拟模型到物理实现的模型数字化传递过程如图2所示，主要分为模型设计阶段、工艺优化阶段和模型打印实现阶段。

在数字化模型的设计过程中，首先根据需求进行指标分析与架构设计，同时结合理论原型进行相关物理参数定义，在功能需求与系统架构设计约束下开展三维结构设计，并运用拓扑优化、等壁厚包络设计等方法实现复杂油路空间布局、结构强度、质

量、性能等指标的多目标全局最优，实现面向增材制造工艺的复杂控制构件集约化模型构建；然后采用多物理场联合仿真技术，综合考虑真实运行场景下热场、应力场、流场、电磁场等载荷效应的敏感度模型，将仿真结果直接迭代回归至模型本身，实现设计端的快速迭代优化；最后是结构设计符合性确认，由于增材制造工艺的特殊性，需要对模型的关键表面进行工艺设计（余量设计），以此保证足够的精加工余量，模型完成符合性确认后才能传递至下一阶段。

模型工艺优化过程的主要特点是进行虚拟仿真成形，主要包括模型成形方向和支撑设计、成形工艺仿真、参数化机器语言三者之间的迭代优化。将上一级传递来的模型

(工艺设计结果)导入虚拟打印平台，进行初步成形方向和支撑结构设计；对于控制系统复杂构件而言，构件的合理成形方向不仅可以避免截面突变带来的打印风险，还能提高内部流道的成形质量；支撑结构设计保证在支撑面积最小的条件下实现成功打印；如何验证支撑设计的合理性以及工艺参数是否达到最优，则需要二者之间采用多尺度成形工艺仿真的方法进行迭代优化。将最终的工艺支撑模型进行切片分层处理，并根据工艺仿真结果设置打印的工艺参数，形成一系列参数化的机器语言控制设备进行打印成形。

模型打印实现过程，包含数字化模型转化为实体构件及后续质量性能检测的所有过程。由于虚拟仿真成形不能百分之百预测实际打印

过程中的诸多问题，且金属粉末床熔融过程非常复杂，因此成形质量的过程控制显得尤为重要。在过程控制中，氧含量是一个非常关键的指标，对构件的冶金质量有重要影响，因此须将成形过程的氧含量控制在合理范围；熔池稳定性、缺陷形成倾向、热应力演化对熔池，以及构件成形表面温度变化很敏感，可借助红外热成像等技术对成形过程温度进行实时监测，为工艺优化提供数据支撑；同时，设备内置的监控相机可实现铺粉、烧结质量的实时监测，及时发现打印风险，形成质量保证与追溯的闭环控制系统。

面向增材制造的设计 三维创新结构设计

面向增材制造的设计 (DFAM),

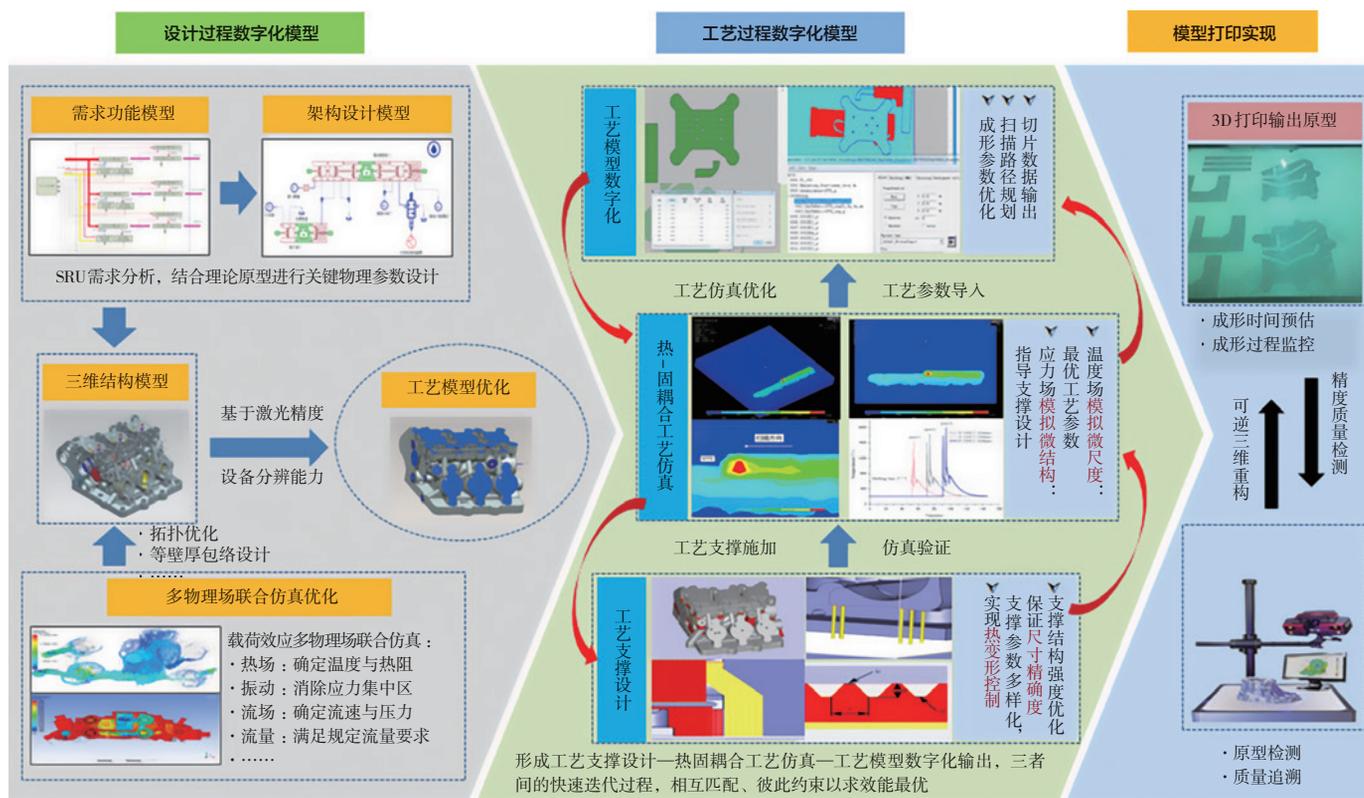


图2 由虚拟模型到物理实现的数字化传递过程

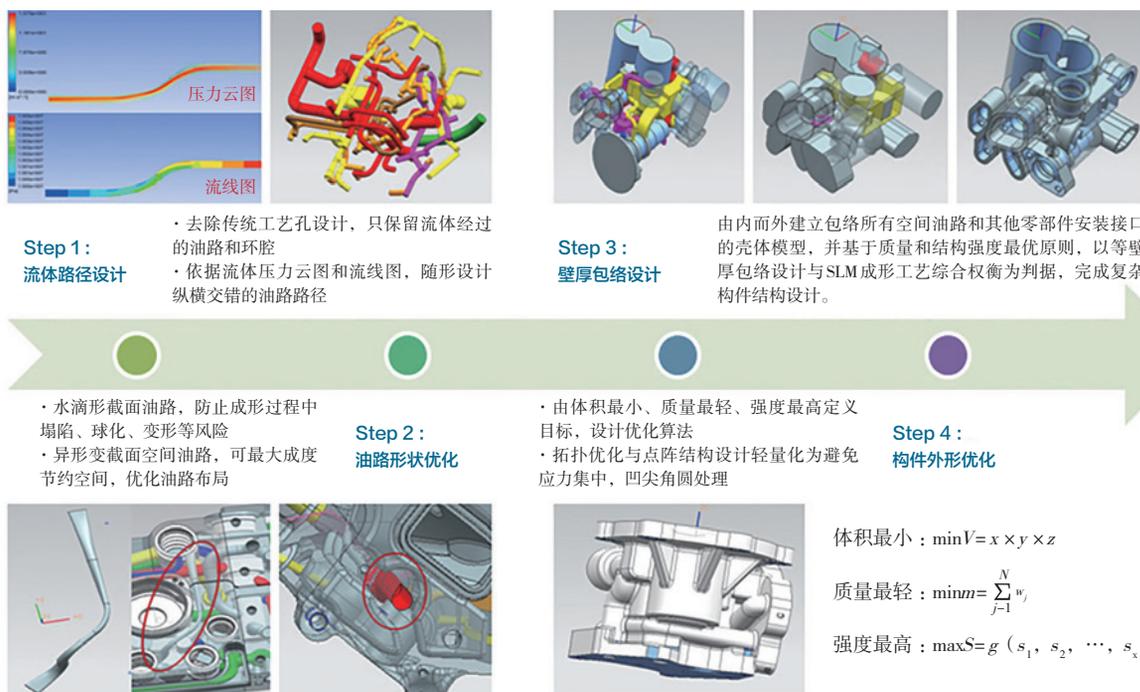


图3 面向增材制造的结构设计技术路径

是一种基于增材制造的能力, 通过形状、尺寸、层级结构和材料组成的系统综合设计最大限度提高产品性能的设计方法。DFAM改变了传统的设计理念, 从零件的三维CAD模型出发, 无须模具, 直接制造零件, 大大降低成本, 缩短研制周期。以轻量化、集约化为目标的DFAM创新结构设计, 其技术路径如图3所示。

以航空发动机燃油控制装置设计为例, 由于传统制造工艺的限制, 复杂壳体内部油路错综复杂, 给壳

体的高效加工制造带来了巨大挑战, 因此设计成供油模块壳体和计量模块壳体组合而成的分体式设计结构, 如图4(a)所示, 减轻质量的设计优化非常有限, 影响着航空发动机燃油经济性。而采用DFAM设计思路, 设计自由无约束, 根据功能与性能需求即可设计出所需复杂构件的几何形状和内部构造, 无须考虑先单独加工各个壳体、再装配出整个产品的传统设计和制造理念, 直接考虑功能模块的集成一体化设计,

复杂构件的轻量化、集约化设计目标唾手可得, DFAM设计结构如图4(b)所示。而后, 经过一系列的增材制造工艺过程, 便可实现真实复杂壳体的加工制造, 如图4(c)所示。

多物理场仿真优化

有了结构设计数字化模型, 复杂构件的结构是否全局最优? 这就需要多物理场联合仿真的快速迭代优化和验证, 来证明设计是否为有限约束条件下的全局最优化设计。针对构件的结构强度仿真(静态)和振动/模态仿真(动态), 属于应力场的动静态特性仿真范畴, 利用有限元方法仿真得到构件在极限载荷下动静态特性; 流场仿真主要是依据锐边节流孔假设和计算流体力学(CFD)理论来对构件内部复杂油路的压力损失和波动特性进行优化确认; 温度场仿真则是对构件由内而外的散热特性和由外而内的防火/耐火特性进行动态热平衡(补偿/抑制)设计的优化确认, 整体优

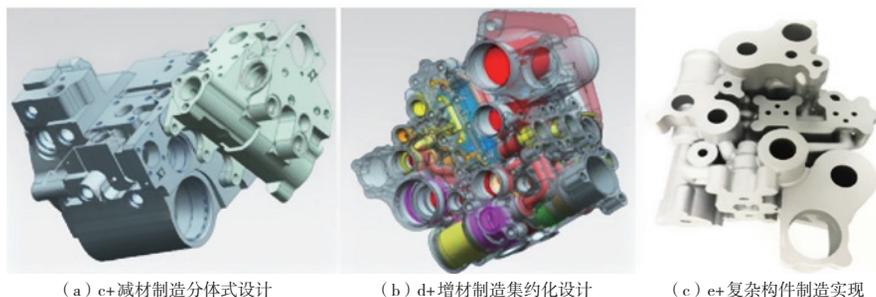


图4 发动机燃油控制装置复杂壳体结构设计

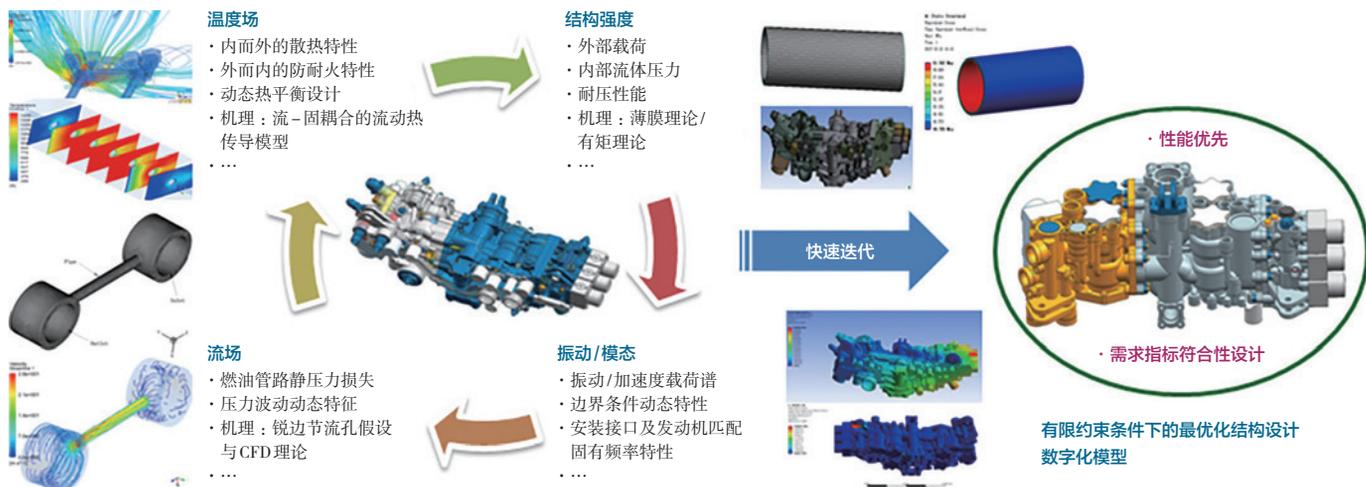


图5 多物理场联合仿真优化

化逻辑如图5所示。经联合仿真优化后，得到最终的复杂构件结构设计数字化模型。

工艺设计与仿真

工艺余量/支撑设计 面向增材制造的工艺设计包括工艺余量设计和工艺支撑设计，其设计优化技术路径为：经工艺余量设计完成的模型传递至工艺支撑设计中，经优化后最终生成工艺余量模型和工艺支撑模型。

工艺余量设计主要是通过数模

对比将三维模型拟精加工表面进行设计处理，设计中应充分考虑精加工的可切削性、材料利用率、对后处理的影响等因素。工艺支撑设计主要基于支撑面积最小、流道成形质量最佳、打印面积最小且不宜有面积突变情况等原则，设计构件的最优摆放角度；并综合考虑模型结构的复杂性，如支撑临界角度优化、非必要支撑面删除和高风险支撑面添加等，在专用支撑数据库中提取相关的支撑类型与参数，生成工艺

支撑模型。

工艺仿真优化 金属SLM成形的特点是粉末材料的逐点沉积，因此对熔池尺度的工艺仿真是解析成形微观机理的关键，同时也是进行工艺参数优化的有效途径。然而，当研究对象上升到宏观尺度的构件时，则应重点关注对宏观构件产生显著影响的因素，如温度和应力。综合考虑微观与宏观特性，提出了多尺度联合工艺仿真优化方法，如图6所示，主要涉及熔池级热-固耦合

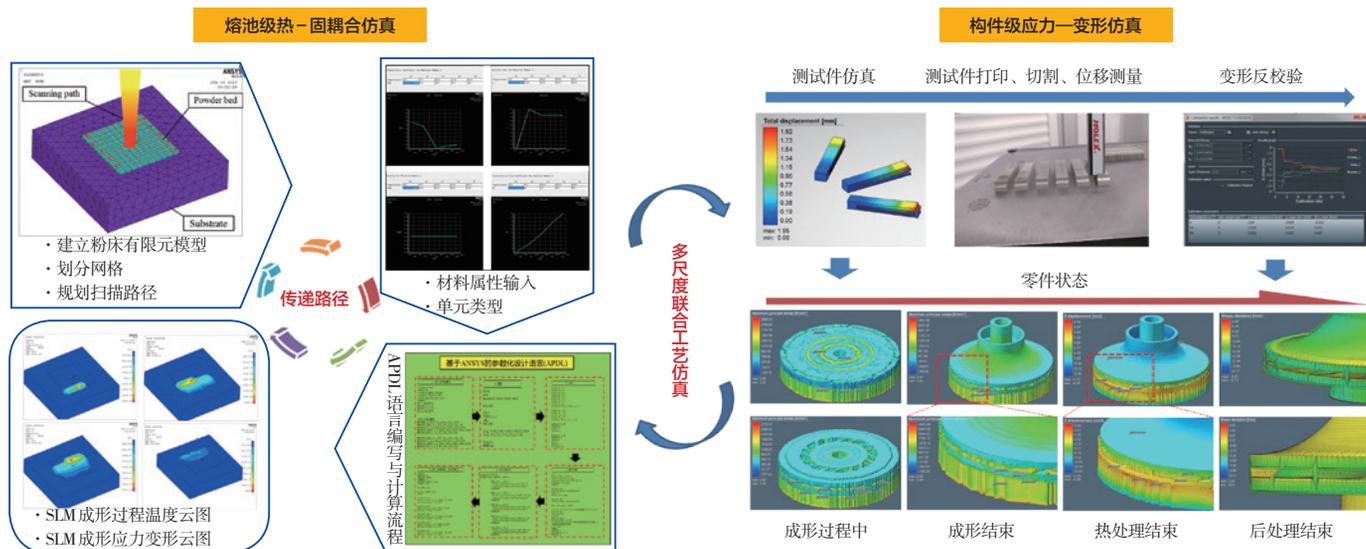


图6 多尺度工艺仿真优化

与构件级应力—变形的跨尺度仿真过程。

增材制造过程所涉及的工艺参数众多，包括激光功率、光斑直径、扫描速度、扫描路径、搭接率等，各工艺参数之间存在强耦合且相互影响，因此难以实现对成形微观过程的完整解析和工艺优化。熔池尺度的工艺仿真涉及熔池热量的传输、熔池与粉末颗粒的交互、熔池形态演化、熔池稳定性、熔池动力学等诸多复杂物理现象，通过建立工艺参数与上述物理现象的解耦敏感度模型，实现工艺参数的最优筛选。但随着研究对象变为大熔池几个数量级的构件时，构件形状复杂程度对构件温度场分布、热应力和热变形的影响则变得尤为显著。通过多尺度联合工艺仿真，可快速建立零件的成形、基板切割、热处理、去支撑等一系列虚拟制造过程，由仿真结果可对零件结构设计、成形方向设计、支撑设计的合理性进行评估与优化，并可预测打印过程可能存在的风险与隐患，为一次打印成功提供仿真数据支持。工程实践表明，多尺度工艺仿真优化在增材制造使能的快速研发迭代中发挥的作用显而易见。

增材制造实现的关键技术问题

金属粉末原材料

金属粉末原材料是增材制造中零件打印实现阶段的第一步，金属粉末性能的控制对成形效率和最终产品的质量至关重要。在材料层形成时，粉末如何流动、压缩，是性能方面的决定性因素；粉末的差异性可导致堆积密度不一致、分层不

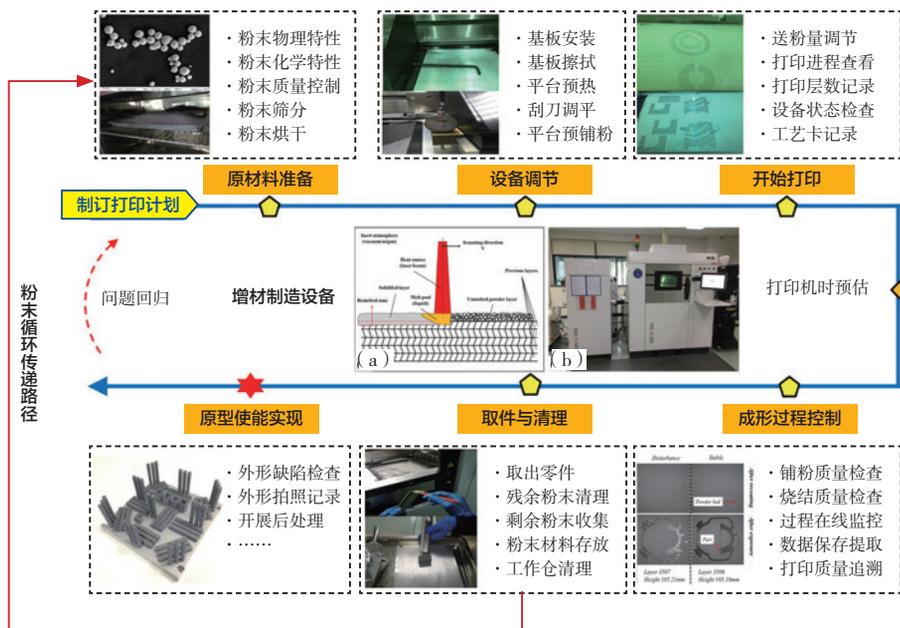


图7 快速成形制造逻辑

均匀，最终导致抗拉强度低以及表面光洁度不够。研究表明，并非所有的金属粉末都适用于增材制造，由于受到热力学和动力学规律的影响，有些粉末的成形易伴随球化、孔隙、裂纹等缺陷。特别是航空发动机零部件严苛的运行工作环境及可靠性、安全性要求，对金属粉末原材料的性能要求就更高，因此在一定程度上制约了国内增材制造技术在航空发动机中的应用。

快速成形制造

在复杂构件的快速成形制造过程中，打印过程的闭环控制是实现一次打印成功的关键，具体快速成形制造逻辑如图7所示。

在原材料端，进行上文所述的原材料特性、质量控制和过程传递控制，包括粉末材料的物理特性和化学特性的检测、多批次粉末循环使用质量控制、筛粉、粉末烘干等一系列原材料过程控制措施，确保成形源头的质量可靠性；在设备调

节与打印端，根据作业规范进行设备的调节与打印，整个过程均由操作标准与规范进行约束，确保打印过程的可重复性；在过程监控端，通过使用红外热成像设备、高分辨率相机等硬件，对成形过程的温度、打印质量进行实时监控，保证及时发现并解决打印问题，并对数据进行采集保存，以备后期的质量追溯；在取件与清粉端，依据工艺规范卡片进行操作，同时将剩余粉末经质量检测后传递至第一步中的原材料端，完成快速成形制造的闭环控制逻辑。

后处理技术

快速成形制造的构件需经过特定的后处理才能最大程度的发挥其应有的性能。面向增材制造的航空发动机控制系统复杂构件的后处理技术主要包括：热处理、喷砂、喷丸、化学光整、磨粒流体光整等。

SLM成形过程中高温梯度、快冷却速度使构件内部组织极为细

小，性能普遍优于铸件或与锻件相当，但仍可以通过热处理实现强度与塑性的最佳匹配，从而显著提高构件的综合力学性能，通常采用（真空）热处理炉或热等静压（HIP）方式；喷砂、喷丸作为一种外表面处理技术，可对成形构件外表面粘粉、氧化皮等物质进行有效机械去除，使构件的外表面粗糙度得到一定程度的改善；化学光整主要通过能与构件发生化学反应的特定浓度酸碱液交替对构件进行清洗，构件金属表面与溶液发生轻微化学反应并去除相应材料，实现构件内外表面非选择性光整；磨粒流体光整属机械选择性抛光，通过将一定压力的半固态磨料压入构件某一条或多条流道，由磨粒与流道内表面产生的磨削作用去除材料，实现复杂构件内

表面的光整加工。通过调节磨料特性，并配合专用工装，可使流道内表面获得较高的表面质量（甚至达到镜面），因此特别适合对航空发动机控制系统复杂构件内流道进行光整处理。

质量检测评估与验证

产品质量检测评估与验证是增材制造产品能否真正实现工程化应用的评判准则，具体实施途径遵循图8所示的技术流程，其中主要包括产品质量检测、产品功能与性能验证与产品符合性认证三部分，以及评估检测、验证与认证过程所涉及的与产品相关的质量信息数据库。通过对产品进行逐级评估与验证，最终达到适航认证目标。

成形构件完成处理流程后，首先进行制品零部件质量检测，从控

形/控性的角度分别将产品的尺寸精度、表面精度等形貌相关检测和成形缺陷、基本力学特性、高频疲劳特性等性能相关检测联系起来，构建产品质量的检测条件与评估准则；在零部件质量检测满足要求的基础上，再进行配装产品的功能与性能验证，如根据产品使用场景开展的流量压力特性考核和环境考核等；然后开展系统级产品的综合验证和整机级的台架试验考核；最后，进行适航认证相关的一系列验证与确认，确保满足飞行安全性要求。

对于任何一个产品来说，在产品质量检测评估与验证过程每一阶段形成的质量信息数据，均包含产品检测和验证的所有数据信息，如图8所示，因此每个特定的产品均对应与其自身质量性能相关的特定数

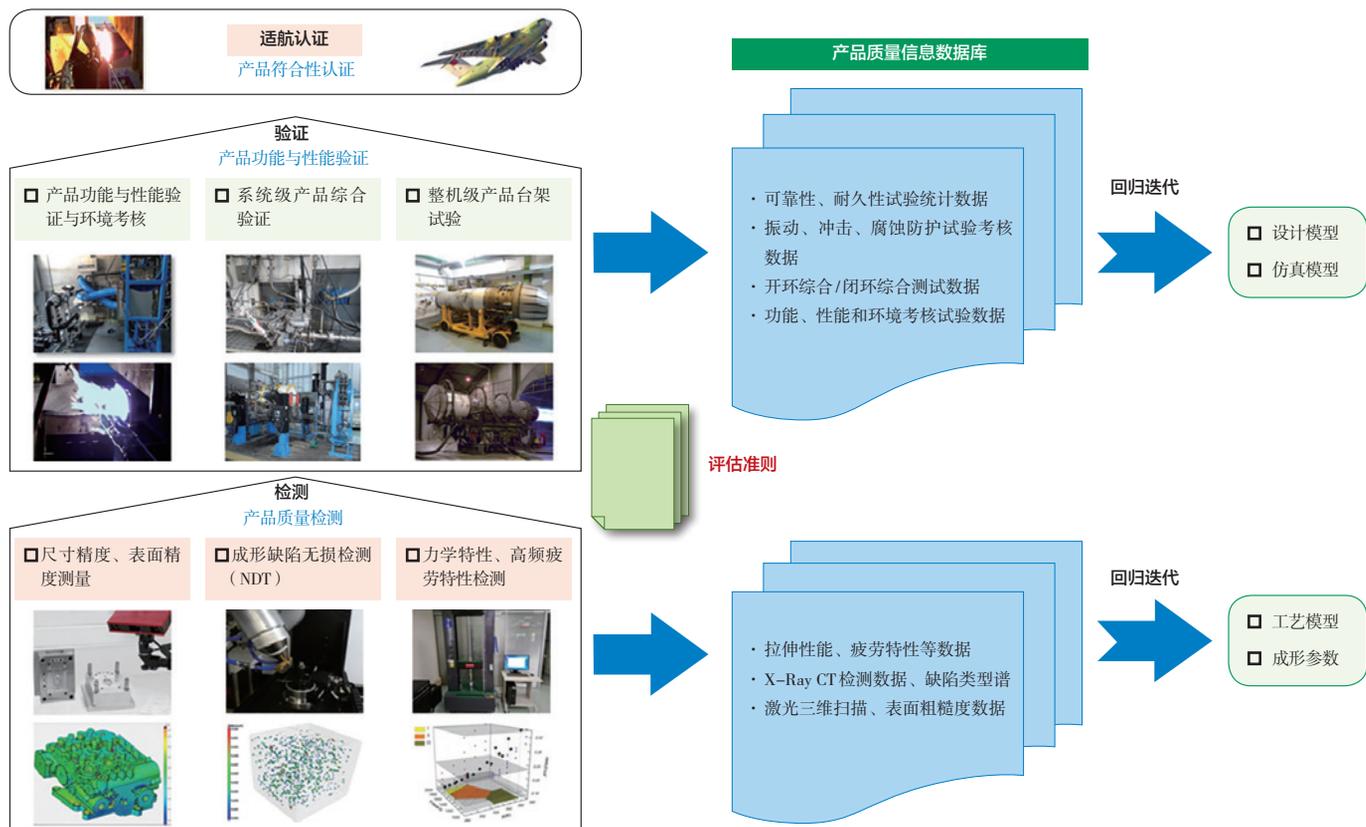


图8 产品质量检测评估与验证流程

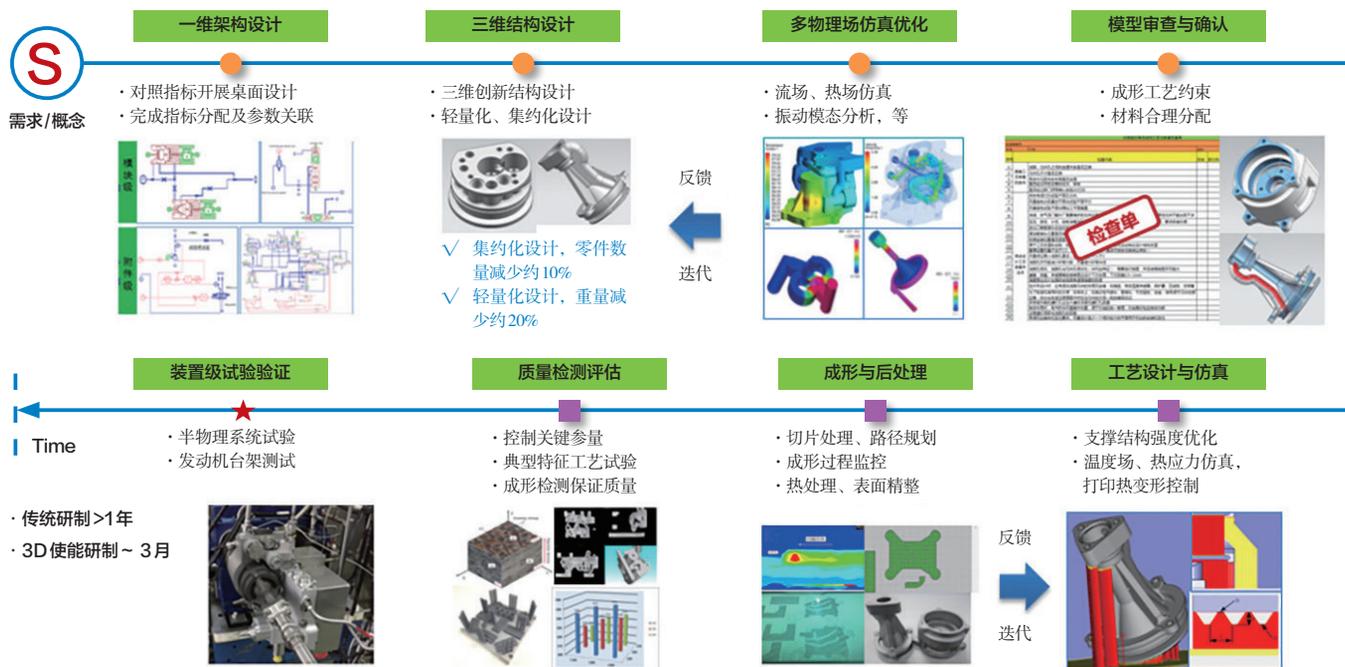


图9 涡轴发动机复杂控制构件研发快速迭代技术工程化应用

据。数据由平台进行管理形成数据库,并跟随产品服役的全生命周期过程,不仅可以为系统级产品满足适航要求提供保障,且在服役过程中发生的任何产品局部损伤、失效等问题,可通过前期考核验证形成的数据进行追溯、分析与查证。在产品质量信息数据库中,产品检测与评估的相关数据可回归迭代至工艺模型和成形参数,产品功能与性能验证和符合性认证的相关数据可回归迭代至设计模型和仿真模型,实现模型和参数的修正与优化。

工程应用实践

以涡轴发动机燃油泵调节器离心泵研发为例,采用基于数字化模型驱动和SLM增材制造技术相融合的快速研发迭代技术路径和方法,在创新设计、工艺仿真、成形质量等研究方向进行了突破,将建模、仿真和优化融为一体,完全实现了由需

求概念到真实物理级产品的快速、高效、质量可靠的交付,研制周期由传统研发模式的1年以上缩短为现在的不足3个月,同时产品的零部件数量减少10%,质量减轻约20%,大大节约了产品的研制成本,目前已通过了部件试验、数控系统半物理模拟试验、发动机台架试验以及相关环境验证考核,试验结果表明各项指标性能均符合设计和制造要求。

结束语

基于数字化模型驱动和SLM增材制造技术相融合的航空发动机控制系统复杂构件研发快速迭代技术与工程应用实践,得到了如下结论。

一是从复杂产品的需求概念到结构工艺设计,采用基于数字化模型驱动的正向研发模式和桌面级仿真验证快速迭代回归,减少了试错环节,初步实现了产品“设计一步到位”的目

标要求,为航空发动机控制系统研发模式转型升级奠定了基础。

二是面向SLM增材制造技术的复杂构件轻量化、集约化设计与成形制造,为复杂构件提供了一种高柔性、短周期、低成本使能手段,不仅突破了传统机加工工艺的局限性,而且促进形成了复杂构件创新结构设计的思路,引导设计与制造向功能一体化的“自由设计、简单制造”方向发展。

三是基于数字化模型驱动和SLM增材制造技术相融合的快速迭代技术,可实现设计制造一体化等特点,突破航空发动机关键部件轻量化、集约化、高性能、高可靠等技术,提高研发效率,加速验证回归迭代,为实现航空发动机正向自主研发提供了全新的完整解决方案。

(陈静,中国航发动控所,高级工程师,长期从事航空发动机控制系统研究工作)