

# 航空发动机设计制造并行协同方案研究

李伦未, 邓 迪, 王 晶, 许 多, 伏 宇

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**[摘要]** 针对现有的设计制造协同方案进行优化,重点整合了并行协同研制流程,实现了设计和制造同步开展;进而探讨了该优化方案的若干实施途径。经分析,该优化方案能进一步缩短设计试制周期约 2~3 个月,促进设计制造紧密融合,提高设计质量和制造符合性,并可期降低研制成本。

**关键词:** 航空发动机;设计制造协同;并行协同;协同研制;研制周期

## Research on Concurrent Collaborative Solutions of Aero-Engine Design and Manufacturing

LI Lunwei, DENG Di, WANG Jing, XU Duo, FU Yu

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**[ABSTRACT]** Based on the former design and manufacturing collaboration solution, an optimized solution has been prompted, focusing on reconstruction of the concurrent collaborative development process, to impel design and manufacturing to operate simultaneously. Furthermore, some implementation ways of the optimized solution have been discussed. According to the analysis, the total time of design and manufacturing can be furtherly cut down about two or three months by applying the optimized solution, in comparison with the former one. Besides, design and manufacturing can be integrated tightly, so that design quality and manufacture conformance can be improved, and development cost can be expected to decrease.

**Keywords:** Aero-engine; Design and manufacturing collaboration; Concurrent collaboration; Collaborative development; Development cycle

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.062

随着国家“两机重大专项”的实施,航空发动机重点型号在保证产品质量的前提下,对研制周期要求更加苛刻。以某型发动机为例,后续平均年产量约为 15~20 台,但单台试制周期仅为 9 个月,若按现有研制模式,难以满足剩余周期要求。现行体制下厂所分离导致设计和制造分别由两个不同责任主体独立承担,沟通协调严重不足:设计不了解材料、工艺和设备对产品的约束,工艺不理解产品中蕴藏的设计意图。一方面造成设计质量和制造符合性不高;另一方面也带来研制周期紧张。据统计,某型发动机 3 个批次的设计更改率分别达到 150%、120% 和 60%,其中工艺提出的更改约占 1/2;整体叶盘、叶环等机加件几乎没有零呈报交付;单台发动机的试制周期约为 12~15 个月。分析其原因,前期设计工艺互相介入不够、设计工艺协调周期长和沟通不到位占据较大比重。综合来看,为解决上述问题,关键要从两方面着手:(1)转变研制模式,促使设计、制造两个

环节紧密衔接;(2)突破体制限制,促使设计、制造两大主体充分融合。这恰好契合“并行工程”的思想,国内外已有很多先进实践案例表明,采用设计制造并行协同是提高质量、缩短周期和降低成本的最佳途径和必然趋势。

并行工程自提出以来,其理论和方法已经被广泛应用于航空航天、汽车、电子、医疗等工程领域<sup>[1-3]</sup>,以适应企业持续发展和获得竞争优势的需要。基于并行工程思想,衍生出了以网络化和数字化为特征的并行协同研制模式。以航空领域为例,波音公司在波音 777、波音 737NG 研制中,全面采用数字化技术进行产品研发,实施了并行工程<sup>[4-6]</sup>;洛克希德·马丁公司在 JSF 研制中建立了工程和制造协同环境,支持全球供应商开展异地协同研制工作<sup>[4,6]</sup>;波音公司在波音 787 研制中构建了全球协同研制环境,从“同地”并行协同发展成为“异地”并行协同,团队模式从设计制造团队(DBT)、集成产品

团队(IPT)发展成为产品全生命周期团队(LCPT)<sup>[4]</sup>;空客公司建立了全球化高度并行协同的研制工作模式,利用数字化技术实现了A380、A350等研制的跨地域协同<sup>[4-8]</sup>;ARJ21飞机研制采用并行协同研制模式,实现了型号的异地多厂所研制<sup>[7]</sup>;借助大飞机等重大工程项目,多家参研单位开展了分布式数字化协同研制平台的建设和应用,提高了研制效率<sup>[8]</sup>;罗罗公司构建了开放式的协同框架与平台,面向产品全生命周期支持全球设计和制造等业务的高效协作<sup>[9]</sup>。国内飞机、航空发动机等行业多以基于模型的定义(MBD)技术为基础,在设计制造协同研制模式、工作流程、组织模式、协同研制平台方面开展了相关研究和应用<sup>[5,9-17]</sup>。

我国航空发动机行业在“十一”、“十二五”期间针对设计制造协同关键技术开展了相关课题研究和验证,目前已经初步建成集团公司级的协同研制平台,初步具备支持跨地域、多厂所协同研制的的能力,基本保障了型号研制的开展<sup>[9,14-17]</sup>。但国家两机重大专项对航空发动机重点型号研制周期的要求愈加苛刻,试制周期须压缩至9个月,因此必须探索加快型号研制的新思路、新方法,来应对面临的困难和挑战。本文以现有的设计制造协同方案为切入点,研究提出了一种更优的并行协同方案。

## 1 现有方案

一般而言,航空发动机研制需在质量特性、研制周期和研制成本三者之间进行权衡。假定 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为影响航空发动机研制的若干因素, $q(x)$ 、 $t(x)$ 、 $c(x)$ 分别为航空发动机质量特性、研制周期和研制成本的函数, $q_0$ 、 $t_0$ 、 $c_0$ 分别为3者的目标值,则航空发动机研制可简化为如下多目标优化的数学模型:

$$\begin{aligned} & \text{Min}[-q(x), t(x), c(x)]^T \\ & \text{s.t.} \begin{cases} q(x) - q_0 \geq 0 \\ t(x) - t_0 \leq 0 \\ c(x) - c_0 \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

现有的航空发动机研制方案分为串行和并行两种。采用何种方案,取决于航空发动机质量特性、研制周期和研制成本3个维度的目标定位,分别为 $q_0$ 、 $t_0$ 和 $c_0$ 。假设不考虑设计、制造各自技术进步和革新对 $q(x)$ 、 $t(x)$ 和 $c(x)$ 的影响,那么,若仅对 $q_0$ 要求较高,而对 $t_0$ 和 $c_0$ 要求宽松,则采用串行研制便可应对;若同时还对 $t_0$ 和 $c_0$ 要求较高,则采用并行研制势在必行。本文重点探讨不同方案的研制周期 $t(x)$ ,为便于比较,逐一对串行研制和并行研制方案进行阐述。

### 1.1 串行研制

串行研制主要是指制造环节是在设计环节完成后才开始启动,如图1所示。其中,设计环节包括需求分析与定义、功能/架构设计、结构详细设计和工程图设计;制造环节包括生产准备(含毛坯设计、采购订货、工艺设计和工装研制等)和全面加工;设计和制造之间通过工艺会签和设计更改进行衔接。

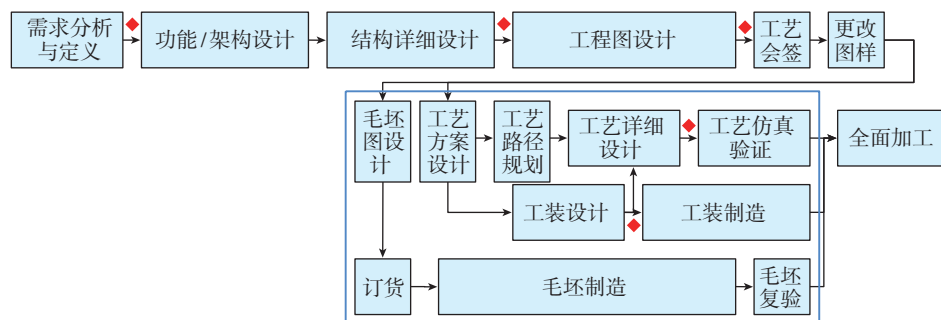
串行方案(简称方案A)是由传统研制分工,厂所分离自然形成的,后续工作必须在前置工作完成之后开始,如果前置工作未完成,则后续工作只能被动等待。研制前端以设计为主,然后转为以制造为主,其弊端是前期设计工艺沟通协调不充分,易造成设计反复,并且生产准备滞后、研制总周期长。

该方案的研制周期 $t_A(x)$ 可表示为:

$$t_A(x) = \sum_{i=1}^8 t_i(x) \quad (2)$$

式中, $t_1(x)$ 对应需求分析与定义, $t_2(x)$ 对应功能/架构设计, $t_3(x)$ 对应结构详细设计, $t_4(x)$ 对应工程图设计, $t_5(x)$ 对应工艺会签和设计完善, $t_6(x)$ 对应生产准备, $t_7(x)$ 对应全面加工, $t_8(x)$ 对应试验验证。

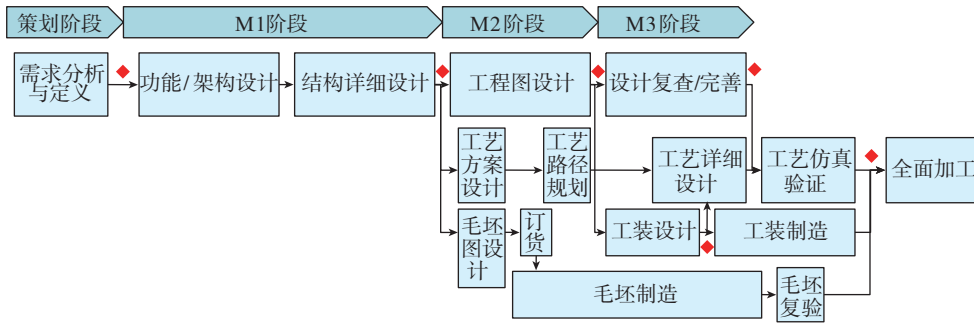
综合几型发动机的研制情况来看,单个轮次或批次发动机研制的 $t_1$ 约为3个月, $t_2$ 约为3个月, $t_3$ 约为3个月, $t_4$ 约为4个月, $t_5$ 约为2~3个月, $t_6$ 约为4~8个月, $t_7$ 约为8~10个月, $t_8$ 约为15~18个月,故 $t_A$ 约为42~52



注: ◆表示评审控制点; □表示生产准备。

图1 串行研制流程

Fig. 1 Serial development process



注：◆表示评审控制点。

图2 原有的协同研制流程

Fig. 2 Former collaborative development process

个月。对于  $t_6$ , 毛坯设计约 0.5 个月, 毛坯制造约 3~6 个月, 毛坯复验约 1 个月; 工艺设计约 2~3 个月, 工装设计约 2 个月, 工装制造约 3 个月。

### 1.2 并行研制

航空发动机行业在“十二五”期间建立了一套基于 MBD 成熟度等级的设计制造协同方案(简称方案 B), 如图 2 所示。一般将航空发动机 MBD 成熟度分为 M1、M2 和 M3 3 个等级<sup>[15,17]</sup>, 与之对应, 可将研制过程分为 M1、M2 和 M3 3 个阶段。

该方案将工艺协调、生产准备提前至与设计过程并行, 即在每一阶段成熟度模型发放后, 启动相应的毛坯设计、工艺设计、工装设计等工作。由于设计、工艺的沟通协调提前, 设计意图可得到更好贯彻, 产品工艺性可得到更好保证; 同时可在保持设计、制造各自周期基本不变的前提下, 压缩设计试制总周期。

该方案的研制周期  $t_B(x)$  可表示为:

$$t_B(x) = \sum_{i=1}^4 t_i(x) + t_5^*(x) + t_6^*(x) + \sum_{i=7}^8 t_i(x) \quad (3)$$

式中,  $t_1(x)$ 、 $t_2(x)$ 、 $t_3(x)$ 、 $t_4(x)$ 、 $t_7(x)$ 、 $t_8(x)$  与式(2)相同;  $t_5^*(x)$  对应 M3 设计复查/完善, 与其并行的工作主要包括工装设计、工艺详细设计等;  $t_6^*(x)$  对应 M3 发放后生产准备, 主要包括工艺仿真验证、工装制造等。对比式(2)和(3), 方案 B 节省的周期主要包括毛坯图设计、毛坯制造、工艺工装设计等。仍以几型发动机的研制情况为例,  $t_5^*$  约为 2~3 个月,  $t_6^*$  约为 2~3 个月,  $t_B$  相比  $t_A$  最长可节省周期约 6 个月。若毛坯制造、工装研制周期越长, 则周期压缩的效果越显著。

值得指出的是, 该方案得以实施得到了两个方面的保障: 数字化的研发技术和网络化的支撑环境。其中, 数字化以基于 MBD 成熟度等级的数字样机为特征, 网络化以跨组织、跨地域的 PDM 协同平台为特征。

但这种方案显而易见的问题是, 策划阶段未给予制造约束足够关注, 且每一阶段的生产准备仍是在相应的结构模型发放后才得以开展的。以 M1 阶段为例, 结构

详细设计后得到 M1 结构模型, 而毛坯图设计、工艺总方案设计、工艺路线规划却是在 M1 阶段之后以发放的 M1 结构模型为依据进行的, 实际上是与 M2 阶段并行的, 而并没有与 M1 阶段并行。造成这种现象的直接原因是制造厂存在结构设计状态不锁定可能导致毛料不可用、工艺工装重做的担忧, 背后原因还是厂所责任的分离和风险共担机制的缺失。

根据图 2 和式(3),  $t_6^*$  未包含在 M1、M2 和 M3 阶段内, 故试制周期应为  $t_6^* + t_7$ , 约 10~13 个月, 尚不能满足重点型号单台试制周期 9 个月的要求。同时, 由于设计和工艺仍是分分管控、单独评审的, 相互的约束力不强, 较难保证后续不发生反复。

## 2 并行协同优化方案

针对并行研制中所述问题, 在某重点型号发动机研制中提出了一种促进设计制造更加紧密、并行协同的优化方案(简称方案 C)。将每一阶段的生产准备工作进一步提前, 真正实现与相应的设计工作同步并行开展, 并在策划阶段将制造约束纳入需求分析与定义一同考虑, 如图 3 所示。

与方案 B 相比, 这种方案能够实现各阶段设计与制造的真正并行, 促进设计工艺更充分地沟通协调及快速迭代; 同时, 评审控制点不再针对设计、工艺单独设置, 而变成面向协同设计的产品设置, 由双方共同对协同数据和最终设计结果负责。为清晰起见, 将图 3 简化成图 4 的表达形式。

由图 4 可见, 方案 C 通过优化整合, 将方案 B 中设计与工艺之间的顺序式交互, 转变为协同设计过程的内部迭代, 省掉了发放等待时间, 实现每一阶段的工作同步和对工作结果的共同确认, 有利于促使设计、制造两大责任主体充分融合。

该方案的研制周期  $t_C(x)$  可表示为:

$$t_C(x) = \sum_{i=1}^4 t_i(x) + t_5^*(x) + \sum_{i=7}^8 t_i(x) \quad (4)$$

式中,  $t_1(x)$ 、 $t_2(x)$ 、 $t_3(x)$ 、 $t_4(x)$ 、 $t_7(x)$ 、 $t_8(x)$  与式(2)、式(3)相同;  $t_5^*(x)$  对应 M3 设计复查/完善, 与其并行的工作主要包括工艺仿真验证、工装制造等, 对比方案 B 可知, 这正是方案 C 可进一步节省的时间  $t_6^*(x)$ , 约 2~3 个月。实际上, 将所有生产准备并入到协同设计之后, 试制周期主要就是动刀加工周期  $t_7$ , 约 8~10 个月, 能够满足重点型号单台试制周期 9 个月的要求。

串行研制(方案 A)、原有的协同研制(方案 B)和优化的并行协同(方案 C)3 种方案的特点对比见表 1。

### 3 实施途径

并行协同优化方案的核心在于通过流程整合将设计和制造(生产准备)紧密耦合起来, 随之而来的转变是设计和制造两大责任主体融合为一体。为适应这种转变, 不可或缺地在厂所协同研制的管理机制、工作方式、研制团队和协同平台等方面也应进行相应调整。图 5 所示为实施并行协同研制的主体架构, 其中协同流程是核心, 协同平台是基础, 协同管理和协同团队是保障。

### 3.1 建立协同管理机制

按照图 4 所示, 从需求分析与定义开始, M1 协同设计、M2 协同设计及 M3 协同设计每一阶段的设计、制造工作是高度耦合的, 内部迭代、协同更加显现; 且每一阶段的设计、制造数据是研制团队共同确认和生效的, 设计和制造实际上成为一个责任主体, 因此在管理层面, 需研究建立与协同流程相匹配的协同管理机制, 来支撑协同流程的运行, 至少应包括: (1) 任务统一规划, 完整考虑各种研制需求和约束, 共同开展设计、制造工作策划, 共同对研制任务进行分解; (2) 计划协调编制, 共同编制研制工作计划, 使厂所的科研、生产计划协调统一; (3) 资源统筹配置, 构建协同研制团队, 实现厂所协同研发相关的人力、设备等资源的统筹配置; (4) 风险共担, 调整现有采购制度, 确立风险共担机制, 加强风险动态管控; (5) 产品状态共同确认, 以共同的评审控制点为依托, 同时确认产品设计、制造数据, 确保产品状态的一致性和符合性。

这将对厂所内部原有的管理制度、管理方式造成一

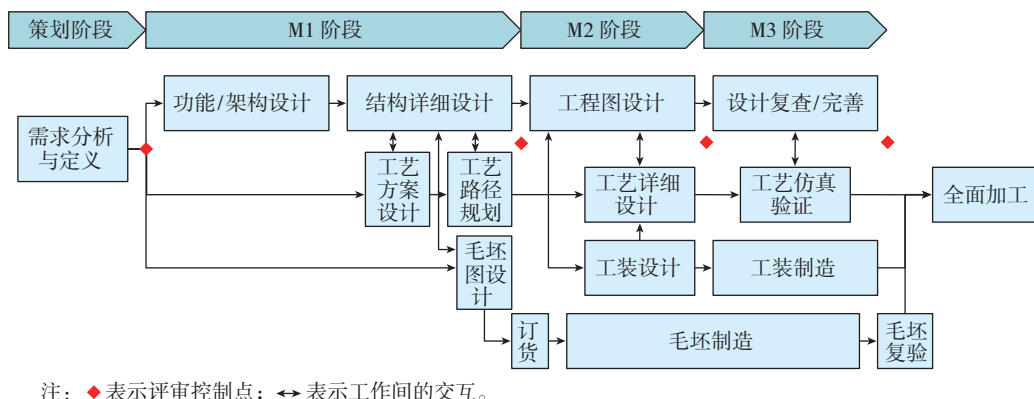


图3 优化的并行协同研制流程

Fig. 3 Optimized concurrent collaborative development process

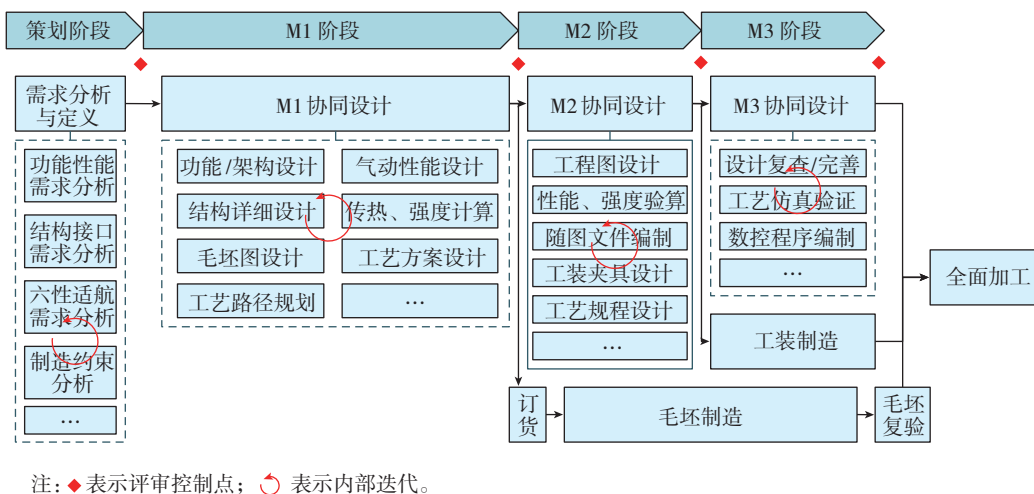


图4 优化的并行协同研制流程(简化后)

Fig. 4 Optimized concurrent collaborative development process (simplified)

表1 3种方案特点对比  
Table 1 Comparison of the three solutions

类别	串行研制方案(A)	原有的协同研制方案(B)	优化的并行协同方案(C)
研制流程	串行,工艺会签及设计更改完成后,才启动生产准备	并行,分 M1、M2、M3 3 个阶段协同,根据各阶段的结构模型,提前开展相应的生产准备	并行,分 M1、M2、M3 3 个阶段协同,生产准备进一步提前,与各阶段相应的设计工作同时开展
数据协同	集中在工艺会签,前期沟通严重不足,后续加工过程中设计反复多	本质上仍为串行协调,即各阶段生产准备在相应的结构模型发放后才启动	并行协调,各阶段双方同步开展工作,快速进行数据迭代,共同对协同数据负责
评审控制点	设计和工艺各自控制,分开评审	设计和工艺各自控制,分开评审	面向产品对象,共同控制、同时评审
团队模式*	设计和工艺分离	设计和工艺分离,但相互沟通加强	设计和工艺紧密融合,向跨厂所协同研制团队(IPT)转变

注:\* 团队模式取决于研制模式或流程。

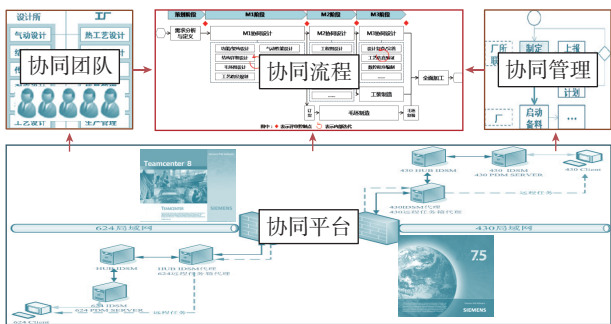


图5 并行协同实施架构

Fig.5 Implementation framework of concurrent collaboration

定的冲击,因此首先要取得管理层的支持并下决心推动,还得结合实际稳步实施,如何平衡是巨大考验。

### 3.2 制定协同工作规范

如图4所示,并行协同流程每一阶段均包括若干具体的设计、制造工作,进而产生一系列设计、制造数据,而这些工作和数据之间存在频繁的迭代、交互,因此在技术层面,需研究制定与协同工作相关的一系列配套规范(包括办法、要求和指南等),来指导具体协同工作的开展,至少应包括:(1)设计制造协同工作流程及工作要求;(2)设计制造协同评审点设置及评审要求;(3)设计制造协同数据分类及定义;(4)典型零组件联合设计标准,包括基准设计、公差设计、尺寸链设计、配合设计、平衡设计、表面完整性设计、检测设计、毛坯设计、工艺设计、工装设计等;(5)基于协同平台的协同研制团队创建及维护;(6)基于协同平台的协同共享区创建及数据管理;(7)基于协同平台的协同数据异地审签。

这需要对厂所内部原有的业务流程和关系进行适应性调整,但涉及面较宽、涉及程度较深,改变已形成的习惯困难和障碍较大,需由点及面稳步过渡和铺开。

### 3.3 构建协同研制团队

并行工程的实施,组织保障必不可少<sup>[1,2,7,9-10]</sup>,这是打破组织壁垒、促进沟通协调、提高研制效率和质量的

重要保证。在并行协同优化方案中,设计和制造已融合为一个责任主体,因此必须构建跨厂所的协同研制团队(IPT),赋予相应的职责和权限。根据图4所示流程中各阶段协同工作特点的不同,按以下方式构建IPT:

(1)在策划、M1和M2阶段,主要以设计为牵引完成需求分析、结构设计、毛坯设计、工艺工装设计、毛料采购等,因此IPT组长由设计所结构设计负责人担任,制造厂主工艺员担任副组长,沟通协调主要在设计所开展;

(2)在M3阶段,主要以工艺为牵引完成设计复查完善、工艺文件准备、工装制造和毛坯复验等,因此IPT组长由制造厂主工艺员担任,设计所结构设计负责人担任副组长,沟通协调主要在制造厂开展。

IPT对各阶段的协同设计工作和协同数据负责,各阶段厂所同步开展工作,快速进行数据迭代,最后同时进行评审。

要实现厂所协同团队对每一阶段同步开展工作的强力支撑,从协调到协同的意识转变是关键也是难点之一,需持续加强培训和引导,并提供现场集中办公或网络化协同办公的条件,促进协同团队成员紧密沟通、协作。

### 3.4 完善协同研制平台

目前,航空发动机行业已通过航发网开展了基于HUB的PDM协同平台建设和部署,初步具备支持跨区域、多厂所协同研制的的能力,基本可实现协同数据共享、远程登录审签功能<sup>[15-17]</sup>,但在传输速率、响应时间、会签对象与流程同步等方面需更深入地研究解决办法,以适应设计制造紧密、并行协同的更高要求,主要包括:

(1)快速的数据交互和设计迭代:并行协同研制流程每一阶段涉及到多轮设计迭代和数据交互,对数据传输量和传输速率均有更高要求。

(2)强耦合的IPT组织架构:设计制造协同工作更加紧密,要求突破传统的权限管理机制,采用新的方式组建和管理IPT,使团队协作更为简洁和高效。

(3)频繁的远程流程交互审签:不论是过程性的还

是最终的设计、制造数据,均需通过协同平台进行审签确认,故对跨厂所的远程审签流程的运行效率和稳定性要求较苛刻。

(4)复杂的产品状态控制和技术数据管理:设计迭代和数据交互频次的增加,将使技术数据的一致性管理和产品状态控制变得更为复杂,除必要的业务规则外,协同平台的支持必不可少。

协同研制平台是支持协同团队网络化协同办公的基本条件,协同数据交互规模之大和频率之高、协同交互参与角色复杂等对协同平台运行的稳定性和效率要求极高,这是一大痛点,尚有较大提升空间。

## 4 结论

本文基于原有设计制造协同方案提出的并行协同优化方案,实现了每一阶段的设计制造并行,强化了协同设计的内部迭代,主要结论如下:

(1)优化后的并行协同方案可进一步压缩设计试制的总周期,约2~3个月;

(2)得益于协同工作方式和评审控制机制的改进,设计制造的交互效率可进一步提升,以往因设计工艺沟通不足导致的产品设计质量和制造符合性不高的情况有望改善;

(3)随着产品设计反复的减少和资源浪费的降低,研制成本可期得到降低;

(4)为保障设计制造并行协同方案的顺利实施,相应的协同管理机制和工作规范、协同研制团队及协同平台等支撑极为重要。

## 参考文献

- [1] 朱云仙,真虹. 国外并行工程研究与应用进展综述[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(4): 66-69.
- ZHU Yunxian, ZHEN Hong. Review of oversea research and application in concurrent engineering[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(4): 66-69.
- [2] 邹灵浩,吴伏家. 现代设计制造中的并行工程技术[J]. 机械管理开发, 2004(5): 43-46.
- ZOU Linghao, WU Fujia. Research on concurrent engineering technology in modern design and manufacture[J]. Mechanical Management and Development, 2004(5): 43-46.
- [3] 周世平,刘丽霞,陆进宝. 飞机工程中并行工程实践性研究[J]. 国防制造技术, 2013(2): 40-43.
- ZHOU Shiping, LIU Lixia, LU Jinbao. Research on practicality of concurrent engineering in aircraft engineering[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(2): 40-43.
- [4] 范玉青,梅中义,陶剑. 大型飞机数字化制造工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- FAN Yuqing, MEI Zhongyi, TAO Jian. Digital manufacturing

engineering of large aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.

[5] 付广磊,王仲奇,吴建军,等. 飞机设计制造协同流程的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(4): 560-566.

FU Guanglei, WANG Zhongqi, WU Jianjun, et al. Research on concurrent progress between design and manufacture in aircraft manufacturing[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(4): 560-566.

[6] 李山,张光星. 航空发动机数字化制造技术的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2009, 52(7): 66-69.

LI Shan, ZHANG Guangxing. Application and development of digital manufacturing technology on aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(7): 66-69.

[7] 刘雅星. 飞机并行协同研制模式与支撑技术探索[J]. 航空制造技术, 2010, 53(18): 77-80.

LIU Yaxing. Study on aircraft concurrent and collaborative design and support technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(18): 77-80.

[8] 刘雅星. 航空制造业数字化协同技术综述[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 66-71.

LIU Yaxing. Review of digital cooperative technology in aeronautical manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 66-71.

[9] 陈冰. 面向智能制造的航空发动机协同设计与制造[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 16-21.

CHEN Bing. Collaborative design and manufacturing of aeroengine oriented to smart manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 16-21.

[10] 亓江文. 基于MBD技术的设计制造并行协同新模式探索与实践[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 99-104.

QI Jiangwen. Exploration and practice on novel concurrent collaborative mode of design & manufacturing based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 99-104.

[11] 王胜任. 航空产品异地并行研制协同工作平台构建与实施应用[J]. 中国制造业信息化, 2012, 41(23): 13-16.

WANG Shengren. The construct and implement of distributed parallel collaborative work platform for aviation products development[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012, 41(23): 13-16.

[12] 赵爽,负周会,郑堂介,等. 基于厂所协同的航空产品研发制造集成平台架构研究[J]. 教练机, 2012(1): 20-24.

ZHAO Shuang, YUN Zhouhui, ZHENG Tangjie, et al. Study on aviation products development-manufacture integrated platform construction based on the cooperation of factory and institute[J]. Trainer, 2012(1): 20-24.

[13] 刘兵,骆花花,王玮. 航空厂所异地协同研制平台研究[J]. 科技广场, 2016(4): 37-41.

LIU Bing, LUO Huahua, WANG Wei. Research on collaborative development and manufacturing platform for aviation factories and institutes of different locations[J]. Science Mosaic, 2016(4): 37-41.

[14] 张定华,李山. 航空发动机数字化协同平台关键技术研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(17): 35-39.

(下转第73页)

变率条件下的误差发散性明显提高。

## 4 结论

(1) 通过进行准静态压缩试验,对 7B04 铝合金 Johnson-Cook 本构模型应变硬化项和热软化项的系数进行了辨识,并建立了本构模型的应变软化项。

(2) 根据经典切削理论,结合直角自由切削试验,建立了 7B04 铝合金 Johnson-Cook 本构模型应变率硬化项系数的经验公式。

(3) 经过验证发现,Johnson-Cook 本构模型能够较为准确地对 7B04 铝合金切削过程中的应力进行仿真。

## 参考文献

[1] 张宁,王耀奇,侯红亮,等. 7B04 铝合金超塑变形行为[J]. 材料工程,2017,45(3): 27-33.

ZHANG Ning, WANG Yaoqi, HOU Hongliang, et al. Super plastic deformation behavior of 7B04 Al alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(3): 27-33.

[2] 毕运波,柯映林,董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(3): 397-402.

BI Yunbo, KE Yinglin, DONG Yuehui. Finite element simulation and analysis of deformation in machining of aeronautical aluminum alloy thin-walled workpiece[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008, 42(3): 397-402.

[3] 李琳,解丽静,王西彬,等. 金属切削加工中难加工材料 2Cr13 的本构模型[J]. 中国机械工程,2009,20(20): 2466-2496.

LI Lin, XIE Lijing, WANG Xibin, et al. Constitutive model of 2Cr13 for finite element analysis of chip formation process[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2466-2496.

[4] 杨勇,柯映林,董跃辉. 金属切削加工中航空铝合金板材的本构模型[J]. 中国有色金属学报,2005,15(6): 854-859.

YANG Yong, KE Yinglin, DONG Yuehui. Constitutive model of aviation aluminum-alloy material in metal machining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 854-859.

[5] 赵娜,刘二亮,张慧萍,等. 金属切削变形常用本构模型研究进展[J]. 工具技术,2016,50(1): 3-7.

ZHAO Na, LIU Erliang, ZHANG Huiping, et al. Recent advances of constitutive model used in metal cutting[J]. Tool Engineering, 2016, 50(1): 3-7.

[6] 刘占强,吴继华,史振宇,等. 金属切削本构方程的研究[J]. 工具技术,2008,42(3): 3-9.

LIU Zhanqiang, WU Jihua, SHI Zhenyu, et al. State-of-the-art of constitutive equations in metal cutting operations[J]. Tool Engineering, 2008, 42(3): 3-9.

[7] 鲁世红,何宁. TC4 钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2009,32(1): 5-9.

LU Shihong, HE Ning. Dynamic constitutive model of TC4

alloy material and finite element simulation of orthogonal high-speed cutting[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(1): 5-9.

[8] GUO Y B. An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 52-81.

[9] 徐文臣,单德彬,李春峰,等. TA15 钛合金的动态热压缩行为及其机理研究[J]. 航空材料学报,2005,25(4): 10-19.

XU Wenchen, SHAN Debin, LI Chunfeng, et al. Study on the dynamic hot compression behavior and deformation mechanism of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 10-19.

[10] 何宜柱,陈大宏,雷廷权,等. 热变形动态软化本构模型[J]. 钢铁,1999,34(9): 29-33.

HE Yizhu, CHEN Dahong, LEI Tingquan, et al. Constitutive models of dynamic restoration of steel during hot deformation[J]. Iron and Steel, 1999, 34(9): 29-33.

[11] 蔡春波. 1050 铝合金变形和再结晶过程中的织构演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2009.

CAI Chunbo. Study on the evolution of texture of 1050 aluminum alloy during process of deformation and recrystallization[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.

通讯作者: 丁悦,博士、高工,研究方向为数控加工技术, E-mail: dingyue105@163.com。

(责编 大漠)

(上接第67页)

ZHANG Dinghua, LI Shan. Key technology of aero engine digitalized collaborative platform[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2009, 38(17): 35-39.

[15] 王睿,陶剑. 航空发动机数字化协同平台建设[J]. 航空制造技术,2013,56(3): 40-43.

WANG Rui, TAO Jian. Construction of aeroengine digital collaboration platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(3): 40-43.

[16] 王震,战强,朱丽君. 航空发动机协同设计平台建设[J]. 航空制造技术,2015,58(12): 51-54.

WANG Zhen, ZHAN Qiang, ZHU Lijun. Construction of aeroengine collaborative development platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(12): 51-54.

[17] 韩福金,陆佳圆,王震,等. 航空发动机协同研制平台的建设与应用[J]. 航空发动机,2015,41(1): 89-93.

HAN Fujin, LU Jiayuan, WANG Zhen, et al. Construction and application of aeroengine collaborative product development platform[J]. Aeroengine, 2015, 41(1): 89-93.

通讯作者: 李伦未,硕士,工程师,主要从事航空发动机系统工程技术管理相关研究工作, E-mail: leolenwis@163.com。

(责编 大漠)