

航空发动机工艺研究及创新体系构建探讨*

张 渝^{1,2}, 于建华^{1,3}, 雷力明¹, 陆 涛¹

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

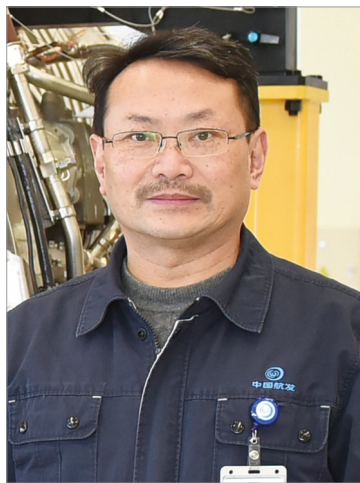
2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;

3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

[摘要] 航空发动机工艺研究系统构建合理与否对型号的成功研制具有重要影响。通过对国内外知名航空航天组织型号的工艺研究系统进行分析, 总结出其逻辑结构、组织特征, 进而形成了设计与制造协同的航空发动机工艺研究体系构建逻辑。最后, 构建了商用航空发动机总工艺师系统, 并提出了工艺管控概念, 阐述了工艺管控的具体内容, 为商用航空发动机的工艺能力建设和研制提供有效支持。

关键词: 航空发动机; 工艺研究体系; 工艺管控; 设计制造协同

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.020



张 渝

现任中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司总经理, 上海商用航空发动机先进工艺与智能装配工程技术中心主任。构建起我国首个商用航空发动机总装交付中心, 建成以 3D 打印为代表的先进制造工艺研究等多种能力的商用航空发动机试制、试验基地。

我国航空发动机产业经过 70 余年的发展, 虽然有很多积累和基础, 但只是一些无机的资料和数据放在一起, 尚未形成体系。目前工艺研究体系设计的技术基础要素还不完整, 如果不能很好地整理, 就只能想到什么用什么, 即按需使用。虽然也遵循一定的流程, 但流程不够显性化, 也不规范, 存在“各取所需、无序调用、效益低下”的现象。此外, 设计制造协同是当前航空发动机研制所面临的很大难题之一。制造厂认为设计的可生产性不好, 设计所认为制造工艺水平不高。目前工艺技术主要是在型号研制提出需求后才进行研究, 工艺技术预研和标准化工作不足。实现民用航空发动机的设计制造协同, 关键在于工艺能力的建设, 在于构建工艺研究体系。

航空发动机的研制是一项复杂的系统工程, 航空工业的世界顶级企

业, 不约而同地都十分重视工艺能力建设, 都掌握核心零部件制造的关键技术^[1]。洛克希德·马丁公司的“臭鼬工厂”(SkunkWorks)是将 1~4 级(技术成熟度/制造成熟度等级 TRL/MRL)的基础技术开发应用孵化为 4~6 级的原型制造, 并进一步转化 7~9 级的成熟产品, 其创新理念和运作模式在全世界得到了肯定和推广, 成为企业自主创新机构的代名词^[2-4]。同样的还有波音公司的“鬼怪工厂”(Phantom Works)、赛峰集团的“赛峰 Tech”、空客的创新中心、埃隆·马斯克建立的 Space X 等都是推行工艺技术创新的典范^[2-5]。其运营类管理流程包括设计研发、生产制造和销售服务等。而具有创新性的工艺研究体系始终贯穿设计研发、生产制造和销售服务三者之中, 因此本文就工艺体系构建工作展开研究, 就是要牵住发动机研制过程中的“牛鼻子”, 为自主创

* 基金项目: 国家科技重大专项 (2018ZX04005001)。

新战略的实施提供坚强的基础支撑。

本文通过分析国内外知名航空航天组织型号的工艺研究系统,总结出其逻辑结构与组织特征,并形成了设计与制造协同的工艺研究体系构建逻辑,最后构建了商用航空发动机总工艺师系统。

国内外航空航天组织工艺研究体系分析

1 工艺研究体系的组织方法和特征

针对航空航天等大型复杂飞行器的研制,美国及欧洲的发达国家取得了多个型号的成功,并建立了行之有效的理论方法,如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的系统工程、美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的并行工程等。

在我国,航天领域也应用系统工程的方法成功研制了多项型号产品。表1分析了国内外航空航天工艺研究体系的组织方法和组织特征,以及该种工艺组织方式和特征在型号研制中的优点。

通过对表1的分析可以看出,在工艺研究体系的组织方法方面,国内外典型航天航空型号项目组织管理都应用了IPT项目管理、集成产品开发和系统工程等。其组织特征具有如下共同点:通过项目办公室和项目经理进行项目的总体策划与横向协调;采用扁平简约的组织机构以提高灵活性和效率;建立集成产品开发团队实现流程、技术和目标的统一^[6]。

2 工艺研究体系的逻辑结构

航空发动机具有规模大,技术复杂,涉及多个学科、多个专业等特点,

每个分系统都存在很大的差异性,需要分系统供应研制。这就要求必须将工艺研究系统的逻辑结构理清,科学合理地划定各个系统及系统之间的关系,然后才能对工艺进行系统、有效的管理。从技术层面来看,IPT需要横跨多种学科和专业。从管理层面来看,IPT不仅从人员配备方面进行整合,而且从程序、制度、措施等方面进行统筹安排。具体来说,工艺研究系统的逻辑结构包括技术基础要素、工作流程和在各类研发流程中活跃着的人,这3部分是一个具有逻辑关系的生命体,如图1所示。

(1) 技术基础。

技术基础要素包括各类标准、规范、准则、数据以及设计工具、软件等。这些要素是无机的存在,如果不能用或者用不好,则无法产生价值和创造价值。因此就需要将流程加入

表1 国内外航空航天工艺研究体系

Table 1 Process research system of world-renowned aerospace enterprises

单位	组织方法	组织特征	优点
鬼怪工厂	IPT管理 集成产品开发 系统工程	管理与技术分离	管理岗位与技术岗位各自发挥其专业优势
		按项目特点及工作分解结构组建组织结构	(1)以产品为中心的责任体系; (2)职责定义清晰、明确
臭鼬工厂	项目管理 系统工程	小而精的项目管理办公室	起到管理指导、能力积累、横向协调的作用, 工作效率高,任务下达快
		工程部门分解为多个子部门	将任务分解与系统集成有效结合
		目标分解下的小规模项目团队	(1)专注于技术研究和 发展; (2)效率高,信息共享程度高
赛峰 Tech	IPT管理 系统工程	灵活、小型、扁平化的项目管理组织架构	(1)组织层级少,决策速度快; (2)工作效率高,利于创新
		强化项目经理职能	(1)决策科学; (2)决策高效; (3)资源统筹
Space X	IPT管理 系统工程 集成产品开发	小型科研团队	专业化分工,效率高、信息共享程度高
		扁平化、简约化的组织管理架构	(1)各部门联系紧密,信息交流方便; (2)组织层级少,沟通顺畅、协调方便
航天 921 工程	IPT管理 系统工程	“两条指挥线”	(1)行政与技术分离; (2)发挥专业分工优势; (3)总体统筹策划
		专项管理办公室	级别高,权限大,全面负责重大事项的决策与管理, 防止决策失误
		两总联席会议专家组	负责工程管理重大决策和多方协调事项
歼 10	IPT管理 系统集成 系统工程	“三师系统”	(1)发挥专业分工优势、各司其职; (2)总体策划; (3)强化质量职能
		各层级设立项目管理办公室	(1)加强横向协调; (2)接口明晰

到体系中来。

(2) 工作流程。

流程加入到工艺研究体系中,首先需要把工艺标准、规范、参数数据等通过工具和软件嵌入到流程当中。数字化的工艺流程进行到哪里,所需要的要素就自动出现,而不是靠人去找;根据规则调用,叶片加工工艺,有多种工艺方案,流程推送3种方案,工艺师选择后调用相应数据。技术基础要素和设计流程是互动的逻辑关系。

(3) 工艺人员。

工艺研究体系中的人分为3类:纯粹做工艺编制工作,按照流程指定的内容工作,通过流程的嵌入或调用使用技术基础要素内容;在使用流程做工艺编制工作的同时,不断完善流程和补充改进技术基础;专门负责改进流程和丰富完善技术基础要素,同时对其他工艺人员进行指导和培训。Rolls-Royce公司在每个工艺方向设置专职人员进行流程改进。

上述描述的互动关系,建立起了技术基础要素、流程和人的逻辑关系,作为一个整体成为体系,即工艺研究体系。

3 工艺研究体系组织特征

通过总结分析国内外知名机构的工艺研究体系的特点,航空发动机工艺研究应该借鉴以下5方面的组织特征。

(1) 设计制造协同,就近提供工艺支持。

制造在设计之初就参与进来,加快设计成熟的迭代效率,不断收集现有工艺技术标准执行中的问题,进行补充完善。

(2) 国际国内合作,分享丰富研发资源。

面向全球收集最新技术信息,纳入到对外合作或者自主研发的范畴。例如,“鬼怪工厂”的工程师们积极吸纳最新科研技术,就开发出了虚拟现实工具和其他技术来缩短设计零部件的时间。

(3) 简约组织机构,提高灵活性和效率。

科学的创新体制和与之相适应的组织架构是推动创新的基础^[7]。扁平化项目管理的组织架构,决策链条非常短,由一系列平行设立的项目办公室组成,相互之间无行政上的隶属关系,项目经理与最高决策者之间仅有一个可沟通的管理层,确保工艺研究体制高效运行。“臭鼬工厂”由决策者直接领导,这就使得科研工作既有充足的资源保障,又能摆脱臃肿组织的诸多束缚,为项目成员提供了很大的自由发挥空间。还有,“鬼怪工厂”4000多名研发人员中,大多数分布在洛克希德·马丁公司的各个部门,通过“先进技术小组”等组织形式,进行异地并行的虚拟合作,从事着近500项

高技术项目的研究。

(4) 激活创新神经,内联外拓创新上瘾。

创新的关键是要建立一套系统、完善、有自身单位特色的创新体系,并从组织层面进行系统推进。开放的胸怀是创新的内在要求。首先,组织层面着力培养工艺人员危机意识、创新意识和市场意识,树立“不创则退”、“慢创也是退”的观念,让创新行为随处可见,变“要我创新”为“我要创新”。其次,组织层面着力培养工艺人员创新思维,创造机会走出去、引进来,通过交流合作、内部研讨、选树榜样等方式,让源自于身边、立足于工作的创新灵感都迸发出来。最终,具备自主制造技术研究能力,并形成可操作的工艺标准。

(5) 功能全面完善,应用简单,运转高效。

工艺研究体系要功能完善、使用简单。研发体系要构建全面,则非常复杂,工作难度很大,但体系输出的结果非常简单。在信息化平台上构建工艺研究体系,体系在信息化平台上运行,IT技术发展固化了流程,使整个体系的运转更加高效。工艺研究体系要涵盖航空发动机全生命周期。

(6) 制造单位主责,设计制造共同运行。

工艺研究能力应当以制造单位为主来建立,设计单位和制造单位共同承担运行管理。工艺研究不能只封闭在工厂里,应与设计和研发单位共享工艺技术,这样工厂在制造过程中也会受益。

工艺研究体系的构建方案

航空发动机项目建设投入大、技术密集度高、项目复杂,非常需要标准化、规范化、精细化的管理。因此需在工艺体系的构建中引入系统工程、并行工程、目标管理、矩阵式管理等现代化管理方法,不断提高工艺系统建设质量效益。在航空发动机工

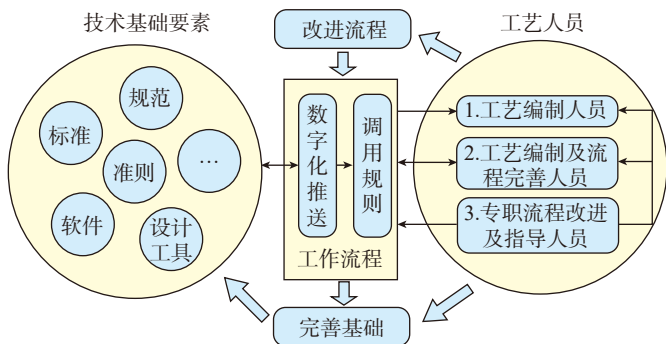


图1 工艺研究系统逻辑结构
Fig.1 Logical structure of process research

艺系统构建中, IPT 文化的工作模式应该被大力倡导。根据前述的逻辑结构和构建原则,提出了航空发动机工艺研究系统的构建方案,如图 2 所示,工艺研究体系需要具备工艺体系架构、工艺技术研究、产品工艺设计 3 大功能,通过构建这 3 大功能 IPT 团队,将技术基础要素、工作流程和在各类研发流程中活跃着的人有机地联系起来,同时明确了各 IPT 团队的责任及组织方式。

1 工艺体系建设

完成工艺体系建设,对工艺标准(管理标准、技术标准)的可操作性、有效性、适宜性负责。具体完成以下工作:

负责工艺系统的策划、指导和管理,组织提出工艺系统构建、管理职责等方案;

负责组织编制冷工艺所需技术管理文件和相关企业技术及管理标准;

负责贯彻落实相关国标、国军标、航标及企业技术和管理标准;

负责工艺系统人员梯队建设,组织技术人员培训、考核并提出奖励意见或建议。

2 工艺技术研究

完成工艺技术发展规划与建设,开展共性攻关技术、前沿技术的研究、推广及应用,申报工艺类课题和项目,为设计提供技术支持。具体完成以下工作:

负责组织提出并审核公司工艺系统年度工作计划及技术发展规划;

负责组织冷工艺方面新技术、新工艺技术攻关及科研成果工程化推广应用;

负责组织制造工艺方面的课题申请、科研攻关及对应的加工能力建设;

负责组织贯彻落实国家、上级关于科技发展的方针、政策、法律和法规;

加强国外的学习,学人之长,创己之新。充分发挥商发特有的国际合作优势,立足民机、服务全行业。

3 产品工艺设计

完成型号工艺设计工作,并针对项目研制问题,开展工艺优化分析、工艺科研和型号攻关工作。完成工艺系统研制能力建设,开展型号的工艺技术管理工作。具体如下:

负责组织工艺系统完成产品研制及生产中所涉及的工艺技术准备和工艺定型工作;

负责组织进行工艺设计工作,制定工艺总方案、开展产品设计图样及文件的冷工艺性审查、参与工艺评审;

负责组织进行特殊过程确认和识别、关键过程确认;

负责根据研制中出现的问题,组织工艺系统开展工艺优化分析、工艺科研和技术攻关工作;

负责组织进行供应商关键工艺的审批及制造过程的审查和管控;

负责组织工艺系统进行重大技术质量问题的分析处理工作;

负责组织工艺系统研制能力建

设,制定相关生产线工艺布局、技术改造方案、供应商培育培养计划;

负责组织开展研保条件建设规划论证工作;

负责组织确定工艺分工原则及参研单位和任务分工建议。

商用航空发动机总工艺师系统

基于工艺研究体系方案,以实现商用航空发动机工艺体系建设、工艺技术研究、产品工艺设计功能为目的,构建了总工艺师系统管理模式。对总工艺师系统构架,领导必须置身其中,成为体系建设不可缺少的成员;必须要有一些理解和明白管理体系的专家来建设体系,建设体系的人要成为专家;每一位员工都要成为体系数据信息的提供者,也是工具方法的使用者和业务流程的执行人,是整个研发体系的改进和创新者。总而言之,工艺研究体系建设必须是一个全员参与的过程。

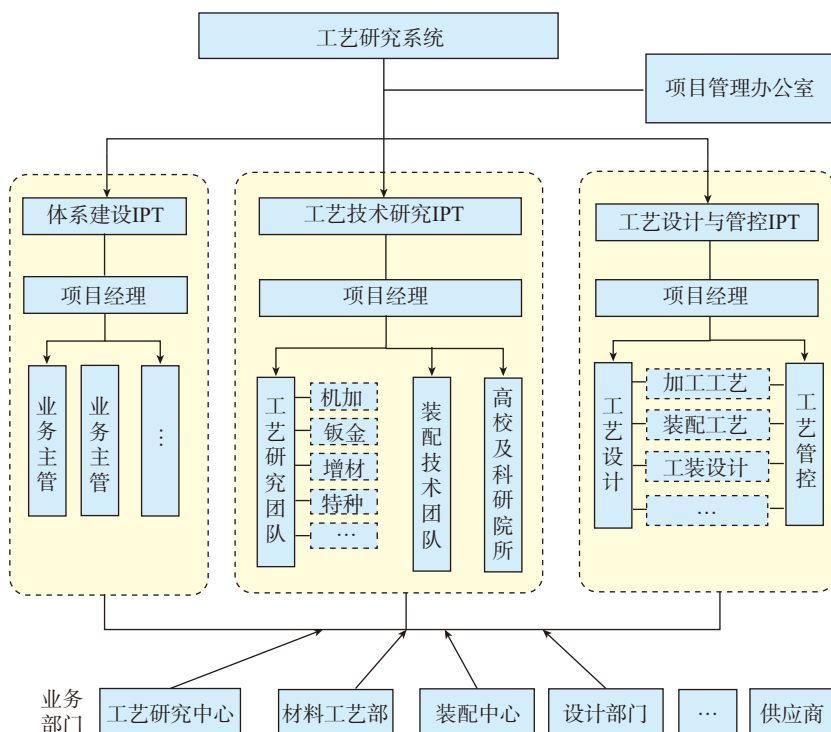


图2 航空发动机工艺研究系统逻辑结构

Fig.2 System of aero-engine processing research

1 总工艺师系统职责

总工艺师负责公司工艺技术和管理工作,负责整个工艺系统的建设、长远发展规划、年度规划及重大事项决策。具体工作包括:

- (1)明确工艺活动流程及标准;
- (2)确定并提出工艺研保条件;
- (3)组织开展新工艺的评估引入;
- (4)组织开展工艺总方案等工艺文件的编制及评审;
- (5)组织开展工艺攻关实施;
- (6)组织开展特殊过程确认;
- (7)组织工艺系统进行重大技术质量问题的分析处理工作。

2 总工艺师系统运营模式

在总工艺师指导下,体系建设IPT团队、工艺技术研究IPT团队、产品工艺设计IPT团队内联外拓开展工艺研究工作,其工作要点如图3所示。

体系建设IPT团队制定工艺研究中心的工艺标准体系,提供材料工艺部的工艺管控标准、工艺导则等体系文件。同时,工艺研究中心开展工艺标准的验证,材料工艺部提出工艺管控和工艺改进需求。

总工艺师指导工艺技术研究IPT团队制定技术发展规划和年度

重点工作、评估攻关课题并进行终止决策、申报工艺攻关和工艺能力建设课题,开展技术创新、新工艺技术攻关及科研成果工程化推广应用。

总工艺师审议产品工艺设计IPT团队制定的各项目总体实施规划,评估工艺技术水平、审议能力建设需求,指导型号工艺技术状态总结等工作,同时在总工艺师的领导下,产品工艺设计IPT团队向工艺研究中心提出关键技术、基础研究需求,对供应商承担的项目技术问题进行协调,对供应商关键件的工艺规程开展审批,开展工艺纪律检查。

3 工艺能力建设

工艺能力建设是总工艺师系统的重要任务,通过工艺体系建设、工艺技术研究、产品工艺设计和管控,最终实现对商用航空发动机项目的工艺计划、工艺设计和工艺管理。如图4(a)所示,以产品全生命流程中的工艺管控为例,来阐述总工艺师系统对工艺能力建设的具体过程和內容。工艺管控包括设计、制造、试验和通用过程4个方面,制造过程的管控是最重要的管控过程。制造过程管控包含很多内容,每个管控内容都由一系列具有逻辑关系的流程文件

构成,每个流程文件又由所属的一系列具体管控标准组成,每份管控标准都有具体的实施技术文件(按照具体项目而指定的检查表单或审核表单)。

图4(b)为工艺技术研究能力的建设,由6个模块组成,分别为制造提前介入研发、产品生产计划、制造过程、物流与仓储、产品退货、关键技术研究模块。在产品的设计阶段,工艺人员就提前介入研发中心的设计任务,研发中心和客户对工艺方案进行反馈,从而提高产品和可加工性。在产品生产阶段,由工艺系统去主导,对产品生产进行合理计划、设计并管理相应工装、进行装配调试和制造质量检验。同时开展关键技术研究,结合生产实践,对先进制造工艺和关键工艺进行研发攻关、成果转化应用。这对于落实关键在手的商用航空发动机战略十分重要。在关键技术攻关过程中,与高校、科研院所和合作企业一起成立一些兴趣小组,举办创新沙龙、小型论坛等,为创新成果的交流提供平台,让工艺人员能够自由地进行头脑风暴、轻松地碰撞灵感。通过提前介入产品设计和合作工艺攻关,更好地促进设计制造协同和创新成果的应用。

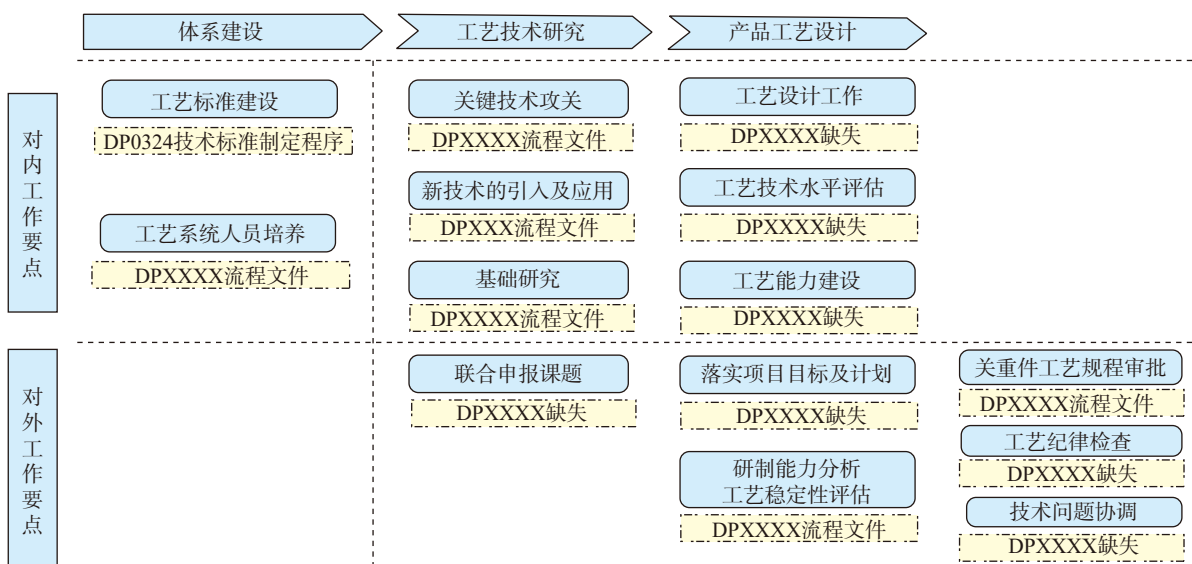
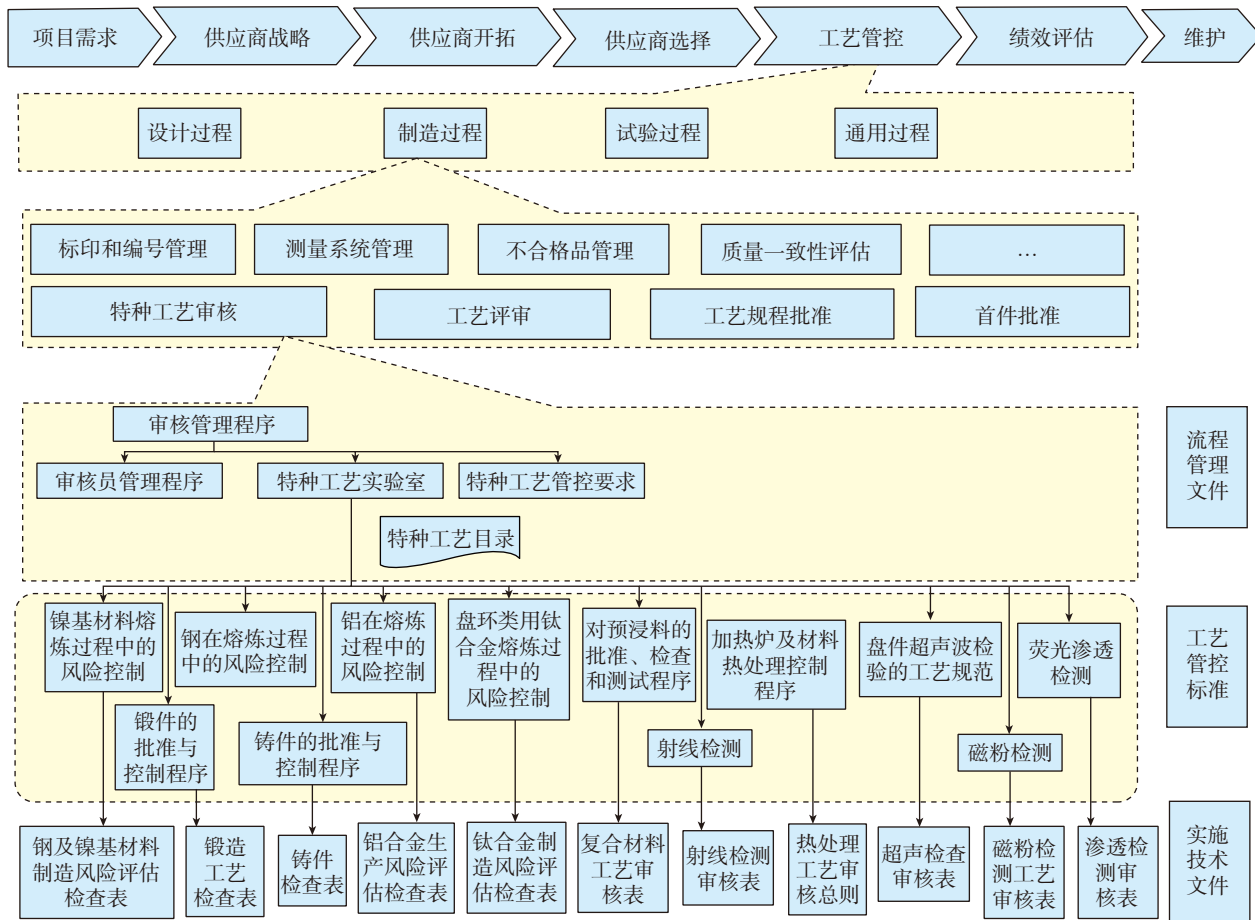
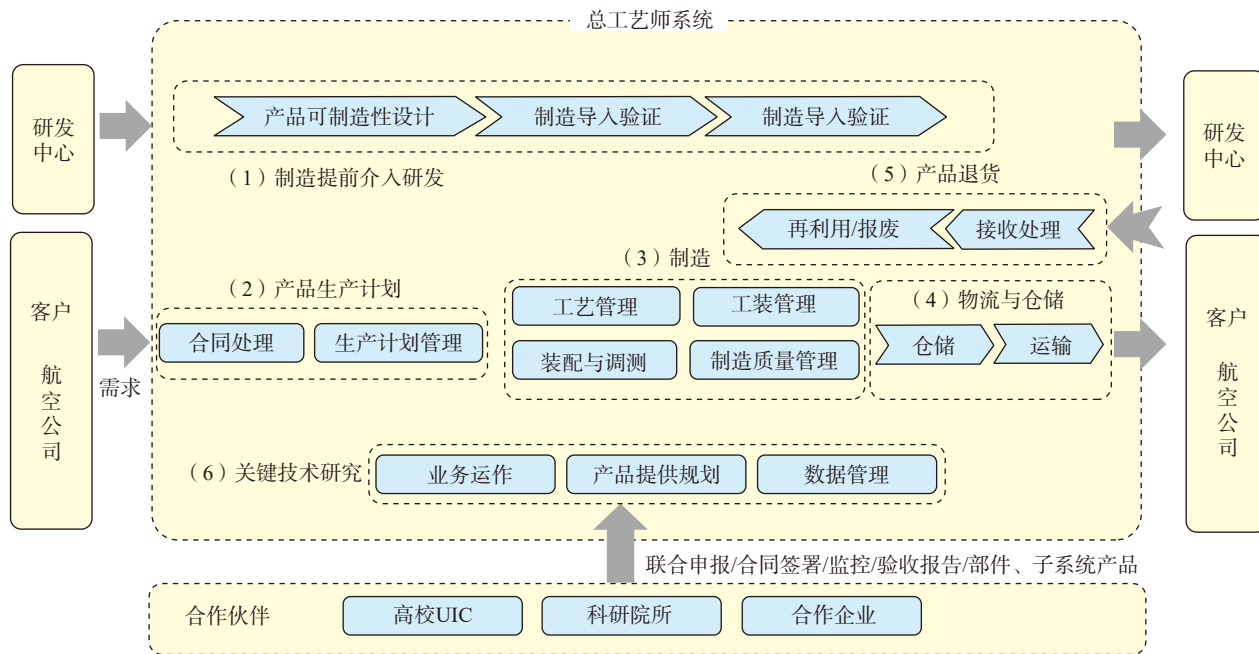


图3 总工艺师系统工作要点
Fig.3 Key points on the general craftsman system



(a) 工艺设计与管控能力建设



(b) 工艺技术研究能力建设

图4 航空发动机体系能力建设

Fig.4 Construction of aero-engine system capability

结论

工艺研究体系提供了一个规范运行的平台,以这个平台为基础,工艺人员才有了在高起点上创新的可能,而不是仅在杂乱和层次不齐的情况下进行单点创新。同时,创新成果又不断丰富到体系中,人和体系共同成长。工艺研究体系的基础要素要全面,系统要完善且具备复杂功能,但它的输出和使用应该简单可操作,并且,工艺研究体系的构建应在应用中不断改进完善。

(1)总工艺师系统的运行依靠各流程文件执行,流程执行需要各IPT单位和团队完成,流程各环节的界面和权责要明晰,否则会出现推诿,流程各环节要尽量规定执行期限,否则会影响执行效率,流程的设立要充分论证,以免流程繁杂。

(2)工艺标准及其下一层级的实施技术文件,即各类表单是总工艺师系统落实工艺管控的具体措施,必须要在现场一线中紧密跟随产品流转,保证航空发动机产品全生命周期状态受控且可追溯。

(3)对于设计、装配和试验能力自建,制造能力依靠社会力量组织的发动机OEM企业,总工艺师系统是产品制造环节质量和进度保证的关键,在供应商能力培育和产品工艺管控中不可或缺。

(4)通过总工艺师系统,可以迅速将航空公司或者航空发动机需求方的要求导入到产品中,是产品制造符合性控制的关键所在。

参考文献

- [1] YU J H, CHEN Z T, JIANG Z P. An approach for machining distortion measurement and evaluation of thin-walled blades with small datum[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 53(8): 36-45.
- [2] 蒲小勃,许泽,吕剑.波音的“鬼怪工厂”[J].大飞机,2014(1): 108-111.
- PU Xiaobo, XU Ze, LÜ Jian. Boeing's Phantom Works[J]. Jetliner, 2014(1): 108-111.
- [3] 姜鹏,杨开,黄育秋,等.波音鬼怪工厂组织管理模式研究及启示[J].飞航导弹,2018(1): 6-9, 13.
- JIANG Peng, YANG Kai, HUANG Yuqiu, et al. Study on the organization model of Boeing's Phantom Works and its enlightenment[J]. Winged Missiles Journal, 2018(1): 6-9, 13.

[4] 聂海涛,桑建华.臭鼬工厂传奇[M].北京:航空工业出版社,2013.

NIE Haitao, SANG Jianhua. A legend of the Skunk Works[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.

[5] 于海鹏,王国庆,王红霞.国内外航天航空型号研制项目管理的分析与启示[J].价值工程,2016,35(7): 237-239.

YU Haipeng, WANG Guoqing, WANG Hongxia. The analysis and implication of project management in domestic and overseas astronautics and aeronautics model development[J]. Value Engineering, 2016, 35(7): 237-239.

[6] 刘敏华.如何建成“国际一流研发中心”[N].中国航天报,2014-08-15(3).

LIU Minhua. How to build “international center of research and development” [N]. China Space News, 2014-08-15(3).

[7] 中华人民共和国中央人民政府.国家技术转移体系建设方案(国发2017第44号)[Z].2017-09-15.

The Central People's Government of the People's Republic of China. Construction scheme of national technology transfer system (2017 National issue No. 44)[Z]. 2017-09-15.

通讯作者:于建华,高级工程师,主要研究方向为航空发动机关键部件先进制造工艺、航空零件长寿命制造及加工表面完整性控制技术, E-mail: numerical@126.com。

Discussion for Construction of Aero-Engine Processing Research and Innovation System

ZHANG Yu^{1,2}, YU Jianhua^{1,3}, LEI Liming¹, LU Tao¹

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Whether the construction of aero-engine process research system is reasonable or not, which has an important influence on successful development of the model engine. Based on the analysis of the successful products process research system of world-renowned aerospace enterprises, this paper summarizes its logical structure and organizational characteristics, and then forms the constructing logic of the aero-engine process research system which is collaborative with design and manufacture. Finally, the general craftsman system of the commercial aircraft is constructed. A concept of process control is put forward, and the specific content of the control is expounded. It provides effective support for process capacity building and development of the commercial aircraft.

Keywords: Aero-engine; Processing research system; Processing control; Design and manufacturing collaboration

(责编 海山)