

液体火箭发动机工艺设计精益化发展展望

何 阳 谭松林 张 永 孙钢铁

(航天推进技术研究院, 西安 710100)



摘要: 基于液体火箭发动机技术的发展趋势及工艺设计特点, 分析了液体火箭发动机工艺设计存在的问题与不足。结合国内外先进制造企业工艺技术及管理的发展现状和趋势, 提出了以协同并行工作模式、基础规范建设、先进技术手段等为突破口, 引导液体火箭发动机工艺设计朝着精益化方向发展, 以满足我国航天型号产品研制工作对周期、成本及可靠性日益提升的需求。

关键词: 液体火箭发动机; 工艺设计; 并行协同; 工艺规范; 知识库; 先进技术

Forecasts on Development of Lean Process Planning of Liquid-propellant Rocket Engine

He Yang Tan Songlin Zhang Yong Sun Gangtie

(Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100)

Abstract: Based on the developing trend and the process planning attribute of liquid-propellant rocket engine, this paper indicates the problems of the process planning. According to the current situation and developing trend of developed manufacturing enterprises at home and abroad, some measures are brought forward, such as parallel collaborative work mode, basic specification construction, and advanced technology, as breakthroughs for lean process planning of liquid-propellant rocket engine, to meet the increasing demand of our aerospace project for short cycle, low cost and high reliability.

Key words: liquid-propellant rocket engine; process planning; parallel collaborative work; process specification; knowledge base; advanced technology

1 引言

液体火箭发动机是发射各种弹道导弹和航天飞行器的主要动力, 是发展航天产业的基础^[1]。其研制周期和产品质量直接影响我国航天事业的发展进程。而作为液体火箭发动机研制和生产的重要环节, 工艺设计直接影响产品的生产成本、生产周期和质量, 是液体火箭发动机制造过程中最为关键的生产活动。

从目前来看, 以串行工作流程和个人经验为主的工艺设计模式已经无法满足我国航天事业快速发展的需求, 开展精益化工艺设计, 从源头上降低工艺流程对物资、周期、场地、人力等方面的消耗, 提高工艺流程可靠性和产品质量, 是液体火箭发动机工艺设计

发展的必然趋势。

2 液体火箭发动机工艺设计特点

液体火箭发动机结构复杂, 工作环境恶劣, 大量采用高温合金、高强不锈钢等材料, 加工难度大, 但对产品质量的可靠性要求高。因此工艺技术难度大, 产品工艺流程复杂, 各生产流程之间的技术状态协调难度大, 技术风险控制要求高。同时液体火箭发动机交付批量小, 种类多, 而且不同的发动机在结构组成、材料种类、工艺方法方面存在较大的差异, 导致工艺设计工作量大。但研制和生产周期控制严格, 要求工艺设计工作必须快速高效。

作者简介: 何阳(1987-), 硕士, 流体机械工程专业; 研究方向: 液体火箭发动机制造技术管理。

收稿日期: 2016-11-28

3 液体火箭发动机工艺设计存在的问题与不足

近年来,以大推力高压补燃液氧煤油火箭发动机为代表的一系列先进发动机的成功研制标志着我国液体火箭发动机制造工艺技术取得长足发展,为我国航天事业的飞速发展奠定了基础。但随着航天任务的快速增长、型号研制难度不断增加、产品可靠性要求日益提升,液体火箭发动机现有的工艺设计模式、技术手段已经呈现出一些不足。

现有工艺设计工作主要以串行工作模式为主,工艺设计效率低,难以满足快速高效的研制需求。工艺信息表达规范缺失,工艺文件实用性不强,工艺信息难以准确、全面地传递到操作人员,产品质量存在波动。基础工艺规范缺失,受工艺人员经验和技术水平的影响,工艺方法及控制点存在差异,技术状态控制难度大。工艺知识管理不足,工艺技术继承性差,研究成果无法得到有效继承和利用,存在工艺技术重复攻关,部分技术问题反复出现的情况,影响研制周期,增加研制成本。此外液体火箭发动机工艺设计仍以个人经验、工艺试验为主,有限元、制造过程失效模式及效果分析(PFMEA)等先进技术手段应用不足。

4 国内外先进制造企业工艺设计发展启示

随着信息技术和企业管理理念的飞速发展,国内外的先进制造企业采用先进的产品研发模式,以精益化生产为目标,优化业务流程,大量引进先进技术手段,坚持基础规范建设,在控制研制周期、成本和产品质量方面取得了巨大的成功,为液体火箭发动机工艺设计朝着精益化方向发展提供了良好的启示意义。

4.1 协同设计模式成为产品研发主流模式

上世纪50年代日本制造业的精益生产模式中就提出了“产品设计内部本来就应包含工艺设计和工业工程”的概念^[2]。以波音为代表的航空航天先进制造企业充分利用MBD技术开展并行协同设计,显著缩短产品的研发周期,提高产品质量。

国内飞机制造企业采用产品设计、工艺设计、工装设计并行工作模式,产品研制周期大幅缩短。其中成飞在某型飞机研制中集中协同攻关,充分利用现有资源和成熟工艺方法,在缩短研制周期同时,显著降低工装系数,节省研制成本^[3]。航天方面,首都航天机械公司提出了基于产品成熟度的工艺设计工作模式,在每个成熟度阶段开展相应的工艺设计、工装设计、

物资准备等工作。中国航天科工集团在冲压发动机的研制过程中也采用了并行协同的研制模式^[4],取得了良好的效果。

4.2 数控程序成为工艺设计的主要内容

国内大部分航空航天企业将传统以工艺文本为主体的机械工艺设计模式转变为由数控程序为主的工艺设计模式,数控程序由专人编制并集中管控,在提高设备利用率的同时实现了生产过程的精确控制,提高了产品质量的稳定性。航天方面中国航天长征机械厂数控加工工艺文件主要由数控程序、工序模型、对刀点及刀具、工装等物资信息组成。数控程序由工艺人员编制、审核后通过数控系统由操作工人调取。工艺文件内容没有大量的文字描述,简洁明了,生产状态稳定可控。

4.3 基础工艺规范是工艺设计的技术支撑

国外先进制造企业十分注重基础工艺规范建设。波音、通用等先进制造企业将基础和通用的操作、控制、检验及相关技术要求纳入规范体系,作为产品生产的基本操作规范。波音公司建立了BAC5000系列工艺规范,涵盖整个飞机制造工艺技术^[5],在减轻工艺设计工作量的同时确保产品质量。国内航空企业也逐渐意识到工艺规范建设的重要性和必要性。上海商用飞机有限公司、成都飞机工业(集团)有限责任公司和中航商用航空发动机有限责任公司等企业都在开展了航空发动机工艺规范体系构建研究和探索^[6]。

4.4 先进技术手段提升工艺设计水平

随着有限元理论以及信息技术的高度成熟,有限元仿真和几何仿真技术在制造业的各个行业发挥了巨大的作用,成为先进制造企业工艺设计的重要手段。达索公司一直强调利用仿真技术开展工艺设计工作,将ABAQUS软件作为其产品和工艺仿真的主要工具。美国普惠公司在试制俄罗斯液氧煤油火箭发动机RD-180的过程中开展了大量的生产工艺仿真工作^[7]。国内航空企业在装配、机械加工方面开展了大量的几何仿真工作,显著提高了装配工艺方案、数控加工方案和数控程序的编制效率和质量。在铸造、钣金、热处理、焊接以及复合材料等专业方面开展了大量的有限元仿真工作,提高了工艺设计水平。部分企业还提出了型号研制过程仿真生命周期管理的构想,推动仿真技术的进一步深化应用^[8]。

以制造过程失效模式及效果分析(PFMEA)为代表的先进技术手段成为国内外制造企业完善工艺设计,提升产品质量的重要技术手段^[9]。丰田汽车以“五

个为什么”对产品质量问题进行深入分析,确定造成缺陷的根本原因。天津长征火箭制造有限公司运用 FMEA 技术,提高工艺可靠性和产品质量^[10]。北京卫星环境工程研究所通过工艺 FMEA 分析得到了工艺可靠性指标和相应的预防措施,提高总装工艺可靠性^[11]。

4.5 工艺知识库是推动技术发展的新动力

越来越多的制造企业认识到技术研发过程中长期积累的知识是一笔无形的巨大财富,对于稳步提升企业制造能力,缩短工艺设计周期,提高工艺设计质量意义重大,构建相应的工艺知识库成为推动企业工艺水平发展的新动力。沈阳飞机工业(集团)有限公司建立航空钣金材料性能参数与工艺知识库,提高了工艺设计质量,缩短研制周期^[12]。沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司利用基于加工特征的快速编程技术在 UG 平台中实现了航空发动机零件的数控编程规划^[13]。首都航天机械公司采用基于三维模型的几何特征匹配,高效利用已有工艺知识,提高工艺设计效率。南京晨光集团有限责任公司构建了航天产品装配工艺知识库,实现了某型号产品的装配工艺知识有序管理和共享重用^[14]。

5 液体火箭发动机工艺设计发展展望

综合国内外先进制造行业工艺设计发展的方向及液体火箭发动机研制特点及发展趋势,工作模式改进、加强基础规范建设、提升知识管理和工艺设计手段,是缩短产品研制周期,提高工艺设计技术水平和工艺文件实用性,推动工艺设计长足发展的重要途径。

5.1 引入并行协同工作模式 提高工艺设计质量和效率

将并行协同模式从产品设计阶段延伸至工艺设计阶段,充分应用并行协同模式,以最大程度缩短产品研制周期。工艺设计、工装设计、物资准备等工作与产品设计并行开展,如图 1 所示。

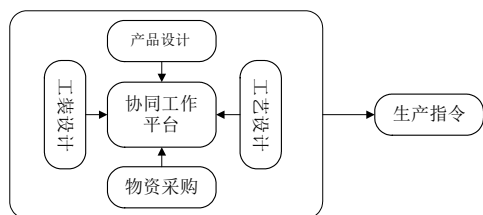


图1 并行协同工作模式

5.1.1 工艺设计与产品设计的协同

建立基于产品成熟度的工艺设计管理制度,明确

每个成熟度阶段工艺人员应完成的工艺设计任务和完成标志。坚持工艺设计工作与产品设计工作同步开展,促使工艺人员充分吃透产品设计意图和主要功能特性,辅助设计人员改进产品工艺性,提高工艺设计的针对性和经济性。

5.1.2 各专业工艺设计之间的协同

协同工艺设计模式分布在两个阶段:产品设计阶段,组织各专业工艺人员同步开展详细工艺设计工作,进行充分的工艺技术状态协调和讨论,以产品的全工艺流程最优为原则,确定各专业工艺之间的技术状态接口,实现产品全工艺流程的无缝衔接;工艺实施阶段,各专业工艺人员并行工作,进一步完善详细的工艺设计。利用数字化工艺设计平台将各专业工艺技术方案紧密结合在一起,使得上游工艺技术状态任何微小的变化能在下游工序中得到快速和准确的体现,实现工艺技术状态的快速准确传递,确保整个工艺流程的协调性和最优化。

5.1.3 工艺人员与其他人员的协同

在工艺设计或变更过程中工艺人员与工装设计人员、物资采购人员协同工作,在制定工艺方案的同时提出完整和详细的生产资料需求,生产准备部门提前开展物资准备工作。同时工艺人员根据生产准备部门的反馈意见及时调整工艺设计方案,有效利用现有生产资源,降低生产准备成本、缩短准备周期,提高工艺方案的可行性、合理性及经济性。

5.2 完善表达标准和方式 提高工艺文件的实用性

提高工艺文件实用性的前提是各专业建立工艺文件表达标准,界定工艺设计与工人之间的分离界面,使工艺设计工作做到有的放矢;其次是根据专业特点确定各自的工艺设计模式和文件信息表达方式,使得工艺文件能得到充分应用。

5.2.1 根据各专业特点确定工艺文件表达形式

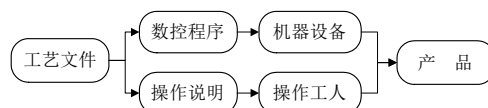


图2 改进后的工艺模式

为适应新形势下航天事业快速发展的需求,提高生产工作效率,应根据液体火箭发动机制造工艺特点改变现有以文字和图形为主的工艺文件表达形式。数控化程度较高的专业工艺文件应由文字描述和图形表达转向由数控程序为主的表达方式。在车间设立数控

程序编制岗位或由工艺人员负责编制数控程序, 数控加工程序通过 DNC 系统直接控制数控设备进行生产, 工人则按照简单的文字说明完成原材料和辅材的领用、产品的装夹、对刀等基本操作, 如图 2 所示。

除机械加工专业以外, 焊接、热处理等数控化水平发展较快的专业也可以按照这种模式开展工艺设计工作。而设备自动化或数控化程度较低的装配、钣金等以手工为主的专业则继续按照原有的模式以文字和图形的形式表达工艺信息。

对于热处理、钎焊、涂层等以过程状态控制为主的专业工艺文件则应以文字说明传递工艺和设计要
求, 以设备控制程序规范过程控制, 以基础工艺规范作为仪器、设备鉴定和检查以及人工操作的基本要求。

5.2.2 建立表达标准 确定工艺设计分离面

以文字和图形描述为主的专业, 根据专业技术特点、产品技术要求、各岗位工人技能水平要求, 将液体火箭发动机生产的基本通用操作要求(例如螺纹拧紧规范、导管弯曲规范、厌氧胶使用规范、去毛刺规范、焊前打磨规范等)编制成基本操作规范手册, 纳入工人岗位职责, 作为工人岗位技能培训和考核标准。基于规范手册建立工艺设计和文件表达的细化标准, 明确责任分离面。这样有助于减轻工艺人员工作量, 提高工作效率, 同时也将工人岗位的培训和考核工作与工艺工作紧密结合, 提高培训和考核的针对性。

5.3 建立基本工艺规范 加强技术状态控制

为规范工艺方法的选用和通用工艺技术状态的控制, 在工艺量化控制的基础上, 建立基本工艺规范, 明确各个工艺方法的代号、定义、适用范围、技术风险点、关键控制点、成熟度等级等信息。结合液体火箭发动机典型的产品结构和典型材料, 建立典型产品和典型材料工艺规范。液体火箭发动机产品研制所用产品的工艺方法均在基本工艺规范中选取, 并按照相关要求制定具体的工艺参数和工序内容。

以组合件或发动机为对象, 建立产品级的工艺选用目录, 作为产品技术状态控制的基本纲领, 以及进行全面的技术风险分析、成熟度评价的基础, 为工艺人员快速高效开展工艺设计和工艺技术状态控制奠定坚实的基础。

5.4 构建工艺知识库 促进工艺技术传承和积累

液体火箭发动机制造工艺复杂, 门类繁多, 工艺技术发展迅速, 工艺知识的积累显得尤为重要。应建立工艺知识收集、审核、评价、维护和应用制度。对型号研制、工艺试验、工艺课题研究、质量技术问题

归零等活动中产生的工艺知识进行归集整理形成知识库。按照其应用范围、考核验证情况、技术评价情况进行审核和成熟度评级, 进行动态管理。根据应用和考核情况及时更正和完善, 不断提高工艺知识的正确性和技术含量, 形成企业无形的知识财富, 为工艺人员学习和工艺设计提供依据, 为工艺技术长足发展奠定坚实的基础。建立数字化知识库, 实现工艺知识的在线共享、快速查询、智能推送, 提高工艺知识的管理和应用效率。

5.5 引入先进技术手段 提升工艺设计水平

将仿真技术、制造过程失效模式及效果分析(PFMEA)等先进技术作为工艺设计和研究的重要手段之一, 纳入工艺技术管理范畴, 建立推广应用制度。

5.5.1 加强工艺仿真基础管理

建立工艺仿真管理制度, 明确工艺仿真应用范围, 结合实际工艺仿真能力和水平将工艺仿真作为部分工艺试验方案论证或实施前必须开展的工作之一。建立基础参数和模型数据库, 及时更新维护, 确保参数的准确性和完整性, 为工艺仿真奠定数据基础。建立工艺仿真规范, 规范仿真过程, 完善评价机制和标准, 提高仿真结果的可信度。加大工艺人员的仿真技能培训, 逐步提高工艺人员的工艺仿真能力。

5.5.2 加强 PFMEA 的推广应用

建立 PFMEA 技术在产品制造全生命周期内的推广应用制度, 将该技术作为工艺技术风险控制、工艺技术问题分析和工艺优化改进的重要技术手段和关键环节, 与型号研制紧密结合, 加强应用实践。加强人员培训, 提升工艺人员失效分析意识和能力。

6 结束语

工艺设计是一门系统性的工作, 涉及面广, 对液体火箭发动机的研制具有重要影响。引入新的工作模式和技术手段, 加强基础规范建设, 坚持工艺知识积累是工艺设计发展的主要方向。为做好这些工作, 应对液体火箭发动机整个研制流程进行优化和完善, 最大程度提高工作效率, 缩短研制周期; 以制度规范建设为基础, 对工艺设计业务流程、工作模式、信息表达等各个方面进行固化, 确保整个业务流程的顺利开展; 以先进的技术手段为工具, 提高设计工作的有效性。三方面工作的有效结合和相互促进才能有效推动液体火箭发动机工艺设计朝着精益化方向快速发展。

(下转第 16 页)