

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.03.022

# 航空产品设计成熟度驱动的制造工艺审查工作模式构建

郭超朋, 郑炜, 杜坤鹏, 杨亚鹏, 王明磊

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

**摘要:** 工艺审查是制造工艺部门参与产品设计的一项重要工作, 但当前工艺审查效率低, 工作缺乏有效管控。为提高航空产品研制过程中设计制造并行协同的效率, 以产品数字化模型设计成熟度为研制时间标尺, 融合飞机研制相关制造专业, 规划产品设计与制造工艺审查并行矩阵, 构建产品设计成熟度驱动的制造工艺审查工作模式。该模式通过飞机设计和制造专业之间并行关系的明确细化来实现工艺审查工作的高效管控。在航空产品研制中采用上述工作模式后, 使制造部门的不同专业能够有效、准确地介入并开展工艺审查工作, 达到缩短研制时间、提升研制质量、降低研制成本的目标。

**关键词:** 航空产品; 设计成熟度; 制造专业; 工艺审查; 工作模式

**中图分类号:** V260 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0105-04

## Working Mode Construction of Manufacturing Process Review Based on Aviation Product Design Maturity

GUO Chaopeng, ZHENG Wei, DU Kunpeng, YANG Yapeng, WANG Minglei

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Review of manufacturing process is an important task for manufacturing departments participating in aviation product design, its efficiency, however, is low and lack of effective methods to control the task. In order to increase the concurrent and collaborative development efficiency, this paper constructs a working mode regarding design maturity level as timeline, blends different majors in aircraft manufacturing, and plans product design and process review parallel matrix. With the mode, the control efficiency of process review is realized through more granular and specific parallel relationship between aircraft design and manufacturing major. Upon the application of the mode in aviation product development, different aircraft manufacturing majors are able to duly intervene process review, hereby achieving the goals of cycle time reduction, quality improvement and cost cutting.

**Keywords:** aviation product; design maturity; manufacturing majors; process review; working mode

## 0 引言

航空工业是技术密集型产业, 产品研制过程需多专业并行协同以达到缩短研制周期、降低研制成本、提高研制质量的目的。产品设计阶段进行制造工艺审查是研制过程中的重要工作, 直接影响产品设计的质量。因此, 如何有效实现设计、制造工艺审查并行协同, 对于提高航空产品研制效率、降低制造风险和研制成本有着重要的意义。

## 1 工艺审查

工艺审查通常指基于现有制造资源条件, 对产品的各设计属性满足制造约束的程度进行分析<sup>[1]</sup>, 即在并行工作中对零件的可制造性、产品的可装配性等方面进行审查分析, 将不利于产品制

造和质量保证的因素及早找出, 避免或减少设计返工, 是有效保证产品制造性、高效性、经济性的有效手段。

随着数字化技术与制造技术深度融合发展, 基于模型的数字化定义(MBD)逐步成为航空企业广泛应用的数字化设计方法, MBP数字化设计模型继而成为产品设计制造过程的唯一依据, 贯穿于产品研发、工艺审查、工艺设计、生产制造以及检验等的全过程。

图1所示的MBD设计模型工艺审查过程是产品制造工艺技术人员对模型中设计定义的零件几何尺寸、加工精度、材料、热处理以及其他特殊要求等三维几何结构信息和制造信息进行工艺分析, 并向设计部门反馈工艺审查意见, 从而提高产品的可制造性。

第一作者简介: 郭超朋(1991—), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士, 研究方向为飞机数字化装配等, 1655676593@qq.com。

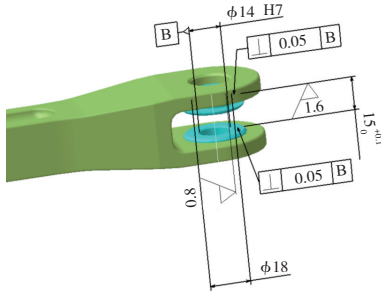


图1 产品 MBD 设计模型

国内外专家学者在 MBD 数字化模型工艺自动审查系统<sup>[2-5]</sup>、可制造性分析评价<sup>[6-9]</sup>方面开展了大量研究。然而由于国内数字化制造技术发展尚未成熟,自动工艺审查系统适用性有限,目前航空产品 MBD 设计模型的工艺审查工作仍主要依靠工艺人员凭借个人技术经验来开展。但是,不同工艺人员经验水平不同,工艺审查过程中容易出现效率低、审查不全面等问题。如何降低工艺审查工作对工艺人员经验水平的要求、提高工艺审查效率、规避工艺审查不全面风险已成为工艺审查工作研究的主要内容。

## 2 产品设计成熟度

国内航空产品设计采用数字化设计与制造并行协同研发模式,在产品设计阶段,制造工艺部门要对零件的可制造性、产品的可装配性等制造要素进行审查。为高效实现产品设计、制造并行协同,设计成熟度控制是关键环节。

成熟度概念提出是为了在工程研制初期识别、控制进入批产阶段的制造风险<sup>[10]</sup>。产品设计成熟度是从最初产品设计方案研究,经过团队协作设计的中间状态到最终产品设计趋于完善的过程中,对产品数字化模型不同状态时的阶段性评估与量化,用于表达产品相关设计活动和任务被有效执行的程度<sup>[11-12]</sup>。简单来说,是对产品设计模型的数字化定义完成情况和详细程度进行等级划分<sup>[13]</sup>,直观反映产品设计具体进展。

航空工业是典型离散性制造业,产品构型复杂、工程更改频繁、涉及专业广<sup>[14-15]</sup>,成熟度等级应依据企业设计、制造能力和产品复杂程度来合理分级。基于现有航空产品研制流程,确立 7 个成熟度等级,具体产品成熟度等级划分及成熟度状态定义如表 1 所示。

表 1 航空产品数字化模型成熟度等级及状态定义表

序号	成熟度	工作内容	成熟度状态定义
1	MM1	气动布局设计	初步确定飞机外形,选择气动布局、总体布置;初步确定产品设计模块划分及相应编号、名称确定,结构树相应设计模块节点定义
2	MM2	结构布局设计	基本确定飞机总体外形、气动布局、总体布置等;基本确定主要结构布置(如框站位、梁轴线、基准线、主要交点等);基本确定结构、系统接口界面及成品安装形式、安装位置等信息
3	MM3	布局方案冻结	确定飞机总体布局、结构布局等方案;确定结构布置(如框站位、梁轴线、基准线、主要交点、结构装配、连接形式等);确定结构、系统接口界面及成品安装形式、安装位置、线缆/管路基本走向等信息
4	MM4	打样设计	产品设计模块定义完善,优化调整总体方案;结构、系统初步设计,确定结构重点部位详细设计方案
5	MM5	打样冻结	编制型号规范,确定材料牌号、毛料尺寸、材料规范等材料信息;确定结构、成品位置及安装接口、外廓尺寸等详细信息
6	MM6	详细设计	确定结构、成品的三维设计模型以及连接标准件种类、规格等;完成结构、系统接口、空间通路等设计协调,确定电缆/管路等设计模型
7	MM7	发图冻结	确定最终布局理论外形,完成飞机详细设计,完成产品设计模块所有数据信息;完成结构载荷分析、结构装配检查等;完成飞机可靠性、维修性、人机工程、测试性等特性评审;完成技术条件、试验大纲等设计文件

产品设计成熟度定义和划分是实现并行协同设计的关键。基于航空产品设计成熟度等级,可实现产品整个研制流程中制造工艺部门介入的准确控制。在产品设计阶段,工艺部门介入后,制造

工艺审查工作开展直接影响产品研制周期。因此,由设计成熟度驱动的高效制造工艺审查工作模式的构建对航空制造并行工程研究有着重要的作用。

### 3 产品设计成熟度驱动的制造工艺审查工作模式

航空产品数字化模型成熟度是制造工艺审查工作并行的基础,在不同成熟度阶段,工艺审查工作内容有所不同。当某一成熟度阶段工艺审查通过时,数字化模型的成熟度等级 MM1—MM7 提升并进行下一阶段的设计工作,同时开展工艺、工装等并行工作,产品设计成熟度 M1—M3 驱动的并行工艺审查流程如图 2 所示。

飞机研制是一项复杂的系统工程,需统筹复材、数控加工、结构装配、特设等多类制造技术专业全程协同参与。在工艺审查工作中,不同专业审查内容大相径庭,且在飞机设计阶段,各制造专业何时介入开展工艺审查依赖于产品数字化模型的成熟度。

为提高现有飞机研制流程中并行工艺审查效率,以产品数字化模型成熟度为时间标尺,策划产品设计成熟度与制造专业工艺审查并行矩阵(表 2),制定不同成熟度阶段各制造专业介入工艺审查要求,形成由成熟度驱动的高效工艺审查

工作模式。以国内典型航空企业为例,在飞机设计过程中参与工艺审查主要有工艺总体、冶金、钣金、数控加工、复材制造、结构装配、特设等 10 个专业。表 2 中,○表示在产品设计某个成熟度阶段参与工艺审查的制造专业;●表示重点开展工艺审查工作的制造专业。

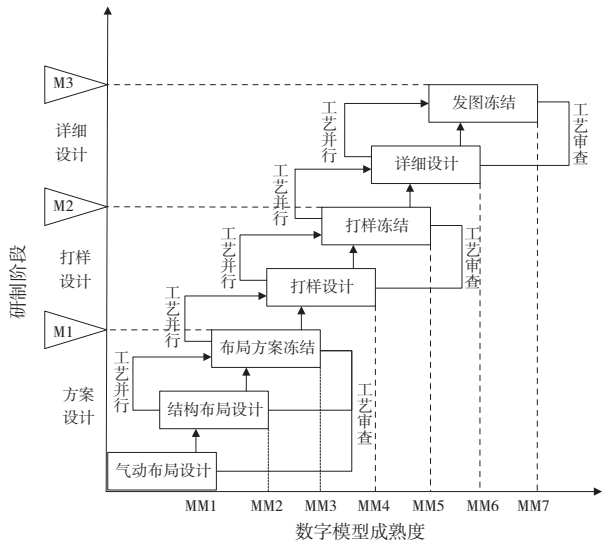


图 2 产品设计成熟度驱动的并行工艺审查流程

表 2 航空产品成熟度驱动的设计与制造工艺审查并行矩阵

产品成熟度	工艺总体	冶金专业	钣金专业	数控加工专业	复材专业	结构装配专业	特设专业	液压及其他系统专业	试飞专业	物料配送专业
MM1	○									
MM2	●					○				
MM3	●				○	○		○		
MM4	●				○	○	○	○		
MM5	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○
MM6	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MM7		○	○	○	○	○		○	○	○

在航空产品设计成熟度驱动的制造工艺审查工作模式中,明确飞机研制专业参与工艺审查工作的成熟度阶段,但目前工艺审查工作主要依赖于工艺人员技术经验,工艺审查质量、效率无法得到保证,直接影响航空产品设计与制造并行协同效率。因此,为降低工艺审查工作对工艺人员经验水平的要求,提高各制造专业工艺审查的效率,

基于航空企业工艺审查专家积累的经验知识,形成产品工艺审查专家知识库,用于支持不同专业在不同成熟度阶段高效开展工艺审查工作(图 3)。参考表 2,以结构装配专业为例简单说明在 MM6 成熟度阶段开展详细工艺审查的内容如表 3 所示。

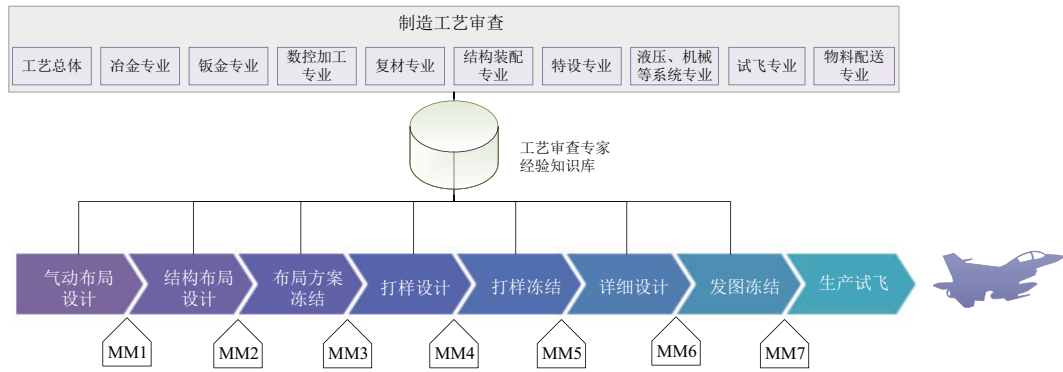


图3 制造并行工艺审查示意图

表3 MM6成熟度阶段结构装配专业工艺审查知识表

序号	审查要素	审查内容简述
1	工艺信息 尺寸要素	装配尺寸标注、工艺信息、检验信息等是否全面、准确;关注尺寸是否便于测量;装配尺寸设计精度要求能否满足
2	装配 开敞性	制孔过程刀具是否与零件立筋干涉;装配施工过程中工人是否有操作空间;结构装配过程零件安装是否存在干涉;产品结构是否有利于预防多余物产生和多余物排除;导管、拉杆等与周围结构间隙是否合理,不同系统导管与基本结构、活动元件间隙应满足特定经验值
3	结构 合理性	设计数模零件模型之间是否存在干涉;零组件装配设计是否存在过定位;同类零组件尺寸、规格、形状是否满足标准化、通用化、系列化要求;设计模型中系统管路、电缆走向是否合理
4	装配 连接	组/部件装配设计是否预留装配补偿余量;标准件信息是否合理,标准件制孔、安装规范是否明确等;装配连接标准件边距、间距是否合理;结构下陷区铆钉与拐点距离设计是否合理(铆钉头不得进入R区);管路、线缆是否可拆卸,维护是否方便;系统管路、线束敷设是否增加防差错设计,如插座、插头是否有防止反接的插接匹配结构

在航空产品设计并行工艺审查流程中融入飞机制造专业、工艺审查专家的知识,明确细化不同成熟度阶段不同制造专业工艺的审查工作,时间标尺清晰,审查内容具体,降低审查工作对工艺人员经验水平的要求,提高并行工艺审查的质量和效率,同时有效地支撑产品设计成熟度升级转段,加快推进航空产品的研制进程。

#### 4 结语

工艺审查是产品设计与制造工艺衔接的桥梁,对航空产品研制有着至关重要的作用。通过将产品数字化模型设计成熟度和飞机制造专业工艺审查的深度融合,规划产品设计与制造工艺审查并行矩阵,以航空企业积累的各制造专业工艺审查专家知识为支撑,构建由产品设计成熟度驱动的高效工艺审查工作模式,规避当前工艺审查不全面、工作效率低等缺点,降低工艺审查对工艺人员的经验要求。通过在某型号研制过程的应用发现,不同制造专业能够有效、准确地介入并开展工艺审查工作,实现了设计、制造工艺审查并行协

同,在提高航空产品研制效率、降低制造风险和研制成本方面取得了一定成效。

#### 参考文献:

- [1] 林绍勇. 支持工艺性审查的知识库的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [2] BOGUE R. Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications[J]. Assembly Automation, 2012, 32(2): 112-118.
- [3] 敖勇刚, 万敏, 李新军. 基于 KBE 的飞机板金件工艺性审查系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1096-1099.
- [4] 韩志仁, 刘明星, 何斌. 面向工程数据集导管工艺性批量审查技术研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 90-92, 96.
- [5] 闫帅, 王宗彦, 郑江, 等. MBD 设计模型的工艺性审查研究[J]. 现代制造工程, 2016(2): 99-102.
- [6] ONG S K, SUN M J, NEE A Y C. A fuzzy set AHP-based DFM tool for rotational parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138(1/2/3): 223-230.
- [7] 段福斌, 姜少飞, 潘双夏. 集成环境下的零件可制造性分析系统[J]. 机床与液压, 2005, 33(4): 10-12, 15.

(下转第 162 页)



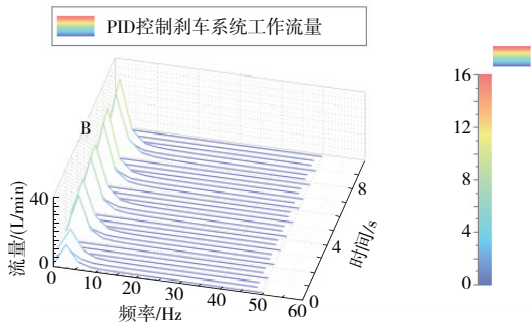


图 11 PID 控制系统的频域曲线

通过频域分析发现,两种系统在刹车系统进行制动的开始阶段都出现了一定的延迟。随着时间的推移,两种系统逐渐进入稳定工作状态,这时图 10 中 A 处的流量波动依然较为明显。而这时,在相同时间 PID 自适应控制系统也进入了稳定工作状态,这时将图 11 中 B 处的流量状态与图 10 中 A 处相比较显示图 11 系统流量更加稳定。通过分析证明,PID 自适应控制系统提高了液压盘式刹车系统的响应速度与稳定性。

### 5 结语

本文首先分析了液压盘式刹车系统的结构,建立了对应的数学与仿真实验模型。通过分析与仿真发现:当外部负载连续变化时,传统的控制方式引起了液压缸有效体积的不稳定变化,造成液压盘式刹车系统的响应速度较低,影响了液压盘式刹车的使用,其次,针对这一问题,以单神经算法为理论基础,以传感器、PID 控制环节为核心设计了一种具有 PID 反馈环节的自适应控制系统,通过 PID 反馈环节的控制,提高刹车系统响应速度,进而达到提高系统稳定性与响应速度的目的。

最后,以 AMESim 为手段搭建了 PID 自适应控制系统的仿真模型并进行了仿真实验,通过实验结果的对比分析表明,PID 控制系统提高了液压盘式刹车系统的响应速度,保持了系统所需的工作流量与压力,提高了系统运行的可靠性,同时增强了设备的适用性,因此本设计具有一定的应用价值。

### 参考文献:

[1] 乔福家. 钻机液压盘式刹车系统工作原理与维护分析[J]. 设备管理与维修,2022(10):54-56.  
 [2] 周远宏. 钻机液压盘式刹车系统工作原理与维护浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2020,40(2):123-124.  
 [3] 李顺. PSZ75 液压盘式刹车系统的设计与研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2016.  
 [4] 文娟,肖苏宸. PSZ65 液压盘式刹车工作钳设计[J]. 电子制作,2015(5):83-84.  
 [5] 钱占松. 三通阀控单作用缸在电液位置伺服系统的应用研究[J]. 液压与气动,2020(6):127-134.  
 [6] 栗君. 压缩式垃圾车液压油流量增加对其温度的影响[J]. 汽车与驾驶维修(维修版),2022(3):28-31.  
 [7] 李资,张海丽. 基于 AMESim-Matlab 的伺服电机速度-压力回路仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):135-137.  
 [8] 李小伟,高清冉. 基于 MATLAB 的汽车悬架系统参数分析[J]. 济源职业技术学院学报,2022,21(1):47-50.  
 [9] 王琳,王文博,钱爱文. 神经网络模糊 PID 控制半主动悬架系统[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2022,32(2):65-72.  
 [10] 曹亚楠. 基于 AMESim 的大流量安全阀动态特性分析与仿真[D]. 西安:西安科技大学,2014.

收稿日期:2022-09-01

(上接第 108 页)

[8] 刘红军,莫蓉,范庆明,等. 并行工程下基于特征的零件可制造性及其评价方法研究[J]. 计算机应用研究,2009,26(3):980-983.  
 [9] 王宏君,张利强,敬石开. 基于模型融合与映射的零件可制造性分析建模技术[J]. 计算机集成制造系统,2013,19(9):2153-2159.  
 [10] 阮超峰. 基于成熟度的并行协同设计方法探究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(1):60-62.  
 [11] 陈阳平. 基于数字样机的直升机协同设计研究与应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.  
 [12] DOOLEY K, SUBRA A, ANDERSON J. Maturity and its impact on new product development project

performance[J]. Research in Engineering Design, 2001,13(1):23-29.

[13] 惠巍,金哲珠,胡保华,等. 基于产品成熟度的设计制造高度并行研发模式[J]. 航空制造技术,2016,59(23):137-141.  
 [14] 郭亮,张超,唐倩,等. 面向设计制造一体化的航空产品成熟度建模方法[J]. 现代制造工程,2018(8):42-47.  
 [15] 朱凌子,王时龙,杨波,等. 基于成熟度模型的航空产品并行协同研制模式[J]. 重庆大学学报,2018,41(10):19-29.

收稿日期:2022-11-11