

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.10.003

# 基于成熟度模型的航空产品并行协同研制模式

朱凌子, 王时龙, 杨波, 唐倩, 王彦凯

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对航空产品研制过程中设计部门与制造部门分离, 研制流程多为单向串行, 导致出现复杂航空产品研制周期长、质量低的现状, 分析了复杂航空产品的研制流程, 建立航空产品成熟度模型, 对其研制过程中的重要环节和状态节点进行定义。在此基础上, 提出基于成熟度模型的航空产品研制流程控制技术, 该技术采用成熟度计算取代原有的阶段评审, 实现研制流程的跳转控制和制造部门介入的节点判定。设计基于二级模糊综合评价的航空产品研制成熟度等级评价方法, 实现航空产品研制成熟度的多层次多因素评价。为了验证上述方法的有效性, 将其应用于某型号航空产品的研制过程。采用上述方法后, 制造部门能够有效地提前介入并开展研制工作, 实现基于制造成本节约的并行工程, 达到缩短研制时间, 保证研制成本可控且产品质量稳步提高的目的。

**关键词:**航空; 并行工程; 产品成熟度; 模糊综合评价

**中图分类号:**TH11

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2018)10-019-11

## Concurrent and collaborative development mode of aviation product based on capability maturity model

ZHU Lingzi, WANG Shilong, YANG Bo, TANG Qian, WANG Yankai

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,  
Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** One of the main obstacle to the development process of aviation product is that the separation between the design and manufacturing departments together with the one-way serial mode of design-manufacturing leads to the long development cycle and low quality. This paper analyzed the development process of complex aviation products, established the aviation product maturity model, and defines the important links and state nodes of the development process. An aviation product development process controlling technology based on capability maturity model was presented. This technology replaced the original review by maturity calculation, achieving the control of the development process and determining the nodes for manufacturing sector involved in. An evaluation method for aviation product development maturity level based on the two-level fuzzy comprehensive evaluation method was designed to realize the multi-level and multi-factor evaluation of aviation products maturity degree. In order to verify the effectiveness of this method, it was applied to the development process of a type of aviation product. The

**收稿日期:**2018-05-18

**基金项目:**国家科技支撑计划资助项目(2015BAF17B00)。

Supported by National Key Technology Research and Development Program(2015BAF17B00).

**作者简介:**朱凌子(1992—),女,重庆大学硕士研究生,主要从事智能制造等研究。

王时龙(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

results show that the manufacturing sector can effectively get involved in advance to implement the concurrent engineering, which is aimed at saving manufacturing cost by shortening the development time, controlling the development costs and improving the quality of products.

**Keywords:** aviation; concurrent engineering; product maturity; fuzzy comprehensive evaluation

航空工业作为高科技的战略性产业,具有全球化和垄断化的趋势<sup>[1]</sup>。实际上,目前几乎没有航空产品项目的研制过程是由一家公司单独承担的,大多是由多家公司甚至不同国家合作而成<sup>[2-3]</sup>。这种跨国合作的工作环境需要在航空产品研制过程中实现上下游多专业并行协同,以达到缩短研制时间,尽量降低研制成本、保证研制质量稳步提高的目的<sup>[4]</sup>。

中国的航空产品研制目前仍是采用典型的串行模式,航空产品的产品设计与工艺、工装设计、产品制造不能同时进行,下游设计、制造必须在上游设计完成后才能开展,上游设计产生的错误也会累积至下游相关工作中,导致出现研制周期较长,返工率较高,产品质量难以保证等问题<sup>[5]</sup>。

因此,采用基于并行工程技术的并行协同研制模式是提升航空产品研制效率和产品质量的必然方向之一。并行工程技术能实现人员、功能、技术、信息的集成,并达到缩短研制时间、提高产品质量的目的。大连海事大学的刘寅东等<sup>[6]</sup>分析了船舶并行协同设计特征,搭建了船舶并行协同设计环境,阐述了采用并行工程技术对船舶制造业的积极影响。上海交通大学的胡洁等<sup>[7]</sup>提出了一种基于系统论的并行协同设计方法,为复杂产品的设计提供了有效方法,但这种方法没有针对性,不能完全适应航空产品的研制过程。南京航空航天大学的王凯等<sup>[8]</sup>提出一种基于任务关联 WBS/Petri 网的飞机总体布置设计过程建模方法,实现了飞机总体布置设计任务的静态结构表达和动态流程分析。

目前,基于并行工程的产品研制虽然实现了设计部门与制造部门的并行协同,但是在并行工程项目的前期工程阶段往往会增加时间或费用<sup>[9]</sup>。同时,由于缺少对下游部门介入的时间节点和工作内容进行控制,下游部门的提前介入工作易成为无效提前参与,由此变更导致的资源浪费巨大,成本明显升高。尤其是在有着周期长、层次多、复杂度高等特点的航空产品研制上,上述缺点会更加突出。

由于成熟度模型适用于管理和优化复杂产品的研制流程,所以笔者将成熟度模型应用于航空产品研制并行协同模式中,可以反映该对象从设计到制造的进展情况,实现上下游多专业并行协同,让工艺设计与生产准备等工作在设计数据正式发放前提前介入并开展工作,从而提升航空产品研制质量、缩短整体研制周期,对航空产品研制过程进行更加有效的流程控制。

## 1 航空产品研制流程分析

目前,中国大部分航空产品研制企业仍采用设计所和制造厂分离的串行研制流程,笔者根据通用飞机研制流程<sup>[10-11]</sup>和中国实际研制流程总结出原有航空产品研制流程,如图 1 所示,灰底色为制造部门相关工作(下同)。不同研制阶段的跳转基于每一级的阶段评审,相关人员根据提前设置的工作内容、关键节点和专家评审意见决定研制流程的走向。

航空产品的研制从可行性分析开始,到方案设计、初步设计、发图生产、工艺工装设计、工装制造、零部件制造,直至最后的样机制造和试飞,各个部门的信息基本上都是单向传递。设计阶段与制造阶段严格区分,设计工作完成之后,制造工作才开始进行,结果导致设计方和制造方信息沟通不便,产品研制周期长,设计缺陷多。

同时,串行研制流程也导致设计部门对制造厂的制造能力不够了解,不能及时根据制造设备、制造工艺的变化调整设计方案,容易出现设计要求不切实际的情况;而制造部门不能完全理解设计方案,在制造工艺无法达到设计要求时,可能擅自降低设计要求,影响最终产品的质量。两个本应是及时沟通的部门却存在着信息交互困难的问题。

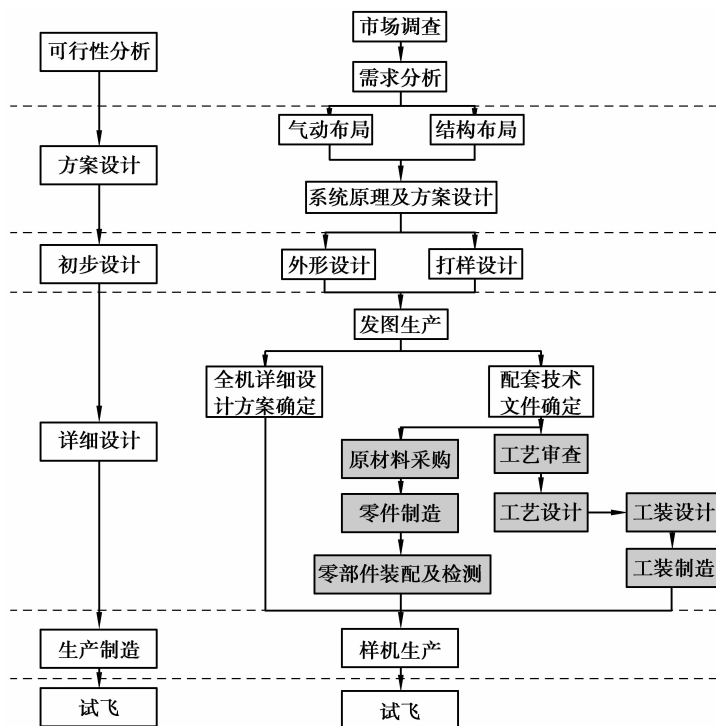


图 1 原有航空产品研制流程

Fig.1 Original aviation product development process

## 2 基于成熟度模型的航空产品研制流程控制

### 2.1 航空产品成熟度模型

产品成熟度的概念来源于能力成熟度模型(capability maturity model,CMM)。CMM 最早于 1987 年由卡内基·梅隆大学软件工程研究院提出,它是对于软件组织在定义、实施、度量、控制和改善其软件过程的实践中各个发展阶段的描述<sup>[12-13]</sup>。现在 CMM 的概念不仅用于软件开发,陆续有人提出了技术成熟度、制造成熟度、产品成熟度、人力资源成熟度等结合各类学科特点的成熟度模型<sup>[14-15]</sup>。

产品成熟度是指产品在设计、工艺、生产和应用上的成熟程度,是对产品数据信息(产品结构信息、几何信息、工艺信息、分析结果和检测结果等)完成情况和详细程度的描述。中国目前少有应用于航空产品研制过程的航空产品成熟度模型。

针对航空产品研制流程的产品成熟度是指对航空产品研制过程中完成情况和详细程度的描述,是评估研制进展的一种度量,直观反映了产品的具体研制进度。根据具体的航空产品研制流程,笔者将航空产品成熟度划分为方案设计、初步设计、详细设计 3 个环节、8 个等级,并对每一个等级进行基线设计,也就是等级描述。从初始状态开始,产品若符合下一级等级描述,可以进行成熟度等级正向提升。在关键节点设立里程碑,用以控制整个研制流程的进展,更重要的是让工装设计、工艺设计、零部件加工、试验验证等部门在设计阶段提前介入。

这样不仅制造部门能够提前开展工作,运用设计部门提供的数据及信息进行相应的实践,并反馈给设计部门,以便设计部门提前发现设计中存在的问题。而且设计部门在设计过程中也能更多地考虑制造需要的信息,做到面向制造的设计,从而提升产品质量,缩短研制周期,降低返工率,降低研制成本,达到设计制造并行协同的目的。

### 2.2 航空产品成熟度等级划分

笔者在现有航空产品研制流程研究的基础上,结合航空产品成熟度的特点<sup>[16-17]</sup>,确立了 8 个成熟度等级,包括方案设计、初步设计、详细设计 3 个环节,具体的产品成熟度等级划分及该等级成熟度需达到的状态见表 1。

表 1 航空产品成熟度模型  
Table 1 Capability maturity model of the aviation product

成熟度	研制阶段	成熟度达到的状态
PM1	气动布局	初步确定飞机外型;初步确定系统原理及方案;论证并选择飞机气动布局、总体装置、各功能系统原理方案和配置方案;初步确定主要结构布置(如发动机、进气道、机翼、起落装置等)。
PM2	方案设计	提出飞机总体技术要求,试验项目,并制订或选用标准规范;优化总体布置方案并进行结构强度系统的初步设计;基本确定框站位、梁轴线、主要交点等信息;确定主要承力构件位置。
PM3	方案冻结	确定系统原理及方案;确定总体布局、结构布局方案;确定试验项目;确定研制任务分工和新成品研制定点;编制总体技术文件;编写飞机总体研制方案报告。
PM4	外形设计	确定飞机外型;形成飞机外型数字样机;总体协调,发出技术设计用总体设计文件;初步预计和分析论证飞机可靠性、维修性和测试性指标;进行系统可靠性、维修性和测试性初步设计分析。
PM5	初步设计	结构、系统初步设计;调整总体方案;编写型号规范;制定材料类型;确定电缆、管路的直径与走向;确定结构重点部位的详细设计方案。
PM6	打样冻结	确定初步布局理论外形数据库;形成打样样机;提出飞机试飞方案和飞行试验要求;完成结构和系统的全面打样。
PM7	发图冻结	确定全机详细设计方案;确定配套技术文件;建立数字样机或确定实物样机设计要求和总体方案;冻结飞机技术状态
PM8	详细设计	完成飞机详细设计,发出全套生产图样、技术条件及配套文件;确定最终布局理论外形数据库;发出地面设备和随机工具生产图样;发出试验任务书及全机静、动力等试验大纲;制造实物样机。

### 2.3 航空产品研制流程控制

为达到设计制造并行协同的目的,笔者将 8 个成熟度等级分为 3 个部分分别对应 3 个研制阶段,工装设计、工艺设计、零部件加工、试验验证等设计、制造部门根据前文设定的航空产品成熟度在设计阶段提前介入,相关部门提前介入节点及工作见表 2。

表 2 相关部门介入节点及工作  
Table 2 Relevant departments involved nodes and works

成熟度	研制阶段	介入部门	具体介入工作	参与单位
PM1-3	方案设计	工艺部门	了解现有工艺水平,进行需求分析;进行飞机总体工艺方案论证。	设计、制造
		工装部门	了解现有工装制造能力,进行需求分析。	设计、制造
		工艺部门	根据飞机总体设计方案,拟定工艺总方案,进行工艺预审查;确定工艺分离面,对飞机外形进行初步工艺分析;制定零部件制造工艺方案。	设计
		工装部门	根据飞机总体设计方案,拟定工装初步设计方案;初步确定大型装配工装外形工装的设计方案。	设计
PM4-6	初步设计	零部件加工部门	了解现有的零部件生产设备和技术,配合工艺部门制定零部件制造工艺方案。	设计、制造
		试验验证部门	气动设计相关试验;编制主要地面试验项目初步的试验任务书,进行专用试验台搭建,提出飞机试验件清单;进行新成品原理性试验;做飞行试验相关准备	

续表2

成熟度	研制阶段	介入部门	具体介入工作	参与单位
PM7-8	详细设计	工艺部门	进行工艺审查;编制并发布配套工艺文件;确定飞机试制总工艺方案。	设计
		工装部门	完成工装详细设计,开始进行工装制造。	设计、制造
		零部件加工部门	进行地面设备和随机工具等零部件生产。	制造
		试验验证部门	进行结构、系统的原理方案试验和关键技术攻关;完成发图前验证性试验。	
		采购部门	根据制定的材料需求计划进行原材料的采购。	

根据表 1、表 2,将航空产品成熟度模型应用于原有的航空产品研制流程,用成熟度计算取代原有的阶段评审,并对研制流程进行改进,将制造部门的部分工作提前到最早的方案设计阶段开始进行,改进后的流程如图 2 所示。

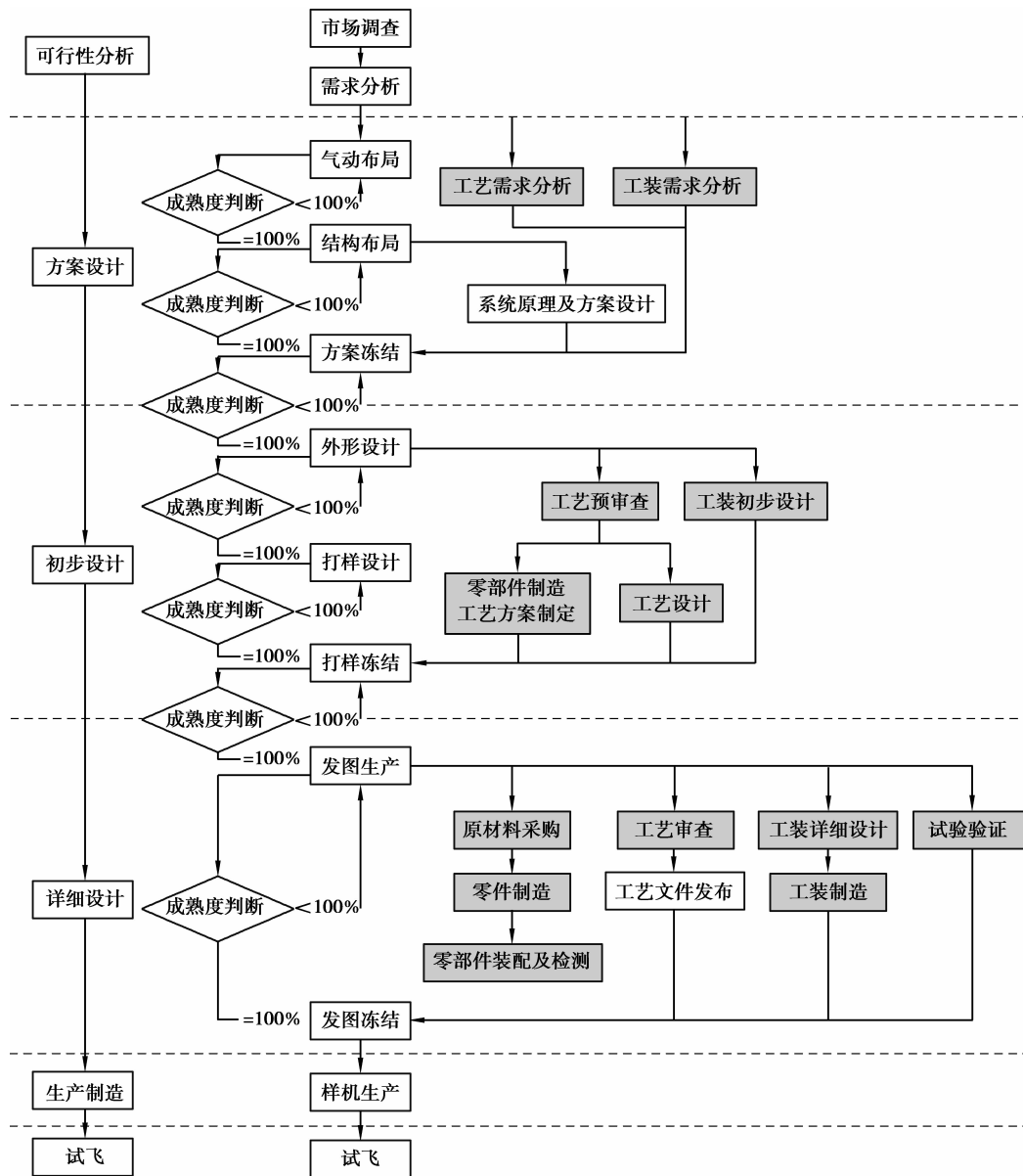


图 2 改进后的航空产品研制流程

Fig.2 Improved aviation product development process

与原有流程相比,改进后的流程中制造部门介入时间更早,设计部门与制造部门的沟通更加通畅,在产品设计中能够更多地考虑制造相关信息,减少因为制造工艺不能达到要求、制造厂装备变更等原因造成的返工量。

产品成熟度模型的建立同时也简化了原有的审批流程,待相关工作文档上传至系统,经过计算后自动对成熟度等级进行变更,进而自动启动下一步的研制工作,不再需要冗余的会议讨论等流程,相关工作的开展也能根据结果更加快捷高效。

从图 2 可以看出,基于成熟度等级判断的研制流程跳转是实现上述流程控制的基础,具体跳转控制如图 3 所示。

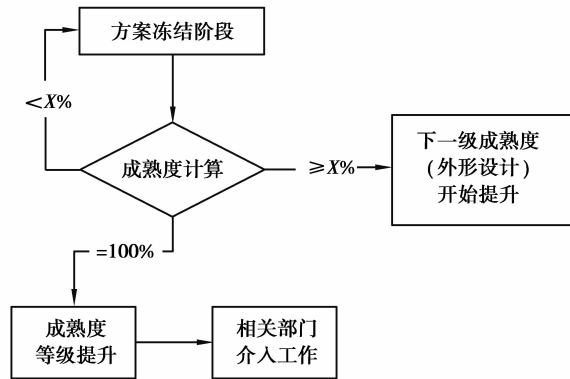


图 3 基于成熟度的研制流程跳转控制

Fig.3 Development process control based on capability maturity model

详细流程为:

- 1) 当  $C_i = 100\%$  时,成熟度等级提升一级 ( $i + 1$ );
- 2) 当  $C_i \geq X\%$  时,下一级成熟度可以根据相关工作的完成情况开始提升;
- 3) 当需要进行设计更改时,若导致上一级的成熟降低至  $X\%$  以下,则成熟度等级降低一级 ( $i - 1$ )。

$C_i$  为某级成熟度的量化结果,  $C_i \in [0.1]$ ;  $X$  为某级成熟度的跳转节点,根据每一级的工作内容确定。

### 2.4 航空产品成熟度二级模糊综合评价

从图 3 及上述跳转控制可以看出,能否对成熟度进行正确合理的计算是研制流程能否正确跳转的关键。

根据航空产品研制过程的特点,笔者采用模糊综合评判<sup>[18-19]</sup>,对航空产品成熟度进行量化评判。因航空产品评判因素多,会使得各因素的权重分量分配过小,导致评判结果失效或失真,所以选用二级模糊综合评判方法。评价流程如图 4 所示。

具体步骤如下:

- 1) 确定评价对象(航空产品研制流程)的一级因素集  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n\}$ , 其中  $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{is}\} (i = 1, 2, \dots, n)$ , 此为子因素集,也就是第二级因素集,  $s$  为某一级因素集中二级因素个数,且满足  $U_{i-1}^n = U, U_i \cap U_j = \phi, i \neq j$ 。

由表 1 可知,航空产品每一级成熟度的标准不同,因此每一级成熟度的因素有所不同。具体因素(指标)由相关专家根据研制流程确定。如一级因素集总体方案设计  $U_1$  中包含气动布局设计  $U_{11}$ 、进排气设计  $U_{12}$ 、质量与平衡方案设计  $U_{13}$  等 6 个二级因素。

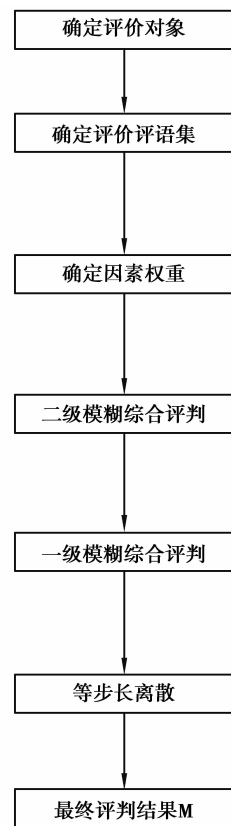


图 4 二级模糊综合评判流程

Fig.4 Two-stage fuzzy comprehensive evaluation process

2) 确定评判评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。这里将评判集分为 5 级, 从高(较好)、较高(较好)、一般、较低(较差)、低(差)5 个等级对航空产品研制流程中的所有因素进行评判, 如表 3 所示。

3) 确定各因素在评判中的权重  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n\}$ , 此为一级因素权重系数, 其中  $W_i = \{W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{is}\}$ , 此为二级因素权重系数。

权重的确定有多种方法, 如统计方法和继承方法<sup>[20]</sup>, 由于航空产品的研制已有一定的基础, 所以选用统计方法。首先请航空产品专家或从事航空产品研制工作且具有丰富经验的人员对因素集  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n\}$  中各元素的权重进行衡量, 综合多位专家的评判结果确定各因素的权重系数(取多位专家的平均值或者根据专家的权威性、熟悉性等因素确定一个专家权重)。

4) 二级模糊综合评判。首先从更详细的二级因素集  $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{is}\} (i = 1, 2, \dots, n)$  开始进行评判。由相关人员根据评判集的 5 个等级对二级因素集中的每一个元素进行打分, 打分区间为  $[0, 1]$ , 对打分

结果进行归一化处理, 得到二级因素集对评判集的模糊关系矩阵  $R_{sm} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{s1} & r_{s1} & \dots & r_{sm} \end{bmatrix}$ , 表示因素集中

的元素属于评判集中每一评价等级的程度高低, 也就是因素  $U_{is}$  对评价  $v$  的隶属度  $\mu_{vm}(U_{is}) = r_{ism}$ 。

然后根据上一步确定的二级因素权重系数, 得出二级模糊综合评判  $B_i = W_i \times R_{sm}$ 。

5) 一级模糊综合评判。将二级模糊综合评判结果作为一级模糊综合评判的评判因素  $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]^T$ , 根据第 3 步确定的一级因素集权重系数, 得出一级模糊综合评判  $C = W \cdot B$ 。

6) 为了使航空产品成熟度评判结果更加直观, 笔者将产品成熟度在区间  $[0, 1]$  按等步长 ( $h = 0.25$ ) 离散为 5 个点, 得到评判集  $V = [0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00]$ , 由此得出最终的航空产品成熟度评判结果  $M$ 。

该模糊运算中有多种合成运算方法可以选择<sup>[21-22]</sup>, 针对评价对象的特征, 笔者选择了模型  $M(\cdot, +)$ , 因为航空产品的每一项因素对于产品的研制流程都有不可消除的影响, 该模型不仅考虑了所有因素的影响, 而且保留了单因素评判的全部信息。

表 3 评判评价集定义  
Table 3 Judgment set definition

评价等级	定义
$v_1$	高(好)
$v_2$	较高(较好)
$v_3$	一般
$v_4$	较低(较差)
$v_5$	低(差)

### 3 应用实例

在某型号的航空产品研制过程中, 相关部门开展了基于成熟度模型的航空产品研制流程控制技术试点应用, 当研制流程进行至 PM3 方案设计的方案冻结阶段时, 为了判断此时的成熟度状态, 需要计算此时的航空产品成熟度, 设计、制造等相关部门根据成熟度计算结果, 调整目前的工作内容, 决定是否该开启下一项工作计划。

1) 根据表 1 和相关专家意见, 笔者将 PM3 的航空产品成熟度模糊综合评价因素集设定为二级, 包括 4 项二级评价因素和 15 项一级评价因素, 同时确定每一项评价因素的权重, 如表 4、表 5 所示。因为航空产品研制流程较复杂, 需要考虑的因素较多, 且评价因素大多具有一定的模糊性, 所以将每一项评价因素分为高

(好)、较高(较好)、一般、较低(较差)、低(差)5 个等级。

表 4 各因素的权重  
Table 4 weight of elements

一级因素集 $U_i$	权 重	二级因素集 $U_{ij}$	权 重
总体方案设计 $U_1$	0.4	气动布局设计 $U_{11}$	0.3
		进排气设计 $U_{12}$	0.1
		重量与平衡方案设计 $U_{13}$	0.1
		飞机方案外形和隐身设计 $U_{14}$	0.1
		结构方案设计及强度评估 $U_{15}$	0.2
		战术性能设计与计算 $U_{16}$	0.2
功能系统原理方案设计 $U_2$	0.3	机电系统方案设计 $U_{21}$	0.4
		飞控系统方案设计 $U_{22}$	0.3
		航电武器系统方案设计 $U_{23}$	0.3
研制组织 $U_3$	0.2	飞机行政总指挥和总设计师 $U_{31}$	0.2
		飞机行政总指挥系统 $U_{32}$	0.2
		设计师系统 $U_{33}$	0.3
		质量师系统 $U_{34}$	0.3
制造部门 $U_4$	0.1	工艺需求分析 $U_{41}$	0.5
		工装需求分析 $U_{42}$	0.5

表 5 各因素下评价指标专家打分(各因素对评价指标的隶属度)  
Table 5 Experts' scores of the evaluation index of each element

因素(指标)		评价结果(专家 1)									
		$v_1$		$v_2$		$v_3$		$v_4$		$v_5$	
		打分 $A_1$	隶属度	打分 $A_2$	隶属度	打分 $A_3$	隶属度	打分 $A_4$	隶属度	打分 $A_5$	隶属度
$U_1$	$U_{11}$	0.8	0.296	1	0.370	0.5	0.185	0.3	0.111	0.1	0.037
	$U_{12}$	0.7	0.200	1	0.286	0.8	0.229	0.6	0.171	0.4	0.114
	$U_{13}$	0.8	0.242	1	0.303	0.7	0.212	0.5	0.152	0.3	0.091
	$U_{14}$	0.6	0.171	0.9	0.257	1	0.286	0.6	0.171	0.4	0.114
	$U_{15}$	0.7	0.200	0.8	0.229	1	0.286	0.7	0.200	0.3	0.086
	$U_{16}$	1	0.313	0.9	0.281	0.7	0.219	0.4	0.125	0.2	0.063
$U_2$	$U_{21}$	0.8	0.235	1	0.294	0.8	0.235	0.5	0.147	0.3	0.088
	$U_{22}$	0.7	0.212	1	0.303	0.8	0.242	0.5	0.151	0.3	0.090
	$U_{23}$	1	0.333	0.8	0.267	0.6	0.200	0.4	0.133	0.2	0.067



续表5

评价结果(专家1)											
因素(指标)	v <sub>1</sub>		v <sub>2</sub>		v <sub>3</sub>		v <sub>4</sub>		v <sub>5</sub>		
	打分 A <sub>1</sub>	隶属度	打分 A <sub>2</sub>	隶属度	打分 A <sub>3</sub>	隶属度	打分 A <sub>4</sub>	隶属度	打分 A <sub>5</sub>	隶属度	
U <sub>3</sub>	U <sub>31</sub>	0.7	0.200	1	0.286	0.8	0.229	0.6	0.171	0.4	0.114
	U <sub>32</sub>	0.7	0.200	1	0.286	0.8	0.229	0.6	0.171	0.4	0.114
	U <sub>33</sub>	0.7	0.200	1	0.286	0.8	0.229	0.6	0.171	0.4	0.114
	U <sub>34</sub>	0.7	0.200	1	0.286	0.8	0.229	0.6	0.171	0.4	0.114
U <sub>4</sub>	U <sub>41</sub>	0.8	0.242	1	0.303	0.7	0.212	0.5	0.152	0.3	0.091
	U <sub>42</sub>	0.8	0.242	1	0.303	0.7	0.212	0.5	0.152	0.3	0.091

2) 二级模糊综合评判。将因素集分为 4 个集合分别进行模糊综合评判,航空产品成熟度评价因素集  $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{16}\}$ , 相应的权重集为

$$W_1 = \{W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}, W_{15}, W_{16}\} = \{0.3, 0.1, 0.1, 0.1, 0.2, 0.2\},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.296 & 0.370 & 0.185 & 0.111 & 0.037 \\ 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \\ 0.242 & 0.303 & 0.212 & 0.152 & 0.091 \\ 0.171 & 0.257 & 0.286 & 0.171 & 0.114 \\ 0.200 & 0.229 & 0.286 & 0.200 & 0.086 \\ 0.313 & 0.281 & 0.219 & 0.125 & 0.063 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = W_1 \cdot R_1 = \{0.253, 0.298, 0.229, 0.148, 0.072\}.$$

航空产品成熟度评价因素集  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{22}\}$ , 相应的权重集为

$$W_2 = \{W_{21}, W_{22}, W_{23}\} = \{0.4, 0.3, 0.3\},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.235 & 0.294 & 0.235 & 0.147 & 0.088 \\ 0.212 & 0.303 & 0.242 & 0.151 & 0.090 \\ 0.333 & 0.267 & 0.200 & 0.133 & 0.067 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = W_2 \cdot R_2 = \{0.258, 0.289, 0.227, 0.144, 0.082\}.$$

航空产品成熟度评价因素集  $U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}\}$ , 相应的权重集为

$$W_3 = \{W_{31}, W_{32}, W_{33}, W_{34}\} = \{0.2, 0.2, 0.3, 0.3\},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \\ 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \\ 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \\ 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = W_3 \cdot R_3 = \{0.200, 0.286, 0.229, 0.171, 0.114\}.$$

航空产品成熟度评价因素集  $U_4 = \{U_{41}, U_{42}\}$ , 相应的权重集为

$$W_4 = \{W_{41}, W_{42}\} = \{0.5, 0.5\},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.242 & 0.303 & 0.212 & 0.152 & 0.091 \\ 0.242 & 0.303 & 0.212 & 0.152 & 0.091 \end{bmatrix},$$

$$B_4 = W_4 \cdot R_4 = \{0.242, 0.303, 0.212, 0.152, 0.091\}.$$

将以上 4 个矩阵合成为模糊关系矩阵  $B$ , 得到二级模糊综合评判结果:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.253 & 0.298 & 0.229 & 0.148 & 0.072 \\ 0.258 & 0.289 & 0.227 & 0.144 & 0.082 \\ 0.200 & 0.286 & 0.229 & 0.171 & 0.114 \\ 0.242 & 0.303 & 0.212 & 0.152 & 0.091 \end{bmatrix}。$$

3) 一级模糊综合评判。将上一步得到的二级评判结果作为一级评判的评判因素集,结合第 1 步确定的权重系数  $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4\} = \{0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$ ,得到 PM3 的航空产品成熟度评判结果。

$$C = W \cdot B = [0.243, 0.293, 0.227, 0.152, 0.085]。$$

4) 为了使航空产品成熟度评判结果更加直观,将结果用区间  $[0, 1]$  的小数来表示。根据评判集  $V = [0.95, 0.75, 0.55, 0.35, 0.15]$  得出最终的评判结果  $M = [0.641]$ 。因此,该航空产品成熟度属于 PM3 方案冻结阶段 64.1%,管理系统根据该评判结果,自动将下一步工作内容下发给相应部门,如工装部门对工装制造能力进行需求分析,减少了工艺工装等部门的会议讨论流程,简化了部门负责人的审批流程。将原本在设计阶段后期甚至结束后才开始的制造部门工作提前至设计阶段前期,加强了设计制造部门的信息交互,减少研制周期,实现了设计与制造的并行协同。

## 4 结 语

航空工业是一个国家高科技产业的重要组成部分,与航空产品研制流程控制方法相关的研究,对于确保航空产品的高效研制有着重要的意义。笔者针对目前航空产品研制所采用的串行研制流程具有周期长、返工率高、产品质量低等缺点,提出了基于成熟度模型的航空产品研制流程控制方法。该方法针对航空产品研制流程的特点,建立了航空产品成熟度模型,8 个成熟度等级的模型体现了研制过程中的三大关键研制阶段和重要节点,接着对航空产品成熟度进行二级模糊综合评价,并根据评价结果指导相关部门的工作内容及时间节点,实现了航空产品研制流程的自动控制 and 设计制造的并行协同。并通过应用实例,验证了本文方法的正确性和有效性。

本文的研究仍然有一定的局限性,如设立航空产品成熟度模型时主要考虑了设计阶段的工作,后续研究应加入制造、试飞及维修等阶段的工作内容,使此模型更为完善。

### 参考文献:

- [1] Isaksson M, Bruze M. Aircraft industry[M]//Kanerva L, Wahlberg J E, Elsner P, et al, eds. Handbook of Occupational Dermatology. Heidelberg, Berlin: Springer, 2000.
- [2] Sarh B, Buttrick J, Munk C, et al. Aircraft manufacturing and assembly[M]//Nof S, eds. Springer Handbook of Automation. Heidelberg, Berlin: Springer, 2009.
- [3] Hirsch B, Humbert G. Production control in the aircraft industry[M]//Rolstadås A, eds. Computer-Aided Production Management. IFIP State-of-the-Art Reports. Heidelberg, Berlin: Springer, 1988.
- [4] Price M A, Robinson T T, Soban D, et al. Maintaining design intent for aircraft manufacture[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1):99-102.
- [5] 李文正.飞机设计流程解析[M].北京:航空工业出版社,2013.  
LI Zhengwen. Aircraft design process analysis[M]. Beijing: Aviation industry Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 刘寅东,苏绍娟.船舶并行协同设计环境及关键技术[J].大连海事大学学报,2011,37(1):25-28,31.  
LIU Yindong, SU Shaojuan. Collaborative environment and key techniques of ship integrated framework design[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(1):25-28, 31. (in Chinese)
- [7] 胡洁,彭颖红,熊光耀.基于系统论的并行协同设计方法研究[J].计算机集成制造系统,2005,11(2):151-156.  
HU Jie, PENG Yinghong, XIONG Guangleng. Research on concurrent and collaborative design based on system theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(2): 151-156. (in Chinese)
- [8] 王凯,刘毅,李文正.协同工作模式下飞机总体布置设计过程建模[J].重庆大学学报,2012,35(2):41-46.  
WANG Kai, LIU Yi, LI Wenzheng. A design process modelling method for airplane general arrangement in the cooperative development mode[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(2):41-46. (in Chinese)

- [9] 金兴明. 并行工程及其在航空电子产品研制中的应用[J]. 航空学报, 2001, 22(6): 505-508.  
JIN Xingming. Concurrent engineering and its application in R&D of avionics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(6): 505-508. (in Chinese)
- [10] Wang Q P, Fan L, Wu X H. Research on the new airplane develop system based on 3D-digital technique and multi-companies collaboration[J]. Procedia Engineering, 2015(99): 101-110.
- [11] Barbosa G F, Carvalho J, Filho E V G. A proper framework for design of aircraft production system based on lean manufacturing principles focusing to automated processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(9/10/11/12): 1257-1273.
- [12] Ngai E W T, Chau D C K, Poon J K L, et al. Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 146(2): 453-464.
- [13] Kerrigan M. A capability maturity model for digital investigations[J]. Digital investigation, 2013, 10(1):19-33
- [14] Lee J H, Suh E H, Hong J. A maturity model based CoP evaluation framework: A case study of strategic CoPs in a Korean company[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3):2670-2681.
- [15] P Fraser, J Moultrie, M Gregory. The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability[C]//IEEE International Engineering Management Conference, August 18-20, 2002, Cambridge, UK. [S.l.]: IEEE, 2002; 244-249.
- [16] 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.
- [17] Siedlak D J L, Pinon O J, Schlais P R, et al. A digital thread approach to support manufacturing-influenced conceptual aircraft design[J]. Research in Engineering Design, 2018, 29(2): 285-308.
- [18] 黄洪钟.模糊设计[M].北京:机械工业出版社,1999.  
HUANG Hongzhong. Fuzzy design[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 杨纶标,高英仪,凌卫新.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2011.  
YANG Lunbiao, GAO Yingyi, LING Weixin. Fuzzy mathematics principle and application[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [20] Antonsson E K, Sebastian H J. Fuzzy sets in engineering design[M]//Zimmermann H J, eds. Practical Applications of Fuzzy Technologies. The Handbooks of Fuzzy Sets Series, Vol 6. Boston, MA: Springer, 1999.
- [21] Liu T I, Yang X M, Kalambur G J. Design for machining using expert system and fuzzy logic approach[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1995, 4(5): 599-609.
- [22] Salhi S. Applications of fuzzy set methodologies in industrial engineering[J]. Journal of the Operational Research Society, 1991, 42(3): 262-263.