

# 基于矩阵相容性的飞机装配序列模糊综合评价<sup>\*</sup>

## Fuzzy Evaluation for Aircraft Assembly Sequence Based on Matrix Compatibility

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 庄绪法 朱海平 李海 何非

**[摘要]** 为简便有效地评价飞机可行装配序列,在建立飞机装配评价指标体系基础上,根据矩阵相容性原理来获得评价指标权重值,并将基于工艺规则的定性评价方法和基于量化指标的定量评价方法相结合,提出基于矩阵相容性的飞机装配序列模糊评价方法,并进行反馈优化。最后,根据装配实例验证该方法的有效性。

**关键词:** 飞机装配序列 模糊评价 矩阵相容性 反馈优化

**[ABSTRACT]** To simply and effectively evaluate the feasible aircraft assembly sequence, the assembly evaluation index system is established, and the evaluation index weight can be obtained on the principle of matrix compatibility. A fuzzy evaluation method for aircraft assembly sequence based on matrix compatibility, by combining qualitative evaluation method based on process rules and quantitative evaluation method based on quantitative index is proposed, and the feedback optimizing for evaluation results is done. Finally, an application example is presented to illustrate the feasibility of the approach.

**Keywords:** Aircraft assembly sequence Fuzzy evaluation Matrix compatibility Feedback optimizing

社会的需求和市场的竞争推动着飞机制造技术的不断更新和制造模式的不断改进。传统的飞机研制流程<sup>[1]</sup>为:概念性设计→初步设计→详细设计→原型机试制→原型机试飞→批生产。然而波音公司在1995年利用数字化预装配手段缔造了在没有生产样机的情况下就获得了波音777飞机订单的制造业奇迹。其中,面向装配的设计是实施数字化预装配的关键技术,这从侧面反映出飞机预装配工作的重要性。

飞机装配工作在飞机制造中占有重要地位。飞机装配的基础是装配序列生成与优化,目前,国内外许多学者对飞机装配研究做了大量工作。秦龙刚等<sup>[2]</sup>介绍了飞机装配中的先进定位技术为数字化定位技术、特征

定位技术和柔性定位技术。杜娟<sup>[3]</sup>从不协调角度分析了不协调问题产生的原因及解决方法。张开富等<sup>[4]</sup>提出了一种基于实例的飞机装配协调工艺方案设计方法。Yamagiwa<sup>[5]</sup>把可装配性分为多个因素分别进行评价和分析,评分较低的装配操作易于在早期识别和修改。Fazio<sup>[6]</sup>根据特征信息,即装配位置、装配方向、零件间的间隙等信息来评价装配难度。郑寿森等<sup>[7]</sup>应用模糊数学理论,把模糊评价引入可装配性评价,构造了二级评价模型。朱文华等<sup>[8]</sup>提出了给予二级制编码的并行装配序列规划方法,实现产品的并行装配。周开俊等<sup>[9]</sup>提出基于熵权法与模糊集的产品装配序列综合评价方法。

现有装配序列评价方法各有其缺点:定性分析偏于主观性,对专家经验要求较高;定量分析评价指标的量化过程没有统一的、科学的标准。评价指标方面也存在问题,主要是现有方法对影响飞机可装配性的单个因素,特别是装配工艺因素单独进行评价研究较多,而对产品的可装配性进行全面多因素的评价,并利用评价结果进行装配序列反馈优化的研究成果不多。本文从装配单元、装配工艺和装配资源3个层面对飞机装配序列评价的指标体系进行考虑,提出了基于矩阵相容性的飞机装配序列模糊综合评价方法,采用定性分析和定量分析相结合的方法,对可行装配序列集中的序列逐一进行综合评价,进而得出最优的装配序列。

### 1 装配序列评价指标体系

飞机装配序列的质量与装配过程中飞机本体及其装配单元、装配工艺和装配资源等多种因素密切相关。建立飞机装配序列评价指标体系时,应该从整体上研究装配序列的可装配性,即综合考虑装配单元、装配工艺和装配资源对装配序列的影响。装配单元的影响包括其整体外形和装配结构,装配工艺的影响包括装配顺序、装配路径和装配工位等,装配资源的影响包括装配资源的引入时机、摆放位置、姿态等<sup>[10]</sup>。本文将影响飞机装配序列质量的评价指标分为以下11种(图1)。

(1)装配单元质量。装配单元的质量越大,装配过程中的可操作性越差,质量大的装配单元应优先装配。

(2)转配单元对称性。装配单元对称性可由装配单

<sup>\*</sup> 国家863计划资助项目(2012AA040909);国家科技支撑计划项目(2012BAF10B08)。

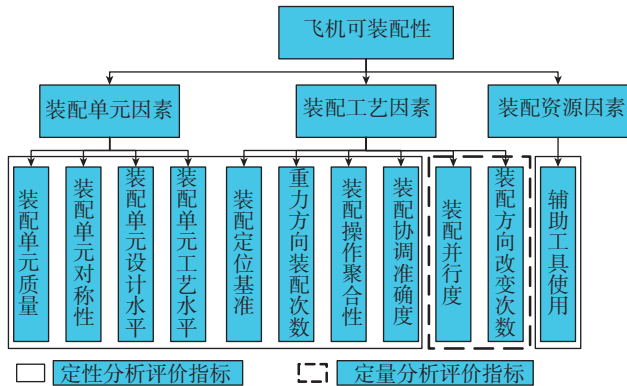


图1 飞机装配序列评价指标体系

Fig.1 Aircraft assembly sequence evaluation index system

元质心与其包围空间中心的距离来判断,装配单元的对称性越差,装配过程中定位难度越大,应优先装配。

(3)装配单元设计水平。主要指装配单元的互换性、协调性和可维修性等。装配单元的设计水平越高,对装配资源的要求就越低,装配成本就越低。

(4)装配单元工艺水平。主要指装配单元加工制造过程中用到的加工工艺水平。装配单元的工艺水平越高,其本身的精度也就越高,装配难度低。

(5)装配定位基准。主要指装配过程中定位基准的选择,不同的部件结构定位基准的选择标准不同,合适的定位基准不仅使装配简单易行,且装配准确度也较高。

(6)重力方向装配次数。主要指装配操作过程中,在重力方向的装配次数占总装配操作次数的比例。重力方向装配次数越多,装配难度越低,减少装配资源的使用。

(7)装配操作聚合性。主要指在装配过程中相同的或相似的装配操作应集中完成,以减少装夹次数和更换装配工具的次数。

(8)装配协调准确度。协调准确度是指两个相配合的零件之间配合部分的实际形状和尺寸相符合的程度。协调准确度越高,即协调误差越小,装配精度越高。

(9)装配并行度。装配并行度是指飞机装配过程中装配并行操作的能力。装配序列的并行度越高,对装配资源利用率也越高,能够提高装配效率,节省装配时间。

(10)装配方向改变次数。主要指同一装配基准的装配操作中,装配方向改变的次数。装配方向改变次数应尽量减少,以节省装配时间,避免复杂装配工艺装备的设计。

(11)辅助工具的使用。装配过程使用的辅助工具主要包括工具、夹具和量具等,辅助工具使用次数包括使用辅助工具的种类数量和更换辅助工具的次数。辅助工具使用次数越多,说明装配难度大,设计的辅助工具多或更换辅助工具的次数多,分别使装配成本增加和

装配周期加长,装配效率低。

## 2 矩阵相容性原理

模糊评判中权重主要由层次分析法得到。层次分析法是专家组给出某一准则下  $n$  个元素两两比较判断矩阵  $T$ ,并由矩阵  $T$  给出权重向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。由于专家组判断意见的不一致,由排序向量构成的矩阵  $W=(w_i/w_j)$ ,与实际判断矩阵  $T$  之间存在距离,且必须进行特征值与特征向量的求解,其应用并不理想。

矩阵相容性是衡量两个矩阵差距的指标。Saaty<sup>[1]</sup> 给出衡量两个矩阵距离相容性的概念与方法。

**定义 1** 设  $M_{R_n}^+$  为  $n$  阶正互反矩阵的集合,则判断矩阵  $T \in M_{R_n}^+$ ,由  $T$  得到的权重向量为  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ ,则矩阵  $W=(w_i/w_j)$  称为矩阵  $T$  的特征矩阵。

**定义 2** 设  $A=(a_{ij}), B=(b_{ij}) \in M_{R_n}^+$ ,若  $A, B$  完全相容,则  $\forall i, j, a_{ij}=b_{ij}$ 。

**定义 3** 设  $A=(a_{ij}), B=(b_{ij}) \in M_{R_n}^+$ ,  $e^T A \cdot B^T e$  称为  $A, B$  的相容度,记作  $C(A, B)$ ,这里  $e^T=(1, 1, \dots, 1)$ ,  $A \cdot B^T$  是  $A$  与  $B^T$  的 Hadamard 积。

设  $T \in M_{R_n}^+$ ,  $T$  的排序权重向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ ,  $T$  的特征矩阵为  $W=(w_i/w_j)$ ,显然,  $w$  可以作为权重向量的充要条件是  $T$  与  $W$  具有满意的相容性。

**定义 4** 设  $A=(a_{ij}), B=(b_{ij}) \in M_{R_n}^+$ ,指标  $SI(A, B)=C(A, B)/n^2$  称为矩阵  $A, B$  的相容性指标。

**定义 5** 当衡量判断矩阵  $A, B$  的相容性时,可采用临界值  $\overline{S.T.}$  作为判断准则,即当  $SI(A, B) \leq \overline{S.T.}$  时,认为矩阵  $A, B$  具有满意的相容性。

利用矩阵相容性原理进行权重向量求解,可避免进行判断矩阵  $T$  的最大特征值与特征向量的求解,并可求解专家意见分歧时的权重向量。具体步骤如下:

**Step1:** 通过评价指标  $u_i$  与  $u_j$  的两两比较可得到  $f_{u_j}(u_i), f_{u_i}(u_j)$ 。  $f_{u_j}(u_i)$  为评价指标  $u_i$  相对于评价指标  $u_j$  的重要程度,取值可根据表 1 所示的标度方法来确定。令  $t_{ij}=f_{u_j}(u_i)/f_{u_i}(u_j)$ ,  $t_{ij}$  作为权重比  $w_i/w_j$  的估计值,从而得到判断矩阵  $T=(t_{ij})_{n \times n}$ 。

表1 判断矩阵标度及其含义

标度	评价指标对比
1	$i, j$ 同等重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值

表2  $\overline{S.I.}$  临界值

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\overline{S.I.}$	1.035	1.067	1.090	1.104	1.116	1.124	1.128	1.134	1.138	1.141

Step2: 本文取  $w'_i = \left( \prod_{j=1}^n t_{ij} \right)^{1/n}$ , 作为元素  $u_i$  的权重

估计值, 再对向量  $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)$  归一化作为排序权重向量  $w$ , 也就是因素权重集:

$$w = \left\{ w'_1 / \sum_i w'_i, w'_2 / \sum_i w'_i, \dots, w'_n / \sum_i w'_i \right\}.$$

Step3:  $T$  的特征矩阵为  $W=(w_i/w_j)$ , 若  $SI(T, W) \leq \overline{S.I.}$ , 则权重向量  $w$  可用, 否则需要调整判断矩阵  $T$  的元素取值, 进行 Step 1 (表 2)。

根据矩阵相容性原理得到各评价指标的客观权重

向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ , 满足  $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^n w_i=1$ 。

### 3 模糊综合评价过程

本文提出的基于矩阵相容性的飞机装配序列模糊综合评价分为两步, 即基于工艺规则的定性分析方法和基于量化指标的定量分析方法。评价流程如图 2 所示。

#### 3.1 建立因素集

根据本文建立的飞机装配序列评价体系, 装配序列定性分析因素集可表示为:  $U=(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9)$ 。分别表示: 装配单元质量、装配单元对称性、装配单元设计水平、装配单元工艺水平、装配定位基准、重力方向装配次数、装配操作聚合性、装配协调准确度和辅助工具的使用。

影响飞机装配质量的评价指标按照评价结果的影响程度不同分为 7 个等级, 因素等级集可表示为:

$Y=(y_j)=(v_{ij})(i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, \dots, 7)$ , 式中  $y_{ij}(i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, \dots, 7)$  表示评价指标  $u_i$  被评价为  $j$  等级, 其含义见表 3。

#### 3.2 建立备择集

评价结果模糊等级可根据实际情况划分, 等级越多, 计算越精

确, 但计算工作量越多。本文将评价指标模糊等级按照 7 级划分法表示, 构造备择集:

$$V=(v_j)=(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7)(j=1, 2, \dots, 7),$$

评价结果分别表示很好、好、较好、一般、较差、差、很差, 其对应得分为  $S=(6, 5, 4, 3, 2, 1, 0)$ 。

#### 3.3 建立权重集

不同的因素等级对备择集中评价结果的影响程度

表3 因素等级集

评价指标 $i$	等级 $j$						
	1	2	3	4	5	6	7
装配单元质量	很好	好	较好	一般	较差	差	很差
装配单元对称性	很好	好	较好	一般	较差	差	很差
装配单元设计水平	很高	高	较高	一般	较低	低	很低
装配单元工艺水平	很高	高	较高	一般	较低	低	很低
装配定位基准	很好	好	较好	一般	较差	差	很差
重力方向装配次数	很多	多	较多	一般	较少	少	很少
装配操作聚合性	很好	好	较好	一般	较差	差	很差
装配协调准确度	很高	高	较高	一般	较低	低	很低
辅助工具的使用	很少	少	较少	一般	较多	多	很多

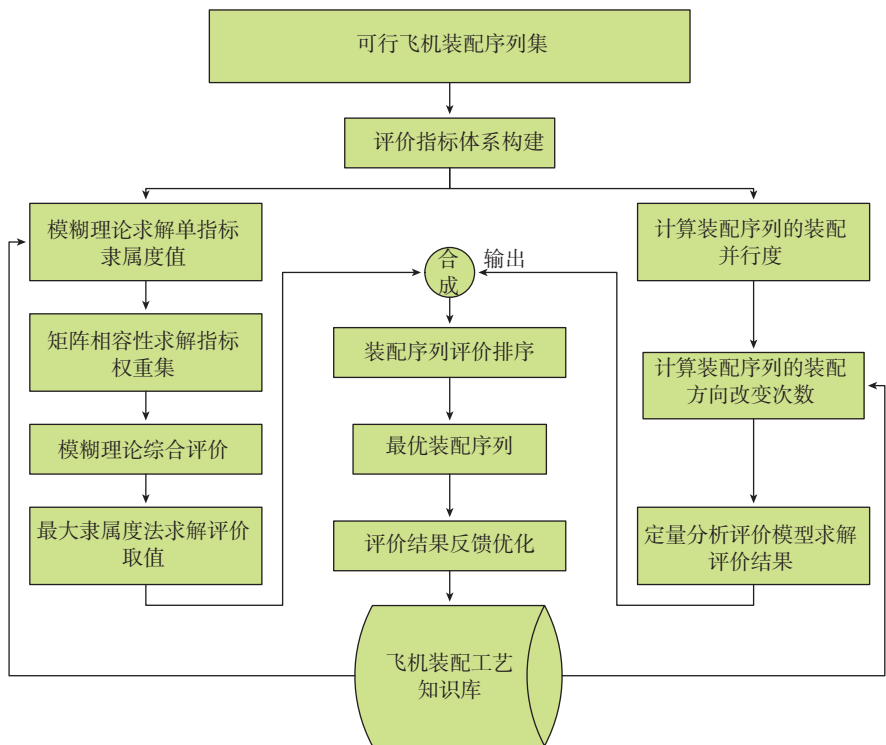


图2 评价流程图

Fig.2 Flow chart evaluation

不同,即隶属度不同。本文按三角形隶属函数制定的评语等分隶属度表<sup>[12]</sup>,根据评语查表4得隶属度 $a_{ij}$ 。 $a_{ij}$ 为评价指标 $u_i$ 对评价结果等级 $v_j$ 的影响程度,满足归一性和非负性条件。等级权重集为:

$$A_i=(a_{i1},a_{i2},a_{i3},a_{i4},a_{i5},a_{i6},a_{i7})(i=1,2,\dots,9)。$$

因素权重集为 $w=(w_1,w_2,\dots,w_n)$ ,根据矩阵相容性原理求得。

表4 因素等级隶属度表

评语	得分						
	6	5	4	3	2	1	0
很好	0.67	0.33	0	0	0	0	0
好	0.25	0.50	0.25	0	0	0	0
较好	0	0.25	0.50	0.25	0	0	0
一般	0	0	0.25	0.50	0.25	0	0
较差	0	0	0	0.25	0.50	0.25	0
差	0	0	0	0	0.25	0.50	0.25
很差	0	0	0	0	0	0.67	0.33

### 3.4 基于工艺规则的定性评价

一级模糊评价是从单个评价指标进行评价,以确定评价对象对等级权重的隶属程度。一级模糊评价的主要任务是确定等级评价矩阵 $R_i$ 。

$$R_i = (r_{ikj}) = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i17} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i27} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i71} & r_{i72} & \cdots & r_{i77} \end{pmatrix}。$$

$r_{ikj}(i=1,2,\dots,9;k=1,2,\dots,9;j=1,2,\dots,9)$ 为评价指标 $u_i$ 进行评价,对其因素等级集的第 $k$ 个元素 $y_k$ 与备择集中第 $j$ 个元素 $v_j$ 的隶属度。

根据等级评判矩阵 $R_i$ 和等级权重集 $A_i$ 计算得出一级综合评判矩阵:

$$B_i=A_i \cdot R_i (i=1,2,\dots,9)。$$

不同评价指标的影响程度不同,根据因素权重集计算得出综合模糊评价函数:

$$B=w \circ r=w \circ [B_i]=(b_1,b_2,\dots,b_7)。$$

二级模糊评价采用 $M(\cdot, +)$ 模型,该模型不但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。 $b_j=\sum_{i=1}^7 a_i r_{ij} (j=1,2,\dots,7)$ ,为飞机装配序列对备择集中备择等级 $v_j$ 的综合满意度。

根据最大隶属度法将区域最大的评价指标 $\max(b_j)$ 相对应的备择元素 $v_L$ 作为飞机装配序列的评价结果,即 $V=\{v_L|v_L \rightarrow \max(b_j)\}$ ,最大隶属度法简单易行,在飞机装配序列的初期筛选时有很好的效果。

### 3.5 基于量化指标的定量评价

最大隶属度法仅考虑了最大评价指标的贡献,舍去了其他指标所提供的信息,且当几个装配序列处于同一模糊评级等级时,无法判定装配序列优劣。飞机装配序列评价结果的优劣主要与装配单元能够以相对较低的成本和较短的时间顺利地装配成产品的能力有关。因此,本文提出基于时间的定量分析法对同一评判等级的飞机装配序列进行定量评价。

飞机装配过程中涉及的零部件数目极大,因此装配时间主要与装配并行度和装配方向改变次数有关。根据飞机装配关系树模型,装配序列的并行度和装配方向改变次数分别用按如下公式计算:

$$PA=1-L_M/L_T$$

$$DC=1-N_C/(N_T-1)$$

式中 $PA$ —装配序列并行度; $L_M$ —装配关系树模型中最长装配链长度; $L_T$ —装配关系树模型总长度; $DC$ —装配方向改变次数; $N_C$ —装配时装配方向改变次数; $N_T$ —装配模型总的零件数。

建立定量分析评价模型为:

$$L=\lambda_1 PA+\lambda_2 DC,$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2$ 为经验系数,满足 $\lambda_1+\lambda_2=1$ 。

由最大隶属度法评价得出同一模糊评价等级的装配序列,经定量分析评价, $L$ 值越大,飞机装配序列的可装配性越好。结合最大隶属度法则,对装配序列进行排序,排序值最大的装配方案为最优方案。

### 3.6 评价结果反馈优化

目前,国内外关于飞机装配序列评价的研究成果存在的最大问题就是没有实现装配序列的反馈优化,对评价结果没有实现充分利用。本文提出反馈矩阵的概念,对不同的评价指标的评价结果进行分析与统计。反馈矩阵可根据如下公式计算:

$$F=SR^T=(f_1,f_2,\dots,f_i),$$

式中 $f_i(i=1,2,\dots,9)$ 为各评价指标的综合评价得分,对其进行对比排序,最优反馈矩阵中排序较低的指标项,专家组需对其进行分析调查,以对飞机装配工艺进行优化改进。

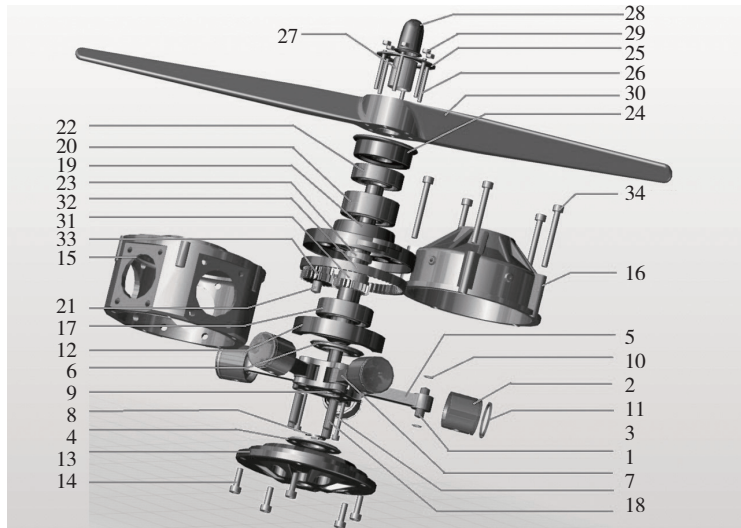
## 4 应用实例

本文提出的基于矩阵相容性的飞机装配序列模糊综合评价,以老式直升飞机发动机为装配评价模型(图3)。图4为装配模型可行装配序列,以其为例进行评价方法有效性验证。装配序列指标评价等级见表5。

最终评价结果为:该装配序列的定性评价值为较好,最大隶属度评价结果为 $\max(b_j)=0.6027$ ,其对应的备择集为 $v_3$ 。根据矩阵相容性得出评价指标权重集为 $w=(0.0236, 0.0541, 0.0762, 0.1215, 0.1906, 0.0361, 0.1380,$

0.2947,0.0653),此时  $SI(T,W)=1.1064$ ,满足相容性要求。由图3可知,该发动机的装配序列由34个零件组成,装配关系树模型中最长装配链的长度为22。故装配序列

装配模型可知,在其现有装配模式下,装配方向多为轴向装配,重力方向装配次数较少,且装配单元对称性一般。



1—连杆 2-5;2—活塞 1-5;3—连杆 - 活塞轴;4—下端盖;5—连杆 1 ;6—上端盖;7—螺钉(内) 1-2;8—挡片;9—内轴承;10—挡圈 1-10 ;11—活塞环 1-5 ;12—主轴;13—底盖;14—螺钉(下) 1-5 ;15—下外壳;16—上外壳;17—下外壳轴承;18—连杆 - 连杆轴;19—凸轮;20—凸轮轴承;21—齿轮轴;22—上外壳轴承;23—衬套;24—桨下盖;25—桨上盖;26—桨螺钉 1-6;27—桨内套;28—桨盖;29—桨螺母 1-6;30—桨;31—外齿轮;32—内齿轮;33—二级齿轮;34—上下盖螺钉 1-5

图3 3DVia Composer环境的模型装配爆炸图

Fig.3 3DVia model assembly explosion in Composer environment

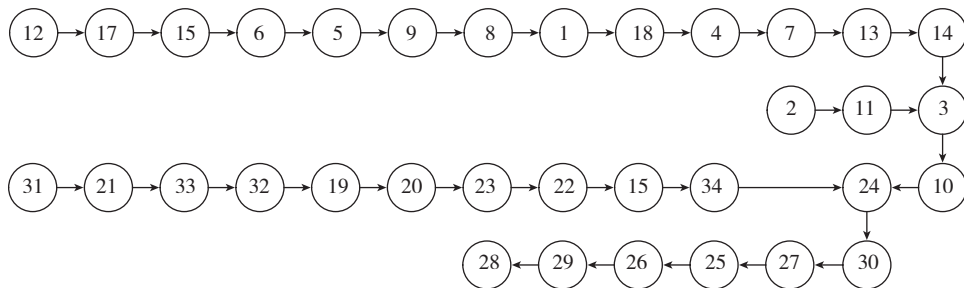


图4 可行装配序列 I

Fig.4 Feasible assembly sequence I

表5 装配序列的指标评价等级

序列	评价指标等级								
	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$
I	2	4	3	3	1	4	1	3	2

的并行度为  $PA=0.43$ 。根据该模型装配多为轴孔连接,其装配方向定义为轴向(+Z,-Z)和周向(C)3个方向,得装配方向改变次数  $DC=0.82$ ,所以  $L=0.625$ 。

该装配序列评价的反馈矩阵为  $F=(10.8,4.63,7.25,7.25,12,4.63,12,7.25,10.8)$ ,其中  $\min(f_i)=4.63$ 。所对应的评价指标装配单元对称性和重力方向装配次数。由发动机

## 5 结束语

飞机的装配工作本身就是涉及零部件数量多、消耗时间周期长、耗费大量人力物力的装配工作。如何从众多的装配序列中选出最适合飞机制造厂实际情况,装配成本低、效率最高的装配序列,关键是建立一个全面的评价指标体系和综合的评价方法。本文将基于工艺规则的定性分析评价方法和基于量化指标的定量分析评价方法相结合,客观全面地评价飞机装配序列。评价方法不仅给出最终的评价结果,还对评价结果进行反馈优化,对装配工艺的优化改进提供参考。实践证明,该方法是合理可行的。

## 参考文献

- [1] 范玉青.现代飞机制造技术.北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [2] 秦龙刚,陈允全,姚定.飞机装配先进定位技术.航空制造技术,2009(14):55-57.
- [3] 杜娟.飞机装配不协调问题的原因分析及解决方法.中国高新技术企业,2011(21):114-116.
- [4] 张开富,李原,邱焱,等.基于实例的飞机装配协调方案设计技术研究.西北工业大学学报,2006(2):249-254.
- [5] Yamagiwa Y. An assembly ease evaluation method for product designers: DAC.Techno Japan,1988,21(12):26-29.
- [6] Fazio T L D, Edsall A C, Gustavson R E, et al. A prototype of feature-based design for assembly. Journal of Mechanical Design, 1993(115):723-734.
- [7] 郑寿森,祁新梅,杜晓荣,等.产品可装配技术指标模糊评价.机械工业自动化,1998,20(6):29-32.
- [8] 朱文华,胡小梅,吴东琦,等.支线飞机装配序列规划的研究.航空制造技术,2009(20):80-82.
- [9] 周开俊,李东波,许焕敏.一种产品装配序列的评价方法.计算机集成制造系统,2006,12(4):563-567.
- [10] 赵磊,李原,董亮.飞机装配顺序多准则渐进式模糊评价方法.航空制造技术,2009(23):74-77.
- [11] Saaty T L. A ratio scale metric and the compatibility of ratio scales: The possibility of arrow's impossibility theorem. Applied Mathematics Letters,1994(6):45-49.
- [12] 李磊,魏生民,张军波.装配序列的模糊综合评价.中国机械工程,2003,14(18):1606-1609.

(责编 三丰)