

飞机装配顺序多准则渐进式模糊评价方法*

Fuzzy Evaluation Method Based on Multi-Index Progressive Mode for Aircraft Assembly Sequence

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 赵磊 李原 董亮

[摘要] 针对飞机装配顺序评价指标多、定性指标量化过程复杂的问题,提出了基于多准则群决策的飞机装配顺序渐进式模糊综合评价方法。实现了对飞机装配顺序的多准则渐进式模糊综合评价。文中所提算法已在某型飞机中央翼壁板组件装配中得到应用,验证了算法的有效性。

关键词: 装配顺序 指标 渐进式 模糊评价

[ABSTRACT] For the situation that there are too many indexes of aircraft assembly sequence (AAS) and the qualitative indexes are hard to evaluate, a progressive fuzzy evaluation algorithm based on multi-index is proposed. Then the AAS can be synthetically evaluated with multi-index progressive mode. Finally, this algorithm is validated in a subassembly of an aircraft, and it is proved to be effective.

Keywords: Assembly sequence Index Progressive mode Fuzzy evaluation

飞机等复杂产品装配顺序具有庞大的解空间,因此在装配顺序选择过程中,必须根据装配工艺要求,对满足装配可行性的装配顺序进行评价筛选。装配顺序选择过程中涉及诸多指标因素,近年来国内外有代表性的研究成果如下所述。

X. F. Zha 等^[1]提出一种基于增加装配操作难度的模糊算法来对装配方案的可行性进行评价。Laperriere^[2]提出了4个评价标准:重定向次数、并行度、子装配稳定性和装配操作聚合性。顾廷权等^[3]提出了针对装配成本对装配方案进行综合评价。潘洋宇等^[4]提出了通过综合装配稳定性、装配关系数和装配并行性来对装配顺序进行模糊评价。李磊等^[5]将影响装配过程的各种因素按属性分类提出了对装配顺序的二级模糊综合评价。储林波^[6]提出了基于模糊集理论的装配顺序评价的方法。Chryssolouris 等^[7]对影响装配时间的因素进行了分

析,并建立了半经验式的时间模型。常向青等^[8]采用了从与或图列举出所有的顺序,通过选取具有模糊意义的指标值进行评价的装配顺序评价方法。

综上所述,现有装配顺序模糊评价方法,针对某条装配顺序,往往对其所有影响指标进行整体评价,指标权重大小的影响仅体现在对装配顺序的影响程度上,这就导致模糊评价指标计算量大,量化过程复杂,降低了装配顺序评价效率,给装配顺序模糊评价增加了难度。

针对上述问题,本课题提出一种飞机装配顺序多准则渐进式模糊评价方法,该方法依据评价指标权重分配方案,将装配顺序进行渐进式模糊评价,及时剔除低效率、低满意度的装配顺序,有效提高了高权重指标对装配顺序的影响程度,大大提高了装配顺序模糊评价效率。

1 多准则渐进式模糊评价模型

基于多准则群决策的装配顺序渐进式模糊评价针对满足装配可行性的多条飞机装配顺序,首先确定装配顺序评价的指标空间 Ω ,在空间 Ω 中包含了设计约束及装配现场对装配顺序的所有约束因素 T_i ($T_i \subset \Omega$);针对指标空间中约束因素 T_i ,分析各约束因素的函数模型 $f(T_i)$ 对综合模型 $F(D)$ 的影响程度 s_i ;依据 s_i 的排序,定义 s_i 的截点阈值 λ ;若 $s_i \geq \lambda$ ($i=1, 2, 3, \dots, m$),则将 s_i 定义为强关联决策集,若 $s_i < \lambda$ ($i=m+1, m+2, m+3, \dots, n$),则将 s_i 定义为弱关联决策集;最后,确定基于各个约束因素 T_i 的函数模型 $f(T_i)$,从而建立面向飞机装配顺序的多准则渐进式评价模型。渐进式模糊评价体系如图1所示。

1.1 装配顺序模糊评价指标空间构建

根据飞机装配顺序评价影响因素多、定性指标量化过程复杂等特点,为了选择最优装配顺序,本课题将基于规则的定性分析指标与基于数值的定量分析指标有机结合。利用产品设计中的模型信息,结合产品装配结构树,通过模糊数学理论对飞机装配顺序进行有效合理评价。提取装配并行度、装配重定向性、装配聚合度、子装配体稳定性、子装配体空间临近性五指标作为飞机装

* 国家“863”项目(2006AA04Z137和2007AA041903)资助。

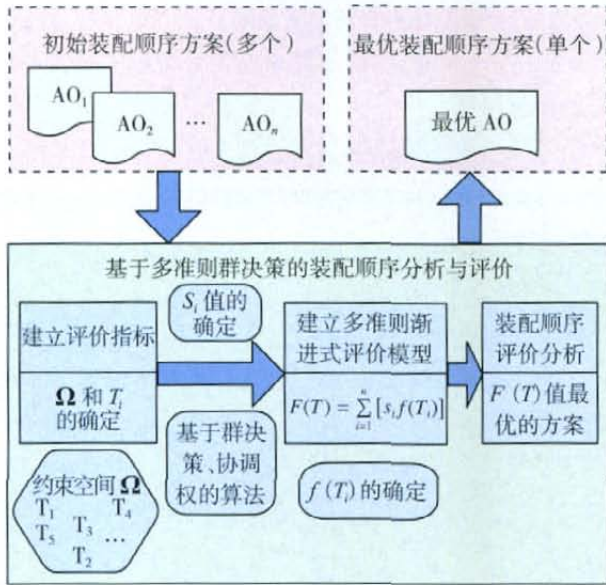


图1 多准则渐进式装配顺序评价体系
Fig.1 System of fuzzy evaluation based on multi-index progressive mode

配顺序评价指标空间 \$\Omega, \Omega = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}\$, 在满足装配工艺条件的基础上, 确定可执行装配顺序方案集 \$\mathbf{u}, \mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}\$, 则由 \$\Omega, \mathbf{S}\$ 确定的装配顺序模糊评价指标空间可表示为:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix},$$

式中, \$f_{ij}\$ 表示为第 \$i\$ 个装配顺序中第 \$j\$ 个评价指标。

1.2 基于群决策的评价指标权重分配

针对本课题提出的飞机装配顺序多准则评价模型, 考虑各影响因素对装配顺序影响的程度不同, 本课题采用评价准则对比权重分配方案, 对所有评价指标分别进行横、纵坐标排列, 将评价指标重要性进行两两对比, 两目标同等重要各给 2 分; 某项比另一项重要分别给 3 分和 1 分; 某项比另一项重要得多分别给 4 分和 0 分。最后通过计算求出各加权系数 \$s_i\$。

$$s_i = k_i / \sum_{i=1}^n k_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n),$$

式中, \$k_i\$ 为某一评价指标的得分; \$\sum_{i=1}^n k_i\$ 为各评价指标的总分; \$n\$ 为评价指标数。各评价目标的加权系数矩阵表示为: \$\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)\$, 满足条件:

$$\sum_{i=1}^n s_i = 1 \quad (s_i \geq 0, i=1, 2, 3, \dots, n)。$$

1.3 基于渐进式评价的权重阈值确定

依据评价指标权重分配方案, 获取影响程度系数 \$s_i\$ 的排序序列, 以 \$s_i\$ 排序为对象, 自定义影响因子权重截点阈值 \$\lambda\$。若 \$s_i \geq \lambda, (i=1, 2, 3, \dots, m)\$ 则将确定 \$s_i\$ 的评价影响因素定义为装配顺序评价的强关联决策集, 可建立强关联模糊评价矩阵对装配顺序进行初始评价; 若评价结果达到满意度要求, 则确定 \$s_i (s_i < \lambda, i=m+1, m+2, m+3, \dots, n)\$ 为装配顺序评价弱关联决策集。此时, 可建立弱关联模糊评价矩阵, 对飞机装配顺序进行后续评价, 直到获得符合满意度的最优装配顺序为止。基于渐进式的评价模型处理流程如图 2 所示。

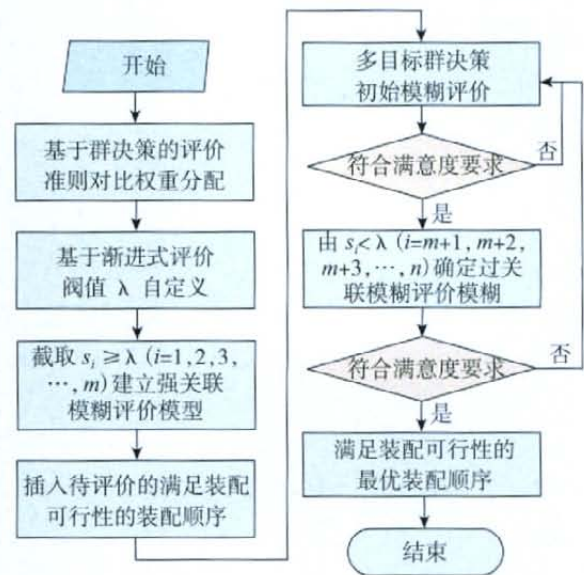


图2 渐进式评价流程
Fig.2 Flowchart of progressive evaluation

1.4 装配顺序模糊评价计算

基于模糊理论的产品装配顺序评价可将评价指标大体分为基于数字量的定量评价指标与基于规则定义的定性评价指标。针对飞机等复杂产品零部件多、装配约束关系多、装配顺序评价影响因素多等特点, 一些对于通用简单产品的定量分析过程用于计算飞机等复杂产品, 显得过于复杂。要准确获取子装配体在外力作用下的稳定性、聚合性等指标, 需要进行大量的计算, 而且没有形成通用的方法。由于本课题考虑渐进式装配顺序模糊评价算法, 根据群决策评价指标对比权重分配方案, 结合专家系统及飞机装配经验知识, 可将弱关联集中的定量指标进行定性分析, 通过隶属度计算实现最终的量化过程。

(1) 定量指标分析。

结合飞机装配顺序图,其规划后的可行三维装配顺序模型必然涵盖装配结构树信息。因此,装配并行度的计算较为简单,可作为量化指标直接定量分析。装配并行度体现装配操作并行的程度。装配并行度越高,装配时间越短,装配操作调度越灵活。

装配并行度可以用相装配的2个子装配体零件数的差值来衡量。2个子装配体在装配时,子装配体所含零件数量越接近,装配并行度越高;否则,装配并行度越低。

装配存在2种极端的方式:一是线性装配,即每步装配操作均只安装一个零件;二是完全并行装配,即除零件级装配操作外,其他装配均为子装配体之间的装配,且装配的子装配体所包含的零件数相等,如图3所示。

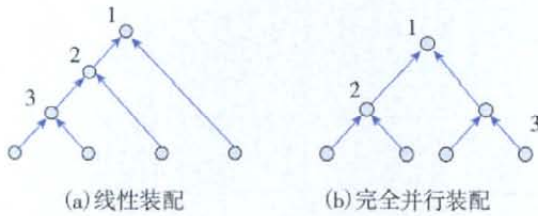


图3 2种极端装配形式

Fig.3 Two extreme modes of assembly

设一个产品由 N 个零件组成,则装配并行度可按下式计算:

$$D_{\text{pam}} = (t_{\text{max}} - t_i) / (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}),$$

式中, t_{max} 、 t_{min} 分别为所有可行装配顺序对应的树的最大深度和最小深度, t_i 为第 i 条装配顺序所对应的树的深度。

D_{pam} 越大,装配并行度越高;反之,装配并行度越低。当 D_{pam} 为1时,表示装配操作为完全并行装配,并行度最高;当每个子装配体中只包含一个零件时,表示装配操作为线性装配,并行度最低。

(2) 定性指标分析。

基于规则的定性指标从一些通用的规则和设计准则出发,对复杂产品装配顺序进行定性的优劣评价。针对飞机装配经验知识,本课题将子装配体稳定性、装配重定向性、装配聚合性和子装配体空间临近性作为飞机装配顺序定性评价指标。

(3) 隶属度计算。

专家系统对设计方案中的各定性指标给出了语言真值,量化方法是将指标分成5个等级,并由所赋标准给出评定值,当指标介于2个等级之间时,评定值取2

个等级评定值之间的值如表1所示。

为了便于计算,应将定性指标的绝对量值转化为相对量,即隶属度。

表1 赋值标准表

指标类型	高	较高	一般	较低	低
成本型	1	3	5	7	9
效益型	9	7	5	3	1

本课题各目标的隶属度函数采用降半梯形分布函数来表示。

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq a \\ \frac{b - x_{ij}}{b - a}, & a < x_{ij} < b \\ 0, & x_{ij} \geq b \end{cases}$$

式中, r_{ij} 为第 j 个方案的第 i 因素的隶属度,在 $[0,1]$ 中分布; r_{ij} 为第 j 个方案第 i 因素的绝对量值; b 、 a 为第 i 个因素指标的最大、最小值。单独从一个因素出发进行评判,确定评判对象的隶属程度 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$,将各单因素评判集按各单因素模糊集的隶属函数式可分别换算出各单因素的隶属度 r_{ij} ,将矩阵 F 变为对应的隶属度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix},$$

为了在不同情况下统一综合考虑,需要进行归一化处理,即

$$r_{ij}^0 = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m),$$

满足条件 $\sum_{j=1}^n r_{ij}^0 = 1$

于是可得

$$R^0 = \begin{bmatrix} R_1^0 \\ R_2^0 \\ \vdots \\ R_m^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^0 & r_{12}^0 & \cdots & r_{1n}^0 \\ r_{21}^0 & r_{22}^0 & \cdots & r_{2n}^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1}^0 & r_{m2}^0 & \cdots & r_{mn}^0 \end{bmatrix}.$$

(4) 糊评价计算。

考虑各因素的权重以后的评价矩阵要通过模糊矩阵合成运算推求,若以 B 表示合成运算后的多因素模糊评价集矩阵,则有:

$$B = A \wedge R^0 = \{b_1, b_2, \dots, b_n\},$$

式中, \wedge 是模糊算子,根据实际问题的需要,可以选定某种具体的模糊综合评价指标 b_j ($j=1, 2, \dots, n$) 的方法。

评价指标的处理方法有3种:最大隶属度法、加权平均法和模糊分布法。本课题只考虑最大评价指标的贡献,因此选用最大隶属度法,取最大的评价指标相对应的方案为最优,即

$$U = \{U_L | U_L \rightarrow \max b_j\}$$

多因素模糊评价集 **B** 表达设计方案多因素的综合评价,它的大小表示设计方案综合评价的优劣,作为优选的依据。不同的设计方案可依据不同的条件、特点和情况给出不同的定量指标和定性指标。依据问题的特点求出 **S** 和 **R**,从而可求 **B**。

2 应用验证

本课题提出的基于多准则群决策的飞机装配顺序渐进式模糊评价方法,以某机型机翼中央翼壁板组件装配顺序为例进行验证,装配评价模型如图4所示。

将评价指标空间 Ω 进行基于群决策的评价准则对比权重分配,如表2所示。

表中, *a*、*b*、*c*、*d*、*e* 分别代表子装配体空间临近性,子装配体稳定性,装配重定向数,操作聚合性,装配并行度。

根据权重分配结果,取阈值 λ 为 0.250,则装配并行度作为强关联决策集;子装配体空间临近性、子装配

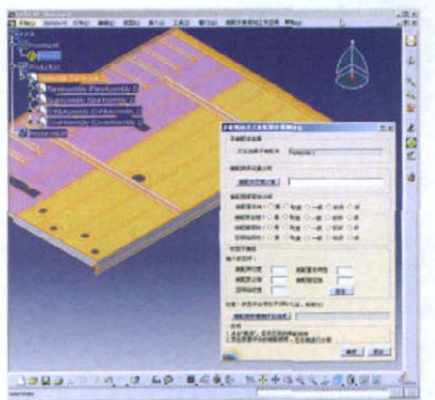


图4 评价模型

Fig.4 Model of evaluation

表2 指标权重表

对比项	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	k_i	a_i
<i>a</i>	0	3	2	2	1	8	0.200
<i>b</i>	1	0	2	2	1	6	0.150
<i>c</i>	2	2	0	2	1	7	0.175
<i>d</i>	2	2	2	0	2	8	0.200
<i>e</i>	3	3	3	2	0	11	0.275

体稳定性、装配重定向数和操作聚合性组成弱关联决策集。计算该装配顺序并行度,若并行度符合装配满意度要求,则可直接进行弱关联模糊计算;若不满足,更改装配顺序,重新计算装配并行度,装配并行度提高,符合装配并行度满意度要求,之后进行弱关联模糊计算,如图5所示。



图5 模糊评价流程

Fig.5 Flowchart of fuzzy evaluation

最后结合定量指标与定性指标分析结果,综合装配顺序强关联模糊评价与弱关联模糊评价矩阵分析,对模糊矩阵进行隶属度函数计算,得出装配顺序多准则渐进式模糊评价结果如图6所示。

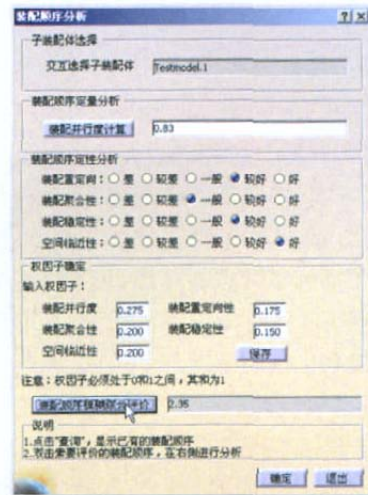


图6 多准则渐进式模糊评价结果

Fig.6 Result of fuzzy evaluation based on multi-index progressive mode

3 结束语

本课题针对飞机等大型复杂产品零部件多、装配顺序 (下转第82页)

此外,由于飞机产品研制过程中有许多不确定因素,更改活动随时都在发生,因此一架飞机的状态处于时刻变化之中。在传统的飞机构型管理中,每一项更改都要实施到最早可应用的飞机上,这样关于飞机的构型将保持一种不稳定的状态,不利于稳定生产。因此在进行飞机构型控制的过程中,可以引入区域点^[3,11]的策略实施更改,所谓的区域点就是将多个、单独的更改积累起来进行合并和实施的预定飞机架次节点。由于更改区域点概念的引入,可以在发生更改时不立即实施,而将更改积累在预定的区域点,即在预先指定的架次上实施构型更改,从而可以稳定飞机的生产,减少由于频繁更改而引发的生产成本的提高。

4 结束语

飞机构型控制技术提供了产品全生命周期中的产品控制能力,将研制过程中的文档、数据和更改记录管理起来,确保最终的飞机产品符合客户和规定的要求。虽然目前我国航空设计制造厂所也已经进行了相关技术的研究和应用,但应用的范围和力度还需要进一步加强。分层的飞机构型控制技术将构型控制的着眼点定位在飞机的上半部分,从而简化了飞机的构型管理过程,更容易地保证了飞机产品数据的可跟踪性。此外,产品数据管理系统的发展,为飞机的构型管理和控制提供了很好的管理平台。但是,对于飞机构型控制技术方面的管理策略和方法仍然需要进一步的研究和深入,尤其是飞机产品在采用了基于模型的定义MBD技术以后,相关的管理方法、标准和规范仍待进一步改进和完善。

参 考 文 献

[1] 于勇,范玉青. 飞机构型管理研究与应用. 北京航空航天大学学报,2005,26(3):357-360.
 [2] 于勇. 基于模块的飞机构型管理技术研究与应用. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2005.
 [3] BACG. Boeing configuration management specification. Boeing Company, 2003.
 [4] Geneva. Quality management-guidelines for configuration management. ISO10007. Switzerland: ISO, 1995.
 [5] Timmermans D P. The business challenge of configuration. Paper from AAAI Workshop, AAAI Press, 1999.
 [6] 秦友淑,曹化工. 工程配置的版本分类及产品版本追踪模型. 计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(2):127-131.
 [7] Conradi R, Westfechtel B. Version models for software configuration management. ACM Computing Surveys, 1998, 30(2):232-282.
 [8] Tichy W F. A data model for programming support

environments and its application. In Proceedings of the IFIP WG 8.1 Working Conference on Automated Tools for Information System Design and Development (New Orleans, Jan.), North-Holland, 1982, 31-48.

[9] 刘刀桂,孟繁晶,邓家缙. PDM中产品变量结构及变量化配置管理的研究. 计算机辅助工程,2001,10(1):7-12.

[10] BACG. Define products distributed to suppliers, Rev C. Boeing Company, 2001.

(责编 侧卫)

(上接第77页)

序影响因素复杂、影响指标量化计算困难等特点,提出了一种多准则渐进式装配顺序模糊评价方法。该方法的主要步骤为:

① 建立基于评价指标空间的装配顺序评价准则;

② 结合各评价指标重要性对比结果,确定指标权重分配方案;

③ 依据权重分配结果,确定渐进式评价模型的权重阈值 λ ;

④ 采用模糊数学中最大隶属度原则对飞机装配顺序进行多准则渐进式模糊综合评价,得出最优装配顺序。通过实例验证该方法有效提高了飞机装配顺序评价效率,并且具有较强的拓展性与适用性。

参 考 文 献

[1] Zha X F, Du H J, Qiu J H. Knowledge-based approach and system for assembly oriented design. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2001,14: 61-75.

[2] Laperriere L, Elmaraghy H A. GAPP: A generative assembly process planner. Journal of Manufacturing System, 1996, 15(4): 282-293.

[3] 顾廷权,高国安,徐向阳. 装配工艺规划中装配序列生成与评价研究,计算机集成制造系统,1998,4(1):25-27.

[4] 潘洋宇,王拴虎,龚光荣. 计算机辅助装配工艺设计关键技术研究. 机械科学与技术,2003,30(2):52-55.

[5] 李磊,白芳妮,魏生民,等. 基于模糊理论的装配序列综合评价. 机械科学与技术,2001,20(1):134-135.

[6] 储林波. 面向虚拟装配的装配工艺规划技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.

[7] George Chryssoulouris, Dimitris Mavrikios, Dimitris Fragos, et al. A virtual reality-based, experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. Robotics and Computer Integrated Manufacturing (S0736-5845), 2000,16(4):267-276.

[8] 常向青,宁汝新. 装配拆卸序列的自动生成与评价方法研究. 北京理工大学学报,2001,21(5):567-573.

(责编 金卯)