

基于广义装配关系的复杂产品装配单元划分方法

靳江艳¹ 黄翔¹ 刘希平² 李泷杲¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 成都飞机工业有限责任公司, 成都, 610091)

摘要:通过分析复杂产品的装配几何关系,考虑夹具和工装在装配过程中的使用情况以及装配工艺性能,建立零部件之间的广义装配关系。在此基础上,构建以装配关系强度和装配并行度为目标的数学优化模型,采用免疫克隆算法进行聚类优化,完成复杂产品的装配单元划分。此方法不仅考虑零部件之间的广义装配关系,而且考虑单元划分的目的,使划分结果更加合理。最后,以某飞机机翼装配单元划分为例进行验证,结果表明该方法具有一定的适用性和有效性。

关键词:广义装配关系;装配单元划分;聚类优化;免疫克隆算法

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)01-0050-06

Assembly Unit Partition for Complex Product Based on Generalized Assembly Relationship

Jin Jiangyan¹, Huang Xiang¹, Liu Xiping², Li Shuanggao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Chengdu Aircraft Industrial Co, Ltd, Chengdu, 610091, China)

Abstract: Generalized assembly relationships between parts are established, which include geometrical assembly relationships, fixtures and tools used in the assembly process and assembly process property. Based on assembly relationship intensity and assembly parallelism, a multi-objective mathematical optimization model is constructed. To realize assembly unit partition for complex product, immune clone algorithm is applied to clustering optimization. Both generalized assembly relationships between parts and the purpose of unit partition are considered so that partition result is more rational. Finally, the method is applied to the aircraft wing assembly unit partition. The result proves that the method is usable and effective.

Key words: generalized assembly relationship; assembly unit partition; clustering optimization; immune clone algorithm

飞机、船舶等机械产品,由于结构复杂、零部件及连接件数量众多、零部件自身重量比较大等因素,其装配工艺设计过程较一般机械产品复杂。装配工艺设计是为装配过程提供工艺技术上的准备,贯穿于产品设计、试制和批产的全过程。其中,装配单元划分是首要进行的工作,是进行合理装配工艺

设计的基础,需要考虑众多的影响因素,主要包括夹具和工装的设计、制造和选择、装配单元的工艺刚度、工艺上的开敞性、生产周期和效率的问题以及其他如现有设备的先进程度、工人的劳动技能和制造过程的管理体制等。

国内外对于装配单元划分的研究相对较少,文

献[1,2]考虑零件之间的结构、功能和工艺约束,基于模糊层次分析法生成装配单元决策图,采用最小生成树算法生成候选装配单元。该方法针对协同装配规划问题提出装配单元规划方法,对于飞机、船舶等大型复杂产品来说,装配单元划分的目的不仅限于此,还需考虑装配单元的工艺性能、生产周期等影响因素。文献[3]将具有公差配合关系的零件划分为一个子装配单元,文献[4]利用三维工艺分离面作为划分依据,进行构件识别和装配单元建模,仅考虑了零部件之间的装配几何关系,没有考虑其他因素对划分结果的影响。文献[5,6]采用实例重用的方法进行装配单元划分,主要解决飞机改型设计问题,不能完全满足现代复杂产品的生产需要。另外,将装配单元划分过程看成一个聚类过程,文献[7,8]采用基于模糊等价关系的动态模糊聚类方法进行装配单元划分,这种方法虽然聚类灵活,但聚类所依据的矩阵已不是原来的矩阵,必然带来分类误差。

针对大型复杂产品装配工艺设计现状,考虑零部件之间的装配几何关系、夹具和工装的使用、以及装配工艺性能,提出基于零部件之间广义装配关系的装配单元划分方法,以广义装配关系强度和装配并行度为目标建立优化模型,采用免疫克隆算法进行复杂产品装配单元划分,并以某飞机机翼的架内装配为例对划分方法进行应用验证。

1 广义装配关系的建立

复杂产品的零部件数量是以几万甚至几百万计的,装配单元数量众多,装配结构和关系复杂,且需要使用大量夹具和工艺装备,其装配单元划分仅依靠零部件之间的层次信息和位置信息是远远不够的。为此,将夹具和工装的使用情况以及装配工艺性能纳入装配关系的范畴,建立零部件之间的广义装配关系,并构建广义装配关系矩阵,矩阵的值表示关系强度。

1.1 广义装配关系

广义装配关系包含零部件之间的装配连接与形位关系、夹具和工装的使用情况以及装配单元的工艺性能。某装配体的广义装配关系可表示如下

$$ER = \{ER_{12}, ER_{13}, \dots, ER_{1n}, ER_{23}, ER_{24}, \dots, ER_{2n}, \dots, ER_{n-1,n}\} \quad (1)$$

式中 ER_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=i+1, i+2, \dots, n$) 表示零部件 i 和 j 之间的广义装配关系

$$ER_{ij} = (C_{ij}, L_{ij}, T_{ij}, M_{ij}) \quad (2)$$

式中: C_{ij} 和 L_{ij} 分别表示零部件 i 和 j 之间的装配连

接关系和形位关系; T_{ij} 表示零部件 i 和 j 之间的夹具和工装使用情况; M_{ij} 表示零部件 i 和 j 的装配工艺性能。

(1) 装配几何关系

装配几何关系包括零部件之间的装配连接关系和形位关系。这里主要考虑几何关系的紧密程度。参考零部件之间几何相关性^[9-10]的定义,装配几何关系的评价标准如表1所示。

表1 装配几何关系评价

几何关系	装配几何关系	评估值
连接关系	焊接、胶接等装配方式形成的不可拆卸连接	5
	压力配合、热胀配合和冷缩配合等装配方式形成的难以拆卸连接	4
	铆接、键连接等形成的较难拆卸连接	3
	螺纹连接等形成的容易拆卸连接	2、1
	无连接关系	0
形位关系	二者之间存在严格的形位关系,如同轴度、平行度、垂直度等	5、4
	间接形位关系:无直接的形位关系,但二者与同一个其他零部件存在严格的形位关系	3、2
	不存在形位关系,但二者与同一个其他零部件存在间接形位关系	1
	无形位关系	0

(2) 夹具和工装的使用情况

零部件之间使用相同的夹具和工装,评估值为5,若不相同或不使用工装,评估值为0。

(3) 装配工艺性

装配工艺性包括工作的机械化与自动化程度、工艺上的开敞性、装配单元的工艺刚度以及是否有利于尺寸和形状协调、是否有利于减少总装阶段工作量等。在实际生产中,矛盾情况经常发生,需要根据产量大小、以往的企业经验等,权衡主次,使矛盾得到合理解决。装配工艺性的评价标准为:很好:5分;好:4分;较好:3分或2分;较差:1分;很差:0分。

1.2 广义装配矩阵的建立

评估零部件之间的广义装配关系强度,建立相关矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times n}$,称为广义装配矩阵

$$r_{ij} = \omega_1[\omega_0 c_{ij} + (1 - \omega_0)l_{ij}] + \omega_2 t_{ij} + \omega_3 m_{ij} \quad (3)$$

式中: c_{ij} 、 l_{ij} 、 t_{ij} 、 m_{ij} 分别表示装配连接关系、形位关系、夹具和工装使用情况及装配工艺性的评估值; ω_0 表示装配连接关系系数; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别表示装配几何关系、夹具和工装使用情况及装配工艺性的

广义装配关系权重, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; n 表示参与划分的零部件数量。

R 的对角线元素均为 0, 是对称矩阵。

2 装配单元划分的优化模型

装配单元划分的目的是在充分利用企业资源的基础上, 尽量缩短生产周期、减小生产成本。而装配单元划分的粒度直接影响到生产周期和成本。一方面, 划分粒度大, 单元内部的装配复杂度高, 装配工作以串行为主, 生产周期长, 周期成本增加, 但随之降低了人力资源成本。另一方面, 划分粒度小, 降低单元内部装配复杂度的同时提高了单元之间的装配复杂度。此时, 装配的并行度提高, 生产周期缩短, 周期成本减少, 但增加了生产所需的人力资源。

由此可见, 装配单元的划分需要满足以下要求:

(1) 每个装配单元内部零部件之间的装配关系强度应尽量大, 装配单元之间的关系应尽量小;

(2) 平衡划分粒度, 降低装配复杂度、缩短生产周期、降低成本。

2.1 装配关系强度

记生成的装配单元数为 n_u , 组成装配单元 i 的零部件数量为 n_i , 则装配单元 i 的广义装配关系强度为

$$U_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n r_{jk}^{(i)}$$

$$r_{jk}^{(i)} = \begin{cases} r_{jk} & \text{零部件 } j \text{ 和 } k \text{ 均属于 } i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

考虑到划分粒度对整个装配体关系强度的影响, 定义装配体关系强度为

$$U = n_u \sum_{i=1}^{n_u} \frac{U_i}{n_i} \quad (5)$$

2.2 装配并行度

出于缩短生产周期的考虑, 划分装配单元时应尽可能使每个装配单元的工作量近似相等, 尤其是对于产品级划分, 这有助于平衡后续的装配流程和节拍。在单元划分初期, 依靠装配复杂程度和工艺专家的经验来估计装配单元的工作量。装配并行度是对各个装配单元装配复杂程度相似性的度量。

将零部件之间的装配复杂程度分为 5 个等级: 复杂: 5 分, 较复杂: 4 分, 较容易: 3 分, 容易: 2 分或 1 分。采用专家打分方式, 给出零部件之间的装配复杂程度矩阵 $Co = [co_{ij}]_{n \times n}$, n 为待划分零部件总数。则装配单元 i 的装配复杂程度为

$$Co_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n co_{jk}^{(i)}$$

$$co_{jk}^{(i)} = \begin{cases} co_{jk} & \text{零部件 } j \text{ 和 } k \text{ 均属于 } i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

装配单元 h 和 i 之间的装配复杂程度为

$$Co_{hi} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n co_{jk}^{(hi)}$$

$$co_{jk}^{(hi)} = \begin{cases} co_{jk} & \text{零部件 } j \text{ 属于 } h, k \text{ 属于 } i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

整个装配体的装配复杂程度为

$$Co_A = \omega_c \sum_{i=1}^{n_u} Co_i + (1 - \omega_c) \sum_{h=1}^{n_u} \sum_{i=h+1}^{n_u} Co_{hi} \quad (8)$$

式中: ω_c 为装配复杂程度系数。

利用物理学中“熵”的概念来衡量装配并行度, 则装配体的装配并行度为

$$P = - \sum_{i=1}^{n_u} \frac{Co_i}{Co_A} \ln \frac{Co_i}{Co_A} \quad (9)$$

P 值越小, 装配并行度越高。

2.3 优化模型

依据上述分析, 装配单元划分的优化目标为

$$\begin{cases} \max \left(U = n_u \sum_{i=1}^{n_u} \frac{U_i}{n_i} \right) \\ \min \left(P = - \sum_{i=1}^{n_u} \frac{Co_i}{Co_A} \ln \frac{Co_i}{Co_A} \right) \end{cases} \quad (10)$$

则优化数学模型为

$$\max \left(F(U, P) = (1 - \omega_p)U + \frac{\omega_p}{P + 1} \right) \quad (11)$$

式中: $\omega_p \in [0, 1]$ 为装配并行度权值, 由设计人员根据实际生产状况给定。

3 基于免疫克隆算法的装配单元划分

免疫算法是根据生物免疫系统运行机制发展起来的一种智能计算方法, 主要功能是对问题的识别、学习和记忆, 具有自适应、自组织、多样性和收敛速度快等优良性能。将人工免疫理论应用于装配单元划分, 提出基于免疫克隆算法的装配单元划分方法。

3.1 编码与种群初始化

采用二维编码方式表示装配单元划分方案^[11-12], 某装配体的一个聚类编码矩阵为

$$C = [c_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中: n 为参与划分的零部件数量; m 为最大聚类

数。矩阵每一行表示一个装配单元(聚类),每个单元格的值表示该单元格对应的零部件是否属于其对应的装配单元。矩阵 C 中,装配单元1包含零部件1,2,3;装配单元2包含零部件4,6;装配单元3包含零部件5,7。

一个二进制聚类编码矩阵 C 对应一条抗体,采用随机法设定初始种群。对于矩阵的每个列向量,任取一个元素置为1,该列向量的其他元素置为0,形成一条初始抗体;然后,重复上述过程,直到达到事先设定的种群规模。

3.2 亲和力

在基于免疫克隆算法的装配单元划分系统中,抗原对应其优化模型,抗体种群对应一组装配单元划分方案。用亲和力对抗体优劣程度进行评估和度量。亲和力是免疫计算中的一个重要概念,包括抗原亲和力和抗体亲和力。

(1) 抗原亲和力

抗原亲和力表示抗体对抗原的识别程度,反映了抗体所描述的装配单元划分方案的优劣程度,划分方案 a_i 的抗原亲和力为

$$aff_i = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (12)$$

式中: F_i 为划分方案 a_i 的目标函数值; F_{\min} 为划分方案种群中目标函数的最小值, F_{\max} 为划分方案种群中目标函数的最大值。

(2) 抗体亲和力

抗体亲和力是指抗体与抗体之间的相似程度。由于抗体种群采用二进制编码,因此用抗体之间的Hamming距离来计算抗体之间的亲和力,在种群中任取两个划分方案 a_p 和 a_q ,对应的聚类编码矩阵分别为 $C_p = [p_{ij}]_{m_p \times n}$ 和 $C_q = [q_{ij}]_{m_q \times n}$ 。每个划分方案对应的装配单元数目不一定相等,即 m_p 与 m_q 的值不一定相等,为了方便计算方案之间的Hamming距离,不失一般性,当 $m_p > m_q$ 时,增加矩阵 C_q 的行数为 m_p ,增加的矩阵元素值均为0,于是, $C_q = [q_{ij}]_{m_p \times n}$ 。

抗体 p 和 q 之间的Hamming距离为

$$d(p, q) = \sum_{i=1}^{m_p} \sum_{j=1}^n |p_{ij} - q_{ij}| \quad (13)$$

考虑到两个划分方案完全相同时,二者之间的Hamming距离为0,故方案之间的抗体亲和力为

$$aff_{pq} = \frac{1}{1 + d(p, q)} \quad (14)$$

由式(14)可见, $aff_{pq} \in (0, 1]$, aff_{pq} 的值越大,表示两个方案的相似程度越高,当 $aff_{pq} = 1$ 时,说明两

个方案完全相同。

3.3 克隆操作

考虑到抗体浓度对免疫过程的影响,对De Castro^[13]提出的克隆选择算法进行改进,利用基于抗体繁殖率的克隆算子进行克隆选择操作^[14]。抗体的繁殖率越高,越容易被选中并进行克隆操作。

划分方案 a_i 的抗体繁殖率为

$$AR_i = \frac{aff_i}{AC_i} \quad (15)$$

式中: AC_i 为划分方案 a_i 的抗体浓度

$$AC_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ac_{ij} \quad ac_{ij} = \begin{cases} 1 & aff_{ij} \geq T_a \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: N 为抗体种群规模; $T_a \in (0, 1)$ 为抗体亲和力阈值,取 $T_a = 0.7$ 。

划分方案 a_i 的克隆规模为

$$q_i = \text{int} \left[Q \times \frac{AR_i}{\sum_{j=1}^N AR_j} \right] \quad (17)$$

式中: Q 为种群克隆规模,取 $Q \geq N$ 。

划分方案 a_i 的克隆操作定义为

$$CL(a_i) = I_i \times a_i = [a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{q_i}}] \quad (18)$$

式中: $I_i = [1]_{1 \times q_i}$; $a_{i_1} = a_{i_2} = \dots = a_{i_{q_i}} = a_i$ 。

则划分方案种群 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 的克隆操作为

$$CL(A) = [CL(a_1), CL(a_2), \dots, CL(a_N)]^T \quad (19)$$

克隆后的划分方案种群为

$$A = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_N\} \quad (20)$$

式中: $A'_i = \{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{q_i}}\}$,且 $a_{i_1} = a_{i_2} = \dots = a_{i_{q_i}} = a_i$ 。

克隆操作完成后,按照系统给定的交叉概率和变异概率,对克隆生成的方案种群进行二维一点交叉操作和基本变异操作。

另外,定义记忆集用来存储具有高抗原亲和力的划分方案,同时也可以记忆集中高抗原亲和力划分方案取代种群中低抗原亲和力划分方案。在免疫算法执行过程中,记忆集不断更新。

综合上述内容,基于免疫克隆算法的装配单元划分步骤如下:

(1) 确定划分方案的初始种群规模 N 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 、终止条件、编码方式等;

(2) 采用随机法产生初始种群 $A(0)$,并定义记忆集 $M(0) = \phi$,记忆集规模阈值为 N_m , $N_m < N$;

(3) 在第 k 代,对划分方案进行评价,计算方案

种群中各方案的抗原亲和力、抗体亲和力和抗体繁殖率；

(4)如果当前种群中包含最佳划分方案,或达到最大迭代次数,则输出计算结果,退出,否则进行记忆操作；

(5)选择种群中 $0.2N$ 个高抗原亲和力划分方案添加到记忆集 $M(k)$ 中,当记忆集中的方案数量超过阈值 N_m 时,利用排挤算法删除多余方案；

(6)按照抗体繁殖率对当前种群 $A(k)$ 进行克隆操作,生成克隆种群 $A_c(k)$ 。

(7)对 $A_c(k)$ 按照交叉概率和变异概率分别进行交叉和变异操作,得到新种群 $A_m(k)$ ；

(8)用记忆集 $M(k)$ 中的方案代替 $A_m(k)$ 中低抗原亲和力方案,生成新的划分方案种群 $A(k+1)$,并转到步骤(3)。

4 应用实例

以某飞机机翼的架内装配为例对划分方法进行验证,某飞机机翼段主体结构如图1所示,按从左至右的顺序,零部件编号依次为 p_1, p_2, \dots, p_9 。

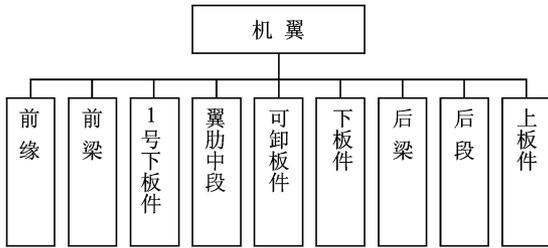


图1 某飞机机翼段主体结构

首先建立广义装配矩阵,每个子矩阵由设计人员根据广义装配关系的评价标准进行评定;然后,给定广义装配矩阵元素各个分量的权值: $\omega_0 = 0.4, \omega_1 = 0.4, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.3$,根据式(3)建立机翼段主体结构各零部件之间的广义装配关系矩阵如图2所示。

零部件之间的装配复杂程度矩阵如图3所示。通过对产品分析,结合生产实际状况,确定装配关系复杂程度系数: $\omega_c = 0.7$,优化目标函数的权重 $\omega_p = 0.2$ 。

运用免疫克隆算法对机翼架内装配进行装配单元划分,取种群数量 $N = 50$,交叉概率 $p_c = 0.8$,变异概率 $p_m = 0.01$ 。算法到16代收敛,运行时间为1 s;优化结果如表2所示。装配单元划分方案为((前缘、前梁)1号下板件、翼肋中段、可卸板件、下板件、(后梁、后段)、上板件)。前梁与前缘装配,后

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
p_1	0	4.68	0.48	0.72	0.48	0.48	0.24	0	0.48
p_2		0	0.48	3.78	0.72	0.72	0.72	0.24	0.72
p_3			0	1.44	1.44	0.48	0.48	0.48	0.48
p_4				0	1.20	1.44	3.78	0.72	1.44
p_5					0	1.44	0.72	0.48	0.48
p_6						0	0.72	0.48	0.48
p_7							0	4.68	0.72
p_8								0	0.48
p_9									0

图2 机翼段主体结构广义装配关系

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
p_1	0	2	4	5	5	5	5	5	4
p_2		0	4	3	5	5	5	5	4
p_3			0	4	4	5	5	5	5
p_4				0	5	5	3	5	4
p_5					0	5	5	5	5
p_6						0	4	5	5
p_7							0	2	4
p_8								0	4
p_9									0

图3 机翼段主体结构装配复杂程度

梁与后段装配,中段的上下板件分别与长桁连接,最后在总装型架内进行组合和铆接。该方案由于前段和后段的工艺刚度比较大,对保证前后段外形有利,但是总装工作量较大。

表2 优化结果

项目	装配关系强度(U)	装配复杂程度(Co_A)	装配并行度(P)	目标函数值(F)
优化结果	32.76	49.6	0.2589	26.37

事实上,装配单元划分方案不是唯一的,这里的划分结果更多地考虑了装配单元的工艺刚度,导致总装工作量增大。并且,由于广义装配关系矩阵的合理与否在一定程度上依赖于设计专家的经验,使得划分结果在一定程度上存在偏差。在工程运用中,应根据产品的实际需求,建立相关关系矩阵,并对划分结果进行适应性调整,从而使最终划分方案更加符合实际生产要求。

5 结束语

结合零部件之间的装配几何关系,将夹具和工装的使用情况及装配工艺性能纳入装配关系范畴,建立了零部件之间的广义装配关系,提出基于广义装配关系的复杂产品装配单元划分方法。该方法可

虑装配关系强度和装配并行度对划分结果的影响,使最终划分方案更加符合工程实际要求。免疫克隆算法的运用在提高算法运行效率的同时,可以保证获得划分方案的全局最优解。将提出的方法应用于某飞机机翼段主体结构装配单元划分,结果表明该方法实现快捷、结果合理,具有良好的应用价值。最后要指出的是,广义装配关系权重的确定比较复杂,需要进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] Wang Y, Liu J H, Li L S. Assembly sequences merging based on assembly unit partitioning[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2009, 45(7): 808-820.
- [2] 王永, 刘继红. 面向协同装配规划的装配单元规划方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(10): 172-179.
Wang Yong, Liu Jihong. Assembly unit partitioning for collaborative assembly planning [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(10): 172-179.
- [3] HCdi Mejri, Bernard Anselmetti, Bernardin Mawussi. A recursive tolerancing method with sub-assembly generation[C]//*Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Besançon, France. New York: IEEE, 2003: 235-240.
- [4] 王自军, 郑国磊, 杜宝瑞. 基于飞机三维模型的装配单元快速划分方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(12): 1495-1498.
Wang Zijun, Zheng Guolei, Du Baorui. Rapid partitioning of an aircraft 3D model into its assembly cells [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(12): 1495-1498.
- [5] 李丽萍, 李原, 张开富. 基于图树模型的飞机装配单元划分[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(2): 157-161.
Li Liping, Li Yuan, Zhang Kaifu. Aircraft assembly unit partition based on chart-tree mode [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(2): 157-161.
- [6] 薛鹏, 李原, 彭培林. 基于实例的飞机装配单元划分技术研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(19): 2318-2321.
Xue Peng, Li Yuan, Peng Peilin. Partitioning assembly cells for aircraft using case-based reasoning [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(19): 2318-2321.
- [7] 马恒儒, 邵毅, 张开富. 飞机工艺组件划分的模糊聚类方法[J]. *航空制造技术*, 2006(9): 73-81.
Ma Hengru, Shao Yi, Zhang Kaifu. Fuzzy clustering approach to process-oriented component partition for aircraft [J]. *Aeronautical Manufacturing Gechnology*, 2006(9): 73-81.
- [8] 王艳玮, 樊其瑾, 彭炎午. 基于模糊聚类的产品合理子装配划分[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(2): 299-301.
Wang Yanwei, Fan Qijin, Peng Yanwu. Product sub-assembly partition method based on fuzzy clustering [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(2): 299-301.
- [9] 潘双夏, 高飞, 冯培恩. 批量客户化生产模式下的模块划分方法研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(7): 1-6.
Pan Shuangxia, Gao Fei, Feng Peien. Module partition method research under the circumstances about mass customization [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(7): 1-6.
- [10] 贡智兵, 李东波, 史翔. 面向产品配置的模块形成及划分方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(11): 160-167.
Gong Zhibing, Li Dongbo, Shi Xiangi. Module generation and module partition method for product configuration [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11): 160-167.
- [11] 刘建刚, 王宁生, 叶明. 基于遗传算法与DSM的产品结构分解聚类方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38(4): 454-458.
Liu Jiangan, Wang Ningsheng, Ye Ming. Decomposition and clustering of product architecture based on genetic algorithms and DSM [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, 38(4): 454-458.
- [12] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 263-268.
- [13] De Castro L N, Von Zuben F J. The clonal selection algorithm with engineering applications[C]//*Proc of GECCO*. Las Vegas, USA: Morgan kaufmann Publishers, 2000: 36-37.
- [14] 陈光柱. 产品免疫概念设计理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 7: 67-68.