

# 考虑资源约束的装配序列动态规划方法研究<sup>\*</sup>

## Research on Assembly Sequence Dynamic Planning Method Considering Resource Constraints

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 孙元亮 李原 张杰 赵磊

**[摘要]** 产品的装配需要人、工具等装配资源的支持,由于生产现场中人员流动、设备维护等因素,使得装配资源具有一定的不确定性,零/部件装配序列需要随之进行调整以避免因装配等待而造成的效率降低。针对这一问题,本文提出将装配资源作为一种动态约束,定义了装配资源状态信息矩阵。以此为基础构造了装配资源影响因子并将之引入了目标函数中,讨论了基于遗传算法进行装配序列动态规划的具体操作和流程。最后,结合 CATIA 二次开发,以某型飞机壁板的装配为例对方法进行了验证。

**关键词:** 装配顺序 装配资源 遗传算法

**[ABSTRACT]** The assembly of products needs the supporting of assembly resources such as operators and tools, and because of some factors such as staff mobility and equipment maintenance, there is some uncertainty on assembly resource, so the assembly sequence need adjustment to avoid efficiency reducing caused by waiting. To solve this problem, this paper proposes an idea to treat assembly resources as one kind of dynamic constraint, and define an assembly resource status information matrix. The impact factor of assembly resource is added in the construction of the objective function, and the genetic algorithm is adopted to execute the real-time planning of assembly sequence. Finally, with the secondary development of CATIA, the assembly of a simple panel of some aircraft is used as an example to validate the correctness of this method.

**Keywords:** Assembly sequence Assembly resource Genetic algorithm

装配顺序是描述产品装配过程的重要信息之一,是对产品装配工艺进行分析和评价的基础,其优劣直接影响到产品的可装配性、装配质量及装配成本。对于航空、航天等大型复杂产品,其零件数量大、结构复杂,为保证

其装配要求,在装配过程中必须大量地使用装配工装、夹具等装配资源,完成对零件的装夹、定位、连接等操作<sup>[1]</sup>。所以对于产品的装配过程而言,各种各样的装配资源在其中扮演了十分重要的角色,对其进行装配顺序规划必须考虑装配资源信息。

计算机辅助装配序列规划(Computer Aided Assembly Sequence Planning, CAASP)是人工智能与装配技术的交叉领域,具有广阔的应用前景,许多学者都对其进行了全方位多层次的研究。Dini G. 和 Santochi M 等<sup>[2]</sup>从产品的 CAD 数据中生成沿空间 6 个坐标轴方向的零件干涉矩阵、接触矩阵,并同时利用产品的其他物理特性生成产品的连接关系矩阵,然后根据这 3 个矩阵的分析生成装配顺序。Zhouping Yin<sup>[3]</sup>等提出了一种基于连接件的装配顺序分层规划方法,其基本思想是通过系统地合并一些简单结构的规划,来为一个装配体建立规划。曾聪文等<sup>[4]</sup>。针对进化类算法中个体智能性不足的问题,设计了求解装配序列规划的一种多智能体进化算法。张刚等<sup>[5]</sup>。对可拆卸启发式规则、拆卸方向和连接关系进行分析,从而生成产品的装配序列。刘诚等<sup>[6]</sup>将基于遗传学原理的基因修复技术引入用于求解装配序列规划问题的遗传算法。李原等<sup>[7]</sup>。采用配合条件法进行装配顺序求解,并添加了一些约束来降低算法的计算量。

然而,现有的研究方法大都致力于根据装配体的当前约束找到一条可行的静态装配顺序,没有考虑到装配资源的变化对装配序列的影响。在装配现场,由于人员调动、设备维护或者其他偶然因素,使得装配资源往往具有一些不确定性,例如装配执行过程中某些装配资源(人、设备等)没有到位,在这种情况下,如果还是根据工艺人员所下发的原始装配序列进行操作,将会影响到装配效率以及装配质量,严重时甚至会导致装配工作无法继续进行。为了解决这一问题,必须调整原始的装配序列,使资源不充分的零件安装顺序尽量靠后,以避免因装配等待而造成的效率降低。特别对于航空航天产品,这一问题显得尤为突出。因此如何根据各种装配资源条件的实际情况对装配序列进行实时地调整,成为装配现场亟待解决的问题。

<sup>\*</sup> 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC12-JS-15-013)、西北工业大学基础研究基金(GBKY1003)、国防基础科研项目资助。

针对这一问题,本文提出将装配资源作为一种动态约束,定义了装配资源状态信息矩阵,在目标函数中增加了装配资源影响因子,并采用遗传算法进行装配序列的实时规划。由于装配资源信息的动态性,装配序列随装配资源信息的变化而调整。结合 CATIA 二次开发,以某型飞机壁板的装配为例对方法进行了验证。

## 1 装配资源状态信息矩阵

装配资源信息指的是与产品装配工艺过程具体实施相关的各种装配资源的总和,包括装配工作台与设备,装配夹具与工具,以及参与装配操作的人员等。这些信息是实施产品装配必不可少的内容,更是进行装配顺序生成与优化所必要的信息。由于人员流动、设备维护等情况,会导致某些资源有时无法参与装配,因而装配资源是一种动态约束。在生产现场,应该设定检查周期,对装配资源进行定期检查。

用  $R(p)$  表示装配零件  $p$  所需的装配资源集合,则:

$$R(p) = \{r(p)_1, r(p)_2, \dots, r(p)_m\}, \quad (1)$$

其中  $r(p)_i$  表示第  $i$  个装配资源,  $m$  表示装配该零件所用到的资源总数。

定义 1: 装配资源状态检查函数。

定义  $\text{value}(r)$  作为装配资源  $r$  的状态检查函数:

$$\text{value}(r) = \begin{cases} 1, & \text{装配资源 } r \text{ 可用} \\ 0, & \text{装配资源 } r \text{ 不可用} \end{cases} \quad (2)$$

定义 2: 零件的装配资源状态。

用  $S_t(p)$  表示零件  $p$  在  $t$  时刻的装配资源状态,则有:

$$S_t(p) = \prod_{i=1}^m \text{value}(r(p)_i). \quad (3)$$

不难看出,只有当所有  $\text{value}(r(p)_i)$  均为 1 时,  $S_t(p) = 1$ , 表示该零件的装配资源充分;若存在至少一项  $\text{value}(r(p)_i)$  为 0, 则  $S_t(p) = 0$ , 表示该零件的装配资源不充分,零件  $p$  此时装配存在困难。

定义 3: 装配资源状态信息矩阵。

设一个产品  $P$  由零件  $p_1, p_2, \dots, p_n$  组成,产品  $P$  在  $t$  时刻的装配资源状态信息矩阵为  $RS_t(P)$ , 它由一个  $1 \times n$  的矩阵表示(式 4)。时间因子  $t$  表征了装配资源的动态性。

$$RS_t(P) = [S_t(p_1), S_t(p_2), \dots, S_t(p_n)]. \quad (4)$$

装配资源状态信息矩阵描述了产品装配资源的状态情况,在此基础上,定义了装配资源影响因子并添加到了目标函数中。采用遗传算法进行装配序列的规划,目标函数(适应度函数)的构造是其重点。

## 2 适应度函数的构造

对于一条装配序列  $s$ , 其适应度函数定义为  $f(s)$ 。本文中适应度函数的构造主要考虑如下 4 个方面:

(1) 装配资源约束: 装配资源具有一定的不确定性,装配资源不充分的零件应该在装配序列中处于比较靠后的位置。

(2) 装配序列的几何可行性: 即可装配性,在装配过程中不发生几何干涉,这是装配序列应满足的首要条件。

(3) 子装配体的稳定性: 在装配过程中如果零件失稳就需要夹具夹持,所以应减少失稳零件的个数。

(4) 装配重定向次数: 重定向需要翻转装配体,重新装夹,这就需要耗费一定的资源,所以应尽量减少重定向次数。

适应度函数的形式为:

$$f(s) = \begin{cases} \omega_1 v_r + \omega_2 v_c + \omega_3 (n - 1 - v_d) & \text{当 } s \text{ 几何可行时} \\ c_N & \text{当 } s \text{ 几何不可行时} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $v_r$  为装配序列  $s$  的装配资源影响因子;  $v_c$  为装配序列  $s$  的稳定连接次数;  $v_d$  为装配序列  $s$  的装配重定向次数;  $n$  为装配体中零件的数目;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  分别为  $v_r, v_c, v_d$  的权重系数;  $c_N$  为惩罚系数,由于本文中适应度函数值随着装配序列优秀程度的提高而增大,所以惩罚系数  $c_N$  应该取一个较小值。

### 2.1 装配资源影响因子的计算

步骤 1: 对一个装配序列  $s$ , 首先建立其所对应的装配资源状态矩阵  $RS_t(s)$ , 建立方法是按零件装配顺序将资源状态信息矩阵  $RS_t(P)$  中的元素进行排列。如果  $s = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ , 则:

$$RS_t(s) = [S_t(q_1), S_t(q_2), \dots, S_t(q_n)]. \quad (6)$$

步骤 2: 建立装配序列位置系数矩阵  $A$ 。对于具有  $n$  个零件的装配体来说,其装配序列位置系数矩阵  $A$  定义如下:

$$A = \begin{Bmatrix} n \\ n-1 \\ n-2 \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

该矩阵记录了装配序列各个位置的权重,第一个位置为最大值  $n$ , 最后一个位置为最小值 1, 中间位置的权重值按等差数列排列。

步骤 3: 将  $RS_t(s)$  与矩阵  $A$  相乘,即可得到该装配

序列的装配资源影响因子  $v_r$ :

$$v_r = RS_i(s) \cdot A = \sum_{i=1}^n (n+1-i)S_i(q_i) \quad (8)$$

由于装配序列位置矩阵  $A$  中位置越靠前权重值越大,位置越靠后权重值越小,如果装配资源矩阵  $RS_i(s)$  中有某几项值为 0,则这几项在装配资源矩阵中的位置越靠后,该序列的  $v_r$  值将越大。也就是说装配资源不充分的零件在装配序列中的位置越靠后,该序列越容易被选择下来。因此,  $v_r$  比较符合实际的反映了装配资源对装配序列的影响。

值得注意的是,由于  $v_r$  中隐含了一个时间  $t$  的参数,所以式(5)中所建立的适应度函数  $f(s)$  也是一个动态的函数,对应不同的装配资源矩阵会有不同的适应度函数。在实际应用时首先设定装配资源检查的周期,在每个周期内利用该适应度函数对装配序列进行选择与优化。该过程充分体现了装配序列规划的动态性。

## 2.2 几何可行性判断以及 $v_c$ 、 $v_d$ 的计算<sup>[2,8]</sup>

在笛卡尔坐标系中,将产品的装配方向分成  $d(k) = \{-x, +x, -y, +y, -z, +z\} = \{d_k\}$  6 个方向。建立装配体的干涉矩阵  $I_{d_k}$ :

$$I_{d_k} = [I_{ij}^{d_k}]_{n \times n}, d_k = \pm x, \pm y, \pm z, \quad (9)$$

上式中  $I_{ij}^{d_k}$  表示零件  $j$  沿着  $d_k$  方向装配与零件  $i$  的干涉情况,发生干涉,则  $I_{ij}^{d_k} = 1$ ; 否则  $I_{ij}^{d_k} = 0$ 。规定  $I_{ij}^{d_k} = 0$ 。

### (1) 装配序列的几何可行性判断。

设  $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  为零件 / 组件  $P_i$  装配前已经装配完成的装配序列,设  $v_k(P_i) = \{v_1, v_2, \dots, v_6\}$  为表示零件 / 组件  $P_i$  在  $d_1, d_2, \dots, d_6$  6 个方向是否为无干涉装配的值,并给出其公式如下:

$$v_k(P_i) = \sum_{j=1}^m I_{P_j P_i}^{d_k} \quad (10)$$

显然,上式中若  $v_k(P_i) = 0$ ,则零件 / 组件  $P_i$  可沿着  $d_k$  方向进行装配,反之则不能装配。对以上结果做连乘计算,若  $\prod_{k=1}^6 v_k(P_i) = 0$ ,则可判断  $\{P_1, P_2, \dots, P_m, P_i\}$  为可行装配序列,并且  $P_i$  可沿着装配方向集  $D_f(P_i) = \{d_k | v_k(P_i) = 0\}$  中的方向进行装配; 否则若  $\prod_{k=1}^6 v_k(P_i) \neq 0$ ,则序列  $\{P_1, P_2, \dots, P_m, P_i\}$  不可行。

### (2) 装配序列重定向次数 $v_d$ 的计算。

所谓装配序列的重定向次数,指的是按照这一装配序列进行装配时装配方向的改变次数。在装配过程

中,调整装配方向是需要耗费资源的,尽量减少方向调整的次数是装配顺序优化的一个重要方面。对于任一可行装配序列  $\{P_1, P_2, \dots, P_m, P_{m+1}, \dots, P_n\}$ ,通过装配方向的推理办法可以得到每一零件 / 组件  $P_i$  的可行装配方向集  $D_f(P_i) = \{d_k | v_k(P_i) = 0\}$ ,对所有已经装配的零件 / 组件的可行装配方向集求交,若  $\bigcap_{i=1}^m D_f(P_i) \neq \emptyset$ ,则在装配  $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  时就不需要改变装配方向; 但是若  $\bigcap_{i=1}^m D_f(P_i) \neq \emptyset$ ,而  $\bigcap_{i=1}^{m+1} D_f(P_i) = \emptyset$ ,则在装配零件 / 组件  $P_{m+1}$  时就必须改变装配方向一次。对整条装配序列进行遍历便可计算出装配方向的改变次数  $v_d$ 。对于具有  $n$  个零件的装配序列,有  $0 \leq v_d \leq n-1$ 。

### (3) 稳定连接次数 $v_c$ 的计算。

为了量化表示可行装配序列的装配稳定性,定义一稳定连接矩阵  $C$  (式 11),其中表示  $C_{ij}$  表示零件  $i$  与零件  $j$  之间的连接关系,当零件  $i$  与零件  $j$  存在稳定连接关系时  $C_{ij} = 2$ ; 当零件  $i$  与零件  $j$  存在接触连接关系时  $C_{ij} = 1$ ,当零件  $i$  与零件  $j$  不存在连接关系时  $C_{ij} = 0$ 。并且定义  $C_{ij} = 0$ 。

$$C = [C_{ij}]_{n \times n} \quad (11)$$

装配序列的装配稳定性可以用向量  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  的和量化表示,即

$$v_c = \sum_{i=2}^n k_i,$$

$$k_i = \begin{cases} 2 & \text{若第 } k \text{ 个与第 } k-1 \text{ 个零件稳定连接} \\ 1 & \text{若第 } k \text{ 个与第 } k-1 \text{ 个零件接触连接} \\ 0 & \text{若第 } k \text{ 个与第 } k-1 \text{ 个零件无连接} \end{cases}, \quad (12)$$

上式中,  $n$  为装配体零件总数;  $v_c$  表示一个装配序列的稳定连接次数,显然  $v_c$  越大,产品装配序列的装配稳定性越好,  $0 \leq v_c \leq 2n-2$ 。

## 3 基于遗传算法的装配序列动态规划

### 3.1 遗传算法相关操作

(1) 编码方式。直接采用零件的顺序编号进行编码,即每个染色体表示一种装配序列,如染色体“123456”表示零件的装配序列为:1-2-3-4-5-6。

(2) 初始种群的生成。初始种群的产生方法通常有两种。一种是完全随机方法,另外一种是将某些先验知识转变为必须满足的一组要求,然后在满足这些要求的解中随机选取样本,这样选择初始种群可使遗传算法更快地到达最优解。对于中小型简单装配体,一般直接采用完全随机方法产生初始种群。对于复杂装配体,装配层次信息可以作为求解装配顺序的先验知识,即可以

在满足装配层次关系的所有装配序列中随机选择初始种群。这样生成的初始种群具有较高的适应度,可以使算法更快收敛达到最优解。本文的实例由于比较简单,采取了完全随机方法生成初始种群。

(3) 选择操作。选择操作用于避免有效基因的丢失,使高性能的个体得以更大的概率生存,从而提高全局收敛性和计算效率。本文为避免出现收敛缓慢的情况,采用基于排名的选择方法,且该方法具有较好的鲁棒性。首先将种群中所有个体由好到坏进行排列,然后以一定方式分配给各个体一定的选择概率,但要求越好的个体所分配的概率越大,且所有个体所分配的概率之和为1。

本文采用线性方式对个体进行概率分配,即个体的选择概率满足逐级递减的等差数列,并且将最差个体的选择概率定为0。如果种群数量为 $n$ ,那么排列好的个体的概率分布为:

$$p_i = \frac{2(n-i)}{n(n-1)} \quad (13)$$

(4) 交叉操作。交叉操作用于组合出新的个体,在解空间中进行有效搜索,同时应该降低对有效模式的破坏概率。本文采用次序交叉(Order Crossover, OX)的操作方式。它首先随机确定两个交叉位置,并交换交叉点之间的片段,并从第二交叉位置起在原先父代个体中删除将从另一父代个体中交换过来的基因,然后从第二交叉位置后开始填入剩余基因。具体操作步骤如下:

a. 随机确定两个交叉位置,如两父代染色体及交叉区域选定为:

$A=2\ 6\ 4\ 17\ 3\ 5\ 8\ 19\ 1;$   
 $B=4\ 5\ 2\ 11\ 8\ 7\ 6\ 19\ 3。$

b. 第二交叉位置起在原先父代个体中删除将要由另一父代个体中交换过来的基因, $A$ 中删除(1876)后剩余(92435), $B$ 中删除(7358)后剩余(94216)。

c. 将两个父代染色体的交叉区域基因进行交换,并且接着从第二交叉位置后开始填入第二步中得到的剩余基因:

$A=4\ 3\ 5\ 11\ 8\ 7\ 6\ 19\ 2;$   
 $B=2\ 1\ 6\ 17\ 3\ 5\ 8\ 19\ 4。$

跟其他方法相比,该方法在一定程度上能满足Holland图式定理的基本性质,子串能够继承父串的有效模式。

(5) 变异操作。采用互换操作的变异技术,即随机交换染色体中两个不同位置的基因。例如,若某装配顺序为(547198623),两随机位置为2,6,则变异操作的结果为(587194623)。

### 3.2 装配序列动态规划流程

针对本文的研究内容,考虑装配资源约束的装配序

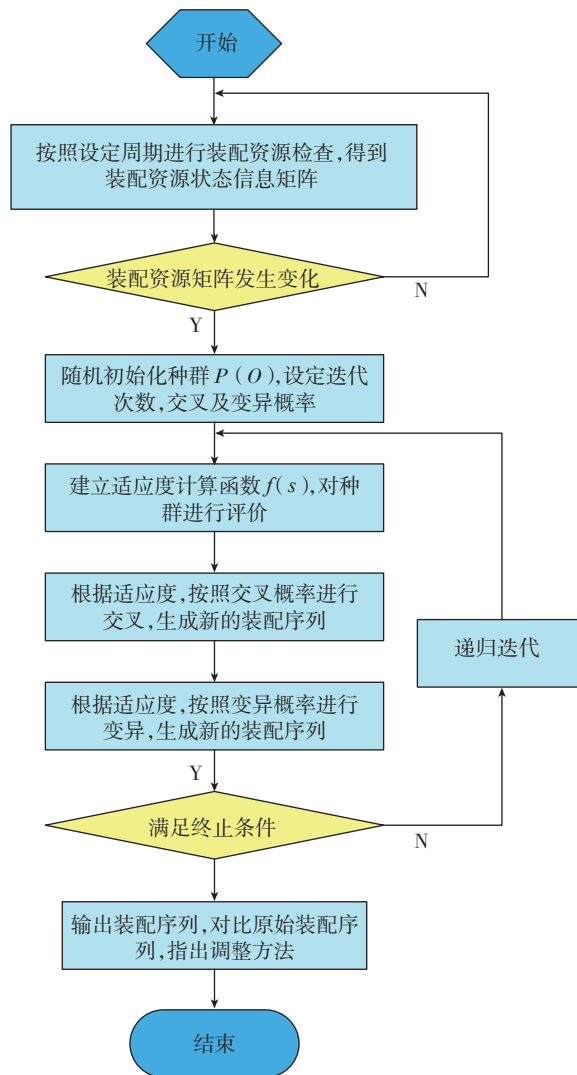


图1 考虑资源约束的装配序列动态规划流程

Fig.1 Flow of assembly sequence dynamic planning method considering resource constraints

列动态规划工作流程如图1所示。

## 4 实例分析

基于以上理论,在三维CAD软件CATIA平台上,

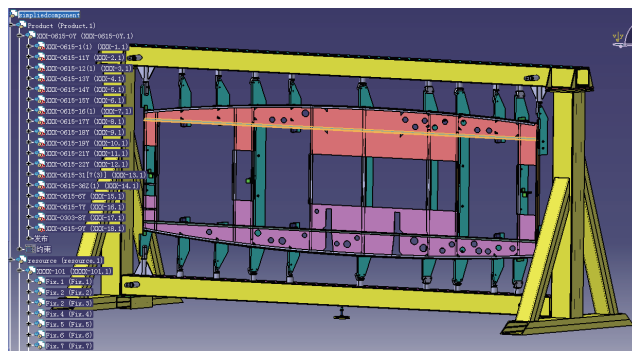


图2 某型号飞机壁板装配模型

Fig.2 Assembly mode of certain type aircraft plate

以CAA (Component Application Architecture) for CATIA为开发工具,开发了集成在CATIA“Assembly Design”工作台中的装配序列动态规划模块。以某型飞机组件装配为例,对方法的有效性与实用性进行验证,验证实例如图2所示。

图2是简化过的某型飞机壁板的装配模型,其中18个零件(编号为1~18)属于壁板产品,而20个零件

(Fix.1~Fix.20)属于装配资源。验证实例信息如表1所示。

(1) 装配资源状态信息矩阵的建立。

本例中,装配资源的状态由设计者人机交互设定。每个零件的所需资源都已在表1中列出,根据前面的定义,容易得到任一零件某一时刻的装配资源状态,从而可以建立其装配资源矩阵 $RS_i(P) =$

表1 验证实例信息列表

零件	编号	所需的资源	零件	编号	所需的资源
1	XXX-1.1	Fix.1~4,Fix.6,Fix.7,Fix.9~13,Fix.15,Fix.16,Fix.18,Fix.20	10	XXX-10.1	Fix.1~4,
2	XXX-2.1	Fix.1~4,Fix.8,Fix.14,Fix.19	11	XXX-11.1	Fix.1~4,
3	XXX-3.1	Fix.1~4,Fix.5,Fix.6	12	XXX-12.1	Fix.1~4,Fix.20
4	XXX-4.1	Fix.1~4,Fix.7	13	XXX-13.1	Fix.1~4,Fix.20
5	XXX-5.1	Fix.1~4,Fix.10	14	XXX-14.1	Fix.1~4,Fix.20
6	XXX-6.1	Fix.1~4,Fix.11	15	XXX-15.1	Fix.1~4,Fix.5,Fix.7,Fix.8,Fix.14,Fix.10~12,Fix.15,Fix.17,Fix.19,Fix.20
7	XXX-7.1	Fix.1~4,Fix.12	16	XXX-16.1	Fix.1~4,Fix.6,Fix.7,Fix.9~13,Fix.15,Fix.16,Fix.18,Fix.20
8	XXX-8.1	Fix.1~4	17	XXX-17.1	Fix.1~4,Fix.5,Fix.7,Fix.8,Fix.14,Fix.10~12,Fix.15,Fix.17,Fix.19,Fix.20
9	XXX-9.1	Fix.1~4,Fix.15	18	XXX-18.1	Fix.1~4,Fix.6,Fix.7,Fix.9~13,Fix.15,Fix.16,Fix.18,Fix.20

表2 壁板产品的稳定连接矩阵

零件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	2	0	2
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0
12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0
15	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	0	0	2	0
16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$[S_i(1), S_i(2), \dots, S_i(18)]$ 。为了验证装配资源不到位对装配序列的影响,我们设计了两个不同时刻的装配资源矩阵:第一次装配资源全部到位,即  $RS_{i1}(P)=[1, 1, 1, 1]$ (所有元素均为 1)。而第二次,定义 Fix.6 缺失,零件 3、16、18 由于同时使用 Fix.6 而无法装配,即  $RS_{i2}(P)=[1, 1, 0, 1, \dots, 1, 0, 1, 0]$ (第 3、16、18 项元素为 0)。

(2) 干涉连接矩阵与稳定连接矩阵的获取。

按照 2.2 节所讲方法,分别得到产品的稳定连接矩阵  $C$  与干涉连接矩阵。其中稳定连接矩阵  $C$  如表 2 所示,而得到干涉连接矩阵共有 6 个(分别对应  $\pm x, \pm y, \pm z$ , 展示从略)。

(3) 设定遗传算法的参数,调用算法进行计算。

a. 装配资源矩阵为  $RS_{i1}(P)$  的情况,计算过程中选择的权重系数为  $\omega_2=0.5, \omega_3=0.5, \omega_1=0$ (因此时装配资源影响因子并不发挥作用)。种群大小  $N=60$ ,终止代数为 100,交叉概率 0.8,变异概率为 0.06。适应度函数最高的一条装配序列为:

1-15-16-18-2-17-12-11-13-14-9-3-10-8-7-6-5-4;

b. 装配资源矩阵为  $RS_{i2}(P)$  的情况,计算过程中选择的权重系数为  $\omega_1=0.6, \omega_2=\omega_3=0.2$ 。其余参数不变。计算得到最优的一条装配序列为:

1-15-2-17-12-11-13-14-9-10-8-7-6-5-3-4-16-18;

结果(2)与结果(1)相对比,注意到零件 3、16、18 在装配序列中的位置普遍靠后了一些。可见,由于装配资源约束因子的影响,装配资源不充分的零件在装配序列中的位置会比较靠后,这样就能够装配现场中尽量避免由于装配等待而造成的效率降低。

## 5 结束语

任何零组件在装配时都需要装配资源的支持,尤其对航空、航天产品,对其进行装配序列规划必须考虑装配资源信息。本文提出了装配资源状态信息矩阵的概念,将装配资源信息作为影响因子添加到遗传算法的适应度函数中,进行了装配序列的动态规划。并以某型飞机壁板组件装配序列的规划为实例,验证了该方法的有效性。

### 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, 2001.
- [2] Dini G, Santochi M. Automated sequencing and subassembly detection in assembly planning. Annals of the CIRP, 1992, 42: 1-4.
- [3] Zhou P Y, Han D, Li H X, et al. A connector-based hierarchical

approach to assembly sequence planning for mechanical assemblies. Computer-Aided Design, 2003,35(1): 37-56.

[4] 曾聪文,古天龙. 求解装配序列规划的一种多智能体进化算法. 计算机集成制造系统, 2009,15(9):1803-1807.

[5] 张刚,李火生,邓克文. 基于特征的装配模型及装配序列规划研究. 机械设计, 2010,27(1):18-21.

[6] 刘诚,付宜利. 引入基因修复技术的装配序列规划方法. 哈尔滨工业大学学报, 2010,42(1):79-82.

[7] 李原,曹哲,张涛,等. 基于产品配合图的装配顺序自动规划. 工程设计, 2000,2:28-31.

[8] 周开俊,李东波,黄希. 基于遗传算法的装配序列规划研究. 机械设计, 2006,23(2):30-32.

(责编 小城)

(上接第 35 页)

相应的装配件包围盒也会发生变化,在给定截面间隔的情况下,只需进行刷新即可生成相应的骨架结构,如图 10 (d~f) 所示。

对于不同的装配件,根据其特点可以设置不同的截面形状,如图 11 所示为水平尾翼装配型架骨架,截面形状为翼形(边比例:  $\alpha=0.5, \beta=0.3, \gamma=0.5$ )。

## 4 结论

在对型架骨架结构及其设计过程进行深入分析的基础上,探讨了骨架结构与装配件模型间的关联性,并根据这种关联性对骨架结构进行了分类,在此基础上,提出了一种基于装配件包围盒的骨架关联设计原理及算法,并以 CATIA V5 系统为平台,在 VC++ 开发环境下基于 CAA 开发和实现了此算法。通过实例测试验证了本文所提出的骨架关联设计技术是可行的,实现了装配型架的结构及其尺寸随产品结构的修改而自适应更改,从而提高了工装骨架设计的自动化程度,对实现工装的三维数字化并行设计具有重要意义。下一步将研究间接关联结构的关联设计技术,以进一步提高骨架设计的智能化和自动化程度。

### 参考文献

- [1] 孟学军,王云渤. 框架结构 CAD 系统. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999,11(2):154-158.
- [2] 郑国磊,冯宗律,王云渤,等. 飞机装配型架 CAD 系统. 航空制造工程, 1996(9): 14-15.
- [3] 郑国磊,朱心雄,许德,等. 飞机装配型架中骨架的数字化设计原理及实现. 航空学报, 2005, 26(2): 229-233.
- [4] 王云渤,张关康,冯宗律,等. 飞机装配工艺学(修订本). 北京:国防工业出版社, 1990.
- [5] Millar A, Kihlman H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly. SAE International, 2009.

(责编 深蓝)