

# 一种复合算法的装配序列规划方法

刘恩福,刘 博,刘晓阳,李 伊

(河北科技大学机械工程学院,河北石家庄 050018)

**摘 要:**针对复杂产品装配规划的组合爆炸和盲目搜索难题,提出一种复合算法解决装配序列规划问题的方法。复合算法首先采取多色集合形式化推理获取足够数量的可行装配序列,并将可行装配序列作为遗传算法的初始种群;然后,通过遗传算法和蚁群算法将人的模糊知识融入规划过程中求精确解;最后,通过实例验证了复合算法的可行性。

**关键词:**计算机辅助制造;装配序列规划;复合算法;多色集合;遗传算法;蚁群算法

**中图分类号:**TP391

**文献标志码:**A

## An assembly sequence planning method based on composite algorithm

LIU Enfu, LIU Bo, LIU Xiaoyang, LI Yi

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract:** To solve the combination explosion problem and the blind searching problem in assembly sequence planning of complex products, an assembly sequence planning method based on composite algorithm is proposed. In the composite algorithm, a sufficient number of feasible assembly sequences are generated using formalization reasoning algorithm as the initial population of genetic algorithm. Then fuzzy knowledge of assembly is integrated into the planning process of genetic algorithm and ant algorithm to get the accurate solution. At last, an example is conducted to verify the feasibility of composite algorithm.

**Keywords:** computer aided manufacturing; assembly sequence planning; composite algorithm; polychromatic sets; genetic algorithm; ant algorithm

产品装配序列规划是产品设计开发过程中的重要环节,装配序列规划的结果能够直接影响产品的装配质量。因此,计算机辅助装配序列规划技术对于缩短装配时间和减小装配成本等方面具有重要意义,是目前国内外研究的热点。

计算机辅助装配序列规划的研究始于 20 世纪 80 年代,常见的装配序列规划方法有基于装配优先约束关系的装配序列生成方法、基于组件识别的装配序列求解方法、基于矩阵运算的方法、基于知识的求解方法、拆卸法等<sup>[1]</sup>。

20 世纪末,随着研究的深入,人们开始将各类智能优化算法如遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、神经网络算法等应用到装配序列规划中,这些智能优化算法可以良好地克服传统方法中存在的组合爆炸问题和装配知识的局限性问题。遗传算法<sup>[2-6]</sup>是目前在装配序列规划中应用最为广泛的算法,但遗传算法在解决装

收稿日期:2015-09-11;修回日期:2015-11-23;责任编辑:冯 民

基金项目:河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(14961811D)

作者简介:刘恩福(1960—),男,河北石家庄人,教授,主要从事制造业信息化方面的研究。

E-mail:liuef@hebust.edu.cn

刘恩福,刘 博,刘晓阳,等.一种复合算法的装配序列规划方法[J].河北科技大学学报,2016,37(1):52-57.

LIU Enfu, LIU Bo, LIU Xiaoyang, et al. An assembly sequence planning method based on composite algorithm[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(1): 52-57.

配序列规划问题时具有全局收敛能力较差和存在大量冗余迭代的问题,而且要求初始种群必须为可行序列,初始设置较复杂;蚁群算法<sup>[7-12]</sup>在装配序列规划问题中也有着广泛的应用,但它具有初始信息素累积较慢,计算效率较低且容易局部收敛的缺点;多色集合理论体系<sup>[13-15]</sup>是一种新兴的系统理论和信息处理的数学工具,在近几年也被用来解决装配序列规划问题,但它仅能提供可行装配序列,需要进一步优化才能获得最优装配序列;混合蛙跳算法<sup>[16]</sup>和粒子群算法<sup>[17-19]</sup>已经成功地应用于复杂产品装配序列规划领域,但混合蛙跳算法在后期的收敛速度较慢,粒子群算法也存在着容易陷入局部最优解的问题。

针对以上问题,本文提出一种基于复合算法进行装配序列规划的方法。

### 1 复合算法的基本原理

该复合算法利用多色集合形式化推理算法,并借鉴遗传算法和蚁群算法推理过程快速生成最优装配序列。图 1 为复合算法的原理图。

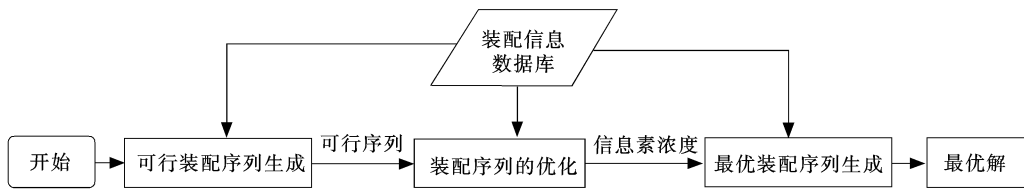


图 1 复合算法基本原理图

Fig. 1 Basic principle of composite algorithm

### 2 复合算法研究

#### 2.1 可行装配序列生成

多色集合形式化推理算法能够快速求出可行装配序列,该算法在面对复杂产品时可以较大程度上缩小求解空间,有效降低计算的复杂性,所以,复合算法利用多色集合形式化推理算法来进行可行装配序列的生成。

##### 2.1.1 装配关系模型

多色集合形式化推理算法以装配约束关系方程组作为筛选可行装配序列的充要条件。装配约束关系方程组包括定位关系方程组和干涉关系方程组,它们分别由定位关系模型和干涉关系模型求得<sup>[20]</sup>,如图 2 和图 3 所示。

	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
$(a_1, a_2)$	●		●			
$(a_1, a_3)$		●				
...					●	
$(a_i, a_j)$			●			●
...				●		
$(a_{n-1}, a_n)$	●		●			●

图 2 定位关系模型

Fig. 2 Location relationship model

	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$
$(a_1, a_2)$	●		●			
$(a_1, a_3)$		●				
...					●	
$(a_i, a_j)$			●			●
...				●		
$(a_{n-1}, a_n)$	●		●			●

图 3 干涉关系模型

Fig. 3 Interference relationship model

图 2 和图 3 中,  $(a_i, a_j)$  表示零件  $j$  对零件  $i$  的逻辑关系;  $F_1 \sim F_6$  表示零件在  $x, y, z$  方向平动、转动的定位关系;  $F_7 \sim F_{12}$  表示零件在  $\pm x, \pm y, \pm z$  方向的干涉关系; ● 表示存在定位关系或者干涉关系。

##### 2.1.2 定位关系方程的建立

定位关系方程是由定位元件(能够确定某一零件在装配体中正确位置的零件集)按一定的逻辑关系组成的关系式,定位关系方程的值代表零件在装配时能否定位。

定位关系方程组的求取算法:

1) 若  $\bigwedge_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \bigwedge_{i=1}^6 F_i(a_k, a_j) \neq 0$ , 则  $B(a_k) = a_k$ , 表示零件  $k$  不需要其他零件来进行定位, 如果装配从它开始, 则  $B(a_k) = 1$ ;

2) 若  $\bigwedge_{i=1}^6 F_i(a_k, a_j) \neq 0$ , 则  $B(a_k) = a_j$ , 若  $\bigwedge_{i=1}^6 [F_i(a_k, a_j) \vee F_i(a_k, a_m)] \neq 0$ , 则  $B(a_k) = a_j \wedge a_m$ ;

3) 若  $B(a_k) = a_j \wedge a_m$ , 且  $B(a_k) = a_j \wedge a_l$ , 则  $B(a_k) = a_j \wedge (a_m \vee a_l)$ 。

其中:  $a_i$  代表零件  $i$  是否安装, 如果零件  $i$  已安装, 则  $a_i = 1$ , 如果零件  $i$  未安装, 则  $a_i = 0$ ;  $B(a_i)$  的值代表零件  $i$  的定位状态,  $B(a_i) = 1$  代表零件  $i$  在装配时能够定位,  $B(a_i) = 0$  代表零件  $i$  在装配时不能定位。

### 2.1.3 干涉关系方程的建立

干涉关系方程是由 1 组干涉某一零件进入装配区间的其他零件按照一定的逻辑关系组成的关系式, 干涉关系方程的值代表零件在装配时是否会发生干涉。

干涉关系方程组的求取算法如下:

1) 若  $\bigwedge_{i=7}^{12} [F_i(a_k, a_j) \vee F_i(a_k, a_m)] = 0$ , 则  $W(a_k) = 0$ ;

2) 若  $\bigwedge_{i=7}^{12} [F_i(a_k, a_j) \vee F_i(a_k, a_m)] = 1$ , 则  $W(a_k) = a_j \wedge a_m$ ;

3) 若  $W(a_k) = a_j \wedge a_m$ , 且  $W(a_k) = a_j \wedge a_l$ , 则  $W(a_k) = a_j \wedge (a_m \vee a_l)$ 。

其中  $W(a_i)$  的值代表零件  $i$  的干涉状态,  $W(a_i) = 1$  代表零件  $i$  在装配时会与其他零件发生干涉,  $W(a_i) = 0$  代表零件  $i$  在装配时不会与其他零件发生干涉。

## 2.2 可行装配序列优化

基于多色集合形式化推理生成的可行装配序列, 通过对遗传算法的变异操作进行改进, 快速生成新的可行装配序列, 并对可行装配序列进一步优化。

### 2.2.1 适应度函数建立

适应度函数的建立直接影响着新的可行装配序列生成效率和质量。优秀的装配序列应具有较低的装配成本、较短的装配时间及较高的装配质量, 因此, 本文主要以装配方向的改变次数、装配工具的更换次数以及装配体的稳定性这 3 项评价指标来构建适应度函数。

适应度函数的构建方法如下:

$$f(s) = \omega_1 v_c - \omega_2 v_t - \omega_3 v_d + v_p, \quad (1)$$

式中:  $v_d$  为装配方向的改变次数;  $v_t$  为装配工具更换次数;  $v_c$  为装配体的稳定性, 取  $v_c = \sum_{i=2}^N k_i$ ,

$$k_i = \begin{cases} 2, & \text{当零件 } i \text{ 与零件 } i-1 \text{ 存在稳定接触连接关系时,} \\ 1, & \text{当零件 } i \text{ 与零件 } i-1 \text{ 存在接触连接关系时,} \\ 0, & \text{当零件 } i \text{ 与零件 } i-1 \text{ 不存在接触连接关系时;} \end{cases}$$

$v_p$  为装配序列的几何可行性, 取

$$v_p = \begin{cases} 0, & \text{如果装配序列可行,} \\ -100, & \text{如果装配序列不可行;} \end{cases}$$

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为权重系数。

### 2.2.2 改进变异算法

为了保证新的可行装配序列快速生成, 本文提出一种新的变异方法: 选取 1 个父代个体, 从这个个体中随机选择 1 个零件, 对选择零件后的序列利用多色集合形式化推理部分的算法重新进行排序, 由于多色集合形式化推理算法具有快速性和准确性, 可以有效生成新的可行序列, 这样就免去了对生成序列进行可行性判断的步骤, 有效提高了迭代效率。

### 2.2.3 可行装配序列优化终止条件

根据需求设定最小遗传迭代次数和最小进化率, 当算法满足最小迭代次数时开始计算每一代的进化率 (进化率 =  $\frac{\overline{f_n} - \overline{f_{n-1}}}{\overline{f_{n-1}}}$ , 其中  $\overline{f_n}$  为第  $n$  代种群适应度的平均值), 如果连续 3 代的进化率都小于最小进化率, 则转入最优装配序列生成过程。

### 2.3 最优装配序列生成

该复合算法借鉴蚁群算法使装配序列优化过程快速收敛,生成最优装配序列。

#### 2.3.1 状态转移概率函数的建立

在构建装配序列的过程中,从基础件出发,根据状态转移概率选择下一级装配零件,状态转移概率由信息素、装配方向和装配工具决定。

状态转移概率函数的构建方法如下:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [d_{ij}(t)]^\beta [t_{ij}(t)]^\mu}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [d_{ij}(t)]^\beta [t_{ij}(t)]^\mu}, & j \in \text{allowed}_k, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$  为路径上的信息素浓度; $d_{ij}(t)$  为方向引导因子,取  $d_{ij}(t) = \begin{cases} 0.2, & \text{如果方向改变,} \\ 1, & \text{其他;} \end{cases}$   $t_{ij}(t)$  为工具引导因子,取  $t_{ij}(t) = \begin{cases} 0.2, & \text{如果工具改变,} \\ 1, & \text{其他;} \end{cases}$   $\text{allowed}_k$  为下一级可装配零件的集合; $\alpha, \beta, \mu$  为权重系数。

#### 2.3.2 信息素初始值设定

信息素初始值设计如下:

$$\tau_{(i,j)}^S = \tau_{(i,j)}^C + \tau_{(i,j)}^G, \quad (3)$$

式中: $\tau_{(i,j)}^C$  为信息素常数,其数值根据求解问题的规模确定; $\tau_{(i,j)}^G$  为序列优化结果转化的信息素值,根据序列的适应度值选取。

### 3 复合算法的实现流程

该复合算法的实现流程如图 4 所示。

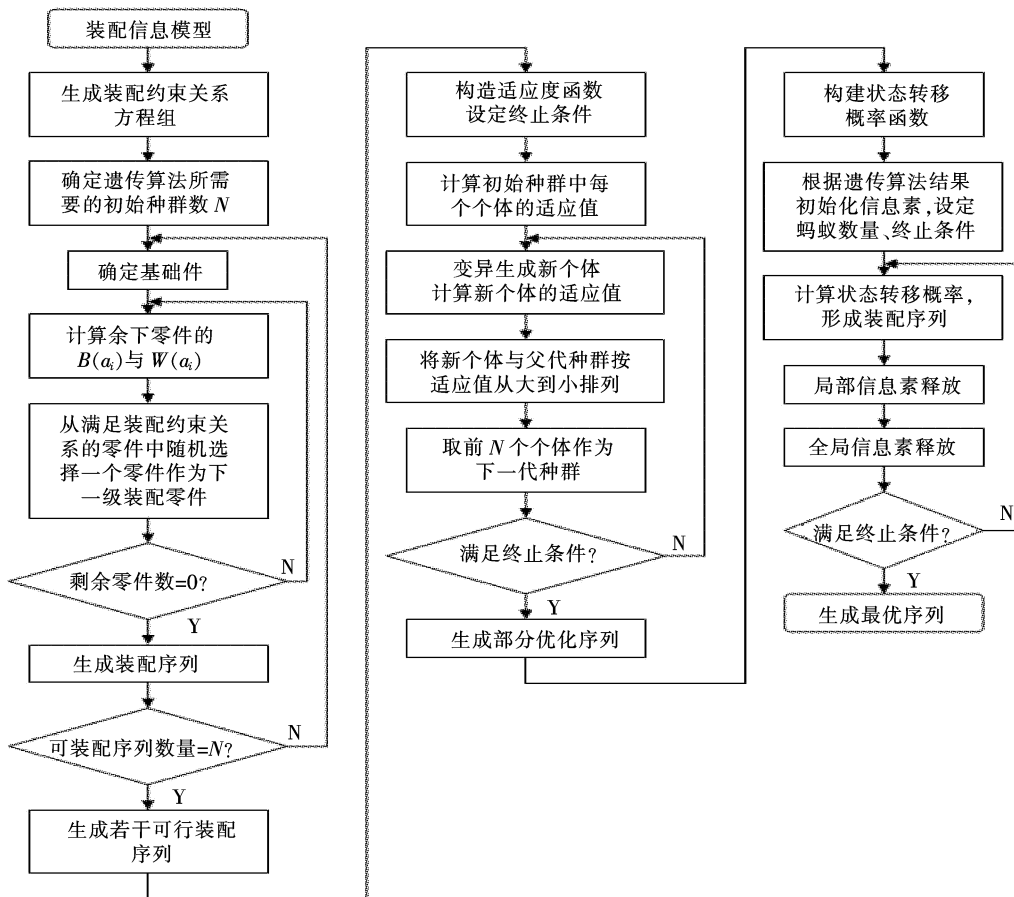


图 4 复合算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the composite algorithm

## 4 实例验证

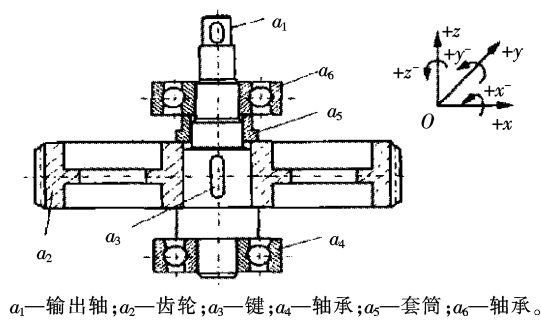
为了验证算法的可行性,以图5所示装配体为例,使用 Visual C++ 6.0 分别对复合算法、遗传算法、蚁群算法进行编程实现。其中,设定遗传算法的初始种群数  $N=5$ ,变异概率为 1,最小遗传迭代次数  $I=10$ ,最小进化率  $P=0.05$ ,蚂蚁数量  $M=5$ ,全局信息素蒸发率为 0.3。

通过多色集合形式化推理算法对装配体进行可行装配序列生成,得到 5 个可行装配序列,分别是:

- 1)  $a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2 \rightarrow a_4 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6$ ;
- 2)  $a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2 \rightarrow a_5 \rightarrow a_4 \rightarrow a_6$ ;
- 3)  $a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6 \rightarrow a_4$ ;
- 4)  $a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_4 \rightarrow a_2 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6$ ;
- 5)  $a_1 \rightarrow a_4 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6$ 。

运行程序所得的最优装配序列为  $a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_2 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6 \rightarrow a_4$ 。图6为3种算法中各代种群的平均适应度函数值图。

同时,分别采用不同的种群数量和不同的蚂蚁数量对3种算法进行比较,其结果如表1所示。



$a_1$ —输出轴; $a_2$ —齿轮; $a_3$ —键; $a_4$ —轴承; $a_5$ —套筒; $a_6$ —轴承。

图5 轴系部件

Fig. 5 Shaft parts

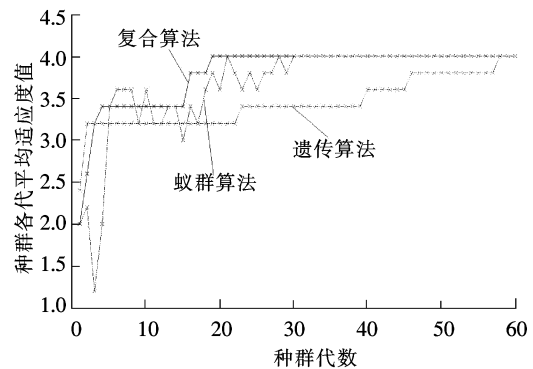


图6 种群各代平均适应度值

Fig. 6 Fitness value of each generation

表1 不同参数下的算法运行结果

Tab. 1 Algorithm running results under different parameters

参数	复合算法结果				遗传算法结果		蚁群算法结果	
	1	2	3	4	1	2	1	2
初始种群个数	5	5	10	10	5	10	—	—
蚂蚁个数	5	10	5	10	—	—	5	10
程序运行次数	20	20	20	20	20	20	20	20
平均迭代次数	12.4	14.55	11.95	15.6	38.65	31.7	19.2	16.35
发生局部收敛次数	3	6	2	3	4	3	8	5

由图6和表1可以看出,遗传算法虽然收敛性较为稳定,但其收敛速度较慢,而且初始种群必须为可行序列,初始设置较为复杂,蚁群算法虽然收敛速度较快,但由于其初始信息素累积的盲目性,造成收敛不稳定的现象,很容易局部收敛,该复合算法既改进了遗传算法收敛较慢的缺点,又避免了蚁群算法收敛不稳定的缺点。

## 5 结语

提出了一种新的复合算法来解决装配序列规划问题,此算法由多色集合形式化推理算法、遗传算法、蚁群算法融合而成,有效避免了遗传算法对初始种群依赖性强以及蚁群算法容易局部收敛的问题。通过实验验证,复合算法不仅能够有效地生成装配序列,而且具有更好的收敛效率和全局收敛性。

## 参考文献/References:

- [1] 彭琛, 刘克能, 周省长. 机械产品装配序列规划研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2006,6(2):81-85.  
PENG Chen, LIU Keneng, ZHOU Changsheng. Study on mechanical product's assembly sequence planning[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology), 2006,6(2):81-85.
- [2] 李原, 张开富, 王挺, 等. 基于遗传算法的飞机装配序列规划优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2006,12(2):188-191.  
LI Yuan, ZHANG Kaifu, WANG Ting, et al. Assembly sequence planning optimization for aircraft assembly based on GA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006,12(2):188-191.
- [3] 韩晓东, 蔡勇, 蒋刚. 基于改进的遗传算法的装配序列规划[J]. 机械设计与制造, 2009(3):212-214.  
HAN Xiaodong, CAI Yong, JIANG Gang. Assembly sequence planning based on the improved genetic algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(3):212-214.
- [4] 蒋超, 吴波, 李明宇, 等. 基于遗传算法的产品装配序列规划研究[J]. 机械与电子, 2012(4):7-11.  
JIANG Chao, WU Bo, LI Mingyu, et al. Product assembly sequence planning method based on genetic algorithm[J]. Machinery & Electronics, 2012(4):7-11.
- [5] 丁慧敏, 李蓓智, 周亚琴. 基于遗传算法的装配序列规划[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2001,27(6):10-13.  
DING Huimin, LI Beizhi, ZHOU Yaqin. Assembly sequence planning based on genetic algorithm[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2001,27(6):10-13.
- [6] 陈颖悦, 吴豪杰. 基于改进遗传算法的拆卸序列优化研究[J]. 厦门理工学院学报, 2014,22(5):72-77.  
CHEN Yingyue, WU Haojie. Disassembly sequence optimization based on the improved genetic algorithm[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2014,22(5):72-77.
- [7] 史士财, 李荣, 付宜利, 等. 基于改进蚁群算法的装配序列规划[J]. 计算机集成制造系统, 2010,16(6):1189-1194.  
SHI Shicai, LI Rong, FU Yili, et al. Assembly sequence planning based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010,16(6):1189-1194.
- [8] 邓明星, 唐秋华, 雷喆. 基于蚁群算法的改进装配序列规划方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013,46(2):246-251.  
DENG Mingxing, TANG Qiu Hua, LEI Zhe. A novel approach for assembly sequence planning based on ant colony algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013,46(2):246-251.
- [9] 方建新. 基于蚁群算法的装配序列规划研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.  
FANG Jianxin. Research on Assembly Sequence Planning based on Ant Colony Algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.
- [10] 谢龙, 付宜利, 马玉林. 基于蚁群算法的装配序列生成策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006,38(2):180-183.  
XIE Long, FU Yili, MA Yulin. Ant-colony-optimization strategy for assembly sequence planning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006,38(2):180-183.
- [11] 卢天宇. 遗传蚁群混合算法研究及应用[D]. 西安:西安科技大学, 2012.  
LU Tianyu. Research and Application of Genetic Ant Colony Hybrid Algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [12] 赵义武, 牛庆银, 王宪成. 遗传算法与蚁群算法的融合研究[J]. 科学技术与工程, 2010,10(16):4017-4020.  
ZHAO Yiwu, NIU Qingyin, WANG Xiancheng. Study on the combination of genetic algorithm and ant algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2010,10(16):4017-4020.
- [13] 李宗斌, 高新勤, 赵丽萍. 基于多色集合理论的信息建模与优化技术[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [14] 赵姗姗, 李宗斌. 基于多色集合的装配序列形式化推理方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008,14(8):1579-1585.  
ZHAO Shanshan, LI Zongbin. Formalization reasoning method for assembly sequences based on polychromatic sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008,14(8):1579-1585.
- [15] 李宗斌. 先进制造中多色集合理论的研究及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [16] 王松, 孙振忠, 郭建文, 等. 基于混合蛙跳算法的复杂产品装配序列规划[J]. 计算机集成制造系统, 2014,20(12):2991-2999.  
WANG Song, SUN Zhenzhong, GUO Jianwen, et al. Assembly sequence planning based on shuffled frog leaping algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014,20(12):2991-2999.
- [17] 于宏, 王成恩, 于嘉鹏, 等. 基于粒子群算法的复杂产品装配序列规划[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010,31(2):261-264.  
YU Hong, WANG Cheng'en, YU Jiapeng, et al. Assembly sequence planning based on particle swarm optimization algorithm for complex product[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010,31(2):261-264.
- [18] 张秀芬, 张树有. 基于粒子群算法的产品拆卸序列规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2009,15(3):508-514.  
ZHANG Xiufen, ZHANG Shuyou. Product disassembly sequence planning based on particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009,15(3):508-514.
- [19] 陈海彬, 郭建文, 孙振忠, 等. 基于自适应变异粒子群优化算法的产品装配序列规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(7):153-156.  
CHEN Haibin, GUO Jianwen, SUN Zhenzhong, et al. Product assembly sequences planning based on adaptive particle swarm optimization algorithm with mutation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(7):153-156.
- [20] 张博, 张洪涛, 赵姗姗, 等. 基于多色集合理论的产品装配规划建模与算法研究[J]. 西安交通大学学报, 2005,39(11):1254-1258.  
ZHANG Bo, ZHANG Hongtao, ZHAO Shanshan, et al. Product assembly planning modeling and algorithm based on polychromatic sets[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005,39(11):1254-1258.