

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.005

基于改进粒子群算法的装配序列规划研究

罗留祥, 邢彦锋

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对装配序列易产生组合爆炸,传统单工位装配序列求解不足等缺点,提出基于改进的粒子群算法进行多工位装配序列规划研究。采用优先关系序列图设计优先关系矩阵;采用装配干涉矩阵描述零件装配几何关系;采用薄板装配公差分析设计评估可行的装配序列函数;采用改进的粒子群算法设计优化生成的装配序列。应用结果表明该改进算法方法可以有效地减小装配偏差,提高装配效率与产品装配质量。

关 键 词:装配序列规划 ASP;公差分析;粒子群算法;优先关系矩阵;装配干涉矩阵

中图分类号: TG95; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2018)01-0019-06

Assembly Sequence Planning Based on Improved Particle Swarm Algorithm

LUO Liuxiang, XING Yanfeng

(School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to solve combination explosion and the shortage of the traditional single station algorithms for the assembly sequence, an improved particle swarm algorithm was presented to solve the multi-station ASP. The precedence relation matrix was designed by the priority sequence diagram. The assembly interference matrix was constructed to describe the geometry relationship of the compliant assemblies. The feasible assembly sequence function was evaluated by the thin plate assembly tolerance analysis. The improved particle swarm optimization algorithm was used to design the optimized assembly sequence. The application results show that the improved algorithm can effectively reduce the assembly deviation. This improved algorithm can improve assembly efficiency and product assembly quality.

Keywords: ASP (assembly sequence planning); tolerance analysis; particle swarm algorithm; precedence relation matrix; assembly interference matrix

装配序列规划研究是计算机辅助工艺设计中的关键环节,是柔性薄板零件装配工艺优化的核心之一。通过装配序列规划研究可以确定合理的装配顺序,提高产品质量。据统计,装配工艺在生产中所占比重很大,可以通过优化装配序列来保证装配要求。装配序列规划的研究可以降低生产成本,提高生产效率,从而提高企业竞争力。

国内外对装配工艺进行了大量的研究,取得了一定的成果。De Fazio 等^[1]用关系序列图对零件装配序列进行描述;Dinia 等^[2]基于装配零件连接与干涉阵列

设计出装配序列规划的数学模型;Lin 等^[3]提出了装配优先图的模型;Gottipolu 等^[4]利用矩阵建立传递模型来描述零部件关系;张嘉易等^[5]基于实际装配序列的并行特点,提出可行的几何装配序列;王丰产等^[6]与李娜等^[7]提出以最小成本为目标运用粒子群算法优化装配序列;夏平等^[8]将虚拟现实和仿生算法相结合,提出一种装配序列规划的新方法。Xing 等^[9]将装配模型进行拓展,基于分总成采取不同方案可以实现自动生成车身装配序列。基于上述的研究,根据装配序列的优化方法,利用装配信息模型来建立零件之

收稿日期:2017-08-14;修回日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51575335)。

第一作者简介:罗留祥(1993),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为薄板零件装配工艺优化。通信作者:邢彦锋(1978),男,山东聊城人,博士,教授,曙光学者,主要研究方向为车身制造质量控制。E-mail:xyf2001721@163.com

间的装配数学关系模型,根据零件之间装配信息与空间关系建立关联图与装配干涉矩阵等。基于装配零件之间的数学模型,装配序列经过合理的规划,然后通过目标函数的设定来评价装配序列的优劣。

目前装配序列优化的方法有很多。Chen 等^[10]利用精确计算方法,但对复杂产品,计算难度增大。所以必要时需引入更多启发式算法到装配序列规划的研究中;Marian 等^[11]基于遗传算法来优化装配序列;Xing 等^[12]提出混合粒子群与遗传算法进行装配序列规划优化研究;Anwar 等^[13]采用了模拟退化算法研究装配序列的优化。在定性方面,只能从主观上对装配序列优劣进行粗糙的评价;在定量方面,装配时间与装配成本依赖传统经验。另外在多工位装配和装配质量等方面的研究较少,多工位装配序列规划的研究仍有许多问题待解决。

课题组以汽车车身后地板为装配的对象,引入公差分析,以装配偏差为目标,采用粒子群优化算法编码,进行装配序列规划研究,根据提出的多工位装配序列优化方法来优化零件的装配序列。

1 装配关系模型

1.1 装配优先关系序列图

装配优先关系序列图可以用有向图 $H = (G, E)$ 来表示。其中: G 表示装配体的零件集合; E 表示装配零件间的关系集合。在优先序列图中,相互联结的零件之间,起点零件的优先级要比终点零件高。

以某车身后地板部分零件装配为例,如图 1 所示,包含 10 个主要零件。

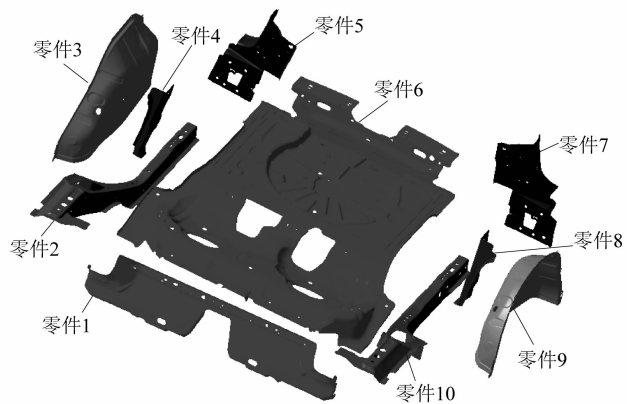


图 1 后地板零件爆炸图

Figure 1 Explosive view of rear floor parts

用有向箭头与层次关系来表示零件装配的优先级别,可以得到装配优先关系的序列图,如图 2 所示。从图中可以清楚地了解零件装配层次以及优先顺序^[14]。

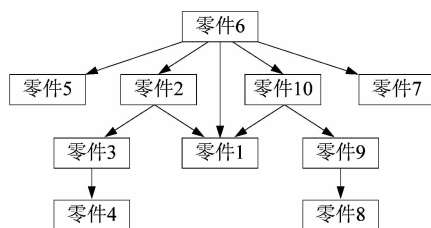


图 2 后地板零件装配优先序列图

Figure 2 Assembly precedence graph of rear floor parts

1.2 装配优先关系矩阵

装配优先关系图包含有分析与评估装配序列时所需的信息,需要将图形转化为数字矩阵形式。装配优先关系矩阵模型

$$E = \begin{matrix} & G_{j=1} & G_{j=2} & \cdots & G_{j=n} \\ \begin{matrix} G_{i=1} \\ G_{i=2} \\ \vdots \\ G_{i=n} \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \circ$$

式中: E 为装配优先关系矩阵; n 为零件数; e 为零件之间优先关系; G_i, G_j 为第 i 个和第 j 个零件。

根据装配优先图中零件之间的关系来填写 e_{ij} 值,如图 2 所示,当零件 i 沿着装配优先序列图的箭头方向装配,与零件 j 相连接,则优先关系值为 1,没有连接关系则优先关系值为 0。例如,零件 2 沿着箭头方向与零件 1 和零件 3 装配连接,于此对应的装配优先关系矩阵,零件 2 对应行 $G_{i=2}$,在 $G_{i=2}$ 行中与零件 1 与零件 3 分别对应 e_{21} 与 e_{23} 值为 1。

从而建立汽车后地板的装配优先关系矩阵

$$E = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \circ$$

1.3 装配干涉矩阵

零件之间在装配路径上的干涉关系可以通过装配干涉矩阵来表示。根据装配干涉信息可以检查装配方

向变化情况与装配零件干涉情况。为得到零件之间的干涉信息,将装配体在 CATIA 软件中进行干涉检验,根据得到的干涉信息建立装配干涉矩阵。装配干涉矩阵模型^[15]

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} & \begin{matrix} G_{j=1} & G_{j=2} & \cdots & G_{j=n} \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_{i=1} \\ G_{i=2} \\ \vdots \\ G_{i=n} \end{matrix} & \begin{bmatrix} b_{s11} & b_{s12} & \cdots & b_{s1n} \\ b_{s21} & b_{s22} & \cdots & b_{s2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{sn1} & b_{sn2} & \cdots & b_{snn} \end{bmatrix} \end{matrix} \circ$$

式中: $\mathbf{B}$ 为装配干涉矩阵; s 为直角坐标系 x, y, z 3个轴的正方向; b_{sij} 表示在 s 轴正方向上,如果零件间无干涉则值为0,如果存在干涉则值为1。在装配体的干涉检验中, x, y, z 3个轴坐标系正方向上,零件1与零件9,均无装配干涉关系,则有 $b_{xij}=0, b_{yij}=0, b_{zij}=0$,在矩阵中可表示为 $b_{s19}=000$ 。

根据干涉检验得到汽车车身后地板部分零件装配干涉矩阵

$$\mathbf{B}_s = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 000 & 110 & 000 & 000 & 000 & 110 & 000 & 000 & 000 & 110 \\ 111 & 000 & 111 & 000 & 000 & 111 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ 000 & 100 & 000 & 001 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ 000 & 000 & 110 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 001 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ 011 & 110 & 000 & 000 & 110 & 000 & 100 & 000 & 000 & 110 \\ 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 011 & 000 & 000 & 000 & 000 \\ 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 100 & 000 \\ 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 000 & 011 & 000 & 110 \\ 111 & 000 & 000 & 000 & 000 & 111 & 000 & 000 & 101 & 000 \end{bmatrix} \end{matrix} \circ$$

2 柔性薄板零件多工位装配偏差模型

通过状态空间模型表示装配过程中零件偏差传递情况。图3所示为在单工位装配基础上建立多工位装配偏差的传递模型^[16]。

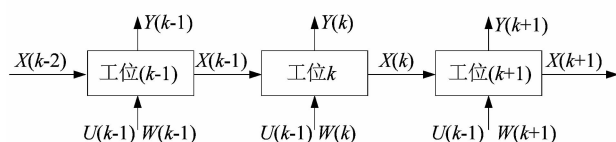


图3 多工位装配偏差传递

Figure 3 Assembly variation transfer of multi-station

偏差传递过程是一个离散线性的过程,所以用离散状态空间法来对装配系统建模。则装配零件偏差可表示为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{L}(k)\mathbf{U}(k); \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k)。 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为状态向量; $\mathbf{A}(k)$ 为状态矩阵; $\mathbf{L}(k)$ 为输出矩阵; $\mathbf{U}(k)$ 为输入向量; $\mathbf{Y}(k)$ 为输出向量; $\mathbf{C}(k)$ 为输出矩阵; $\mathbf{W}(k)$ 为系统噪声。

对于薄板装配,Liu等^[17]分析柔性零件弹性变形与装配回弹的影响,提出根据影响系数预测装配偏差的方法,通过有限元方法得到零件的敏感度矩阵。根据影响系数法可以得到零件偏差与装配偏差的敏感度矩阵,建立两者之间的线性关系,即

$$\mathbf{I} = \mathbf{S}_1\mathbf{I}_1 + \mathbf{S}_2\mathbf{I}_2。 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为装配偏差; $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}_2$ 为敏感度矩阵; $\mathbf{I}_1$ 和 $\mathbf{I}_2$ 为零件偏差。

建立零件偏差传递关系,即

$$\left. \begin{aligned} V_{ar1} &= q_1; \\ V_{ari} &= \varepsilon_i [q_i + V_{ari-1}], (i=1, 2, 3, \dots, n)。 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: V_{ari} 为第 i 个零件的累积偏差; q 为零件 i 的制造偏差; ε_i 为第 i 个零件的接头系数,搭接式接头系数为0,对接式接头系数为1。

3 装配序列粒子群算法模型

3.1 装配序列适应度函数

根据装配偏差传递关系设定适应度函数,分析装配体在 x, y, z 3个方向上的偏差累积情况,综合无穷范数得到具有工程意义的适应度函数

$$F = \sum_{i=1}^n \|M_i\|_{\infty}。 \quad (5)$$

式中 M_i 表示第 i 个零件在装配体中的公差向量。

3.2 粒子群算法离散化

粒子群算法中的每个初始粒子,在多维搜索空间中都会对应一个位置与速度。粒子可以记忆个体最优和全局最优的信息,根据这些信息从而不停地更新自己的位置与速度。标准的粒子群算法比较适合解决一些连续性的问题,但是在装配序列规划中是用粒子来表示每个装配序列,而且它们的位置与速度的解空间都属于离散整数域的,所以需要将标准的粒子群离散化处理^[18-19]。

粒子 m 的位置:组成装配体所有零件的排列组合,即装配序列,用 $X_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn}, \dots, x_{mD})$ 表示。 X_m 是从1到 D 不重复的排列组合,其中 D 表示维数, x_{mn} 表示零件编号,即在 m 序列中的第 n 个零件。

粒子 m 的速度:在 D 维搜索空间中,粒子速度可以视为粒子位置的另外一种变换,即装配序列排列组合的变换,可以用 $V_m = (v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mn}, \dots, v_{mD})$ 表示。

位置和速度的加法:设某一粒子位置 $X_1 = (x_{11},$

$x_{12}, \dots, x_{1D}$), 速度 $V_1 = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1D})$ 。 X_1 与 V_1 的加法为 $X_1 + V_1 = X$, 即得到新位置 X 。当 $V_1 = 0$, 则粒子位置不变, 否则交换 X_1 零件编号, 由 x_{1m} 换为 v_{1m} 。

位置之间的减法: 设位置 $X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1D})$, 位置 $X_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2D})$, 两位置相减的结果是一个速度, 即 $X_1 - X_2 = V$ 。当 2 个位置零件编号 $x_{1m} = x_{2m}$, 则 $v_m = 0$, 否则 $v_m = x_{2m}$ 。

速度和系数的乘法: 设某一粒子速度 $V_1 = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1D})$, 系数 $a, a \in [0, 1]$, 它们相乘为 $aV_1 = V$ 。在 0 到 1 之间取一个均匀分布的数 b , 当 $b < a$, 有 $V = 0$, 否则 $V = V_1$ 。

速度之间的加法: 设速度 $V_1 = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1D})$, 速度 $V_2 = (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2D})$, 2 速度相加会得到一个新速度, 即 $V_1 + V_2 = V$ 。

设粒子在第 t 次迭代个体极值为 $P_m = (P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mD})$, 群体极值为 $P_n = (P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nD})$ 。在每次迭代过程中, 粒子根据位置与速度的更新方程来调整自己的位置与速度。

3.3 粒子速度与位置更新方程

粒子速度、位置以及其加法运算等法则通过上述操作重新定义, 粒子 m 的速度和位置在改进后更新方程为:

$$V_m^{t+1} = \omega_m V_m^t + c_1 r_1 (P_m - X_m) + c_2 r_2 (P_m - X_m); \quad (6)$$

$$X_m^{t+1} = X_m^t + V_m^{t+1}。 \quad (7)$$

式中: ω_m 为惯性权重; c_1, c_2 为加速度因子; r_1, r_2 为在 $[0, 1]$ 范围内的随机数; V_m^t 为 $t-1$ 次迭代粒子速度; X_m^t 为 $t-1$ 次迭代粒子位置; V_m^{t+1} 为 t 次迭代粒子新速度; X_m^{t+1} 为 t 次迭代粒子新位置。

3.4 自适应变异

粒子群算法具有通用性特强、收敛快, 同时存在后期迭代效率不高、易早熟收敛及搜索精度低等特点^[20]。因而引入变异操作, 借鉴遗传算法中的变异思想, 即以一定的概率将某些变量重新初始化^[21]。针对种群搜索空间在迭代中不断缩小等缺点, 采用变异操作来拓展种群搜索空间, 不仅可使粒子跳出之前的搜索空间, 能够在更大空间中搜索, 而且还能保持种群的多样性, 使算法寻到更优值的可能性大大增加。因此, 在普通粒子群算法基础上, 增加自适应变异, 对速度进行变异操作, 粒子在每次更新之后将以一定的概率重新初始化^[22]。

当陷入局部最优时, 第 m 个粒子的个体极值按照一定的概率 ρ 进行变异操作。对于在更新方程中第 m 个粒子随机产生的一个数 r , 当 $r > \rho$, 对粒子的个体极

值进行变异, 先随机产生一个符合正态分布 $N(0, 1)$ 的随机数 a , 然后对个体极值施加扰动使得 $V_m' = V_m^t * (1 + a)$ ^[23]。

3.5 改进粒子群优化算法流程

1) 设置种群大小, 迭代次数, 惯性权重, 学习因子等参数;

2) 在解空间中初始化, 粒子种群初始迭代次数为 1, 随机生成初始装配序列与初始速度;

3) 计算每条初始装配序列适应度值, 当 $t = t + 1$, 评估每个粒子适应值;

4) 变异操作, 对陷入局部最优的个体极值施加扰动;

5) 根据公式(6)更新粒子速度; 根据公式(7)更新粒子位置;

6) 设置最大迭代次数 T , 如果 $t > T$ 则结束, 否则就跳转到第 4) 步骤重复操作;

7) 输出粒子最优值。

根据以上步骤可得算法流程图如图 4 所示。

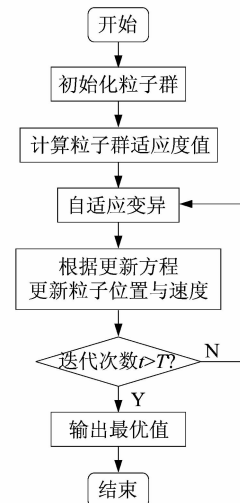


图 4 算法流程图

Figure 4 Flow chart of algorithm

4 实例优化结果及分析

以图 5 所示的装配体为例, 此装配体是由零件 1、6 和 10 在 2 个工位上装配而成。3 个零件装配共有 6 种排列组合, 即有 6 种装配序列。

零件 1 与零件 6, 零件 1 与零件 10 在 x 方向使用搭接式焊接, 零件 6 与零件 10 在 y 和 z 方向都是搭接式焊接。令每个零件制造偏差和存在装配关系的零件装配偏差, 在 x, y, z 方向偏差均为 1 mm; 不存在装配关系零件间则偏差为 0。

按照零件 1-零件 6-零件 10 顺序装配。



图5 零件装配图

Figure 5 Assembly drawing of parts

1) 首先在 x 方向上零件 1 有制造偏差 $V_{ax1} = q_{x1} = 1$ 。与零件 6 装配,则偏差传递,得到 $V_{ax6} = \varepsilon_6 (q_{x6} + V_{ax1}) = 0$ 。由于零件 1 与 6 在 x 方向搭接,则有 $\varepsilon_{x6} = 0$ 。最后与零件 10 装配,得到偏差为 $V_{ax10} = \varepsilon_{10} (q_{x10} + 0) = 1$,其中 $\varepsilon_{x10} = 1$ 。

2) 在 y 方向,零件 1 有制造偏差 $V_{ay1} = q_{y1} = 1$ 。与零件 6 装配后得到 $V_{ay6} = \varepsilon_{y6} (q_{y6} + V_{ay1}) = 2$ 。最后与零件 10 装配,得到累积偏差 $V_{ay10} = \varepsilon_{y10} (q_{y10} + V_{ay6}) = 0$ 。

3) 同理得到此序列零件 6 和 10 在 z 方向上的累积偏差分别为 2 和 0。零件 1 偏差为 $V_{az1} = 3$,零件 6 偏差 $V_{az6} = 4$,零件 10 偏差 $V_{az10} = 3$,此序列最终偏差为 $V_{az} = 10$ 。

同理以序列零件 6-零件 10-零件 1 为例,零件 6 在 x, y, z 方向偏差分别是 $q_{x6} = 1, q_{y6} = 1, q_{z6} = 1$;零件 10, 在 x, y, z 方向偏差分别是 2, 0, 0;零件 1 在 x, y, z 方向偏差分别是 0, 1, 1。则此序列总偏差 $V_{az} = 7$ 。

通过以上对比发现,不同装配序列可能会得到不同的装配质量。因此装配序列会影响公差分配,影响偏差传递,影响产品装配质量。

利用图 1 所示某汽车后地板的 10 个装配零件模型,基于改进的粒子群算法及图 2 所示的装配优先序列图以及装配优先矩阵和装配干涉矩阵,对偏差数据进行处理,在计算机上测试验证模型与算法。

改进的粒子群算法参数设定:迭代次数 $T = 100$;惯性权重 $\omega_m = 0.9$;种群数 $P = 20$;加速因子 $c_1 = 1$; $c_2 = 1$ 。根据仿真适应度函数,求解 $\min f = F$ 对应的适应度值。

仿真后的结果如图 6 所示。在经过迭代后算法收敛,未引入变异算子,得到装配累积偏差值是 17.4;引入变异算子后,其装配累积偏差值是 16.9。从结果可以看出,带变异算子的粒子群算法可以避免局部搜索,能够跳出局部极小值点,在更大搜索空间搜索,得到更优的结果。

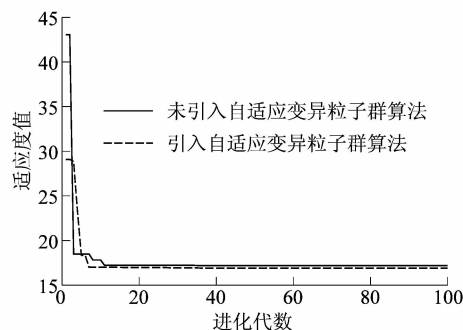


图6 适应度值曲线图

Figure 6 Optimal curve of the best fitness value

5 结论

课题组提出一种改进粒子群算法的装配序列优化方法,以装配关系序列图与干涉矩阵作为基础描述几何装配关系,将装配序列作为粒子编码,计算粒子适应度值,以装配偏差评估装配序列,最后用后地板部分零件装配实例阐述了装配序列规划优化的过程。得出以下结论:

1) 可以通过给出的优先序列图来描述装配零件之间的优先关系,为了更适合进行数学运算,建立方法模型,从而构建优先关系矩阵、装配干涉矩阵。

2) 装配序列影响装配质量,在今后进行的公差分析中,可以引入装配序列作为参考条件。

3) 利用改进粒子群算法对装配顺序进行优化,提高装配序列优化效率。

课题组研究的装配序列评估函数可以为实际装配序列规划提供基础。然而,仅限于概念设计,与实际仍有差距。将来还可以基于实验操作进一步研究适应度函数,优化装配序列。

参考文献:

- [1] De FAZIO T, WHITNEY D E. Simplified generation of all mechanical assembly sequence [J]. IEEE journal of robotics and automation, 1987, 3(6): 648.
- [2] DINIA G, SANTOCHI M. Automated sequencing and subassembly detection in assembly planning [J]. CIRP Annals, 1992, 41(1): 3.
- [3] LIN A C, CHANG T C. 3D maps: three-dimensional mechanical assembly planning system [J]. Journal of manufacturing systems, 1993, 12(6): 446.
- [4] GOTTIPOLU R B, GHOSH K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences [J]. Computers in industry, 2003, 50(3): 253.
- [5] 张嘉易, 王成思, 马明旭. 产品装配序列评价方法建模 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 218.
- [6] 王丰产, 孙有朝, 李娜. 多工位装配序列粒子群优化算法 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 155.

(下转第 28 页)