

文章编号:1000-8055(2011)01-0204-06

叶片质量矩优化排序中遗传算法的应用

贾金鑫, 李全通, 高星伟, 陈 卫

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对某型发动机压气机转子, 考虑叶片质量矩和初始不平衡量, 采用遗传算法, 对叶片进行优化排序以达到减少转子不平衡量的目的. 经过对 10 余台发动机转子叶片质量矩优化排序验证, 结果表明: 整个转子的不平衡量大大减小, 该方法可在实际发动机转子动平衡中推广应用.

关 键 词: 航空发动机; 转子叶片; 质量矩; 优化排序; 遗传算法; 自适应遗传算子

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Application of genetic algorithm in optimizing arrangement of engine blades based on initial unbalance

JIA Jin-xin, LI Quan-tong, GAO Xing-wei, CHEN Wei

(The Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A method to reduce turbojet engine vibration was introduced by optimizing initial arrangement order of blades. This method gave an optimal blade arrangement sequence to obtain least unbalance volume. Based on this GA (genetic algorithm) scheme, the experience for fan blades show that it provides much better results than those given from both the simple pair method and common experience method, and therefore should be adopted to balance the engine rotor.

Key words: aero-engine; rotor blade; mass moment; optimizing arrangement; genetic algorithm; adaptive genetic operator

转子的不平衡不仅引起振动而且引起气流激振力, 在一定条件下可能诱发转子失稳^[1], 对整个发动机的正常工作产生不良影响. 转子的不平衡量, 除由轴、盘本身引起之外, 转子叶片也会产生新的不平衡量. 叶片安装排序方式不同, 产生的不平衡量不同. 因此, 叶片安装是一个十分重要的问题^[2]. 发动机转子叶片的优化排序问题长期以来一直是个难题. 如何排序以减少不平衡量, 从而减小发动机的整机振动, 相关人员进行了大量研究. 目前, 对于国外的叶片排序配装方式很难获得, 查找不到相关资料; 国内工厂的叶片排序配装方式是按一定的经验规律排序, 然后在动平衡机上反复动平衡. 通过增加平衡螺钉或在转子的特定位

置去除材料, 使转子动平衡达到一定精度即可; 或按国外提供的现成安装程序进行安装, 但安装之后仍然存在较大的剩余不平衡量^[3].

转子不同级上的叶片数目不同, 对转子的不平衡量的影响也不同^[4], 但是对于同一级上给定数目的叶片, 不同安装排序方式, 其影响也不同. 本文拟考虑叶片质量矩的问题, 寻求一种简单实用的方法, 使其排序最优, 从而使整个转子不平衡量最小. 叶片排序类似于运筹学中的指派问题, 指派问题可以用枚举法解决^[5]. 但对于数量较多的叶片排序问题, 枚举法运算量巨大, 不可能实现. 解决指派问题的另一种解决方法——匈牙利法 (LINGO 软件), 也存在一定问题, 计算量大、耗时

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-06-13

作者简介: 贾金鑫 (1984—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士生, 研究方向为发动机可靠性、维修性与寿命工程.

长,不能获得满意的结果。

笔者曾试图用匈牙利法来解决这一问题,对于规模不大的问题可以解决;对于较大规模的排序问题难以实现。遗传算法对于求解大型的指派问题具有一定的可行性和优越性。目前在许多工程领域得到了广泛的应用。

1 发动机转子叶片排序模型

对于存在质量偏心的轮盘,取一组叶片(n 个),在轮盘的 n 个榫槽位置上安装。不同叶片在不同位置上的安装时,对整个转子的不平衡量的改变及影响程度不同,因此如何对叶片排序使得总的不平衡量最小本身就是一个优化问题。

1.1 力学模型

对于整个转子而言,叶片质量矩($m_i r_i$)和偏心量一样,本质上就是引起转子的不平衡量,从而产生不平衡力或者不平衡力矩。假设:不带叶片时,轮盘具有偏心量 Me 。在轮盘上安装上所有叶片后,总的偏心量为 $(M + \sum_{i=1}^n m_i) e'$, 如图1示。

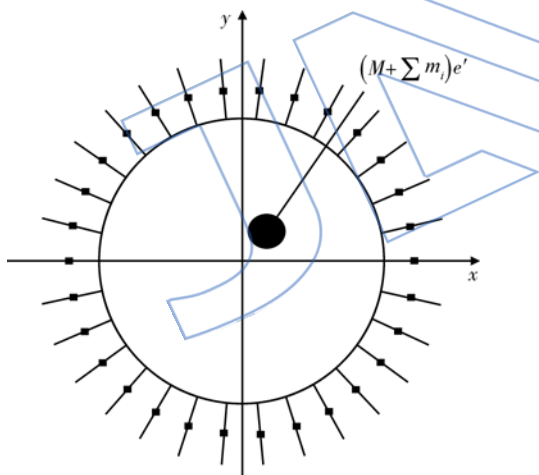


图1 带叶片的轮盘的偏心量

Fig. 1 Trunplate centroidal volume including blade

装上叶片后的离心力 F 为

$$F = (M + \sum_{i=1}^n m_i) e' \omega^2 = M(x_e + iy_e) \omega^2 + \sum_{i=1}^n m_i(x_i + iy_i) \omega^2 \quad (1)$$

式中 m_i 为第 i 个叶片质量; e' 为总偏心距; $m_i r_i$ 为第 i 个叶片的质量矩; x_e, y_e 为转子的偏心距 e 在 x, y 坐标轴上的分量; x_i, y_i 为第 i 个叶片质心的 x, y 坐标; $m_i x_i, m_i y_i$ 为第 i 个叶片的质量矩在

x, y 坐标轴上的分量。

从式(1)可知:对于给定转速 ω , 要使得离心力 F 最小, 则不平衡量(偏心量) $Z(Z = (M + \sum_{i=1}^n m_i) e' = Me + \sum_{i=1}^n m_i r_i)$ 应达到最小。

1.2 数学模型

不同叶片在不同位置安装,引起不同的不平衡量,产生不同的效果。定义影响系数 C_{ij} , 即不同叶片、不同位置安装时产生的不平衡量;建立叶片排序优化问题的数学模型,使得最终合成的质量矩为最小。其数学表达式为

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 & i = 1, 2, \dots, n \\ x_{ij} = 0, 1 & i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_{ij} 表示在给定位置取1,在其他位置时取0。

2 遗传算法

遗传算法^[5](genetic algorithm,简称GA)就是对生物各种生存特性的机理研究和行为的模拟,是对生物遗传和进化过程的计算机模拟,遗传算法使得各种人工系统具有良好的自适应能力和优化能力。该算法最早由美国密执安大学的Hilland教授于1975年首先提出的。遗传算法求解问题时,在编码方案、适应度函数及遗传算子确定后,算法将利用进化过程中获得信息自行组织搜索。由于基于自然的选择策略为“适者生存,不适者淘汰”,因而适应度大的个体具有较高的生存概率。遗传进化算法的这种自组织、自适应特征,使它具有能根据环境变化来自动发现环境的特征和规律的能力。

遗传算法本身是对目标函数进行搜索和优化,不需要其他任何假设条件或主观信息的判断因而使用操作简单,且得出的结果较客观。遗传算法在一定的范围内而不是在一个点上进行寻优,从而更容易达到全局最优或最满意解的把握性越大^[6]。对于大多数复杂指派问题,用GA求解会得到令人满意的结果。

应用遗传算法解决叶片排序优化问题有以下5个步骤^[7]:

- 1) 将问题的解进行编码;
- 2) 找出生成初始化群体的方法;

- 3) 选择遗传算子(这是求解问题的关键);
- 4) 定义适应度函数;
- 5) 确定各个参数.

3 实际应用算例

以某型发动机压气机某一级叶片配置排序为例说明优化方法. 首先采用工厂常用的安装排序

方式对发动机转子叶片排序安装,测定不平衡量,测得安装有43个叶片的发动机某级,其转子的初始不平衡量为 $55.4\text{ g}\cdot\text{mm}$,初始不平衡量角度为 235° . 初始安装的顺序以及叶片的质量矩如表1所示. 其次以此排序为基础,进行遗传算法优化排序,使得发动机转子最终的不平衡量达到最小,再确定是否需要添加平衡螺钉.

表1 压气机某级叶片安装情况(质量矩单位: $\text{g}\cdot\text{mm}$)

Table 1 General arrangement of compressor vanes (unit of mass moment: $\text{g}\cdot\text{mm}$)

位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩
1	10	24616	11	12	24480	21	22	24600	31	32	24356	41	31	23976
2	2	22856	12	26	23440	22	24	23316	32	36	23536	42	8	23976
3	42	24384	13	7	24400	23	21	24344	33	3	24236	43	4	23976
4	28	23568	14	19	23704	24	33	23752	34	13	23676			
5	25	24232	15	5	24144	25	15	24216	35	37	24176			
6	30	23716	16	14	23816	26	34	23700	36	9	23832			
7	20	24136	17	11	23932	27	35	24124	37	38	24060			
8	29	23836	18	23	23916	28	16	23920	38	17	24100			
9	41	23968	19	1	23960	29	27	24040	39	43	24004			
10	18	23936	20	40	23956	30	6	24076	40	39	24056			

3.1 编码

一般问题常采用的编码是二进制编码^[8],本文采用实数编码. 实数编码对于函数优化问题最为有效. 关于实数编码在函数优化和约束优化领域比二进制编码和 Gray 编码更有效,已经得到

了广泛验证^[9].

3.2 确定目标函数

将叶片按一定排列顺序后的残余不平衡作为评价指标,其数值越小,说明排序结果越好. 故目标函数设计为

$$F(x) = \sqrt{\left[M_0 \cos \phi + \sum_{i=1}^n M_i \cos(i\mu)\right]^2 + \left[M_0 \sin \phi + \sum_{i=1}^n M_i \sin(i\mu)\right]^2} \quad (4)$$

式中 M_i 为第 i 个叶片的质量矩; $\mu = 2\pi/n$ 为每 2 个叶片之间的夹角.

3.3 选择算子

通常采用赌轮盘策略,令 $P_{ip} = \sum_{j=1}^i p_i$, $P_{0p} = 0$, 其中 P_{ip} 为累计概率, P_i 为个体的选择概率,其计算公式为: $\frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^N F(x_i)}$, 共转轮 N 次,每次转

轮时,随机产生 0 到 1 之间的随机数 r , 当 $P_{(i-1)p} < r < P_{ip}$ 时选择个体 i . 本文采用线形排序和压差为 2 的估算适应度来对个体进行选择^[10].

$$F_{\text{lin}} V(P_{\text{os}}) = 2 - sp + 2(sp - 1) \frac{P_{\text{os}} - 1}{N_{\text{ind}} - 1}$$

N_{ind} 为种群中个体的数量,每个个体的适应度值根据它在排序种群中的位置 P_{os} 来计算.

3.4 交叉算子

交叉算子是两染色体之间交换部分基因的操作,此处采用一种基于序的交叉算子^[6]. 基于序的交叉算子首先确定几个交叉点. 假定两个个体

$$p_1 = (1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9)$$

$$p_2 = (4 \quad 1 \quad 2 \quad 8 \quad 7 \quad 6 \quad 9 \quad 3 \quad 5)$$

进行交叉,交叉点为 3,4,6,9,以后代 o_1 为例说明生成后代的过程.

1) 将 p_2 中位于 3,4,6,9 位置上的叶片“2”,“8”,“6”,“5”组成一个插入序列

$$2, \quad 8, \quad 6, \quad 5$$

2) 删除 p_1 中的“2”,“8”,“6”,“5”,得到

$o_1 = (1 \quad \# \quad 3 \quad 4 \quad \# \quad \# \quad 7 \quad \# \quad 9)$

3) 将插入序列中依次插入 o_1 中

$o_1 = (1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 8 \quad 6 \quad 7 \quad 5 \quad 9)$

同理,若以 p_1 中位于 3,4,6,9 位置上叶片插入序列插入到 p_1 中,就可以得到 o_2 .

$o_1 = (1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 8 \quad 6 \quad 7 \quad 5 \quad 9)$

$o_2 = (3 \quad 1 \quad 2 \quad 8 \quad 7 \quad 4 \quad 6 \quad 9 \quad 5)$

3.5 变异算子

变异是在染色体上自发地产生随机的变化。在遗传算法中,变异可以提供初始种群中没有的基因,或找回选择过程中丢失的基因,为种群提供新的内容。在传统的遗传算法中,变异只是后备算子,用于产生关于染色体的微小扰动以维持个体的分散性^[11]。这里采用基于邻域搜索的变异,它是用于施行深度搜索,以找到改进的后代。

3.6 遗传算法的有关参数

遗传算法虽然具有其优越性,但也存在“早熟”现象,引起“早熟”的主要原因是在进化初期群体中个体的多样性迅速降低,使得算法过早收敛,从而可能丢失一些有意义的搜索点和最优点,而进入局部最优。

遗传算法中选择、交叉和变异算子是主要的遗传算子。交叉算子是组合父代群体中有价值的信息产生新的后代;变异算子的作用是保持群体中基因的多样性。随着遗传算法的收敛,多样性逐步减小,因此遗传算法中多样性减小与遗传算法收敛本质上是一致的^[12]。遗传算法的参数中交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 的选择是影响遗传算法行为和性能的关键所在,直接影响算法的收敛性。 p_c 越大,新个体产生的速度就越快,但 p_c 过大时遗传模式被破坏的可能性也越大,使得具有高适应度的个体结构很快就会被破坏。但是如果 p_c 过小,会使搜索过程缓慢,以致停滞不前^[12]。对于变异概率 p_m ,如果 p_m 过小,就不易产生新的个体结构;如果 p_c 取值过大,那么遗传算法就成了纯粹的随机搜索算法,为了在保持群体多样性的同时,保证遗传算法的收敛性,这里采用自适应遗传算子,使 p_c 和 p_m 随着适应度自动改变。

$$\begin{cases} p_c = k_1(f_{\max} - f')/(f_{\max} - f_{\text{avg}}); & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_c = k_2; & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_m = k_3(f_{\max} - f)/(f_{\max} - f_{\text{avg}}); & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_m = k_4; & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $f_{\max}$ 为群体中最大的适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度; f 为要变异个体的适应度。这里 k_1, k_2, k_3, k_4 取(0,1)区间的某一值。

3.7 叶片排序算法流程图

按照上面的遗传各个过程,给出叶片排序优化流程框图,如图2所示。在此流程的基础上对压气机某几级的叶片进行了基于遗传算法的优化排序,其排序结果如表2所示。

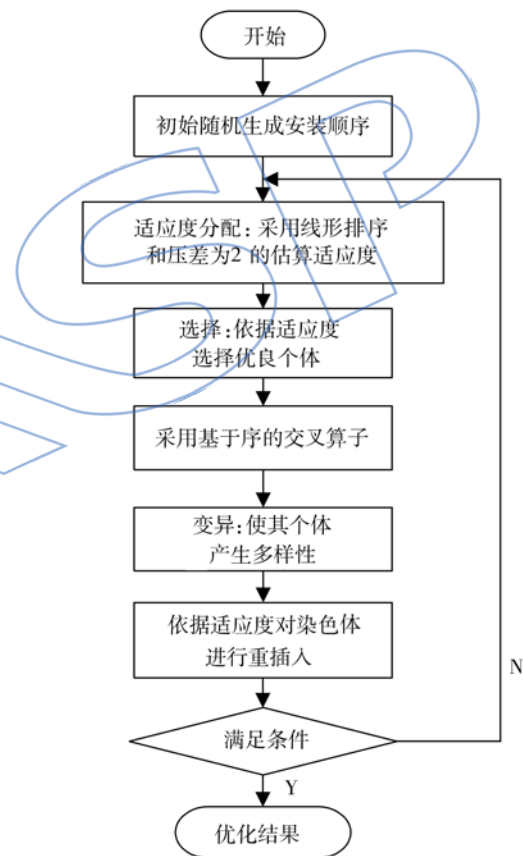


图2 叶片排序遗传算法优化流程图

Fig. 2 Flow chart of optimizing arrangement of blades

表2为是叶片优化排序方式,其转子不平衡量为 $0.4709 \text{ g} \cdot \text{mm}$,而表1经验排序方式的不平衡量为 $352.5 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。按照优化排序方式,对实际发动机某几级转子叶片进行优化排序,按遗传算法,经过50代就能达到要求。对于10余台发动机转子叶片,采用文中所述方法进行优化排序,转子不平衡量大大减小,其不平衡量与遗传代数关系如图3所示。

表 2 压气机某级叶片优化后的排序情况(质量矩单位:g·mm)

Table 2 Arrangement after optimizing sequencing of compressor vanes (unit of mass moment:g·mm)

位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩	位置	编号	质量矩
1	41	23968	11	1	23960	21	38	24060	31	16	23920	41	34	23700
2	24	23316	12	32	24356	22	43	24004	32	3	24236	42	37	24176
3	12	24480	13	42	24384	23	23	23916	33	22	24600	43	33	23752
4	7	24400	14	26	23440	24	40	23956	34	5	24144			
5	13	23676	15	39	24056	25	31	23976	35	8	23976			
6	19	23704	16	27	24040	26	30	23716	36	4	23976			
7	29	23836	17	36	23536	27	17	24100	37	20	24136			
8	10	24616	18	25	24232	28	35	24124	38	21	24344			
9	14	23816	19	15	24216	29	18	23936	39	9	23832			
10	28	23568	20	6	24076	30	2	22856	40	11	23932			

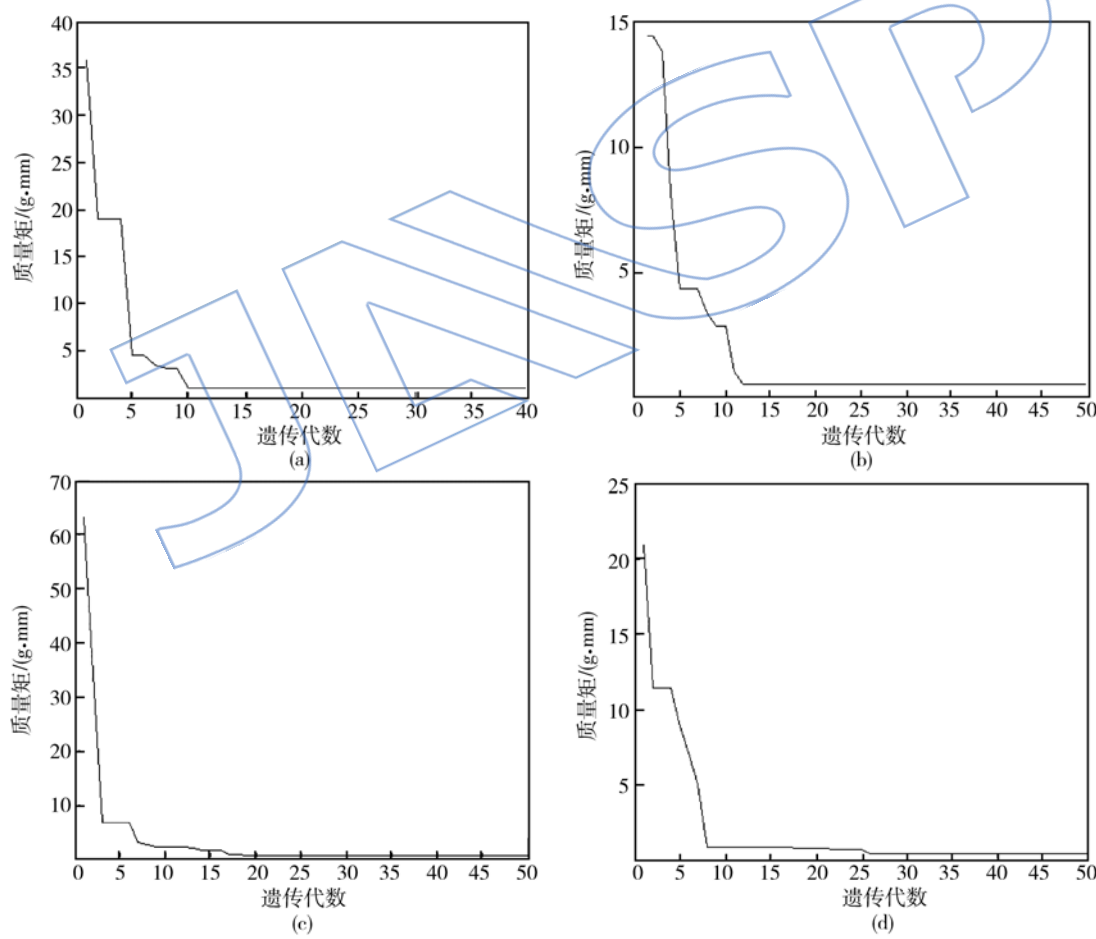


图 3 按照遗传代数产生的不平衡量与遗传代数的关系

Fig. 3 Relation of genetic generation and unbalance

4 结 论

利于遗传算法对转子叶片考虑质量矩进行优化排序,可以使转子总不平衡量大大减小,对于工

厂进行叶片排序与转子动平衡提供了一种很好的方法;对于一级多个叶片的转子,遗传算法收敛速度快,操作起来方便可行性比较好,在此基础上,建立了发动机叶片安装系统,能够为发动机装配

人员提供一种优化排序策略,为工厂人员安装提供了便利.算法程序仅仅考虑了转子原始不平衡量与叶片的质量矩,其他方面有待进一步研究.经过对10余台发动机转子叶片质量矩优化排序计算验证,结果表明:转子的不平衡量大大减小.该方法可在实际发动机转子不平衡中推广使用.

参考文献:

- [1] 晏砺堂,洪杰,李其汉,等.压气机叶轮偏心引起的自激力和稳定性的理论分析[J].航空动力学报,1994,5(8):122-128.
YAN Litang, HONG Jie, LI Qihan, et al. Analysis the self-exciting force and stability caused by blade tip clearance of the compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 5(8):122-128. (in Chinese)
- [2] 刘瑞韬,徐忠.叶片数及分流叶片位置对压气机性能的影响[J].工程热物理学报,2004,25(2):224-225.
LIU Ruitao, XU Zhong. Effect of blade number and splitter blade position on the performance characteristic of the compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2):224-225. (in Chinese)
- [3] 王满贤,李建锋,张绍军.某发动机转子叶片选配工艺改进[J].红旗技术,2006,14(6):180-185.
- [4] Rodgers C. Effects of blade number on the efficiency of centrifugal compressor impellers[J]. Proceedings of ASME Turbo. Expo., 2000, 22(2):25-35.
- [5] 陈国良,庄镇泉,王东生.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996.
- [6] 唐绍军,王旭,朱斌.遗传算法对压气机排序的应用[J].航空动力学报,2005,20(3):518-520.
TANG Shaojun, WANG Xu, ZHU Bin. Research on genetic algorithm applied to sequence of compressor vanes[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3):518-520. (in Chinese)
- [7] Tagami. Study on application method of genetic algorithms for combinatorial optimization problem[D]. Tokushima: University of Tokushima, 1995.
- [8] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [9] Eshelman L J, Schaffer J D. Real-code genetic algorithms and interval-schemata[M]//Whitley L D. Foundations of genetic algorithms 2. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1993:187-202.
- [10] 雷英杰,张善文,李继武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [11] 王正志,薄涛.进化算法[M].北京:国防科技大学出版社,2000.
- [12] 曹俊,朱如鹏.一种改善遗传算法早熟现象的方法[J].上海大学学报(自然科学版),2003,9(3):229-231.
CAO Jun, ZHU Rupeng. A method for preventing premature of genetic algorithm[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science), 2003, 9(3):229-231. (in Chinese)
- [13] FU Xuhui, KANG Ling. Study of the premature convergence of genetic algorithms[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2003, 12(3):345-348.