

进港飞机调度多目标优化问题的改进NSGA-II算法

冯翔^{1,2}, 杨红雨¹

(1. 四川大学空管自动化系统技术重点实验室 成都 610064; 2. 四川九州电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000)

【摘要】基于多目标优化问题的Pareto最优解概念,提出了一种求解非劣解集的改进非支配排序遗传算法(NSGA-II),用于解决多条跑道情况下进港航班调度问题,要求航班总延误时间平方和及总延误成本两个目标最少。重点讨论了算法实现中的基于最近邻思想的启发式交叉算子和改进的变异算子,以及对非劣解集的筛选操作。最后进行了仿真实验,对优化结果进行了分析比较。研究结果表明改进NSGA-II算法对多跑道进港飞机调度多目标优化问题具有较好的应用前景。

关键词 启发式交叉算子; 多目标优化; NSGA-II; Pareto最优; 进港飞机调度

中图分类号 V355

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.011

Improved Nondominated Sorting Genetic Algorithm II for Multi-Objective Optimization of Scheduling Arrival Aircrafts

FENG Xiang^{1,2} and YANG Hong-yu¹

(1. State Key Lab of Air Traffic Control Automation Technology and Systems, Sichuan University Chengdu 610064;

2. Sichuan Jiuzhou Electric Group Co. Ltd. Mianyang Sichuan 621000)

Abstract Based on the Pareto optimal conception, an Improved nondominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) seeking non-inferior solution set of multi-objective optimization (MO) problems is proposed, while the heuristic crossover operator based on nearest-neighborhood, the improved mutation operator and the filtering of non-inferior solutions are focused and discussed. The algorithm proposed is applied to a two-objective optimization of scheduling of arrival aircrafts at an airport with multiple runways, where both the sum of all the delays squared and the fuel cost of all the aircrafts were required to be minimized. After the simulation experiment, the optimal solutions are analyzed and compared with the best solutions founded by some existing algorithms. The research result demonstrates that improved NSGA-II possesses a good application foreground for multi-objective optimization of scheduling arrival aircrafts at an airport with multiple runways.

Key words heuristic crossover operator; multi-objective optimization; NSGA-II; Pareto optimal; scheduling arrival aircrafts

进港飞机调度问题是空中交通流量管理中的重要问题。现实中基于管制员个人经验以FCFS为原则的人工调度日益不能满足目前航空业的发展。优化进港飞机调度对减少飞机延误及燃油花费,提高终端区管制效率有着重要意义。

进港飞机调度包括飞机降落跑道、排序和降落时间的确定,是一个NP-C的组合优化问题。当目标数、跑道数、飞机数增多时,问题的复杂度急剧增加。现有的研究成果大多针对单跑道^[1-2]或多跑道单优化目标^[3-7]问题,其中基于进化理论的优化算法得到了广泛研究,但简单遗传算法^[3-7](simple genetic algorithm, SGA)在求解进港飞机优化调度问题时,算法收敛速度较慢,在跑道数、航班数较多情况下,

不易收敛到最优解。文献[8]提出一种Memetic算法,与SGA相比,具有收敛性好、收敛速度快的特点,但该算法在5跑道、20架进港航班的情况下,依然不能收敛到最优解。

近年来,多跑道多目标优化逐渐成为进港航班调度问题的研究热点。如文献[9]提出了一种适用于双跑道、多优化目标的CPS动态规划算法。文献[10]提出了一种多跑道着陆飞机协同调度多目标优化遗传算法,根据个体在各优化目标的排序情况计算个体综合适应度,以此进行遗传运算。

多目标优化问题(multi-objective optimization, MO)与单目标优化问题本质不同,MO问题最优解称为Pareto最优解或非劣解,一般是一个集合^[11]。求解

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 国家863项目(2012AA011201)

作者简介: 冯翔(1983-),男,博士生,主要从事空中交通管理、数据融合、智能算法等方面的研究

MO问题的常规方法是根据设计者的意图将其转化为单目标处理, 如目标规划法、多目标加权法等, 即使求解很成功^[11], 得到的解不能保证Pareto最优性。近年来, 基于Pareto思想的非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[12]以其优秀的性能得到了广泛的关注和应用, 但直接采用NSGA-II算法并不能得到满意的结果。本文给出了一种适用于多跑道多目标优化进港航班调度问题的NSGA-II改进算法, 重点提出了一种启发式交叉算子, 改进了变异算子, 以及非劣解集的筛选。最后进行了算例分析。

1 问题描述

有 n 架飞机 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 进入终端区等待降落, 要求将它们分配到 m 条跑道上, 并且确定各跑道上飞机的降落次序和降落时间STA(scheduled time of arrival)。飞机在各跑道上的预计降落时间ETA $_{i,j}$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$) (estimated time of arrival)已知, 飞机 i 在跑道 j 降落的实际降落时间STA $_{ij}$ 不能早于相应的ETA $_{ij}$ 。飞机机型有重型(H)、中型(L)、轻型(S)。同一跑道上着陆的相邻飞机的STA需满足间距标准: STA $_{i+1,j}$ - STA $_{i,j}$ > C $_{i,i+1}$, ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$), C $_{i,i+1}$ 为由相邻两机类型决定的时间间隔。由于目前空管规则要求C $_{i,i+1}$ 应是在最低法定距离基础上, 根据飞机速度、飞机重量类型、风速大小以及管制员加入的人工时间缓冲而实时计算得到。为简单起见, 本文算例采用固定的单位时间间隔(含义近似为分钟), 如表1所示。本文采用的机场多跑道模型为平行跑道模型, 各跑道独立运行, 这也是目前国内机场多跑道系统普遍的运行方式。另外, 若 $m=1$, 问题变为单跑道情形, 可见, 单跑道是多跑道的特殊情形。

表1 相邻两机时间间距

前机		S	L	H
后机	S	1	1.5	2
	L	1	1.5	1.5
	H	1	1	1

一些机场存在跑道限制问题^[4]: 因为各跑道的长度、年龄等因素, 某些跑道被限制只允许指定的机型降落。如某拥有3跑道的机场, 其中一条跑道只允许L、S机型降落。该问题可等效为假设重型机到该跑道的ETA是一个远大于正常ETA的数, 限制重型机只能选择其余两条跑道降落。

飞机的延误时间等于实际降落时间STA与预计到达机场时间之差, 即:

$$t_{\text{delay}i} = \text{STA}_i - \min_{1 \leq k \leq m} (\text{ETA}_{ik}) \quad (1)$$

飞机的延误运营成本等于延误时间与单位时间延误运营成本之积。本文假设^[13]轻型、中型、重型机的单位时间间隔内的延误运营成本分别为1、14、20。为了与文献[4,8]结果比较, 本文算例的优化目标函数如下定义, 即所有飞机延误时间平方和最小:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n t_{\text{delay}i}^2 \quad (2)$$

与延误时间之和相比, 该方案能使延误更均匀地分布于各个航班, 使所有飞机延误运营成本最小:

$$f_2 = \sum_{i=1}^n (t_{\text{delay}i} p_i) \quad (3)$$

式中, p_i 为飞机 i 机型的单位时间延误成本。

2 算法设计

搜索是优化算法收敛于最优解的一系列计算步骤。搜索策略包含两个重要方面: 搜索最优解和扩展搜索空间。多数经典优化方法的计算基于目标函数的梯度或高阶导数, 沿着最速下降方向进行点对点的搜索, 只注重探索最好解而忽略了搜索空间的扩展, 极易陷入局部最优解。遗传算法综合了定向搜索与随机搜索的优点, 可以取得较好的区域探索与空间扩展的平衡。然而需要指出的是, 简单的遗传运算设计为通用目的搜索, 它基本是一种盲目搜索而不能对后代进行改进, 在许多情况下不是十分有效^[14]。

下面探讨NSGA-II算法在进港航班调度问题中的应用, 重点讨论影响遗传算法搜索策略的交叉算子、变异算子、非劣解集的筛选操作。

2.1 编码和解码方法

本文采用整数编码, 一个染色体表示一种优先调度飞机降落的次序。如染色体为(6,3,4,1,2,5), 表示优先调度飞机6到合适的跑道并确定其STA, 然后依次安排后续飞机降落。当完成所有飞机调度时, 目标函数值也随之确定了。

具体的解码过程详见文献[3], 此处限于篇幅, 不再赘述。

2.2 选择算子

本文采用轮盘赌算法, 这种方法能保证在当代种群中, 优秀的个体以较大的概率被选中, 体现了优胜劣汰的原则。

2.3 交叉算子

遗传算法的性能在很大程度上取决于采用的交叉运算的性能^[14]。交叉模拟了自然进化中的交配过程, 若子代个体继承了双亲中的优秀基因信息, 则

会产生优秀的后代, 加快收敛速度, 促使进化朝优化的方向发展, 反之亦然。交叉算子可分为两类: 规范法和启发式法。SGA常用的交叉算子^[3-7], 如部分匹配(PMX)等, 属于规范法, 其思想为随机选择交叉位置进行交叉, 需要嵌入修复程序解决后代的非法性。规范法不能保证交叉后的后代比双亲更好, 而启发式法的目的是为了产生改进的后代。

另外, 在实际空管中, 也倾向于使调度方案趋于FCFS序列, 减轻管制员工作负担, 降低航班调整位置所带来的风险和成本。基于这些考虑, 本文提出了一种基于“最近邻”思想的启发式交叉算子。其核心思想是在交叉操作时, 若子代染色体当前基因位为 c' , 亲代染色体中 c' 的后续航班分别为 c_{r1} 、 c_{r2} , 选择 c_{r1} 、 c_{r2} 中与 c' 预计到达机场时间“最近”的航班作为 c' 的后续航班 c'' , 然后再以 c'' 作为子代当前基因位 c' , 执行上述操作, 直至遍历完一条亲代染色体。通过提取亲代中较优秀的基因信息, 子代染色体得到了优化, 保证了进化始终朝优化的方向进行。现详述如下:

选择两个父染色体 $P_1(c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n})$ 、 $P_2(c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2n})$ 进行交叉, 共有 M 条跑道。先基于 P_1 进行如下操作:

1) 选择第一个基因 c_{11} 作为交叉的起点, 将其放入基因串Head中。

2) 取Head中最后一个基因 c' 。

3) 分别从 P_1 、 P_2 中找出 c' 右边的基因位 c_{r1} 、 c_{r2} , 计算 $\text{diff}_1 = |\min \text{ETA}_{c'} - \min \text{ETA}_{c_{r1}}|$, $\text{diff}_2 = |\min \text{ETA}_{c'} - \min \text{ETA}_{c_{r2}}|$ 。若 $\text{diff}_1 \leq \text{diff}_2$, 则转步骤4), 否则, 转步骤5)。

4) 选择 c_{r1} , 将 c_{r1} 添加到Head尾部, 且在 P_1 、 P_2 中删去 c_{r1} 。若 $c_{r1} = c_{1n}$ 或者 $c_{r1} = c_{2n}$, 则转步骤6), 否则, 转步骤2)。

5) 选择 c_{r2} , 将 c_{r2} 添加到Head尾部, 且在 P_1 、 P_2 中删去 c_{r2} 。若 $c_{r2} = c_{1n}$ 或者 $c_{r2} = c_{2n}$, 则转步骤6), 否则转步骤2)。

6) 将Head分别和 P_1 、 P_2 剩下的编码串组合, 产生个体 O_1 、 O_2 。

同理, 对 P_2 进行步骤1)~步骤6)的操作, 可产生个体 O_3 、 O_4 。

在 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 中选择2个最优秀的个体, 作为交叉之后的子代染色体Child₁和Child₂。

2.4 变异算子

在遗传算法迭代中, 随着高适解的获得, 交叉运算倾向于在这些解的周围搜索, 会失去扩展搜索

空间的作用^[14]。

为了扩展算法搜索空间, 避免收敛到局部最优解, 应增强个体的基因突变性。本文采用随机变异的思想设计变异算子, 即随机选择同一染色体中的两个点, 将两点之间的基因位的顺序重新随机确定。

2.5 非劣解集的筛选

在NSGA-II算法进化过程的每一代, 经过选择、交叉、变异操作后, 产生新群体。然后根据各个体的目标函数值对群体进行分级。分级就是将群体划分成若干不同等级的非劣解集合。第一级非劣点是当前群体的非劣解, 但不一定是整个MO问题的非劣解。在算法迭代过程中, 由于优秀个体有更大的概率繁殖, 非劣解“近亲”的概率大大增加。为保证非劣解分布的均匀性, 应删掉那些彼此距离太近的点。为此, 根据进港飞机调度问题的特点, 若非劣解 i 和 j 的目标函数值均相等, 则任选 i 或 j 之一删除, 同时为群体加入一个新个体 k 。

改进NSGA-II算法其余步骤和文献[12]中的一致, 限于篇幅, 此处不再赘述。

3 算例仿真与分析

3.1 仿真计算

文献[4]根据美国一些大机场的实际运行数据设计了4个典型算例, 并用SGA优化算法进行了计算。文献[8]用Memetic算法对这4个算例进行了求解, 并利用第三方软件获得了算例的理论最优解。为了测试本文算法的性能, 用改进NSGA-II算法求解这4个算例, 对每个算例分别进行了10次仿真, 并与文献[4,8]得到的最优结果进行了对比。对比标准为各算法所得最优解的飞机延误平方和, 即目标函数 f_1 。仿真程序采用C++编写。实验中, 种群规模为255, 变异概率0.2, 交叉概率0.9, 进化代数最多300代。进化终止条件是连续迭代50代非劣解未发生变化或者已完成300次迭代, 机器配置为3.0 GHz CPU和2 GB内存。

各种算法的对比结果如表2所示, 其中算例4的跑道限制条件为H型飞机不能降落于跑道3, J_{opt} 、 J_{SGA} 分别表示最优解和文献[4]中最好解的目标函数值, J_{m_worst} 、 J_{m_best} 、 J_{m_med} 分别表示文献[8]中Memetic算法10次仿真所得到的目标函数值的最差、最好及中位数值。同理, J_{n_worst} 、 J_{n_best} 、 J_{n_med} 表示本文算法目标函数值的最差、最好及中位数值。 t_m 、 t_n 分别表示Memetic算法和本文算法10次仿真的平均求解时间, N_n 为本文算法的收敛到Parato最优解的平均求

解代数。

表2 各种算法性能比较

算例	架次	跑道数	跑道限制	J_{opt}	J_{SGA}	J_{m_worst}	J_{m_med}	J_{m_best}	J_{n_worst}	J_{n_med}	J_{n_best}	t_m/s	t_n/s	$N_n/代$
1	12	3	无	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	0.04	0.45	2.20
2	15	3	无	12.25	12.50	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	0.09	8.38	35.40
3	20	5	无	7.75	12	11.25	10	9.5	8.75	7.75	7.75	0.17	17.00	46.6
4	12	3	有	6.25	11.25	9.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	0.04	0.46	2.30

限于篇幅,这里仅列出了算例3一次仿真的计算结果。算法在118代便退出迭代,非劣解集如表3所示,表4给出了解1对应的调度方案作为参考,TD、CD分别代表飞机的延误时间和延误成本。图1、图2显示该次仿真中最佳目标函数值 f_1 、 f_2 随进化的收敛过程。算例的原始数据参见文献[4]。

表3 非劣解集

序号	解	目标函数	
		f_1	f_2
1	(11,6,12,14,18,4,17,13,9,19,8,15,10,5,20,2,7,3,1,16)	7.75	128.5
2	(11,6,4,12,17,14,8,19,18,13,15,10,5,20,9,2,7,3,1,16)	10.5	96.5
3	(11,6,4,17,12,14,9,19,18,10,13,8,15,5,20,2,7,3,1,16)	8.75	103.5
4	(11,6,4,17,12,14,9,19,18,8,15,10,5,20,2,7,3,13,1,16)	10.25	97

表4 仿真调度结果(解1)

航班数据			解1			
序号	航班号	机型	跑道	STA	TD	CD
1	DL130	H	5	9	0	0
2	AA335	L	1	15	0	0
3	UA123	H	5	8	1	20
4	DL1920	H	2	7	1	20
5	UA1133	S	1	10	0	0
6	NW2123	H	5	5	0	0
7	AA205	L	1	16.5	1.5	21
8	DL3319	H	4	8	1	20
9	SW200	H	4	7	1	20
10	DL510	S	1	9	0	0
11	UA410	H	3	4	0	0
12	SW185	L	3	6	0	0
13	DL200	S	1	7.5	0.5	0.5
14	NW410	L	1	6	0	0
15	AA1225	H	3	7	0	0
16	SW442	S	3	10	0	0
17	AA127	L	4	6	0	0
18	AA1410	L	5	7	0	0
19	UA555	H	2	8	1	20
20	SW250	L	4	9.5	0.5	7

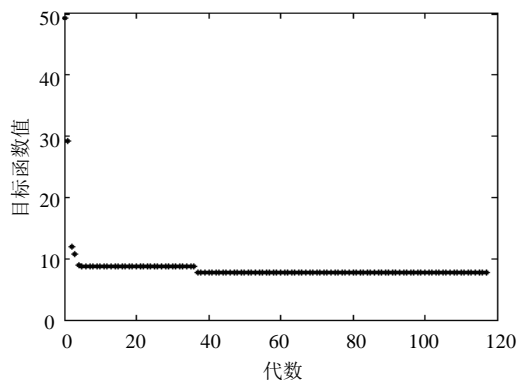


图1 最佳目标函数值(f_1)随进化收敛过程

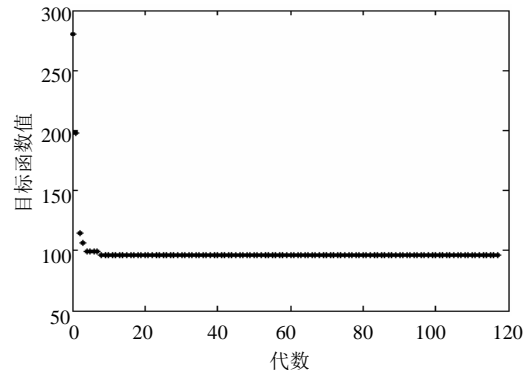


图2 最佳目标函数值(f_2)随进化收敛过程

3.2 结果分析

对多跑道飞机调度问题,最多有 $n!m^n$ (n 为飞机数, m 为跑道数)个不同组合。由表2可以看出,随着问题规模的扩大,问题的复杂度急剧增加,算例的求解时间逐渐增多。和文献[4,8]相比,本文的算法在4个算例均能得到最优解,而文献[4,8]的算法在问题规模较大的情况下(算例3)均不能得到最优解,并且在这种情况下,本文算法10次仿真所得的解均优于文献[8]所能得到的最好解。从实时性考虑,文献[4]指出算法求解时间低于5 min便能满足实时管制辅助决策的要求,由表2易见,本文算法的求解时间完全满足实时性要求。由图1可见,初始种群的最佳目标函数值 f_1 为49.25,进化到38代便收敛为7.75。由图2可见, f_2 在初始种群中最佳目标函数值为280,在第9代便收敛为96.5,显然本文算法的收敛性能是令人满意的。

由表3可见,本文算法一次运行能得到多个Pareto最优解,所优化的两个目标间存在矛盾关系,当 f_1 最小时(解1), f_2 最大,反之亦然(解2)。解3、解4代表了两个目标折中的调度方案。决策人可根据偏好选择一个非劣解作为最终的调度方案。当偏重其中一个优化目标时,可选择解1或解2,当同时看重两个目标时,可选择解3或解4。

4 结论

对进港飞机调度问题,MO比单目标优化有更好的工程实用意义。本文的改进NSGA-II算法具有较

好的实用性和应用潜力。通过改进的启发式交叉算子、变异算子和对非劣解的筛选操作获得了较好的区域探索与空间扩展的平衡,促使进化逐渐收敛到MO问题的Pareto最优解,避免了基于SGA的优化算法常见的“进化退化”现象,而且收敛速度快,符合实时性要求。随着航空业的迅速发展,我国一些大型机场已开始使用或规划多条跑道,各机场跑道的构型及管约束关系也不一样。如何针对这些约束,对算法进行调整和改进,发掘算法的工程应用潜力,这需要后续进一步研究解决。

参 考 文 献

- [1] YU Jiang, YANG Ying-bao, ZHOU Hang. Innovative predatory search algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling problem[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 27(4): 361-366.
- [2] 杨凯, 张建伟. 基于回溯与交换的降落航班排序模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 138-144.
YANG Kai, ZHANG Jian-wei. Research of arriving aircrafts scheduling model based on push-back and swap[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(3): 1-6.
- [3] CHENG V H L, CRAWFORD L S, MENON P K. Air traffic control using genetic search techniques[C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applicatios. Hawaii, USA: IEEE, 1999: 249-254.
- [4] HANSEN J V. Genetic search methods in air traffic control[J]. Computers&Operations Research, 2004, 31(3): 445-459
- [5] CAPR S, IGNACCOLO M. Genetic algorithm for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model[J]. Journal of Air Transport Management, 2004, 10(5): 345-351.
- [6] 余江, 罗晓利. 遗传算法在飞机着陆调度问题上的应用[J]. 航空计算技术, 2007, 37(3): 1-4.
YU Jiang, LUO Xiao-li. Application of genetic algorithm on scheduling arrival aircrafts[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(3): 1-4.
- [7] 杨秋辉, 游志胜, 冯子亮, 等. 一种改进的基于遗传算法的多跑道到达飞机调度[J]. 四川大学报(工程版), 2006, 38(2): 141-145.
YANG Qiu-hui, YOU Zhis-hen, FENG Zi-liang, et al. Scheduling arrival aircrafts on multiple runways based on an improved genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(2): 141-145.
- [8] 孟祥伟, 张平, 李春锦. 到场飞机排序及调度问题的Memetic算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 488-494.
MENG Xiang-wei, ZHANG Ping, LI Chun-jin. Memetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling problem[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 488-494.
- [9] 应圣刚, 孙富春, 胡来红, 等. 基于多目标动态规划的多跑道进港排序[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 826-835.
YING Sheng-gang, SUN Fu-chun, HU Lai-hong, et al. Multi-objective dynamic programming algorithm for aircraft arrival sequence and runway scheduling[J]. Control Theory&Application, 2010, 27(7): 826-835.
- [10] 张洪海, 胡明华. 多跑道着陆飞机协同调度多目标优化[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 402-409.
ZHANG Hong-hai, HU Ming-hua. Multi-objection optimization for collaborative scheduling aircraft landing on multi-runways[J]. Journal of Southwest Jiao-tong University, 2009, 44(3): 402-409.
- [11] 林铨云, 董加礼. 多目标优化的方法与理论[M]. 长春: 吉林教育出版社, 1992.
LIN Cuo-yun, DONG Jia-li. Multi-objective optimization method and theory[M]. Changchun: Jilin Education Press, 1992.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] 徐肖豪, 李雄. 航班地面等待模型中的延误成本分析与仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 115-120.
XU Xiao-hao, LI Xiong. Cost analysis of flight delays and simulation in ground-holding model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(1): 115-120.
- [14] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
XUAN Guang-nan, CHENG Rui-wei. Genetic algorithm and engineering design[M]. Beijing: Science Press, 2000.

编辑 漆蓉