

文章编号: 1000-582X(2011)12-096-06

车间生产调度中动态小生境协同进化算法

罗书强¹, 赵鹏², 张根保³

(1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070;

3. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘要: 车间生产调度是企业生产的重要环节。为避免遗传算法在求解多车间协同调度时早期成熟和陷入局部最优解, 以及收敛速度慢的问题, 特引入一种基于动态小生境集的多种群协同进化模型。在基于工序的染色体编码方法的基础上, 利用交叉算子和变异算子调整加工顺序和多工艺路线选择。融合动态小生境集技术和多种群协同进化方法, 实现多工艺路线下多车间协同生产调度的优化求解。实验表明, 该方法具有良好的优越性。

关键词: 小生境集; 进化算法; 调度; 染色体编码

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Dynamical niche sets-based cooperative evolutionary algorithm for job shop scheduling

LUO Shu-qiang¹, ZHAO Peng², ZHANG Gen-bao³

(1. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, P. R. China; 3. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Job shop scheduling is an important part of manufacturing process. Pre-mature, local optimal solution or low convergence rate of Genetic Algorithm may come across in solving scheduling problem in multi-Job shop. To avoid those unhealthy tendencies, this paper introduced the Dynamical Niche Sets-based Cooperative Evolutionary Algorithm model. In the Algorithm, Process-based chromosome encoding method was used; the crossover operator and mutation operator were designed to adjust operation sequences and choose process routes. The cooperative scheduling problem in multi-Job shop was solved using dynamical niche sets technology and multi-population cooperative evolution method. The Experiment result shows the proposed method has good advantages.

Key words: Niche sets; evolutionary algorithm; scheduling; chromosome encoding

作为生产制造系统中的重要环节, 车间生产调度的柔性直接影响到整个生产系统的效率。当前, 车间柔性化调度的研究已经引起了高度的重视, 大量的算法被引入到车间生产调度优化设计过程

中^[1-7]。其中许多研究者应用遗传算法对该类问题展开广泛而深入的研究。Dirk C Mattfeld 利用遗传算法来解决车间生产调度问题中搜索空间过大的不足, 该算法同时考虑加工设备层的短期决策和车间

收稿日期: 2011-07-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50835008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 罗书强(1971-), 男, 西南大学副教授, 博士后, 主要研究方向为制造业信息化、现代质量工程、先进制造技术等, (E-mail) luoshuqiang@swu.edu.cn。

调度层的长期决策,以此减少搜索空间,快速寻优^[8]。曾强以工件完工时间平均隶属度最大为目标函数的柔性作业车间调度问题优化模型,针对模型提出并设计了一种基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法^[9]。同样的问题,Pezzella 采用了遗传算法来解决^[10],并在种群初始化、个体选择和新个体繁殖等操作上融合不同的策略,实验结果表明相对禁忌算法,该算法较优。Felix T S 针对多平行机调度问题,设计了一种基于遗传算法的调度器,并试图实现加工路线和加工序列的柔性化选择^[11]。

虽然遗传算法在解决车间调度问题上相对其他算法表现出一定的优势,但标准遗传算法采用基于个体自身适应度的进化模式,而没有考虑环境和个体间关联对个体进化的影响,完全随机的遗传操作虽然能够在进化初期保证解的多样性,但在进化后期将会出现遗传漂变现象^[12],大量个体不可避免地集中于某一个极值点,从而丧失了解的多样性。由此导致的结果是:利用遗传算法在求解车间生产调度问题时,只能找出个别最优的车间调度方案,有时甚至仅仅是局部最优,但全局不优的方案。协同进化有利于避免遗传算法未成熟收敛和收敛速度过慢的缺陷^[13,14],而小生境机制的引入则能够保证到遗传算法能够处理定位,避免遗传算法的漂变现象,维护多个最优解^[15,16]。

为此,笔者提出一种基于动态小生境集的协同进化算法(Dynamical Niche Sets-based Cooperative Evolutionary Algorithm, DNSCEA),该算法把生产调度问题分解为多个车间生产调度子问题,每个子问题对应一个种群,由多个种群个体构成整个问题的完整解。每个种群进化过程中形成的峰值称为小生境,并加入小生境核心集,通过小生境核心集共享机制实现车间生产调度的协同优化。

1 问题描述

在柔性化的制造系统中,车间具有多台功能相同或相近的加工设备,每一项工件任务可能存在多条工艺路线。柔性化的车间调度就是要在既定的制造、工艺约束条件下,根据特定的目标,决策出最优的工艺路线及相应的生产调度方案。生产调度问题可以描述为:

1)企业的制造系统包括 s 个相互协作的车间,定义第 i 个车间加工设备集合 $E_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iq}, \dots, e_{iq'}\}$,其中 q^i 为 i 车间的设备数。

2) n 个工件加工任务投入生产制造,构成任务集合 $\{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\}$ 。定义第 j 个工件加工任

务 t_j 具有制造可行的工艺路线集合 $R_j = \{r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jp}, \dots, r_{jp^j}\}$,其中 p^j 为工件加工任务 t_j 的可行工艺路线数量。

3)定义第 j 个工件加工任务 t_j 的一条工艺路线 r_{jp} 的工序集合为 $O_{jp} = \{o_{jpp1}, o_{jpp2}, \dots, o_{jppg}, \dots, o_{jppg^p}\}$,其中 g^p 表示该条工艺路线的最大工序数。

4)定义 $C_s(o_{jppg}, e_{iq})$ 和 $C_o(o_{jppg}, e_{iq})$ 分别为第 j 个工件加工任务 t_j 的第 p 条加工路线的 g 道工序在第 i 个车间的第 q 台设备上加工的开始加工时间和加工时间。

5)定义 D_j 为加工任务 t_j 的交付期限。本文所研究问题的目标是加工任务的持续时间最小化。定义为:

$$\text{Min } S_{\text{schedule}}(t) = \text{Max}\{C_s(o_{jppg}, e_{iq}) + C_o(o_{jppg}, e_{iq})\}$$

st:

$$J = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$p = 1, 2, \dots, p^j; \quad (2)$$

$$g = 1, 2, \dots, g^p; \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, s; \quad (4)$$

$$q = 1, 2, \dots, q^i; \quad (5)$$

$$C_s(o_{jppg}, e_{iq}) + C_o(o_{jppg}, e_{iq}) \leq D_j; \quad (6)$$

$$C_s(o_{jpp(g+1)}, e_{i(q^s)}) - C_s(o_{jppg}, e_{i(q^s)}) > C_o(o_{jppg}, e_{i(q^s)}); \quad (7)$$

$$C_s(o_{jppg}, e_{iq}) - C_s(o_{j'p'g'}, e_{iq}) > C_o(o_{j'p'g'}, e_{iq}). \quad (8)$$

在上面的约束条件中,式(1)–(5)分别对相关参数的取值进行约束;式(6)表明加工期限要求;式(7)表明同一工件同一路线的不同工序不能被同时加工;式(8)表明同一设备在同一时间只能加工一道工序。除此之外,上述模型还基于以下几点假设:

1)工序的加工时间包括了除操作外的准备及运输时间。

2)企业制造系统加工能力能够满足任务要求。

3)单道工序由某一设备独立完成。

4)理想状态下,设备外的其他资源可以自由支配。

5)单道工序在某一设备上的加工时间确定,不受加工先后顺序的影响。

6)同一工件在某一一道工艺路线中,工序必须被顺序加工。

2 基于动态小生境的协同进化模型

协同进化和小生境的概念都源于生态学,协同进化指多物种在进化过程中相互影响和适应以实现共同进化,而小生境本是生物生活或居住的微小范

围的环境,小生境中都有特定的生物种类,小生境的种类或数目决定了物种的种类。小生境进化技术能够将每一代个体划分为若干个类,将每一类中的优秀个体选取共同组成一个种群,通过种群间的交叉、变异以及不同机制的选择操作产生下一代新的种群。协同进化模型能够实现小生境的自动定位,基于动态小生境的协同进化算法能够较好地处理多峰值函数优化问题,它能很好地保持解的多样性,同时具有较高的全局寻优能力和较快的收敛速度。多工艺路线下的多车间调度问题本身就是一个具有多种优化方案的问题,在本文中,将整个生产制造系统的调度问题,按照车间种类划分为多车间生产调度的子问题,每一类车间对应一个种群,各种群间通过共享通信协同进化,以产生全局的最优调度方案。图1为基于动态小生境的多种群协同进化模型框架。

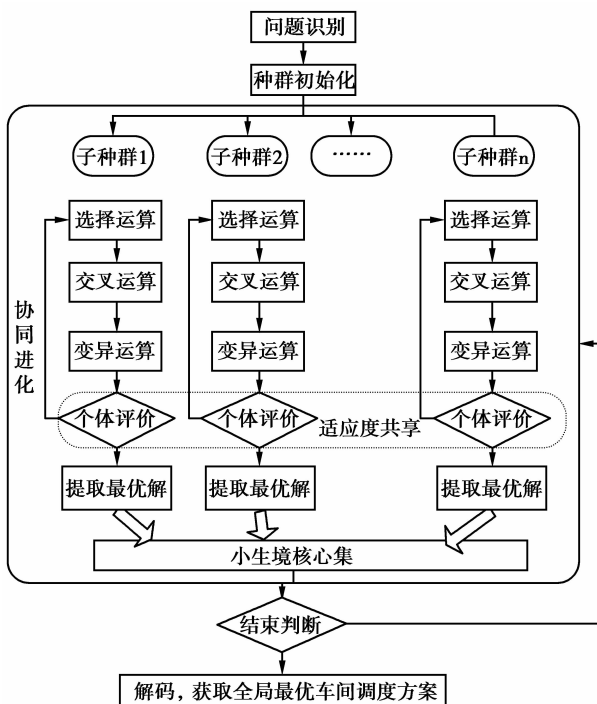


图1 基于动态小生境的多种群协同进化模型框架

3 协同进化主要操作

3.1 染色体编码

采用基于工序的染色体编码方式,使用编码 (J, P) 表示第 j 个加工任务的第 p 条可行工艺路线, (J, P) 出现在染色体的不同位置表示该条工艺路线的不同工序。以单车间加工任务的工序数与加工任务的数量之乘积为染色体长度,由工序差异和车间分配到的任务数量的不同而引起的染

色体长度不足的,设置 (J, P) 为 $(0, 0)$ 补充染色体长度。

3.2 种群的初始化

设 DNSCEA 模型中具有 s 个种群,种群的初始化过程为:(1)为每一个加工任务随机抽取一条工艺路线。(2)将随机选取的 n 条工艺路线的所有工序按照车间的加工类型划分成 s 组,这些组分别形成一个种群。记加工任务 j 中选取的工艺路线 p' 在某种群的工序集合为 $R_{jp'}^i$ 。(3)从 s 个种群中选取单条工艺的最大工序数目为 $\text{Max}(\text{num}(R_{jp'}^i))$,则染色体长度为 $L = n \times \text{Max}(\text{num}(R_{jp'}^i))$ 。(4)在第 i 种群中,从每一条工艺路线的工序集合 $R_{jp'}^i$ 中随机选取一道工序作为染色体的第一个基因,如此往复,直到所有工序被选取完成。(5)将染色体长度不足的个体用 $(0, 0)$ 凑齐。

3.3 适应度计算

定义染色体编码的欧式距离

$$d(c_x, c_y) = \sqrt{\sum_{k=1}^L (c_x - c_y)^2} \quad (9)$$

其中 c_x, c_y 为任意两染色体, k 为个体索引, L 为染色体长度。

定义个体 c_x 相对于个体 c_y 的共享函数

$$sh(d(c_x, c_y)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d(c_x, c_y)}{\sigma_0}\right)^\alpha, & 0 < d(c_x, c_y) < \sigma_0; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (10)$$

其中, σ_0 代表预定义的小生境峰半径, α 为共享函数的形状参数, $\alpha > 0$ 。

定义小生境数为

$$m_x = \sum_y^N sh(d(c_x, c_y)), x = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

N 为种群规模大小。

定义个体的动态适应度值为

$$f'_x = \frac{f_x}{m_x} \quad (12)$$

其中 f_x 为初始适应度。由(9)-(12)可知,如果某个个体的小生境峰半径 σ_0 与个体的适应度密切相关,通过调节个体小生境峰半径的大小来调整个体动态适应度的大小。在峰半径确定的情况下,如果一个个体与最佳个体相似度较高,则个体的适应度将减小,由此可以通过小生境技术快速地定位到尽可能多的最佳个体。

3.4 操作算子

3.4.1 选择

目前选择策略主要包括 De Jong [4] 提出的基于

排挤机制的选择策略和 Goldberg 和 Richardsoo^[5]提出的共享法选择策略。本文选择前者,其基本原理是:在有限生存空间,群体间相互竞争以延续生存,通过相互排挤,新生代将排挤出相似的父代个体。

3.4.2 交叉

通过交叉算子可以调整加工的顺序,交叉操作发生在两个不完全相同的个体之间,选取两个体中相同的某一基因片段(j, p)。在新个体中,保留(j, p)在个体 1 中的位置,并将个体 2 中除(j, p)外的基因顺序填补新个体 1' 中的位置;同理保留(j, p)在个体 2 中的位置,并将个体 1 中除(j, p)外的基因顺序填补新个体 2' 中的位置,以此交叉获得两个新的个体。举例如图 2 所示。

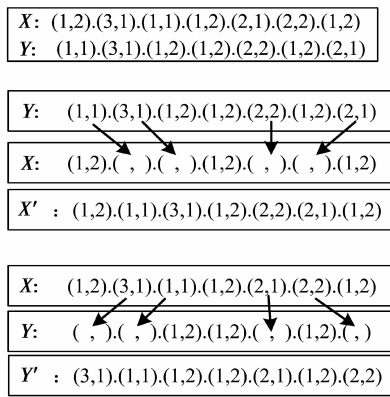


图 2 染色体交叉操作示例图

3.4.3 变异

变异操作用于改变加工任务的工艺路线,即将个体染色体中特定的基因码值中表示工艺路线的 P 值改变,即是:(j, p)((j, p'))。由于不同路线中最大工序数量的不同,可能导致染色体长度变化。在本文中取最长的染色体长度,不足的以(0,0)基因补齐。

4 算例

以 3 个相互协作的车间对 10 个工件加工为例,进行该模型的验证。其基础数据如表 1 所示。优化结果选择的工艺路线为 1. 2, 2. 4, 3. 1, 4. 2, 5. 3, 6. 1, 7. 2, 8. 1, 9. 1, 10. 1。

各设备对上述工艺路线中的工序加工时间(包括准备和运输时间)见表 2,数值 0 表示该道工序不适合在该机床上加工。由此获得的各车间的加工甘特图(见图 3),计算求得加工持续时间为 11. 81 min。在与同类算法比较中,该方法在收敛速度和求解结果上,也显示出较好的优越性。

表 1 工件工艺路线及工序数列表

工件号	工艺路线序号	工序数	工件号	工艺路线序号	工序数
1	1	5	5	1	3
	2	3		2	5
	3	6		3	3
	4	5		6	4
2	1	4	7	1	2
	2	3		2	1
	3	6		8	3
	4	3		2	5
3	1	6	9	3	5
	2	8		1	5
	3	7		2	6
4	1	4	10	1	2
	2	2			

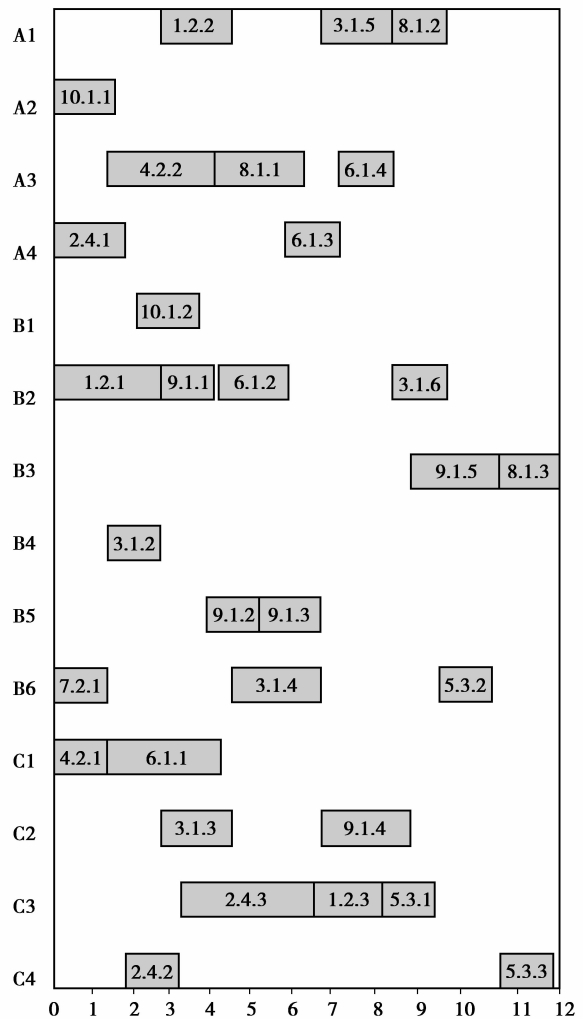


图 3 三车间调度甘特图

表2 选择工序在各设备上的加工时间列表

工序	A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	C.1	C.2	C.3	C.4
1.2.1	0	0	0	0	0	1.35	3.94	1.83	0	3.42	0	2.38	3.5	1.12
1.2.2	0.59	0	0	0	0.88	3.73	0	2.77	2.41	1.83	0	2.21	0	0
1.2.3	0	0.89	0	0	1.1	0	0	0	0	3.77	0	3.57	0.61	0
2.4.1	0	0	1.76	0.78	2.07	0.82	0	2.05	0	0	3.53	3.09	0	2.14
2.4.2	0	0	0	0	0	3.73	2.69	0	0	0	2.51	0	0	0.95
2.4.3	3.32	0	0	0	0	0	0	4.47	3.61	4.36	3.81	4.02	2.05	0
3.1.1	1.47	0	3.43	0	1.73	0	1.65	0	1.62	4.5	0	2.55	1.29	1.45
3.1.2	0	0	0	1.43	3.55	0	3.52	1.63	0	0	0	0	1.04	0
3.1.3	0	0	3.7	0	0	4.03	0	2.19	2.3	0	2.65	1.74	3.4	0
3.1.4	0	3.09	0	0	0	0	0	3.1	0	2.2	2.26	0	2.96	0
3.1.5	1.91	0	2.27	0	3.94	0	2.64	0	4.07	2.44	0.73	1.97	3.7	0
3.1.6	0	3.76	4	0	0	0.75	1.37	0.73	2.11	2.69	0	0	4.2	0
4.2.1	3.35	0	0	3.81	2.19	0	0	0	0	0	1.25	0	0	3.27
4.2.2	0	4.49	2.98	0	0	0	1.67	4.35	2.5	0	0	3.34	4.07	0
5.3.1	3.37	0	0	0	1.97	0	0	0	0	2.73	0	2.75	1.34	3.41
5.3.2	0	0	0	3.1	0	2.25	0	2.2	0	1.14	0	3.49	0	2.52
5.3.3	3.61	3.33	0	2.27	0	0	0	1.22	0	0	0	0	0	1.58
6.1.1	0	3.96	3.17	0	2.48	2.46	2.96	0	3.14	3.87	2.93	0	0	0
6.1.2	0.3	0	1.88	4.5	1.83	2.42	2.51	0	2.42	0.68	0	3.75	0	0
6.1.3	0	2.37	3.42	1.47	1.17	3.39	1.06	2.84	0	0	0	0	4.38	3.6
6.1.4	1	1.32	1.13	0.45	0.1	3.66	0	2.81	1.51	2.72	0	0	0	3.7
7.2.1	0	0	0	1.3	0	0.72	0	0	0	1.43	0	2.79	4.29	1.95
8.1.1	0	0	2.23	2.97	4.29	3.95	3.05	2.46	0	1.74	4.31	2.13	2.72	3.92
8.1.2	1.13	0	3.64	1.28	0	0	1.74	1.25	3.85	0	1.89	0	2.1	2.07
8.1.3	1.67	0	0	1.47	1	4.13	1.92	0	1.81	1.4	3.67	0	0	4.11
9.1.1	0	1.03	2.52	1.3	2.23	1.3	3.67	0	0.6	2.9	0	1.85	1.74	0
9.1.2	3.9	0	0	1.41	2.81	0	1.71	0	1.22	0.59	0	2.59	1.23	0
9.1.3	0	3.99	0	0	0	4.35	2.6	0	1.81	1.91	1.73	3.29	0	2.61
9.1.4	0		2.49	0	0	0	0	2.35	0	4.45	2.32	0	0	0
9.1.5	0	0	0	0	2.47	0	2.92	1.89	0	2.19	0	2.81	0	0
10.1.1	0	1.15	0	2.11	2.57	0	2.98	2.32	0	0	0	2.46	0	0
10.1.2	0	0	0	1.17	4.47	3.07	0	0	1.86	1.75	3.67	0	2.69	1.63

5 结 论

提出的基于动态小生境的协同进化的车间生产调度方法,能够快速定位并保证多个最优点,避免遗

传算法中的早熟、收敛过慢或者不收敛的现象。通过实验表明:该方法在解决多工艺路线下多车间协同制造过程中车间生产调度问题上具有良好的效果。

参考文献:

- [1] LI X Y, GAO L, SHAO X Y, et al. Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling [J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37 (4): 656-667.
- [2] SHAO X Y, LI X Y, GAO L, et al. Integration of process planning and scheduling—a modified genetic algorithm-based approach [J]. *Computers & Operations Research* 2009, 36(6): 2082-2096.
- [3] CHRISTOS T M, SUNG C. Integration of production planning and scheduling: overview, challenges and opportunities [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, 33(12):1919-1930.
- [4] DE JONG K A. An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 1975.
- [5] GOLDBERG D E. Genetic algorithm with sharing for multimodal function optimization [C]// *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithm*, July 28-31, 1987. Cambridge, MA, USA. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1987:41-49.
- [6] 郑忠, 朱道飞, 高小强. 钢厂炼钢-连铸生产调度及重计划方法[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(7):820-824.
- ZHENG ZHONG, ZHU DAO-FEI, GAO XIAO-QIANG. An approach of production scheduling and replanning in a steelmaking-continuous casting plant [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(7): 820-824.
- [7] MACRO D T. *AntColony Optimization* [M]. Cambridge: MIT Press, 2003.
- [8] MATTFELD D C, BIERWIRTH C. An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 155(3): 616-630.
- [9] 曾强, 杨育, 王小磊, 等. 应用需求时间窗的柔性作业车间调度优化模型[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(2): 86-94.
- ZENG QIANG, YANG YU, WANG XIAO-LEI, et al. Optimal model and algorithm for flexible job-shop scheduling problem based on demand time window[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(2):86-94.
- [10] PEZZELLA F, MORGANTI G, CIASCETTI G. A genetic algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem [J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(10):3202-3212.
- [11] FELIX T S, CHAN K L, BIBHUSHAN C. A genetic algorithm-based scheduler for multi product parallel machine sheet metal job shop[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7):8703-8715.
- [12] 陆青, 梁昌勇, 杨善林, 等. 面向多模态函数优化的自适应小生境遗传算法[J]. *模式识别和人工智能*, 2009, 22(1):91-100.
- LU QING, LIANG CHANG-YONG, YANG SHAN-LIN, et al. An adaptive niche genetic algorithm for multimodal function optimization[J]. *PR&AI*, 2009, 22(1):91-100.
- [13] 程俊, 顾幸生. 灾变合作型协同进化遗传算法及其在 Job Shop 调度中的应用[J]. *华东理工大学学报:自然科学版*, 2007, 33(5):704-707, 732.
- CHENG JUN, GU XING-SHENG. Cooperative coevolutionary genetic algorithm with catastrophe and its applications to job-shop scheduling problem[J]. *Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science edition*, 2007, 33(5):704-707.
- [14] 周泓, 王建, 谭小卫. 一种求解集成生产计划的混合协同进化算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(7): 1412-1418.
- ZHOU HONG, WANG JIAN, TAN XIAO-WEI. Hybrid collaborative evolutionary algorithm for integrated production planning[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13 (7):1412-1418.
- [15] 王辉, 任传祥, 尹唱唱, 等. 基于小生境遗传算法的物流配送路径优化研究[J]. *计算机应用*, 2009, 29(10): 2862-2865.
- WANG HUI, REN CHUAN-XIANG, YIN CHANG-CHANG, et al. Study on optimization of logistics distribution route based on niche genetic algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29 (10): 2862-2865.
- [16] 甘屹, 李胜, 张志伟. 小生境蚁群优化及其在 JSSP 中的应用研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(10):1173-1178.
- GAN YI, LI SHENG, ZHANG ZHI-WEI. Study on job shop scheduling problems based on microhabitat ant colony optimization[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(10):1173-1178.