

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.003

自适应克隆竞争算法在自动化电镀生产线调度中的应用

王时龙, 冷林霞, 周 杰, 朱哲岐, 李世龙

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:针对柔性小批量,多镀种电镀生产调度系统,提出了一种自适应克隆竞争优化算法。该算法通过克隆概率和变异概率与迭代次数的一次函数关系实现全局最优值和局部最优值搜索能力的调节,并采用竞争机制和招募新成员机制确保种群多样性。经试验仿真证明,与传统的克隆算法相比,自适应克隆竞争算法具有较高的寻优能力,同时收敛速度快。

关键词:电镀生产线;调度算法;多目标优化;多资源;克隆算法;竞争机制

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2013)07-012-04

Adaptive clonal competition algorithm and its application in automatic electroplating production line scheduling

WANG Shilong, LENG Linxia, ZHOU Jie, ZHU Zheqi, LI Shilong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at small batch and multi-type electroplating production scheduling system with flexible process, an adaptive clonal competition algorithm (ACCA) is proposed. The capability of searching the global optimal value and the local optimal value of the new algorithm can be adjusted through the function between the cloning and mutation probability and the number of iterations. Besides, the population diversity of the adaptive clonal competition algorithm can be ensured through the competition mechanism, the elite migration mechanism and the raising new members' mechanism. Compared with traditional clonal selection algorithm, adaptive clonal competition algorithm has higher searching ability and faster convergence speed.

Key words: electroplating production line; scheduling algorithms; multi-objective optimization; multiple resources; cloning algorithms; competition mechanism

生产调度是生产管理的核心内容和关键技术,是一种复杂的组合优化问题,属于 NP-hard 问题^[1]。自动化电镀生产线调度较传统的作业生产车间调度,除了需要考虑工件的调度,还需考虑电镀行车的调度,调度模型更加复杂。目前遗传算法(GA)、蚁群算法(ACA)等智能算法已广泛应用于生产调度

的研究^[2-4];禁忌搜索(TS),免疫算法(IA)等智能优化也受到研究者的关注^[5-7]。GA研究相对成熟,但存在易早熟,局部搜索能力差等弱点,克隆算法(CSA)与GA类似,采用群体搜索和操作算子策略,具有邻域局部性信息继承与逼近的特点^[8],搜索目标具有一定的分散性、独立性^[9]。CSA虽然克服了遗传算法局部搜索能力差的问题,但常出现进化缓

收稿日期:2013-03-02

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(50925518);国家自然科学基金青年基金资助项目(51005260);国家科技支撑计划资助项目(2012BAF12B09);重庆科技攻关重大项目(CSTC2013gg-yyjsb70001)

作者简介:王时龙(1966-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事计算机继承制造、数控技术与装备自动化等领域的研究,(E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

慢现象,局部搜索能力与全局搜索能力相矛盾^[10-11]。鉴于此,笔者提出了克隆概率和变异概率与迭代次数相关的自适应克隆竞争算法,寻优初期,抗体种群差异较大,优良个体所占比重小,较大的变异概率和较小的克隆概率能增加种群多样性,扩大搜索空间,增强全局最优的搜索能力,随着迭代次数的增加,种群优良性增强,较小的变异概率和较大的克隆概率能保持种群优良性,提高收敛精度。

1 自动化电镀生产线多目标调度模型

1.1 自动化电镀生产线调度模型

自动化电镀生产线调度问题描述为:有 n 批工件, m 个镀槽(包含并行工位),工件在各镀槽中的加工时间和加工顺序确定, h 辆行车,负责工件在各镀槽间的转移,假设和约束条件如下:

1)工件一旦进入生产,则不能中断,且镀槽之间无中间缓冲区,即

$$t_{lkj} = t_{skj} + t_{kj}, \quad j \in (1, m); k \in (1, n), \quad (1)$$

$$t_{skj_2} = t_{lkj_1} + \frac{l_{j_1, j_2}}{v} + t_r,$$

$$j_1 \in (1, m); j_2 \in (j_1 + 1, m); k \in (1, n), \quad (2)$$

式中: t_{lkj} 为工件 k 在 j 中的完工时间; t_{skj} 为工件 k 在 j 中的开工时间; t_{kj} 为工件 k 在 j 中的加工时间; l_{x_1, x_2} 为镀槽 j_1 到 j_2 的中心距离; v 为行车带料时的移动速度; t_r 为行车取料、放料时间和。

2)同一镀槽在同一时间加工工件数目不能超过 1^[12-13]:

$$|t_{lk_1j} - t_{lk_2j}| + |t_{sk_1j} - t_{sk_2j}| \geq t_{k_1j} + t_{k_2j}, \quad j \in (1, m); k_1, k_2 \in (1, n); k_1 \neq k_2. \quad (3)$$

当工序存在并行工位时,设并行工位中最先完成加工的工件在此工位上的加工时间、开始时间以及结束时间分别为 s'_{kj} 、 f'_{kj} , 则应满足:

$$|t'_{lk_1j} - t'_{lk_2j}| + |t'_{sk_1j} - t'_{sk_2j}| \geq t'_{k_1j} + t'_{k_2j}, \quad j \in (1, m); k_1, k_2 \in (1, n); k_1 \neq k_2. \quad (4)$$

3)同一时间,行车最多能转移一批工件:

$$\begin{cases} t_{ij_1k_1} - t_{ij_3k_2} \leq -\frac{l_{j_1, j_2}}{v} & t_{ij_1k_1} < t_{ij_3k_2} \\ t_{ij_1k_1} - t_{ij_3k_2} \geq \frac{l_{j_3, j_4}}{v} & t_{ij_1k_1} \geq t_{ij_3k_2} \end{cases} \quad (5)$$

$$j_1 \in (1, m); j_2 \in (j_1 + 1, m)$$

$$j_3 \in (1, m); j_4 \in (j_3 + 1, m)$$

$$k_1, k_2 \in (1, n); k_1 \neq k_2$$

1.2 多目标调度模型

1.2.1 最小化最大完成时间

最后一批工件在最后一个镀槽中加工结束的时间为所有工件的总加工时间,如式(6)所示。

$$g_1 = t_{\text{总min}} = \dots \min \left(t_{sn_1} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (r \cdot \eta_{kj} + t_{kj}) + \frac{l_{1,m}}{v} \right), \quad (6)$$

式中: η_{kj} 为 $t_{kj} \neq 0$ 时, $\eta_{kj} = 1$, 否则 $\eta_{kj} = 0$ 。

1.2.2 最小化拖期/提前惩罚

对制造企业来讲,提前完工会增加库存成本,拖期会影响生产效率,实际生产中,提前/拖期对客户满意度影响符合梯形模糊隶属函数^[14-15],如图 1 所示。不同产品的重要性有一定差别,设 $(\partial_1, \partial_2 \dots \partial_n)$ 为 n 批产品的重要因子, $(\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n)$ 为 n 位客户满意度,最小化拖期/提前惩罚即使客户满意度与对应的重要因子之积最大,如公式(7)。

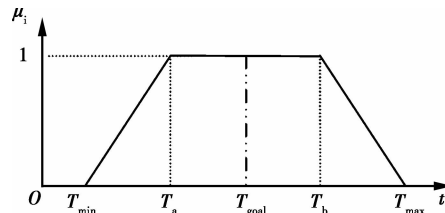


图 1 交货期与客户满意度关系图

$$g_2 = \max \left(\sum_{i=1}^n \partial_i \mu_i \right) = \min \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\partial_i \mu_i} \right). \quad (7)$$

1.2.3 目标函数

权衡最大完工时间和拖期/提前惩罚重要程度,设置加权函数:

$$g = \min(\alpha g_1 + \beta g_2), \quad (8)$$

式中: α, β 分别为最大完工时间和惩罚因素的加权系数。设 E 为 g 的估计最大值,将目标函数修改为式(9)。

$$f = \max(E - (\alpha g_1 + \beta g_2)). \quad (9)$$

2 自适应克隆竞争算法

自适应克隆竞争算法(ACCA)相对传统的克隆竞争算法来讲,具有较高的寻优能力,同时收敛速度快,算法描述如下:

Step1 初始化:产生 2 个初始种群 A1、A2,各种群随机生产 Pop_Size 个抗体,对种群 A1、A2(以下用 A 代替)分别进行如下操作。

Step2 克隆:计算抗体亲和力,选择种群 A 中亲和力较高的 m 个抗体,按公式(10)进行克隆扩增操作,得到抗体群 C;

$$P_c(k) = \frac{P_{\text{cmax}} - P_{\text{cmin}}}{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}} k + \dots$$

$$\frac{G_{\max} * P_{\text{cmin}} - P_{\text{cmin}} * G_{\max}}{G_{\max} - G_{\min}}, \quad (10)$$

式中: P_{cmax} 为最大克隆概率; P_{cmin} 为最小克隆概率; G_{\max} 为最大迭代次数; G_{\min} 为最小迭代次数。

Step3 交叉变异: 根据公式(11)对抗体群 C 进行交叉操作, 得到抗体群 D;

$$P_h(k) = \frac{P_{\text{hmin}} - P_{\text{hmax}}k}{G_{\max} - G_{\min}} + \dots$$

$$\frac{G_{\max} * P_{\text{hmax}} - P_{\text{hmin}} * G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}}, \quad (11)$$

式中: P_{hmax} 为最大变异概率, P_{hmin} 为最小变异概率。

Step4 合并: 合并抗体群 A、D, 去掉高浓度抗体, 得抗体群 E。

Step5 募集新成员: 随机产生 k 个抗体, 代替抗体群 E 中亲和力较低的 k 个抗体, 得抗体群 F。

Step6 竞争: 将种群 A1、A2 进化获得的抗体群 F1、F2 相互竞争, 选择最优抗体。

Step7: 判断是否满足终止条件, 若未终止, 则交换 A1、A2 最优抗体, 转至 Step2。

3 仿真分析

8 批工件(P1~P8)在 8 个镀槽(M1~M2, M3.1~M3.3(并行工位)和 M4~M6)中加工, 行车带料移动速度 $v = 1 \text{ m/s}$, 相邻镀槽中心的距离 $l = 1 \text{ m}$, 行车取料、放料时间总和 $t_r = 3 \text{ s}$, 行车数目 $h = 1$ 辆, 最大完工时间加权系数 $\alpha = 0.3$, 惩罚因素加权系数 $\beta = 0.7$, 各批工件的工艺参数即在各镀槽中的加工时间如表 1 所示; 产品信息参数, 包括产品交货期 t (单位为 s) 以及其重要因子 ∂ (单位为 1) 如表 2 所示。

表 1 产品工艺参数

毛坯	工件在镀槽中的加工时间/s					
	M1	M2	M3.1~3.3	M4	M5	M6
P1	4	5	16	3	4	5
P2	6	3	8	6	3	5
P3	7	2	10	5	2	3
P4	4	6	9	6	2	5
P5	5	3	10	4	3	2
P6	6	2	14	3	2	2
P7	3	4	12	8	5	4
P8	3	2	17	7	4	6

表 2 产品信息参数

产品编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
t/s	130	110	90	100	120	70	140	50
∂	1	0.2	0.5	0.7	0.5	0.6	0.4	0.9

优化计算时, 取总群大小 $\text{Pop_Size} = 50$, 最大克隆概率 $P_{\text{cmax}} = 0.8$, 最小克隆概率 $P_{\text{cmin}} = 0.1$, 最大变异概率 $P_{\text{hmax}} = 0.8$, 最小变异概率 $P_{\text{hmin}} = 0.1$, 使用计算机环境为 Intel (R) Pentium (R) Dual T2390, Windows XP, 1.86GHz, 1G 内存, 用 matlab 仿真软件, 分别采用传统克隆算法和自适应克隆竞争算法求解模型, 各算法分别进行 20 次实验, 若不考虑惩罚因素, 得最优排序方式为 2-7-6-8-5-4-1-3, 最小完工加工时间 $t_{\text{总min}} = 119 \text{ s}$, 如图 2 所示; 同时考虑完工时间和惩罚因素, 得目标函数最优解 $f_{\text{best}} = 53.12$, 此时完工时间 $t_{\text{总}} = 138 \text{ s}$, 最优排序为 8-6-3-2-7-4-1-5, 如图 3 所示。

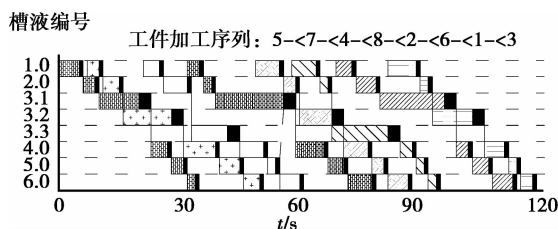


图 2 最小化最大加工时间调度甘特图

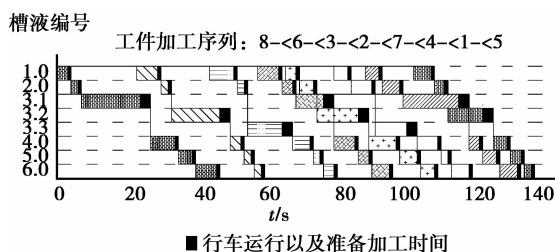


图 3 目标值最优解调度甘特图

传统克隆算法和自适应克隆竞争算法性能对比见表 3、图 4 和图 5。其中, G_{\max} 为最大迭代次数, 最小迭代次数 $G_{\min} = 1$, 最小化最大完工时间与惩罚因素的加权函数最大估计值 $E = 200$, \bar{f} 、 f_{best} 、 f_{wrost} 分别为目标值的平均值、最优值和最差值, S_2 为标准偏差, j^* 为寻优率。

表 3 ACCA 和 CSA 性能对比

G_{max}	\bar{f}		f_{best}		f_{wrost}		S_2		j^*	
	ACAC	CSA	ACAC	CSA	ACAC	CSA	ACAC	CSA	ACAC	CSA
30	53.06	51.79	53.12	53.12	52.97	49.37	0.076	1.09	0.6	0.1
50	53.07	52.48	53.12	53.12	52.97	51.01	0.072	0.74	0.7	0.2
100	53.08	52.82	53.12	53.12	52.97	51.17	0.06	0.62	0.8	0.6

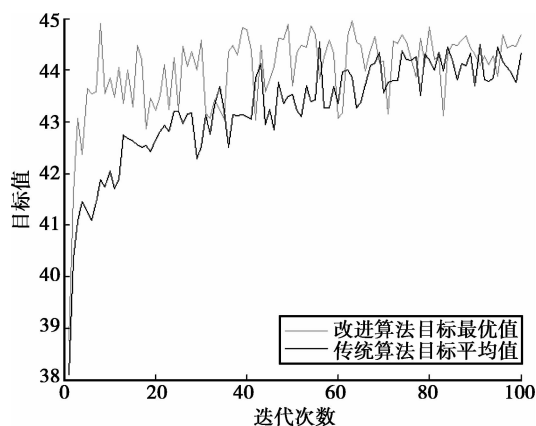


图 4 ACCA 和 CSA 分别求解目标函数平均值

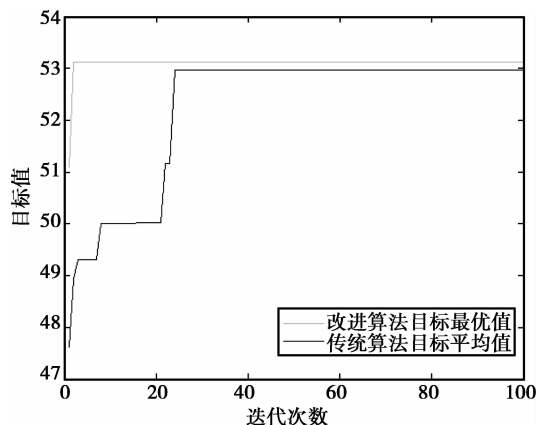


图 5 ACCA 和 CSA 分别求解目标函数最优值

4 结 论

笔者从企业实际生产情况出发,针对带并行工位的自动化电镀生产线工件与行车的调度问题,提出了自适应克隆竞争算法(ACCA),有效地平衡了搜索全局最优值和局部最优值的能力,通过仿真实验证实,选择适当的参数,ACCA 具有较高的收敛率和全局寻优能力,不仅有效地解决了该模型,同时对于多品种、小批量生产调度问题的求解以及对克隆算法的进一步研究具有参考价值。

参考文献:

- [1] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 改进免疫克隆算法的 Job Shop 调度[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(10): 61-67.
LIU Aijun, YANG Yu, XING Qingsong, et al. Job-shop scheduling based on improved immune cloning algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(10): 61-67.
- [2] Zhang R, Wu C. A hybrid immune simulated annealing algorithm for the job shop scheduling problem [J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(1): 79-89.
- [3] Eswaramurthy V P, Tamilarasi A. Tabu search strategies for solving job shop scheduling problems[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2007, 6(1): 59-75.
- [4] Zhang C Y, Rao Y Q, Li P G. An effective hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9/10): 965-974.
- [5] 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-qing. An approach of production scheduling and replanning in a steelmaking-continuous casting plant [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(7): 820-824.
- [6] Bagheri A, Zandieh M, Mahdavi I, et al. An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. Future Generation Computer Systems, 2010, 26(4): 533-541.
- [7] Luh G C, Chueh C H. A multi-modal immune algorithm for the job-shop scheduling problem [J]. Information Sciences, 2009, 179(10): 1516-1532.
- [8] 魏圆圆, 唐超礼, 黄友锐. 自适应克隆选择算法及其仿真研究 [J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(2): 202-207.
WEI Yuanyuan, TANG Chaoli, HUANG Yourui. Adaptive clonal selection algorithm and its simulation[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(2): 202-207.
- [9] 李敏强, 寇纪淞. 多模态函数优化的协同多群体遗传算法[J]. 自动化学报, 2002, 28(4): 497-504.

446-466.

- [8] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks [J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.
- [9] 胡良谋, 曹克强, 徐浩军, 等. 支持向量机故障诊断及控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [10] 姚富光, 钟先信. 一类支持向量机中引导式量子粒子群优化机理及实现[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(2): 108-112, 119.
- YAO Fuguang, ZHONG Xianxin. Mechanism and implementation of directional quantum-behaved particle swarm optimization in OC-SVM [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(2): 108-112, 119.
- [11] 屈梁生, 张西宁, 沈玉娣. 机械故障诊断理论与方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.
- [12] Bennett K P, Blue J A. A support vector machine approach to decision trees[C] // *Proceedings of the 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence/The 1998 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, May 4-9, 1998, Anchorage, AK. Piscataway: IEEE Press, 1998, 3: 2396-2401.
- [13] Fröhlich H, Chapelle O, Schölkopf B. Feature selection for support vector machines using genetic algorithm[J]. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 2004, 13(4): 791-800.
- [14] Wan V, Renals S. Speaker verification using sequence discriminant support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2005, 13(2): 203-210.
- [15] Howley T, Madden M G. The genetic kernel support vector machine: description and evaluation[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2005, 24(3/4): 379-395.
- [16] 黄扬帆, 张慧敏, 徐子航, 等. 基超球体支持向量机的不完全二叉树多类分类算法[J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(6): 125-128, 140.
- HUANG Yangfan, ZHANG Huimin, XU Zihang, et al. An incomplete binary tree SVM multi-class classification algorithm based on hypersphere[J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(6): 125-128, 140.

(编辑 张 苹)

(上接第 15 页)

- LI Minqiang, KOU Jisong. Coordinate multi-population genetic algorithms for multi-modal function optimization[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(4): 497-504.
- [10] Castro L N D, Zuben F J V. Learning and optimization using the clonal selection principle [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 239-251.
- [11] Castro L N D, Zuben F J V. The clonal selection algorithm with engineering applications[EB/OL]. [2011-11-17]. <http://wenku.baidu.com/view/ed1f630e76c66137ee0619e8.html>.
- [12] 杨志才. 化工生产中的间歇过程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [13] 田志锋, 尚宏利, 姚威. 自动化集成电镀生产线的生产调度问题[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学*, 2011, 25(6): 38-44.
- TIAN Zhifeng, SANG Hongli, YAO Wei. Schedule problem for automatic integrated electroplated product lines[J]. *Journal of Chongqing University Institute of Technology: Natural Science*, 2011, 25(6): 38-44.
- [14] 李富明, 朱云龙, 尹朝万, 等. 可变机器约束的模糊作业车间调度问题研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(2): 169-173, 197.
- LI Fuming, ZHU Yunlong, YIN Chaowan, et al. Research on fuzzy job shop scheduling with alternative machines [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(2): 169-173, 197.
- [15] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 多目标模糊柔性车间调度中的多种群遗传算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(9): 1954-1961.
- LIU Aijun, YANG Yu, XING Qingsong, et al. Multi-population genetic algorithm in multiobjective fuzzy and flexible job shop scheduling [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(9): 1954-1961.

(编辑 张 苹)