

11-20-2019

## Optimization for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Deteriorating Jobs

Xuan Hua

*1.School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;;*

Yingying Qin

*1.School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;;*

Xueyuan Wang

*1.School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;;*

Bailin Zhang

*2.Inspur Electronic Information Industry Co., Ltd, Ji'nan 250101, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Optimization for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Deteriorating Jobs

### Abstract

**Abstract:** Unrelated parallel machine scheduling problem with deteriorating jobs is studied with the objective of minimizing the maximum completion time. *The processing time of a job varies with its beginning time which is denoted as an increasing function of its starting time. It is assumed that each job has its own different deterioration rate on each machine. A mathematical programming model is formulated for the NP-hard problem. An improved genetic algorithm based on two segment coding and self-adaptive adjustment of genetic parameters is then designed to make job scheduling and machine allocation more reasonable.* Through the simulation experiments of different sized problems, the results show that the proposed algorithm has more advantages in both resolution time and solution quality.

### Keywords

maximum completion time, unrelated parallel machines scheduling, deteriorating jobs, two segment coding, self-adaptive strategy

### Recommended Citation

Xuan Hua, Qin Yingying, Wang Xueyuan, Zhang Bailin. Optimization for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Deteriorating Jobs[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 919-924.

## 带恶化工件的不相关并行机调度优化

轩华<sup>1</sup>, 秦莹莹<sup>1</sup>, 王薛苑<sup>1</sup>, 张百林<sup>2</sup>

(1. 郑州大学管理工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 浪潮电子信息产业股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 研究了以最小化最大完工时间为目标的不相关并行机环境下带恶化工件的车间调度问题, 工件的加工时间随着开始时间的不同而改变, 将其表示为开始时间的增函数, 假设每个工件在不同机器上有各自的恶化系数。针对该 NP-hard 问题, 建立数学规划模型, 设计基于两段式编码和遗传参数自适应调节策略的改进遗传算法以合理地进行工件排序及机器分配。通过测试不同规模问题的仿真实验, 对比结果表明所设计的算法在求解时间和求解质量上均具有较大优势。

**关键词:** 最大完工时间; 不相关并行机调度; 恶化工件; 两段式编码; 自适应策略

中图分类号: TP15;TB49;TN911 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 05-0919-06  
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0150

## Optimization for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Deteriorating Jobs

Xuan Hua<sup>1</sup>, Qin Yingying<sup>1</sup>, Wang Xueyuan<sup>1</sup>, Zhang Bailin<sup>2</sup>(1. School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Inspur Electronic Information Industry Co., Ltd, Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** Unrelated parallel machine scheduling problem with deteriorating jobs is studied with the objective of minimizing the maximum completion time. *The processing time of a job varies with its beginning time which is denoted as an increasing function of its starting time. It is assumed that each job has its own different deterioration rate on each machine. A mathematical programming model is formulated for the NP-hard problem. An improved genetic algorithm based on two segment coding and self-adaptive adjustment of genetic parameters is then designed to make job scheduling and machine allocation more reasonable.* Through the simulation experiments of different sized problems, the results show that the proposed algorithm has more advantages in both resolution time and solution quality.

**Keywords:** maximum completion time; unrelated parallel machines scheduling; deteriorating jobs; two segment coding; self-adaptive strategy

## 引言

并行机环境中, 一组功能相同的若干台机器设备, 工件加工时可在任意一台机器上进行加工, 其调度问题已广泛出现在各行业的加工生产中。无关

并行机调度问题 (Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem, UPMSP) 是并行机调度中常见的一类问题, 指同一工件在各并行机器上的加工时间互不相关, 主要取决于工件和机器的匹配程度。以往对该类问题的研究往往假设加工时间是已知的固定常数, 这显然和实际问题存在偏差。如钢铁业的热轧处理过程中, 板坯经过并行的多台加热炉加热到一定温度可到热轧机进行成型处理, 开始温度不同, 无论回炉再加热还是低温继续处理都会增



收稿日期: 2017-04-10 修回日期: 2017-07-09;  
基金项目: 国家自然科学基金(U1604150, U1804151),  
教育部人文社会科学研究(15YJC630148), 郑州大学  
优秀青年教师发展基金(1421326092), 河南省高等学  
校重点项目(17A520058);  
作者简介: 轩华(1979-), 女, 河南睢县, 博士, 教  
授, 研究方向为物流优化与控制等。

<http://www.china-simulation.com>

加其实际的加工时间。而板坯选择不同的加热炉,加热炉的内部结构、处理能力等方面的差异也会影响板坯的恶化加工时间,这正是 UPMSP 的一种应用。类似实例在半导体、塑料加工、物流运输、纺织品等行业普遍存在。机器设备加工能力不同,工件需要根据本身的物理性质和化学性质等因素选择合适的机器进行加工,因而恶化问题应当考虑与工件自身及机器都有关系的恶化情况。故本文考虑加工时间随着开始时间而恶化的 UPMSP。文献[1]已证明带恶化工件的 PMSP 是 NP-hard,因此,本文所研究问题也是 NP-hard。

并行机调度问题应用广泛,已取得一定的研究成果。为最小化 makespan,文献[2]研究了调整时间与顺序相关的等同并行机调度问题,建立了数学模型,采用遗传算法进行了求解;文献[3]考虑了依赖序列的设立时间和有工具限制的等同并行机调度,提出了自适应邻域搜索算法;文献[4]提出了基于信息熵的自适应分布估计算法以求解不相关并行机调度问题。为最小化总完工时间,文献[5]研究了加工时间不确定的同型并行机调度,基于最小最大遗憾准则建立了鲁棒调度模型。

带恶化工件的并行机调度问题已引起一些学者的关注。在等同并行机环境下,文献[6]考虑了带阶梯恶化工件的等同并行机调度,目标是 minimized makespan。文献[7]研究了带线性恶化的并行机调度问题,以最小化 makespan 对数为目标,提出了启发式算法,分析了最坏误差界。在其它并行机环境下,文献[8]考虑了带线性恶化和拒绝的一致并行机调度问题,以最小化所有工件的交付时间为目标,提出了多项式时间近似求解方法。文献[9]考虑了模糊环境下带工件恶化和学习效应的异构并行机调度问题,提出了分支定界算法以最小化总提前/延误和最大完工时间。

就求解上述问题的优化方法而言,自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)的运用较少。但 AGA 已广泛用于求解其它领域的问题。文献[10]提出了一种遗传参数自适应调节策略以解

决旅行商问题。文献[11]提出了改进交叉、变异的自适应遗传算法以求解作业车间调度问题。文献[12]提出了用启发式指导机器分配的文化基因算法求解了生产调度问题。

就目前所查阅的文献资料而言,对带恶化特征的并行机调度的探讨较少,既有的相关研究多假定恶化系数相同以简化所研究问题的复杂性;求解方法多采用启发式法,但启发式法选取规则不易确定,求解结果有待改进,本文则采用 GA 的迭代求解优势,针对所研究问题设计改进的遗传策略,进行自适应操作,不断寻得更优解。本文考虑到并行机器的差异,探究工件在各并行机器上具有各自不同恶化率的 UPMSP,设计基于两段式编码(Two-segment coding)的自适应遗传算法(以下简称 TCAGA)以有效求解该问题。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

$n$  个工件  $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  在  $m$  台不相关并行机器  $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  上选择合适的机器进行加工。每个工件的加工时间是和开始时间有关的增函数。对于机器  $j(j=1, 2, \dots, m)$  上排在第  $i(i=1, 2, \dots, n)$  个位置进行加工的工件,令其加工时间为  $\alpha_{ij}t_{ij}$ , 其中,  $\alpha_{ij}$  是机器  $j$  上第  $i$  个位置进行加工工件的恶化率,  $t_{ij}$  是机器  $j$  上第  $i$  个位置进行加工工件的开始时间,定义  $t_{ij} \geq t_0 \geq 1$ 。

为简化实际生产中的复杂约束,假设所有工件在  $t_0$  时刻都能开始加工,工件间无优先级。排在第  $i$  个位置的工件在机器  $j$  上的完工时间为  $t_{Cij}$ , 目标为最小化 makespan, 即确定每台机器上所加工工件的序列,满足在最佳排序下的完工时间最小以提高机器利用率。

### 1.2 数学模型

根据以上描述,将带恶化工件的 UPMSP 建立如下的数学规划模型:

$$\min t_{C_{\max}} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij}^h \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij}^h \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}^h \leq M_m \quad (4)$$

$$t_{Cij} + \alpha_{i+1,j} t_{i+1,j} \leq t_{Ci+1,j} \quad (5)$$

$$t_{ij} \geq t_0 \geq 1 \quad (6)$$

$$X_{ij}^h \in \{0, 1\}, t_{Cij} \geq 0 \quad (7)$$

目标函数(1)为使最大完工时间最小; 约束(2)是机器占用约束, 表示在时刻  $h$  一个工件最多使用一台机器进行加工; 约束(3)表示时刻  $h$  一台机器至多加工一个工件; 约束(4)是机器能力约束, 表示在时刻  $h$  正在加工的工件数不得超过此时可用的机器数  $M_m$ ; 约束(5)是加工时间约束; 约束(6)是开始加工时间约束; 约束(7)是决策变量的取值范围。

## 2 求解方法

GA 常以工件号为编码方式随机产生初始种群, 采用已知常数安排交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  等遗传参数, 但 PMS 必然需要考虑机器的分配问题, 故本文设计 TCAGA, 采用两段式编码方式, 同时考虑工件排序和机器分配问题, 并设计自适应策略改进遗传参数  $P_c$  和  $P_m$ , 扩展了 GA 的应用, 使其能更有效地求解 UPMSP。

### 2.1 两段式编码生成初始解

编码是求解问题的首要环节, 并行机调度不仅要考虑工件的加工顺序, 而且需要将机器分配考虑在内。故拓展文献[2], 采用两段式编码方式, 第一段编码长度为  $n$ , 对应染色体基因总数, 即  $n$  个工件的排列顺序,  $n$  条染色体表示为  $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , 第二段编码长度为  $m$ , 对应  $m$  台机器各自加工的工件个数。因此, 这  $m$  个正整数的数值之和为总工件数  $n$ , 即若  $m$  台机器上加工工件数依次为  $a, b, \dots, s$ , 则  $a+b+\dots+s=n$ , 其中  $a, b, s$  均在  $[1, n-m+1]$  区间范围内, 以满足无机器空

闲, 每个机器都被分配有工件在其上加工, 保证调度有可行解且无冗余解。以在 3 台机器上调度 5 个工件的编码为例, 如图 1 所示。

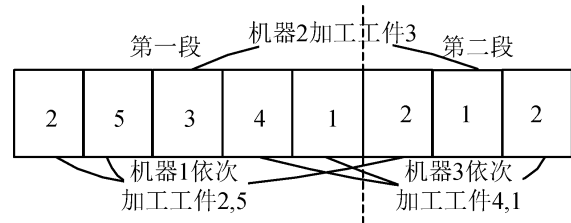


图 1 两段式编码示例  
Fig. 1 Two segment coding example

### 2.2 筛选解及精英保留

适应度函数采用目标函数的倒数形式, 即染色体  $x_i$  的适应度  $f(x_i)=1/t_{C \max}(x_i)$ 。选择操作选用轮盘赌选择方法, 被选中的概率

$$L(x_i) = f(x_i) / \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

为防止产生新个体的同时破坏已有的优良个体, 采用精英保留策略。第  $k$  代产生的  $n$  个个体为  $\{x_1(k), x_2(k), \dots, x_i(k), \dots, x_n(k)\}$ , 则第  $k$  代最优个体  $f_{\max}(k)=\max\{f(x_1(k)), f(x_2(k)), \dots, f(x_i(k)), \dots, f(x_n(k))\}$ , 第  $k+1$  代最优个体  $f_{\max}(k+1)=\max\{f(x_1(k+1)), f(x_2(k+1)), \dots, f(x_i(k+1)), \dots, f(x_n(k+1))\}$ 。若  $f_{\max}(k) > f_{\max}(k+1)$ , 则保留  $f_{\max}(k)$  作为第  $k+1$  代的适应度值。

### 2.3 自适应操作更新解

针对所研究问题, 采用自适应更新遗传算子的操作, 扩展文献[10-11]的研究, 对交叉、变异等调节策略进行调整以获得更好解。设计遗传算子使遗传参数自适应调节, 以在不同的迭代时期匹配合适的  $P_c$  值和  $P_m$  值, 从而更高效地求解所研究问题。令  $P_{ci}$  和  $P_{mi}$  分别表示个体实际的交叉概率、变异概率,  $f_i$  表示个体当前适应度值,  $f_{\max}$  和  $f_{\text{avg}}$  分别表示当前种群的最大适应度值和平均适应度值, 则遗传算子具体设置如下:

$$P_{c \max} = \begin{cases} 0.7, & g \leq D \\ 0.6, & D < g \leq 3D \\ 0.5, & 3D < g \leq 4D \end{cases}$$

$$P_{m \min} = \begin{cases} 0.009, & g \leq D \\ 0.01, & D < g \leq 3D \\ 0.03, & 3D < g \leq 4D \end{cases}$$

$$P_{ci} = \begin{cases} P_{c \max} - (g / G + f_i / (f_{\max} - f_{\text{avg}})) \\ (P_{c \max} - P_{c \min}), & f_i \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c \max}, & f_i < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

$$P_{mi} = \begin{cases} P_{m \min} + (g / G + f_i / (f_{\max} - f_{\text{avg}})) \\ (P_{m \max} - P_{m \min}), & f_i \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m \min}, & f_i < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

其中： $g$  表示当前迭代数； $G$  表示最大遗传代数； $D=G/4$ ， $P_{c \min}=0.4$ ， $P_{m \max}=0.05$ 。进而结合 GA 的部分匹配交叉操作和基本倒位变异操作求解所研究问题。由于两段式编码的特殊性，第一段和第二段都会影响结果，故将两段式编码记为整体，共同进行交叉操作和变异操作。

### 3 仿真实验

由于以往文献对类似问题的研究较少，且问题特征和目标也不相同，故本节仅对比了常规 GA 算法和所提出的 TCAGA 算法，以验证所提算法性能。这两种算法均在 CPU 2.20GHz，内存 4.00GB 的 Acer Travel Mate P446-MG 微机的 Matlab R2014a 上实现。

为确定算法参数的取值，依据文献[12]提供的种群规模、交叉概率、变异概率等取值设定，结合所研究的具体问题，通过多次试验测试，以确定最佳参数值的选取。参数设置如下：

- (1) 种群规模 80；
- (2) 传统 GA 中， $P_c$  取 0.65， $P_m$  取 0.01；
- (3) 恶化率  $\alpha_{ij}$  在区间[0.1, 0.9]上服从均匀分布，选取步长为 0.1 的[0.1, 0.4]，[0.6, 0.9]列在表中；
- (4) 随机产生正整数  $t_0$  满足[1, 5]上均匀分布；
- (5) 工件数  $n \in \{40, 70, 100, 130\}$ ；
- (6) 机器数  $m \in \{3, 4, 5\}$ 。

以迭代 300 代作为两种算法运行的停止条件。以 8 个工件，3 台机器的不相关并行机环境下的调度问题为例， $t_0$  设为 1，恶化率  $\alpha_{ij}$  在步长为 0.1 的

[0.1, 0.4]区间上随机产生，如表 1 所示，运行算法可得如图 2 所示的调度甘特图。最优调度时间是 1.716 s，最优调度顺序为：

- 机器 1：工件 7—工件 4；  
机器 2：工件 8—工件 3—工件 2；  
机器 3：工件 1—工件 5—工件 6。

表 1 恶化率取值  
Tab. 1 Deterioration rate settings

工件号	机器 1	机器 2	机器 3
1	0.4	0.4	0.2
2	0.4	0.4	0.4
3	0.1	0.1	0.4
4	0.4	0.4	0.4
5	0.3	0.4	0.3
6	0.1	0.2	0.1
7	0.2	0.4	0.4
8	0.3	0.1	0.4

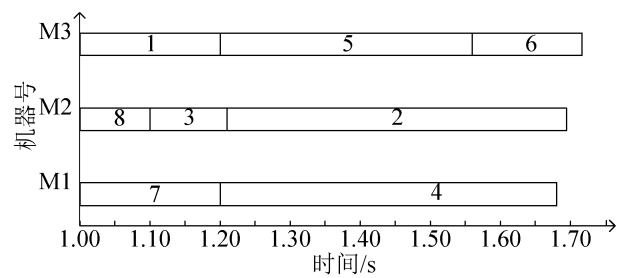


图 2 甘特图  
Fig. 2 Gantt chart

不同组合  $\{m, n, \alpha_{ij}\}$  会产生多种问题规模，每个规模产生 10 组实例，取平均值列在表 2 中，利用  $R=(GA-TCAGA)/TCAGA \times 100\%$  衡量改进率。分析表 2 中数据可得如下结论：

(1) 恶化率  $\alpha_{ij}$  越大，问题越复杂，求得的目标值越大。当工件数  $n$  和并行机数  $m$  不变时，随恶化率  $\alpha_{ij}$  的增大，TCAGA 对于 GA 的改进率逐渐增大，TCAGA 在求解质量和耗时上均优于 GA。

(2) 在同一恶化率区间，工件规模不变时，随并行机数的增多，目标值逐渐减小；TCAGA 能在略短的时间内求得更好的解。在同一恶化率区间，机器数不变时，随工件数的增多，问题逐渐复杂，求得的目标值随之增大。

(3) 随问题规模的增大, TCAGA 和 GA 所用时间的平均值分别是: 40 个工件时 5.714 6 s 和 6.602 1 s; 70 个工件时 6.704 2 s 和 7.249 1 s; 100 个工件时 7.326 9 s 和 8.116 8 s; 130 个工件时 7.970 9 s 和 8.965 5 s。由此可见, TCAGA 用时均少于 GA, TCAGA 能在更短时间内求得更好的解。

(4) 随问题规模的扩大, TCAGA 求解效率表现更佳。工件规模为 40 时, 平均改进率  $R$  为 24.941 2%;

工件规模为 70 时, 平均改进率  $R$  为 45.469 7%; 工件规模为 100 时, 平均改进率  $R$  为 58.964 4%; 工件规模为 130 时, 平均改进率  $R$  为 73.011 7%。因此, 对于 40, 70 个工件的中小规模问题时, 改进率已在 24% 以上, 对于 100, 130 个工件的大规模问题, 改进率高达 58% 以上。可见问题规模越大, TCAGA 求解优势越明显。

表 2 测试结果对比  
Tab. 2 Comparison of testing results

$n$	$m$	$\alpha_{ij}$	CPU/s		$\min t_{C_{\max}}$		$R/\%$
			GA	TCAGA	GA	TCAGA	
40	3	[0.1,0.4]	5.820 4	4.867 3	43.280 6	37.338 9	15.912 9
	3	[0.6,0.9]	5.687 8	4.751 8	5 711.20	4 262.05	34.001 2
	4	[0.1,0.4]	6.546 5	5.549 0	14.673 0	13.162 7	11.474 1
	4	[0.6,0.9]	6.692 4	6.084 1	411.793	314.582	30.901 6
	5	[0.1,0.4]	7.369 4	6.613 0	5.798 80	4.944 10	17.287 3
	5	[0.6,0.9]	7.495 8	6.422 6	165.591	118.220	40.070 2
70	3	[0.1,0.4]	6.250 9	5.368 0	138.750 7	118.871 6	16.723 2
	3	[0.6,0.9]	6.389 8	6.227 6	2 042 420	1 069 210	91.021 4
	4	[0.1,0.4]	7.229 0	6.778 3	63.436 9	54.793 2	15.775 1
	4	[0.6,0.9]	7.318 0	6.603 6	129 863	69 585	86.625 0
	5	[0.1,0.4]	8.024 7	7.226 0	60.135 8	47.925 7	25.477 1
	5	[0.6,0.9]	8.282 1	8.021 7	17 969.6	13 097.7	37.196 6
100	3	[0.1,0.4]	6.962 3	6.006 1	1 678.56	1 284.97	30.630 3
	3	[0.6,0.9]	7.441 2	6.910 9	$5.52 \times 10^8$	$3.11 \times 10^8$	77.492 0
	4	[0.1,0.4]	7.896 8	7.424 2	266.996 4	193.923 4	37.681 4
	4	[0.6,0.9]	8.098 1	7.154 3	5 140 250	2 713 810	89.410 8
	5	[0.1,0.4]	8.870 3	7.826 6	215.540 9	172.114 6	25.231 0
	5	[0.6,0.9]	9.431 9	8.639 4	792 248	409 767	93.341 1
130	3	[0.1,0.4]	7.740 8	6.588 0	26 549.5	16 056.5	65.350 5
	3	[0.6,0.9]	8.254 1	7.520 9	$1.6 \times 10^{11}$	$8.9 \times 10^{10}$	79.775 3
	4	[0.1,0.4]	8.684 6	7.998 2	1 515.06	859.966 8	76.176 6
	4	[0.6,0.9]	9.825 1	9.299 3	$5.2 \times 10^8$	$2.8 \times 10^8$	85.714 3
	5	[0.1,0.4]	9.591 0	8.357 0	834.609 2	521.476 6	60.047 3
	5	[0.6,0.9]	9.697 1	8.062 2	$2.89 \times 10^7$	$1.69 \times 10^7$	71.005 9

## 4 结论

本文研究了带恶化工件的不相关并行机调度优化问题, 考虑了不同工件在不同机器上有不同的恶化率。以最小化最大完工时间为目标, 建立了数学规划模型, 设计两段式编码方式及遗传参数自适

应调节的改进遗传算法, 从而保证种群的多样性, 提高全局搜索能力, 以更有效地求解这类复杂的 NP-hard 问题。通过仿真实验和算法对比, 结果表明了所提算法的可行性和优越性。进一步的研究可探讨带恶化特征的更复杂机器环境的调度问题以及拓展 TCAGA 的应用。

## 参考文献:

- [1] Ji M, Cheng T C E. Parallel-machine scheduling of simple linear deteriorating jobs[J]. Theoretical Computer Science(S0304-3975), 2009, 410: 3761-3768.
- [2] 胡大勇, 姚振强. 调整时间与顺序相关的等同并行机调度[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 160-165.  
Hu Dayong, Yao Zhenqiang. Identical parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 160-165.
- [3] Beezão A C, Cordeau J F, Laporte G, et al. Scheduling identical parallel machines with tooling constraints[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2017, 257(3): 834-844.
- [4] 吴楚格, 王凌, 郑晓龙. 求解不相关并行机调度的一种自适应分布估计算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(12): 2177-2182.  
Wu Chuge, Wang Ling, Zheng Xiaolong. An adaptive estimation of distribution algorithm for solving the unrelated parallel machine scheduling[J]. Control and Decision, 2016, 31(12): 2177-2182.
- [5] 许晓晴, 崔文田, 林军, 等. 基于最小最大遗憾的同型并行机鲁棒调度模型[J]. 系统工程学报, 2013, 28(6): 729-737.  
Xu Xiaoqing, Cui Wentian, Lin Jun, et al. Robust identical parallel machines scheduling model based on min-max regret criterion[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(6): 729-737.
- [6] Eduardo L R, Stefan V. Modeling the parallel machine scheduling problem with step deteriorating jobs[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2016, 255(1): 21-33.
- [7] Wang X Y, Zhou Z L, Ji P, et al. Parallel machines scheduling with simple linear job deterioration and non-simultaneous machine available times[J]. Computers and Industrial Engineering (S0360-8352), 2014, 74: 88-91.
- [8] Zhang Q, Luo C X. Uniform parallel-machine scheduling with deteriorating jobs and rejection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644/650: 2030-2033.
- [9] Rostami M, Pilerood A E, Mazdeh M M. Multi-objective parallel machine scheduling problem with job deterioration and learning effect under fuzzy environment [J]. Computers and Industrial Engineering(S0360-8352), 2015, 85: 206-215.
- [10] 于莹莹, 陈燕, 李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1483-1488.  
Yu Yingying, Chen Yan, Li Taoying. Improved genetic algorithm for solving TSP[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1483-1488.
- [11] Liu M H, Peng X F. Improved adaptive genetic algorithms for job shop scheduling problems[J]. Advanced Materials Research(S0363-7425), 2010, 97/101: 2473-2476.
- [12] 李玲, 唐秋华, 张利平. 文化基因算法求解多工艺路线炼钢-连铸生产调度问题[J]. 武汉科技大学学报, 2017, 40(1): 17-22.  
Li Ling, Tang Qiuhua, Zhang Liping. Memetic algorithm for steelmaking-continuous casting production scheduling with multiple process routes[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2017, 40(1): 17-22.