

多品种小批量订单型企业生产调度优化

刘晨, 蒙丹花, 方玮宸, 周清华
(桂林电子科技大学, 桂林 541004)

摘要: **目的** 研究多品种小批量订单型企业的生产调度优化问题, **方法** 针对 S 公司的生产现状, 应用遗传算法思想设计调度优化方案, 采用不等长矩阵的编码方式实现订单的批量生产及车间排产的方案。**结果** 通过仿真分析和 S 公司生产调度的实际应用, 验证了该算法的可行性及有效性。**结论** 基于遗传算法的调度优化算法实现了多品种小批量流程型生产企业生产调度优化, 达到了缩短生产周期、有效利用生产资源的目的。

关键词: 生产调度; 遗传算法; 系统仿真; 多品种小批量

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0093-07

Production Scheduling Optimization of Enterprises with Multi-varieties and Small-batch Orders

LIU Chen, MENG Dan-hua, FANG Wei-chen, ZHOU Qing-hua
(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: This work aimed to study the production scheduling optimization problem of enterprises orienting multi-varieties and small-batch orders. In view of the production status of company S, a scheduling optimization scheme was designed with genetic algorithm, using unequal length encoding matrix to accomplish the scheme of mass production and the scheduling of the workshop order. Through simulation analysis and actual trial of company S, the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm were verified. The scheduling algorithm, which indeed realized the scheduling optimization of enterprises based on genetic algorithm, achieved the aim of shortening the production cycle and effectively utilizing production resource.

KEY WORDS: production scheduling; genetic algorithm; system simulation; multi-varieties and small-batch

随着市场竞争日益激烈, 顾客个性化需求凸显, 企业也将目光转向多品种小批量订单生产组织方式, 即面向订单的生产模式(MTO)。这种生产模式在满足客户需求的同时, 也带来了生产调度的难题, 如何在一定时间内, 分配有限的资源, 对生产任务进行统筹安排, 成为企业生产的重要决策问题。车间作业调度问题(JSSP)属于 NP 难问题, 而多品种小批量生产模式的调度优化问题属于随机 JSSP, 它增

添了工序加工时间的不确定因素, 难以准确解决, 且研究较少, 却更加贴近现实生产的需要, 具有更大的现实意义与实际价值^[1]。考虑到多品种小批量生产系统约束繁多且具有动态不确定性, 采用启发式遗传算法能够较好地解决此类问题。文中结合 S 公司的生产实际, 采用矩阵编码方法, 设计一种更切合实际的有效调度算法, 实现调度的优化。

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家级大学生创新训练计划(201410595022)

作者简介: 刘晨(1993—), 女, 河北邯郸人, 桂林电子科技大学本科生, 主攻工业工程。

通讯作者: 周清华(1969—), 男, 湖南江华人, 硕士, 桂林电子科技大学副教授, 主要研究方向为工业工程、机械设计与制造工程等。

1 生产调度问题的算法

随着研究的深入,车间调度问题的求解算法主要有以下3类^[2]:经典最优化方法,如数学规划方法,通常基于枚举思想对调度问题求最优解,应用最多的有分支定界法和拉式松弛法;启发式规则方法,如最短加工时间(SPT)、剩余工序最多(EDD)等^[3],这些方法针对问题的NP特性,以某种规则减小计算量较快地得到该规则下的近似满意解,在现实应用中较多;智能计算方法,随着计算机处理速度的提高,各种智能计算方法快速发展起来,如人工神经网络优化(NN)、模拟退火法、禁忌搜索法、遗传算法(GA)等。其中遗传算法的基本思想来源于分子遗传学和生物进化论,是模仿生物群体整个进化过程的一种优化算法,给出一组初始解作为一个群体,通过选择、交叉以及变异等遗传操作来寻找最优解。

由于GA的通用性,编码技术操作简单,优化不受限制性条件的约束,计算性能和全局搜索能力优良,且有隐含并行性^[4],因此文中采用GA的方法进行调度优化。

2 S公司生产调度现状分析

S公司是一家股份制小型印刷企业,主要业务涉及包装产品设计、印刷和包装盒制造,公司产品类型有:外包装箱、手提袋、精品礼盒及宣传页,其中外包装箱订单量最大。各类产品对应的生产工艺流程如下所述。

1) 外包装箱:切纸→印刷→选页→覆膜→烫金→压纹→压盒→排废→人工(贴透明片、加底纸粘盒、打包)。

2) 手提袋:切纸→印刷→选页→覆膜→烫金→压纹→压盒→排废→人工(封底、穿绳、打包)。

3) 精品礼盒:切纸→印刷→选页→覆膜→烫金→压纹→压盒→排废→流水线。

4) 宣传页:切纸→印刷→选页→覆膜→烫金→压纹→压盒→排废→打包。

该公司生产车间现有一线车间员工30人,切纸机、印刷机、烫金等半自动设备共计20台,车间6个,涉及10多道工序。日常生产中,由于不同客户对产品的要求不尽相同,因此产品的生产重复率较低,各工序的加工时间相异,并且不同订单还存在交付时间、订购批量的差异。公司在生产调度管理中主要通过生产通知单进行控制。由于前段工序生

产批量较大,因此调度规则是前段一般由员工自主按照FCFS(first come first served)规则自行作业,而后段人工工序(生产的瓶颈环节)则由车间主管根据生产进度和交单日期的紧急程度,进行安排,即采用EDD规则进行作业安排。这样在实际生产中,会出现前段工序经常性空闲,而后续工序超过正常生产能力,实际按时交单率仅达约50%。生产调度整体无序,导致生产过程节奏性、均匀性差,各工序忙闲不一,存在窝工现象;生产成本低,经常性加班加点,易出现批量不合格现象;服务水平低,经常不能按时交单,影响企业信誉。由此可见,优化生产调度是企业急需解决的问题。

3 基于遗传算法的生产调度建模

3.1 问题描述

S公司生产调度是 x 个订单 $\{D_1, \dots, D_x\}$ 在 j 个工序间加工,工序的顺序是固定的,且订单的工艺要求预先已确定,每个加工工序中有 N_j 台功能相同且性能相同或相近的机器或员工,每个订单按批量分为任务项在各工序间分解进行,而各个任务在各工序中由任一机器或员工进行加工作业,各个任务的加工时间随订单的工艺要求和工序的不同而不同,调度的主要目标在于合理安排各个订单的分批任务在各车间中各机器或员工的任务顺序,使得完成所有订单的流程时间最短,即一次排产中总流程时间最小化的问题,提高按时交单率^[6]。

3.2 模型的建立

S公司属于典型的离散、混合流程型制造过程,其生产调度问题是随机车间作业调度,调度目标追求按时交单率,并力图降低在制品库存,减少总的流程时间,即属于要求总流程时间最小化的车间调度问题。为了便于建立调度问题模型,设置如下假设^[7]。

1) 各订单加工工艺预先已知、工序间流程顺序固定,每道工序必须在它之前所有工艺要求工序加工生产完毕后再加工^[1],且工序转换时间较短。

2) 各订单有1种产品需求,当1个订单不止有1种产品时,将之拆分成多个订单,使得每个订单只有1种产品,此时,可假设同一订单产品种类唯一^[6]。

3) 订单按批量进行生产,即按批量分解为各项任务,而订单在机加工工序和人工加工工序的生产批量不同,但同一工序中订单的分批任务互不影响。

4) 以 1 台机器或 1 位员工作为作业单元进行调度。

5) 每台机器或每位员工每一时刻只能做 1 项任务, 且 1 项任务每一时刻只能由 1 台机器或被 1 名员工加工^[8]。

6) 同一工序的各台机器和员工完全或近似相同, 且无优先关系, 每种机器只能完成 1 道加工任务。

7) 加工过程中采取顺序方式移动, 即任务的上一道工序完成后立即送到指定位置, 等待下一道工序。

8) 假定生产前, 所需原材料及消耗性材料齐全。不考虑交单时间限制和插单情况, 且订单的重要程度相同。

9) 各工作单元日工作负荷不超过其正常负荷能力, 即 8 h/d。

下面建立该调度问题的数学模型, 单目标总流程时间的指标, 目标函数:

$$\min T_n = \min \{ \max \{ t_{nj} \} \}, 1 \leq n \leq p_s, 1 \leq j \leq n_{\text{sum}}$$

式中: T_n 表示调度 n 总流程时间; t_{nj} 表示调度 n 中机器 j 的最早完工时间; n, j 分别表示加工的调度序号和机器序号; p_s 表示种群大小; n_{sum} 为机器总数。

约束条件:

$$1) \text{ 产品数量约束: } \sum_{k=1}^n n_j^{ik} \geq n_i$$

式中: n_j^{ik} 代表订单 i 的第 k 项任务在工序 j 完成的数量; n_i 代表订单 i 的订单数量要求 (已知量)。

$$2) \text{ 机器约束: } \sum_{t=t_0}^{t_0+t_k} V_j^{tk} = 0$$

式中: V_j^{tk} 为 0-1 变量, $V_j^{tk} = 0$, 代表任务 k 可占用机器 j 的时间片段 t , $V_j^{tk} = 1$, 表示机器 j 的时间片段 t 已被占用, 不可被调用; t_0 表示最早开工时间; t_k 为任务 k 的作业持续时间。

$$3) \text{ 工序约束: } n_{j-1}^i \geq n_j^i$$

式中: n_j^i 代表第 t 个时间片段订单 i 在工序 j 已完成的数量。

3.3 算法主要步骤

3.3.1 染色体编码设计

对于混合流程型车间调度问题, 有多种编码方式, 文中采用基于位置的矩阵编码方式, 具体如下所述。

1) 初始产生并进行操作的矩阵 (种群), 矩阵行代表染色体, 对应一组可行的调度方案。

2) 染色体的长度为所有进入排程的订单按相应生产批量分解成任务项后, 各工序的所有任务项的总和数。

3) 染色体中的所有数据项按先工序再订单号的规则依次顺排, 即第 1 工序上第 1 个订单排定全部批次后再排下一订单, 直到所有订单全部完成第 1 工序的安排, 再进行下一工序。

4) 单个数据项 (基因) 为具有 1 位小数的浮点数, 代表了该任务的调度操作。如, 位于染色体首位的数字 2.3 意味着: 订单 1 的第 1 批次任务在第 1 工序的 2 号机器上作业, 且优先级为 3^[9]。

3.3.2 生成初始种群

初始种群对算法的全局搜索能力有很大的作用, 为保证算法的良好运行, 采用随机的方式生成。此外, 引入均匀种群的概念, 初始矩阵的最后 2 行 (可行解) 由各个任务顺、逆次调度构成, 即各工序的所有生产任务依次 (顺序和逆序) 安排在该工序机器组中的所有机器上。另外, 采用条件新增的方式增强多样性、避免早熟现象^[10]。

3.3.3 解码操作^[11]

各染色体的解码过程: 首先把染色体转变成 1 个有序的工序任务表, 然后根据该工序任务表、随机优先级数、工艺约束和批量约束对各个操作以最早允许加工时间逐个进行作业, 从而产生对应的调度方案, 其算法操作如下所述。

1) 令 $z=1$, Chrom 为种群存放的数组, C_{nz} 表示该数组第 n 行的第 z 个元素, 即第 n 个可行调度的第 z 个操作。取出第 n 行的所有元素, 按工序分行存放在数组 Group 中, 构成第 n 个可行调度的不等长调度矩阵。

2) 根据工序号获得该工序各订单的加工批量, 再根据订单批量和生产批量取出将在第 1 个工序加工的所有任务对应的基因, 取出 Group 中对应的行元素并存放在数组 Temp 中。

3) 对 Temp 中的所有基因按从大到小的顺序重新排序, 并将排序后各个基因对应的原先的订单号记录下来。

4) 按数组 Temp 中基因的顺序依次安排各个任务, 查找数组 Data 和数组 Part 以限定机器和工序的约束, 找到最佳插入时刻的位置, 即最早开始时间, 并将机器占用情况和订单出产情况分别记录在数组 Data 和数组 Part 中。

5) 同理, 进行下一工序的取数和安排。返回第 2 步。

6) 当完成 1 个可行调度, 即取完 1 行 Chrom 的元素后, 找到记录机器占用情况的数组 Data 寻找最晚停工的机器对应的时间, 并记录在数组 FlowTime 的第 n 个元素中, 即表示该可行调度对应的流程时间。

7) 进行下一个可行调度的解码, 返回第 1 步。

3.3.4 适应度函数设计

适应度函数 (Fitness, 记 F_n) 作为判断个体优劣的依据, 会直接影响遗传算法的收敛效率与效果, 对整个寻优过程有着至关重要的作用。在此选用直接选取法, 且利用排序算法避免适应度值取为负数的情况。

$$F_n = \max_{j=0}^{n_{\text{sum}}} \{t_{nj}\}, 1 \leq n \leq p_s$$

3.3.5 交叉操作及变异操作^[12]

常用的交叉算子有单点交叉、两点与多点交叉、均匀交叉等, 常用的变异方法有基本位变异、均匀变异、边界变异等, 文中采用单点交叉算子和基本位变异。

3.3.6 选择操作

常用的方法有: 适应度比例选择、排序选择、保留最佳个体选择等。文中采用精英保留 (即将一定数量的最佳个体直接复制到下一代) 及适应度比例 (记 P_i) 选择^[13], 并依据目标函数值的排序实现目标的最小化。

$$P_i = \left\{ \left(\frac{\sum_{j=1}^{P_s} F_j - F_i}{\sum_{j=1}^{P_s} F_j} \right) / (P_s - 1) \right\} / \sum_{j=1}^{P_s} F_j, 1 \leq i \leq G_{\text{max}}$$

式中: G_{max} 代表最大世代数。

4 生产调度仿真与优化分析

采用 Visual Studio 软件对上述调度优化的遗传算法进行实现, 下面以 S 公司实际订单的生产调度仿真对上述调度算法进行分析验证该调度系统的可行性。其中订单根据生产实际确定加工批量, 即按各工序中转运批量 (以瓶颈环节的转运批量确定, 且能被需求数量整除) 确定最小任务单元, 以此为调度分配的最小因子。例如, 表 1 中的 1 号订单, 由于客户需求, 该产品的工艺路线为: 切纸→印刷→选页→覆膜→对裱→压盒→排废→人工工序 (贴透明片、粘盒、打包), 其生产相关的批量信息见表 1。为使生产连续性较好, 必须确定均衡且合理的转

运批量, 以免加重人工工序的生产压力。由于机加工和人工加工工艺差别较大, 机加工存在最小加工批量 100 (考虑印刷工序的转换成本), 人工加工最大加工批量 300 的限制 (生产实际情况)。流程划分为 2 个阶段, 因此订单 1 的机加工批量为 100~1800, 人工加工批量 100~300, 具体批量通过仿真寻优确定可接受的优化调度。

表 1 1 号订单的生产相关批量信息

Tab.1 Batch Processing Information of Order No1

生产工序	最大日产能	最大转运批量	最小转运批量
切纸	45 000	1800	800
印刷	32 000	1800	800
选页	36 000	1800	800
覆膜	32 000	1500	800
对裱	7500	1500	500
压盒	7000	1500	500
排废	32 000	1500	100
人工工序	30 000	300	100

取 2015 年某满负荷周次订单需求, 订单信息及批量设定见表 2 (其中订单 6 和 7 的工艺要求中无人工环节, 因此无人工加工批量)。此外, 由于优化追求总流程时间最短, 算法以 6 个工作日为调度对象, 将订单按转运批量划分为多项任务, 最大限度地考虑转化成本、生产能力及生产实际后。将这些任务按相关约束尽早安排在工作日的时间片段中, 以确定各工序执行各项任务的先后次序。在流程时间最优后, 再确定日工作任务。

表 2 原始订单信息及批量设定

Tab.2 Original Order Information and Batch Processing Setting

产品信息	订单信息		批量设定	
	订单号	需求数量	机加工批量	人工加工批量
兴安提子包装盒	1	3000	1500	300
陈双贵相框盒-1	2	1000	1000	200
陈双贵相框盒-2	3	2000	1000	200
伊卓手提盒	4	8000	1000	200
大河丰水梨手提盒	5	4600	2300	200
名坊香芋酥	6	3600	1200	—
清泉酒业 12 瓶装纸箱	7	20 000	1000	—
桂花酒手提袋	8	5000	1000	200

因客户对产品的要求存在差异, 不同订单要求的材质、大小、形状等都不同, 重复性低, 生产时间也存在差异, 生产类型是多品种。由此, 实际加

工时间的测定尤为重要,仿真中以 0.1 h 为时间单位。各订单在各工序的批量加工时间采用秒表测量法测定,且测量时考虑加工前准备时间、加工过程中的拿放时间及调整时间、加工前后搬运时间及废品余

量^[14]。由于不同产品工艺不同,因此当不需要经过某个工序时将该工序批量加工时间计为 0^[15]。经实际测定的批量加工时间见表 3。

表 3 批量加工时间测定结果
Tab.3 Time measurement results table

订单号	切纸	印刷	选页	覆膜	烫金(银)	对裱	压盒	排废	打包	人工工序
1	0.2	0.4	0.6	0.4	0	2	1.9	0.4	0	0.5
2	0.2	0.2	0.4	0	0	0	1.2	1.1	0	1.7
3	0.2	0.2	0.3	0	0	0	1	0.4	0	0.4
4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.8	0	0.8	0.1	0	2
5	0.2	0.5	1	0	0	3.2	2.4	0.3	0	0.8
6	0.1	0.3	0.7	0.2	0	0	1.6	0.2	2.3	0
7	0.1	0.2	0.3	0.3	0	1.7	1.2	1.1	0.6	0
8	0.1	0.2	0.5	0.3	0	0	1	0.7	0	2.8

设定公司基本情况:10 个工序,各工序机器数分别为 1, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 2, 2, 8; 设定订单信息,包括批量和批量加工时间;设定算法参数,

种群大小 $p_s=20$, 最大世代数 $G_{max}=100$, 交叉概率 $P_c=0.6$, 变异概率 $P_m=0.05$ 。优化后调度安排情况见表 4, 优化前后甘特图对比情况分别见图 1。

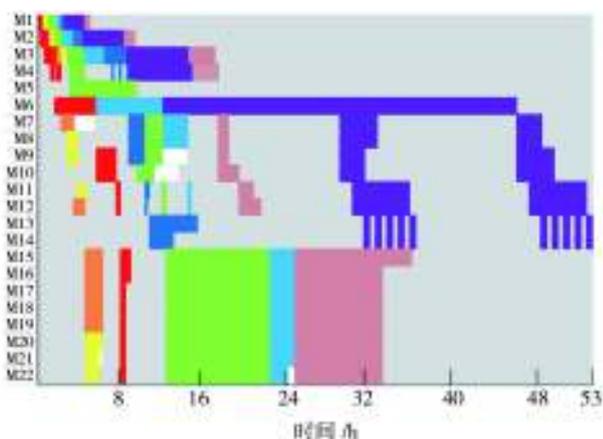
表 4 仿真调度安排
Tab.4 Simulation scheduling table

工序	序号	利用率/%	任务顺序(括号内为批次)
切纸	M1	10.33	4(2)-7(2)-8-3-4-6-7(2)-8-3-4(2)-7(2)-8-6-7(3)-4-5-7-8-7(3)-1-4-7(3)-8-2-4-7-1-5-6-7(3)
印刷	M2	18.80	4-7(2)-8-4-7(2)-8-3-7-4-7(2)-4-5-3-1-7-4-6-4-1-6-7(2)-2-7(3)-8-4-6-7(3)-8-4-5-7(4)-8
选页	M3	33.88	4-7-4-7(2)-3-4-7-8-7(2)-1-6-5-7-8(2)-4-6-5-7(2)-1-4(3)-6-7(5)-4-7-8-2-7(3)-8-3-7(2)
覆膜	M4	20.04	7(4)-4(2)-8-7(2)-1-7-4-8-6-4-8-7(2)-6-4-6-7(4)-1-4(2)-7-4-8-7(4)-8-7(2)
烫金(银)	M5	13.22	4(8)
对裱	M6	91.74	7(3)-1-7(2)-5-7(4)-1-7(4)-5-7(7)
压盒	M7	31.61	6-4(2)-8-2-4-1-7(6)
压盒	M8	25.21	4-6-4-7-4-8-7(5)
压盒	M9	24.59	4-8-1-7-3-7(3)-5
压盒	M10	26.03	7-3-4-7-8-7-8-6-7-5
排废	M11	39.26	8(2)-4-6-7-6-7(2)-8-7-4-1-4-7-7-4-7-5-7(7)
排废	M12	23.14	3-7(2)-8-4(2)-7(3)-4-8-5-1-4-3-6-2-7
打包	M13	21.90	6-7(3)-6-7(7)
打包	M14	17.15	7(9)-6-7
人工工序	M15	46.69	8-1-2-3-4(5)-5(2)-8(2)
人工工序	M16	49.79	8(3)-4-1-4(2)-3-5(3)-4-8-5(2)
人工工序	M17	51.65	8(3)-4(2)-2-3-4-5-4(2)-2-4
人工工序	M18	35.95	3-4(2)-8-2-1-8-4-5(4)
人工工序	M19	48.55	8-3-4-5-1-5-8-5-3-4-1-4-1-5-8-5-8-
人工工序	M20	45.45	3-8(2)-3(2)-5-1-4-5(2)-1(2)-4-8-1-4(2)
人工工序	M21	48.76	3-8(2)-4(2)-8-4(4)-8
人工工序	M22	57.23	4(4)-5(2)-2-4(3)-8(2)-5-4(2)

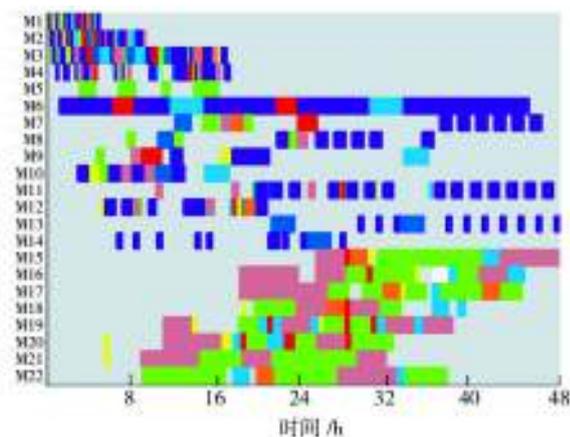
对比 2 个甘特图的调度结果,现行 FCFS 调度(图 1a)总流程时间约为 53 h, 优化后调度(图 1b)总

流程时间约为 48 h, 优化后可节省流程时间约 10%; 从生产均衡性来看, 优化后工序负荷更为均衡, 资

源利用率相应提高。企业根据实际情况,以优化调度计划为指导,结合调度工序资源的占用情况,灵活调度人员,取得了良好的效果。



a 优化前



b 优化后

图1 优化前后调度甘特图

Fig1 The scheduling G chart before and after optimization

5 结语

根据包装盒加工流程和多品种产品的生产,提出了基于遗传算法的调度优化算法,运用随机和均匀种群的思想生成初始种群,条件生成的方式增强种群多样性,以提高搜索效率和收敛速度,并在调度规则中模拟现实生产情况引入了批量,最终建立了一类混合流程型礼盒生产产品的基于遗传算法的调度系统。通过仿真实验和实际应用,验证了算法的有效性,实现多品种小批量流程型生产企业生产调度的优化安排,达到缩短生产周期、有效利用生产资源的目的,且该系统的可靠性依靠时间的输入数据的真实性,能够极大地发挥人的作用,具有一定的实用价值,但也存在由于维数的增多导致算法

效率下降的不足。

参考文献:

- [1] 于晓义, 孙树栋, 王彦革. 基于扩展遗传算法的随机车间作业调度[EB/OL]. 中国科技论文在线. 2008-03-13. YU Xiao-yi, SUN Shu-dong, WANG Yan-ge. Improved Genetic Algorithm for Solving Stochastic Job-shop Scheduling Problems[EB/OL]. Science Paper Online. 2008-03-13.
- [2] 王超. 基于遗传算法的产品装配生产调度优化研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005. WANG Chao. Research on the Optimization of Product Assembly Scheduling Based on Genetic Algorithm[D]. Wuhan:Wuhan University, 2005.
- [3] 张洪业. 订单式生产企业生产调度优化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007. ZHANG Hong-ye. Study on Production Scheduling Optimization for Make-to-order Enterprise[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2007.
- [4] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10):2911—2916. GE Ji-ke, QIU Yu-hui, WU Chun-ming, et al. Genetic Algorithm Research Review[J]. Computer Application Research, 2008, 25(10):2911—2916.
- [5] 夏正喜. JZIC公司生产调度优化研究[D]. 南昌:南昌大学, 2012. XIA Zheng-xi. On Production Scheduling Optimization in JZIC[D]. Nanchang:Nanchang University, 2012.
- [6] 陈伟, 周俊. 基于遗传算法的纺纱生产调度研究[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(6):123—125. CHEN Wei, ZHOU Jun. Spinning Production Scheduling Research Based on Genetic Algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(6):123—125.
- [7] 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7):145—151. ZHANG Guo-hui, GAO Liang, LI Pei-gen, et al. Improved Genetic Algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7):145—151.
- [8] 袁波, 应保胜, 谢皓. 基于遗传算法的不确定条件下作业车间调度[J]. 现代制造工程, 2012(10):52—56. YUANG Bo, YING Bao-sheng, XIE Hao. Job Shop Scheduling under Uncertain Environment Based on Genetic Algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(10):52—56.
- [9] 陈宇航. 典型制造车间生产调度优化方法的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011. CHEN Yu-hang. Research on Optimization Method of Production Scheduling in Typical Manufacturing Shops [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2011.
- [10] 马永杰. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4):1201—1210. MA Yong-jie. Research Progress of Genetic Algorithm[J].

- Computer Application Research, 2012, 29(4):1201—1210.
- [11] 潘全科, 孙志俊, 朱剑英. 基于遗传算法的作业车间调度优化[J]. 信息与控制, 2002, 31(3):216—218.
PAN Quan-ke, SUN Zhi-jun, ZHU Jian-ying. An Intelligent Scheduling Optimization of Job-shop with Alternative Machines[J]. Information and Control, 2002, 31(3): 216—218.
- [12] 赵建峰, 朱晓春, 汪木兰, 等. 基于遗传算法柔性制造系统生产调度的优化与仿真[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5):156—178.
ZHAO Jian-feng, ZHU Xiao-chun, WANG Mu-lan, et al. Optimization and Simulation of Production Scheduling of Flexible Manufacturing System Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Manufacturing Automation, 2010, 32(5):156—178.
- [13] 蓝发超, 王洪. 基于Matlab的遗传算法程序设计[J]. 广西物理, 2008, 29(1):32—34.
LAN Fa-chao, WANG Hong. Design Based on Matlab Genetic Algorithm[J]. Guangxi Physics, 2008, 29(1):32—34.
- [14] 张颀颖, 王辛玥, 肖佩. 基于遗传算法的变压器生产调度建模及优化[J]. 物流工程与管理, 2014, 36(4):127—129.
ZHANG Yi-ying, WANG Xin-yue, XIAO Pei. Modeling and Optimization of Transformer Production Scheduling Based on Genetic Algorithm[J]. Logistics Engineering and Management, 2014, 36(4):127—129.
- [15] 刘建华, 王万良. 基于遗传算法的企业生产调度系统仿真[J]. 职业, 2012, 33:106.
LIU Jian-hua, WANG Wan-liang. Enterprise Production Scheduling System Based on Genetic Algorithm and Simulation[J]. Occupation, 2012, 33:106.