

考虑倒垛因素的轧制计划编制方法

董广静^{1,2}, 李铁克^{1,2}, 王柏琳^{1,2}, 单刚刚³

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083; 2. 钢铁生产制造执行系统技术教育部工程研究中心, 北京 100083; 3. 河北大学 管理学院, 河北 保定 071002)

摘要: 在给定粗轧制计划的基础上考虑钢坯库倒垛优化, 编制详细的轧制计划; 建立以最小化轧制计划内钢坯出库总倒垛次数与轧制单元之间切换机架次数为目标的多目标整数规划模型; 针对模型特征, 设计一种基于钢坯匹配的单亲遗传算法. 通过基于实际生产数据的实验验证, 相对于传统的手工计算方法, 所提出的算法在优化倒垛次数和切换机架次数上平均提升 20%, 算法和模型是可行且有效的.

关键词: 轧制计划; 钢坯倒垛; 单亲遗传算法; 圆钢生产

中图分类号: TP29

文献标志码: A

Rolling planning problem with stacking factor

DONG Guang-jing^{1,2}, LI Tie-ke^{1,2}, WANG Bai-lin^{1,2}, SHAN Gang-gang³

(1. Dongling School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. College of Management, Hebei University, Baoding 071002, China. Correspondent: DONG Guang-jing, E-mail: dongguangjing_2011@126.com)

Abstract: A multi-objective integer programming model is presented for the billet warehouse stacking optimization problem with the purpose of minimizing the stacking shuffles and the switches of rolling units. The optimization of billet warehouse stacking based on the given rolling plan is taken into consideration in the proposed model. To solve the model, a partheno-genetic algorithm based on the billet match is constructed. The experiment results from the real production data show that the algorithm improves 20% on average for optimizing the stacking shuffles and the switches of rolling units through comparing with the traditional manual method, which illustrates the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: rolling plan; billet stacking; partheno-genetic algorithm; round bar production

0 引言

热轧圆钢是重要的工业原料, 广泛应用于铁路、军事、化工、机械制造、造船等部门. 当前, 用户对热轧产品的需求呈现出小批量、多品种的特点^[1], 与钢铁企业大规模、批量化的生产模式相冲突, 从而对企业的生产组织提出了更高的要求.

热轧过程作为圆钢生产的瓶颈环节, 其生产计划的编制被认为是钢铁生产优化管理中最复杂和难解的问题之一. 目前, 热轧轧制计划的学术成果主要集中于“板坯-钢卷”类产品. 文献[2]建立了热轧带钢生产轧制计划问题模型, 并采用遗传算法求解; 文献[3]将编制轧钢生产计划问题分解为两个子问题, 并设计

了混合遗传算法; 文献[4]针对热轧调度问题设计了一种基于两阶段的调度策略; 文献[5-6]建立了热轧轧制计划编制问题的奖金旅行商问题(PCTSP)模型; 文献[7]建立了基于奖金收集车辆路径问题的轧制计划模型, 并设计了一种结合了模拟退火和蚁群算法的混合算法; 文献[8]针对允许同时编制多个轧制单元的热轧计划问题建立了多旅行商模型; 文献[9-10]采用约束满足算法分别求解一体化轧制计划和热轧轧制计划编制问题; 文献[11]将约束满足技术和邻域搜索嵌入到粒子群的初始化和进化过程; 文献[12-13]分别对热轧调度问题进行研究, 设计了具有问题特征的算法.

收稿日期: 2013-08-23; 修回日期: 2013-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71231001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-SD-12-012B, FRF-SD-12-011B).

作者简介: 董广静(1984—), 女, 博士生, 从事生产计划与调度、智能算法的研究; 李铁克(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产调度与计划、先进制造管理等研究.

上述研究实现了对“板坯-钢卷”产品的轧制计划编制,主要侧重于在优化炼钢与轧钢之间衔接程度的前提下编制合理的热轧计划.然而,在圆钢生产中,一般60%~70%的轧制计划是在冷装工艺下进行的,炼钢计划会比轧制计划提前2~3天完成.此外,连铸出来的钢坯以马莲垛(图1)的形式存放于钢坯库中,这种存放方式与传统的板坯堆放方式相比,存在倒垛困难的情况.在编制轧制计划时若不考虑钢坯库的实际堆放情况,将会造成巨大的倒垛现象(图1).因此,在编制轧制计划时有必要综合考虑轧制工艺规程和钢坯库的堆放情况,以达到在满足轧制工艺规程的前提下优化钢坯库的倒垛次数和规格之间切换机架的次数.

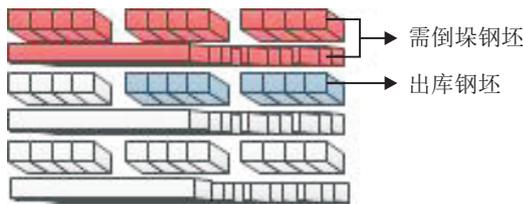


图1 钢坯倒垛现象

基于圆钢生产的特点,一般在编制轧制计划时首先编制粗轧制计划,然后根据实际库存确定详细的轧制计划.本文以冷装工艺下的轧制计划编制问题为研究对象,在钢坯库倒垛优化的前提下设计一种综合考虑轧制工艺规程的轧制计划,采用两阶段算法对问题进行求解:第1阶段采用启发式钢坯匹配算法对粗轧制计划内的轧制单元进行钢坯匹配;第2阶段通过单亲遗传算法对已匹配的轧制单元进行优化排序.

1 问题建模

1.1 问题描述

在冷装工艺下,圆钢轧制计划是依据生产部下发的粗轧制单元和实际库存情况来确定的.其中,粗轧制单元只给出了轧制单元内的钢坯属性要求,并未指定具体钢坯.圆钢轧制计划则需要根据库存情况进一

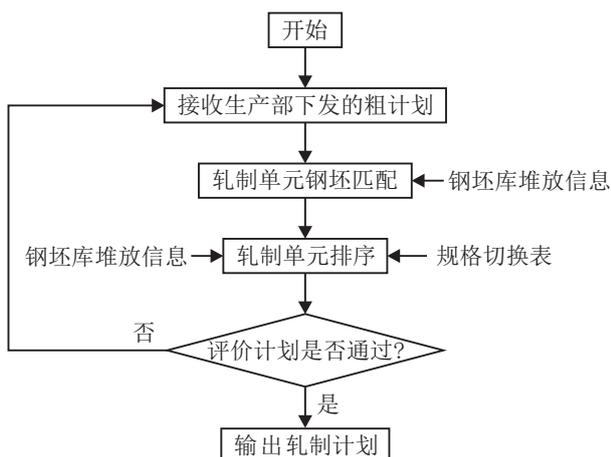


图2 轧制计划编制流程

步确定待轧钢坯,使其钢坯属性与要求相匹配,同时对轧制单元进行排序优化,形成可行的轧制计划.圆钢轧制计划编制需要考虑两个重要因素:1)最小化轧制钢坯出库时的倒垛成本.在确定满足属性匹配要求的待轧钢坯时,需要综合考虑当前钢坯库的堆放情况,降低库存倒垛作业成本,同时保证生产原料的及时供应.2)最小化轧制单元间切换机架次数.不同轧制规格的圆钢在轧制之间需要切换机架,规格跳跃越大,切换机架次数越多.图2为轧制计划编制流程.

1.2 模型假设

基于对轧制计划编制过程的分析,本文建立的模型基于以下3条假设.

1) 轧制单元之间的切换机架次数已知,并且只有轧制规格之差在一定范围内时才能切换,以避免规格之间的大幅度跳跃;

2) 每支钢坯只对应一种轧制规格;

3) 未编制到当前匹配轧制计划中的库存钢坯定义为障碍坯,钢坯的倒出、倒回记为一次倒垛.

1.3 符号定义

为了便于描述模型和理解算法,符号定义如下.

1) 索引及集合.

i : 钢坯库中的实际库存钢坯, $i \in I$, I 为实际库存钢坯集合;

k : 轧制单元, $k \in K$, K 为轧制单元集合;

j : 轧制计划内的轧制位置, $j \in J$, J 为所有轧制位置集合;

j_k : 轧制单元 k 内的轧制位置, $j_k \in J_k \subseteq J$, J_k 为轧制单元 k 内的轧制位置集合.

2) 模型参数.

l_i : 钢坯 i 的长度;

g_i : 钢坯 i 的钢种;

s_i : 钢坯 i 的特殊要求;

l_{j_k} : 轧制单元 k 中轧制位置 j_k 上要求的钢坯长度, $j_k \in J_k$;

s_{j_k} : 轧制单元 k 中轧制位置 j_k 上要求的特殊要求, $j_k \in J_k$;

$sw_{kk'}$: 轧制单元 k 切换到轧制单元 k' 时需要切换机架的次数;

ss_k : 轧制单元 k 的轧制规格;

SS : 相邻两轧制单元之间的轧制规格跳跃度上限值;

T_i : 钢坯 i 所在垛位;

D_i : 压在钢坯 i 上的钢坯数;

C_{ijk} : 钢坯 i 在轧制单元 k 中 j 位置上轧制时的净倒垛次数.

3) 决策变量.

x_{ijk} : 如果钢坯 i 被匹配到轧制单元 k 中的轧制位置 j_k 上, 则 $x_{ijk} = 1$, 否则 $x_{ijk} = 0$;

$y_{kk'}$: 如果轧制单元 k 紧接着轧制单元 k' 轧制, 则 $y_{kk'} = 1$, 否则 $y_{kk'} = 0$;

z_{ik} : 如果钢坯 i 被匹配到轧制单元 k 中, 则 $z_{ik} = 1$, 否则 $z_{ik} = 0$;

v_{ijk} : 如果钢坯 i 在轧制单元 k 中轧制位置 j 处轧制, 则 $v_{ijk} = 1$, 否则 $v_{ijk} = 0$.

1.4 问题模型

以最小化计划倒垛次数及轧制单元之间切换机架的次数为目标的多目标规划模型建立如下:

$$\min F_1 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_k} C_{ijk} v_{ijk}; \quad (1)$$

$$\min F_2 = \sum_{k \in K} \sum_{k' \in K, k \neq k'} sw_{kk'} y_{kk'}. \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \forall j \in J; \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I; \quad (4)$$

$$(|l_i - l_{j_k}| + |g_i - g_{j_k}| + |s_i - s_{j_k}|) + x_{ijk} = 0, \\ i \in I, j_k \in J_k; \quad (5)$$

$$C_{ijk} = D_i - \sum_{j'=1}^{j-1} \sum_{i' \in \{l|T_i=T_i, D_l < D_i\}} v_{i'j'k} - \\ \sum_{k'=1}^{k-1} \sum_{i' \in \{l|T_i=T_i, D_l < D_i\}} z_{i'k'}; \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} y_{kk'} = 1, \forall k' \in K \setminus \{k, 1\}; \quad (7)$$

$$\sum_{k' \in K} y_{kk'} = 1, \forall k \in K \setminus \{k', |K|\}; \quad (8)$$

$$y_{k1} = y_{|K|k} = 0, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$|ss_k - ss_{k'}| y_{kk'} \leq SS, k \in K, k' \in K. \quad (10)$$

目标函数(1)表示最小化轧制计划实施时引起的垛位净倒垛次数; 目标函数(2)表示最小化轧制计划切换机架总次数; 约束(3)表示轧制单元内的虚拟钢坯只能匹配钢坯库内一支钢坯; 约束(4)表示钢坯库内的钢坯最多匹配轧制单元中的一个轧制位置; 约束(5)表示轧制计划内的每支钢坯只能从对应钢坯库中的可交换钢坯集合中选取; 约束(6)表示计算轧制单元内某个轧制位置钢坯实施计划时引起的倒垛次数; 约束(7)和(8)表示除了排在第1个和最后1个轧制单元外, 其他轧制单元的前后都必有1个轧制单元; 约束(9)表示第1个轧制单元前和最后1个轧制单元后没有直接衔接的轧制单元; 约束(10)表示相邻两个轧

制单元之间的规格跳跃具有一定上限值.

2 求解算法

轧制计划编制问题是一个含有多种复杂约束的 NP-hard 问题, 对于大规模的轧制计划编制问题, 求解非常困难.

为实现模型求解, 需要完成两项工作.

1) 为粗轧制计划匹配库内钢坯, 以最小化钢坯出库时的总倒垛次数为目标.

2) 编制详细的轧制计划, 即为匹配完毕的轧制单元进行优化排序, 目标是最小化切换机架次数和计划实施时钢坯库的总倒垛次数.

对于此类问题, 本文在分析影响轧制计划编制因素的基础上设计一种基于钢坯匹配的单亲遗传算法. 单亲遗传算法(PGA)^[14]是由李茂军等提出的一种专门针对组合优化问题的改进遗传算法. 该算法相对遗传算法而言不仅简化了遗传操作, 提高了计算效率, 而且不要求初始群体中个体的多样性, 也不存在“早熟收敛”问题, 对于解决组合优化问题和复杂工程优化问题都具有良好的效果.

2.1 钢坯倒垛分析

在冷装工艺下, 圆钢轧制计划的编制需要在满足轧制工艺规程约束的基础上进一步考虑钢坯库的实际堆放情况, 以避免产生大量的倒垛现象. 在连铸生产过程中, 一般采用多机多流连铸机, 因此会同时下线多支钢坯, 在钢坯库内以马莲垛方式堆放, 即按照一次下线的多支钢坯在同一层间隔堆放.

马莲垛堆放方式能够有效提高钢坯库的空间利用率, 但当钢坯库流动性很大时会造成钢坯库的大量倒垛作业. 因此, 若不充分考虑钢坯库的堆放情况, 大量的倒垛作业会降低轧制计划的可行性, 甚至导致轧制生产的延迟或中断. 所以, 根据粗轧制单元计划编制详细的轧制计划时不仅需要考虑轧制工艺规程, 还要考虑优化轧制钢坯出库时的总倒垛次数, 这对轧制计划的连续进行和降低倒垛作业成本有着极其重要的意义.

2.2 求解框架

针对问题特征, 本文提出一种基于钢坯匹配的单亲遗传算法(BM-PGA), 编制过程分为两个阶段: 第1阶段根据钢坯特征设计启发式钢坯匹配算法, 使其能够依据粗轧制单元计划在钢坯库中匹配合适的钢坯; 第2阶段对匹配好的轧制单元集合排序, 以确定最终轧制计划, 该部分首先采用启发式算法求得初始种群, 然后采用单亲遗传算法优化轧制计划. 算法求解框架如图3所示.

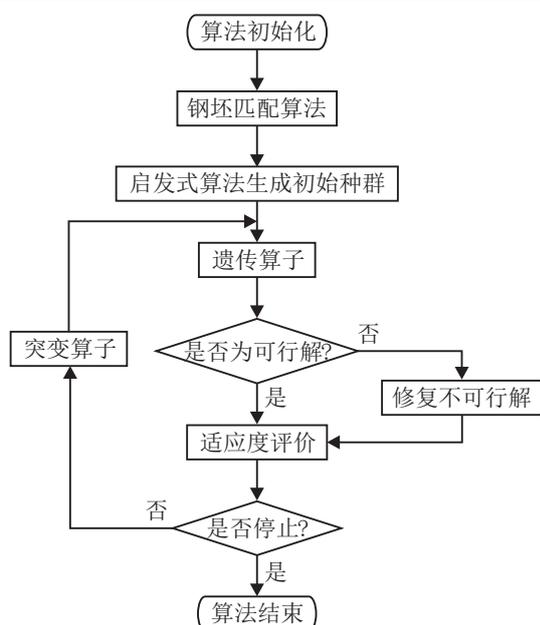


图 3 BM-PGA 算法求解框架

为了便于进一步讨论问题,给出以下定义。

定义 1 (障碍坯) 将垛位中压在轧制计划的目标钢坯之上且未编制到轧制计划的钢坯称为障碍坯。

定义 2 (选择适应值) 设 Num_{ik} 为轧制单元 k 内压在候选钢坯 i 上的障碍坯数, Num_{ijk} 为纳入到轧制单元 k 内候选钢坯 i 所在垛位 j 上的候选钢坯数。称 $P_i = \alpha \text{Num}_{ijk} + U - \beta \text{Num}_{ik}$ 为候选钢坯 i 的选择适应值,其中: α 、 β 为对应权重系数, U 为一个较大的正整数。

选择适应值用来标示某个候选钢坯被选中赋值的程度,该值随着虚拟钢坯与库存钢坯的匹配过程而动态变化。

2.3 基于钢坯匹配的单亲遗传算法

2.3.1 钢坯匹配算法流程

钢坯匹配算法首先为粗轧制单元计划所要求的钢坯到钢坯库中匹配合适的实际钢坯。为此,本文基于启发式方法设计了钢坯匹配算法,其主要思想为:按照粗轧制单元计划内轧制顺序依次为虚拟钢坯匹配库存内的实际钢坯,匹配过程中以最小化每个轧制单元计划的倒垛次数为目标。设 $I_k = \{1, 2, \dots, |I_k|\}$ 为粗轧制计划中轧制单元 k 内的虚拟钢坯集合,其中虚拟钢坯定义为满足一定属性条件的钢坯描述。算法步骤如下。

Step 1: 初始化。 初始化所有轧制单元内虚拟钢坯的 g_i 、 l_i 、 s_i 、 ss_i 等属性以及钢坯库内钢坯的存储情况。

Step 2: 轧制单元。 令 $k = 1$ 对应第 1 个轧制单元。

Step 3: 轧制单元钢坯。 令 $j_k = 1$ 对应轧制单元 k 内第 1 个轧制位置。

Step 4: 计算候选钢坯集合。 计算轧制单元 k 内第 j_k 个轧制位置在钢坯库内的候选钢坯集合 W_{jk} , $j_k \in I_k$, $W_{jk} \neq \emptyset$ 。

Step 5: 钢坯选择和赋值。 将集合 W_{jk} 内的候选钢坯按照选择适应值非增排序,选择排序后的第 1 个候选钢坯对轧制单元 k 内第 j_k 个轧制位置进行赋值,若 $j_k > |I_k|$, 转至 Step 6; 否则令 $j_k = j_k + 1$, 转至 Step 4。

Step 6: 终止条件。 若 $k > |K|$, 算法结束, 输出钢坯匹配结果; 否则 $k = k + 1$, 转至 Step 3。

2.3.2 编码方式

在轧制计划编制问题中,最终解为轧制计划内所有轧制单元的一个序列。因为轧制单元内的钢坯轧制顺序是固定且已知的,所以编码只需要确定轧制单元的轧制顺序即可。因此,对轧制序列采用顺序编码的自然数编码方式,一个染色体对应一个可行的轧制计划序列,首先按照轧制规格从小到大排序,形成一个可行的轧制序列,然后从轧制序列的第 1 个轧制单元开始进行自然数从小到大编码。如染色体 $X = \{2, 1, 6, 4, 5, 3\}$ 表示的含义为编号为 2 的轧制单元为轧制计划的第 1 个轧制单元,编号为 1 的轧制单元为轧制计划的第 2 个轧制单元,依此类推。

2.3.3 启发式算法生成初始种群

PGA 的遗传操作全部在一个个体上进行,因此不要求种群必须具有多样性,可以按照编码方式生成若干个个体进行修复后作为初始种群。然而,为了提高算法的搜索效率,本文考虑在优化钢坯库总倒垛次数的前提下,采用启发式算法生成初始解。算法的主要设计思想为:以最小化轧制单元之间的切换机架次数为目标,并采用遗传算子变异修复为可行初始种群,步骤如下。

Step 1: 初始化。 初始化规格切换机架表,轧制单元钢坯匹配结果。

Step 2: 变量排序。 轧制单元按以下两规则排序。

Rule 1: 按轧制单元的倒垛次数非减排序;

Rule 2: 按轧制规格非减排序,得到序列 $S(P)$ 。

Step 3: 判断可行解。 若存在相邻两轧制单元 k 、 k' 违反约束 (10), 转至 Step 4; 否则, 输出轧制序列。

Step 4: 修复不可行解。 若序列 $S(P) - \{k\}$ 可行, 转至 Step 5.1; 若序列 $S(P) - \{k'\}$ 可行, 转至 Step 5.2; 否则按 Rule 2 到 Rule 1 排序, 此时得到的解一定是可行解, 转至 Step 6。

Step 5: 变量赋值。

Step 5.1: 搜索序列 $S(P) - \{k\}$, 将切换机架次数最少的轧制位置赋给轧制单元 k , 输出轧制序列;

Step 5.2: 搜索序列 $S(P) - \{k'\}$, 将切换机架次数最少的轧制位置赋给轧制单元 k' , 输出轧制序列。

Step 6: 种群生成. 若 $t > T$, 算法结束, 输出初始种群; 否则, $t = t + 1$, 随机交换 Step 1 ~ Step 5 得到序列的两个轧制单元, 转至 Step 3.

上述启发式算法编制了多个可行轧制计划, 求解过程综合考虑了对倒垛次数和切换机架次数的优化, 能够得到有效的可行解, 提高了 PGA 算法的求解效率。

2.3.4 适应度函数确定

对于轧制计划编制问题, 每条染色体的适应值可根据模型中的两个优化目标函数的加权平均来计算。

$$F = \left(\lambda_1 \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_k} C_{ijk} v_{ijk} + \lambda_2 \sum_{k \in K} \sum_{k' \in K, k \neq k'} sw_{kk'} y_{kk'} \right) / (\lambda_1 + \lambda_2). \quad (11)$$

其中: F 为适应度函数, 分别为对应倒垛次数和切换机架次数两个目标的权重; λ_1 、 λ_2 值分别由实际生产中倒垛时间及切换机架时间的历史数据获得, 其计算方式如下: 设 t_d 、 t_q 为每个轧制计划的钢坯库倒垛和切换机架次数所需的平均时间, 则 $\lambda_1 = t_d / (t_d + t_q)$, $\lambda_2 = t_q / (t_d + t_q)$. 这里 t_d 、 t_q 的取值由历史数据统计分析得到。

2.3.5 遗传算子

PGA 遗传算子主要以变异操作为主, 采用 k-opt 或 LK 等局部搜索算法对种群个体优化; 交叉操作用来产生一个较好的搜索起点, 通过选择和染色体基因重组的变异方式繁殖后代; 选择操作与 GA 完全一致。

PGA 常用的有如下 3 种遗传算子。

1) 换位算子 (GE): 随机选择被交换的基因位置 (轧制单元位置), 按一定的概率 p 交换一条染色体 (一个可行的轧制序列) 中的某对 (些) 基因位置 (轧制单元位置) 的过程, 这种操作隐含了遗传算法中 PMX、OX 等两条染色体之间交叉算子的功能, 但操作起来比 GA 方便得多。

2) 移位算子 (GS): 按一定的概率 p 把一条染色体中的某个 (些) 子串中的基因 (轧制单元) 依次后移 (或前移), 并把该子串中的最后 (前) 一个基因 (轧制单元) 移到最前 (后) 面的位置 (轧制位置)。

3) 倒位算子 (GI): 按照一定概率 p 把一条染色体中的某个 (些) 子串中的基因 (轧制单元) 依次首尾倒置, 被倒置的子串及其长度是随机选取的。

应用以上 3 个遗传算子对轧制单元顺序进行调整, 通过适应度值来评价对调整后的轧制序列的优劣, 进而得到最优的轧制序列。

2.3.6 修复不可行解

通过生成种群的启发式算法中的 Step 3 ~ Step 5 对不可行解进行修复。

2.3.7 启发式突变算子

当 PGA 运行到一定代数时, 如果继续迭代下去, 则解质量的改变余地会变小. 因此, 可以在连续迭代的代数超过一个给定数量时, 调用突变算子将某些基因位置的个体变成该基因邻域中适应值较好的个体, 然后返回选择操作, 继续进行下一代的迭代。

这里设计的启发式突变算子主要有两类。

1) 柔性化约束 (10): 令 $SS = SS + \delta$, 通过遗传算子进一步优化序列. 约束 (10) 的柔性化具有一定的上限范围, 不能无限地柔性化, δ 值由实际生产中最大切换规格数的历史数据统计获得。

2) 插空策略: 通过在轧制单元之间的微调改变解的运行方向, 抽取轧制序列内净倒垛次数最大的轧制单元为其重新赋值, 即选择使得整个轧制序列内倒垛增加量最少的空隙插入, 得到一个新的可行染色体。

3 数据实验

3.1 实验环境与数据

为了验证本文的 BM-PGA 算法, 从某钢铁厂的实际生产数据中抽取了一个含有 22 个轧制单元 (340 根钢坯) 的粗计划进行编制. 在实验过程中, 从 22 个轧制单元中随机选择 2 ~ 20 个轧制单元计划, 分为 19 组进行实验, 重复 20 次. 每次实验时, 保证轧制单元数固定, 且内部所需轧制钢坯顺序已知不变, 根据实际生产过程中钢坯库的动态调整变化情况, 随机生成 20 个垛位, 钢种种类有 50 种, 钢坯数为 500 支。

算法采用 Microsoft Visual Studio C# 编程实现, 测试环境为 Pentium 4 1GHz 2G Windows XP Professional. 通过大量仿真实验, BM-PGA 算法参数设置如下: 种群大小为 50; 最大迭代次数为 100 次; 权重系数 λ_1 、 λ_2 由实际生产中的历史数据统计结果获得, 这里取 2 个月的实际数据统计结果, 得 $\lambda_1 = 0.63$, $\lambda_2 = 0.37$; 换位算子 $p_h = 0.8$; 倒位算子 $p_d = 0.1$; 移位算子 $p_y = 0.4$. 为检验 BM-PGA 算法的求解性能, 将其与传统的遗传算法 (GA)^[15] 和人工计算方法进行比较. 人工计算方法的思路为: 由于轧制规格的大小决定其轧制速度 (单位时间内轧制钢坯的支数) 的快慢, 轧制规格较大的速度较快, 轧制规格较小的速度较慢, 在实际生产中, 一般是在最小化钢坯库存量和切换机架次数的前提下确定轧制序列, 即当库存量超过给定上限值时, 优先选择大规格轧制; 若库存量小于给定下限值时, 则优先选择小规格轧制. 轧制规格的选择以最小化机架切换次数为主要优化目标。

3.2 实验结果与分析

19组实验的计算结果如表1所示. m 为轧制单元数, C_{avg} 为平均倒垛次数, F_{avg} 为平均切换机架次数.

表1 算法对比结果

m	BM-PGA		GA		人工计算方法	
	C_{avg}	F_{avg}	C_{avg}	F_{avg}	C_{avg}	F_{avg}
2	0.7	2	2.5	2	3.7	2
3	2.2	4.1	4.3	4.3	5.9	4.3
4	2.9	6.7	6.2	6.4	8.5	7.2
5	3.4	11.5	5.7	12.4	8.1	10.5
6	3.2	14.5	7.3	13.9	8.6	15
7	5.5	18.9	7.6	19.7	10.7	19.6
8	7.2	22.5	11.5	23.7	13.7	25.2
9	9.4	23.8	14.6	25.9	16.4	27.5
10	11.8	25.2	17.5	27.4	20.5	30.5
11	15.1	29.6	19.3	28.5	22.2	33.8
12	17.5	34.3	23.9	37.2	26.7	37.8
13	19.5	38.8	25.3	39.4	28.8	43.4
14	26.6	41.4	32.1	46.3	31.3	50.7
15	33.7	49.6	37.1	55.4	39.3	57.3
16	32.8	53.2	40.3	61.6	43.7	64.6
17	36.1	55.8	44.2	67.1	50.6	70.9
18	34.4	61.9	49.3	66.4	65.1	77.5
19	40.3	65.4	59.9	72.6	75.9	85.6
20	41	71.5	77.3	85.8	103.4	96.7

由表1可知, BM-PGA算法在优化轧制计划内钢坯出库总倒垛数上明显优于传统GA算法和人工计算方法, 平均优化效果高达20%, 而且随着轧制单元数的递增, 其倒垛数递增率低于GA算法和手工计算方法. 其中, 在优化轧制单元间切换机架次数上只有个别实验结果略低于人工经验值, 主要是由于人工确定轧制单元之间的切换规格时, 复杂的库存情况制约了人工对钢坯库倒垛情况的全面考虑, 相对侧重了切换机架时间的优化. 然而, 在实际生产中, 钢坯库的倒垛作业关系着吊车的作业成本和连续轧制的时间成本, 其重要性远大于切换机架成本, 所以在设计BM-PGA算法时加强了对倒垛成本这个因素的考虑.

抽取20个轧制单元, 对BM-PGA进行算法收敛性的实验, 并与传统GA算法进行对比. 每次迭代进行实验30次, 取适应度值的平均值, 实验对比结果如图4所示.

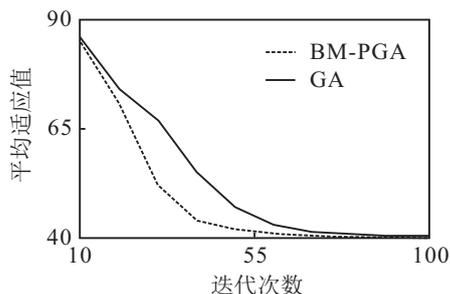


图4 算法收敛的比较

由图4可知: 随着迭代次数的增大, BM-PGA算法的适应值逐渐趋向稳定, 算法是收敛的, 并且收敛

性能略高于GA算法; 算法的计算时间会随着迭代次数的增大而增加, 但一般当迭代次数达到100时, 即可得到一个较好的含有20个轧制序列的计划方案, 计算时间在2min左右; 人工编制方法一般需要人工计算2h左右. 可见, BM-PGA算法的编制时间远小于人工编制方法, 由于GA算法在运算过程中算子运算较复杂, 所需时间也略高于BM-PGA算法, 如表2所示. 表2给出了GA算法与BM-PGA算法的求解时间对比结果.

表2 算法求解时间对比

轧制单元数	GA 计算时间/s	BM-PGA 计算时间/s
5	7.342	5.224
10	13.358	9.753
15	17.086	14.532
20	25.639	21.34

在实际生产中, 倒垛增加量具有很重要的现实意义, 通过该项指标可以指导计划期间长度及轧制单元数量的设定, 以保证轧制计划的可行性不会因为倒垛次数过大而降低. 图5给出了倒垛增加量随着轧制单元数增长的变化趋势. 设 Q_i ($i \geq 2$)为实验20次时轧制单元数 i 的平均倒垛次数, 则轧制单元数 $i+1$ 的倒垛增加量计算表达式为 $A_{i+1} = Q_{i+1} - Q_i$.

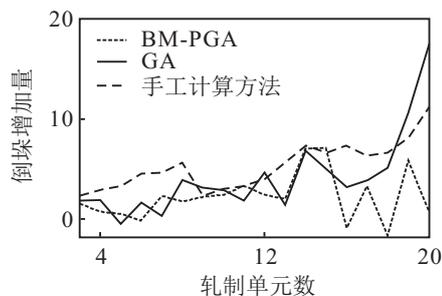


图5 倒垛增加量变化趋势

从图5可以看出: 随着轧制单元数的增加, BM-PGA算法获得的倒垛增加量变化浮动较小, 即使轧制单元数较大时也不会出现倒垛次数的大幅增加, 倒垛增加量的稳定性高; 传统的人工计算方法只是在为粗轧制单元计划匹配钢坯时考虑了优化倒垛, 在倒垛增加量的变化稳定性上明显劣于BM-PGA算法.

4 结 论

本文研究了一种基于钢坯库倒垛优化的轧制计划编制问题, 即在已知粗轧制计划的前提下, 编制详细的轧制计划. 将问题分解为两个子问题. 1) 匹配问题: 为粗轧制计划内所要求的虚拟钢坯匹配钢坯库内的实际钢坯. 2) 排序问题: 对匹配完毕的轧制单元优化排序, 生成一个可行的轧制单元序列. 通过深入分析问题特点及其复杂约束, 建立了以优化所有轧制钢坯出库的总倒垛次数和轧制单元之间切换机架次数为目标的多目标整数规划模型. 针对模型构造了一种

基于钢坯匹配的单亲遗传算法, 算法求解主要分两个阶段: 第1阶段通过钢坯匹配算法为粗轧制计划内所要求的虚拟钢坯匹配钢坯库内实际钢坯, 目标为最小化每个轧制单元的倒垛次数; 第2阶段通过PGA算法为匹配好的轧制单元优化排序, 目标为最小化所有轧制钢坯出库时的总倒垛次数和轧制单元之间切换机架次数。基于实际生产数据的实验结果表明, 建立的数学模型及算法切实可行, 编制结果优于传统的手工计算方法, 对实际生产具有指导意义。

参考文献(References)

- [1] 吴秀丽, 李苏剑, 杜彦华. 柔性作业车间多品种小批量调度算法研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 423-429.
(Wu X L, Li S J, Du Y H. Research on batch scheduling problem in a flexible job shop[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(4): 423-429.)
- [2] 唐立新. 热轧带钢轧制计划的实例应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1999, 20(3): 1-5.
(Tang L X. Case study on the production lot planning of the hot rolling strip[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 1999, 20(3): 1-5.)
- [3] Chen Y W, Lu Y Z, Ge M, et al. Development of hybrid evolutionary algorithms for production scheduling of hot strip mill[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(2): 339-349.
- [4] Zhao J, Wang W, Liu Q L, et al. A two-stage scheduling method for hot rolling and its application[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(6): 629-641.
- [5] Lopez L, Carter M W, Gendreau M. The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach[J]. European J of Operational Research, 1998, 106(2): 317-335.
- [6] 刘士新, 周山长, 宋健海, 等. 基于PCTSP的热轧单元计划模型与算法[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 89-92.
(Lin S X, Zhou S C, Song J H, et al. The model and algorithm for hot-milling unit planning based on PCTSP[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 89-92.)
- [7] 屠乃威, 黄辉, 罗小川, 等. 热轧轧制计划模型及其混合求解算法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(1): 83-90.
(Tu N W, Huang H, Luo X C, et al. Model and hybrid algorithm for hot rolling lot planning[J]. J of Systems Engineering, 2011, 26(1): 83-90.)
- [8] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex[J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 267-282.
- [9] 孙玲, 李铁克. 炼钢-连铸-热轧轧制计划的约束满足算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5): 940-944.
(Sun L, Li T K. Constraint satisfaction algorithm of batch planning for steel-making continuous casting-hot rolling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(5): 940-944.)
- [10] 李铁克, 郭冬芬. 基于约束满足的热轧轧制计划模型及算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 389-398.
(Li T K, Guo D F. Model and algorithm for hot-rolling batch plan based on constraint satisfaction[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 389-398.)
- [11] 张文学, 李铁克. 基于粒子群和约束满足的钢轧一体化轧制计划优化[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 840-846.
(Zhang W X, Li T K. Integrated batch planning optimization based on particle swarm optimization and constraint satisfaction for steel production[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(4): 840-846.)
- [12] Tang L X, Huang L. Optimal and near-optimal algorithms to rolling batch scheduling for seamless steel tube production[J]. Int J Production Economics, 2007, 105(2): 357-371.
- [13] Changchun P, Yang G K. A method of solving a large-scale rolling batch scheduling problem in steel production using a variant of column generation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 165-178.
- [14] Li Maojun. A further result on the schema theorem of partheno-genetic algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(3): 465-468.
- [15] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. Modelling and a genetic algorithm solution for the slab stack shuffling problem when implementing steel rolling schedules[J]. Int J of Production Research, 2002, 40(7): 1583-1595.

(责任编辑: 齐 霖)