

文章编号: 1001-0920(2007)04-0389-05

基于约束满足的热轧批量计划模型与算法

李铁克, 郭冬芬

(北京科技大学 管理学院, 北京 100083)

摘要: 将热轧批量计划问题作为一个约束满足问题处理, 建立不确定计划数的 VRPSTW 约束满足模型. 在求解过程中, 先用约束满足的一致性技术过滤变量的值域, 收缩搜索空间; 然后用变量选择和值选择构造轧制计划的解. 为变量赋值之后, 实施约束传播, 保证每块板坯只被访问一次并动态禁止子回路. 在已有的解的基础上, 应用基于禁忌的 k -opt 互换改进解的质量. 数据实验证明模型和算法是有效的.

关键词: 热轧批量计划; 车辆路径问题; 约束满足; 一致性技术; 约束传播; k -opt 互换

中图分类号: TF3 **文献标识码:** A

Model and algorithm for hot-rolling batch plan based on constraint satisfaction

LI Tie-ke, GUO Dong-fen

(Management School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondent: GUO Dong-fen, E-mail: guodf640@hotmail.com)

Abstract: The hot-rolling batch planning problem is treated as a constraint satisfaction problem. A VRPSTW constraint satisfaction model with uncertain rolling plan number is established. During the solving procedure, domains of variables are filtered by applying constraint satisfaction consistency techniques, and the solution is constructed by the variable selection and value selection heuristics. After the instantiation of a variable, constraint propagation is implemented, the constraint that each slab is visited only once is guaranteed and the subtour is dynamically forbidden. The quality of the solution is further improved by using tabu-based k -opt exchange. The numerical experiments show the validity of the proposed model and algorithm.

Key words: Hot-rolling batch plan; Vehicle routing problem; Constraint satisfaction; Consistency technology; Constraint propagation; k -opt exchange

1 引言

炼钢-连铸-热轧生产计划与调度问题是钢铁企业生产管理的核心, 已成为一个重要的研究课题. 关于热轧批量计划问题已有许多研究, 文献[1]给出了限制板坯宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚函数表; 文献[2]提出一种数学规划模型, 用基于禁忌的启发式算法求解; 文献[3]基于多旅行商模型编制轧制计划, 用遗传算法求解; 文献[4]将轧制计划问题归结为车辆路径问题, 建立数学规划模型, 用基于遗传算法和动态规划的两阶段方法求解; 文献[5]建立不确定计划数的 VRP 数学规划模型, 用遗传算法和禁忌搜索相结合的方法求解; 文献[6]建立合理安排烫辊材和主体材的轧制计划模型, 构造一种基于单亲遗传

算子的免疫算法.

根据对热轧批量计划问题的研究可知, 主要是建立数学规划模型, 然后基于遗传算法和禁忌搜索算法求解. 遗传算法(GA)是基于种群的随机搜索优化方法, 在搜索过程中可能会产生大量的非法解. 为了限制非法解的产生, 需设计特定的遗传编码和遗传算子, 或采用罚函数或染色体修复手段消除非法解. 然而这些手段往往使得: 1) 遗传编码和遗传算子的设计成为遗传算法的应用瓶颈; 2) 问题约束条件越复杂, 非法解在搜索空间中占的比例越大, 应用罚函数或染色体修复手段消除非法解的效率就越低. 而禁忌搜索算法的优化性能与初始解的质量和邻域构造方法有很大的依赖关系^[7], 通常一个好的初始

收稿日期: 2006-01-05; 修回日期: 2006-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70371057).

作者简介: 李铁克(1958—), 男, 长春人, 教授, 博士, 从事生产计划与调度、先进制造管理等研究; 郭冬芬(1964—), 女, 石家庄人, 副教授, 博士生, 从事生产计划与调度、物流优化等研究.

解的产生并非一件容易的事。

热轧批量计划问题约束条件多,具有 NP 难特点,本文将其转化为一个约束满足问题处理,建立不确定计划数的带软时间窗的车辆路径问题 (VRPSTW) 约束满足模型,设计了基于约束满足和 k -opt 互换的求解算法。在求解过程中,先用约束满足的一致性技术对变量值域进行预处理,收缩搜索空间,降低计算复杂性;然后,从全局优化视点提出一种变量选择和值选择启发式方法构造轧制计划;最后,通过实施赋值触发约束传播过滤剩余待调度变量的值域,确保每块板坯只被访问一次并动态禁止子回路。在已获得解的基础上,用基于禁忌的路径间 k -opt 互换进一步优化轧制计划。

2 热轧批量计划的 VRPSTW 约束满足模型

2.1 问题描述

炼钢、连铸、热轧是钢铁生产的 3 大工序,批量单位依次是“炉次”、“浇次”和“轧次”。在传统冷装生产方式下,因为连铸和热轧之间有板坯库作缓冲,所以炉次计划、浇次计划和轧制计划可只考虑本阶段的工艺约束,分阶段独立制定。但在连铸-热轧一体化的生产方式下,铸坯不经加热炉加热(或只有短暂加热)直接送上轧线,炼钢、连铸和热轧 3 工序的批量计划应视为一个整体,统一计划和调度。然而,由于 3 工序的批量单位不同,产能不同,约束条件有很大的差异,实际上很难同时做出 3 工序的批量计划。因此,本文基于“拉动式”排程思想研究批量计划,在轧制计划的制定过程中,不仅考虑热轧阶段的轧制规程约束,而且考虑炼钢-连铸阶段对板坯钢种的约束和合同交货期的约束,以便在后续工作中由轧制计划提炼出浇次计划和炉次计划,支持一体化生产的要求。

在下面的热轧批量计划制定过程中,主要考虑的因素有:1) 构成主体材的板坯总长限制在一定范围内;2) 板坯宽度应递减变化,变化要平滑;3) 相同宽度的板坯连续轧制不超过一定长度;4) 厚度变化要平滑,最好是非减方向变化;5) 宽度、厚度、硬度不允许同时跳跃;6) 硬度变化呈渐近递增或渐近递减;7) 宽度、厚度、硬度 3 者优先级为硬度-厚度-宽度;8) 板坯钢种的约束和交货期的约束。

热轧批量计划就是对排产后的计划板坯进行组批和排序,形成若干个轧制计划,每个轧制计划内安排的板坯数量受轧辊的能力限制,板坯的排列顺序应符合轧制规程的要求,最小化对轧辊的磨损影响,每个轧制计划的负荷装载率应尽量高,以节省生产成本;根据合同交货期,每块板坯应在一定的时间窗口内被轧制,提前或拖期生产应受到惩罚,此问题可

归结为带软时间窗的车辆路径问题。

2.2 热轧批量计划的 VRPSTW 模型

车辆路径问题 (VRP) 由 Dantzig^[8] 提出。设有 n 个客户需要访问,每个客户的位置和货物需求已知,车辆的负载能力已知,但车辆数未定。VRP 问题是确定车辆访问客户的路径(每辆车一条路径,开始和终止于同一点 depot),每条路径上的客户需求之和不超过车辆的能力,目标是使总成本最小。有时间窗口约束的 VRPSTW 问题是在 VRP 问题之上,加上了客户被访问的时间窗约束,VRPSTW 是 NP-难问题。本文将热轧批量计划归结为 VRPSTW 问题时,将板坯视为需访问的客户,一个轧制计划视为一台车辆。热轧批量计划的目标是在最小化所使用的车辆数的前提下,使得两两板坯间因规格上的差异造成的惩罚值和因违反时间窗约束造成的总惩罚值最小。为使每个轧制计划构成一条闭合路径,在板坯集合中引入一块公共虚拟板坯作为第 0 和第 $n+1$ 块板坯,每个轧制计划起始于板坯 0,终止于板坯 $n+1$ 。

模型和算法中用到的符号如下:

1) i 表示板坯序号, N 表示板坯集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 令 $i = 0$ 和 $i = n+1$ 为公共虚拟板坯,定义: $N^o = N \cup \{0\}$, $N^d = N \cup \{n+1\}$, $N^{o,d} = N \cup \{0, n+1\}$ 。

2) st_i 为板坯 i 的开始轧制时间, p_i 为板坯的持续轧制时间。

3) l_i 为板坯 i 的长度, w_i 为板坯的宽度, g_i 为板坯 i 的钢种。

4) Q 为轧辊最大轧制能力, $Q = \max\{l_i, i \in N\}$; q_i 为轧完第 i 块板坯后的累积负荷, z_j 为连续轧制同宽度板坯的累积负荷, L 为连续轧制同宽度板坯的最大长度限制; $[a_i, b_i]$ 为根据交货期要求制定的板坯 i 的轧制时间窗约束。

5) 为每块板坯 i 定义两个决策变量 s_i 和 p_i , s_i 为后续变量,其值是排在板坯 i 之后轧制的下一块板坯 p ; p_i 为前继变量,其值是排在板坯 i 之前轧制的上一块板坯。

6) $D(s_i)$ 和 $D(p_i)$ 表示 s_i 和 p_i 的值域。

7) 用 $c_{ij} = P_{ij}^w + P_{ij}^s + P_{ij}^h$ 代表板坯 i 到板坯 j 的规格跳跃总惩罚值,其中 P_{ij}^w , P_{ij}^s , P_{ij}^h 分别为相邻板坯宽度、厚度和硬度的跳跃惩罚值;若 $s_i = j$,说明在节点 i 和节点 j 之间建立了一条有向弧 (i, j) ,如果用 c_{is_j} 表示有向弧 (i, j) 的权重,则轧制批量计划的目标函数可表达为

$$f = \sum_{i \in N^{o,s_i}} c_{i,s_i} + \sum_{i \in N} \max(0, a_i - st_i) +$$

$$\max(0, st_i - b_i).$$

8) $s_0 = j(j \in N)$ 对应一条有向弧 $(0, j)$, 代表一个新轧制计划的开始. 用 c_{0,s_0} 表示创建一个新轧制计划的费用值, 令 $c_{0,s_0} = M$ 为一个足够大的正数, 则在目标函数最小化的前提下, 足以使轧制计划数最少; 若 $s_i = n + 1$, 则 $c_{i,s_i} = 0$.

9) v 表示轧制计划序号.

10) 为变量 s_i 赋值后, 即形成包括板坯 i 的部分有向图, 用 i 的 i 表示当前部分路径的起点和终点.

11) UN 表示待调度的板坯集合.

12) $A[v]$ 表示已安排在第 v 个轧制计划中的板坯集合.

13) $Num[v]$ 表示第 v 个轧制计划中已经安排的板坯数.

基于上述说明, 热轧批量计划的 VRPSTW 约束满足模型为

$$\min f = \sum_{i \in N^o, s_i \in N^d} c_{i,s_i} + \sum_{i \in N} \max(0, a_i - st_i) + \sum_{i \in N} \max(0, st_i - b_i), \quad (1)$$

$$s.t. \quad s_i = s_j, \quad \forall i, j \in N^o, i = j; \quad (2)$$

$$s_i \in \{1, 2, \dots, n + 1\}, \quad \forall i \in N^o; \quad (3)$$

$$s_i = i, \quad \forall i \in N^o; \quad (4)$$

$$s_i = j \Rightarrow s_j = i, \quad j = n + 1, \quad \forall i \in N^o, j \in N^d; \quad (5)$$

$$s_i = j \Rightarrow st_i + p_i = st_j, \quad \forall i \in N^o, j \in N^d, i = j; \quad (6)$$

$$s_i = j \Rightarrow q_i = q_j + l_j, \quad \forall i \in N^o, j \in N^d, i = j; \quad (7)$$

$$l_j \leq q_j \leq Q, \quad \forall j \in N^d; \quad (8)$$

$$s_i = j \text{ 且 } w_i = w_j \Rightarrow z_j = z_i + l_j, i = j; \quad (9)$$

$$s_i = j \text{ 且 } w_i < w_j \Rightarrow z_j = l_j, i = j; \quad (10)$$

$$l_j \leq z_j \leq L, \quad \forall j \in N^d; \quad (11)$$

$$g_i = g_j \Rightarrow s_i = j, \quad \forall i, j \in N; \quad (12)$$

$$w_i = w_j \Rightarrow s_i = j, \quad \forall i, j \in N. \quad (13)$$

其中: 式(1) 包含两层优化目标, 第 1 层优化目标是 最小化轧制计划数, 第 2 层优化目标是 最小化轧制计划总惩罚值; 式(2) 保证每块板坯只被访问一次; 式(3) 初始化决策变量 s_i 的值域; 式(4) 和(5) 保证消除子回路; 式(6) 为沿路径传播板坯开始轧制时间; 式(7) 为沿路径传播轧制计划的累积负荷; 式(8) 为轧辊的能力约束; 式(9) 和(10) 为沿路径传播连续轧制同宽度板坯累积负荷; 式(11) 为连续轧制相同宽度板坯的长度约束; 式(12) 和(13) 为排在同一轧制计划内的板坯钢种约束和板坯宽度递减约

束.

在上述模型中, 当系数 a_i 和 b_i 很大时, 该模型为带硬时间窗的车辆路径问题, 将迫使每个合同必须在其时间窗内被轧制; 当 a_i 和 b_i 较小时, 便为带软时间窗的车辆路径问题, 板坯若不能在要求的时间窗内轧制, 将给予一定的惩罚, 但该模型将允许更多的板坯安排到同一个轧制计划内, 减少轧制计划数目. 当 $a_i = 0, b_i = 0$ 时, VRPTW 模型变为 VRP 模型; 当只有一个轧制计划时, 则变为 TSPTW 模型.

3 模型求解

3.1 约束满足技术简介

约束满足技术源自人工智能领域, 是一种用于大规模组合优化问题的建模与求解的方法. 其特点是不仅能以更接近于现实世界的方式描述调度问题及其约束, 而且可利用变量之间的约束关系修剪搜索空间, 降低计算复杂性^[9,10]. 约束满足技术用一个变量集、变量的值域和限制变量取值的约束集描述组合优化问题. 约束满足问题的求解是从变量的值域中寻找一组满足约束的值赋给变量. 主要求解技术包括一致性技术、约束传播技术、变量选择和值选择启发式搜索算法.

一致性技术通过将不符合约束的值从变量的值域中删除来消除无效搜索, 收缩搜索空间. 节点一致是将不符合一元约束的值从变量的值域中删除. 弧一致是将不符合由弧连接的两个节点之间的二元约束的值从变量的值域中滤除.

当将一个变量赋值之后, 可能对其他变量的取值造成影响, 这一影响通过变量之间的约束关系进行传播, 进而导致其他变量的取值或值域发生改变, 该过程称为约束传播.

例如 x, y, z 的初始域为 $x \in \{7, 11, 20\}, y \in [5, 19], z \in [1, 3, 5, 6]$, 变量之间的二元约束为: $x < y, y < z$, 若从 x 域中选择值 11 赋给 x , 即 $x = 11$, 由约束 $x < y$, 使 y 值域中的 19 被滤除, $y \in [5], y$ 只能取值 $y = 5$, 由约束 $y < z, z$ 的值域中元素 5 被滤除, z 的值域变为 $z \in [1, 3, 6]$. 上述约束传播过程称为赋值触发约束传播.

应用一致性技术和约束传播技术可简化问题, 但不能保证找到问题的解, 还要通过对变量的不同赋值搜索问题的解^[11].

3.2 求解策略

3.2.1 基于约束满足构造轧制计划的解

1) 变量值域的预处理

首先根据式(3) 初始化 s_i 的值域, $D(s_i) = [1, 2, \dots, n + 1]$. $D(s_i)$ 域中的元素是所有可能排在板坯 i 之后轧制的候选板坯. 根据约束满足的节点一

致性技术,应将不可能排在板坯*i*之后轧制的板坯从*D(s_i)*中滤除.所以,首先根据式(4),从*D(s_i)*中将*i*移走;然后,根据式(12)和(13)分别按钢种和宽度约束将不可能排在板坯*i*之后的板坯从*D(s_i)*中移走.

2) 变量选择和值选择

从待调度板坯集合UN中,选择一块宽度最宽、开工时间最早的板坯*i*作为轧制计划*v*的种子板坯,将*s_i*作为下一个要赋值的变量.

值的选择: $\forall j \in D(s_i)$, 计算 $C(i, j) = c_{ij} + c_{ij} + c_{ij}$. 其中: $c_{ij} = P_{ij}^w + P_{ij}^s + P_{ij}^h$ 是板坯*i*与板坯*j*之间宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值, $c_{ij} = \max(0, a_j - st_j) + \max\{0, st_j - b_j\}$ 是板坯*j*的开工时间违反时间窗约束造成的惩罚值, c_{ij} 是违反连续轧制同宽度板坯最大长度限制约束造成的惩罚值. $\forall j \in D(s_i)$, 根据式(6)沿路径传播板坯开轧时间 st_j , 计算 c_{ij} ; 再根据式(9)和(10)沿路径传播同宽度板坯连续轧制累积负荷 z_j , 用式(11)判断 z_j 是否违反最大长度 L 的限制, 若违反该限制, 置 c_{ij} 等于一个很大的惩罚值, 限制板坯*j*成为下一块要访问的板坯; 若不违反该限制, 置 $c_{ij} = 0$, 最后计算 $C(i, j)$ 的值. 令 $\min_c = \min\{C(i, j) \mid j \in D(s_i)\}$. 值的选择可采用如下2种策略:

总是选择 $C(i, j)$ 值最小的 j 赋给 s_i , 该选择策略是一个贪婪策略, 可使单个轧制计划的惩罚值最小, 但轧制计划数不一定小;

将 $C(i, j)$ 值落在 $[\min_c, \min_c + \Delta]$ 范围内的所有板坯作为待选板坯集合 U , 计算 U 中每块板坯的值域关联度指标 $RUL(j)$, 选择 $RUL(j)$ 值最小板坯 j 作 s_i 的值. 板坯的值域关联度指标定义为

$$RUL(j) = \frac{|\{i \in UN \mid i \in D(s_i)\}|}{|UN|}$$

$$i(j) = \begin{cases} 1, & \text{板坯 } j \in D(s_i); \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

值域关联度越小, 说明该板坯被其他未调度变量竞用的概率越小, 此策略通过为其他未调度变量保留更多的可选值来改进总体调度性能^[12]. 仿真结果证明, 第2种策略能取得更好的全局优化效果. 其中 Δ 是一个可选值, 根据经验可在20~100之间调整.

3) 约束传播和动态禁止子回路

为变量 s_i 赋值后, 实施赋值触发约束传播. 根据式(2)检查所有剩余待调度变量的值域, 从待调度变量的值域中移走已赋给 s_i 的值, 以保证每块板坯只被访问一次.

$s_i = j$ 意味着终止于 i 的部分路径与起始于 j 的

部分路径合并, 如图1所示. 根据式(5)规定的约束 $s_j \neq i$ 可推断, 合并后新路径的终点 j 不能被它的起点 i 跟随, 所以必须从 s_j 的值域中删除 i , 以动态禁止子回路. 当 $j = n + 1$ 时, 无需执行此操作.

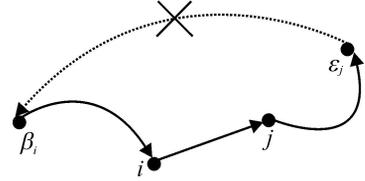


图1 动态禁止子回路

4) 约束检查

为 s_i 赋值之后, 用式(7)沿路径传播轧制计划的累积负荷, 若累积负荷达到式(8)给定的能力限制或当前变量的值域变为空域, 且 $UN \neq \emptyset$, 则创建一个新的轧制计划, 否则, 将路径中最后一块板坯作为下一个要赋值的变量 s_i , 继续值的选择. 若 $UN = \emptyset$, 结束此过程.

算法步骤描述如下:

Step1: 初始化待调度板坯集合UN, 轧制单元序号 $v = 0, A[v] = \emptyset$, 初始化变量 s_i 的值域.

Step2: 对每个 $s_i (i \in UN)$ 的值域实施一致性预处理.

Step3: 若 $UN = \emptyset$, 结束求解过程; 否则, $v = v + 1, A[v] = A[v] \cup \{0\}$. 为轧制计划 v 选择种子板坯 i , 令 $s_0 = i, UN = UN \setminus \{i, Num[v] = 1, A[v] = A[v] \cup \{i, q_i = l_i\}$.

Step4: 根据值选择策略从变量 s_i 值域中搜索合适的板坯 j , 若 $Q - q_i \leq l_j$, 转 Step7; 否则, 令 $s_i = j, UN = UN \setminus \{j, A[v] = A[v] \cup \{j, Num[v] = Num[v] + 1, q_j = q_i + l_j\}$.

Step5: 实施赋值触发约束传播, 过滤剩余待调度变量的值域.

Step6: 将轧制计划中最后一块板坯作为下一个待调度变量 s_i , 若 $D(s_i) \neq \emptyset$, 转 Step4; 否则, 转 Step7.

Step7: 令 $s_i = n + 1, A[v] = A[v] \cup \{n + 1\}$, 转 Step3.

3.2.2 用基于禁忌的 k-opt 互换优化轧制计划

本文用路径间3-opt操作和节点重置操作对轧制计划改进, 并利用这两种操作调整板坯所在的路径.

路径间3-opt操作如图2所示. 该操作从路径 r 中选择2个属性相近的相邻节点 y 和 y' , 将其重新插入另一条路径 r' 中; 然后令 $s_i = y, s_y = i, s_x = z$. 如果得到的新解是可行的, 则作为当前解的一个邻域解. 在实施该操作时, 为提高搜索效率, 先将路

径 r 中的所有节点看作是 p_y 和 s_y 的初始值域, 根据宽度约束, 将不可能排在 y 之前和 y 之后的节点从 p_y 和 s_y 的值域中滤除; 然后搜索插入位置 i 和 i' .

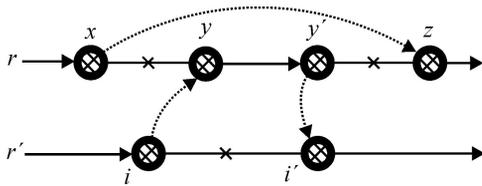


图 2 路径间 3-opt

节点重置操作将一个节点从一条路径移出, 重新插入另一条路径中. 令 $s_x = y, s_i = y, s_y = i$. 若试图将节点 y 插入到路径 r 中时发生了约束冲突, 为使插入成为可能, 从路径 r 中寻找一个节点 z , 先将节点 z 转移到另外合适的路径中, 以释放出足够的空间容纳节点 y , 会形成节点重置序列如图 3 所示. 当无约束冲突发生时, 仅在两条路径间实施节点重置操作.

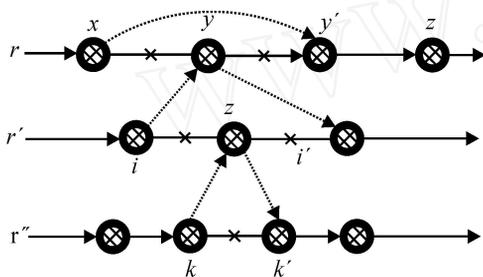


图 3 路径间节点重置

为了防止陷入死循环, 采用禁忌表记录节点的路径变化, 禁忌表采用矩阵结构, 行代表节点, 列代表路径. 节点 y 从路径 r 中移出, 则将其移出时的迭代步数记录在第 y 行、第 r 列, 在其后的第 τ 禁忌长度内, 不允许节点 y 插回路径 r . 禁忌长度取 10 个迭代步数. 算法步骤如下:

Step1: 令上述获得的解为当前解 x^{cur} 和最优解 x^{best} , 令禁忌表 $tabu_list = \emptyset$.

Step2: 依次检查路径中各节点的惩罚值 $C(i, j)$ (设 $i, j \in r$). 若 $C(i, j)$ 大于某一值 τ , 则实施下述 3 种操作: 1) 对节点 i 和 i 之前的相邻节点、节点 j 和 j 之后的相邻节点实施路径间 3-opt 操作; 2) 对节点 i 和节点 j 分别实施节点重置操作; 3) 从路径 $r (r \in V \setminus \{r\})$ 中选择一个宽度介于 i 和 j 之间, 厚度、硬度和时间属性与节点 i 和节点 j 都较近的节点 z , 将 z 插入到 i 和 j 之间. 上述操作产生的新解作为当前解的邻域 $N(x^{cur})$.

Step3: 若存在一个 $x^{cad} \in N(x^{cur})$ 优于最优解 x^{best} , 则忽视其禁忌特性, 用其替代当前解和最优解; 否则, 从 $N(x^{cur})$ 中选出一个满足禁忌要求的最好候选解 x^{cad} 作为当前解, 更新禁忌表, 迭代步数加

1.

Step4: 达到指定迭代步数后, 终止迭代; 否则, 转 Step2.

4 数值实验

为验证本文提出的模型与算法, 从某钢厂的实际生产数据中分别选取 110 和 320 块板坯进行实验, 板坯宽度、厚度、硬度跳跃惩罚系数采用文献[1]提供的惩罚函数表, 参数 $\alpha = 5, \beta = 10, M = 3000, \gamma = 100$. 在 110 块板坯实验组中, 取 200, 在 320 块板坯实验组中, 取 300. 实验结果表明, 所产生的初始解不但满足所有约束, 且惩罚值和车辆数均较小, 在质量较高的初始解的基础上, 应用基于禁忌的 k -opt 方法进一步优化解的质量, 最终结果优于遗传算法.

表 1 实验结果

| 板坯数 | 遗传算法 | | 约束满足 | | k -opt 最终结果 | | | |
|-----|-------|------|------|-------|---------------|-------|------|-----|
| | 惩罚值 | 时间 s | 计划数 | 惩罚值 | 改进比 % | 负荷率 % | 时间 s | |
| 110 | 5 282 | 281 | 2 | 4 987 | 4 602 | 7 | 91.6 | 210 |
| 320 | 7 934 | 383 | 3 | 7 278 | 6 930 | 4.7 | 92.8 | 322 |

5 结 论

热轧批量计划问题约束条件复杂, 求解困难. 因此将热轧批量计划问题转化为一个约束满足问题处理时, 可利用问题的约束条件修剪搜索空间, 降低计算复杂性, 在搜索问题答案的过程中, 通过实施赋值触发约束传播来保证解的可行性. 在已获得可行的轧制计划的基础之上, 应用基于禁忌的 k -opt 方法可进一步改善解的质量. 数值实验证明, 本文提出的模型和算法是有效的.

参考文献(References)

[1] Kosiba E D, Wright J R, Cobbs A E. Discrete event sequencing as a traveling salesman problem [J]. Computers in Industry, 1992, 19(2): 317-327.

[2] Lopez L, Carter W M, Gendreau M. The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach [J]. European J of Operational Research, 1998, 106(2): 317-335.

[3] Tang L, Liu Jiyin, Rong A, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in shanghai baoshan iron and steel complex[J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 267-282.

[4] 陈雄, 郭令忠, 徐心和. 轧制批量计划问题的模型及算法研究[J]. 信息与控制, 1997, 26(5): 382-387. (Chen X, Guo L Z, Xu X H. Model and algorithm for rolling batch planning [J]. Information and Control, 1997, 26(5): 382-387.)

(下转第 398 页)

- [2] Xu Z S, Da Q L. Method based on fuzzy linguistic sale and FLOWGA operator for decision-making problems [J]. J of Southeast University, 2003, 19(1) : 88-91.
- [3] 徐泽水. 基于模糊语言评估和 GIOWA 算子的多属性群决策方法 [J]. 系统科学与数学, 2004, 24(2) : 218-224.
(Xu Z S. Method based on fuzzy linguistic assessment and GIOWA operator in multi-attribute group decision-making [J]. J System Science and Mathematical Science, 2004, 24(2) : 218-224.)
- [4] Herrera F, Herrera-Viedma E. Linguistic decision analysis : Steps for solving decision problems under linguistic information [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115(1) : 67-82.
- [5] 王欣荣, 樊治平. 群决策中基于语言信息处理的一种理想点法 [J]. 中国管理科学, 2002, 10(6) : 84-87.
(Wang X R, Fan Z P. A TOPSIS method with linguistic information for group decision making [J]. Chinese J of Management Science, 2002, 10(6) : 84-87.)
- [6] 王欣荣, 樊治平. 一种基于语言评价信息的多指标群决策方法 [J]. 系统工程学报, 2003, 18(2) : 173-176.
(Wang X R, Fan Z P. Approach to multiple attribute group decision making with linguistic assessment information [J]. J of Systems Engineering, 2003, 18(2) : 173-176.)
- [7] Xu Z S. Uncertain linguistic aggregation operators based approach to multiple attribute group decision making under uncertain linguistic environment [J]. Information Sciences, 2004, 168(1-4) : 171-184.
- [8] Herrera F, Mart ez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(6) : 746-75.
- [9] Delgado M, Herrera F. A communication model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation for a distributed intelligent agent system on Internet [J]. Soft Computing, 2002, 6(3) : 320-328.
- [10] 李洪燕, 樊治平. 一种基于群体语言判断矩阵的群决策问题的二元语义解法 [J]. 系统工程, 2003, 21(5) : 104-108.
(Li H Y, Fan Z P. A decision making method for group linguistic judgment matrix based on two-tuple [J]. Systems Engineering, 2003, 21(5) : 104-108.)
- [11] 王坚强. 基于离差优化的信息不完全确定的多准则分类方法 [J]. 控制与决策, 2006, 21(5) : 513-516.
(Wang J Q. Multi-criteria classification approach with incomplete certain information base on optimizing deviation of categories [J]. Control and Decision, 2006, 21(5) : 513-516.)
- [12] Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty [J]. IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics, 1994, 24(1) : 1-18.

(上接第 393 页)

- [5] 张涛, 王梦光, 杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型和算法 [J]. 系统工程学报, 2000, 15(1) : 54-60.
(Zhang T, Wang M G, Yang J X. The model and algorithm for hot-milling batch planning with uncertain number [J]. J of System Engineering, 2000, 15(1) : 54-60.)
- [6] 李耀华, 王伟, 徐乐江, 等. 热轧生产轧制计划模型与算法研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20(3) : 275-279.
(Li Y H, Wang W, Xu L J, et al. Rolling paln model and algorithm in hot rolling plant [J]. Control and Decision, 2005, 20(3) : 275-279.)
- [7] Taillard E, Badeau P, Gendreau M, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows [J]. Trans Science, 1997, 31(1) : 170-186.
- [8] Dantzig G, Ramser J. The truck dispatching problem [J]. Management Science, 1959, 10(6) : 80-91.
- [9] Brailsford S C, Potts C N, Smith B M. Invited review : Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications [J]. European J of Operational Research, 1999, 119(3) : 57-581.
- [10] Baptiste P, Pape C L, Nuijten W. Constraint-based scheduling [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [11] Sadeh N, Fox M S. Variable and value ordering heuristics for job shop scheduling constraints satisfaction problem [J]. Artificial Intelligence, 1996, 86(11) : 455-480.
- [12] Suh M S, Lee A, Lee Y J, et al. Evaluation of ordering strategies for constraint satisfaction reactive scheduling [J]. Decision Support Systems, 1998, 22(4) : 187-197.