

· 前沿技术 ·

冷轧和热轧板材成品库存一体化匹配模型与方法研究

席 阳¹ 李铁克² 施灿涛²

(1. 北京服装学院 商学院 北京 100029; 2. 北京科技大学)

摘要:针对现代钢铁企业在面向订单(MTO)与面向库存(MTS)混合生产组织方式下库存匹配效率较低的问题,按照一体化计划的管理思想,建立了实现库存匹配重量最大化、匹配成本最小化的冷轧、热轧成品库存一体化匹配模型,该模型为多目标0-1规划模型。结合该问题的特点,利用约束规划的变量排序、值排序以及节点互换构建了启发式算法求解该模型,并通过实例仿真证明了模型与算法的有效性和可行性,可大幅提高实际生产的效率。

关键词:冷轧和热轧;库存匹配;变量选择;值选择;节点互换

中图分类号:TP29 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7059(2011)03-0014-05

Model and method for integrative optimization of inventory matching of the hot rolled coil and cold rolled coil

XI Yang¹ LI Tie-ke² SHI Can-tao²

(1. Business School Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, China;
2. University of Science and Technology Beijing)

Abstract: Dedicated for inventory matching in the modern mode of mixed MTO and MTS production planning and operation in steel enterprises, an integrative inventory matching model, which maximizes weight and minimizes cost of inventory matching of cold-rolled, hot-rolled products, is established and presented in this paper according to the integrative planning management idea. The model is a multi-objective 0-1 programming model. To obtain the solution of the model, a heuristic algorithm associated with the characteristics of the problem is constructed by using the variable ordering and the value ordering of constraint programming and the nodes swapping. A simulation example is given to illustrate effectiveness and feasibility of the model and the algorithm.

Key words: hot rolled and cold rolled; inventory matching; variable selection; value selection; node exchange

0 引言

以钢铁为代表的流程型企业由于受到大批量、连续化生产工艺的限制,大都采用面向订单(Make To Order, MTO)与面向库存(Make To Stock, MTS)的混合方式组织生产,来应对日益激

烈的市场竞争和多变的客户需求,这就不可避免地形成相当数量的余材——非订单库存产品,造成大量资金和空间的占用。高级计划排程系统(Advanced Planning System, APS)中的可用量承诺(Available To Promise, ATP),即库存匹配为解决这

收稿日期:2010-10-26; 修改稿收到日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70771008)

作者简介:席 阳(1979-),男,北京人,讲师,博士,主要研究领域为生产计划、仓储管理、供应链管理。

一问题提供了指导。它对订单进行预处理,利用库存中符合订单特征值的余材对客户订单需求做出及时和准确的反应,缩短交货提前期,保证订单承诺的准确性及订单履行的可靠性^[1-3]。

关于钢铁企业库存匹配的问题,国内外已有一些相关研究,但都集中于热轧成品的匹配问题,还未有将热轧和冷轧成品匹配统一考虑的研究。近年来,源自人工智能领域的约束满足技术已成为组合优化领域的又一研究热点^[4-7]。该技术具有灵活表达问题的约束、能利用变量之间的约束关系修剪搜索空间和降低求解计算量的优势,已在车间调度、运输工具路线优化、资源优化配置、批量计划等中得到应用。由于热轧钢卷既可以直接销售,又可以作为冷轧钢卷的原料,因此为了更好地满足客户多样化需求,本文根据钢铁一体化管理的思想,将原本独立的冷轧成品匹配和热轧成品匹配统一起来,提出冷轧、热轧成品库存一体化匹配方法,建立了最大化匹配重量和最小化匹配成本的多目标模型,并通过理想点法转化为单一目标,利用约束满足技术的约束传播机制、变量/值选择规则以及节点互换策略开发了启发式算法。

1 问题描述

通常客户订单的特征值包括钢材牌号、宽度、厚度、订货款、交货期等内容,本文考虑的订单的特征是交货期相近(可同时匹配),具有单一的牌号和规格,订货款远远大于成品的卷重,即每个订单需要用多个钢卷与之匹配。库存匹配的目标是在尽可能满足所有订单的前提下,力求最大化匹配重量,达到降低库存水平的目的,同时还要最小化各种匹配成本,提高库存匹配整体期望收益。

热轧订单只能由特征值相同或相近的热轧成品进行匹配,冷轧订单既可以用特征值相同或相近的冷轧成品匹配,也可以用符合工艺路线的热轧钢卷匹配,库存匹配是面向整个订单池和库存产品进行的,因而增加了问题的复杂性。本文把同种类型的订单和钢卷的匹配称之为同型匹配(包括热轧订单-热轧钢卷,冷轧订单-冷轧钢卷),而把不同种类型的订单和钢卷的匹配称之为异型匹配(包括冷轧订单-热轧钢卷)。

为了使问题具有代表性和实际意义,本文假设进行库存匹配的钢卷,其宽度和厚度必须与匹配的订单相符,异型匹配时还要满足工艺要求(如

冷轧切边),钢材牌号不低于订单要求。

在库存匹配过程中,除了订单与钢卷的特征值完全相同之外,都会产生附加的库存匹配成本,具体包括如下两种情况:

(1) 同种类型的“以好充次”匹配时的替代损失成本。当成品的特征值无法完全满足订单时,可以用较高级别的牌号“以好充次”匹配订单的低级别牌号需求,因此这里有个替代损失成本。为此定义一个替代损失矩阵 R 来度量单位重量钢卷的匹配损失。

$$R = \{r_{ab} | a, b = 1, 2, \dots, n\}$$

式中 r_{ab} 为匹配时的单位钢卷重量惩罚值; a 为待匹配钢卷的牌号; b 为订单要求的牌号。

$$\text{其中 } r_{ab} = \begin{cases} 0 & a = b \text{ 匹配} \\ r_{ab} & a \neq b \text{ 匹配} \\ \infty & \text{不能匹配} \end{cases}$$

当 $a = b$ 时,表示同级钢种的钢卷匹配,订单的匹配损失为 0; 当钢种为 a 的钢卷匹配钢种需求为 b 的订单时,订单的匹配损失由企业自定; 当钢种为 a 的钢卷不能与钢种需求为 b 的订单匹配时,匹配损失成本为无穷大。

(2) 冷轧订单由热轧钢卷匹配时产生的加工成本。

以上两种附加成本为库存匹配的成本,库存一体化匹配的目标之一就是库存匹配成本最小化。

2 模型的建立

$$\max F_1 = \sum_{i \in O^h} \sum_{j \in \Omega_i^h} (x_{ij}^{hh} \omega_j^h) + \sum_{i \in O^c} \sum_{j \in \Omega_i^c} (y_{ij}^{cc} \omega_j^c) + \sum_{i \in O^c} \sum_{j \in \Omega_i^{ch}} (z_{ij}^{ch} \omega_j^h \eta_{ij}^{ch}) \quad (1)$$

$$\max F_2 = \sum_{i \in O^h} \sum_{j \in \Omega_i^h} (x_{ij}^{hh} r_{ij}^{hh} \omega_j^h) + \sum_{i \in O^c} \sum_{j \in \Omega_i^c} (y_{ij}^{cc} r_{ij}^{cc} \omega_j^c) + \sum_{i \in O^c} \sum_{j \in \Omega_i^{ch}} (z_{ij}^{ch} p_{ij}^{ch} \omega_j^h \eta_{ij}^{ch}) \quad (2)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in \Omega_i^h} (x_{ij}^{hh} \omega_j^h) \leq G_i^h, \forall i \in O^h \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Omega_i^c} (y_{ij}^{cc} \omega_j^c) + \sum_{j \in \Omega_i^{ch}} (z_{ij}^{ch} \omega_j^h \eta_{ij}^{ch}) \leq G_i^c, \forall i \in O^c \quad (4)$$

$$\sum x_{ij}^{hh} + \sum z_{ij}^{ch} \leq 1, \forall j \in U^h \quad (5)$$

$$\sum y_{ij}^{cc} \leq 1, \forall j \in U^c \quad (6)$$

$$x_{ij}^{hh} \in \{0, 1\}, y_{ij}^{cc} \in \{0, 1\}, z_{ij}^{ch} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$PS(j) \geq OS(i), \forall j \in \Omega_i^c \cup \Omega_i^c \cup \Omega_i^{ch}, \forall i \in O^c \cup O^h \quad (8)$$

$$PT(j) \cong OT(i), \forall j \in \Omega_i^c \cup \Omega_i^h \cup \Omega_i^{ch}, \\ \forall i \in O^c \cup O^h \quad (9)$$

$$PW(j) \cong OW(i), \forall j \in \Omega_i^c \cup \Omega_i^h \cup \Omega_i^{ch}, \\ \forall i \in O^c \cup O^h \quad (10)$$

上述式中 F_1, F_2 为目标函数; i 为订单编号; O^h 为热轧订单集合; O^c 为冷轧订单集合; j 为库存成品钢卷编号; U^h 为热轧库存成品集合; U^c 为冷轧库存成品集合; Ω_i^h 为特征值满足热轧订单 i 要求的热轧成品钢卷集合, $\Omega_i^h \subseteq U^h$; Ω_i^c 为特征值满足冷轧订单 i 要求的冷轧成品钢卷集合, $\Omega_i^c \subseteq U^c$; Ω_i^{ch} 为能被加工成符合冷轧订单 i 要求的热轧钢卷集合, $\Omega_i^{ch} \subseteq U^h$ 。不区分热轧、冷轧生产类型的参数: $PS(j)$ 为钢卷 j 具备的牌号; $OS(i)$ 为订单 i 要求的牌号; $PT(j)$ 为钢卷 j 具备的厚度; $OT(i)$ 为订单 i 要求的厚度; $PW(j)$ 为钢卷 j 具备的宽度; $OW(i)$ 为订单 i 要求的宽度。区分热轧、冷轧生产类型的参数: ω_j^h 为热轧钢卷 j 的重量; ω_j^c 为冷轧钢卷 j 的重量; η_{ij}^{ch} 为热轧库存成品 j 匹配冷轧订单 i 时的利用率; r_{ij}^{hh}, r_{ij}^{cc} 分别为热轧、冷轧同型成品匹配的单位成本; p_{ij}^{ch} 为热轧成品 j 匹配到冷轧订单 i 的单位加工成本; G_i^h 为热轧订单 i 的订货重量; G_i^c 为冷轧订单 i 的订货重量。决策变量:

$$x_{ij}^{hh} = \begin{cases} 1 & \text{热轧成品 } j \text{ 匹配到热轧订单 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ y_{ij}^{cc} = \begin{cases} 1 & \text{冷轧成品 } j \text{ 匹配到冷轧订单 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ z_{ij}^{ch} = \begin{cases} 1 & \text{热轧成品 } j \text{ 匹配到冷轧订单 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

目标函数(1)表示最大化库存匹配的成品重量;目标函数(2)表示最小化库存匹配的成本;约束(3)和(4)分别表示热轧冷轧库存成品实际匹配的重量不能超过订单的订货量;约束(5)表示一个热轧钢卷只能匹配到一个订单中;约束(6)表示一个冷轧钢卷只能匹配到一个订单中;约束(7)表示变量的取值范围;约束(8)表示匹配时钢卷的牌号必须和订单要求牌号处在同一序列,且不低于订单要求;约束(9)和(10)分别表示匹配的钢卷厚度、宽度符合订单规定厚度和宽度要求,其中 \cong 表示同型订单与匹配的钢卷的规格完全一致,异型订单与匹配的钢卷的规格符合加工公差要求。

3 模型的求解算法

3.1 目标函数的集成

库存一体化匹配数学模型属于多目标 0-1 规

划模型,在求解过程中两个目标函数可能发生冲突而难以协调,并且不同的决策者对两个目标函数的评价通常是模糊的。为了更好地验证解的有效性,需要把两个目标统一起来,为此本文采用理想点法集成两个目标函数。

假设 F_1^* 是目标函数(1)的理想点,令 $F_1^* = \sum_{i \in O^h} G_i^h + \sum_{i \in O^c} G_i^c$ 表示冷轧、热轧订单的订货重量之和; F_2^* 是目标函数(2)的理想点,令 $F_2^* = 0$ 表示期望的匹配成本为零,即没有附加匹配成本。集成后的单目标函数为

$$\min U = \sqrt{|F_1^* - F_1|^2 + |F_2|^2} \quad (11)$$

通过以上公式变换,将多目标规划转换为单目标优化问题,以便求出最优解。

3.2 算法的基本思想

库存一体化匹配问题本质上是多背包问题,具有 NP 难的求解特性,为了减少计算量并在有限的时间内得到满意解,首先利用约束满足的一致性技术修剪搜索空间,即基于值域最小的变量选择规则,然后利用基于成本最小的值选择规则构造一个初始解,最后利用基于节点互换的广度搜索策略进一步改善解的质量。

(1) 基于值域最小的变量选择规则。定义订单关键系数 $KC(i) = \sum_{j \in \Omega_i} \omega_j / G_i$ 为变量选择指标,其中 $\sum_{j \in \Omega_i} \omega_j$ 为特征值满足订单 i 约束的钢卷总重量, G_i 为订单 i 的订货重量,则热轧订单关键系数 $KC(i^h) = \sum_{j \in \Omega_i^h} \omega_j^h / G_i^h$,冷轧订单关键系数 $KC(i^c) = (\sum_{j \in \Omega_i^c} \omega_j^c + \sum_{j \in \Omega_i^{hc}} \omega_j^h \eta_{ij}^{ch}) / G_i^c$ 。根据定义可知,关键度反映变量的值域空间, $KC(i) \in [0, +\infty)$, $KC(i)$ 的取值越大说明订单的关键度越低,变量选择规则要求优先选择关键度较高的订单进行库存匹配。

(2) 基于成本最小的值选择规则。根据值域最小的变量选择规则选出订单后,在该订单对应的可匹配钢卷集合中,搜索匹配成本最低的钢卷,将该钢卷指定给变量选择规则得出的订单,同时更新所有相关集合。

(3) 基于节点互换的广度搜索策略。通过变量选择和值选择规则可以找到同类型库存匹配的一个近优解,在此基础上利用节点互换算法(Node-Exchange Algorithm, NEA)进行异型库存匹配(将热轧钢卷匹配给冷轧订单),进一步改善目标值,以便获得满意解。由于仅有冷轧订单存在异型匹配的情况,因此本文采用的节点互换算法

并非是遍历方式的,而是仅针对冷轧订单的。为保证搜索效率以及节点互换后获得可行解,本文算法优先匹配未匹配率(用未匹配重量除以订货重量)最大的冷轧订单,并且在每次节点互换后计算目标函数值,最后仅保留具有最优解的库存匹配结果。

3.3 算法描述

根据上述思想,可以将库存一体化匹配的求解算法具体描述如下:

Step1 初始化订单变量信息、值域和未匹配率。

Step2 热轧同型匹配:

(1) 将热轧 $KC(i^h)$ 由小到大排序,在未匹配订单且 $KC(i^h) \neq 0$ 中选择取值最小的订单 i^{h*} ,若对 $\forall i^h \in O^h$ 都有 $KC(i^h) = 0$,则转 Step3,否则转 (2);

(2) 根据选择的热轧订单 i^{h*} ,在特征值满足该订单的热轧成品集合 $\Omega_{i^{h*}}^h$ 中,依次挑选匹配成本最低的热轧钢卷 j^h ,将其匹配给该订单,直至满足订货量或者 $\Omega_{i^{h*}}^h = \emptyset$ 时为止(\emptyset 表示空集),更新其未匹配率,并计算该订单中的匹配重量和匹配成本;

(3) 若所有热轧订单都被同型匹配过,则转 Step3,否则转 Step2。

Step3 冷轧同型匹配:

(1) 将冷轧 $KC(i^c)$ 由小到大排序,在未匹配订单且 $KC(i^c) \neq 0$ 中选择取值最小的订单 i^{c*} ,若对 $\forall i^c \in O^c$ 都有 $KC(i^c) = 0$,则转 Step4,否则转 (2);

(2) 根据选择的冷轧订单 i^{c*} ,在特征值满足该订单的冷轧成品集合 $\Omega_{i^{c*}}^c$ 中,依次挑选匹配成本最低的冷轧钢卷 j^c ,将其匹配给该订单,直至满足订货量或 $\Omega_{i^{c*}}^c = \emptyset$ 时为止,更新其未匹配率,并计算该订单的匹配重量和匹配成本;

(3) 若所有冷轧订单都被同型匹配过,则转 Step4,否则转 Step3。

Step4 根据式(11)计算目标函数值 U ,并令 $U_{best} = U$ (U_{best} 为当前的最优值)。

Step5 冷轧异型匹配:

(1) 在未进行异型匹配的冷轧订单中,选择未匹配率最大冷轧订单 $i^{c'}$;

(2) 在可满足该订单的热轧成品集合 Ω_i^{ch} 中,依次将匹配成本最小的热轧钢卷(未指定订单)匹

配给订单 $i^{c'}$,更新匹配重量。当匹配量小于订货量,则计算目标值 U' ,若 $U' \leq U_{best}$,则令 $U_{best} = U'$ 并保留匹配结果,转(2),否则取消此次匹配,转(3);

(3) 对冷轧订单 $i^{c'}$ 应用节点互换策略,依次选择匹配成本较大的冷轧成品并用 Ω_i^{hc} 中的热轧成品替代,即取消将冷轧成品指定给订单 $i^{c'}$,而将可行集中的热轧成品指定给该订单,对于热轧成品原来匹配的热轧订单需要重新进行同型匹配,计算目标值 U' ,若 $U' \leq U_{best}$,则令 $U_{best} = U'$ 并保留匹配结果,否则取消此次匹配,重新应用节点互换,直至所有匹配的冷轧成品均进行过异型匹配时,转 Step5,选择下一个冷轧订单。若所有冷轧订单都进行了异型匹配,则转 Step6。

Step6 算法结束。

4 仿真实验

为了验证该算法的有效性和实用性,本文利用某大型钢厂的实际库存匹配数据进行仿真模拟。根据库存一体化匹配的要求,选取热轧和冷轧各 5 个订单(如表 1 所示),热轧和冷轧成品卷共 121 个(如表 2 所示)。

表 1 订单信息

Table 1 Information of custom orders

订单编号	类型	订单量/t	牌号	规格/(mm×mm)
0	热轧	160	SPHC	1 250×2.0
1	热轧	120	SPHD	1 250×2.0
2	热轧	150	SPHE	1 250×2.0
3	热轧	170	SPHC	1 550×3.0
4	热轧	150	SPHD	1 550×3.0
5	冷轧	90	SPCC	1 780×1.5
6	冷轧	80	SPCD	1 780×1.5
7	冷轧	125	SPCC	1 210×0.4
8	冷轧	160	SPCD	1 210×0.4
9	冷轧	110	SPCE	1 210×0.4

表 2 库存钢卷统计信息

Table 2 Statistics information of products in stock

类型	牌号规格/(mm×mm)	总重/t	数量/卷	钢卷编号
热轧	SPHC 1 250×2.0	313.9	15	$J_1 J_2 \cdots J_{15}$
热轧	SPHD 1 250×2.0	308.0	14	$J_{16} J_{17} \cdots J_{29}$
热轧	SPHE 1 250×2.0	284.3	13	$J_{30} J_{31} \cdots J_{42}$
热轧	SPHC 1 550×3.0	242.4	11	$J_{43} J_{44} \cdots J_{53}$
热轧	SPHD 1 550×3.0	237.5	11	$J_{54} J_{55} \cdots J_{64}$
冷轧	SPCC 1 780×1.5	222.1	10	$J_{65} J_{66} \cdots J_{74}$
冷轧	SPCD 1 780×1.5	196.7	9	$J_{75} J_{76} \cdots J_{83}$
冷轧	SPCC 1 210×0.4	268.3	12	$J_{84} J_{85} \cdots J_{95}$
冷轧	SPCD 1 210×0.4	270.8	12	$J_{96} J_{97} \cdots J_{107}$
冷轧	SPCE 1 210×0.4	311.2	14	$J_{108} J_{109} \cdots J_{121}$

订单中包含异型匹配的对应关系(如牌号为 SPHC、规格为 1 250 mm×2.0 mm 的热轧钢卷可匹配牌号为 SPCC、规格为 1 210 mm×0.4 mm 的冷轧订单)。为了简化运算,取参数 $\eta_{ij}^{ch} = 1$ (即热轧成品匹配冷轧订单时利用率取 1) $\rho_{ij}^{ch} = 2$ (即热轧成品匹配冷轧订单时单位加工成本取 2) $r_{11}^{hh} = r_{11}^{cc} = 0$ $r_{12}^{hh} = r_{12}^{cc} = 1$ $r_{13}^{hh} = r_{13}^{cc} = 2$ (分别表示同型匹配时,等级相同、高一个等级、高两个等级的单位匹配成本,其他情况不可匹配)。

算法程序用 Delphi 7 编写,在 CPU P4 2.93 GHz, RAM 512 MB 的计算机上进行测试,通过该测试在 1 s 内得到一体化匹配结果,如表 3 所示。为了进一步显示一体化匹配的优势,对测试数据采用企业现行的成品匹配方法(仅有同型匹配)进行匹配,将所得结果与一体化匹配的结果进行对比,如表 4 所示。

表 3 匹配结果

Table 3 Match results of given orders and products

订单编号	匹配钢卷	匹配重量/t
0	$J_1 J_2 \cdots J_8$	150.0
1	$J_{15} J_{16} \cdots J_{19}$	115.8
2	$J_{29} J_{30} \cdots J_{34}$	142.9
3	$J_{42} J_{43} \cdots J_{48}$	162.2
4	$J_{53} J_{54} \cdots J_{60}$	148.5
5	$J_{64} J_{65} \cdots J_{70}$	89.2
6	$J_{74} J_{75} J_{76}$	77.2
7	$J_{11} J_{83} J_{84} \cdots J_{87}$	114.0
8	$J_{23} J_{24} J_{95} J_{96} \cdots J_{100}$	159.7
9	$J_{40} J_{107} J_{108} \cdots J_{110}$	109.8

表 4 库存匹配结果的比较

Table 4 Comparison of the algorithms performance

匹配方法	匹配总重量/t	目标值	热轧匹配重量/t	冷轧匹配重量/t	匹配成本
一体化匹配	1 269.3	76.942	709.9	559.4	61.4
常规匹配	1 227.9	87.099	689.0	538.9	0

根据表 1 可知订单总重量为 1 315 t,热轧订单总重为 750 t,冷轧订单总重为 565 t,从表 4 的对比结果可知,不论在匹配重量还是在目标值上,利用约束规划方法建模并求解库存一体化匹配比现行的库存匹配方法具有较强的优势,能够更好地满足订单,提高交货效率,虽然有一定的匹配成本发生,但是管理者可以利用这个成本来权衡安排生产和成品匹配两种方案的优劣,以便做出正确的决策。

5 结论

库存匹配是 APS 订单排产阶段的核心问题之一,也是现代钢铁企业制定生产作业计划的前提和基础。本文根据现代钢铁一体化计划管理的思想,提出了热轧、冷轧成品库存一体化匹配的建模方法,通过同型匹配和异型匹配的有效结合,有效利用库存余材,以最小化匹配成本实现匹配重量最大化,结合问题的特点,利用约束规划的变量排序、值排序规则和节点互换策略构建了求解算法,最后通过仿真实验验证了模型的可行性和算法的有效性。该研究可推广到其他流程工业中,为解决同类问题提供借鉴。

参考文献:

[1]姬小利,孟凡丽.面向供应链的 ATP 系统分析与计算[J].工业工程与管理,2009,14(3):50-54.
JI Xiao-li,MENG Fan-li. Analysis and calculation of an ATP system for supply chain[J]. Industrial Engineering and Management,2009,14(3):50-54.

[2]Rajagopalan S. Make to order or make to stock: model and application [J]. Management Science,2002,48(2):241-256.

[3]Trumbo M,Kalagnanam J, Lee H. IBM research report: a solution architecture for inventory application problems in the steel industry[R]. Unpublished Results,1998.

[4]Cesta A, Oddi A, Smith S F. A constraint-based method for project scheduling with time windows [J]. Journal of Heuristics,2002,8(1):109-136.

[5]Dechter R, Frost D. Backjump-based backtracking for constraint satisfaction problems [J]. Artificial Intelligence,2002,136(2):147-188.

[6]上官春霞,周泓,师瑞峰,等.作业车间排序重调度问题及其改进修复约束满足算法[J].计算机集成制造系统,2008,14(9):1 742-1 751.
SHANGGUAN Chun-xia,ZHOU Hong,SHI Rui-feng, et al. Flow shop rescheduling problem and its improved repair-based constraint satisfaction algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2008,14(9):1 742-1 751.

[7]李铁克,郭冬芬.基于约束满足的热轧批量计划模型与算法[J].控制与决策,2007,22(4):389-393.
LI Tie-ke, GUO Dong-fen. Model and algorithm for hot-rolling batch plan based on constraint satisfaction [J]. Control and Decision,2007,22(4):389-393.

[编辑:薛 朵]