

文章编号: 1001-0920(2009)10-1467-06

加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题研究

俞胜平, 庞新富, 柴天佑, 郑秉霖

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 针对炼钢连铸生产过程中存在的加工时间不确定性问题, 采用三角模糊数表示不确定性加工时间信息, 引入 4 种模糊运算, 建立了问题的模糊规划调度模型. 采用“中间值最大隶属度”的算法, 将模糊规划调度模型转化为非线性规划模型, 并在多重精炼工序、多机并行条件下, 应用遗传算法求解最小完成时间. 最后, 利用实际生产数据的仿真实验表明了模型与算法的有效性.

关键词: 炼钢连铸; 生产调度; 不确定性; 模糊优化; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on production scheduling for steelmaking and continuous casting with processing time uncertainty

YU Sheng-ping, PANG Xin-fu, CHAI Tian-you, ZHENG Bing-lin

(Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: YU Sheng-ping, E-mail: spyu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Uncertain processing time is denoted by triangular fuzzy number in order to deal with uncertain processing time in the steelmaking and continuous casting production process. Four fuzzy operators are introduced, and fuzzy programming model is established, which is then transformed into nonlinear programming model by using the algorithm of maximizing the membership function of middle value. An genetic algorithm is presented to minimize the makespan under the multi-refining process and multi-parallel machines. The simulation results show the effectiveness of the proposed model and algorithm by online data.

Key words: Steelmaking and continuous casting; Production scheduling; Uncertainty; Fuzzy optimization; Genetic algorithm

1 引言

在全球钢铁行业竞争日趋激烈的形势下, 钢铁企业的生产管理日益受到重视. 炼钢连铸是钢铁生产的主要工序, 其生产调度水平的高低直接关系到整个企业的生产效率和生产效益. 目前, 对于炼钢连铸生产调度问题的研究主要涉及到对可用共享资源(包括设备、原料等)的分配和对加工任务的排序^[1-4], 这些研究假设加工时间是确定的, 是一种静态条件下的生产调度. 而事实上, 由于各种随机因素, 如机器故障、操作工人的熟练程度、环境参数等的影响, 只能得到加工时间的一个大概数据以及数据的可能变化范围, 很少能获得精确的加工时间. 因此, 将加工时间按模糊数处理更加符合生产实际, 更能保证调度的可行性.

目前, 对不确定因素下调度的研究还不多, 在理论研究方面, Mignon 等人^[5]给出了调度鲁棒性和调度性能的定义. 在应用研究方面, 主要集中在加工时间不确定下的调度问题; 在建模方面, 主要集中于 flow shop 调度问题, 而对于 job shop 的研究很少. 在不确定性因素的描述上, 主要采用随机变量和模糊数学方法. 随着模糊数学的发展, 模糊数学规划的思想被运用到调度领域, 模糊调度成为非确定性调度的一个重要分支^[6]. 局域搜索方法之一的遗传算法有优良的计算性能和显著的应用效果, 在工业工程、经济管理、交通运输、工业设计等领域得到了广泛应用^[7]. 文献^[8, 9]研究了模糊加工时间和模糊交货期的作业车间调度问题, 并用遗传算法进行求解.

本文针对炼钢连铸生产实际过程中的加工时间

收稿日期: 2008-10-06; 修回日期: 2008-12-24.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534010); 高等学校学科创新引智计划项目(B08015).

作者简介: 俞胜平(1976—), 男, 浙江湖州人, 讲师, 博士生, 从事生产计划与调度等研究; 柴天佑(1947—), 男, 兰州人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、多变量智能解耦控制的研究.

不确定性,采用三角模糊数表示不确定性加工时间信息,并引入 4 种模糊运算.此外,建立了解决不确定加工时间下的炼钢连铸生产调度问题的模糊规划模型,并采用“中间值最大隶属度”的算法将模糊规划调度模型转化为非线性规划模型,应用遗传算法进行最优调度的求解.仿真实验结果表明,该模型和算法能适用于加工时间不确定条件下的炼钢连铸调度.

2 问题描述和模型建立

2.1 问题描述

本文考虑的炼钢连铸生产调度包括炼钢-精炼-连铸 3 大工序,计划的精炼工序阶段总数相同,且在相同阶段的精炼类型一致.每个阶段存在多台并行设备可用,属于多阶段、并行机的混合 flow shop 问题.其中计划在连铸工序的加工设备和在设备上的加工顺序,以及连铸开浇时间已知.该问题具体描述为:设有 n 条计划按照各自的加工路线在 s_i 道工序 (Z_1, Z_2, \dots, Z_{s_i}) 上加工,计划所在的每道工序有 $m_{ij} \geq 1 (j = 1, 2, \dots, s_i)$ 台并行设备可用.每个计划的第 $k (k = 1, 2, \dots, s_i - 1)$ 道工序可在该道工序的任一并行机上被加工.调度任务是,确定计划在每道工序 ($1, 2, \dots, s_i - 1$) 的加工设备和各设备上计划的加工顺序和作业开始/结束时间,问题的目标是 minimized 最大完成时间.其生产工艺流程如图 1 所示.

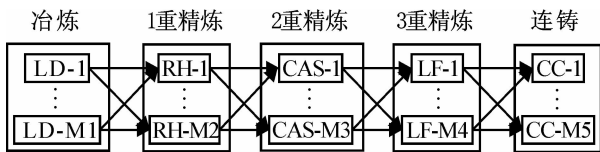


图 1 炼钢连铸生产工艺流程示意图

在炼钢连铸生产过程中,由于作业过程受诸多随机因素的影响,只能得到计划 i 的某道工序 j 在某台机器 k 上加工时间的一个大概数据,以及数据的可能变化范围,一般采用标准加工时间、最短加工时间和最长加工时间来表示.为此,加工时间正好采用一个三角形模糊数 $\tilde{p}_{ijk} (p_{ijk}^L, p_{ijk}^M, p_{ijk}^U)$ 来表示.也就是说,模糊加工时间的最可能值为 p_{ijk}^M (标准加工时间),乐观值为 p_{ijk}^L (最短加工时间),悲观值为 p_{ijk}^U (最长加工时间).其隶属函数 $\mu_{ijk}(x)$ 表示计划 i 的工序 j 在机器 k 上模糊加工时间的可能性度量,如图 2 所示,即

$$\mu_{ijk}(x) = \begin{cases} 0, & x < p_{ijk}^L, x > p_{ijk}^U; \\ \frac{x - p_{ijk}^L}{p_{ijk}^M - p_{ijk}^L}, & p_{ijk}^L \leq x \leq p_{ijk}^M; \\ \frac{p_{ijk}^U - x}{p_{ijk}^U - p_{ijk}^M}, & p_{ijk}^M < x \leq p_{ijk}^U. \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 为模糊加工时间的可能值.

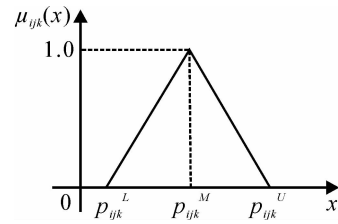


图 2 三角模糊数的隶属度函数

在模糊调度中,模糊数的加法、减法、取大、取小和比较操作很关键.加法运算用于计算所有计划在连铸机上的加工开始和结束时间,减法运算用于设备冲突解除、计算总完工时间和计算所有计划在非连铸工序的加工开始和结束时间.取大操作用于确定计划在连铸机上的最晚加工结束时间,取小操作用于确定计划在冶炼工序的最早加工开始时间.

两个模糊数相加时,采用模糊加算子^[10],即:如果 $\tilde{A} = (a^1, a^2, a^3), \tilde{B} = (b^1, b^2, b^3)$,则有

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a^1, a^2, a^3) + (b^1, b^2, b^3) = (a^1 + b^1, a^2 + b^2, a^3 + b^3). \quad (2)$$

为避免无意义的负值完成时间,采用如下模糊减算子^[11]:

$$\tilde{B} - \tilde{A} = (\min(\min(b^2 - a^2, b^3 - a^3), b^1 - a^1), \min(b^2 - a^2, b^3 - a^3), \min(0, b^3 - a^3 - (b^2 - a^2))) + \max(b^2 - a^2, b^3 - a^3). \quad (3)$$

两个模糊数的模糊取大、取小操作采用如下算子^[12]:

$$\tilde{\max}(\tilde{A}, \tilde{B}) = (\max(a^1, b^1), \max(a^2, b^2), \max(a^3, b^3)), \quad (4)$$

$$\tilde{\min}(\tilde{A}, \tilde{B}) = (\min(a^1, b^1), \min(a^2, b^2), \min(a^3, b^3)). \quad (5)$$

两个模糊数的比较采用文献[9]提出的如下 3 条准则:

准则 1 根据 C_1 值的大小比较两个模糊数的大小,有

$$C_1(\tilde{A}) = (a^1 + 2a^2 + a^3)/4. \quad (6)$$

准则 2 如果两个模糊数的 C_1 值相等,则根据 C_2 值的大小来比较,有

$$C_2(\tilde{A}) = a^2. \quad (7)$$

准则 3 若两个模糊数的 C_1, C_2 值均相等,则根据 C_3 值的大小来比较,有

$$C_3(\tilde{A}) = a^3 - a^1. \quad (8)$$

2.2 问题变量

具体的问题变量如下:

i : 炉次序号;

Ω : 炉次集合, $i \in \Omega, |\Omega|$ 为炉次总数;

n : 浇次号, N 为浇次数, $n = 1, 2, \dots, N$;
 Ω_n : 第 n 个浇次中的炉次集合, $\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_N = \Phi$ 且 $\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_N = \Omega$;
 Ω_0 : 浇次中的第 1 个炉次集合;
 s : 工序阶段总数;
 j : 工序序号;
 Θ_i : 炉次 i 的工序集合;
 m_{ij} : 炉次 i 的工序 j 的设备总数;
 M_{ij} : 炉次 i 的工序 j 的设备集合, $M_{ij} = \{1, 2, \dots, m_{ij}\}$;
 k : 工序内的设备序号, $1 \leq k \leq m_{ij}$;
 \tilde{S}_n : 浇次 n 的开浇时间, $n = 1, 2, \dots, N$;
 \tilde{p}_{ijk} : 炉次 i 在工序 j 的机器 k 上的加工时间, 包括起吊时间、传输时间、卸装时间及处理时间, 是在一定区间变化的不确定量, 采用三角模糊数表示;
 \tilde{s}_{ijk_l} : 炉次 i 在工序 j 的机器 k 上的加工开始时间, 也为模糊数;
 \tilde{e}_{ijk_l} : 炉次 i 在工序 j 的机器 k 上的加工结束时间, 也为模糊数;
 ajt_{cast} : 浇次之间的间隔时间;
 D_i : 炉次 i 的加工顺序集, $D_i = \{d_{i1}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{is_i}\}$, $i \in \Omega$, 其中 $d_{ij} \in M_{ij}$ 为炉次 i 的第 j 道工序所需的生产设备;
 O_k : 机器 k 上操作的炉次顺序集, $O_k = \{o_{k1}, \dots, o_{kl}, \dots, o_{kq}\}$, 其中 $o_{kl} \in \Omega$ 为生产设备 k 上第 l 个加工的炉次计划, q 为机器 k 上操作的炉次总数.

2.3 模型建立

在实际的钢铁生产过程中, 需要考虑热轧的生产需要, 因此会给出连铸开浇的时间, 以满足连铸与热轧的匹配关系. 在本文的炼钢连铸生产调度问题中, 计划在连铸工序的加工设备和在设备上的加工顺序, 以及连铸开浇时间均已知, 因此, 需要从连铸工序开始, 逆序计算计划在各工序的加工开始和结束时间.

1) 当 $j = s, l = 1$ 时, 浇次 n 的第 1 个计划在连铸工序的加工开始时间等于浇次的开浇时间, 即

$$\tilde{s}_{isk_l} = \tilde{S}_n, i \in \Omega_n \cap \Omega_0. \quad (9)$$

2) 当 $j = s, l \neq 1$ 时, 连铸机上不是第 1 个计划的加工开始时间等于该连铸机上前一个计划的加工结束时间, 满足连续浇铸的要求, 有

$$\tilde{s}_{isk_l} = \tilde{e}_{O_{k,l-1}, s, k_{l-1}}. \quad (10)$$

3) 当 $j = s$ 时, 连铸机上每个计划的加工结束时间等于计划的加工开始时间加上计划的加工时间, 即

$$\tilde{e}_{ijk} = \tilde{s}_{ijk} + \tilde{p}_{ijk}. \quad (11)$$

4) 当 $j \neq s, l = q$ 时, 每个非连铸设备的最后一

个计划的加工结束时间等于该计划下一工序的加工开始时间, 即

$$\tilde{e}_{ijk_l} = \tilde{s}_{i,j+1,d_{i,j+1}}. \quad (12)$$

5) 当 $j \neq s, l \neq q$ 时, 炉次 i 在非连铸工序 j 的机器 k 上(不是最后一个加工)的加工结束时间, 决定于炉次 i 的后一工序操作和机器 k 上进行的后一操作的完成时间中的最小值, 即

$$\tilde{e}_{ijk_l} = \min\{\tilde{s}_{i,j+1,d_{i,j+1}}, \tilde{s}_{O_{k,l+1},j,k_{l+1}}\}. \quad (13)$$

其中: $\tilde{s}_{i,j+1,d_{i,j+1}}$ 为炉次 i 在工序 $j+1$ 的加工开始时间, $\tilde{s}_{O_{k,l+1},j,k_{l+1}}$ 为机器 k 上第 $l+1$ 个加工计划的开始时间.

6) 当 $j \neq s$ 时, 每个计划在非连铸工序上的加工开始时间等于计划在该工序的加工结束时间减去加工时间, 即

$$\tilde{s}_{ijk} = \tilde{e}_{ijk} - \tilde{p}_{ijk}. \quad (14)$$

7) 总的完工时间为

$$\tilde{f} = \max(\tilde{e}_{isk}) - \min(\tilde{s}_{i1k'}). \quad (15)$$

8) 目标函数的最小化完成时间为

$$\min(\tilde{f}). \quad (16)$$

2.4 模型转化

以上建立了加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题的非线性模糊规划模型, 对于模糊规划常用的解决思想是, 运用某种数学和实际应用中可行变换方法, 将其转化为清晰的规划问题求解^[13]. 引用文献[14]提出的“中间值最大隶属度”的算法, 将本文的非线性模糊规划模型转化为清晰的单目标非线性规划模型, 具体方法如下:

1) 将原模糊模型转化为清晰的多目标非线性规划, 记

$$\begin{cases} \max Z_1 = f^M - f^L, \\ \min Z_2 = f^M, \\ \min Z_3 = f^U - f^M. \end{cases} \quad (17)$$

2) 采用 Zimmermann 方法求得 $Z_i (i = 1, 2, 3)$ 的正、负理想值分别为

$$\begin{cases} Z_1^{\text{PIS}} = \max\{f^M - f^L\}, \\ Z_2^{\text{PIS}} = \min\{f^M\}, \\ Z_3^{\text{PIS}} = \min\{f^U - f^M\}, \\ Z_1^{\text{NIS}} = \min\{f^M - f^L\}, \\ Z_2^{\text{NIS}} = \max\{f^M\}, \\ Z_3^{\text{NIS}} = \max\{f^U - f^M\}. \end{cases} \quad (18)$$

则 $Z_i (i = 1, 2, 3)$ 的隶属度函数为

$$\mu_{z_1}(x) = \begin{cases} 0, & x < Z_1^{\text{NIS}}; \\ \frac{x - Z_1^{\text{NIS}}}{Z_1^{\text{PIS}} - Z_1^{\text{NIS}}}, & Z_1^{\text{NIS}} \leq x \leq Z_1^{\text{PIS}}; \\ 1, & x > Z_1^{\text{PIS}}; \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{z_2}(x) = \begin{cases} 1, & x < Z_2^{\text{PIS}}; \\ \frac{Z_2^{\text{NIS}} - x}{Z_2^{\text{NIS}} - Z_2^{\text{PIS}}}, & Z_2^{\text{PIS}} \leq x \leq Z_2^{\text{NIS}}; \\ 0, & x > Z_2^{\text{NIS}}; \end{cases} \quad (20)$$

$$\mu_{z_3}(x) = \begin{cases} 1, & x < Z_3^{\text{PIS}}; \\ \frac{Z_3^{\text{NIS}} - x}{Z_3^{\text{NIS}} - Z_3^{\text{PIS}}}, & Z_3^{\text{PIS}} \leq x \leq Z_3^{\text{NIS}}; \\ 0, & x > Z_3^{\text{NIS}}. \end{cases} \quad (21)$$

3) 将模型转化为单目标非线性规划模型,记

$$\max \{ \Gamma \partial^L + (1 - \Gamma) \partial^U \}, \quad (22)$$

$$\text{s. t. } \partial^U \geq \mu_{z_i} \geq \partial^L, \quad i = 1, 3; \quad (23)$$

$$\mu_{z_2} \geq \partial^U; \quad (24)$$

$$\partial^L, \partial^U \in [0, 1]. \quad (25)$$

其中: ∂^L 为 $\mu_{z_i}(x) (i = 1, 2, 3)$ 中的最小值; ∂^U 为 $\mu_{z_i}(x) (i = 1, 2, 3)$ 中的最大值; Γ 由决策者决定, 代表决策者在积极与消极决策间的倾向, Γ 值越小, 则决策越积极, 反之则决策越消极. 对于决策者而言, 常常希望在综合考虑最坏和最好等各种情况后, 所得的结果在最可能的情况下, 具有最高的满意程度, 因此令 $\mu_{z_2}(x)$ 取隶属函数中的最大值. 将 $\Gamma \partial^L + (1 - \Gamma) \partial^U$ 作为目标函数即遗传算法中的适应度函数进行求解.

3 算法设计

本文针对炼钢连铸生产模糊调度问题, 应用遗传算法, 在遗传算法适应度评估中, 引入模糊数和相应的模糊算子及模糊数比较方法进行算法设计.

1) 染色体编码

炉次计划的精炼工序阶段总数相同, 且在相同阶段的精炼类型一致, 每个阶段存在着多台并行设备可用. 炉次计划在最后一道工序(连铸工序)的加工设备, 以及在该设备上的作业顺序和连铸开浇时间均为已知, 因此需要考虑上述因素, 使得产生的每一个染色体都对应一个可执行的调度, 并且在进行遗传操作时不会产生非法解, 编码采用如下矩阵编码:

$$A_{s \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1s} & a_{2s} & \cdots & a_{ns} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

其中 a_{ij} 为区间 $[1, m_{ij} + 1)$ 上的一个实数, 表示炉次 i 的第 j 道工序在第 $[a_{ij}]$ 台机器上加工 ($[\cdot]$ 表示取下整数). 整数部分若出现 $[a_{ij}] = [a_{i'j}] (i \neq i')$, 表示多个炉次计划将在同一台机器上加工, 则根据每个炉次计划在该机器的开工时间来确定加工顺序 (FIFO). 若在该机器的开工时间相同, 则按 a_{ij} 值由

小到大确定各炉次计划的加工顺序; 若 a_{ij} 值再相同, 则随机确定加工顺序.

矩阵编码可构造用于遗传算法搜索的染色体, 染色体由 s 个小段组成, 每个小段包括 n 个基因, 由矩阵的每一行组成一个小段, 小段之间用标识符“0”隔开以表示不同的工序, 因此染色体的长度为 $s \times n + s - 1$, 染色体可表示为

$$[a_{11}, \dots, a_{n1}, 0, a_{12}, \dots, a_{n2}, 0, \dots, 0, a_{1s}, \dots, a_{ns}]. \quad (27)$$

2) 适应度函数

适应度函数是遗传算法进化过程的驱动力, 也是进行自然选择的唯一标准. 将 $\Gamma \partial^L + (1 - \Gamma) \partial^U$ 作为目标函数即遗传算法中的适应度函数.

3) 选择操作

采用轮盘赌选择方法.

4) 交叉操作

根据前面的编码方式, 只要保证 a_{ij} 位于区间 $[1, m_{ij} + 1)$ 之内就能保证染色体的合法性. 设染色体的交叉概率为一固定值 $P_c (0 < P_c < 1)$, 当产生的随机数 $P < P_c$ 时发生交叉操作. 交叉只发生在同一工序的染色体的基因之间, 以保证交叉操作之后解的可行性. 对于染色体的每一个子片断, 即矩阵编码的每一行, 随机确定某些位置的基因跟另一个染色体的相同位置上的基因互换.

5) 变异操作

设染色体的变异概率为一固定值 $P_m (0 < P_m < 1)$, 当产生的随机数 $P < P_m$ 时发生变异操作. 变异操作可采用分段方式, 对于第 i 个片段的第 j 个基因, 首先在集合 $\{-1, 1\}$ 中随机取值得到 d , 若 $d = 1$, 则产生随机数 $r = \text{rand}(0, m_{ij} + 1 - a_{ij})$; 否则产生随机数 $r = \text{rand}(0, a_{ij} - 1)$, 然后令 $a_{ij} = a_{ij} + dr$ 来实现基因的变异. 这种变异操作能保证 a_{ij} 位于区间 $[1, m_{ij} + 1)$ 之内, 从而保证染色体的合法性.

4 仿真实验

实例数据来源于上海某大型钢铁企业一炼钢分厂: 第 1 道工序有 3 座 300 吨的氧气顶吹转炉 (LD), 第 2 道工序有 3 台真空循环脱气炉 (RH), 第 3 道工序有 2 台钢包密封吹氩及成分微调炉 (CAS), 第 4 道工序有 2 台钢包炉 (LF), 第 5 道工序有 3 台连铸机 (CC). 对 15 个计划的调度问题进行仿真实验, 表 1 给出了计划的处理时间. 采用上述遗传算法, 种群规模为 100, 交叉率 $P_c = 0.8$, 变异率 $P_m = 0.03$, 进化代数数为 200 次. 对于不同的 Γ 值, 分别计算 10 次, 并比较目标函数值, 如表 2 所示.

表 1 模糊炼钢连铸调度问题计划处理时间表

计划	工 序				
	LD	RH	CAS	LF	CC
1	(32,35,40)	(30,36,40)	(26,30,33)	(45,50,55)	(40,45,55)
2	(33,36,40)	(31,35,38)	(24,30,33)	(45,50,55)	(40,50,55)
3	(28,35,38)	(32,36,42)	(28,32,35)	(45,55,60)	(42,48,56)
4	(33,40,45)	(25,30,33)	(25,30,35)	(40,45,55)	(35,40,50)
5	(30,35,40)	(28,36,40)	(25,35,38)	(46,50,53)	(40,55,60)
6	(33,35,38)	(30,33,37)	(25,32,35)	(45,55,60)	(40,50,55)
7	(33,36,40)	(35,38,42)	(26,30,33)	(46,52,55)	(50,60,65)
8	(32,35,39)	(33,36,42)	(25,31,34)	(50,55,58)	(42,45,55)
9	(32,37,41)	(31,35,40)	(28,35,39)	(46,50,55)	(44,48,56)
10	(33,36,40)	(32,36,40)	(28,33,38)	(48,54,59)	(40,55,58)
11	(32,35,40)	(30,34,40)	(26,30,33)	(45,50,55)	(40,45,55)
12	(33,38,42)	(30,35,40)	(30,36,40)	(44,51,55)	(40,55,58)
13	(30,35,38)	(30,33,36)	(25,30,35)	(44,50,58)	(35,40,52)
14	(31,36,40)	(32,35,40)	(26,30,38)	(45,52,55)	(40,44,55)
15	(32,35,41)	(31,36,40)	(23,30,35)	(42,50,56)	(40,46,53)

表 2 不同 Γ 情况下的目标函数

Γ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
0.1	0.942084	0.94248	0.942348	0.942216	0.941953	0.941821	0.942612	0.941689	0.941293	0.941557	0.942005
0.2	0.883641	0.883377	0.883113	0.882586	0.884433	0.883905	0.883333	0.884960	0.882322	0.882058	0.883372
0.3	0.825462	0.824274	0.823879	0.823087	0.825066	0.823483	0.825000	0.824670	0.823483	0.822691	0.824109
0.4	0.768338	0.767282	0.769393	0.766755	0.766227	0.765172	0.764644	0.765699	0.766667	0.767810	0.766798
0.5	0.706464	0.705145	0.708443	0.709103	0.704485	0.707124	0.703166	0.705805	0.709763	0.708333	0.706783
0.6	0.654881	0.647757	0.654090	0.650000	0.650132	0.646174	0.650923	0.642216	0.646966	0.645383	0.648852
0.7	0.591667	0.589050	0.593668	0.591821	0.592744	0.590897	0.594591	0.596438	0.589974	0.595514	0.592636
0.8	0.532454	0.534560	0.530343	0.533333	0.533509	0.537731	0.535620	0.530107	0.526121	0.529288	0.532306
0.9	0.475198	0.477573	0.481135	0.471636	0.483509	0.477573	0.470448	0.475000	0.482322	0.478760	0.477315

5 结 论

在炼钢连铸生产过程中,由于各种随机因素的影响,无法获得钢水的准确加工时间,在实际调度过程中,一般只能得到钢水加工时间的可能变化范围.因此,考虑加工时间的不确定性来研究炼钢连铸调度问题显得十分重要.对此,本文考虑了炼钢连铸实际生产过程中钢水处理时间的不确定性,采用三角模糊数表示处理时间,建立了该调度问题的模型.针对多精炼工序、多并行机的实际炼钢连铸生产调度问题,提出了结合模糊优化和遗传算法的调度算法.采用某钢厂的实际生产数据进行了仿真实验,实验结果表明了本文模型和算法的有效性.在今后的研究中,从实际问题出发,研发适合炼钢连铸实际生产的实用性调度系统软件,将具有广阔的研究空间和应用前景.

参考文献(References)

[1] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production [J]. European J of Operational Research, 2001, 133(1): 1-20.

[2] 俞胜平, 郑秉霖, 柴天佑. 炼钢连铸混合智能调度方法及其应用[J]. 华东理工大学学报, 2006, 32(7): 844-848.
(Yu S P, Zheng B L, Chai T Y. Hybrid intelligent scheduling method and its application for steelmaking and continuous casting[J]. J of East China University of Science and Technology, 2006, 32(7): 844-848.)

[3] Kumar V, Kumar S, Tiwari M K, et al. Auction-based approach to resolve the scheduling problem in the steel making process[J]. Int J of Production Research, 2006, 44(8): 1503-1522.

[4] 庞新富, 俞胜平, 柴天佑, 等. 炼钢连铸动态调度方法

- 及其应用[J]. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(3): 60-63.
(Pang X F, Yu S P, Chai T Y, et al. Dynamic scheduling method and its application for steelmaking and continuous casting [J]. J of Petrochemical Universities, 2007, 20(3): 60-63.)
- [5] Mignon D J, Honkomp S J, Reklaitis G V. A framework for investigating schedule robustness under uncertainty[J]. Computers and Chemical Engineering, 1995, 19(S1): 615-620.
- [6] Ishii H, Tada M, Masuda T. Two scheduling problems with fuzzy due dates[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 46(3): 339-347.
- [7] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(Gen M, Cheng R W. Genetic algorithms and engineering optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [8] Sakawa M, Mori T. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date [J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 36 (2): 325-341.
- [9] Sakawa M, Kubota R. Fuzzy programming for multiobjective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms[J]. European J of Operational Research, 2000, 120 (2): 393-407.
- [10] Dubios D, Prade H. Operations on fuzzy numbers[J]. Int J for Systems Sciences, 1978, 9 (7): 613-626.
- [11] 胡劲松, 吴斐, 钟永光. 模糊网络最大流算法研究[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(8): 293-299.
(Hu J S, Wu F, Zhong Y G. Study on fuzzy network maximum flow algorithm[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006, 36(8): 293-299.)
- [12] Rommlfanger H J. Network analysis and information flow in fuzzy environment [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67 (1): 119-128.
- [13] 方述诚, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(Fang S C, Wand D W. Fuzzy mathematics and fuzzy optimization[M]. Beijing: Science Press, 1997.)
- [14] 刘琦, 顾幸生. 基于模糊规划的不确定性条件下递阶生产计划模型[J]. 信息与控制, 2000, 26(5): 399-406.
(Liu Q, Gu X S. A fuzzy model for hierarchical production planning under uncertainty[J]. Information and Control, 2000, 26(5): 399-406.)

~~~~~  
(上接 1466 页)

- [4] Chern T L, Wu Y C. Design of integral variable structure controller and application to electrohydraulic velocity servosystems[J]. IEE Proceedings-D, 1991, 138(5): 439-444.
- [5] Chern T L, Chang J. DSP-based integral variable structure model following control for brushless DC motor drivers[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12 (1): 53-63.
- [6] Baik I C, Kim K H, Youn M J. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2000, 8(1): 47-54.
- [7] 王敏, 杜克林, 黄心汉. 机器人滑模轨迹跟踪控制[J]. 机器人, 2001, 23(3): 217-221.  
(Wang M, Du K L, Huang X H. Research on tracking control of robotic sliding mode trajectory [J]. Robot, 2001, 23(3): 217-221.)
- [8] Kachroo P, Tomizuka M. Chattering reduction and error convergence in the sliding mode control of a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1063-1068.
- [9] 李涛, 冯勇, 安澄全. 变加权系数减小变结构系统抖振的设计方法[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 645-648.  
(Li T, Feng Y, An C Q. Chattering free method using fixed boundary in VSS[J]. Control and Decision, 2000, 15(6): 645-648.)
- [10] Seshariri S, Khalil H K. On introducing integral action in sliding mode control[C]. Proc of the 41st Conf on Decision and Control. New York: IEEE Press, 2002: 1473-1478.
- [11] Seshagiri S, Khalil H K. Robust output feedback regulation of minimum-phase nonlinear systems using conditional integrators[J]. Automatica, 2005, 41(1): 43-54.