

改进的差分进化算法求解炼钢—连铸动态调度问题

金 焰, 王秀英

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了求解炼钢—连铸动态调度问题, 提出了一种将拉格朗日插值算法与差分进化算法相融合得到的改进的差分进化算法; 改进后的差分进化算法通过自适应调整进化参数, 动态的调整差分进化的方向, 并结合拉格朗日插值来优化差分进化算法的局部搜索能力, 引入权重系数对全局搜索和局部搜索加以平衡; 针对国内某大型钢厂的实际生产数据建立实验模型, 以最小化总完工时间、最小化总断浇时间、最小化炉次间总等待时间和最小化总偏差量时间为目标, 将改进的差分进化算法应用于求解炼钢—连铸转炉出现故障的动态扰动事件调度问题; 实验结果表明, 改进的差分进化算法应用在炼钢—连铸动态调度问题上, 有效地缩短了炉次加工总完工时间、炉次间总等待时间和总断浇时间, 在合理范围内, 有效控制了新生产的调度计划与原始调度计划的时间偏差量, 避免了因扰动事件的发生而引起连铸机断浇。

关键词: 差分进化算法; 拉格朗日插值算法; 炼钢—连铸; 动态调度; 自适应调整

Improved Differential Evolution Algorithm to Solve Steelmaking-Continuous Casting Dynamic Scheduling Problem

JIN Yan, WANG Xiuying

(College of Information Science & Technology, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to solve the dynamic scheduling problem of steelmaking and continuous casting, an improved differential evolution algorithm is proposed, which combines with the fusion algorithm for the Lagrange interpolation and differential evolution. The improved differential evolution algorithm adjusts the evolution parameters adaptively, adjusts the direction of differential evolution dynamically, and combines with the Lagrange interpolation to optimize the local search ability of the differential evolution algorithm, and introduces weight coefficients to balance the global search and local search. An experimental model is established based on the actual production data of a large domestic steel plant, with the minimizing total goals of completion time, pouring interruption time, waiting time between heats, and deviation time. The evolutionary algorithm is applied to solve the dynamic disturbance event scheduling problem for the steelmaking-continuous casting converter failure. The experimental results show that the improved differential evolution algorithm is applied to the steelmaking-continuous casting dynamic scheduling problem, which effectively shortens the indexes of total completion time, total waiting time between heats, and total pouring interruption time in the heat processing, which effectively controls the time deviation between the new production scheduling plan and the original scheduling plan within a reasonable range, and avoids the continuous casting machine due to the occurrence of disturbance events.

Keywords: differential evolution algorithm; Lagrange interpolation algorithm; steelmaking-continuous casting; dynamic scheduling; adaptive adjustment

0 引言

钢铁的生产关系着制造业未来的发展方向, 而炼钢—连铸是钢铁工业生产的关键过程, 该过程的高效调度能够有效缩短生产周期、降低生产成本和能源消耗、提高钢铁质量和生产效率。炼钢—连铸生产过程中主要包括三大工艺过程: 炼钢、精炼和连铸^[1]。由于炼钢和精炼的生产过程是离散的, 而连铸阶段为了提高产量需要连续生产, 因此炼钢—连续生产过程是离散和连续相结合的复杂生产

过程。

近年来, 国内外研究者们对炼钢—连铸生产调度问题主要方向仍然是静态调度, 动态调度的研究仍亟待求解。在炼钢—连铸实际的生产过程中, 由于工艺复杂, 多约束、多设备、多目标和随机性等特点^[2], 常常会出现各种不确定的扰动事件, 使得实际生产无法按原始的调度计划执行, 如开工时间延迟、设备故障、紧急订单添加等扰动事件^[3]。炼钢—连铸动态调度的任务, 就是当生产过程中出现扰动时, 实时调整调度计划表, 保证连续生产的前提下, 尽可

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-01。

作者简介: 金 焰(1995-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事智能优化算法方向的研究。

通讯作者: 王秀英(1962-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 主要从事生产计划与调度理论和方法、智能优化算法等方向的研究。

引用格式: 金 焰, 王秀英. 改进的差分进化算法求解炼钢—连铸动态调度问题[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 272-278.

能的减少能源消耗和等待时间, 提高生产效率, 降低生产成本^[4]。罗小川^[5]等针对炼钢—连铸中作业时间冲突引起的调度优化问题, 提出了分部分求解的方案, 先用线性规划法解决调度问题, 再用极大值原理解决连铸机拉速变化问题, 优化了炼钢—连铸生产过程中可能因时间扰动导致的调度过程出现时间冲突而导致断浇的问题。张春生^[6]等针对故障下的炼钢—连铸动态调度问题, 提出了基于动态约束满足技术建模机制, 该机制灵活反映了实际生产车间中各种动态因素, 能根据炼钢—连铸生产过程中出现的故障扰动程度实时制定不同的调度策略, 保证了炼钢—连铸生产过程稳定进行。王柏琳^[7]等针对炼钢—连铸生产过程中连铸机出现故障而引起的动态调度问题, 建立了动态约束满足模型, 提出了基于约束满足的优化方法, 通过动态调整策略调整浇次计划, 优化了炼钢—连铸两阶段故障引起的调度问题。Yu^[8]等针对炼钢—连铸生产过程中转炉故障引起的动态调度问题, 建立了多目标非线性规划模型, 提出了两阶段动态最优调度方案, 设计并开发了动态最优排产软件系统, 优化了炼钢—连铸生产过程中的加工时间和排产调度, 缩短了炉次在工序间的等待时间。Hou^[9]等研究了当生产车间遇到各种实时扰动时对生产车间的影响问题, 并提出当机器故障时, 通过基本的识别和分析可得出对机器故障引起的问题的调度方案。Jiang^[10]等针对炼钢—连铸生产过程中产生的扰动事件引起的调度问题, 提出了一种基于改进差分进化的多阶段动态软调度算法, 解决了因扰动事件引起的全局调度问题和局部调度问题。钱承星^[11]针对炼钢—连铸的实际生产过程中出现的动态扰动因素引起的调度问题, 开发了炼钢—连铸生产调度决策支持系统, 加入自适应规则改进差分进化算法, 应用动态优化思想并嵌入记忆种群形成动态差分进化算法, 以某大型钢铁企业为研究对象, 将差分进化算法与标准差分进化算法和人工模拟算法进行比较, 改进后的动态差分进化算法在炼钢—连铸生产调度过程中更具有实用性。赵月^[12]先以生产调度为研究背景, 对生产过程中出现的动态因素因其的动态优化问题进行分析, 提出了动态差分进化算法, 再以炼钢—连铸生产调度为研究对象, 提出了增量式动态差分进化算法, 当动态扰动事件发生时, 快速响应并生成新的调度方案。

本文针对炼钢—连铸动态调度问题, 提出一种以炉次最小化总完工时间、最小化总断浇时间、最小化总等待时间和最小化总偏差量为优化目标, 将拉格朗日插值算法与差分进化算法相融合, 利用拉格朗日插值算法提高差分进化算法的局部搜索能力, 通过自适应控制差分进化算法的进化参数, 避免了算法陷入局部收敛的现象。最后, 通过对国内某大型钢厂的实验数据进行仿真实验, 验证了模型和算法的有效性。

1 问题描述

1.1 炼钢—连铸生产工艺过程

炼钢—连铸生产过程主要包含炼钢、精炼和连铸共 3

个环节。在同一个转炉里经过炼钢、精炼到连铸阶段结束统称为一个炉次, 多个炉次组合成一个浇次, 同一个浇次必须持续浇铸不能断浇。

1.1.1 炼钢

如图 1 中所示, 高炉 (图 1 中的 BF) 将生铁和废钢进行熔化, 通过转炉 (图 1 中的 LD) 将生铁和废钢按照钢种的要求进行氧化和脱硫处理, 调整其成分的含量到一定的范围内且符合一定的出钢温度, 即为铁水。将铁水通过高炉转运到转炉后, 加入废钢, 进行加热处理去除杂质调整钢水中的碳含量, 将处理后的钢水倒入钢包中, 通过吊车将其转移至精炼炉中进行精炼。

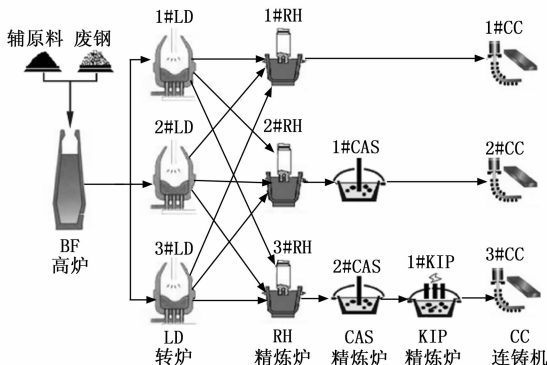


图 1 炼钢—连铸生产工艺流程图

1.1.2 精炼

精炼阶段是为了进一步调整钢水中的成分含量, 去除杂质, 添加所需的合金成分, 生产出特定级别的钢水。钢水温度需要保持在一定的范围内, 若钢水的温度过高或过低, 都将影响连铸阶段的效果。由于不同级别的钢种质量要求不同, 钢水包需经过的精炼炉的种类和数量也不同, 根据钢水包经过的精炼炉数量将精炼过程命名为一重精炼 (例如一重精炼钢水包只需经过 1#RH 精炼设备)、二重精炼 (二重精炼钢水包需经过 2#RH 和 1#CAS 两个精炼设备) 和三重精炼 (三重精炼钢水包需经过 3#RH、2#CAS 和 1#KIP 三个精炼设备进行处理)^[13]。

1.1.3 连铸

高温钢水经过连铸机的处理, 将熔融的金属不断浇入结晶器中, 冷却后的铸件可通过结晶器的另一端拉出任意长度的铸件, 即具有一定钢和规格的板坯。在连铸过程中, 需要进行连续浇铸, 若不能连续浇铸而产生断浇, 会消耗过多的能源和时间。因此, 为了提高生产效益、降低生产成本, 连铸过程要保持连续浇铸。

1.2 炼钢连铸动态调度问题

炼钢—连铸动态调度问题可以归类为作业车间调度问题^[14]。炼钢—连铸生产调度问题实际上是对生产工序中运输时间、生产工艺路径存在的回环和最后阶段是同一炉次连续加工的特殊生产问题^[15]。而实际炼钢—连铸生产车间中, 在满足生产约束的前提下, 需实时调整并确定某一炉次在某工序的某台机器上进行加工及其开始时间和顺

序,尽可能的缩短炉次在炼钢一连铸生产过程中的总完工时间、总断浇时间、总等待时间和时间偏差量,提高炼钢一连铸生产车间的生产效率,减少生产能耗。

1.3 数学模型

1.3.1 基本假设

炼钢一连铸生产过程是一个集离散和连续相混合的复杂过程。为了解决实际问题,通常使用数学模型对该问题进行描述。为确保生产过程的连续性,在正常的生产情况下,炉次依次在设备间传递且无重叠,连铸机的拉速是恒定的,当遇到不可预测的扰动时,可在合理范围内进行调节连铸机拉速,且有初始调度计划表。

1.3.2 符号定义

i 表示炉次号; j 表示工序号; p 表示浇次号; m 表示机器号; I 表示炉次集合; J 表示工序集合; P 表示浇次集合; M 表示机器集合; q 表示连铸工序; I_p 表示浇次 p 上的所有炉次集合; d_p 表示浇次 p 上的开始炉次; z_p 表示浇次 p 上的结束炉次; J_i 表示炉次 i 经过的所有工序集合; $\delta(i, j)$ 表示炉次 i 在工序 j 的下一个工序; M_j 表示在工序 j 上加工机器集合; $T_{mm'}$ 表示从机器 m 到 m' 的传输时间; ω_{ij}^{\max} 表示炉次 i 在工序 j 到下一工序的最大等待时间; T_{tiao} 表示两相邻浇次间的连铸机的调整时间; MS_{break}^m 表示 m 机器出现故障的开始时间; ME_{break}^m 表示 m 机器出现故障的结束时间; k_{ij}^{gd} 表示动态调度前原调度计划的工序加工时间; C_{\max} 表示动态调度总完工时间; ϵ_1 表示总完工时间惩罚系数; ϵ_2 表示断浇惩罚系数; ϵ_3 表示工序间总等待时间惩罚系数; ϵ_4 表示工序加工时间偏差惩罚系数; a_{ij} 表示炉次 i 在工序 j 上开始加工时间; a_{ij}^1 表示炉次 i 在工序 j 上的加工时间; a_{ij}^2 表示炉次 i 在工序 j 上完工后的等待时间; r_m 表示炉次 i 在工序 j 上的结束时间; a_i^3 表示炉次 i 的断浇时间; b_p 表示浇次 p 开始加工时间; b_p^1 表示浇次 p 浇铸完成时间。

其中:

$$u_{ijm} = \begin{cases} 1 & \text{炉次 } i \text{ 在工序 } j \text{ 上被分配到机器 } m \\ 0 & \text{否则} \end{cases};$$

$$v_{pm} = \begin{cases} 1 & \text{浇次 } p \text{ 被分配给连铸机 } m \\ 0 & \text{否则} \end{cases}.$$

1.3.3 目标函数及约束条件

1) 目标函数:

$$F = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (1)$$

$$f_1 = \min \epsilon_1 C_{\max} \quad (2)$$

$$f_2 = \min \epsilon_2 \sum_{p \in P} \sum_{i \in I_i} a_i^3 \quad (3)$$

$$f_3 = \min \epsilon_3 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} a_{ij}^2 \quad (4)$$

$$f_4 = \min \epsilon_4 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} |a_{ij}^1 - k_{ij}^{gd}| \quad (5)$$

2) 约束条件:

$$\sum_{m \in M_i} u_{ijm} = 1, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M_p} u_{pm} = 1, \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$u_{ijm} u_{i'jm} (a_{ij} + a_{i'j}^1) \leq u_{ijm} u_{i'jm} a_{i'j} \quad (8)$$

$$\text{或 } u_{ijm} u_{i'jm} (a_{i'j} + a_{ij}^1) \leq u_{ijm} u_{i'jm} a_{ij}^1$$

$$\forall j \in J_i, k \in M_j, (i, i') \in \{(i, i') \mid j \in J_i \cap J_{i'}\}$$

$$v_{pm} v_{p'm} (b_p^1 + T_{\text{tiao}}) \leq v_{pm} v_{p'm} b_{p'} \quad (9)$$

$$\text{或 } v_{pm} v_{p'm} (b_{p'}^1 + T_{\text{tiao}}) \leq v_{pm} v_{p'm} b_p$$

$$\forall p \neq P, m \in M_q \quad (10)$$

$$b_p = a_{d,p}, \quad \forall p \in P \quad (11)$$

$$b_p^1 = a_{z,p}, \quad \forall p \in P \quad (12)$$

$$a_{i+1,q} = a_{iq} + a_{z,q}^1, \quad \forall p \in P \quad (12)$$

$$u_{ijm} u_{i,\delta(i,j),m'} a_{i,\delta(i,j)} = u_{ijm} u_{i,\delta(i,j),m'} [a_{ij} + a_{ij}^1 + T_{mm'} + a_{ij}^2] \quad (13)$$

$$\forall i \in I, j \in J_j, m \in M_j, m' \in M_{\delta(i,j)}$$

$$u_{ijm} a_{ij} \geq u_{ijm} ME_{\text{break}}^m$$

$$\text{或 } u_{ijm} (a_{ij} + a_{ij}^1) \leq u_{ijm} MS_{\text{break}}^m \quad (14)$$

$$\forall i \in I, j \in J_j, m \in M_j$$

$$u_{ijm} a_{ij} \geq u_{ijm} r_m, \quad \forall i \in I, j \in J_j, m \in M_j \quad (15)$$

$$C_{\max} \geq b_p^1, \quad \forall p \in P \quad (16)$$

$$0 \leq a_{ij}^2 \leq \omega_{ij}^{\max}, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (17)$$

$$(a_{ij}^1)_{\max} \leq a_{ij}^1 \leq (a_{ij}^1)_{\max}, \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (18)$$

$$a_i^3 \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$u_{ijm} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

$$v_{pm} \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$a_{ij}, b_p, b_p^1 \text{ 无限制}, \quad \forall i \in I, j \in J_j, p \in P \quad (22)$$

式 (1) 表示目标函数由式 (2) ~ (5) 组成, 其中, 式 (2) 表示最小化总完工时间, 式 (3) 表示最小化总断浇时间, 式 (4) 表示最小化总等待时间, 式 (5) 表示最小化时间偏差量。式 (6) 表示在生产过程中炉次在各机器上仅可以被分配到一台机器上进行加工; 式 (7) 表示连铸机上的一个浇次在同一时刻仅可以被分配到一台连铸机上浇铸; 式 (8) 表示任意一台机器仅被允许一个炉次进行加工; 式 (9) 表示表示连铸机在同一时刻仅允许一个浇次进行浇铸; 式 (10) 表示连铸机的开浇时间等于该连铸机上第一个炉次开始浇铸的时间; 式 (11) 表示连铸机的结束工作时间是该连铸机上最后一个炉次的浇铸结束时间; 式 (12) 表示在同一个浇次中, 后一炉次的浇铸开始时间等于前一炉次在该连铸机上的浇铸结束时间与两个炉次之间的断浇时间的和; 式 (13) 表示某一炉次的下一工序的开始时间等于前一工序的结束时间与工序间的运输时间和等待时间之和; 式 (14) 表示机器发生故障时该时间段内炉次不能在该机器上进行加工; 式 (15) 表示炉次在各工序之间的加工开始时间不小于该机器上上一炉次的结束时间; 式 (16) 表示炼钢一连铸生产调度的总完工时间; 式 (17) 表示炉次在进行下一工序前的可等待时间范围; 式 (18) 表示炉次的加工时间范围; 式 (19) 表示连铸上断浇的时间范围; 式 (20) 表示炉次在工序上可分配到的机器数; 式 (21) 表示浇次可被分配的机器数; 式 (22) 表示对工序的开始加工时间、浇次的开始浇铸时间和浇次的结束浇铸时间没有具体的限制。

2 改进差分进化算法的设计与求解

2.1 差分进化算法基本原理

差分进化算法 (DEA, different evolution algorithm) 由 Storn 和 Price^[16] 于 1995 年提出的一种基于群体的全局优化算法^[17]。差分进化算法通过模拟自然界生物种群的生存法则则进化发展规律而形成的一种具有随机启发式的搜索算法。差分进化算法中, 每个个体都有一个解向量, 通过变异操作对种群个体进行差分, 并将生成的差分向量与初始基向量进行交叉操作, 通过选择操作选取最优个体, 并将该最优个体保存至下一代, 最终生成新的种群, 通过不断的迭代, 直到找到最优解。差分进化算法因结构简单、容易实现、鲁棒性强等特点, 而被广泛应用于各个领域^[18]。

2.2 差分进化算法的基本流程

差分算法的流程如下^[19]:

- 1) 设置参数;
- 2) 随机产生初始种群;
- 3) 对初始种群中个体计算适应度值;
- 4) 判断是否达到最大迭代次数。若达到, 则结束循环; 否则, 继续执行操作;
- 5) 对未达到最大迭代次数的种群个体进行变异和交叉操作, 将变异向量 $v_{i,g}$ 与父向基向量 $x_{i,g}$ 进行交叉操作, 得到一个第 j 维的新个体, 交叉操作公式如下:

$$u_{i,g}^j = \begin{cases} v_{i,g}^j, & \text{当 } (\text{rand}[0,1] \leq CR) \text{ or } (j = j_{\text{rand}}) \\ x_{i,g}^j, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

其中: CR 是交叉概率, j_{rand} 是维数 $[1, D]$ 之间的均匀分布的随机数。

- 6) 将得到的新个体向量与基向量进行选择操作, 选取最优个体保留至下一代种群。选择操作的计算公式为:

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g}, & \text{当 } (f(u_{i,g}) < f(x_{i,g})) \\ x_{i,g}, & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

- 7) 迭代数加 1, 转至步骤 4)。

2.3 拉格朗日插值

通过对同一物理量进行多个角度观察, 可得多个不同的观测值, 获得的多个观测值可由一个多项式表示, 则该多项式称为拉格朗日插值多项式^[20]。即拉格朗日插值是在已知多个坐标点的情况下, 通过坐标点获得近似函数的一种建模方法^[21]。

拉格朗日插值法基本原理: 在需要插值的点附近随机选取若干个合适的点, 构造一个简单的插值函数 $y = q(x)$, 且该构造的插值函数需通过随机选取的插值点。在所选的插值点区间内将插值函数值作为原函数 $f(x)$ 的值, 使函数 $f(x_i) = p(x_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$ 成立。拉格朗日插值法的实质是根据已知的选取的插值点构造一个插值函数, 并利用该插值函数快速获取原函数在该插值点上的位置, 这种利用多个节点数据来构造插值基函数的方法称为拉格朗日插值法^[22-23]。

在区间 $[a, b]$ 上, 有 $n+1$ 个点 x_0, x_1, \dots, x_n , 且过该 $n+1$ 个点的函数值为 y_0, y_1, \dots, y_n , 对这 $n+1$ 个点, 每个 x_i

均可得到其对应的函数值 y_i , 公式如下:

$$L_n(x) = \sum_{k=1}^n l_k(x) y_k \quad (25)$$

式 (25) 中, $L_n(x)$ 为拉格朗日多项式; 为次数不超过 n 的多项式, 即插值基函数。此时, 拉格朗日插值阶数为 n , 满足如下公式:

$$l_k(x) = \delta_{ki} = \begin{cases} 1 & k = i \\ 0 & k \neq i \end{cases} \quad k, i = 0, 1, \dots, n \quad (26)$$

具体计算公式为:

$$l_k(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^n \left(\frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) \quad (27)$$

将式 (26) 代入式 (27) 得到 n 次拉格朗日多项式的计算式为:

$$L_n(x) = \sum_{k=1}^n l_k(x) y_k = \sum_{k=1}^n \left[\prod_{i=0, i \neq k}^n \left(\frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) \right] y_k \quad (28)$$

2.4 拉格朗日插值改进差分进化算法

利用拉格朗日插值法构建的近似函数是一个恰好穿过二维平面上若干个已知点的多项式函数, 该函数可以通过已知的信息来推测未知信息, 获取更优解。已知坐标点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_D, y_D)$, 其中 x_i 为种群个体, y_i 为种群个体的适应度值。通过已知的多个解建立近似函数, 得到 n 次拉格朗日插值多项式:

$$f_n(x) = \sum_{k=0}^n \left(\prod_{j=0, j \neq k}^n \frac{x - x_j}{x_k - x_j} \right) y_0 \quad (29)$$

本文取 $n \in \{0, 1, 2\}$, 代入式中得到抛物线式插值, 将其简化成二次函数的数学模型如下:

$$f_n(x) = ax^2 + bx + c \quad (30)$$

式 (30) 中: a, b 及 c 为方程式的系数, 其计算过程分别为:

$$a = -\frac{n_1 n_1^0 y_0 + n_2 n_2^0 y_1 + n_0 n_0^0 y_2}{n_0 n_1 n_2} \quad (31)$$

$$b = -\frac{n_1 y_0 + n_2 y_1 + n_0 y_2}{n_0 n_1 n_2} \quad (32)$$

$$c = c_0 + c_1 \quad (33)$$

其中:

$$c_0 = -\frac{[n_2(n_1 + n_1^0)(n_2 + n_2^0)y_0 + n_0(n_0 + n_0^0)(n_2 + n_2^0)y_1]}{2n_0 n_1 n_2}$$

$$c_1 = -\frac{n_1(n_0 + n_0^0)(n_1 + n_1^0)y_2}{2n_0 n_1 n_2}$$

式中, $n_0, n_1, n_2, n_0^0, n_1^0$ 及 n_2^0 的取值可由以下公式计算得出:

$$n_0 = x_0 - x_1 \quad (34)$$

$$n_1 = x_1 - x_2 \quad (35)$$

$$n_2 = x_2 - x_0 \quad (36)$$

$$n_0^0 = x_0 + x_1 \quad (37)$$

$$n_1^0 = x_1 + x_2 \quad (38)$$

$$n_2^0 = x_2 + x_0 \quad (39)$$

2.5 自适应调整差分进化算法搜索方向

将当前种群中各个个体进行适应度函数值大小排序, 将适应度函数值小的个体放在前面, 并将前 $m(m \in [1, 2, \dots, NP])$ 个个体定义为当前种群的优质解。通过随机选取

的种群中的优质解来引导搜索方向，保证了前期种群的多样性，使得迭代后期寻优结果趋于最优解。变异策略 DE/rand-to-best/1 的具体计算公式如下所示：

$$v_{i,g} = x_{i,g} + f_i \cdot (x_{mbest,g} - x_{i,g}) + f \cdot (x_{r_1,g}^i - x_{r_2,g}^i) \quad (40)$$

式中， $x_{mbest,g}$ 表示当前种群中前 m 个优质解中的最优个体。随机选取当前种群中不同于 $x_{mbest,g}$ 或 $x_{i,g}$ 的两个个体 $x_{r_1,g}^i$ 和 $x_{r_2,g}^i$ 。其中， m 的计算公式为：

$$m = s \left\{ \frac{NP}{4} \cdot \left[\cos \left(\frac{g}{g_{max}} \cdot \pi \right) + 1 \right] \right\} \quad (41)$$

式 (41) 中， g 表示当前进化代数， g_{max} 表示最大进化代数， $s(x)$ 表示大于 x 的最小整数。 m 在种群的前期搜索速率较慢，算法可在较大的范围内寻求最优解，增强了算法的局部搜索能力；而在种群后期搜索速率较快，通过优质解中的最优解得到位置分布。当 $m = 1$ 时， $x_{mbest,g} = x_{best,g}$ 为当前种群最优解，算法更倾向于在全局最优解附近搜索，从而加快了算法的收敛速度。

为了利用拉格朗日插值优化差分进化算法搜索局部最优值，本文以当前变异的最优个体和最优个体附近的随机生成的两个个体从而得到 3 个点 x_0, x_1, x_2 ，其中， x_0 为最优个体， x_1, x_2 由下列公式生成：

$$x_1 = x_0 - \delta \quad (42)$$

$$x_2 = x_0 + \delta \quad (43)$$

$$\delta = a \times (rand - 0.5) \quad (44)$$

其中： a 为极小系数，本文设置 $a = 0.01$ 。

利用二次拉格朗日插值可获得一条经过 x_0, x_1, x_2 三点的二次函数，通过对二次函数的计算可获得全局最优解。为了平衡全局搜索和局部搜索，引入权重 ω 加以控制，权重的计算表达式如下：

$$\omega = \omega_{max} - \frac{t}{maxDT} (\omega_{max} - \omega_{min}) \quad (45)$$

其中：分别设置 $\omega_{max}, \omega_{min}$ 为 0.9 和 0.4； t 为种群迭代次数； $maxDT$ 为当前种群最大迭代次数。 ω 的选取决定了种群的搜索能力， ω 越小时，其种群的全局搜索能力越强，反之局部搜索能力越强。在拉格朗日插值算法改进差分进化算法的过程中，权重系数 ω 在种群前期的主要是为了扩大种群搜索范围，而在迭代后期，权重系数 ω 的引入能够加快种群的局部搜索速度。

2.6 改进的差分进化算法流程

如图 2 所示，拉格朗日插值改进的差分进化算法具体步骤如下：

- 1) 设置算法的种群大小 NP ，最大进化代数为 $maxDT$ 以及其他进化参数。初始化种群，计算各个个体的适应度，记录最优个体 x_{best} 以及 $f(x_{best})$ ；
- 2) 判断结果是否达到 $maxDT$ ，若是退出计算，否则，进入步骤 3)；
- 3) 计算当前权重 ω ，若 $\omega \leq 0.75$ ，则进入步骤 4)，否则进入步骤 5)；
- 4) 取 x_{best} 和附近两点 x_1, x_2 ，做拉格朗日插值计算，求

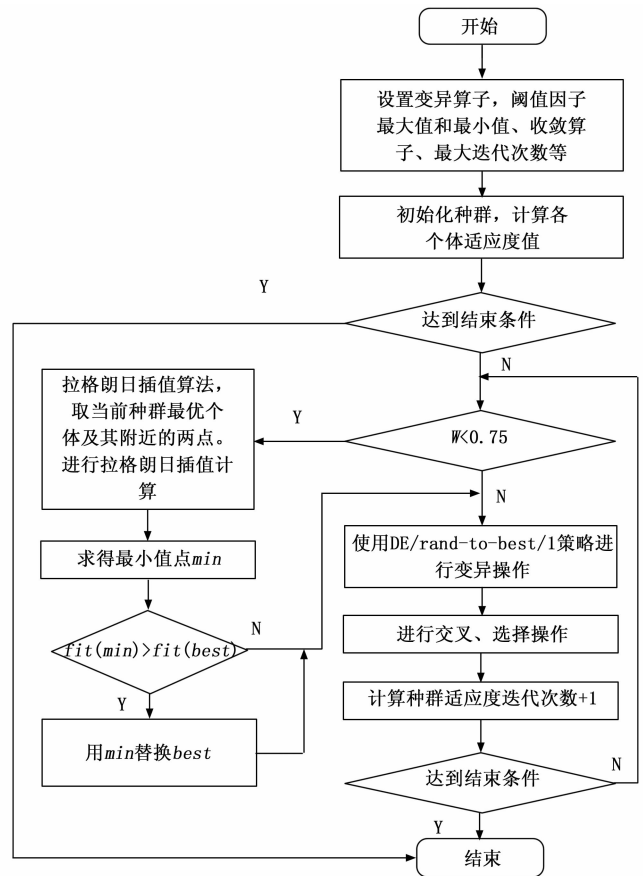


图 2 LGDE 算法流程图

得最小值 min ，计算 min 的适应度值并与 x_{best} 的适应度值相比较，当 $f(x_{best}) < f(min)$ ，用 min 替换 x_{best} ；

5) 使用 DE/rand-to-best/1 策略进行变异操作；

6) 进行交叉和选择操作，并计算种群中每个个体的适应度值，迭代次数加 1；

7) 判断是否满足结束条件，若是，则结束循环；否则，转至步骤 3)。

3 实验结果与分析

表 1 是某大型钢厂的实际生产数据，包含 3 个浇次计划、10 个炉次计划和两种精炼方式。以表 1 中的浇次计划进行仿真试验。

表 1 浇次计划

浇次号	炉次号	钢号	精炼方式	浇铸目的
1	1	DV3943D1	R	CC1
	2	DT0912D1	R	CC1
	3	DV3948D1	R	CC1
	4	DT0138D1	R	CC1
2	5	AP0740D5	C	CC2
	6	AP0740D5	C	CC2
	7	DV3943D1	R	CC2
3	8	DV3943D1	R	CC3
	9	DV3943D1	R	CC3
	10	DV3943D1	RK	CC3

将本文所提出的改进的差分进化算法与标准差分进化算法对上述问题求解, 设置种群规模为 50, 变异算子为 0.5, 交叉概率为 0.3, 迭代次数为 1 000, 对数据进行 50 次独立实验, 计算每一代目标函数值, 获得折线如图 3 所示, 改进后的差分进化算法的收敛曲线均优于标准差分进化算法的收敛曲线, 证明了本文所提的改进后的差分进化算法有较好的收敛性。

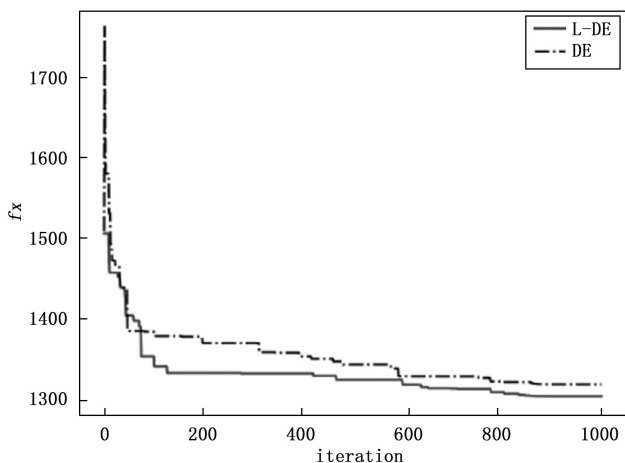


图 3 改进后的差分进化算法的收敛曲线

在实际的生产车间中, 通过对该钢厂实际生产的相关数据的提取, 当机器运行至 7:30 分时, 2# LD 转炉突然出现故障, 导致后面的炉次不能继续在该转炉上进行加工, 需要分配新的转炉, 如图 4, 2# LD 转炉出现故障, 导致在该转炉上还未开始加工的第 7 炉次和第 4 炉次开工延迟, 从而导致第 7 炉次和第 4 炉次在连铸机上出现断浇, 动态调整前的调度甘特图如图 4 所示。

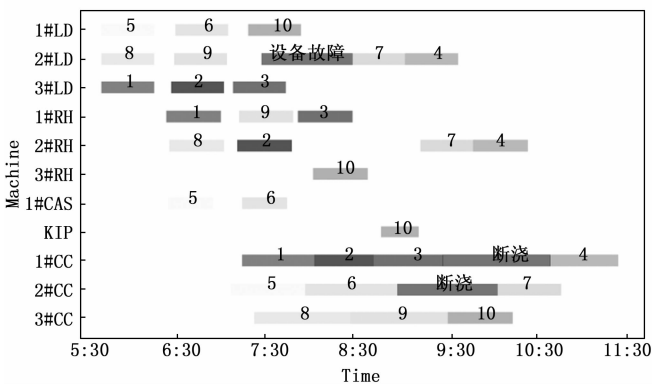


图 4 动态调度调整前的甘特图

通过改进的差分进化算法对原始调度计划进行调整, 对故障下导致延迟的第 7 炉次和第 4 炉次重新分配新的转炉机器, 调整后的甘特图如图 5 所示。

通过仿真实验结果显示, 本文提出的改进的差分进化算法能够有效解决炼钢连铸生产过程中转炉出现故障的扰动事件, 并生成新的较优的调度计划表。

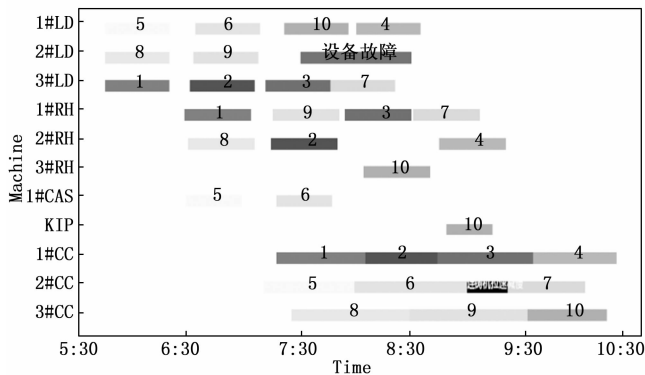


图 5 动态调度调整后的甘特图

4 结束语

1) 针对炼钢—连铸生产动态调度问题, 结合某大型钢厂的实际生产车间的数据, 以炉次在炼钢—连铸生产过程中最小化总完工时间、最小化总断浇时间、最小化炉次间总等待时间和最小化总偏差量为优化目标, 建立了炼钢—连铸动态调度数学模型。

2) 在给定原始调度计划表的前提下, 提出了以拉格朗日插值改进差分进化算法的方法来求解炼钢—连铸动态调度问题, 并提出了自适应调整策略和权重系数的判断, 来平衡全局搜索和局部搜索。

3) 以某大型钢厂的实际生产数据为研究对象, 建立数学模型并进行仿真实验, 结果表明, 所提出的算法能够有效地缩短炉次在炼钢—连铸生产过程中的总完工时间, 当实际生产现场出现扰动事件时, 及时响应并做出相应调整, 确保了炼钢—连铸生产车间的顺利进行。本文所提的改进的差分进化算法未来可更多应用于多组合多约束优化问题。

参考文献:

[1] 池浩天, 蒋朝辉, 陈致蓬, 等. 基于混合智能优化算法的炼钢—连铸生产调度方法 [C] //2018 中国自动化大会 (CAC2018) 论文集, 2018: 180-186.

[2] 刘青, 刘倩, 杨建平, 等. 炼钢—连铸生产调度的研究进展 [J]. 工程科学学报, 2020, 42 (2): 144-153.

[3] 崔岩. 炼钢—精炼—连铸生产过程动态调度规则与策略研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

[4] 徐微. 炼钢—连铸生产过程动态调度的仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

[5] 罗小川, 桑美宁, 邓梦怡, 等. 炼钢—连铸中作业时间冲突的协调优化方法 [J]. 控制工程, 2020, 27 (1): 84-91.

[6] 张春生, 李铁克, 王柏琳, 等. 炼钢机器故障下炼钢—连铸调度 DCSP 建模与算法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (22): 226-234.

[7] 王柏琳, 李铁克, 张春生, 等. 基于动态约束满足的考虑连铸机故障的炼钢连铸调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17 (10): 2185-2194.

[8] YU S, CHAI T, WANG H, et al. Dynamic optimal scheduling

- method and its application for converter fault in steelmaking and continuous casting production process [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44 (1): 9506 - 9511.
- [9] HOU D, LI T. Analysis of random disturbances on shop floor in modern steel production dynamic environment [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 663 - 667.
- [10] JIANG S, ZHENG Z, LIU M. A multi-stage dynamic soft scheduling algorithm for the uncertain steelmaking-continuous casting scheduling problem [J]. Applied Soft Computing, 2017, 60: 722 - 736.
- [11] 钱承星. 基于动态差分进化算法的炼钢-连铸生产调度 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [12] 赵月. 基于动态优化的动态调度问题研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [13] 张晓凤. 改进布谷鸟算法在炼钢-连铸优化调度问题的应用研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [14] 谷学静, 朱朝月, 张 建, 等. 多 Agent 蚁群算法求解炼钢-连铸动态调度问题 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (27): 50 - 57.
- [15] 马 强. 探究炼钢-连铸生产启发式调度方法 [J]. 应用能源技术, 2021 (12): 17 - 19.
- [16] STORN R, PRICE K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4): 341 - 359.
- [17] 王 琳. 面向流水车间调度问题的粒子群优化算法研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2016.
- [18] 陈 鑫. 两阶段混合流水车间调度问题精确算法的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [19] 方锦辰, 王 环, 胡 文. 基于改进差分进化算法的三相逆变系统分数阶 PI 控制策略 [J/OL]. 计算机测量与控制: 1 - 10 [2022-03-23].
- [20] 秦利刚. 拉格朗日插值算法在频谱分析中的应用 [J]. 电子世界, 2014 (5): 112 - 113.
- [21] 黄裘俊, 张 凯, 宋锦春, 等. 基于改进粒子群算法的取件机械手轨迹综合优化设计 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39 (11): 1636 - 1641.
- [22] 林昌华, 杨 岩. 拉格朗日插值法在工程设计及 CAD 中的应用 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2013, 27 (12): 34 - 37.
- [23] 王建敏, 李 特. 北斗三号卫星位置插值研究 [J]. 测绘通报, 2021 (12): 50 - 53.
- ~~~~~
- (上接第 271 页)
- [5] 郑 捷, 潘大志. 改进的离散型萤火虫优化算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 计算机与现代化, 2021 (8): 11 - 15, 23, 29.
- [6] 刘长平, 叶春明. 求解零空闲置换流水车间调度问题的离散萤火虫算法 [J]. 系统管理学报, 2014, 23 (5): 723 - 727.
- [7] 张其亮, 陈永生. 一种新的混合粒子群算法求解置换流水车间调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (6): 2028 - 2030, 2034.
- [8] 吴 琼, 纪志成, 吴定会. 协同混合粒子群算法求解车间作业调度问题 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (5): 266 - 270.
- [9] 刘长平, 叶春明. 一种新颖的仿生群智能优化算法: 萤火虫算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (9): 3295 - 3297.
- [10] 高星星. 几种粒子群优化算法及其应用研究 [D]. 银川: 北方民族大学, 2020.
- [11] 杨小东, 蔡泽凡. 萤火虫粒子群混合算法 [J]. 电子测试, 2018 (15): 33 - 36.
- [12] 王庆喜, 魏胜利. 基于混沌和非线性规划的萤火虫算法 [J]. 科技通报, 2017, 33 (5): 120 - 123.
- [13] KAYA S, KARAZMEL Z H, AY DILEK I B, et al. The effects of initial populations in the solution of flow shop scheduling problems by hybrid firefly and particle swarm optimization algorithms [J]. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2020, 26 (1): 140 - 149.
- [14] 喻 祥, 孙 辉, 赵 嘉, 等. 自适应多策略粒子群优化算法的研究综述 [J]. 南昌工程学院学报, 2016, 35 (3): 71 - 75.
- [15] 王丛俊, 王锡淮, 肖健梅. 基于动态自适应策略的改进差分进化算法 [J]. 计算机科学, 2013, 40 (11): 265 - 270.
- [16] WANG H, ZHOU X Y, SUN H, et al. Firefly algorithm with adaptive control parameters [J]. Softcomputing, 2017, 21 (17): 5091 - 5102.
- [17] 陶新民, 刘福荣, 刘 玉, 等. 一种多尺度协同变异的粒子群优化算法 [J]. 软件学报, 2012, 23 (7): 1805 - 1815.
- [18] 陶新民, 王 妍, 赵春晖, 等. 双尺度协同变异的离散粒子群算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32 (12): 1617 - 1623.
- [19] 段欢欢, 崔国民, 陈家星, 等. 一种基于多种群对立平行进化策略的 DE 算法 [J]. 计算物理, 2016, 33 (5): 561 - 569.
- [20] 吕冰垚, 姜志翱, 宁春玉. 基于 PSO 和 GA 混合优化的 FCM 算法 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 125 - 130.
- [21] KRISHNANAND K N, GHOSE D. Glowworm s-warm optimization: a new method for optimizing multi-modal functions [J]. International Journal of Computational Intelligence Studies, 2009, 1 (1): 93 - 119.
- [22] 曹承煜, 李人厚, 樊 健. 车间调度算法的研究和开发 [J]. 控制理论与应用, 2000, 17 (1): 31 - 34.
- [23] 周艳平, 蔡 素, 李金鹏. 一种粒子群和改进自适应差分进化混合算法及在生产调度中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (8): 227 - 230.
- [24] 王 凌. 车间调度及其遗传算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.