

热连轧精轧负荷分配优化的多目标反向迭代法

李冬, 刘建昌, 谭树彬[†], 于霞

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 在求解热精轧负荷分配优化的过程中, 针对目标函数中加权系数难以确定的问题, 提出多目标反向迭代法 (multi-objective inversion iteration algorithm, MOII), 该法通过数值迭代的方式实现了热精轧机组负荷分配的多目标优化. 首先, 在综合考虑板形、板厚精度和质量的基础上, 设计负荷分配优化的多目标函数; 然后, 基于轧制力能参数与轧机入口和出口板带厚度的单调性关系, 设计 MOII 算法, 并对 MOII 算法的合理性及异常情况进行分析, 给出其计算流程; 最后, 基于实际生产数据进行仿真, 结果表明, MOII 算法不仅能够实现负荷分配的多目标优化, 而且求解速度快、精度高, 体现出良好的在线应用前景; 与其他方法得到的解相比, MOII 算法求得的解有更好的性能.

关键词: 优化; 多目标反向迭代法; 负荷分配; 热轧机

中图分类号: TP273, TG334.9 **文献标识码:** A

Multi-objective inversion iteration algorithm for load distribution optimization in finishing mill group of hot strip rolling

LI Dong, LIU Jian-chang, TAN Shu-bin[†], YU Xia

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;
State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: For solving the problem of load distribution optimization for hot finishing mills, we present the multi-objective inversion iteration (MOII) algorithm to tackle the difficulty in determining the weighting coefficients for objective functions. This algorithm realizes the multi-objectives optimization of load distribution in hot finishing mills through numerical iteration operation. Firstly, multi-objective functions for load distribution optimization are formulated by synthetically considering the accuracy and quality of the strip shape and thickness. Afterwards, MOII algorithm is designed based on the monotonic relationship between the rolling force and energy parameters, as well as the entry and outlet strip thickness of the stand. Moreover, the rationality and the abnormal situation for MOII algorithm are further analyzed, and the calculation procedure is explained. Finally, simulation results based on practical production data show that MOII algorithm is prospective for online application in multi-objective optimization of load distribution with rapidity and precision. Besides, comparing solutions from other load distribution methods, we find the one obtained from the MOII algorithm gives better performances.

Key words: optimization; multi-objective inversion iteration algorithm; load distribution; hot rolling mills

1 引言(Introduction)

热连轧精轧机组的负荷分配优化, 是在一定的轧制条件下, 根据来料的初始数据(如钢种、厚度、宽度、温度等)和要求的成品规格, 最优地分配各机架压下量. 它体现了通过连轧机组各机架, 如何一步一步地将来料厚度为 H_0 的中间坯, 轧成厚度为 h_n 的成品^[1]. 负荷分配是轧制规程的核心, 它对轧制设备调整的难易、轧制能耗、生产过程的稳定性和作业率等项指标

有重要影响. 在某些情况下, 负荷分配还将影响到产品最终的组织性能^[2-3]. 常见的负荷分配方法有经验法^[4]、能耗曲线法^[5]、负荷分配系数法^[6-7]、优化方法^[8]等.

热连轧负荷分配的经验法过于依赖操作工经验, 无法充分发挥设备能力; 文献[5]利用能耗曲线法优化负荷分配, 虽然能够充分发挥设备机组能力, 但是该法具有很强的工艺条件性, 需要大量的实测数据, 不

收稿日期: 2014-07-08; 录用日期: 2015-01-21.

[†]通信作者. E-mail: tanshubin@ise.neu.edu.cn; Tel.: +86 24-83678396.

国家自然科学基金项目(61374137), 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费项目(2013ZCX02-03)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374137) and State Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry Technology and Research Center of National Metallurgical Automation Fundamental Research Funds (2013ZCX02-03).

能对所有钢种、品种都准确预测能耗与压下量间的定量关系。文献[6]根据负荷成比例原则建立非线性方程组,利用Newton-Raphson法求解。该方法求解精度高,但对初始解要求严格,如计算过程中求导矩阵出现奇异,该法无法完成求解。为克服Newton-Raphson法的缺点,文献[7]采用Newton descendent synergetic error conversion algorithm实现了非线性方程组的求解。在实际生产中,追求的目标往往不是单一的,而是多个目标的综合。为了充分发挥轧制力调控板形的积极作用,通过负荷分配方法提高板形控制质量,文献[8]设计了前几个机架以负荷均衡为目标、后几个机架以板形良好为目标的多目标函数,利用群智能方法解决带钢热连轧负荷分配的多目标优化问题。

对于文献[8]提出的多目标优化函数,一般是通过加权系数将多目标优化函数转换成单目标优化函数。但是,由于各个目标函数的量纲反映到数量级上相差较大,并且在优化过程中是动态变化的,这使得加权系数难以确定。文献[9]对改进的多目标差分进化算法在热精轧机组负荷分配优化中进行了尝试性研究;文献[10]提出MaximinDE方法求解热精轧负荷分配优化的多目标函数,并根据目标的重要性从Pareto优化前沿选择解。虽然,此类方法一次计算可以得到多个解,但是,每次迭代计算需要寻找Pareto前沿,导致计算量增加,算法时间较长,使此类方法在线进行负荷分配优化的过程中受到制约。因此,为了能够实现负荷分配的在线优化,需要寻找新的求解方法。

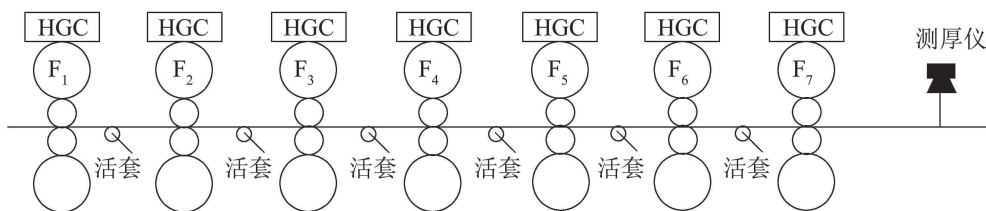


图1 热精轧机组

Fig. 1 Hot finishing mill group

图1中HGC是Hydraulic gap control的缩写。

2.2 目标函数及约束条件(Objective functions and constrain conditions)

为使自动板形控制系统在轧制过程中有良好的工作起点,充分发挥轧制设备能力轧制出高精度的板带钢,设计负荷分配优化目标函数的总体思路为:前3个机架主要提供充足的压下量,后4个机架则充分发挥轧制力调控板形的积极作用保证轧出板形良好,目标函数的具体设计如下^[14]:

1) 随着轧制的进行,板带越轧温度越低,轧机的压下效率也会降低。为了能够充分发挥轧制设备的

为克服上述方法研究缺点,本文提出多目标反向迭代法(multi-objective inversion iteration, MOII)算法,该法实现了热精轧组负荷分配优化中多目标函数的数值迭代求解。依据轧制经验,在综合考虑压下量、目标板形板厚精度、板形良好条件的基础上,设计负荷分配优化的多目标函数;基于轧制力能参数与轧机入口和出口板带厚度的单调性关系,设计求解热精轧负荷分配优化的MOII算法;然后,对算法的合理性及异常情况进行分析,并给出算法的详细计算过程;最后,进行仿真比较分析。

2 多目标反向迭代法算法的设计(Design of MOII algorithm)

2.1 MOII算法想法的产生(Generation of the idea for MOII algorithm)

由轧制理论可知, F_i 机架的负荷函数(轧制力、绝对凸度、相对凸度等)都是 F_{i-1} 机架出口厚度 h_{i-1} 的单调增函数和 F_i 机架出口板带厚度 h_i 的单调减函数^[11]。这一理论构成了本文的理论基础。

平衡迭代法^[12]、变步长数值转换法^[13]和Newton descendent synergetic error conversion algorithm^[7]利用该理论成功实现了负荷分配系数法的迭代求解。

本文依据图1所示7机架热精轧机组的工艺特点和轧制经验,为每一个机架构建一个负荷分配优化的目标函数。基于上述轧制理论,设计MOII算法,该算法以各机架相对压下量为决策变量,通过数值迭代的方式对提出的负荷分配优化问题进行尝试求解。

能力, $F_1 \sim F_3$ 机架要尽可能施加较大的轧制力。由于轧件温度波动或来料厚差等轧件扰动因素的存在,需要为 F_1 机架的压力AGC留有一定的压下余量。根据经验,常取 F_1 机架的轧制力为 F_2 机架轧制力的0.9倍,即 $P_1 = 0.9P_2$ 。

2) F_2 和 F_3 机架在施加较大轧制力的同时需要考虑轧制过程的稳定,因此,这两个机架的轧制力应尽可能保持相等,即 $P_2 = P_3$ 。

3) 为了能够实现 $F_1 \sim F_3$ 机架的负荷分配,使分配给各机架的轧制力达到上述要求, F_3 机架的轧制力应与其自身最大轧制力成比例,并且在优化过程

中可以根据具体情况进行调节, 即 $P_3 = KP_{3\text{MAX}}$.

4) 为达到目标凸度并保证轧出板形良好, 依据连轧过程的工艺条件和良好板形的条件, $F_4 \sim F_7$ 机架的出口相对凸度与目标相对凸度应保持一致, 即

$$\frac{CR_{i-1}}{h_{i-1}} = \frac{CR_i}{h_i} = \frac{CR_n}{h_n}, \quad i = 5, 6, 7.$$

综上所述, 将上述要求进行整理可得

$$\begin{cases} J_1 = P_1 - 0.9P_2, \quad i = 1, \\ J_2 = P_2 - P_3, \quad i = 2, \\ J_3 = P_3 - KP_{3\text{MAX}}, \quad i = 3, \\ J_i = \frac{CR_i}{h_i} - \frac{CR_n}{h_n}, \quad i = 4, \dots, 7, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为 F_i 机架的目标函数; $P_i (i = 1, 2, 3)$ 为计算的 F_i 机架的轧制力; K 为比例调节系数, 由于分配的轧制力不能超过最大轧制力, 因此, 比例系数的合理取值范围为 $(0, 1)$; $P_{3\text{MAX}}$ 为 F_3 机架最大轧制力; h_n, CR_n 分别为终轧板带厚度和绝对凸度; $h_i, CR_i (i = 4, 5, \dots, 7)$ 分别为 F_i 机架轧机出口板带厚度和绝对凸度, 其中 $h_7 = h_n$.

式(1)中各个目标函数越接近0, 越能满足上述要求. 为了同时达到式(1)中各目标的要求, 式(1)被转换成多目标优化模型的形式:

$$\min \begin{cases} J_1'(K) = (P_1 - 0.9P_2)^2, \quad i = 1, \\ J_2'(\varepsilon_2) = (P_2 - P_3)^2, \quad i = 2, \\ J_3'(\varepsilon_3) = (P_3 - KP_{3\text{MAX}})^2, \quad i = 3, \\ J_i'(\varepsilon_i) = \left(\frac{CR_i}{h_i} - \frac{CR_n}{h_n}\right)^2, \quad i = 4, \dots, 7. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中各目标函数的最优值为0, 其使用的相关轧制力和绝对凸度模型如下^[1]:

$$P = 1.15Bl'_c Q_P \sigma, \quad (3)$$

$$Q_P = 0.8205 + 0.2376 \frac{l_c}{h_m} + 0.1006\varepsilon \frac{l_c}{h_m} - 0.3768\varepsilon, \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left(\frac{u_m}{10}\right)^{a_3 T + a_4} a_6 \left(\frac{e}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{e}{0.4}, \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{H - h}{H}, \quad (6)$$

$$CR = \frac{P}{K_P} + \frac{F}{K_F} + E_c w_c + E_\Sigma (w_H + w_w + w_o) + E_0 \Delta, \quad (7)$$

式中: Q_P 为应力状态影响系数; σ 为金属变形阻力; l_c 和 l'_c 分别为未考虑和考虑轧辊压扁时的接触弧水平投影长度; h_m 为平均板带厚度; H, h 分别为机架

的入口和出口板带厚度; ε 为相对压下量; T 为板带的轧制温度; $a_1 \sim a_6$ 为钢种决定的系数; u_m 平均变形速度; e 为真正变形程度; K_P 为轧机横向刚度; K_F 为弯辊横向刚度; w_c 为可控辊型; w_H 为热辊型; w_w 为磨损辊型; w_o 为初始辊型; Δ 为板带入口凸度; E_Σ, E_c, E_0 为相应系数.

为了能够实现顺利穿带, F_1 机架的咬入角要小于最大咬入角; 同时考虑到轧制设备的极限值和连过程中板带越轧越薄的特点, 设置目标函数的约束条件为^[14]

$$\begin{cases} 0 \leq P \leq P_{i\text{MAX}}, \\ 0 \leq I \leq I_{i\text{MAX}}, \\ 0 \leq h_{i+1} \leq h_i, \\ \alpha_1 \leq \alpha_{1\text{MAX}}, \end{cases} \quad (8)$$

式中: I 为电机电流; $I_{i\text{MAX}}, P_{i\text{MAX}}$ 分别是 F_i 机架电机电流和轧制力的最大值; $\alpha_1, \alpha_{1\text{MAX}}$ 分别为 F_1 机架的计算咬入角和最大咬入角.

2.3 MOII算法(MOII algorithm)

2.3.1 MOII算法的推导(Derivation of MOII algorithm)

由于轧制力和相对凸度不为0, 式(2)可等价变换为式(9), 其各目标函数的最优值为1.

$$\begin{cases} f_i(\varepsilon_i^k) = \left(\frac{CR_n}{h_n} / \frac{CR_i^k}{h_i}\right)^2, \quad i = 4, \dots, 7, \\ f_3(\varepsilon_3^k) = \left(\frac{KP_{3\text{MAX}}}{P_3^k}\right)^2, \quad i = 3, \\ f_2(\varepsilon_2^k) = \left(\frac{P_3}{P_2^k}\right)^2, \quad i = 2, \\ f_1(K^k) = \left(\frac{P_1^k}{0.9P_2}\right)^2, \quad i = 1, \end{cases} \quad (9)$$

式中 ε_i^k 为 F_i 机架中第 k 次迭代计算的相对压下量.

若 $F_i (i = 2, \dots, 7)$ 机架经 k 次迭代计算之后, 计算出来的绝对凸度 CR_i^k 或轧制力 P_i^k 无法使 F_i 机架的目标函数 f_i^k 达到目标值, 即 $f_i(\varepsilon_i^k) \neq 1$, 利用式(10)将这一误差转化为相应机架的相对压下量修正系数, 修正 F_i 机架的相对压下量:

$$\begin{cases} \varepsilon_i^{k+1} = \varepsilon_i^k \times \frac{CR_n}{h_n} / \frac{CR_i^k}{h_i}, \quad i = 4, \dots, 7, \\ \varepsilon_3^{k+1} = \varepsilon_3^k \times \frac{KP_{3\text{MAX}}}{P_3^k}, \quad i = 3, \\ \varepsilon_2^{k+1} = \varepsilon_2^k \times \frac{P_3}{P_2^k}, \quad i = 2. \end{cases} \quad (10)$$

MOII算法从末机架开始向上游机架逐个计算各个机架的相对压下量. 当 F_i 机架的目标函数 f_i^k 达到目标值后, 通过式(11)来确定 F_{i-1} 机架的轧出板带

厚度,直到F₂~F₇机架的目标函数都满足条件为止.

$$h_{i-1} = \frac{h_i}{1 - \varepsilon_i}. \quad (11)$$

当计算到F₁机架的时候,由于来料厚度H₀的限制,无法通过调节该机架的相对压下量来满足目标函数f₁.如果f₁(ε₁^k) ≠ 1,依据式(12),将这一误差转化为比例系数K的修正量,修正F₃机架的比例系数.然后,从F₃机架开始,重新计算F₁~F₃机架相对压下量.

$$K^{k+1} = K^k \pm \lambda_1 \frac{P_1^k}{0.9P_2}, \quad i = 1, \quad (12)$$

式中λ₁为步长调节系数.

2.3.2 初始值确定(Determination of initial value)

MOII算法对初始值没有严格地要求.为此可以在合理范围内,如(0,0.5),随机初始化F₂~F₇机架的相对压下量ε_i(i = 2, 3, …, 7).

为减少迭代时间,可以利用平均分配压下量法确定各机架的初始板带厚度,如式(13)所示^[7].然后,利用式(11)进一步确定各机架的初始相对压下量.

$$h_i^1 = h_{i-1}^1 \left(\frac{h_n}{H_0} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1, \quad (13)$$

式中:h_i¹为F_i机架的初始板带厚度;h_n为终轧目标厚度;n为精轧机组机架数目.

2.3.3 迭代终止条件(Iterative termination condition)

由式(11)可知,通过F_i机架的相对压下量ε_i^k和出口厚度h_i可以确定F_{i-1}机架的出口厚度h_{i-1}^k,进而确定F_i机架的轧制力P_i^k和绝对凸度值CR_i^k.如果能够使目标函数满足下面地要求,那么迭代计算停止:

$$|\sqrt{J_i^k}| \leq \Delta_i, \quad i = 1, 2, \dots, 7, \quad (14)$$

式中Δ_i为各机架目标函数允许的精度范围.

3 MOII算法的合理性分析及异常情况处理 (Analysis of rationality and treatment of abnormal condition for MOII algorithm)

3.1 合理性分析(Analysis of rationality)

F_i机架的轧制力P_i、绝对凸度CR_i与F_{i-1}机架的出口板带厚度h_{i-1}成正比.假设经过k次迭代计算后,F_i(i = 2, 3, …, 7)机架的目标函数没有达到目标值:

$$f_i^k > 1, \quad i = 2, 3, \dots, 7. \quad (15)$$

由式(10)可知,F_i机架的相对压下量ε_i^k增加到ε_i^{k+1},从而使F_{i-1}机架的出口板带厚度由h_{i-1}^k增加

到h_{i-1}^{k+1},F_i机架的出口板带绝对凸度CR_i^k和轧制力P_i^k增加.结果是:目标函数f_i^{k+1}(i = 2, 3, …, 7)向小于等于1的方向发展,系统的调节过程见图2.

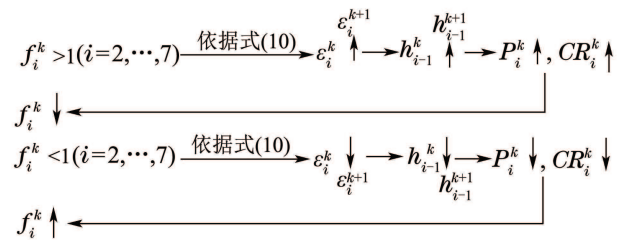


图 2 MOII算法求解f_i(i = 2, 3, …, 7)的调节过程

Fig. 2 Adjustment process of solving f_i(i = 2, 3, …, 7) by MOII algorithm

同理,由图2可知,如果f_i^k < 1, i = 2, 3, …, 7,那么F_i机架的相对压下量ε_i^k减小到ε_i^{k+1},这使得F_{i-1}机架的出口板带厚度h_{i-1}^k减小到h_{i-1}^{k+1},F_i机架的出口板带绝对凸度CR_i^k和轧制力P_i^k减小,从而也会使目标函数f_i^{k+1}(i = 2, 3, …, 7)在经过数次迭代后趋向大于等于1的方向.

利用计算出来的F₁机架出口板带厚度h₁和已知的精轧入口板带厚度H₀计算目标函数f₁^k,比例系数K的调节过程如图3所示.

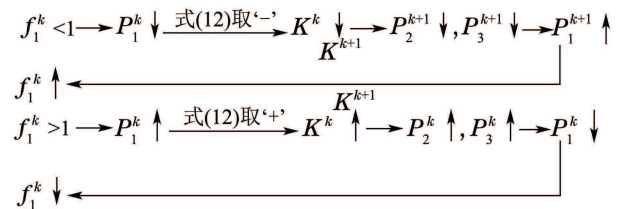


图 3 MOII算法求解f₁的调节过程

Fig. 3 Adjustment process of solving f₁ by MOII algorithm

由图3可知,若f₁^k < 1,则式(12)取负号.比例系数由K^k减小到K^{k+1},使轧制力P₂^k,P₃^k减小,P₁^k增加,从而使目标函数f₁^{k+1}向大于等于1的方向发展.同理,若目标函数f₁^k > 1(i = 2, 3, …, 7),则式(12)取正号.比例系数由K^k增加到K^{k+1}.这一变化,使F₂和F₃机架的轧制力P₂^k,P₃^k增加,F₁机架轧制力P₁^k减小,从而使目标函数f₁^{k+1}向小于等于1的方向发展.

3.2 厚度分布异常处理(Disposal of strip thickness distribution abnormality)

3.2.1 F₁或F₂机架出口板带厚度异常(Abnormality of strip thickness at F₁ or F₂ stand exit)

由于K初始值设计的不合理,迭代计算过程中,可能会出现第F₂或F₃机架压下量过大,造成计算出来的F₁或F₂机架的出口板带厚度h₁^k或h₂^k超过精轧

入口板带厚度 H_0 。所以,在 F_2 和 F_3 机架计算求解之后,需要对厚度计算的合理性进行判断,如下所示:

$$h_i^k < H_0, i = 1, 2. \quad (16)$$

如果计算出的 F_1 或 F_2 机架的出口板带厚度不能满足式(16)的要求,那么依据式(17)修正比例系数 K 。然后,依据上面的方法依次重新计算 $F_3 \sim F_1$ 机架的出口板带厚度值。

$$K^{k+1} = K^k \frac{H_0}{h_i^k}, i = 1, 2. \quad (17)$$

若式(16)判定失败,依据式(17)可知,比例系数由 K^k 减小到 K^{k+1} 。这会使 F_2 和 F_3 机架的压下量减小,进而使 F_1 或 F_2 机架的出口板带厚度减小以满足式(16)的要求。

3.2.2 $F_1 \sim F_3$ 机架压下量分配异常(Abnormality of reduction allocation for $F_1 \sim F_3$ stands)

在极限校核中,如果发现 $F_2 \sim F_3$ 机架的轧制力或电机电流超过上限值,同时 F_1 机架的咬入角也超过限定值,需要按照式(18)–(19)修正 $F_4 \sim F_7$ 机架的迭代终止精度 $\Delta_i (i = 4, 5, 6, 7)$,重新执行负荷分配。

$$\Delta_i^g = \Delta_i^1 + (g - 1)\lambda_{2,i}, i = 4, 5, 6, 7, \quad (18)$$

$$\lambda_{2,i} = \frac{40\left(\frac{h_i}{B}\right)^\beta - \Delta_i^1}{(g_{\max} - 1)}, i = 4, 5, 6, 7, \quad (19)$$

式中: B 为板带宽度; g_{\max} , g 分别为程序总循环次数和当前循环次数; $\lambda_{2,i}$ 为 $F_i (i = 4, 5, 6, 7)$ 机架目标函数精度的变化步长; β 为2或1.86^[15]。

如果 $F_1 \sim F_3$ 机架的极限校核失败,意味着 $F_1 \sim F_3$ 机架无法完成剩余压下量分配。依据式(18)–(19)可知, $F_i (i = 4, 5, 6, 7)$ 机架目标函数终止精度由 Δ_i^g

增加到 Δ_i^{g+1} (根据Shohet评判准则^[15],程序最后一次循环中 $\Delta_i^{g_{\max}} = 40(h_i/B)^\beta$),即 $F_4 \sim F_7$ 机架的目标函数终止精度在板形良好条件范围内降低。这会使 $F_4 \sim F_7$ 机架的压下量增加,而 $F_1 \sim F_3$ 机架的压下量降低,从而达到顺利完成负荷分配优化的目的。

3.3 MOII算法的步骤(Procedure of MOII algorithm)

采用MOII算法实现7机架热精轧机负荷分配优化的流程如下:

步骤 1 读取板坯和设备数据;

步骤 2 根据式(11)(13)确定初始相对压下量 $\varepsilon_i^1 (i = 2, 3, 4, 5, 6, 7)$,并设定迭代参数。

步骤 3 轧制过程参数计算;

步骤 4 使用式(10)–(11)对 $F_7 \sim F_4$ 机架进行迭代计算;

步骤 5 根据式(10)(12)对 $F_3 \sim F_1$ 机架进行迭代计算;

步骤 6 如果不能满足式(16)的要求,用式(17)去修正比例系数 K ,程序返到步骤5,否则到步骤7;

步骤 7 如果 $F_1 \sim F_3$ 机架的负荷函数值超过上限,使用式(18)–(19)修正迭代终止精度 $\Delta_i (i = 4, 5, 6, 7)$,程序返回到步骤4,否则到步骤8;

步骤 8 判断迭代终止条件。

当式(14)成立的时候,程序停止迭代计算。当式(14)不成立的时候,如果迭代次数或者循环次数超过最大值,程序将报警并停止迭代计算。

4 仿真实验(Simulation experiment)

采用MOII算法对7机架热精轧机组进行负荷分配优化以验证其有效性。各机架设备参数见表1。

表1 设备相关参数
Table 1 Parameters of equipment

参数	机架号						
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
工作辊直径/mm	765	765	765	765	700	700	700
电机功率/MW	12	12	12	12	12	10	10
最大轧制力/MN	50	50	50	50	40	40	40
电机速度/(rad·s ⁻¹)	18.84/47.1	18.84/47.1	18.84/47.1	18.84/47.1	18.84/47.1	20.93/62.8	20.93/62.8

仿真采用的钢种为Q235,来料宽度为1500 mm,中间坯厚度为50.6 mm,目标厚度为4.5 mm,精轧入口温度为1329 K,终轧温度为1143 K,目标凸度为0.01 mm。由式(11)(13)确定初始相对压下量。

4.1 参数设置及收敛说明(Parameters setting and convergency description)

设置目标函数和MOII算法的相关参数如下:允

许的终止精度范围 $\Delta_i = 1 \text{ kN} (i = 1, 2, 3)$, $\Delta_i^1 = 1.0e - 004 (i = 4, 5, 6, 7)$;程序的总循环和初始循环次数 $g_{\max} = 6, g = 1$; $F_1 \sim F_3$ 机架程序的总循环次数和初始循环次数 $m_{\max} = 5000, m = 1$;每个机架中的总迭代次数和初始迭代次数 $k_{\max} = 50, k = 1$;随机确定比例调节系数 $K = 0.5$;由于步长调节系数的设定直接影响 $F_1 \sim F_3$ 机架程序的循环迭代次数,

对步长调节系数与循环次数 m 进行测试, 图4给出这两个参数的关系曲线。

由图4可以看到, 当步长调节系数 $\lambda_1 = 0.006$ 时, 具有较快的收敛速度。

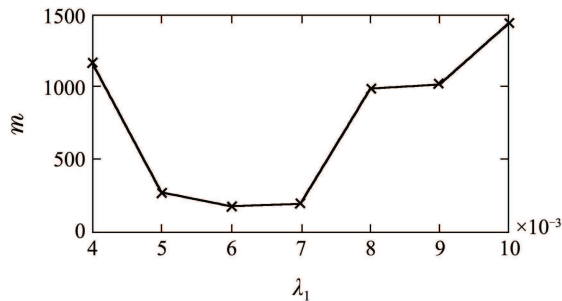


图 4 迭代次数 m 与 λ_1 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between iterative times m and λ_1

采用上述参数, 利用MOII算法对给出的板带材进行仿真优化, 式(9)中各目标函数值随迭代次数变化的曲线如图5所示。

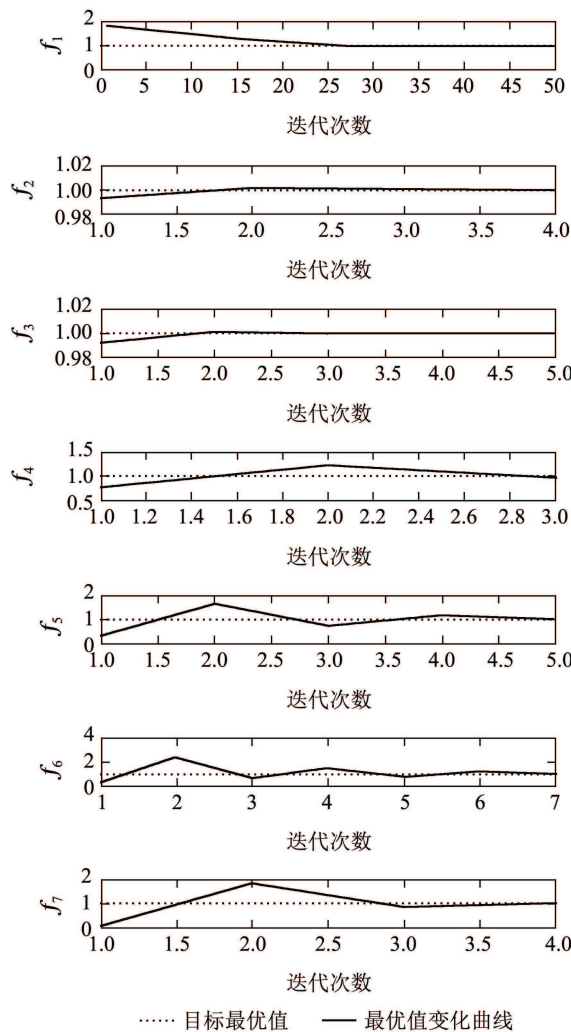


图 5 各目标函数值的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of the value of each objective function

由图5可以看出, 目标函数 f_1 逐渐收敛到最优目

标值, 目标函数 $f_2 \sim f_7$ 的目标函数值与最优目标值的差值随着迭代次数的增加而逐渐减小, 即振幅逐渐衰减, 由此可见, 该算法是收敛的。

4.2 比较分析(Comparative analysis)

利用实际生产数据进行仿真, 并将轧制规程中的经验结果、MOII算法、MaximinDE^[10]算法和IASPSO^[16]算法的仿真结果进行对比分析. 图6为4种方法分配给各机架的轧出板带厚度柱状图。

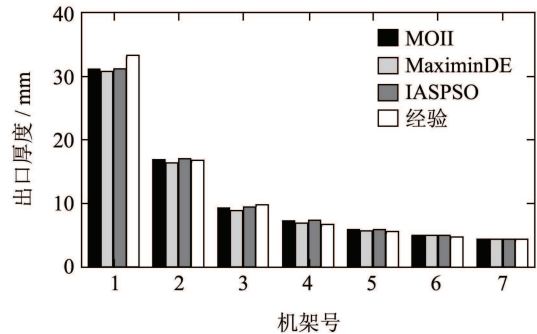


图 6 各机架出口板带厚度

Fig. 6 Strip thickness at each stand exit

从图6中可以看出, MOII算法优化计算出的各机架出口板带厚度与MaximinDE和IASPSO优化的结果接近, 与经验法的结果相差较大. 但是, 4种方法给出的各机架出口板带厚度都满足热连轧的工艺条件, 即各机架轧出板带厚度沿轧制方向逐渐变薄. 利用各机架的轧出板带厚度, 可以计算出相应机架的轧制力, 4种方法的轧制力分配结果如表2所示。

表 2 各机架轧制力(kN)

Table 2 Rolling force of each stand (kN)

机架号	MOII	MaximinDE	IASPSO	经验法
F ₁	26744.3	27239.2	26664.1	24074.8
F ₂	29716.1	30295.3	29596.5	32335.0
F ₃	29716.4	30298.9	29609.1	28104.1
F ₄	14378.7	14427.9	14592.2	20932.4
F ₅	11122.6	9645.6	11281.4	9277.3
F ₆	9180.0	7578.7	9275.5	7187.1
F ₇	7045.9	7045.7	7141.8	6437.5

由表2可知, 经验法中 $F_1 \sim F_3$ 机架的轧制力无法满足目标函数的要求, 但是MOII, MaximinDE以及IASPSO计算的轧制力都能够满足目标函数的要求. 其中MOII计算的轧制力分配更加均衡, 更能充分发挥轧制设备的能力. 在 $F_4 \sim F_7$ 机架中, 4种方法分配给各机架的轧制力都逐渐减小, 这也说明了4种方法分配给后4个机架的轧出板带厚度是合理的. 但是, 经验法中 F_4 和 F_5 机架的轧制力差值明显大于另外3种方法的轧制力差值, 这会导致轧制力作用下

的相对凸度存在差别.表3为种厚度分配结果对应的各机架相对凸度值.

表3 各机架相对凸度
Table 3 Relative crown of each stand

机架号	MOII	MaximinDE	IASPSO	经验法
F ₁	0.0017	0.0018	0.0017	0.0015
F ₂	0.0035	0.0037	0.0035	0.0038
F ₃	0.0061	0.0065	0.0060	0.0055
F ₄	0.0022	0.0023	0.0022	0.0038
F ₅	0.0022	0.0019	0.0022	0.0018
F ₆	0.0022	0.0017	0.0022	0.0016
F ₇	0.0022	0.0022	0.0022	0.0020

表4 相对凸度差

Table 4 Relative crown difference

相对凸度差	良好板形区上限	MOII	MaximinDE	IASPSO	经验法	良好板形区下限
$\frac{CR_4}{h_4} - \frac{CR_5}{h_5}$	0.0014	0.0000	0.0004	0.0000	0.0020	-0.0028
$\frac{CR_5}{h_5} - \frac{CR_6}{h_6}$	0.0010	0.0000	0.0002	0.0000	0.0002	-0.0020
$\frac{CR_6}{h_6} - \frac{CR_7}{h_7}$	0.0008	0.0000	-0.0005	0.0000	-0.0004	-0.0016

由表4进一步可知,虽然经验法得到的相对凸度差最终能够进入板形良好区间,但是,F₄和F₅机架的相对凸度相差较大,导致该差值点在板形良好区间外.此处,相对凸度的改变对于弯辊调节系统来说是比较困难的.因为,当板带厚度小于等于12 mm时,其金属的横向流动性随着厚度的减小而降低^[1].而MOII,MaximinDE和IASPSO计算的后4个机架相对凸度值满足相对凸度一致原则,所以它们的相对凸度差在Shoht评判准则形成的区间中具有较大的余量,这说明轧制力调控板形的积极作用得到充分发挥,同时也为弯辊控制系统提供了良好的工作起点,使得后4个机架的弯辊控制系统调节板形的能力也得到充分发挥.这3种算法的计算时间见表5.

表5 计算时间比较(s)

Table 5 The comparison of calculation time (s)

算法	MOII	MaximinDE	IASPSO
运行时间	0.892	11.360	4.850

由表5可知,MOII求解热精轧机组负荷分配优化的时间小于1 s,满足在线执行负荷分配优化地要求,且求解速度优于IASPSO以及MaximinDE.

5 结论(Conclusions)

在求解热精轧机组负荷分配优化过程中,针对

由表3可知,经验法中F₄和F₅机架的相对凸度差值明显大于另外3种方法的相对凸度差值,显然不满足目标函数中要求的后四个机架尽量保持相对凸度一致的原则.由此可见,经验法虽然合理的分配了各机架的轧出板带厚度,但是,分配的结果并非最优.MOII,MaximinDE以及IASPSO分配给后4个机架的相对凸度都能满足相对凸度一致原则,其中MOII和IASPSO方法分配的效果更好.综合表2和表3的结果可知,MOII算法具有更好的求解精度.业内普遍采用相对凸度差是否满足Shohet评判准则来判断轧出板形是否良好,后4个机架的相对凸度差如表4所示.

多目标转换为单目标加权系数难以确定的问题,提出了MOII算法.该方法利用机架负荷函数与机架入口和出口板带厚度的单调性关系实现了负荷分配多目标优化的迭代求解,为热精轧机组负荷分配优化提供了一种新的解法.该算法具有原理及参数设置简单、对初始值要求低和便于现场操作人员使用及维护的优点.最后,通过仿真验证,结果表明:MOII算法能够成功的实现热精轧负荷分配优化的求解,求解精度高、速度快,能够满足在线进行负荷分配优化的要求,有良好的在线应用前景;与经验法,IASPSO和MaximinDE算法相比,MOII算法得到的解具有更好的性能,能够充分利用前3个机架提供压下量的能力,充分发挥后4个机架轧制力调控板形的积极作用,使其弯辊控制系统有良好的工作起点.

参考文献(References):

- [1] 孙一康.带钢热连轧的模型与控制[M].北京:冶金工业出版社,2002:38-62,168-171,178-179.
(SUN Yikang. *The Model and Control of Hot Strip Mill* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 38-62, 168-171, 178-179.)
- [2] YAMADA F, SEKIGUCHI K, TSUGENO M, et al. Hot strip mill mathematical model and set-up calculation [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(1): 131-139.
- [3] YOSHIDA H, YORIFUJI A, KOSEKI S, et al. An integrated mathematical simulation of temperatures, rolling loads and metallurgical

- properties in hot strip mills [J]. *ISIJ International*, 1991, 31(6): 571 – 576.
- [4] STONE M D. Rolling of thin strip [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1953, 30(2): 61 – 73.
- [5] 刘来萌, 于成全, 孙正旭, 等. 热轧窄带钢能耗曲线的绘制及应用 [J]. 轧钢, 2004, 21(4): 65 – 67.
(LIU Laimeng, YU Chengquan, SUN Zhengxu, et al. Drawing energy consumption curve of hot narrow strip rolling and its application [J]. *Steel Rolling*, 2004, 21(4): 65 – 67.)
- [6] SEKIGUCHI K, SEKI Y, OKITANI N, et al. The advanced set-up and control system for Dofasco's tandem cold mill [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(3): 608 – 616.
- [7] LI H J, XU J Z, WANG G D, et al. Improvement on conventional load distribution algorithm in hot tandem mills [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(2): 36 – 41.
- [8] 王建辉, 徐林, 闫勇亮, 等. 改进粒子群算法及其对热连轧机负荷分配优化的研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1379 – 1383.
(WANG Jianhui, XU Lin, YAN Yongliang, et al. Improved PSO and its application to load distribution optimization of hot strip mills [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(12): 1379 – 1383.)
- [9] 姚峰, 杨卫东, 张明. 多目标差分进化在热连轧负荷分配中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 897 – 902.
(YAO Feng, YANG Weidong, ZHANG Ming. Multi-objective differential evolution used for load distribution of hot strip mills [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7): 897 – 902.)
- [10] JIA S J, LI W G, LIU X H, et al. Multi-objective load distribution optimization for hot strip mills [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20(2): 27 – 32, 61.
- [11] 梁国平. 关于轧机的最佳负荷分配问题 [J]. 钢铁, 1980, 15(1): 42 – 48.
(LIANG Guoping. The optimum distribution of loads on rolling mills [J]. *Iron and Steel*, 1980, 15(1): 42 – 48.)
- [12] 吕程, 赵启林, 刘立忠, 等. 热连轧精轧机组负荷分配的优化算法 [J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(1): 26 – 29.
(LÜ Cheng, ZHAO Qiliin, LIU Lizhong, et al. Optimizing algorithm of pass schedule for finisher [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2001, 13(1): 26 – 29.)
- [13] 李海军, 王国栋, 徐建忠, 等. 变步长数值转换法在热连轧负荷分配中的应用 [J]. 轧钢, 2006, 23(2): 16 – 18, 72.
(LI Haijun, WANG Guodong, XU Jianzhong, et al. Application of variable step-length numerical conversion method in load distribution of tandem hot strip mill [J]. *Steel Rolling*, 2006, 23(2): 16 – 18, 72.)
- [14] 王焱, 刘景录, 孙一康. 免疫遗传算法对精轧机组负荷分配的优化 [J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 339 – 341.
(WANG Yan, LIU Jinglu, SUN Yikang. Immune genetic algorithms (IGA) based scheduling optimization for finisher [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3): 339 – 341.)
- [15] SHOHET K N, TOWNSEND N. Flatness control in plate rolling [J]. *Journal of Iron and Steel Institute*, 1971, 209(10): 769 – 775.
- [16] 姚峰, 杨卫东, 张明. 改进粒子群算法及其在热连轧负荷分配中的应用 [J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 1061 – 1066.
(YAO Feng, YANG Weidong, ZHANG Ming. Improved PSO and its application to load distribution optimization of hot strip mills [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(8): 1061 – 1066.)

作者简介:

李冬 (1983–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂工业过程控制与优化, E-mail: lidong_lu@163.com;

刘建昌 (1960–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制理论与应用、复杂过程建模、控制与优化、故障诊断, E-mail: liujianchang@ise.neu.edu.cn;

谭树彬 (1974–), 男, 副教授, 目前研究方向为复杂工业过程控制与优化, E-mail: tanshubin@ise.neu.edu.cn;

于霞 (1989–), 女, 讲师, 目前研究方向为热连轧负荷分配策略的研究及应用, E-mail: yuxia@ise.neu.edu.cn.