

文章编号: 1000-8152(2007)01-0000-00

改进权重自适应 GA 及冷连轧轧制规程多目标优化

李勇¹, 刘建昌¹, 王昱²

(1. 东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004;

2. 沈阳航空工业学院 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 针对聚合多目标优化方法的权重难以确定的问题, 提出了一种改进的权重自适应方法, 并以遗传算法为基础对冷连轧轧制规程进行多目标优化. 首先, 结合某冷轧厂实际的轧制规程优化过程, 选取等功率裕量、轧制能耗及带钢打滑概率作为优化目标, 建立了冷连轧轧制规程的多目标优化模型. 然后将改进的权重自适应 GA 应用于不同规格的带钢轧制规程多目标优化中, 结果表明, 与实际应用的轧制规程相比, 该方法有效的降低了 3 个目标函数的值; 与权重自适应 GA 相比, 改进的权重自适应 GA 的针对性更强, 同时重要性高的目标收敛速度更快.

关键词: 改进权重自适应方法; 遗传算法; 冷连轧; 轧制规程; 多目标优化

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

An improved adaptive weight approach GA for rolling schedules multi-objective optimization of tandem cold rolling

LI Yong¹, LIU Jian-chang¹, WANG Yu²

(1. Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. Department of Automatic Control Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of designing weight for the weight-sum multi-object objective method, an improved adaptive weight approach is proposed, and it is applied to rolling schedules multi-objective optimization of tandem cold rolling based on GA. According to actual rolling schedules optimization process, power distribution, rolling energy consumption and slip rate are selected as objective functions, then the multi-objective model of rolling schedules is established. Applying the improved adaptive weight approach GA to optimize rolling schedules of different specifications strips, optimization result shows the proposed optimization method decreases the value of three objective functions simultaneous compared to actual rolling schedules; it is more targeted and makes the object with higher priority has the faster convergence speed compared with the adaptive weight approach GA.

Key words: improved adaptive weight approach; genetic algorithm; tandem cold rolling; rolling schedules; multi-objective optimization

1 引言 (Introduction)

冷连轧轧制规程的制定, 就是根据来料条件和设备条件来设定各道次轧机的出口厚度, 并由此计算出各道次轧机辊缝和轧辊速度. 合理的轧制规程可以带来极大的经济效益.

某冷轧厂的酸轧线采用五机架六辊 UCM 轧机, 此种机型能够在大压下量的情况下实现稳定轧制并且保证良好的带钢板形和边缘降. 轧机配有液压压下系统以及带钢板形控制功能. 该生产线轧制规程的设定以等功率裕量为目标, 采用“计算—判断—修正”的方法, 属于单目标的轧制规程优化. 与其他

单目标的轧制规程优化设计方法^[1-5]一样, 此类方法虽然有明确的目标, 但考虑的角度单一, 使单目标的优化结果不尽合理. 而轧制过程是复杂的, 需要考虑的目标也具有多样性, 以固定的加权系数聚合的多目标优化设计^[6-8], 其权重系数又很难确定, 人为的因素太多, 结果不能令人满意.

本文提出一种改进的权重自适应方法, 并以遗传算法为基础对冷连轧轧制规程进行了多目标优化. 结合某冷轧厂实际的轧制规程优化过程, 选取等功率裕量、轧制能耗及带钢打滑概率作为优化目标, 建立了冷连轧轧制规程的多目标优化模型, 并应用

改进的权重自适应 GA 对不同规格的带钢进行了轧制规程多目标优化。

2 轧制规程多目标优化模型的建立 (Establishing the multi-objective optimization model of rolling schedules)

2.1 目标函数 (Objective functions)

结合某冷轧厂实际的轧制规程设计过程, 选取等功率裕量、轧制能耗及带钢打滑概率作为优化的目标函数。

前文所述冷连轧生产线用 i 机架的电机功率平衡系数 Bal_i 判定功率裕量是否平衡, 当 Bal_i 的值全为 1 时, 功率裕量完全平衡, 当 $1 - a < Bal_i < 1 + a$, 则满足功率裕量平衡条件, a 为允许偏移量。 Bal_i 按实际生产线的过程自动化程序中的公式计算:

$$\begin{cases} Bal_1 = P_1/P_2/A_1 & i = 1 \\ Bal_i = \frac{H_{P_i}/H_{P_{\max_i}}/A_i}{(\sum_{i=2}^L H_{P_i}/H_{P_{\max_i}}/A_i)/(L-1)} & 1 < i < L-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_i = b \cdot k_{p_i} \cdot \kappa_i \cdot Dp_i \cdot \sqrt{R'_i \cdot (H_i - h_i)}$$

$$Dp_i = 1.08 + 1.79 \cdot r_i \cdot \sqrt{1 - r_i} \cdot \mu_i \cdot \sqrt{\frac{R'_i}{h_i}} - 1.02 \cdot r_i$$

$$r_i = (H_i - h_i)/H_i$$

$$\kappa_i = \left(1 - \frac{tb_i}{kp_i}\right)$$

$$\cdot \left(1.05 + 0.1 \cdot \frac{1 - \frac{tf_i}{kp_i}}{1 - \frac{tb_i}{kp_i}} - 0.15 \cdot \frac{1 - \frac{tb_i}{kp_i}}{1 - \frac{tf_i}{kp_i}}\right)$$

$$H_{P_i} = 0.2192 \times 10^{-3} \cdot (v_i/R_i) \cdot (G_{r_i} + G_{l_i})/1.34$$

其中: P_i 为 i 架轧制力 kg ; H_{P_i} 为 i 架电机功率的计算值 kw ; $H_{P_{\max_i}}$ 为 i 架电机额定功率 kw ; L 为机架数; A_i 为 i 架等功率裕量比例系数; b 为带钢宽度 mm ; k_{p_i} 为 i 架平均变形抗力 kg/mm^2 ; Dp_i 为 i 架摩擦力因子; κ_i 为 i 架张应力因子; R'_i 为 i 架工作辊压扁半径 mm ; r_i 为 i 架压下率; H_i 为 i 架入口厚度 mm ; h_i 为 i 架出口厚度 mm ; μ_i 为 i 架摩擦系数; tb_i 为 i 架后单位张力 kg/mm^2 ; tf_i 为 i 架前单位张力 kg/mm^2 ; G_{r_i} 为 i 架轧制力矩 $kg \cdot mm$; R_i 为 i 架工作辊半径 mm ; v_i 为 i 架轧制速度 m/min ; G_{l_i} 为 i 架损失力矩 $kg \cdot mm$ 。为了避免带钢表面留下轧辊痕迹, 1 架的功率裕量平衡用 1、2 架的轧制力平衡来实现; 为了保证板形, 末机架只允许很小的压下量, 所以不考虑末机架的功率裕量。基于功率裕量建立

目标函数一:

$$f_1 = \alpha \sum_{i=1}^{L-1} \ln[1 + \beta \times (Bal_i - 1)^2] \quad (2)$$

其中: α 、 β 为常数。 f_1 的值反映了各机架的功率裕量是否按预先设定的比达到了平衡, 其值越小则 Bal_i 的值越接近 1, 达到的功率裕量平衡的程度越好。为了使轧制能耗尽量小, 建立目标函数二:

$$f_2 = \sum_{i=1}^L H_{P_i} \quad (3)$$

其值越小, 总的轧制能耗越小。

对于薄窄料 (出口厚度小于 $0.8mm$, 宽度小于 $1200mm$), 在轧制过程中容易产生打滑现象^[9]。为预防打滑, 使得各机架打滑因子最小, 并且不出现任一机架打滑因子偏大的现象, 建立目标函数三:

$$f_3 = \lambda \times \sqrt{\sum_{i=1}^L (\psi_i - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \psi_i)^2} + (1-\lambda) \times \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \psi_i \quad (4)$$

$$\psi_i = \frac{1}{4\mu_i} \left| \sqrt{\frac{(H_i - h_i)}{R'_i}} + \frac{T_{b_i} - T_{f_i}}{P_i} \right|$$

其中: ψ_i 为 i 架打滑因子; λ 为常数; T_{b_i} 为 i 架总的后张力 kg ; T_{f_i} 为 i 架总的前张力 kg 。 f_3 的值越小, 打滑出现的概率越小。

2.2 约束条件 (Constraint conditions)

根据轧机的机械型号、电气状态条件、实际操作中应满足的条件, 确定如下约束条件:

(1) 压下率 $r_i \in [0.1, 0.45]$, $i = 1 \sim 4$, $r_5 \in [0.005, 0.03]$ 。其中: $r_1 \sim r_4$ 为相对压下率; r_5 为绝对压下率。

(2) 轧制力、轧制力矩、轧制功率小于各机架所允许的最大值。

(3) 轧制速度在满足生产要求的末机架最小速度与轧机机械系统允许的最大速度之间。

(4) 打滑因子 $\psi_i < 0.5$ ^[9]。

(5) 等功率裕量的比例系数 $A_i \in [0.5, 1.5]$ 。

2.3 轧制规程的多目标优化模型 (Multi-objective optimization model of rolling schedules)

以等功率裕量、轧制能耗、带钢打滑概率为优化目标建立轧制规程的多目标优化模型如下:

$$\begin{cases} \min Z = (z_1, z_2, z_3) \\ z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), z_3 = f_3(x) \\ s.t. \quad g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (5)$$

其中: Z 为向量函数; x 为轧制规程的染色体编码;

$g_i(x)$ 为第 i 个约束条件.

应用改进的权重自适应 GA 对 (5) 式进行求解, 得出 Pareto 最优妥协解, 进而达到对轧制规程多目标优化的目的 (具体做法见 4.5).

3 改进的权重自适应方法 (Improved adaptive weight approach)

3.1 权重自适应方法 (Adaptive weight approach)

Gen 和 Cheng 提出适应性权重方法 (adaptive weight approach)^[10], 该方法利用当前种群中的有用信息来重新调整权重, 获得朝向理想点的搜索压力. (5) 式中三个目标的适应性权重定义如下:

$$w_i = \frac{1}{z_i^{\max} - z_i^{\min}} \quad (6)$$

其中 $z_i^{\max}$ 、 $z_i^{\min}$ 分别是当前种群中第 i 个目标的最大值和最小值. 此时相应的评价函数如下:

$$z(x) = w_1 \cdot (z_1^{\max} - z_1) + w_2 \cdot (z_2^{\max} - z_2) + w_3 \cdot (z_3^{\max} - z_3) \quad (7)$$

极限点每代更新, 权重和极限点确定的超平面也随之更新, 最小极限点最终将接近理想点.

适应性权重方法与传统方法相比, 克服了固定权重的人为因素, 但在轧制规程多目标优化的应用中还存在如下不足:

(1) 当一代中某个目标的最大值等于最小值的时候算法会出错.

(2) 针对不同规格带钢制定轧制规程时的侧重点不同, 需要加入新的权重值影响因子, 使优化的结果更好的达到预期的目标.

3.2 改进的权重自适应方法 (Improved adaptive weight approach)

基于以上的分析, 本文提出一种改进的权重自适应方法 (improved adaptive weight approach, 简称为 IAWA), 其思想是: 在原有的权重自适应方法的权重因子中加入新的权重因子 w_{new} , 使所有目标中最重要先达到要求, 然后满足次要的目标, 以此类推. 以 3 目标的优化问题为例, 设目标重要程度的顺序为: 目标 1 大于目标 2 大于目标 3, w_{new} 的作用为: 当目标 1 没有达到要求时, 使目标 2、3 的权重远小于目标 1, 当目标 1 达到要求, 使目标 2 的权重最大, 当目标 1、2 都达到要求时, 使目标 3 的权重最大. 下面给出 w_{new} 的计算方法:

将各目标函数按下式标准化:

$$\bar{f}_i = \frac{2}{1 + e^{10(1+q)(1-f_i^n)}}, f_i^n = \frac{f_{target_i}}{f_i} \quad (8)$$

其中: $\bar{f}_i$ 为标准化后的目标函数 i 的值; f_{target_i} 为目标函数 i 的优化目标值; f_i 为目标函数 i 的值; q 为

常数, 当 q 取不同的值时 $\bar{f}_i$ 的形状如图 1 所示.

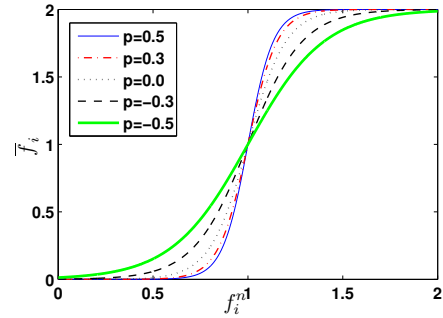


图 1 q 取不同的值时 $\bar{f}_i$ 的形状

Fig. 1 Shape of $\bar{f}_i$ when q is of different values

从图 1 中可以看出 $\bar{f}_i$ 的值在 $[0, 2]$ 内. 当 $f_i > f_{target_i}$ 时, $f_i^n < 1$, $\bar{f}_i < 1$; 当 $f_i < f_{target_i}$ 时, $f_i^n > 1$, $\bar{f}_i > 1$. 如优化之前, 优化目标值已知, 可以将 f_{target_i} 的值设为相应的优化目标值; 若未知则用单目标优化方法以目标 i 为优化目标, 找到其最优值 f_{opt_i} , 令 $f_{target_i} = \alpha \cdot f_{opt_i}$ (对于最小化问题 α 一般取 1.1~1.3, 对于最大化问题 α 一般取 0.7~0.9).

第 i 个目标的新的权重影响因子定义为下式.

$$w_{new_i} = \prod_{i=1}^k \bar{f}_i (\text{目标 } 1 \sim k \text{ 的重要程度大于 } i) \quad (9)$$

加入新的权重影响因子后 N 个目标的多目标优化问题的评价函数计算如下:

$$z_{ip}(x) = \sum_{i=1}^N w_{new_i} \cdot w_{ip_i} \cdot (z_i^{\max} - z_i + \zeta) \quad (10)$$

式中 $w_{ip_i} = \frac{1}{z_i^{\max} - z_i^{\min} + \zeta}$, ζ 为小常数, 可避免某代中某目标的最大值等于最小值时 IAWA 出错.

结合图 1、式 (9)、(10) 可以看出, 当存在比目标 i 重要的目标没有达到优化目标值时, 目标 i 就会被乘以小于 1 的因子 w_{new_i} , 减小了目标 i 的权重; 当所有比目标 i 重要的目标都达到优化目标值时, w_{new} 的值大于 1, 增加了目标 i 的权重. 这样就很好的实现了 IAWA 的思想.

4 基于改进权重自适应 GA 的冷连轧制规程多目标优化 (Improved adaptive weight approach GA based rolling schedules multi-objective optimization of tandem cold rolling)

4.1 编码及遗传算子 (Coding and genetic operator)

采用实数编码, 令:

$$x = [r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, A_1, A_2, A_3, A_4]$$

本文采用的遗传算子包括交叉算子和变异算子. 根据文献 [11] 对实数编码的多目标优化算法的研究成果, 采用模拟二进制交叉算子 (Simulated Binary Crossover) 和多项式变异算子 (polynomial mutation).

4.2 确定三个目标的重要性顺序 (Determining importance sequence of the three objectives)

目前大多数冷轧厂的轧制规程是以等功率裕量为检验依据的, 所以对于轧制负荷大的宽厚料, 要尽量使功率裕量平衡, 然后使总的轧制能耗尽量小; 而对于薄窄料 (出口厚度小于 0.8mm , 宽度小于 1200mm), 其主要矛盾是轧制过程中容易产生打滑的现象 [9]. 因此当轧制出口厚度小于 0.8mm , 宽度小于 1200mm 的带钢时, 3 个目标 (目标 1 为 (2) 式、目标 2 为 (3) 式、目标 3 为 (4) 式) 的重要性顺序为: 目标 3 > 目标 1 > 目标 2; 当轧制其他规格的带钢时, 3 个目标的重要性顺序为: 目标 1 > 目标 2 > 目标 3.

4.3 罚函数 (Penalty function)

对于超越限制的染色体, 不能完全拒绝, 因为像轧制规程优化这种不连续的复杂搜索区间, 往往会出现定义域范围外的染色体离最优点更近的情况. 对在解空间中无对应可行解的个体, 计算其评价函数时, 乘以一个罚函数, 从而既保存了不可行解的有用信息, 又对不可行解施加了选择压力. 种群中个体 x 的适应性罚函数构造如下 [12]:

$$p(x) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta b_i(x)}{\Delta b_i^{\max}} \right]^a \quad (11)$$

$$\Delta b_i(x) = \max\{0, g_i(x) - b_i\}$$

$$\Delta b_i^{\max} = \max\{\varepsilon, \Delta b_i(x) | x \in \text{pop}\}$$

其中: $\Delta b_i(x)$ 为当前染色体对第 i 个约束的违背值, $\Delta b_i^{\max}$ 为当前种群中对约束 i 的最大违背值, ε 为小正数, 用来避免罚函数中出现被零除的情况; pop 为当前种群.

4.4 评价函数 (Evaluation function)

评价函数是 GA 对种群中的不同个体进行比较的依据, 基于改进权重自适应 GA (IAWA GA) 轧制规程的多目标优化模型 (式 (5)) 的评价函数为:

(1) 薄窄带钢

$$z_{ip}(x) = p(x) \cdot [\overline{f_3} \cdot w_{ip_1} \cdot (z_1^{\max} - z_1 + \zeta) + \overline{f_1} \cdot \overline{f_3} \cdot w_{ip_2} \cdot (z_2^{\max} - z_2 + \zeta) + w_{ip_3} \cdot (z_3^{\max} - z_3 + \zeta)] \quad (12)$$

(2) 宽厚带钢

$$z_{ip}(x) = p(x) \cdot [w_{ip_1} \cdot (z_1^{\max} - z_1 + \zeta) + \overline{f_1} \cdot w_{ip_2} \cdot (z_2^{\max} - z_2 + \zeta) + \overline{f_1} \cdot \overline{f_2} \cdot w_{ip_3} \cdot (z_3^{\max} - z_3 + \zeta)] \quad (13)$$

由式 (12)、(13) 看出 z_i 的值越小, 评价函数的值越大, 即评价函数值高的个体优于评价函数值低的个体, 其进入下一代种群的机率越大.

4.5 基于 IAWA GA 的轧制规程多目标优化 (IAWA GA based multi-objective optimization of the rolling schedules)

基于 IAWA GA 的冷连轧轧制规程多目标优化过程如下:

Step1: 随机产生 N 个个体, 即随机产生 N 种轧制规程;

Step2: 由式 (2)、(3)、(4) 计算出每个个体对应的 3 个目标函数值, 采用改进的权重自适应方法根据当代种群的信息, 与目标的重要性顺序, 计算出每个目标函数的权重值, 由式 (11) 得出惩罚值, 并由式 (12) 或 (13) 计算出每个个体对应评价函数值.

Step3: 根据评价函数值, 用联赛选择法选出 $N/2$ 个父代个体. 即随机选取两个个体, 选择评价函数值大的个体作为父代个体, 重复这个过程, 直到父代个体的数量达到 $N/2$.

Step4: 对父代个体按一定的概率做 SBX 交叉、多项式变异, 产生子代个体.

Step5: 将父代与子代结合, 根据评价函数值由高到低的顺序选出 N 个个体, 作为下一代的种群.

Step6: 判断算法是否达到最大遗传代数, 是则终止算法, 否则返回 step2.

每进化一代, 父代与子代中评价函数值低的个体将会被淘汰, 评价函数值高的前 N 个个体进入下一代, 随着进化代数的增加, IAWA GA 将收敛于式 (5) 的一个 Pareto 最优妥协解. IAWA GA 取最后一代种群中评价函数值最高的个体作为最终的解, 它也是所有代的所有个体中评价函数值最高的个体.

5 优化参数以及结果 (Optimization parameters and results)

以某冷轧厂五机架冷连轧机为例, 利用本文提出的 IAWA GA 进行轧制规程多目标优化. 表 1 所示为实际的轧机参数.

表 1 冷连轧机参数

Table 1 Parameters of the tandem cold mills

机组参数	机架号				
	1	2	3	4	5
最大轧制力 (ton)	2000	2000	2000	1000	1000
最大转速 (m/min)	542	861	1190	1250	1250
额定功率 (kw)	4000	5750	5750	5750	5750
工作辊半径 (mm)	221.2	226.9	221.4	235.7	237.2

分别以薄厚两种规格的带钢为对象, 进行

轧制规程多目标优化. 其中规格 1 的薄窄带钢来料尺寸为 $2.6\text{mm} \times 900\text{mm}$ 的 CQ 钢, 成品尺寸为 $0.5\text{mm} \times 900\text{mm}$; 规格 2 的厚带钢来料尺寸为 $3.7\text{mm} \times 1720\text{mm}$ 的 DQ 钢, 成品尺寸为 $1.0\text{mm} \times 1720\text{mm}$. 设定种群数为 50, 运行代数 200 代, 根据文献 [13] 对多目标优化算法参数的研究成果, 交叉的概率定为 0.9, 变异的概率定为 0.1, 做 SBX 交叉 (Simulated Binary Crossover) 和多项式变异 (Polynomial mutation) 的分布指数 η_c 和 η_m 都取为 20^[13], 计算 f_{target_i} 时 α 取为 1.115. 在进化过程中, 记录每一代种群中评价函数最大个体所对应的 3 个目标函数的值 f_1^* 、 f_2^* 、 f_3^* , IAWA GA 的优化结果用实线表示, 权重自适应 GA(AWA GA) 的优化结果用虚线表示. 规格 1 带钢优化过程中, f_1^* 、 f_2^* 、 f_3^* 的进化过程如图 2 所示:

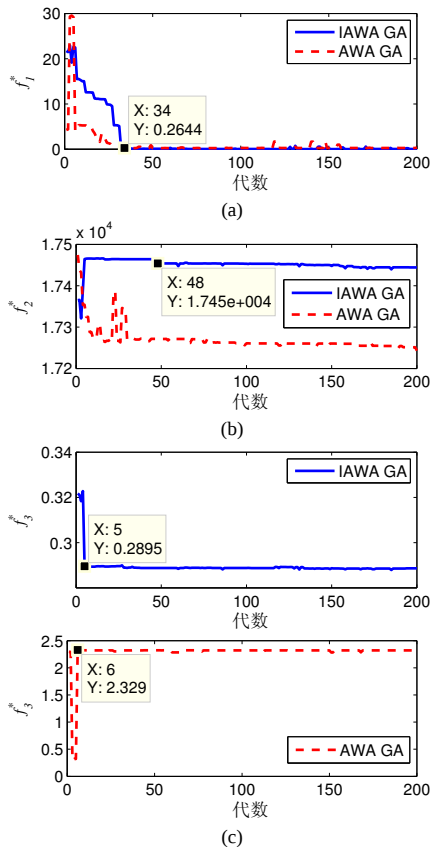


图 2 规格 1 带钢的 3 个目标函数优化过程. (a) 目标函数 1. (b) 目标函数 2. (c) 目标函数 3

Fig. 2 Optimization procedure of three objective functions of the first specification strip. (a) The first objective function. (b) The second objective function. (c) The third objective function.

对比图 2(a)、(b)、(c) 中的实线部分, 前 5 代重要性最高的 f_3^* 的值迅速变小, 重要性第二的 f_1^* 在 $f_3^* < f_{target_3}$ 后权重变为最大, 值开始迅速变小, 而 f_2^* 为了实现 $f_3^* < f_{target_3}$ 且 $f_2^* < f_{target_2}$ (条

件 1), 其值与第一代相比开始上升, 到 34 代, 条件 1 被满足了, f_2^* 开始小幅下降. 结果证明了 IAWA GA 实现了重要的先达到要求, 然后满足次要目标这一思想. IAWA GA 的最终优化结果为 $F^* = [f_1^*, f_2^*, f_3^*] = [0.02473, 17444, 0.28862]$, 对应的 $x = [37.754, 18.832, 19.134, 12.099, 0.00504, 1.4989, 0.80901, 0.89786, 0.62098]$, 经检验为可行解. 相应的轧制规程为来料厚度 2.6mm, 各架出口厚度分别为: 一架 1.1259mm, 二架 0.8242mm, 三架 0.5994mm, 四架 0.5026mm, 五架 0.5mm. 实际应用的轧制规程用式 (2)、(3)、(4) 计算出的 3 个目标函数值为: $f_1 = 0.77328$, $f_2 = 18262$, $f_3 = 4.3706$. 可见与原来的轧制规程相比, 反映打滑发生概率的 f_3 的值明显变小了, 同时降低了 f_2 、 f_1 的值, 使总的轧制能耗更小, 每个机架的功率裕量更加均衡.

对比图 2(a)、(b)、(c) 的实线与虚线部分, 令 $F_o^* = [f_{o1}^*, f_{o2}^*, f_{o3}^*]$ 表示 AWA GA 的优化结果, 可见 $f_{o1}^* > f_1^*$ 、 $f_{o2}^* < f_2^*$ 、 $f_{o3}^* > f_3^*$, 显然 F^* 更符合薄窄带钢轧制过程中容易产生打滑这一主要矛盾的要求; 同时 IAWA GA 比 AWA GA 的收敛速度快.

规格 2 带钢优化过程中 f_1^* 、 f_2^* 、 f_3^* 的进化过程如图 3 所示:

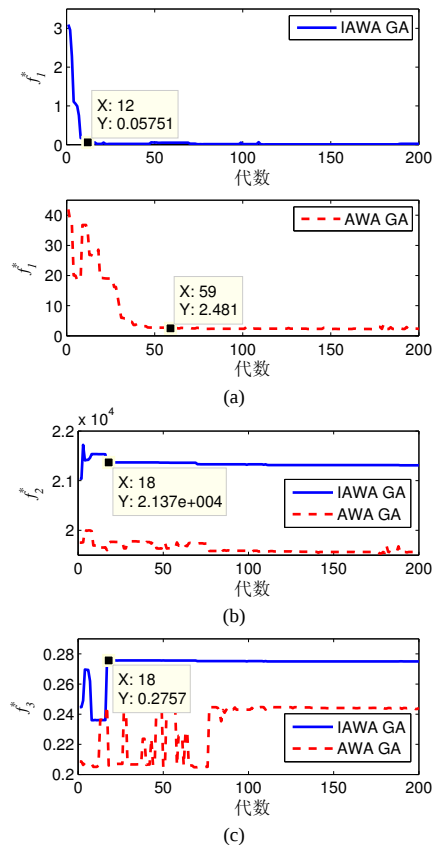


图 3 规格 2 带钢的 3 个目标函数优化过程. (a) 目标函数 1. (b) 目标函数 2. (c) 目标函数 3

Fig. 3 Optimization procedure of three objective functions of the second specification strip. (a) The first objective function.

(b) The second objective function. (c) The third objective function.

对比图 3 中的实线部分, 前 12 代重要性最高的 f_1^* 的值迅速变小, 重要性第二的 f_2^* 在 $f_1^* < f_{target_1}$ 后权重变为最大, 值开始变小, 而 f_3^* 为了实现 $f_1^* < f_{target_1}$ 且 $f_2^* < f_{target_2}$ (条件 2), 其值与初始值相比开始上升, 到 18 代, 条件 2 被满足了, f_3^* 停止上升. 结果证明了 IAWA GA 实现了重要的先达到要求, 然后满足次要目标这一思想. IAWA GA 的优化结果 $F^* = [f_1^*, f_2^*, f_3^*] = [0.02115, 21308, 0.27503]$, 对应的 $x = [36.594, 29.875, 20.435, 20.581, 0.03, 1.2248, 1.3371, 1.0331, 1.0762]$, 经检验为可行解. 相应的轧制规程为来料厚度 3.7mm, 各架出口厚度分别为: 一架 2.333mm, 二架 1.6313mm, 三架 1.2981mm, 四架 1.0310mm, 五架 1mm. 实际应用的轧制规程对应的 3 个目标函数值为: $f_1=0.15903$, $f_2=23473$, $f_3=0.28325$ 可见与原来的轧制规程相比 f_1 的值明显变小了, 同时降低了 f_2 、 f_3 的值.

对比图 3 中的实线部分与虚线部分, 可见 $f_{o1}^* > f_1^*$ 、 $f_{o2}^* < f_2^*$ 、 $f_{o3}^* < f_3^*$, 虽然 $f_{o2}^* < f_2^*$ 并且 $f_{o3}^* < f_3^*$, 但 f_{o1}^* 最终收敛到 2.481, 比实际应用的轧制规程计算出的 $f_1=0.15903$ 还要大很多. 显然 F^* 更符合厚带钢轧制过程以等功率裕量为主要目标的要求; 同时图 3 显示 IAWA GA 比 AWA GA 的收敛速度快.

6 结论 (Conclusions)

本文提出一种改进的权重自适应方法, 并以遗传算法为基础对冷连轧轧制规程进行了多目标优化. 结合某冷轧厂实际的轧制规程优化过程, 选取等功率裕量、轧制能耗及带钢打滑概率作为优化目标, 建立了冷连轧轧制规程的多目标优化模型. 将改进的权重自适应 GA 应用于不同规格带钢的轧制规程多目标优化, 结果表明, 经 IAWA GA 优化的轧制规程与实际应用的轧制规程相比, 有效的降低了 f_1 、 f_2 、 f_3 的值; 与权重自适应 GA 的优化结果相比, IAWA GA 得出的优化结果的针对性更强, 可以满足不同规格带钢的轧制规程多目标优化的要求, 同时从仿真结果可以看出 IAWA GA 使重要性高的目标收敛速度更快.

参考文献 (References):

- [1] Jingming Yang, Haijun Che, Yajie Xu and Fuping Dou. Application of Adaptable Neural Networks for Rolling Force Set-Up in Optimization of Rolling Schedules[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg LNCS. 2006: 864-869.
- [2] 陈东宁, 姜万录, 王益群. 基于粒子群算法的冷连轧机轧制负荷分配优化[J]. 中国机械工程. 2007, 18(11): 1303-1306. (CHEN Dongning, JIANG Wanlu, WANG Yiqun. Load distribution optimization of tandem cold mill based on PSO algorithm[J]. *China Mechanical Engineering* 2007, 18(11): 1303-1306.)
- [3] 王焱, 刘景录, 孙一康. 冷连轧机组负荷分配智能优化新方法[J]. 北京科技大学学报. 2002, 24(5): 551-552, 555. (WANG Yan, LIU Jinlu, SUN Yikang. A new intelligent optimization method for the scheduling of cold continuous rolling mills[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2002, 24(5): 551-552, 555.)
- [4] 杨景明, 等基于遗传算法的冷轧轧制规程优化设计[J]. 中国机械工程. 2007, 18(15): 1868-1871. (YANG Jingming, et al. Application of genetic algorithm to rolling schedule in tandem cold mill[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(15): 1868-1871.)
- [5] 李维明, 穆志纯. 基于案例推理的冷轧负荷分配模型研究[J]. 系统仿真学报. 2006, 18(8): 2162-2165. (LI Weiming, MU Zhichun. Case-based reasoning model for cold rolling schedule[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8): 2162-2165.)
- [6] D.D. Wang, A.K. Tieu, F.G. de Boer, B. Ma, W.Y.D. Yuen. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2000, 13: 397-406.
- [7] C.T.A. Pires, H.C. Ferreira, R.M. Sales and M.A. Silva. Set-up optimization for tandem cold mills: A case study[J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 173: 368-375.
- [8] 刘士新, 宋健海, 周山长. 热轧带钢轧制批量计划优化模型及算法[J]. 控制理论与应用. 2007, 24(2): 243-248. (LIU Shixin, Song Jianhai, ZHOU Shanchang. Model and algorithm for solving hot strip rolling batch planning problems[J]. *Control Theory and Applications* 2007, 24(2): 243-248.)
- [9] 白振华, 连家创, 王骏飞. 冷连轧机以预防打滑为目标的压下规程优化研究[J]. 钢铁. 2003, 38(10): 35-38. (BAI Zhenhua, LIAN Jiachuang, WANG Junfei. Screw-down schedule optimization for preventing slippage on cold tandem mill[J]. *Iron and Steel* 2003, 38(10): 35-38.)
- [10] Cheng, R. and M. Gen. An adaptive superplane approach for multiple object optimization problems, Technical report, Ashikaga Institute of Technology, 1998.
- [11] K. Deb, L. Thiele, M. Laumanns, and E. Zitzler. Scalable multi-objective optimization test problems[C].//*Proc of Cong. Evol. Compute*, Piscataway, NJ, 2002, vol. 1, pp. 825-830.
- [12] 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. (XUAN Guangnan, CHEN Runwei. Genetic algorithms and engineering optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2004.)
- [13] Robin C. Purshouse and Peter J. Fleming. On the Evolutionary Optimization of Many Conflicting Objectives[J]. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 2007, 11(6): 770-784.

作者简介:

李 勇 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事多目标优化算法、轧制流程优化与控制的研究, E-mail: liyong.neu@gmail.com

刘建昌 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制理论与应用, 复杂过程控制与优化的研究, E-mail: liujianchang@ise.neu.edu.cn

王 昱 (1980—), 女, 助教, 硕士, 主要从事复杂工业过程控制与优化的研究, E-mail: wangyu.siae@gmail.com