

# 基于遗传算法的热连轧机负荷再分配

罗永军 李忠富 曹军民 王长松 张杰 李江洁

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

**摘要** 以工业轧机为对象, 根据热连轧板形前馈的特点, 研究提出了基于遗传算法的轧制力负荷再分配的模型. 实验数据对比分析结果表明, 使用该策略能够获得良好的板形及生产的平稳过渡, 可用于热连轧生产.

**关键词** 板形前馈控制; 负荷再分配; 遗传算法; 热连轧

**分类号** TG 335.11; TP 273.1

在热连轧生产中, 负荷分配和工作辊弯辊力是过程控制的主要手段. 为了获得良好的控制性能和板形质量, 需要对其进行综合考虑.

在轧制过程中, 实际的轧制力值随着轧件温度、速度等参数的变化而频繁变化. 为了达到板形控制的目标, 通常通过调整工作辊的弯辊力, 对轧制力的波动进行补偿, 即前馈控制; 当弯辊力在许可范围内达不到补偿要求时, 则采取对轧制力进行负荷再分配的控制策略<sup>[1,2]</sup>.

本文以某厂工业轧机为对象, 基于遗传算法, 对负荷再分配进行优化研究.

## 1 基本原理

### 1.1 板形指标

凸度和平坦度是衡量板形质量的重要指标. 带钢出口凸度可以使用下式来表示:

$$C_b = C_n + \eta \left( \frac{h}{H} C_H - C_n \right) \quad (1)$$

Shohet 判别式为<sup>[1]</sup>:

$$\delta = \frac{C_H}{H} - \frac{C_b}{h} \quad (2)$$

$$K = a \left( \frac{h}{B} \right)^p \quad (3)$$

$$-2K < \delta < K \quad (4)$$

式中,  $C_b$  为出口凸度,  $\mu\text{m}$ ;  $C_n$  为负荷辊缝凸度,  $\mu\text{m}$ ;  $C_H$  为入口凸度,  $\mu\text{m}$ ;  $H, h$  为入口厚度、出口厚度,  $\text{mm}$ ;  $\eta$  为入口凸度系数;  $\delta$  为入口带钢比例凸度与

出口带钢比例凸度的残差;  $K$  为阈值;  $B$  为带钢宽度,  $\text{mm}$ ;  $a, p$  为常数,  $a = 40, p = 2$  或  $186$ .

当某机架带钢的出口与入口比例凸度之差满足式(4)时, 带钢不会产生浪形. 式(4)又称为“平坦死区”, 当  $\delta > K$  时, 将出现中浪; 当  $\delta < -2K$  时, 将出现边浪.

式(3)反映了带钢热轧中凸度和平坦度与厚度的关系.

### 1.2 控制原理

通常意义的轧制力负荷分配侧重于各机架负荷平衡和厚度控制, 而忽略了轧制力的板形调控作用.

轧制力负荷再分配是对当前轧制状况的一种优化调整, 与通常意义所指的轧制力负荷分配有所区别. 它考虑了当前的轧制力状况, 以当前轧制力负荷分配作为调节的起点以保证轧制力补偿控制, 从而保持生产的稳定, 并且获得良好的板形质量.

轧制力负荷再分配的目标首先是保证带钢板形良好, 即末机架出口带钢的凸度和平坦度同时达到期望目标. 其次, 再分配是对现有轧制状况的微调, 所以再分配调节的幅度不宜过大. 最后, 希望机架间平坦度变化最小. 由此可见, 这是一个多目标优化问题.

## 2 优化控制的实现

轧制力的负荷再分配涉及压下量, 而且同时

要顾及最终的良好板形, 具有多目标和多约束的特点.

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局化概率搜索算法, 尤其适合于复杂系统优化计算<sup>[3]</sup>. 由于遗传算法是对整个群体所进行的进化运算操作, 它着眼于个体的集合, 因而是求解多目标优化问题最优解集合的一个有效手段. 本文采用遗传算法实现板形的优化控制, 算法流程如图 1.

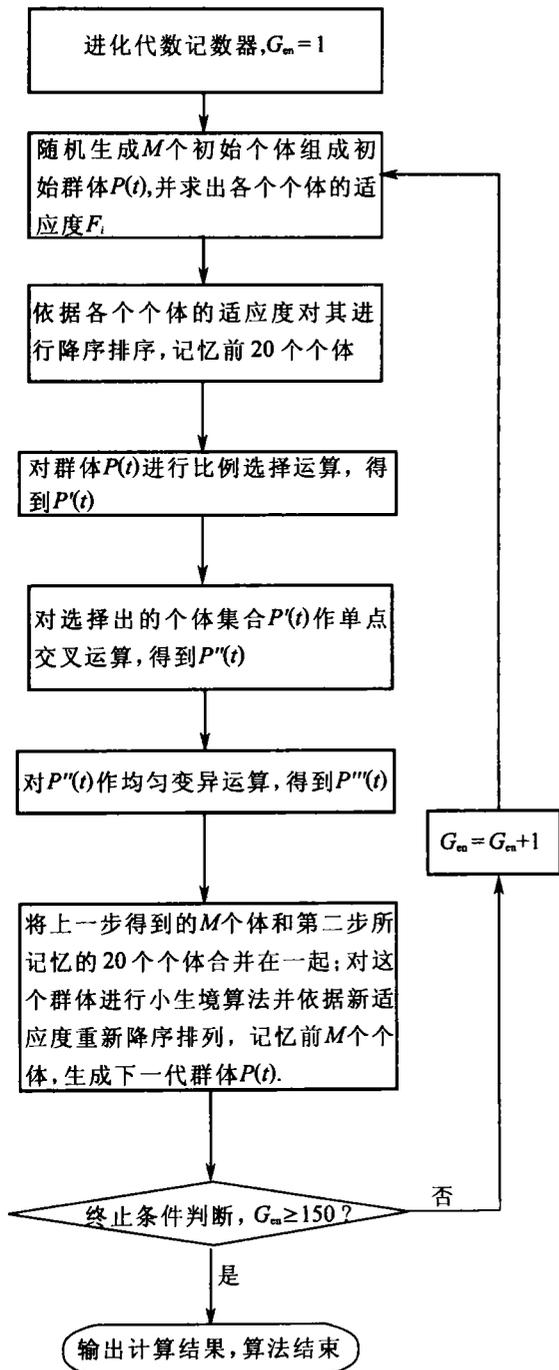


图 1 遗传算法流程图  
Fig.1 Flow chart of GA

### 2.1 优化目标

由于凸度和平坦度都可以表示为轧件入口厚度及出口厚度的函数, 所以将各机架出口厚度作为求解参数. 结合生产现场, 其精轧机组包括七个机架, 分别为 F1~F7. 由于 F7 机架(末机架)的变形量很小, 并且还要参与平坦度的闭环反馈控制, 所以负荷再分配中不包括 F7 机架. 这样可以确定带钢在 F1 机架的入口厚度  $h_0$  以及 F6 机架的出口厚度  $h_6$ , 而机架 F1~F5 的出口厚度为优化计算的可调参数.

本优化问题具有多目标性和多约束性, 采用权重系数法可以使得目标侧重点有所不同<sup>[4,5]</sup>.

(1) 目标函数  $f_1$ . 考虑到精轧机组板形控制以及后序工序的需要, 末机架出口带钢常带有一定比例凸度. 因此, 出口凸度以接近实际需要制定的目标凸度为目标.

$$f_{11} = \left| \frac{C_{h7} - C_{HT}}{C_{HT}} \right| \quad (5)$$

式中,  $C_{h7}$  为 F7 机架出口带钢的凸度,  $\mu\text{m}$ ;  $C_{HT}$  为目标凸度,  $\mu\text{m}$ .

末机架出口带钢平坦度以不出现任何浪形为目标, 即平坦度接近 0.

$$f_{12} = |\varepsilon_{H8}| \rightarrow \min \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon_{H8}$  为 F7 机架出口带钢的平坦度,  $\mu\text{m}$ .

凸度和平坦度共同决定热轧带钢的板形控制, 故取两者的加权组合作为板形的控制目标.

$$f_1 = a f_{11} + b f_{12} \quad (7)$$

式中,  $a, b$  为权重系数, 取  $a = 0.7, b = 0.3$ .

(2) 目标函数  $f_2$ . 在现有轧制状况下调整.

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left( \omega_i \frac{h_{ei} - h_i}{h_i} \right)^2} \rightarrow \min \quad (8)$$

式中,  $h_{ei}$  为第  $i$  机架负荷再分配后的出口厚度,  $\text{mm}$ ;  $h_i$  为第  $i$  机架当前的出口厚度,  $\text{mm}$ .  $\omega_i$  系数, 取值为: F1, 0.1; F2, 0.1; F3, 0.12; F4, 0.18; F5, 0.2; F6, 0.3.

(3) 目标函数  $f_3$ . 机架间平坦度变化最小.

$$f_3 = \sum_{i=3}^7 |\text{Flat}_{i+1} - \text{Flat}_i| \rightarrow \min \quad (9)$$

式中,  $\text{FLAT}_i$  为第  $i$  机架出口带钢的平坦度.

综合上述, 适应度评价函数为:

$$F = 1000 - (\xi_1 f_1 + \xi_2 f_2 + \xi_3 f_3) \quad (10)$$

式中,  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  为权重系数, 分别取值为 0.7, 0.15, 0.15.

### 2.2 遗传算法实现

遗传算法中的运行参数主要有个体编码串长度  $l$ 、群体大小  $M$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、终

止代数 $G_m$ 等等。

(1)编码/解码。

用长度为 10 位的二进制编码串来分别表示 5 个决策变量 $h_1 \sim h_5$ 。再将分别表示 $h_1 \sim h_5$ 的编码串连接在一起,组成一个 50 位的二进制编码串。相应地,解码时先将其切断为 5 个十位二进制数码串,然后将它们转化为对应的十进制整数代码 $h_1 \sim h_5$ 。

(2)确定评价函数。

采用上述的优化目标函数。

(3)设计遗传算子。

选择运算使用比例选择运算,为了避免多峰值函数计算常遇到的只能找到个别的几个最优解,甚至往往是局部最优解,在选择算子时加入小生境技术选择。

交叉运算使用单点交叉算子;变异运算使用

基本位变异算子。

(4)确定遗传算法的运行参数。

群体大小 $M=100$ ,终止代数 $G_m=150$ ,交叉概率 $p_c=0.8$ ,变异概率 $p_m=0.01$ 。

### 3 实验验证

根据从现场采集的工艺数据,如表 1,对模型进行验证。

表 2 为根据原设定压下量计算得到的板形(1)和根据本模型负荷再分配后的压下量计算所得的板形(2)的计算结果比较。

图 2 所示为计算过程中总适应度函数和三个目标函数各自的进化曲线,以及计算过程中最优个体进化曲线,依次为 $h_1 \sim h_5$ 。

在适应度图中,自上而下分别为适应度函数

表 1 计算工艺数据(规格:1 025 mm×3 mm)

Table 1 Technical data for calculation (Specification: 1025 mm×3 mm)

机架号	入口厚度/mm	工作辊辊形/ $\mu\text{m}$	入口凸度/ $\mu\text{m}$	出口凸度/ $\mu\text{m}$	平坦度/ $\text{IU}$
F1	33.00	124.80	250.000	125.516	0
F2	17.47	135.64	124.864	130.373	0
F3	10.28	121.09	161.385	119.732	0
F4	6.77	97.56	134.642	98.014	0
F5	5.20	94.34	92.069	91.745	0
F6	3.94	77.34	115.928	79.253	0.001
F7	3.31	68.51	63.399	65.710	0

表 2 计算结果比较

Table 2 Comparison of calculated results

板形	F1~F5 机架出口厚度/mm					凸度/ $\mu\text{m}$		平坦度/ $\text{IU}$	
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	目标	输出	目标	输出
1	17.47	10.28	6.77	5.20	3.94	60	67.62	0	0
2	17.50	9.91	6.84	4.56	4.14	60	65.84	0	0

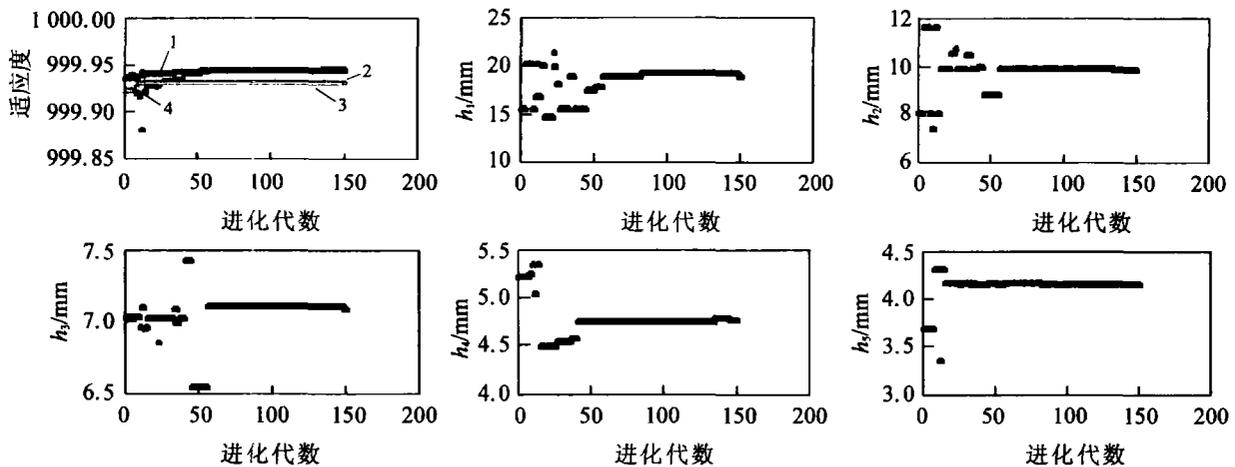


图 2 进化曲线

Fig.2 Curves of evolution process

值、目标函数 $f_1$ 的适应度、目标函数 $f_2$ 的适应度、目标函数 $f_3$ 的适应度。

从图中可知,在进化到大约 50 代后,曲线趋于收敛,并且适应度评价函数 $F$ 和单个目标函数有很好的 consistency。

## 4 结论

建立了基于遗传算法的热连轧精轧机组负荷再分配算法,经过实验验证它能够兼顾板形良好和生产平稳的多重要求。进化计算得到了负荷再分配问题的 Pareto 最优解,具有一定的实用价

值和推广意义。

## 参 考 文 献

- 1 Shohet K N, Townsend N. A Flatness control in plate rolling [J]. J Iron Steel Inst, 1971, (10): 769
- 2 Koehler G J. New directions in genetic algorithm theory [J]. Ann Oper Res, 1997, 75: 49
- 3 周明, 孙树栋. 遗传算法原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 4 顾云舟. 宽带钢热连轧机板形前馈与反馈建模及控制策略的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2002
- 5 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

## Application of GA to Rolling Forces Re-distribution in Hot Strip Mills

LUO Yongjun, LI Zhongfu, CAO Junmin, WANG Changsong, ZHANG Jie, LI Jiangjie

Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** Feedforward shape control aiming at the disturbance of rolling force plays an important role in hot strip mills. Based on the principle of feedforward shape control, a GA-based rolling force re-distribution model for industrial rolling mills was proposed. The comparison of test data shows that the model is appropriate and practicable.

**KEY WORDS** feedforward shape control; rolling force re-distribution; genetic algorithm; hot strip mills