

文章编号: 1002-0411(2002)02-189-04

# 基于免疫遗传算法的冷连轧机轧制参数优化方法

王 焱<sup>1</sup> 孙一康<sup>2</sup>

(1. 济南大学信控系 济南 250022; 2. 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心 北京 100083)

**摘 要:** 板厚、板形精度是衡量冷轧板带产品的二个主要质量指标, 本文以板厚板形为综合目标函数, 首次采用智能优化方法——免疫遗传算法对冷连轧机轧制参数进行优化。算例分析表明了该方法的有效性, 取得了良好的效果, 为冷连轧机组轧制规程的优化设计提供了一种新的尝试。\*

**关键词:** 冷连轧机; 板厚板形; 轧制参数; 免疫; 遗传算法

中图分类号: TG301

文献标识码: B

## OPTIMAL MEANS BASED ON IMMUNE GENETIC ALGORITHMS FOR ROLLING PARAMETERS OF TANDEM COLD STRIP MILL

WANG Yan<sup>1</sup> SUN Yikang<sup>2</sup>

(1. Department of Information and Control Engineering, Jinan University, Jinan, 250022;

2. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Strip gauge and shape are the two main quality targets of strip products. This paper adopt intelligent optimization method—Immune GA to optimize rolling parameters at cold tandem process whose objective function is the shape and gauge. With the example, the effectiveness of the method is proved and good results obtained. This method also provides another way for optimization design of the rolling schedule of cold continuous rolling mill.

**Keywords:** cold continuous rolling mill, gauge and shape, rolling parameter, immune, genetic algorithms

### 1 引言(Introduction)

轧制规程是冷轧带钢生产工艺的主要内容之一, 合理的轧制规程(压下负荷分配及相应的力能参数计算)是轧钢规范化和科学化的首要问题。轧制规程的优化设计, 既可以提高冷轧带钢的生产率、降低能耗, 又能保证产品的质量, 提高设备的利用效率, 能带来很大的经济效益。

本文首次提出将一种新的智能优化方法——免疫遗传算法(Immunity Genetic Algorithms, 简称 IGA)应用于冷连轧机轧制参数的优化计算中。算例分析表明, 该方法在轧制参数的优化计算方面的性能优于传统的优化方法。

### 2 免疫遗传算法(Immune genetic algorithms)

#### 2.1 遗传算法的特点

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法, 是根据达尔文的自然界生物进化思想——适者生存、优胜劣汰等自然进化规则, 将其灵活运用至优化运算领域而产生的一种智能寻优算法<sup>[1]</sup>。该方法尤其适用于处理传统搜索方法解决不了的复杂和非线性问题。与传统的优化算法相比, 遗传算法的主要特点是: 不直接作用在参变量集上, 而是利用参变量集的某种编码; 不是从单个点, 而是从点的群体开始搜索; 利用目标函数(适值)信息, 而无需导数或其它辅助信息; 利用概率转移规则指导搜索, 而非确定性规则。

虽然 GA 能解决传统优化方法难以解决的复杂优化问题, 在复杂空间内进行有效的搜索, 并具有很强的鲁棒性与适应性。但 GA 在显示其巨大优越性的同时也暴露出一些局限性: 缺乏产生最优个体的

\* 收稿日期: 2001-06-15

强大能力, 导致在接近全局最优解时搜索速度变慢, 过早收敛, 个体的多样性减少很快, 甚至陷入局部最优解等. 为了不改变 GA 搜索机制的同时又能改善 GA 的性能, 出现了许多改进的 GA. 本文借助生物免疫系统抗体多样性的遗传机理和细胞选择机理, 提出用于改善 GA 性能的免疫遗传算法(IGA).

## 2.2 免疫机理及其特点

免疫是生物体的一种特性生理反应. 免疫系统通过分布在全身的淋巴细胞识别和清除侵入生物体的抗原性异物, 维持内环境的稳定. 免疫系统虽然十分复杂, 但其抗御抗原的自适应能力却是十分明显的. 如果我们把外来入侵的抗原和免疫系统产生的抗体分别与实际求解问题的目标函数以及问题的解相对应, 那么, 生物免疫功能的抗体多样性的遗传机理和细胞选择机理, 对于改进和提高遗传算法的能力有十分重要的启迪作用.

免疫系统的主要特征<sup>[2]</sup>:

(1) 抗体的多样性: 通过细胞的分裂和分化作用, 免疫系统可产生大量的抗体来抵御各种抗原的入侵, 这种多样性的遗传机理可用于搜索优化, 它不尝试于全局最优, 而是进化地处理不同抗原的抗体, 这对提高 GA 的全局搜索能力又不陷于局部解很有帮助;

(2) 自我调节机构: 免疫系统具有维持免疫平衡的机制, 通过对抗体的抑制和促进作用, 能自我调节产生适当数量的必要抗体, 这对应于 GA 中个体浓度的抑制和促进, 利用这一功能可提高 GA 的局部搜索能力;

(3) 免疫记忆功能: 产生抗体的部分细胞会作为记忆细胞而被保留下来, 对今后入侵的同类抗原, 相应的记忆细胞会被迅速激发而产生大量的抗体, 如果 GA 利用这种抗原识别功能, 则可以加快搜索速度, 提高 GA 的总体搜索能力.

以下面二个典型测试函数为例, 说明标准遗传算法(SGA)和 IGA 的性能差别.

$$F_1 = (4 - 2.1x^2 + x_4/3) + xy + (-4 + 4y^2)y^2$$

$$F_2 = 0.002 + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6}$$

$$\text{其中}[a_{ij}] = \begin{vmatrix} -32 & -16 & 0 & 16 & 32 \\ -32 & -32 & -32 & -32 & -32 \\ -32 & -16 & \dots & 0 & 16 & 32 \\ -16 & -16 & \dots & 32 & 32 & 32 \end{vmatrix}$$

$F_1$  有六个局部极小点, 但其中只有两个为全局最小点:  $(-0.0898, 0.7126)$  和  $(0.0898, -0.7126)$ ,  $F_{1\min} = -1.031628$ ;  $F_2$  有多个局部极大点, 一般认为  $F_2 > 1$  为收敛条件. 分别用 SGA 和 IGA 对  $F_1$ 、 $F_2$  进行计算, 结果列于表 1.

表 1 SGA、IGA 计算结果对比

Tab. 1 The calculation result of the SGA and IGA

算法	$F_{1\max}$ 计算次数	$F_2 > 1$ 计算次数
SGA	423	> 10000
IGA	35	206

## 3 基于 IGA 的轧制参数优化方法(Optimal method based on IGA for the rolling parameters)

### 3.1 目标函数的建立和约束条件

对冷轧板带产品来说, 板厚和板形是二个主要质量指标, 本文利用文献[3]提出的目标函数, 即以板厚板形作为优化的综合目标函数, 目的是使冷轧机各架出口带钢的相对凸度尽量趋于一致, 即:

$$f = a_1(h - h_T)^2 + a_2(C_h - C_{h_T})^2 +$$

$$a_3 \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_{h_i}}{h_i} - \frac{C_{H_i}}{H_i} \right)^2$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为加权系数;  $H_i$ 、 $h_i$  为各架入口、出口带钢厚度;  $C_{H_i}$ 、 $C_{h_i}$  为各架入口、出口带钢凸度;  $h$ 、 $C_h$  为成品带钢的厚度和凸度;  $h_T$ 、 $C_{h_T}$  为成品带钢的目标厚度和凸度;  $n$  为机架数.

设备约束条件为

$$0 \leq N_i \leq N_{i\text{允}}$$

$$0 \leq P_i \leq P_{i\text{允}}$$

$$0 \leq M_i \leq M_{i\text{允}}$$

式中:  $N_i$ 、 $P_i$  和  $M_i$  分别为第  $i$  机架的轧制功率、轧制压力和轧制力矩;  $N_{i\text{允}}$ 、 $P_{i\text{允}}$  和  $M_{i\text{允}}$  分别为第  $i$  机架的最大轧制功率、最大轧制压力和最大轧制力矩.

工艺约束条件为

$$m \text{ in } \epsilon_i \leq \epsilon_i \leq m \text{ ax } \epsilon_i$$

$$m \text{ in } v_i \leq v_i \leq m \text{ ax } v_i$$

式中  $\epsilon_i$  为第  $i$  机架带钢的相对变形率;  $v_i$  为第  $i$  机架出口的带钢速度.

优化计算所用其它数学模型略.

### 3.2 IGA 算法步骤

(1) 读入初始化文件. 根据给定问题(视为抗原)

进行具体分析, 从中提出最基本的特征信息, 根据这种信息而得出的一类解即为抗体。

(2) 产生初始群体(抗体)并编码. 如果是记忆中的抗原, 则从记忆细胞中取出相应的抗体组成 IGA 的初始群体; 否则, 随机产生初始群体. 选择一定的编码方案(本文采用十进制编码方案)对初始群体进行编码, 组成基因码串, 每一码串代表一个个体, 表示优化问题的一个解. IGA 的任务就是要从这些群体出发, 模拟生物进化过程, 择优汰劣, 最后得出非常优秀的群体和个体, 满足优化的要求。

(3) 计算目标函数值(个体适应值). 按编码规则计算群体中每一个体的适应值, 即将自变量值带入目标函数, 计算目标函数值. 函数值大者, 代表的适应值也高, 更适应生存环境. 适应值为群体进化时的选择提供了依据。

(4) 演变记忆细胞. 若是新抗原, 则用当前群体中适应值高的个体代替记忆细胞中适应值低的个体; 否则, 将当前群体中适应值高的个体加入至记忆细胞中。

(5) 抗体选择(促进、抑制). 计算当前群体中适应值相近的个体浓度(即相近个体数与群体总数的比值), 浓度高则减小该个体的选择概率(即抑制); 反之, 则增加该个体的选择概率(即促进). 以此保持群体中个体的多样性。

(6) 抗体产生(交叉、变异). 按交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$  进行与标准遗传算法(SGA)相同的交叉和变异操作。

对产生的新一代群体重新进行评价、选择、交叉、变异等操作, 如此循环往复, 使群体中最优个体的适应值和平均适应值不断提高, 直至最优个体的适应值达到某一限值, 或最优个体的适应值和群体的平均适应值不再提高, 则迭代过程收敛, 输出结果, 算法结束。

基于 IGA 的轧制参数优化流程如图 1 所示。

#### 4 算例分析(Example analysis)

本文以某厂四机架冷连轧机组的计算数据为例, 选用材质 Q195, 来料厚度 2.75mm, 成品厚度 0.95mm, 带钢宽度 1000mm. 原轧制规程和采用 IGA 算法优化的轧制规程计算结果列于表 2。

从表 2 可以看出: 以板厚板形为综合目标函数, 基于 IGA 优化计算的轧制规程, 由于使用了符合现场实际的数学模型, 因此具有高精度的优化计算结果. 而且, 优化轧制规程的压力呈递减规律分布, 这

符合板形及板凸度的控制, 板形质量得到了很大改善, 成品平直度提高了 25.3%, 而原轧制规程没有充分考虑这一点。

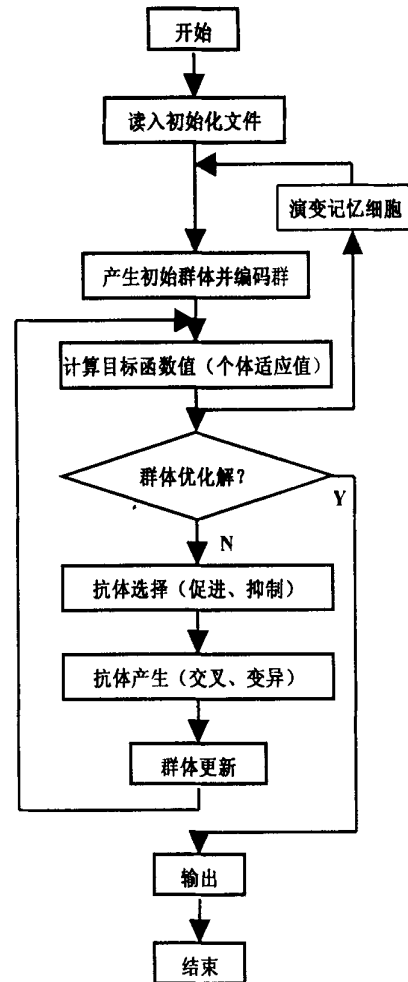


图 1 IGA 轧制参数优化流程

Fig. 1 The optimization flow chart of the rolling parameter of IGA

#### 5 结论(Conclusion)

以单目标优化轧制规程, 一般会带来很多不利因素. 对于多变量、非线性、强耦合、时变性的轧制系统, 以板厚板形为综合目标函数, 借助免疫遗传算法的强大搜索能力、自适应能力和鲁棒性, 对冷连轧机轧制参数进行智能优化, 其性能优于 SGA 和传统优化方法. 该方法算法简单, 具有很强的学习功能, 计算精度高, 取得了良好的效果, 为冷连轧机组轧制规程的优化设计提供了一种新的尝试。

表 2 四机架冷连轧机轧制规程计算结果

Tab. 2 The calculation result of the rolling schedule of the 4-stand tandem cold strip mill

机架	规程	入口厚度 mm	出口厚度 mm	压下率%	凸度 mm	轧制压力 MN	速度 m/min
1	原	2.75	2.11	23.27	0.0632	9.73	597
	优化	2.75	2.12	22.90	0.0611	9.47	585
2	原	2.11	1.35	36.02	0.0784	8.12	893
	优化	2.12	1.47	30.66	0.0752	9.32	836
3	原	1.35	1.06	21.48	0.0680	8.35	1141
	优化	1.47	1.04	29.25	0.0677	9.19	1166
4	原	1.06	0.95	10.38	0.0651	7.41	1273
	优化	1.04	0.95	8.65	0.0641	7.05	1273

注: 成品平直度: 原轧制规程 16.21 I; 优化规程 12.11 I

### 参 考 文 献 (References)

- Holland J H. Genetic Algorithm and the Optimal Allocations of Trials. SIAM Journal of Computing, 1973, 2: 88~ 105
- 王煦法, 张显俊, 曹先彬等. 一种基于免疫原理的遗传算法. 小型微型计算机系统, 1999, 20(2): 117~ 120
- 张大志, 李谋渭, 孙一康等. 基于遗传算法的冷连轧机参数优化设计系统. 上海金属, 2000, 22(6): 25~ 30
- 陈根社, 陈新海. 遗传算法的研究与发展. 信息与控制, 1994, 23(4): 215~ 222
- Chun J S, Kim M K, Jung H K, et al. Shape Optimization of

Electromagnetic Devices Using Immune Algorithm. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2): 1876~ 1879

- 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法. 电子学报, 2000, 28(7): 74~ 78

### 作者简介

王焱(1961-), 女, 博士研究生, 副教授. 研究领域为智能控制、智能优化等.

孙一康(1932-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为轧钢自动化等.