

基于遗传算法的不锈钢冷连轧机轧制规程优化

张 欣¹, 陈树宗², 李 旭³, 孙 杰³, 梅瑞斌¹, 王晓宇¹

(1. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 冷轧不锈钢属于高端精品钢材,其生产过程控制系统是最复杂的工业控制系统之一,系统控制精度要求高、动态响应时间短、轧制速度快且工艺参数多。在不锈钢冷轧过程中,合理的轧制规程是保证冷轧不锈钢产品质量和生产效率的基础,其模型精度不仅会影响产品尺寸精度,而且会影响冷轧企业高端产品的研发拓展。为了提高冷轧不锈钢生产过程中的产品质量精度,同时考虑尽可能降低轧制过程总能耗,在深入研究传统负荷分配法和轧制规程计算原理的基础上,针对世界首套 7 机架不锈钢冷连轧机组,根据冷连轧生产工艺,设计了一种包含目标项和惩罚项的目标函数结构形式,选取电机功率均衡、轧制力均衡、压下分配合理、轧制能耗小、板形良好为目标,构建由 5 个单目标函数加权和组成的总目标函数,通过采用遗传算法对某 850 mm 不锈钢冷连轧机典型产品规格进行轧制规程优化计算,并与比例负荷分配法和 Nelder-Mead 单纯形法求解的轧制规程进行对比,从而确定最优的不锈钢冷连轧轧制规程。结果表明,遗传算法实现了所建立目标函数的高效求解,通过调整目标函数的权重系数,可以有选择地优化轧制规程,采用遗传算法优化轧制规程的计算精度、收敛速度和求解稳定性方面均满足在线控制要求,为高质量不锈钢冷轧生产奠定了基础。

关键词: 不锈钢; 冷连轧; 轧制规程; 多目标优化; 遗传算法

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2023)07-0099-07

Optimization of tandem cold rolling schedule for stainless steel strip based on genetic algorithm

ZHANG Xin¹, CHEN Shuzong², LI Xu³, SUN Jie³,
MEI Ruibin¹, WANG Xiaoyu¹

(1. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;
2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;
3. Stage Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Cold rolled stainless steel is part of the high-end fine steel, and its production process control system is one of the most complex industrial control systems, with high system control accuracy, short dynamic response time, fast rolling speed and many process parameters. In the stainless steel cold rolling process, the reasonable rolling schedule is the basis of guaranteeing the quality and production efficiency. The optimization of rolling schedule is an effective way to save energy and reduce carbon in China's iron and steel enterprises, which has become a research hotspot in the iron and steel industry. And the model accuracy of the process control system will not only affect the dimensional control accuracy of the product, but also affect the R&D and expansion of high-end products and intelligent transformation of cold rolling enterprises. In order to improve the product quality accuracy and reduce the total energy consumption in the stainless steel cold rolling process, the traditional load distribution method and the calculation principle of rolling schedule were deeply studied. The first set of seven-stand stainless steel tandem cold rolling mill in the world was taken as the research object, and an objective function structure form containing the target term and the penalty term was designed. The rolling power balance, rolling force balance, reasonable reduction distribution, low rolling energy consumption and good strip shape were selected as the goals to construct a total objective function. The rolling schedule of typical product in an 850 mm stainless steel cold rolling mill is optimized by genetic algorithm, and compared with the rolling schedule solved by proportional load distribution method and Nelder-

Mead simplex algorithm. Thus, the optimal cold rolling schedule for stainless steel is determined. The results show that, the genetic algorithm realizes the efficient solution of the established objective function. The rolling schedule can be optimized selectively by adjusting the weight coefficient of the objective function. The calculation precision, convergence speed and stability of genetic algorithm for optimization of rolling schedule can meet the requirements of on-line control, which lays a solid foundation for the production of high quality cold stainless steel products.

Key words: stainless steel; tandem cold rolling; rolling schedule; multi-objective optimization; genetic algorithm

不锈钢具有十分优良的耐腐蚀性能和加工性能,广泛应用于工业生产和人们的日常生活。近年来,中国对不锈钢的需求快速增长,已成为世界上备受关注的第一大不锈钢消费国。为适应不锈钢快速增长的需求,中国生产不锈钢主要企业的装备、工艺和技术也取得了显著进步,由于不锈钢生产中轧制变形抗力大,产品厚度和板形控制精度要求高,表面质量要求严格,生产不锈钢的冷连轧装备已由传统的 5 机架冷连轧机发展到 7 机架冷连轧机^[1-5]。不锈钢生产的快速增长促使原材料价格上涨,也使不锈钢生产的利润空间日趋减小,这就迫使不锈钢生产厂家不断开发新工艺和新技术,以便达到节约能源消耗的目的,其中轧制规程优化一直是研究的重点。

冷连轧轧制规程计算是过程自动化系统的核心功能,主要作用是为轧机基础自动化系统提供合理的负荷分配及轧制设定参数,针对轧制规程优化问题,国内外众多学者开展了大量的研究工作。张殿华等^[6]针对异常轧制过程数据集的小样本问题,开发了面向不确定小样本环境的学习算法,建立打滑、热划伤等生产运行状态的实时评判模型,以最优运行指标评价函数实时监控轧制非稳态过程运行状态;张清东等^[7]基于遗传算法 BP 神经网络建立了结合数学模型的变形阻力和轧制压力修正模型;WANG D D 等^[8]提出了一种基于遗传算法的 5 机架冷连轧机轧制规程优化方法,构建了考虑功率分配、机架间张力、带钢板形和工艺设备约束等条件的目标函数;王晓晨等^[9]针对 UCM 轧机建立了板厚-板形-张力设定系统综合优化模型,开发了具有全局寻优能力的群粒子群差分进化算法;李勇等^[10]针对聚合多目标优化方法的权重确定问题,提出了一种改进权重自适应方法,并采用遗传算法对冷连轧规程进行多目标优化;陈树宗等^[11-12]以冷轧数学模型中自适应系数作为寻优参数,采用 Nelder-Mead 单纯形算法对目标函数进行寻优求解;WANG Y 等^[13]和 BABAJAMALI Z 等^[14]研究了基于 NSGA-II 的冷轧轧制规程多目标优化策略;白振华等^[15]针对冷连轧过程常见的打滑现象,给出了打滑判定不等式,建立了以预防打滑为目标的压下规程优化方

法;YANG J M 等^[16]将遗算法应用于 1 370 mm 冷连轧机组轧制规程的优化过程,并与现有轧制规程进行了对比分析;张升琳等^[17]以负荷均衡、综合功率和预防打滑因子为目标建立多目标优化函数,将遗传算法与种群规模自组织机制相结合提高了算法寻优精度;HU Z Y 等^[18]选取相对功率裕度、防止打滑、板形良好等为目标构建多目标函数,采用深度置信网络进行轧制规程优化计算;赵新秋等^[19]采用改进的免疫克隆多目标算法对某钢厂冷连轧机进行轧制规程优化计算;GAO Z Y 等^[20]研究了以抑制振动和速度提升为目标的轧制规程优化策略,并采用模式搜索法求解了优化模型;LI Y 等^[21]提出了采用差分进化算法优化冷连轧机轧制规程,解决工艺参数的不确定性问题;WANG Y L 等^[22]结合深度神经网络计算轧制力,并设计多目标粒子群优化器优化轧制规程;BU H N 等^[23-24]采用案例推理结合禁忌搜索提高冷连轧轧制规程的计算效率和精度。

以上学者从多个角度对冷连轧过程轧制规程计算及优化问题进行了大量研究,但均是针对传统的 5 机架冷连轧机组,伴随着 7 机架不锈钢冷连轧机组的出现,有必要结合新的轧制装备对轧制规程优化问题进行深入研究。本文基于某钢厂 850 mm 7 机架不锈钢冷连轧生产线展开研究,选取电机功率均衡、轧制力均衡、压下分配合理、轧制能耗小、板形良好为目标构建多目标函数,采用遗传算法对典型产品规格进行轧制规程优化计算,并与比例负荷分配法和 Nelder-Mead 单纯形法求解的轧制规程进行对比,为 7 机架不锈钢生产过程的轧制规程设定提供了理论支撑。

1 问题描述与数学模型

1.1 冷连轧规程优化问题

不锈钢冷轧工艺分为传统 20 辊可逆轧制和全连续轧制,不同的生产工艺路线各有其不同的优势和市场定位。本文研究的 7 机架冷连轧机组的设备布置形式如图 1 所示。轧制规程优化的任务就是制定轧件在连轧机组轧制过程中的减薄途径,合理的规程分配可以使得轧机在各机架负荷均衡前提下取

得更高的轧制速度,降低设备损耗及维修成本,减少 钢材和能源的消耗,获得良好的产品性能。

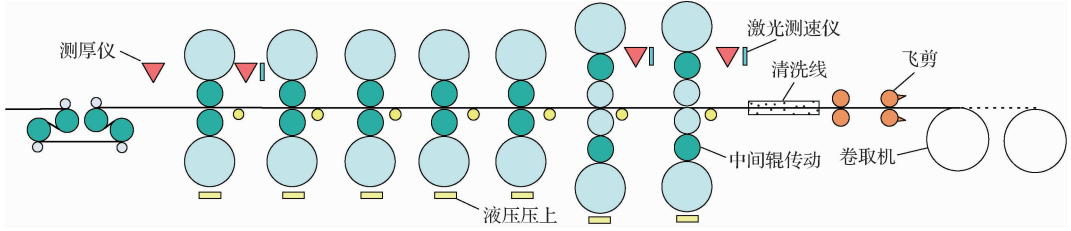


图 1 连轧机组设备布置形式

Fig. 1 Equipment layout of tandem cold rolling mill

1.2 冷连轧过程数学模型

带钢冷连轧数学模型表征了一卷带钢在冷连轧过程的输入和输出关系,主要包括轧制力模型、变形抗力模型、摩擦因数模型、前滑模型等,其中轧制力模型是冷连轧数学模型的核心^[25-28]。

轧制力模型计算公式为

$$F = BQ_P \sigma' k_T \sqrt{R'(H-h)} \quad (1)$$

$$Q_P = 1.08 + 1.79u \frac{H-h}{H} \sqrt{\frac{R'}{H}} - 1.02 \frac{H-h}{H} \quad (2)$$

$$R' = R[1 + \frac{16(1-\nu^2)F}{\pi EB(H-h)}] \quad (3)$$

式中: F 为轧制力, N; B 为带钢宽度, mm; Q_P 为轧制力外摩擦影响系数; σ' 为平均变形抗力, MPa; k_T 为张力影响系数; R' 为轧辊压扁半径, mm; R 为轧辊半径, mm; H 为入口带钢厚度, mm; h 为出口带钢厚度, mm; u 为摩擦因数; ν 为泊松比; E 为弹性模量。

轧制力矩模型计算公式为

$$M = \frac{1}{2}[F \sqrt{R(H-h)} + (t_f - t_b)R] \quad (4)$$

式中: M 为轧制力矩, N·mm; t_f 、 t_b 分别为轧制前、后张应力, MPa。

电机功率模型是为了便于比较和应用建立的,通常采用单位小时产量的轧制功耗即所谓的单位能耗,相当于每小时轧制 1 t 钢材所消耗的能量。

$$P = MV/R \quad (5)$$

式中: P 为电机功率, kW; V 为轧制速度, m/s;

假设单位时间 t 内轧制的轧件质量为 G , 则 $G = \rho h B v t$, 其中, v 为轧制速度, 轧制单位质量能耗为 $a = M/(R \rho h B)$ 。

2 目标函数构建

针对 7 机架不锈钢冷连轧生产过程,考虑电机

功率均衡、轧制力均衡、压下分配合理、轧制能耗小、板形良好等方面设计目标函数。为了简化求解过程,在设计目标函数时考虑增加惩罚项,当迭代点不满足某个约束条件时,目标函数值会因惩罚项的增加而呈指数倍增长,这样便可淘汰该迭代点^[29-31]。目标函数的结构形式如下。

1) 轧制力均衡目标函数 J_1 为

$$\min J_1 = \sum_{i=1}^N K_{F,i} \left(\frac{F_i - F_{avg,i}}{F_{avg,i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i - F_{nom,i}}{F_{delta,i}} \right)^{80} \quad (6)$$

$$F_{avg,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (7)$$

$$F_{nom,i} = (F_{max,i} + F_{min,i})/2 \quad (8)$$

$$F_{delta,i} = (F_{max,i} - F_{min,i})/2 \quad (9)$$

式中: $K_{F,i}$ 为加权系数; F_i 为第 i 机架轧制力, N; $F_{avg,i}$ 为平均轧制力, N; $F_{nom,i}$ 为轧制力目标值, N; $F_{delta,i}$ 为轧制力偏差基准值, N; $F_{max,i}$ 为第 i 机架最大允许轧制力, N; $F_{min,i}$ 为第 i 机架最小允许轧制力, N; N 为机架数。

2) 功率均衡目标函数 J_2 为

$$\min J_2 = \sum_{i=1}^N K_{P,i} \left(\frac{P_i - P_{max,i}}{P_{max,i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{2P_i - P_{max,i}}{P_{max,i}} \right)^{80} \quad (10)$$

式中: $K_{P,i}$ 为第 i 机架电机功率加权系数; P_i 为第 i 机架电机功率, kW; $P_{max,i}$ 为第 i 机架电机额定功率, kW。

3) 压下率目标函数 J_3 为

$$\min J_3 = \sum_{i=1}^N K_{r,i} \left(\frac{r_i - r_{nom,i}}{r_{delta,i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{r_i - r_{nom,i}}{r_{delta,i}} \right)^{20} \quad (11)$$

$$r_{nom,i} = (r_{max,i} + r_{min,i})/2 \quad (12)$$

$$r_{\text{delta},i} = (r_{\text{max},i} - r_{\text{min},i})/2 \tag{13}$$

式中： $K_{r,i}$ 为第 i 机架压下率加权系数； r_i 为第 i 机架压下率； $r_{\text{nom},i}$ 为第 i 机架压下率目标值； $r_{\text{delta},i}$ 为第 i 机架压下率偏差基准值； $r_{\text{max},i}$ 为第 i 机架最大允许压下率； $r_{\text{min},i}$ 为第 i 机架最小允许压下率。

4) 能耗最小目标函数 J_4 为

$$\min J_4 = \sum_{i=1}^N P_i \tag{14}$$

5) 考虑板形良好的目标函数 J_5 为

$$\min J_5 = \sum_{i=1}^N K_{f,i} \left(\frac{F_i - F_{\text{flat},i}}{F_{\text{delta},i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i - F_{\text{nom},i}}{F_{\text{delta},i}} \right)^{80} \tag{15}$$

式中： $K_{f,i}$ 为第 i 机架板形加权系数； $F_{\text{flat},i}$ 为维持板形良好的轧制力， N 。

以轧制力均衡、功率均衡、压下率、能耗最小和板形良好为优化目标建立的多目标优化模型为

$$\min f = K_1 f_1 + K_2 f_2 + K_3 f_3 + K_4 f_4 + K_5 f_5 \tag{16}$$

式中： f 为轧制规程的多目标函数； $f_1 = J_1(x)$ ， $f_2 = J_2(x)$ ， $f_3 = J_3(x)$ ， $f_4 = J_4(x)$ ， $f_5 = J_5(x)$ ， x 为轧制规程的染色体编码； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 分别为各单目标函数在多目标函数中的加权系数，并且满足 $K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = 1$ 。

3 遗传算法求解流程

遗传算法是以适应度为依据的逐代搜索过程，通过不断地选择、交叉和变异等遗传操作，使得解的质量越来越好，主要由编码机制、控制参数选择、适应度计算函数和遗传算子 4 部分组成^[32]，具体工作流程如图 2 所示。

1) 编码机制。对于 7 机架不锈钢冷连轧生产过程，机架之间张力根据经验进行设定，由于末机架出口厚度是固定值，因此前 6 个机架出口厚度采用实数编码方式进行编码。

2) 生成初始种群。将相邻 2 个机架作为边界，根据每个机架压下率约束条件确定各机架出口厚度范围，通过随机方法生成初始种群，利用贪婪算法局部寻优的优势对初始个体进行优化，由此得到初步优化的个体。

3) 构建适应度函数。适应度函数是用来计算个体的适应度大小，从而决定其遗传机会的大小。构建的适应度函数形式见式(17)，其中 f_{max} 为目标函数最大值， ξ 为一个较小的数，目的是避免适应度函

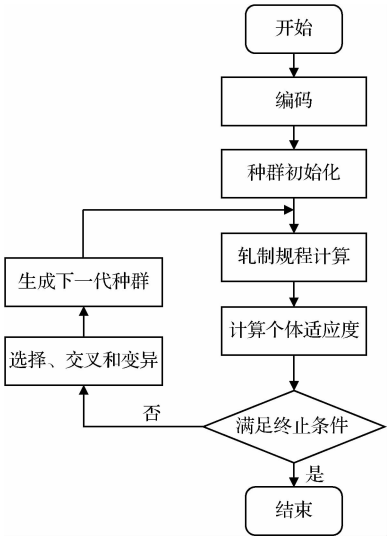


图 2 遗传算法流程图
Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm

数值为 0。适应度函数的值越大，其进入下一代种群的概率越大。

$$F(x) = -f(x) + f_{\text{max}} + \xi \tag{17}$$

4) 设置遗传算子。遗传算法中的选择操作采用赌轮选择算子，计算每个个体在整个种群适应度中的被选择概率和累计概率，通过生成的随机数确定被选个体；交叉操作运用随机双点交叉进行运算，当随机数值小于交叉概率，则对选定的个体基因进行替换；变异操作采用随机单点变异，当随机数值小于变异概率时，则对基因进行变异操作，通过适当的变异可以增加找到最优解的概率。

4 分析与讨论

为验证所建立模型的准确性，以某 850 mm 7 机架不锈钢冷连轧机组为研究对象，选取典型产品规格进行分析。该生产线主要用于生产 AISI304 不锈钢，设计年生产能力为 30 万 t，机组最大轧制速度为 450 m/min，最小可轧厚度为 0.3 mm，其 F1~F5 机架为工作辊传动的 4 辊轧机，F6 和 F7 机架为中间辊传动的 6 辊轧机，由于轧机出口配置有张力辊组，末机架出口可以提供较大的前张力。该生产线基本设备参数见表 1。

验证试验所选钢种为 AISI304，原料尺寸为 2.8 mm×730 mm，成品尺寸为 0.45 mm×730 mm。该试验在 python 3.9.12 中实现，运行在 Intel(R) i7-10510U CPU @1.8GHz (32G RAM)。在遗传算法求解过程中，将初始种群数目设为 100；遗传代

表 1 850 mm 7 机架不锈钢冷连轧机组设备参数

Table 1 Mechanical equipment parameters of 850 mm stainless steel tandem cold rolling mill

名称	1 号轧机	2 号轧机	3 号轧机	4 号轧机	5 号轧机	6 号轧机	7 号轧机
工作辊直径/mm	212.01	211.74	205.70	201.33	191.65	170.78	168.72
中间辊直径/mm	—	—	—	—	—	314.31	316.82
支撑辊直径/mm	869.12	870.85	862.25	865.32	866.98	867.28	875.22
最大轧制力/kN	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000
主电机功率/kW	1 200	1 400	1 600	1 600	1 600	1 400	1 400

数对寻优结果的影响如图 3 所示,当寻优次数在 50 次左右时目标函数值趋于稳定,为了得到最优解并兼顾求解时间,将迭代代数设定为 200;为选择合适的遗传算子,以不同交叉概率和变异概率在种群数为 100、遗传代数为 100 的条件下进行计算,结果如图 4 所示,最终选定交叉概率为 0.85,变异概率为 0.1。

为了验证基于遗传算法的轧制规程多目标优化结果,将优化后的轧制规程与传统的比例负荷分配法(LDP, load distribution proportional)和冷轧生产线实际使用的单纯形法(N-M, nelder-mead)规程进行了对比,并将不同轧制规程中各机架压下

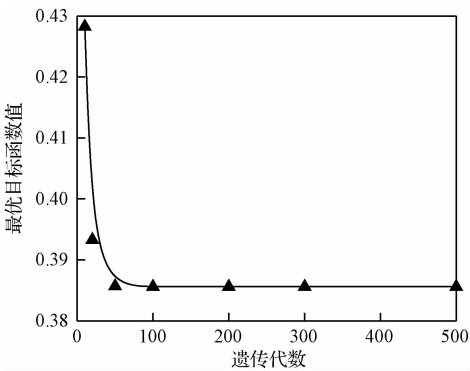
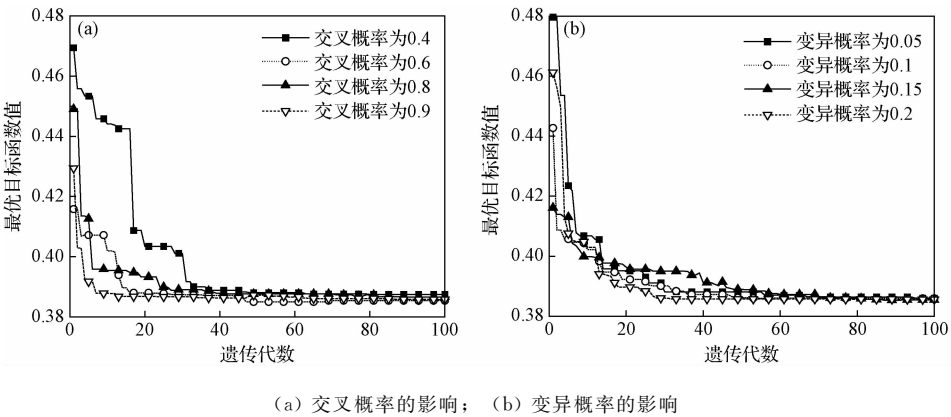


图 3 遗传算法收敛迭代曲线

Fig. 3 Convergence iterative curve of genetic algorithm



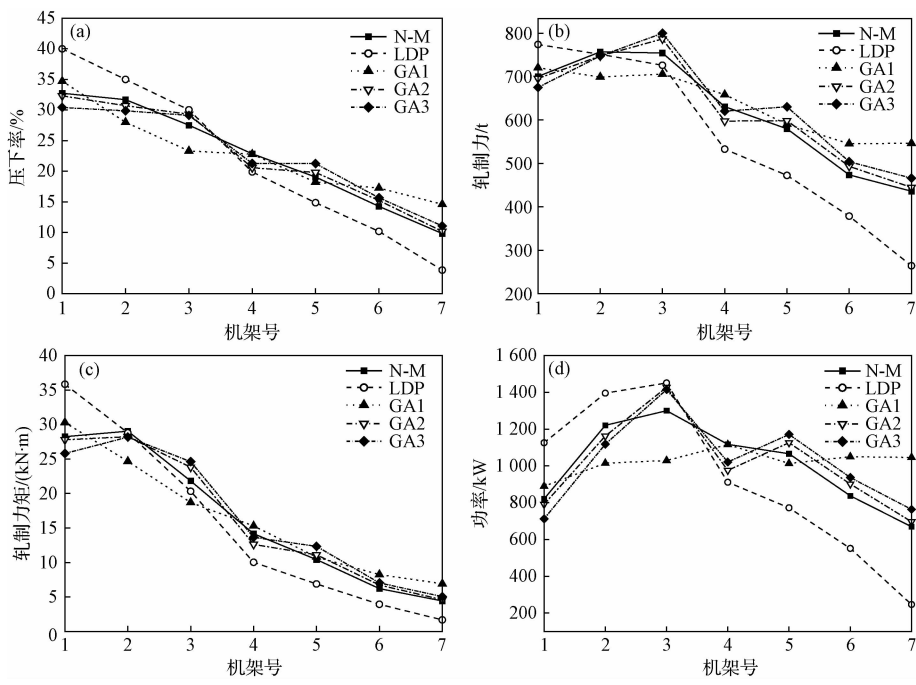
(a) 交叉概率的影响; (b) 变异概率的影响

图 4 遗传算子对多目标函数优化结果的影响

Fig. 4 Effect of genetic operator on multi-objective function optimization results

率、轧制力、轧制力矩和功率绘制成折线图,结果如图 5 所示。其中,GA1($K_1 = 0.25$, $K_2 = 0.25$, $K_3 = 0.25$, $K_4 = 0.25$, $K_5 = 0$)未考虑板形良好目标函数的影响,虽然各机架轧制力和功率更加均衡,但末机架压下率约为 15%,无法保证成品带钢板形质量;GA2($K_1 = 0.2$, $K_2 = 0.2$, $K_3 = 0.2$, $K_4 = 0.2$, $K_5 = 0.2$)综合考虑了 5 个目标函数的影响,优化结果与在线应用规程基本保持一致,在满足工艺和设备要求的前提下,合理利用了各

机架的电机功率,且轧制力分配比较均衡;GA3($K_1 = 0.2$, $K_2 = 0.2$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.4$, $K_5 = 0.1$)增大了能耗最小目标函数所占权重,从图 5(d)中可以看出,比例负荷分配法总能耗最少,但是受限于功率分配不均,不能发挥机组最大轧制速度,GA3 优化规程总能耗略少于其他 3 种规程。基于上述分析结果可以证明,基于遗传算法的 7 机架不锈钢冷连轧规程优化方法能够实现目标函数的快速求解,可以满足冷连轧现场轧制规程设定精度要求。



(a) 压下率； (b) 轧制力； (c) 轧制力矩； (d) 功率

图 5 不同优化策略轧制规程对应的轧制参数

Fig. 5 Rolling parameters for rolling schedules based on different optimization strategies

5 结论

1)针对 7 机架不锈钢冷连轧机组,建立了综合考虑电机功率均衡、轧制力均衡、压下分配合理、轧制能耗小和板形良好的轧制规程多目标优化函数,并采用遗传算法对其进行优化求解,分析了遗传代数对寻优能力的影响,确定了合适的遗传算子。

2)对比了比例负荷分配法、N-M 单纯形法和选用不同权重系数的遗传算法求解典型产品规格的轧制规程,结果表明,采用遗传算法对 7 机架不锈钢冷连轧机组轧制规程进行寻优求解是可行的,通过对多目标函数权重系数的调整,可以充分发挥设备能力并达到提高生产效率和改善产品质量的目的,为后续该机组的稳定生产和产品质量提升提供了保障。

参考文献:

[1] 刘振宝,梁剑雄,杨哲,等. 高强度不锈钢应用及研究进展[J]. 中国冶金,2022,32(6):42. (LIU Z B, LIANG J X, YANG Z, et al. Progress of application and research on high strength stainless steel [J]. China Metallurgy, 2022, 32(6):42.)

[2] GARDNER L. Stability and design of stainless steel structures-Review and outlook[J]. Thin-Walled Structures,2019,

141;208.

[3] 陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京:化学工业出版社,2013. (LU S Y. Introduction to StainlessSteel[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2013.)

[4] 张殿华,彭文,孙杰,等. 板带轧制过程中的智能化关键技术[J]. 钢铁研究学报,2019,31(2):174. (ZHANG D H, PENG W, SUN J, et al. Key intelligent technologies of steel strip rolling process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2):174.)

[5] 康永林. “十三五”中国轧钢技术进步及展望[J]. 钢铁,2021,56(10):1. (KANG Y L. China steel rolling technology progress in the 13th five-year plan and prospection[J]. Iron and Steel,2021,56(10):1.)

[6] 张殿华,孙杰,陈树宗,等. 高精度薄带材冷连轧过程智能优化控制[J]. 钢铁研究学报,2019,31(2):180. (ZHANG D H, SUN J, CHEN S Z, et al. Intelligent optimization control of tandem cold rolling process for high precision thin strip[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2):180.)

[7] 张清东,徐兴刚,于孟,等. 基于遗传神经网络的不锈钢带冷轧轧制力模型[J]. 钢铁,2008,43(12):46. (ZHANG Q D, XU X G, YU M, et al. Cold rolling force model based on GA and ANN for stainless steel strip[J]. Iron and Steel,2008,43(12):46.)

[8] WANG D D, TIEU A K, BOER F G, et al. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000,13:397.

[9] 王晓晨,杨荃,孙友昭. 冷连轧设定控制系统综合优化研究

- [J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 39. (WANG X C, YANG Q, SUN Y Z, et al. Research on comprehensive optimization of tandem cold rolling setting control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 39.)
- [10] 李勇, 刘建昌, 王昱. 改进权重自适应 GA 及冷连轧轧制规程多目标优化[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 687. (LI Y, LIU J C, WANG Y. An improved adaptive weight approach GA for optimizing multi-objective rolling schedules in a tandem cold rolling[J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(6): 687.)
- [11] 陈树宗, 彭文, 姬亚锋, 等. 基于目标函数的冷连轧轧制力模型参数自适应[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(8): 1128. (CHEN S Z, PENG W, JI Y F, et al. Parameters adaptation of the rolling force model based on the objective function in tandem cold rolling[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2013, 34(8): 1128.)
- [12] CHEN S Z, ZHANG X, PENG L G, et al. Multi-objective optimization of rolling schedule based on cost function for tandem cold mill[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(5): 1733.
- [13] WANG Y, LI C S, JIN X, et al. Multi-objective optimization of rolling schedule for tandem cold strip rolling based on NSGA-II [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 257.
- [14] BABAJAMALI Z, KHABAZ M K, AGHADAVOUDI F, et al. Pareto multi-objective optimization of tandem cold rolling settings for reductions and inter stand tensions using NSGA-II[J]. ISA Transactions, 2022, 130: 399.
- [15] 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. (BAI Z H, LIAN J C, WANG J F. Screw-down schedule optimization for preventing slippage on cold tandem mill[J]. Iron and Steel, 2003, 38(10): 35.)
- [16] YANG J M, CHE H J, DOU F P, et al. Genetic algorithm-based optimization used in rolling schedule[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(2): 18.
- [17] 张升琳, 李伯群, 董慧, 等. 基于改进遗传算法的冷连轧多目标规程优化[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(7): 94. (ZHANG S L, LI B Q, DONG H, et al. Multi-objective optimization of cold continuous rolling schedule based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(7): 94.)
- [18] HU Z Y, WEI Z H, MA X M, et al. Multi-parameter deep-perception and many-objective autonomous-control of rolling schedule on high speed cold tandem mill[J]. ISA Transactions, 2020, 102: 193.
- [19] 赵新秋, 孟庆刚, 杨景明, 等. 基于改进免疫克隆多目标算法的轧制规程优化[J]. 钢铁, 2015, 50(8): 58. (ZHAO X Q, MENG Q G, YANG J M, et al. Optimization of rolling schedule based on improve immune clone multi-objective algorithm [J]. Iron and Steel, 2015, 50(8): 58.)
- [20] GAO Z Y, TIAN B, LIU Y, et al. Dynamics-based optimization of rolling schedule aiming at dual goals of chatter suppression and speed increase for a 5-stand cold tandem rolling mill[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(2): 168.
- [21] LI Y, FANG L. Robust multi-objective optimization of rolling schedule for tandem cold rolling based on evolutionary direction differential evolution algorithm[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(8): 795.
- [22] WANG Y L, WANG J K, YIN C H, et al. Multi-objective optimization of rolling schedule for five-stand tandem cold mill [J]. IEEE Access, 2020, 8: 80417.
- [23] BU H N, YAN Z W, ZHANG D H, et al. Application of case-based reasoning-Tabu search hybrid algorithm for rolling schedule optimization in tandem cold rolling[J]. Engineering Computations, 2018, 35(1): 187.
- [24] BU H N, YAN Z W, ZHANG D H, et al. Rolling-schedule multi-objective optimization based on influence function for thin-gauge steel strip in tandem cold rolling[J]. Scientia Iranica, 2016, 23(6): 2663.
- [25] 孙杰, 汪龙军, 任辉, 等. 轧制过程多工序指标建模及优化的研究现状与发展趋势[J]. 冶金自动化, 2022, 46(2): 57. (SUN J, WANG L J, REN H, et al. Research status and development tendency of multi-process indexes modeling and optimization in steel strip rolling[J]. Metallurgical and Automation, 2022, 46(2): 57.)
- [26] 孙杰, 叶俊成, 彭文, 等. 板带材生产全流程数字孪生模型及信息物理系统研究现状与趋势[J]. 轧钢, 2022, 39(6): 37. (SUN J, YE J C, PENG W, et al. Research status and tendency of digital twin model and cyber physical system for sheet and strip production process [J]. Steel Rolling, 2022, 39(6): 37.)
- [27] 孙一康. 冷热轧板带轧机的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010. (SUN Y K. Model and Control of Cold and Hot Rolling Mill for Sheets and Strips[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.)
- [28] 刘相华, 胡贤磊, 杜林秀, 等. 轧制参数计算模型及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. (LIU X H, HU X L, DU L X, et al. Rolling Parameter Calculation Model and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.)
- [29] 宋军, 任廷志, 魏臻, 等. 基于多目标优化的冷连轧工作辊窜辊优化控制[J]. 钢铁, 2021, 56(9): 102. (SONG J, REN T Z, WEI Z, et al. Optimal control of work roll shifting in tandem cold rolling mill based on multi-objective optimization [J]. Iron and Steel, 2021, 56(9): 102.)
- [30] JIN X, LI C S, WANG Y, et al. Multi-objective optimization of intermediate roll profile for a 6-high cold rolling mill[J]. Metals, 2020, 10(2): 287.
- [31] 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] POURSIANA M, DEHKORDI N T, FATTAAHI A, et al. Application of genetic algorithms to optimization of rolling schedules based on damage mechanics[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 22: 61.