

热轧带钢短行程控制自适应策略

彭文¹, 马更生¹, 曹剑钊², 张殿华¹

(1. 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; 2. 沈阳建筑大学信息与控制工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 热连轧生产过程中, 短行程是控制轧件头尾宽度的重要手段。为提高短行程的控制精度, 提出了一种短行程自适应策略, 以短行程关键坐标位置为优化变量并建立目标函数, 使用单纯形替换法对目标函数求解, 得到了最优宽度补偿曲线, 进一步对短行程关键参数进行平滑处理, 实现了对短行程曲线关键参数的优化过程, 提高了轧件头尾的宽度控制精度。本优化策略已成功应用于某热连轧生产线, 实际生产数据表明, 采用自适应优化策略之后轧件头尾与中部稳定段的宽度偏差控制在 2.0 mm 之内达到了 90% 左右, 提高了宽度控制精度, 具有良好的实际应用效果。

关 键 词: 热轧; 短行程控制; 目标函数; 自适应策略; 单纯形替换法

中图分类号: TG 335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0343-04

Adaptive Strategy of Short Stroke Control in Tandem Hot Rolling

PENG Wen¹, MA Geng-sheng¹, CAO Jian-zhao², ZHANG Dian-hua¹

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: PENG Wen, E-mail: pengwen233@163.com)

Abstract: The SSC (short stroke control) is a key issue in the width control of the strip head end in hot tandem rolling process. In order to enhance the width precision, an SSC adaptive strategy was proposed, the objective function with the key points of the SSC curve and actual width error curve was founded, and in the process for looking for the optimal solution, the NM (Nelder-Mead) simplex algorithm was used, finally the optimized width compensation curve was received, and the SSC on-line adaptive strategy was realized with the exponential smoothing method. The adaptive strategy was successfully applied to a tandem hot mill, and the application result showed that the width deviation between the head end and the stable part can be controlled within 2.0 mm, and the proportion is up to 90%, which can meet the actual production, and has good application prospect.

Key words: hot rolling; short stroke control (SSC); objective function; adaptive strategy; simplex algorithm

热轧带钢生产过程中, 短行程控制能够有效地控制带钢头尾的宽度超差, 在带钢宽度控制过程中得到广泛应用。许多学者对短行程控制进行了研究工作, 文献[1]采用曲线拟合的方式, 将传统两段折线式短行程曲线优化得到新的抛物线控制曲线; 文献[2-3]对神经网络曲线形式的短行程曲线进行了大量研究工作, 通过离线仿真评估

了参数权重对宽度控制的影响; 文献[4]使用刚塑性有限元分析法研究了不同压下制度下的头尾失宽规律, 并优化了两段折线式短行程曲线; 文献[5-6]建立了立-平轧制过程中的三维弹塑性有限元模型, 得到了短行程控制模型关键参数, 并通过离线测试验证了模型的准确性。

在实际生产过程中, 大多采用基于经验数据

收稿日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074051); 辽宁省博士启动基金资助项目(20131033)。

作者简介: 彭文(1987-), 男, 山东青州人, 东北大学博士后研究人员; 张殿华(1963-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学教授, 博士生导师。

给出短行程关键参数进行短行程控制过程,理论预报模型缺少对现场轧辊表面磨损状态、轧件温度、表面质量等的考虑,导致宽度实际控制效果不稳定.因此,本文提出了一种短行程在线自适应算法,采用实测宽度偏差数据和短行程曲线建立目标函数,最终求解得到了最优宽度偏差补偿曲线,实现了短行程曲线的在线优化过程,提高了轧件头尾宽度的控制精度.

1 短行程控制原理

短行程控制的基本思想是根据轧制时板坯头尾的轮廓曲线,使立辊开口度从板坯头部到尾部按照与轮廓曲线对称并相反的曲线变化,以补偿板坯头尾失宽量.典型的短行程曲线表示为轧件头(尾)部长度与立辊开口度修正量的函数关系.短行程控制曲线一般分为双折线式、四折线式以及高次曲线等形式,图 1 给出了应用中广泛采用的四折线式,其中 l 是调节点距离带钢端部的长度, s 是调节点的立辊开口度补偿量.

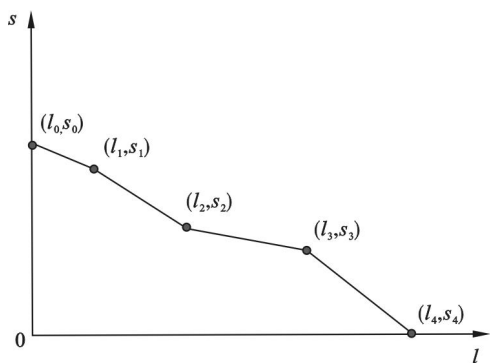


图 1 典型折线式短行程曲线

Fig. 1 Diagram of typical short stroke control curve

2 短行程自适应策略

模型自适应的目的是利用轧制过程中的头尾实测宽度偏差数据修正模型关键参数,通过上一带钢实际头尾宽度偏差曲线对 SSC 曲线的开口度补偿量进行修正,从而达到提高宽度控制精度的目的.

2.1 优化变量的确定

在短行程自适应策略过程中,将 SSC 曲线中的开口度补偿量作为优化变量,建立宽度偏差目标函数,通过合适的寻优算法从实测头尾宽度偏差曲线中得到最优的补偿曲线,实现对关键参数的优化过程,以 SSC 曲线关键点的纵坐标位置作为模型自适应参数,将待优化变量设计为

$$\mathbf{z} = [s_0, s_1, s_2, s_3, s_4]^T. \quad (1)$$

2.2 目标函数的建立

以带钢头部的短行程曲线为例,以短行程折线关键点的开口度补偿量作为待优化变量,建立目标函数 $J(\mathbf{z})$ 如下所示:

$$\min J(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^n (y_i - f_z(x_i))^2. \quad (2)$$

式中: i 为采样点, $i = 1 \sim n$, n 为最大采样点数目; x_i 为采样点 i 距离轧件头部的长度; y_i 为采样点 i 的宽度偏差量; f_z 为以待优化变量为关键点的短行程折线方程.

热连轧生产线粗轧出口测宽仪可以得到轧件长度方向上各位置的宽度偏差量,考虑到带钢经立轧再经过平辊轧制后长度方向会发生延伸,原短行程曲线横坐标需要进行位置转换,各控制点距离端部的位置 L_j 由式(3)进行计算:

$$L_j = l_j \cdot \frac{H}{h} \cdot m_j + n_j. \quad (3)$$

式中: j 为短行程控制点编号, $j = 0 \sim 4$; H 为平辊轧前厚度; h 为平辊轧后厚度; m_j 和 n_j 为延伸系数.

基于优化变量 \mathbf{z} , 短行程曲线上各点的纵坐标位置由下式进行计算:

$$f_z(x_i) = s_j + \frac{s_{j+1} - s_j}{L_{j+1} - L_j} (x_i - L_j), L_j < x_i \leq L_{j+1}. \quad (4)$$

2.3 基于单纯形替换法的目标函数求解

单纯形替换法由 Spendley 和 Himsworth 于 1962 年提出,后来由 Nelder 和 Mead 于 1965 年作了改进,它不需要计算目标函数的梯度,具有较快的收敛速度,适用于多维变量最优化问题的求解^[7].它利用单纯形的最差顶点和最优顶点确定搜索方向,不断寻找新的顶点来替换最差顶点,最终得到最优顶点.

优化向量 \mathbf{z} 的初始单纯形顶点位置向量 $\mathbf{z}_1 \sim \mathbf{z}_5$ 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{z}_1 &= [s_0, s_1, s_2, s_3, s_4]^T, \\ \mathbf{z}_i &= \mathbf{z}_1 + 0.1 \cdot \mathbf{e}_i \quad (i = 2 \sim 5). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, \mathbf{e}_i 为单位向量, $\mathbf{e}_i = [0, \dots, 0, \overset{i-1}{1}, 0, \dots, 0]^T$.

单纯形替换法的搜寻计算包括反射、延伸、收缩和压缩四种基本操作,根据初始顶点寻优的过程可参考文献[8-9].

2.4 模型自适应流程

根据式(5)形成初始单纯形,通过单纯形解法进行求解,直到达到收敛条件为止,最终寻找到符合收敛条件的最优坐标位置,自适应的流程如

图 2 所示. 主要包括以下步骤:

- 1) 对实测数据进行初步有效性判断之后,按照式(3)坐标变换处理;
- 2) 根据实际位置得到实际宽度偏差,将其作为初始顶点 z_1 , 得到所有初始顶点坐标;
- 3) 根据初始顶点计算目标函数式(2)的函数值,开始寻优过程,并进行收敛条件判断;
- 4) 若满足收敛条件,则输出坐标位置,若超出迭代次数则给出报警,并退出;
- 5) 得到新的关键坐标位置,考虑到宽度偏差曲线与短行程曲线的对称性,需要进行取系数反处理;
- 6) 对短行程参数平滑处理,采用工程上通用的指数平滑法进行^[10]:

$$s_j^{new} = \lambda \cdot s_j^{cal} + (1 - \lambda) \cdot s_j^{old}.$$
 (6)

式中: λ 为指数平滑系数; s_j^{new} 为新模型参数; s_j^{cal} 为寻优后得到的参数; s_j^{old} 为原模型参数.

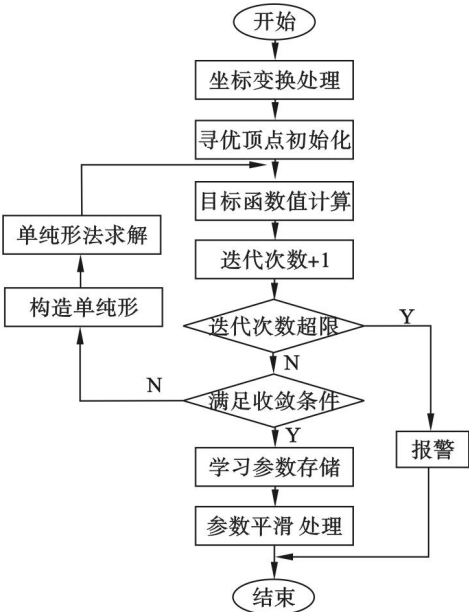


图 2 自适应流程图
Fig. 2 Flow chart of adaption process

3 自适应策略应用实例

为验证模型的控制效果,在实际生产过程中分别选取同规格(钢种:Q235B,中间坯尺寸:50 mm×1 225 mm)相邻前后三块带钢.第一块不使用短行程控制,第二块使用短行程默认参数,第三块根据第二块实测数据按照本文所述的方法进行参数优化,它们的头部宽度实际宽度控制效果如图 3 所示.

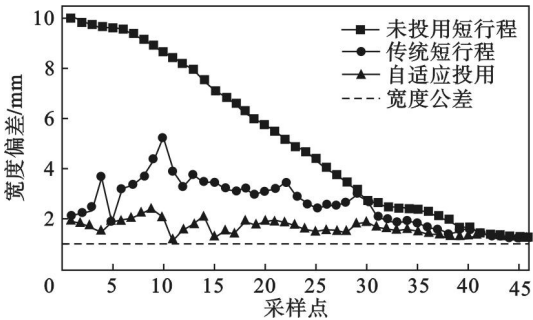


图 3 自适应前后轧件头部宽度控制效果比较
Fig. 3 Comparison of the width precision in the head with and without adaption

由图 3 可以看出,在宽度公差为 1.0 mm 的情况下,未投用短行程控制的带钢头部失宽较严重,宽度偏差最大到达 10.2 mm;投用传统短行程控制之后,失宽有所改善,但偏差最大仍达到 5.5 mm 左右;投入自适应策略之后,轧件头部宽度控制偏差控制在 3.0 mm 以内,头部与中间稳定段的宽度偏差最大为 2.0 mm 左右.表 1 给出了在一个轧制周期内,投用自适应策略前后轧件头尾与轧制稳定段的宽度偏差统计情况.

表 1 带钢头尾宽度偏差统计

Table 1 Statistical data of width deviation between the traditional and adaptive strategy

与稳定段偏差/mm	>5.0	2.0~5.0	<2.0
传统短行程精度/%	3.0	33.1	63.9
短行程自适应精度/%	1.2	8.40	90.4

使用短行程自适应策略之后,同轧制稳定段相比,轧件头尾宽度偏差控制在 2.0 mm 之内达到 90% 以上,提高了轧件头尾的宽度控制精度,能够进一步减小产品的头尾切削损失,提高成材率.

4 结 论

- 1) 提出了一种短行程自适应策略,将短行程曲线调节量作为优化变量建立目标函数,并通过单纯形替换算法进行目标函数寻优,完成了短行程曲线关键位置参数的自适应过程.
- 2) 实际应用效果表明,使用在线自适应策略之后,轧件头尾的宽度控制精度得到提高,与稳定段之间的平均宽度偏差能够控制在 2.0 mm 左右,提高了产品的成材率.

参考文献:

[1] Tan S B, Li L, Liu J C. Research on the gap setting model of

- short stroke control system in hot edge rolling [C]// Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference, Mianyang, 2011; 4134 – 4136.
- [2] Tian Y, Hu X L, Liu X H, et al. Optimization study of short stroke control for head and tail of hot strip [C]// Proceedings of the 10th International Conference on Steel Rolling, Beijing, 2010; 713 – 718.
- [3] Ding J G, Qu L L, Hu X L, et al. Short stroke control with Gaussian curve and PSO algorithm in plate rolling process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 20 (4): 93 – 96.
- [4] 李学通, 黄兆猛, 王敏婷, 等. 基于有限元和优化的粗轧短行程控制曲线研究[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 616 – 619.
(Li Xue-tong, Huang Zhao-meng, Wang Min-ting, et al. Research on SSC curve on roughing mill using FEM and optimization [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(4): 616 – 619.)
- [5] Du X Z, Yang Q, Lu C, et al. Optimization of short stroke control preset for automatic width control of hot rolling mill [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(6): 16 – 20.
- [6] 杜晓钟, 杨荃, 何安瑞, 等. 热轧带钢立辊调宽短行程控制模拟研究与应用[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(5): 182 – 185.
(Du Xiao-zhong, Yang Quan, He An-rui, et al. Study and application of short stroke control in hot edge rolling [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15(5): 182 – 185.)
- [7] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization [J]. *The Computer Journal*, 1965, 7(4): 308 – 313.
- [8] 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 – 1740.
- [9] Peng W, Liu Z Y, Yang X L, et al. Optimization of temperature and force adaptation algorithm in hot strip mill [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014, 21(3): 300 – 305.
- [10] 李海军, 时立军, 徐建忠, 等. 带钢热连轧机组温度模型及其自适应方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 369 – 372.
(Li Hai-jun, Shi Li-jun, Xu Jian-zhong, et al. Temperature model of hot strip finishing mills in tandem and its self-learning strategy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(3): 369 – 372.)

(上接第 337 页)

初生 Al_4Sr 相均呈较规则且完整的块状形貌, 升温至 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 及降温至 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 中心主要呈细长条竹节状, 边部呈短条或椭圆状, 降温至 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时中心呈粗大和细小条状两种形貌, 降温至 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 时为粗大的条状。

3) 通过改变凝固条件, 成功地获得了多种不同形貌、尺寸和分布的 Al_4Sr 相。

参考文献:

- [1] 程仁菊, 潘复生, 王维青. Al_2Sr 中间合金制备及应用的发展现状[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(7): 5 – 11.
(Cheng Ren-ju, Pan Fu-sheng, Wang Wei-qing. Development status of preparation and application of Al_2Sr master alloy [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2006, 34(7): 5 – 11.)
- [2] Timpel M, Wanderka N, Vinod K G S, et al. Microstructural investigation of Sr-modified Al-15wt% Si alloys in the range from micrometer to atomic scale [J]. *Ultramicroscopy*, 2011, 111(6): 695 – 700.
- [3] Timpel M, Wanderka N, Schlesiger R, et al. The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(9): 3920 – 3928.
- [4] Shabestari S G, Keshavarz M, Hejazi M M. Effect of strontium on the kinetics of formation and segregation of intermetallic compounds in A380 aluminum alloy [J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2009, 477(1/2): 892 – 899.
- [5] Dahle A K, Nogita K, McDonald S D, et al. Eutectic modification and microstructure development in Al-Si alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 413/414 (15): 243 – 248.
- [6] 边秀房, 刘相法, 王先娥, 等. Al – Sr 中间合金变质效果的遗传效应[J]. 金属学报, 1997, 33(6): 609 – 614.
(Bian Xiu-fang, Liu Xiang-fa, Wang Xian-e, et al. Heredity effect of modification efficiency for Al-Sr master alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(6): 609 – 614.)
- [7] Li L, Zhang Y D, Esling C, et al. Crystallographic features of primary Al_3Fe phase [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2010, 43(1): 1108 – 1112.
- [8] Closset B, Dugas H, Pekguleryuz M, et al. The aluminum-strontium phase diagram [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17: 1250 – 1253.
- [9] Hirose T, Shimamoto T. Fractal dimension of molten surfaces as a possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylytes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(10): 1569 – 1574.
- [10] Johari G P. The Gibbs-Thomson effect and intergranular melting in ice emulsions; interpreting the anomalous heat capacity and volume of supercooled water [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1997, 107(23): 10154 – 10165.
- [11] Li L, Zhang Y D, Esling C, et al. Crystallographic features of primary Al_3Zr phase [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 316(1): 172 – 176.
- [12] Li L, Zhu Q F, Zhang H, et al. Morphological and crystallographic characterization of solidified Al-3Ti-1B master alloy under a high magnetic field [J]. *Materials Characterization*, 2014, 95: 1 – 11.
- [13] Li L, Zhang Y D, Esling C, et al. Formation of feathery grains with the application of a static magnetic field during direct chill casting of Al-9.8wt% Zn alloy [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(4): 1063 – 1068.