

基于软测量模型的粗轧厚度预测方法

彭文, 马更生, 龚殿尧, 张殿华
(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: 为提高热连轧粗轧过程各道次厚度控制精度, 满足道次动态修正的要求, 提出了一种简单有效的厚度软测量模型. 基于典型粗轧区的仪表配置, 模型从轧件跟踪、数据处理等方面进行了针对性的研究, 提出了偶数道次立辊辊缝渐变的策略用于可逆轧制过程中的宽度测量, 并通过模型预测得到了轧制过程中各道次的出口厚度. 现场实际应用表明, 通过软测量模型预报的各道次厚度与实际测量结果吻合较好, 各道次的厚度预报偏差在 $\pm 0.10\text{ mm}$ 范围内达到 95.2%, 满足了现场生产需求.

关 键 词: 热连轧; 粗轧; 软测量模型; 厚度预测; 控制精度

中图分类号: TG 335.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)03-0366-04

Prediction Method of Rough Rolling Thickness Based on the Soft Sensor Model

PENG Wen, MA Geng-sheng, GONG Dian-yao, ZHANG Dian-hua
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: PENG Wen, E-mail: pengwen233@163.com)

Abstract: In order to improve the thickness control precision and meet the demand of the pass dynamic correction in rough rolling process, a simple and effective thickness soft sensor model was proposed. The study of rolling tracking and data processing was carried out based on the instrument arrangement in typical rough rolling. The strategy of gradual vertical roll-gap was proposed to measure the width in the even pass. And the thickness of each pass was obtained by the soft sensor model. The application results showed that the thickness is in a good agreement with the actual measured ones. The predicted precision error in the range of $\pm 0.10\text{ mm}$ reaches 95.2%, which can meet the demand of the production.

Key words: hot rolling; rough rolling; soft sensor model; thickness prediction; control precision

热连轧粗轧轧后中间坯厚度控制是过程控制中不可缺少的重要环节,其控制精度直接影响到中间坯的尺寸精度,若存在偏差较大则会影响到精轧机组穿带过程稳定性.作为典型的多道次可逆轧制过程,由于轧件过厚测量困难、测厚仪安装成本高以及测量环境恶劣等原因,目前国内的热连轧生产线粗轧机组前后一般不配置测厚仪,而是采用人工卡尺的方式进行厚度测量,各道次的出口厚度也难以直接测量,因此无法完成道次间轧制规程的在线修正.文献[1]介绍了工程中普遍采用根据弹跳方程来预报中间坯厚度的方法,通过实测轧制力和实际辊缝等数据完成预报过程,但此种方法由于无实时实测数据反馈,并且轧辊磨损等对在线修正造成影响,随着轧制过程的进行,模型预报精度会进一步降低.

软测量技术可以解决产品生产过程中关键生产参数无法直接测量的问题,近年来在石油化工^[2]、生物化工^[3-4],加热炉内温度预报^[5],轧后温度预报^[6]和组织性能预报^[7]等方面得到了广泛的应用.通过多个仪表将其结果采用加权平均作为最终输出的方式可以提高测量的鲁棒性和抗干扰性.本文针对粗轧多道次可逆轧制中的厚度问

题,提出了一种粗轧过程的厚度软测量模型,计算得到了各道次的轧制厚度,对于提高轧制道次间的模型修正和中间坯厚度控制精度具有重要的意义.

1 软测量技术

软测量技术是基于一种最优准则,通过选择与主导变量(primary variable)密切相关的且又容易测量的辅助变量(secondary variable),通过构造某种数学关系,完成对主导变量的预估过程.它利用易测量过程变量与难以直接测量的待测过程变量之间的数学关系,通过一定的数学计算和预估方法,实现对待测量变量的测量.

软测量模型一般可用下式进行描述:

$$y=f(d_i,u,\theta) . \tag{1}$$

式中: y 为主导变量; θ 为可测辅助变量; d_i 为可测干扰变量; u 为控制变量.

软测量的目的就是利用可获得的信息求取主

导变量的最优估计值,构造从可测信息集 θ 到 y 的映射.软测量的主要性能取决于过程的描述、噪声和扰动的特性、辅助变量的选择以及最优准则.

2 厚度软测量模型

2.1 仪表布置

图 1 给出了典型粗轧区的轧线仪表分布情况.热金属检测器 HDM(hot metal detector)可以完成对轧件的头尾位置跟踪过程,高温计 PY(pyrometer)完成温度测量过程,可以进行辅助跟踪;测宽仪 WG(width gauge)完成奇数道次的轧后宽度测量.另外,轧制力信号和速度信号分别由压力传感器和速度编码器完成,轧制力的信号可以作为轧件跟踪的辅助信号.轧件通过各测量仪表的时刻由基础自动化传递给过程计算机进行记录,通讯周期为 100 ms.

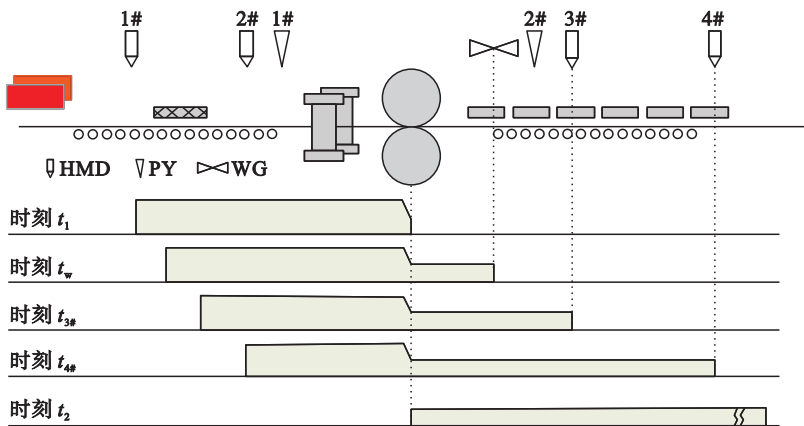


图 1 粗轧仪表分布及关键位置跟踪
Fig. 1 Instrument arrangement and tracking time in rough rolling

2.2 数据处理

2.2.1 跟踪信号处理

使用热金属检测器信号生成跟踪信号,500 ms内持续检得(检失)即可判定轧件头部或尾部通过(离开);使用轧制力信号生成跟踪信号时,在 500 ms 内测量数值持续大于(小于)某一目标值条件的即可认为轧件通过(离开)轧机.

2.2.2 误差处理

现场仪表的信号由现场设备或传感器通过 TCP/IP 通讯或硬线接入的方式传递给控制系统;为提高软测量模型的计算精度,必须对实时数据进行分析 and 处理.实测数据中的误差一般分为系统误差、随机误差和粗大误差三种.数据误差的处理方式可以参照文献[8],此处不做进一步描述.

2.3 软测量模型

在高精度的粗轧 AGC 和 AWC 控制下,轧制过程中轧件头尾金属异常流动以及头尾温度趋势性差异造成的偏差基本能够消除^[9-12],可以认为轧件的厚度和宽度控制精度在长度方向上保持一致,在实际处理过程中可以将轧件头部的厚度和宽度作为带钢全长的平均厚度和宽度.厚度的软测量模型包括长度计算、宽度计算和厚度计算模型三个方面.

2.3.1 轧件长度计算

轧件长度计算是通过轧件速度以及轧件运行时间计算,下面以奇数第 1 道次轧制过程为例进行计算过程分析.

1) 时间的计算.使用轧制力信号确定轧件头

部到达平辊的时刻 t_1 和轧件尾部离开平辊的时刻 t_2 ,如图 2 所示. 轧件头部到达 3#和 4#热检的时刻分别记为 $t_{3\#}$ 和 $t_{4\#}$.

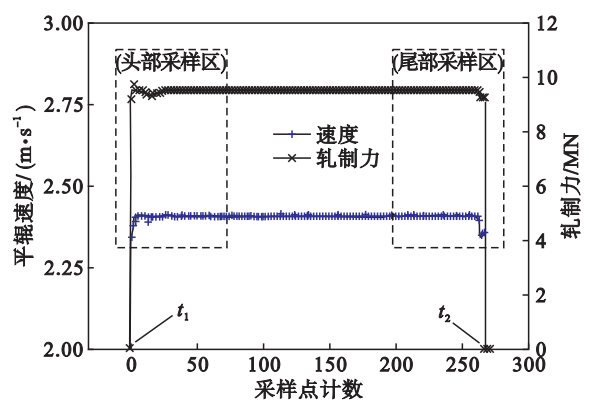


图 2 轧制力和速度曲线

Fig. 2 Curves of rolling force and velocity

使用轧件通过平辊的时间作为轧件的运行时间可以消除轧件在抛钢之后速度发生变化造成的误差.

2) 速度的计算. 轧件头部通过 3#和 4#热检的平均速度 v_{sl} 由式(2)进行计算:

$$v_{sl} = \frac{l_{3\# - 4\#}}{t_{4\#} - t_{3\#}}. \tag{2}$$

由于采用恒速轧制制度,本道次轧制之后轧件的总长度可以使用下式进行计算:

$$l_1 = v_{sl} (t_2 - t_1). \tag{3}$$

2.3.2 轧件宽度的计算

粗轧轧制过程中,奇数道次的轧后宽度可以根据测宽仪测量得到,而偶数道次由于粗轧机前无测宽仪,不能进行测量.

基于采用“立辊奇数道次压下,偶数道次打开”的控制策略,本文提出了一种宽度辅助测量手段. 在偶数道次轧制过程中,将立辊的开口度按照单位步长(- 10.0 mm/s)逐渐向轧件靠近,当立辊压力传感器出现示数时,通过调整开口度的大小使轧制力信号维持在一定范围内,此时的开口度平均值即为轧件平均宽度. 为防止轧件偏离轧制中心线造成“假信号”,可以采用两侧的立辊轧制压力信号同时进行判断. 此过程的立辊的开口度变化曲线与对应的轧制力变化曲线如图 3 所示.

2.3.3 轧件厚度的计算

在加热炉加热过程中,表面生成大量氧化铁皮会造成板坯质量损失. 根据氧化铁皮抛物线生长模型^[13]可以计算出氧化铁皮的厚度在 0.5 mm 以内,而轧制过程中生成的表面氧化铁皮在轧制过程中会压合到轧件表面,因此可以认为在轧制

过程中质量保持不变,因此第 i 道次的轧制厚度 h_i 可以由下式进行计算:

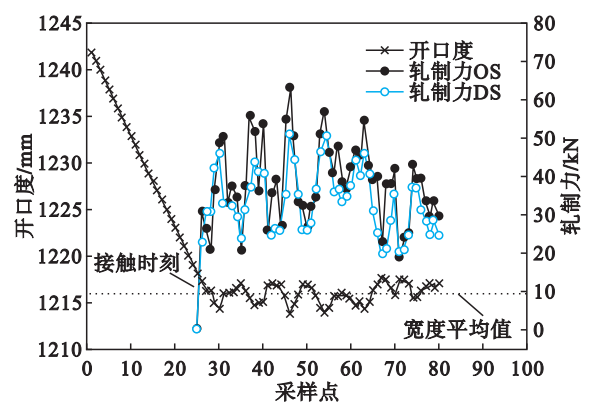


图 3 立辊开口度减小过程中轧制力变化趋势

Fig. 3 Dependence of the rolling force on the decrease of edge gap

$$h_i = \frac{h_{slab} \cdot w_{slab} \cdot l_{slab}}{w_i \cdot l_i}. \tag{4}$$

式中: h_{slab} 为板坯厚度,mm; w_{slab} 为板坯宽度,mm; l_{slab} 为板坯长度,mm; w_i 为第 i 道次的轧制宽度; l_i 为第 i 道次的轧制长度.

3 在线验证

为验证模型预报精度,在现场实际生产过程中,采用双侧人工卡量结果方式进行比较,图 4 给出了最末道次的软测量与实际人工卡量对比情况.

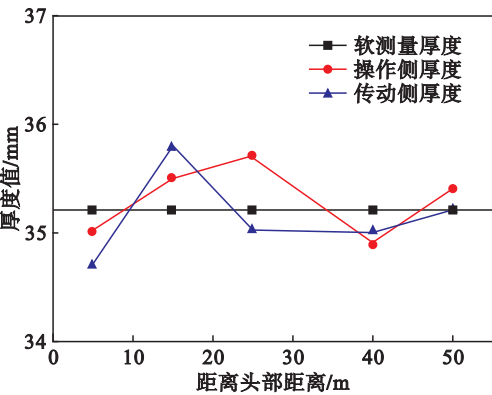


图 4 末道次实测值与软测量值比较

Fig. 4 Comparison between the manual actual and soft sensor value in last pass

为验证模型的在线使用效果,对一个换辊周期内 50 块带钢进行厚度软测,并与人工卡量厚度进行比较,将每道次多点的卡量平均值作为实测厚度,偏差统计结果如图 5 所示. 可以看出,软测量偏差在 ± 0.10 mm 以内的结果(238 次)占到总

测量次数(250 次)的 95.2%,说明软测量的模型具有很高的预报精度,完全能够满足在线生产的需要.

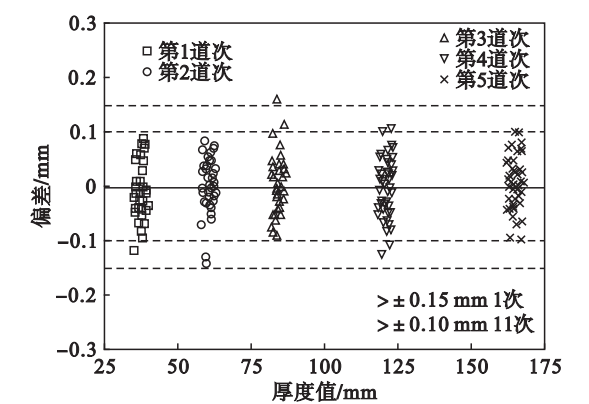


图 5 一个轧制周期内软测量厚度偏差统计
Fig. 5 Deviation statistics of soft sensor value in one rolling cycle

4 结 论

- 1) 提出了一种有效的厚度软测量模型,能够准确计算轧制过程中各道次的出口厚度.
- 2) 轧制过程中偶数道次采用开口度逐渐减小的控制策略,准确得到轧件偶数道次轧后宽度.
- 3) 现场实际测量结果表明,厚度软测量模型具有较高的厚度预报精度,可以为粗轧道次间的动态修正提供依据.

参考文献:

[1] Ding J G, Hu X L, Jiao J M, et al. Application of adaptive threading technique to hot strip mill [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2008, 15 (5) : 29 – 31, 36.

[2] Shakil M, Elshafei M, Habib M A, et al. Soft sensor for NO_x and O₂ using dynamic neural networks [J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2009 (35) : 578 – 586.

[3] Jin H P, Chen X G, Yang J W, et al. Multi-model adaptive soft sensor modeling method using local learning and online support vector regression for nonlinear time-variant batch processes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015 (135) : 282 – 303.

[4] Mcelroy L, Bao J, Yang R Y, et al. A soft-sensor approach to flow regime detection for milling processes [J]. *Powder Technology*, 2009 (18) : 234 – 241.

[5] Xiong Z H, Huang G H, Shao H H. Software sensor for slab reheating furnace [J]. *Journal of University Science and Technology Beijing*, 2005, 12 (2) : 123 – 127.

[6] 彭良贵,张殿华,郭涛,等. 热轧带钢发射率软测量及影响因素分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34 (8) : 1118 – 1122.
(Peng Liang-gui, Zhang Dian-hua, Guo Tao, et al. Emissivity indirect-measurement and analysis for hot strip mill [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34 (8) : 1118 – 1122.)

[7] 何纯玉,赵宪明,吴迪,等. 热轧过程中轧件组织与性能软测量系统的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28 (1) : 63 – 67.
(He Chun-yu, Zhao Xian-ming, Wu Di, et al. On the soft sensing system for work piece ' s microstructure and mechanical properties during hot rolling [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28 (1) : 63 – 67.)

[8] 吴石林,张圻. 误差分析与数据处理[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
(Wu Shi-lin, Zhang Qi. Error analysis and data processing [M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2010.)

[9] 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 (New Series)*, 2013, 20 (4) : 93 – 98.

[10] 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.

[11] Zou J, Fu X, Yang H Y. Active disturbance rejection control for hydraulic width control system for rough mill [J]. *Journal of Zhejiang University (Science A)*, 2007, 8 (9) : 1429 – 1434.

[12] 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 on application of short stroke control in hot edge rolling [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15 (5) : 182 – 185.)

[13] Schwerdtfeger K, Zhou S X. A contribution to scale growth during hot rolling of steel [J]. *Steel Research International*, 2003 (9) : 538 – 548.