

超宽冷轧机带钢板形特征聚类分析

李洪波^{1)✉}, 包仁人¹⁾, 张杰¹⁾, 贾生晖²⁾, 褚玉刚²⁾, 刘海军²⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083

✉ 通信作者, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

摘 要 为准确掌握超宽冷轧机不同宽度带钢的板形特征, 以某 2180 mm 超宽冷轧机 1900 mm 宽度带钢实测板形数据为研究对象, 借鉴“大数据”的思想, 结合数据挖掘领域中聚类分析方法, 提出基于网格和密度的板形特征聚类方法, 并以此方法对几种典型带钢宽度的大量板形实测数据进行分析, 得到不同宽度带钢的板形特征。以分段函数对板形特征进行多项式表达, 得到不同宽度带钢的板形特征参数化分析结果。提出的基于网格和密度的板形特征聚类与分析方法, 能够快速准确地对大量板形实测数据进行分析, 提取出长期生产过程中板形缺陷特征并得到参数化表达, 从而为冷连轧机, 特别是超宽带钢冷连轧机的辊形改进和控制策略优化提供数据基础。

关键词 冷轧机; 带钢; 板形; 聚类分析

分类号 TG335.5

Cluster analysis of strip flatness characteristics for ultra-wide cold rolling mills

LI Hong-bo^{1)✉}, BAO Ren-ren¹⁾, ZHANG Jie¹⁾, JIA Sheng-hui²⁾, CHU Yu-gang²⁾, LIU Hai-jun²⁾

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

2) Wuhan Iron and Steel(Group) Corp., Wuhan 430083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

ABSTRACT In order to master the flatness characteristics of strips with different widths for ultra-wide tandem cold rolling mills, taking the sufficient flatness detection data of 1900 mm strips from 2180 mm cold rolling mills as a research object and considering the idea of big data and the cluster analysis method of data mining, this article proposed a cluster algorithm based on density and grid, applied this cluster algorithm to the analysis of flatness detection data under several typical strip widths, and then obtained the flatness characteristics of strips with different widths. A piecewise polynomial function was introduced to describe the strip flatness characteristics, and the analysis results of polynomial coefficients for strips with different widths were gotten. The proposed cluster algorithm based on density and grid and the piecewise function analysis method can be applied to analyze plenty of flatness detection data quickly and accurately, and the flatness defect characteristics and parameterized expression can be obtained, which will be a data basis of roll contour improvement and strip flatness control strategy optimization for cold rolling mills, especially ultra-wide cold rolling mills.

KEY WORDS cold rolling mills; strip steel; flatness; cluster analysis

带钢平坦度是冷轧板带材最重要的质量指标之一, 是冷轧过程板形控制的核心。随着科技的发展与板带产品客户要求的不断提高, 带钢板形控制的技术要求也越来越高。冷轧板形控制具体包括板形状态实时检测、板形缺陷判别和板形调节三方面^[1], 可见板形缺陷的判别是在板形仪准确测得板形应力数据的基础

上, 实现板形有效调节的中间关键一环。同时, 对板形缺陷的长期规律性判别, 也是生产现场进行辊形改进和板形控制策略优化的前提条件。

板形模式识别作为一种有效方法可用于对板形缺陷的初步判别和分类, 在冷轧板形控制中得到广泛的应用^[2]。其本质就是采用一定的数学方法识别实测张

收稿日期: 2016-01-04

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAF30B01); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-15-016A3)

应力信号中的板形缺陷类型,识别结果既可应用于板形闭环控制,也可为确定板形控制策略提供依据,为提高冷轧设备板形控制能力提供指导^[3-4]。

近年来,我国投产了一批1800 mm以上的超宽带钢冷连轧机,由于轧辊长径比的增加使得轧辊挠曲更为复杂,加之可轧带钢宽度跨度较大,所以现场实测的带钢板形应力分布较为复杂,现有的板形控制手段已难以实现对复杂板形的有效控制^[5-8]。为解决超宽冷连轧机的板形控制问题,必须准确把握不同带钢宽度下的板形缺陷特征,才能针对性地从辊形和板形控制策略等方面提出解决办法。

包仁人等^[9-10]采用板形模式识别的方法对某2180 mm冷连轧机的带钢板形缺陷进行分析,设计了包括一次、二次、三次和四次基本板形模式的识别算法,分析表明超宽带钢存在三次板形缺陷,且存在明显的边中复合浪。但对于超宽带钢,如1800 mm以上带钢的复杂浪形,如图1所示,四次多项式的拟合结果并不能很好地吻合实际板形检测结果,即使将多项式系数提高到八次,二者之间仍存在一定差异,这主要是因为边部近200 mm范围内板形应力变化较为剧烈。

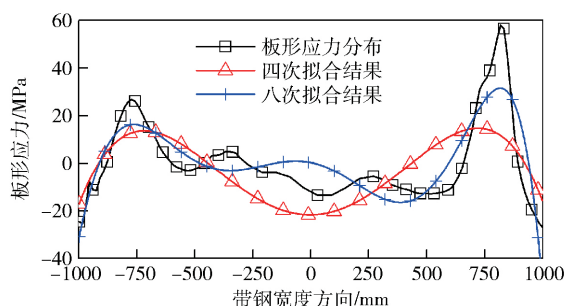


图1 宽度2000 mm带钢板形应力与拟合结果比较

Fig. 1 Comparison between flatness data and fitting results for a 2000 mm strip

为明确该2180 mm轧机的带钢板形特征,杨光辉等^[11]对带钢板形缺陷进行初级分类,并提取出单位典型板形相量,采用 k 均值聚类法求解典型比值系数,进而得到了1500 mm和2000 mm两个宽度带钢的典型板形向量。但由于分析数据量有限,并未能得出现场长期存在的板形缺陷特征,且未对板形缺陷进行数学描述。

为获取带钢的板形特征细节,最好能对生产现场大量的板形检测结果进行统计和深入地分析,特别是现代化的冷连轧机配备的服务器可保存多达数千卷、上百万帧的带钢板形检测信号,使“大数据”分析成为可能。通过对某2180 mm冷连轧机带钢板形进行跟踪,发现同批具有近似规格和钢种的带钢在稳定轧制阶段的板形缺陷具有相似性,其浪形幅值和形态比较接近,具有聚类分析的基础。因此借鉴“大数据”的思想,结合数据挖掘领域中聚类分析方法提出适用于冷

轧带钢板形特征的聚类分析方法,可实现快速对大批量带钢的板形检测结果的处理,从而快速准确地获取轧机不同宽度下带钢板形特征,可以为辊形改进和板形控制策略优化提供坚实的基础。

为此,本文基于Ester在1996年提出的DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise) 算法思想^[12],提出基于密度与网格的板形特征聚类分析方法,并结合某2180 mm超宽带钢冷连轧机带钢板形的实际数据进行分析与研究。

1 板形特征的聚类分析

板形特征聚类分析的基本思路是在以带钢宽度和板形应力幅值所构成的二维网格中计算落于每一网格内的板形应力散点值的频率,删除低密度单元以滤掉板形中偏差较大的“噪声”和“孤立点”,将密度足够高的区域连通,作为板形特征识别的基础,进而判断对应每一宽度坐标处板形应力的分布形式来判断其主要分类,再通过一定算法具体实现。

1.1 冷轧带钢板形特征提取原则

聚类分析方法根据数据间的相似程度,将数据划分为不同的组,找到并提取出数据的共性特征,形成具有不同特征的数据集。根据超宽冷连轧机带钢板形的特点,确定如下板形特征提取原则:

- (1) 以稳定轧制阶段带钢板形应力为对象,不考虑波动较大的带钢头部和尾部板形;
- (2) 带钢的板形特征以散点形式表征,无预先给定模板,即特征提取过程无预判定类别;
- (3) 板形特征分类数不宜过多,需确定合适的比例阈值去除在板形总帧数中占比例过低的分类;
- (4) 板形特征提取过程应具有快速、有效的特点,特征识别结果应具有稳定性和唯一性。

1.2 聚类分析网格空间的确定

对于同规格带钢而言,其全长范围内的板形检测结果相当于一个 $m \times n$ 的二维矩阵,其中 n 代表带钢宽度方向覆盖的传感器数量, m 代表全部长度的检测帧数。为便于数学处理和比较不同规格间板形特征差异,将一组同规格带钢的 m 帧板形应力 $\Delta\sigma$ 按列等间距线性插值,插值后列数与2180 mm冷连轧机五机架后板形仪传感器总数110相对应,即将 $m \times n$ 的二维矩阵转换为 $m \times 110$ 的二维矩阵。

对带钢宽度 B 的坐标 $[-B/2, B/2]$ 归一化至 $[-1, 1]$,沿带钢宽度 $[-1, 1]$ 划分110个区间作为网格空间横向划分依据,各区间分别为 $[-1, -1 + 1/109]$, $[-1 + 1/109, -1 + 2/109]$, $[-1 + 2/109, -1 + 3/109]$, $[-1 + 3/109, -1 + 4/109]$, $[-1 + 4/109, -1 + 5/109]$, ..., $[-1 + 108/109, -1 + 109/109]$, $[-1 + 109/109, 1]$;以能包含 m 帧板形应力极差的最小整数区间 $[\lfloor \min(\Delta\sigma) \rfloor, \lceil \max(\Delta\sigma) \rceil]$ 为纵坐标,以

1 MPa 为间隔, 划分 p 个区间; 即可构成 $p \times 110$ 的网格空间 Ω 如图 2 所示, 空间中每个网格称为单元。

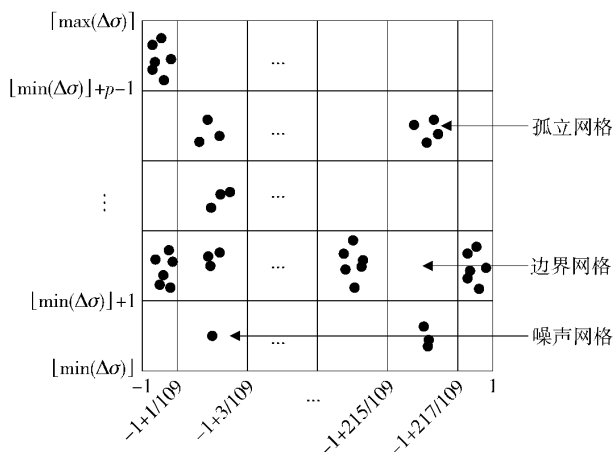


图 2 网格空间划分示意图

Fig. 2 Diagram of space meshing

1.3 基于网格和密度的板形聚类算法

基于网格和密度的聚类算法核心思想, 是认为处于同一网格单元中数据点具有较高的相似度。聚类原则是将一定空间距离内的高密度单元合并形成新类, 而低密度单元则视为孤立点或噪声而从数据集中剔除。将这一原理应用到冷轧带钢板形特征分析中, 用于确定板形应力的类别。

(1) 网格单元内数据密度计算。将多卷同轧制计划、同规格带钢的 m 帧板形应力作为待分析样本, 每帧板形应力 $\Delta\sigma$ 的值可视为 1×110 的矩阵, 与之对应的网格空间 Ω 的值为 $p \times 110$ 的矩阵, 可按下式计算每个网格单元中板形应力值的密度 q_{ij} :

$$q_{ij} = \frac{Q_{ij}}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 为每个单元中点的总数; ij 为单元号, $1 \leq i \leq p$, $1 \leq j \leq 110$ 。

图 3 为宽度为 1900 mm 带钢的板形应力值的网格单元内密度 q_{ij} 的分布, 其中 OS (operation side) 为操作侧, DS (drive side) 为传动侧。从图中可看出对于同规格带钢其板形应力分布相对集中, 尤其是带钢中部的集中程度更高。

(2) 阈值 $\min P$ 的确定。定义阈值 $\min P$, 用于区分低密度单元与高密度单元, 此值需保证 90% 的板形应力 $\Delta\sigma$ 数据点所在网格单元不被定义为低密度单元。如果某一单元 $q_{ij} \geq \min P$ 则将其视为高密度单元, 否则为低密度单元。将图 3 所示网格空间中低密度单元剔除, 结果如图 4 所示。可以看出板形应力分布相对集中的特点更加明显, 但仍存在一些孤立单元, 需要做进一步的处理。

(3) 孤立单元的判断。判断板形网格空间 Ω 中每个高密度单元的邻域 ε 内 (定义为相邻单元) 是否存

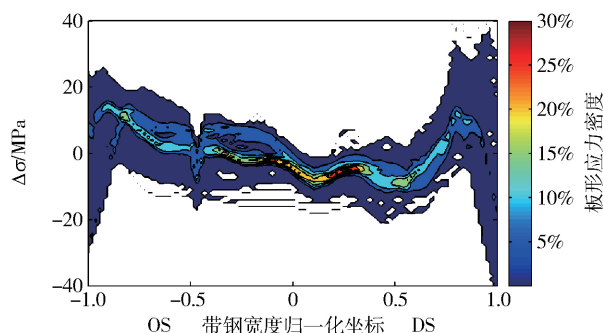


图 3 宽度为 1900 mm 带钢的板形应力密度分布

Fig. 3 Stress density distribution of flatness data for the 1900 mm strip

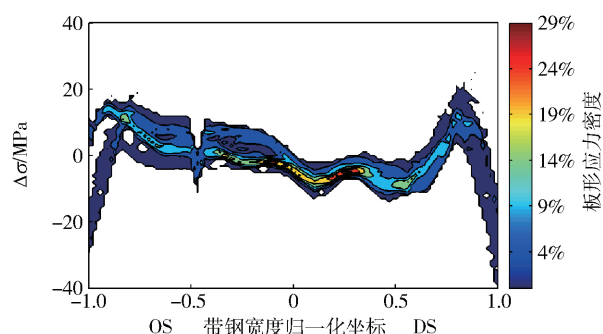


图 4 去除低密度单元后板形应力密度分布

Fig. 4 Stress density distribution of flatness data after the removal of low density units

在高密度单元, 如不存在则认为此单元为孤立单元, 将此单元从网格空间中剔除, 至此则完成了通常意义上的聚类过程。

以上基于网格和密度的板形聚类算法过程如图 5 所示。

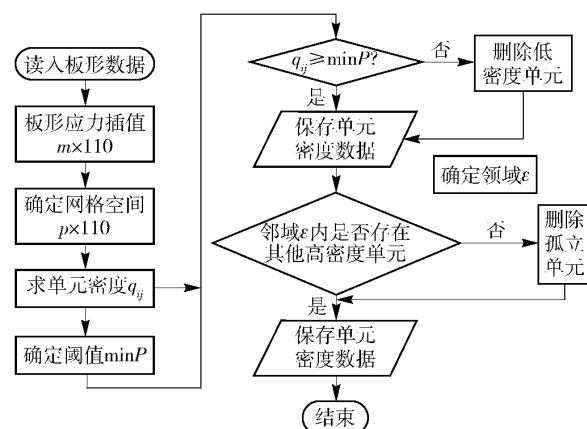


图 5 基于密度和网格的聚类算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of the cluster algorithm based on density and grid

2 板形特征分类与求取

根据对实测数据的聚类分析, 发现某一宽度下的带钢存在着不止一种板形特征, 因此对板形特征做进

一步的分类与求取。其基本思想为判断去除低密度单元及孤立单元后的网格空间中的数据点是否包括分叉结构,即如图6所示的框中所示区域,提取此区域边界作为分类依据。

对图4所示数据,按图6所示分叉结构边界将板形应力数据分为两类,未落入两类边界的板形数据点予以剔除。将各分类板形数据再执行一次图5所示处理过程,得到分类后的两个数据集 D_{N1} 和 D_{N2} ,如图7所示。按式(1)求两个数据集各个数据点对应的密度 q_{ij} ,再以其为权计算纵向每一帧的板形应力的加权平均数即得到此分类对应的板形特征,具体如式(2)所示。对图7所示数据进行计算,得到宽度为1900 mm带钢的板形特征求取结果如图8所示。可以看出带钢板形特征被分为两类,两类区别在于操作侧(OS)侧板形应力差别较大,带钢板形的整体特征和局部特征均被保留。

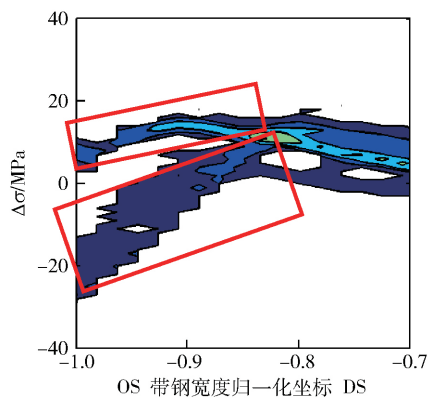


图6 板形特征的分类

Fig. 6 Classification of flatness characteristics

$$\sigma^* = \sum_{i=1}^p q_{ij} \Delta \sigma. \quad (2)$$

式中 σ^* 为宽度方向上每一点的板形特征值。

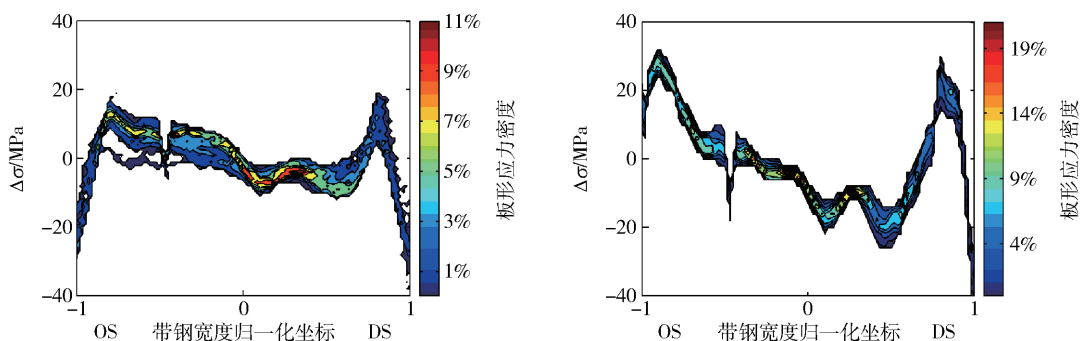


图7 分类后的板形应力密度分布

Fig. 7 Stress density distribution of flatness data after classification

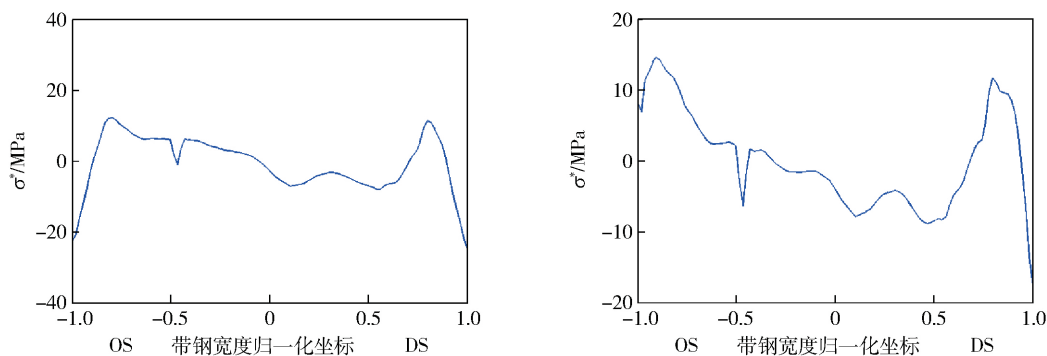


图8 宽度为1900 mm带钢的板形特征

Fig. 8 Flatness characteristics of the 1900 mm strip

3 超宽轧机带钢板形特征分析与表征

利用提出的板形特征聚类分析方法,分别提取几种典型带钢宽度下大量板形数据的板形特征,并将带钢宽度 $[-B/2, B/2]$ 归一化至 $[-1, 1]$ 范围内,如图9所示。发现90%以上的局部尖峰的位置在距带钢边部 0.2 ± 0.1 倍 $B/2$ 的位置,且板宽中部板形应力变化较边部平缓,平缓部分宽度约为带钢宽度的 $1/2$ 。造成这

种现象的主要原因是由于轧辊与带钢边部的接触压扁,导致该区域板形应力变化剧烈。同时也可以看出,随着带钢宽度的增加,带钢板形特征变化愈为复杂,板形特征的边部局部尖峰愈为剧烈。

根据图9所示的板形应力分布特征,可将带钢板形应力用分段函数 $f(x)$ 表示,具体为边部以二次多项式表示,中部以四次多项式表示。为了降低拟合误差,对带钢宽度和板形应力幅值均进行归一化处理,则

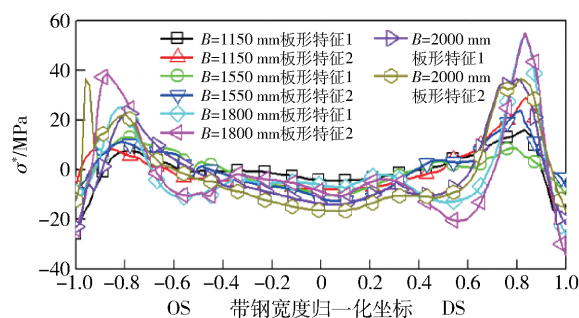


图9 不同宽度带钢板形特征对比

Fig.9 Comparison between the flatness characteristics of strips with different widths

$f(x)$ 可具体表示为:

$$f(x) = \begin{cases} a_2 x^2 + a_1 x + a_0, & (-1 \leq x \leq -1 + \delta_{OS}, 1 - \delta_{DS} \leq x \leq 1), \\ b_4 x^4 + b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0, & (-1 + \delta_{OS} \leq x \leq 1 - \delta_{DS}). \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a_0 \sim a_2$ 和 $b_0 \sim b_4$ 待定系数 δ_{OS} 和 δ_{DS} 分别为 OS 和 DS 边部区域的分界坐标。

在进行分段拟合时,在 δ_{OS} 和 δ_{DS} 处会出现间断点,此时以中部拟合曲线及边部拟合曲线的交点作为分界点将三条曲线连接为一条曲线。

分别对不同宽度的带钢进行拟合,如图 10 所示。

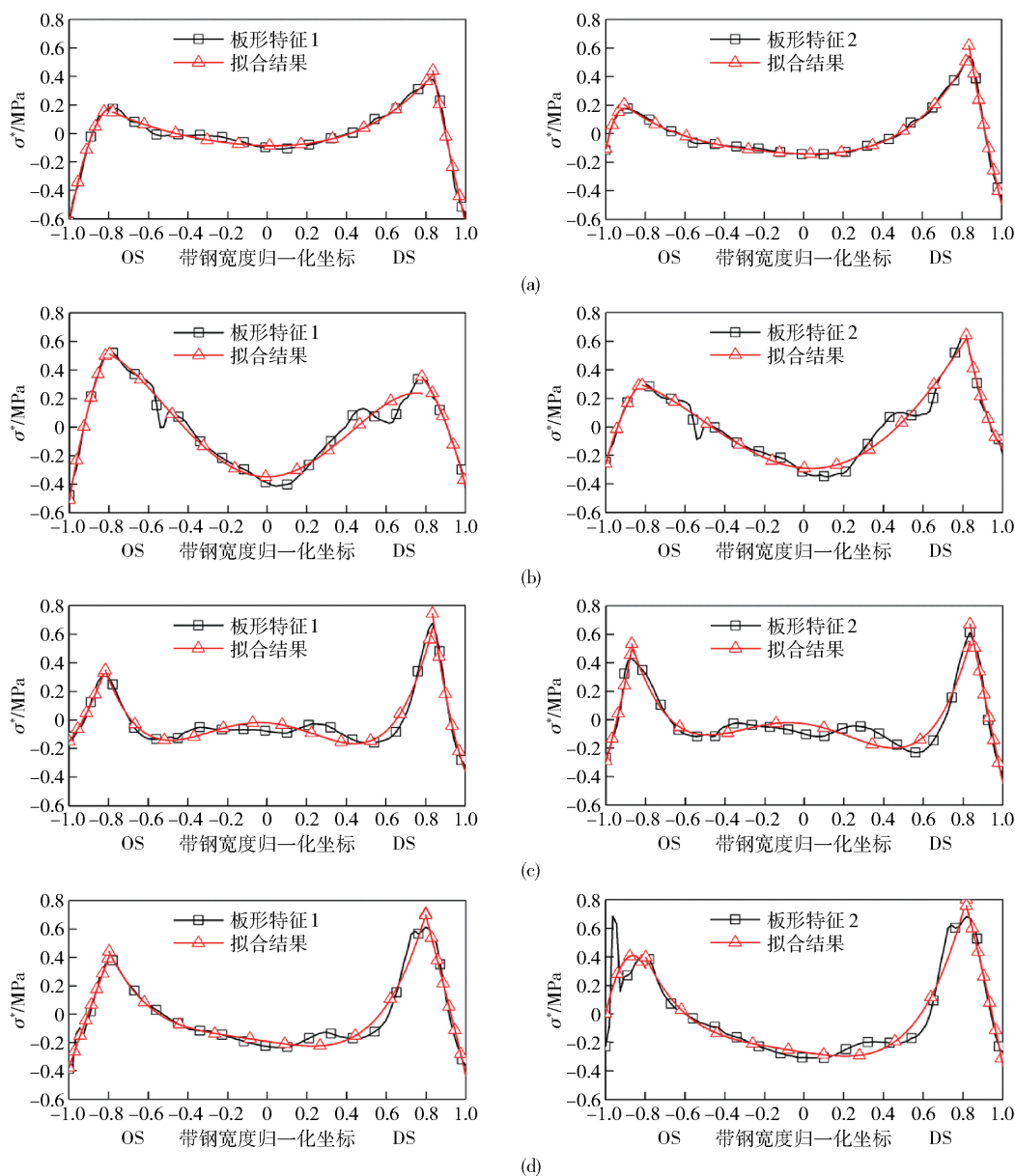


图10 不同宽度带钢板形特征分段拟合结果。(a) 带钢宽度 1150 mm; (b) 带钢宽度 1550 mm; (c) 带钢宽度 1800 mm; (d) 带钢宽度 2000 mm

Fig.10 Fitting results of the flatness characteristics of strips with different widths: (a) 1150 mm strip; (b) 1500 mm strip; (c) 1800 mm strip; (d) 2000 mm strip

可以看出,分段函数 $f(x)$ 能够很好地表达各宽度带钢的板形特征, $f(x)$ 函数的具体系数值如表 1 所示。

表 1 不同宽度带钢板形特征分段拟合系数
Table 1 Fitting coefficients of the flatness characteristics of strips with different widths

宽度/ mm	OS 拟合结果			中部拟合结果					DS 拟合结果		
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	a_0	a_1	a_2
1150	-9.31	-24.60	-15.92	-0.08	-0.02	0.41	0.23	0.20	9.80	-15.13	4.70
	-30.00	-66.16	-36.27	-0.14	-0.03	0.38	0.39	0.44	12.94	-21.47	8.04
1550	-6.46	-20.01	-14.06	-0.35	0.02	2.15	-0.30	-1.61	-3.05	10.49	-7.85
	-5.37	-15.20	-10.09	-0.29	-0.10	1.43	0.45	-0.47	14.84	-28.04	13.05
1800	6.81	12.08	5.12	0.01	0.03	0.09	0.06	0.14	21.47	-39.99	18.16
	14.29	24.28	9.70	-0.03	-0.19	-1.16	0.41	2.68	7.31	-8.94	1.19
2000	3.13	3.02	-0.48	-0.19	-0.20	0.05	0.58	1.80	4.08	-3.17	-1.35
	-15.62	-37.17	-21.54	-0.27	-0.21	0.14	0.63	1.80	1.60	3.11	-5.07

利用该方法对某 2180 mm 超宽带钢冷连轧机带钢板形实际数据进行分析得到的结果,与现场后工序长期观测到的板形缺陷具有较好的对应性。图 11 为 1800 mm 宽度带钢的某一板形特征与后工序实测照片

的对比。与此同时,分析结果也与现场曾提出和试验的辊形改进思路具有较好的对应性^[7-8],证明将该方法应用于带钢板形特征判别与分析的实用性和准确性。

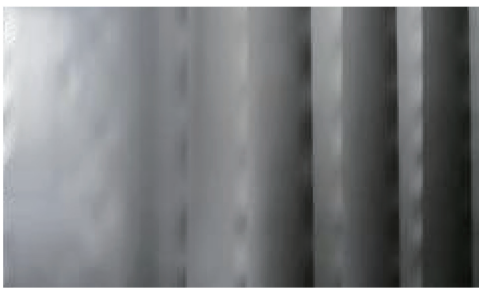
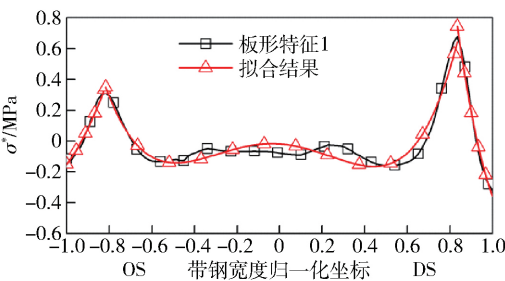


图 11 1800 mm 带钢板形特征与后工序实拍板形缺陷对比。(a) 带钢板形特征;(b) 实际板形缺陷

Fig. 11 Comparison of the flatness characteristics with the real flatness defect photo of the 1800 mm width strip: (a) flatness characteristics (b) real flatness defects

由此可见,利用该方法可以在大量纷繁冗杂的板形实测数据中,挖掘出不同宽度带钢的板形特征以及参数化表达,以掌握现场板形缺陷的发生规律,有助于针对性地提出辊形改进和板形控制优化策略。

4 结论

(1) 提出基于网格和密度的板形特征聚类方法,利用该方法对不同宽度带钢进行特征分析,发现某 2180 mm 冷连轧机带钢板形应力在边部变化剧烈,中部相对较缓,边部板形应力尖峰在距带钢边部 (0.2 ± 0.1) 倍 $B/2$ 的位置。

(2) 给出板形特征的分段描述方法,能够用函数较好地表达不同宽度带钢的板形特征。

(3) 基于网格和密度的板形特征聚类与分析方法,能够快速准确地对大量板形实测数据进行分析,提取出长期生产过程中的板形缺陷特征并得到参数化表达,从而为冷连轧机,特别是超宽带钢冷连轧机的辊形

改进和控制策略优化提供坚实的基础。

参 考 文 献

[1] Huang C Q, Zhao M. Research progress of plate-profile recognition and control for cold-rolled strip. *J Iron Steel Res*, 2013, 25 (12): 1
(黄长清,赵曼. 冷轧板带板形识别及控制的研究进展. 钢铁研究学报, 2013, 25(12): 1)

[2] Peng Y, Liu H M. Pattern recognition method progress of measured signals of shape in cold rolling. *J Yanshan Univ*, 2003, 27 (2): 142
(彭艳,刘宏民. 冷轧带钢板形检测信号模式识别方法的进展. 燕山大学学报, 2003, 27(2): 142)

[3] Zhang X L, Liu H M. GA-BP model of flatness pattern recognition and improved least-squares method. *Iron Steel* 2003, 38(10): 29
(张秀玲,刘宏民. 板形模式识别的 GA-BP 模型和改进的最小二乘法. 钢铁, 2003, 38(10): 29)

[4] Dai J B, Wu W B, Zhang Q D, et al. Recognition and evaluation system for strip flatness on 2030 mm cold tandem mills. *J Univ Sci*

- Technol Beijing* ,2003 ,25(6) : 572
(戴江波,吴文彬,张清东,等. 宝钢 2030 冷轧带钢板形识别和统计系统. 北京科技大学学报,2003 ,25(6) : 572)
- [5] Yan Q T ,Zhang J ,Jia S H ,et al. Research on analyzing the flatness adjusting capacity for cold mill and its application. *J Mech Eng* ,2011 ,47(4) : 77
(闫沁太,张杰,贾生晖,等. 冷轧机板形调节能力分析方法的研究与应用. 机械工程学报,2011 ,47(4) : 77)
- [6] Yang G H ,Zhang J ,Li H B ,et al. Study on strip shape adjusting characteristics on 2180 mm CVC tandem cold rolling mills. *Metall Equip* ,2012(2) : 1
(杨光辉,张杰,李洪波,等. 2180 超宽 CVC 冷连轧机板形调控特性研究. 冶金设备,2012(2) : 1)
- [7] Li H B ,Bao R R ,Zhang J ,et al. Strip profile control analysis of 2180 mm CVC tandem cold rolling mill and roll contour optimization // *Proceedings of China Iron & Steel Annual Meeting*. Beijing ,2013: 1
(李洪波,包仁人,张杰,等. 2180 mm CVC 冷连轧机板形控制问题分析与辊形改进//中国钢铁年会论文集. 北京,2013: 1)
- [8] Bao R R ,Zhang J ,Li H B ,et al. Research on flatness analysis and control in cold rolling based on big date. *Manuf Autom* ,2015 ,37(6) : 10
(包仁人,张杰,李洪波,等. 基于“大数据”的冷轧板形分析与控制技术研究. 制造业自动化,2015 ,37(6) : 10)
- [9] Bao R R ,Zhang J ,Li H B ,et al. Flatness pattern recognition of ultra-wide tandem cold rolling mill. *Chin J Eng* ,2015 ,37(Suppl 1) : 6
(包仁人,张杰,李洪波,等. 超宽带钢冷连轧机板形模式识别. 工程科学学报,2015 ,37(增刊 1) : 6)
- [10] Bao R R ,Zhang J ,Li H B ,et al. Flatness assessment system of ultra-wide tandem cold rolling mill. *Appl Mech Mater* ,2014 ,529: 415
- [11] Yang G H ,Zhang J ,Li H B ,et al. Extracting method of typical shape defect vector for super-wide strip steel. *J Univ Sci Technol Beijing* ,2014 ,36(4) : 523
(杨光辉,张杰,李洪波,等. 超宽带钢典型板形缺陷向量提取方法. 北京科技大学学报,2014 ,36(4) : 523)
- [12] Ester M ,Kriegel H ,Sander J ,et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland ,1996: 226