

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007262

## 整辊式板形辊挠曲影响信号的快速识别和消除\*

于华鑫<sup>1,2</sup>, 张桐源<sup>1</sup>, 张帅<sup>1</sup>, 王东城<sup>1,2</sup>, 刘宏民<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘要:**整辊式板形仪是冷轧带材接触式板形仪的发展趋势。整辊式板形仪在自重和外载作用下的挠曲变形会使内部安装的传感器预紧力发生变化,产生类似正弦波形的干扰信号,和有效信号叠加在一起,影响板形检测精度。本文研究这种影响信号的产生机理和识别消除方法。首先,根据试验标定和工业测试结果,发现并分析了板形信号与干扰信号的波形特征,即沿包角分布的板形波形位于沿圆周分布的干扰波形的波峰和波谷。其次,应用弹性力学理论计算分析了板形辊挠曲产生的应力变形,揭示了传感器预紧力的周期性变化是产生干扰正弦波形的原因。最后,根据包角范围以外的检测信号数据,采用曲线拟合最小误差优化方法,建立了精确快速识别和消除干扰信号波形的数学模型。工业应用表明,本文方法可有效的消除挠曲影响信号,提高板形检测和控制效果1~2 I。

**关键词:**板形仪;整辊式检测辊;挠曲影响信号;快速识别;消除方法

**中图分类号:** TG334.9 TH89

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 420.4020

## Fast recognition and elimination of the interference signal caused by bending deformation of the whole roller seamless flatness meter

Yu Huaxin<sup>1,2</sup>, Zhang Tongyuan<sup>1</sup>, Zhang Shuai<sup>1</sup>, Wang Dongcheng<sup>1,2</sup>, Liu Hongmin<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Rolling Strip,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. State Key Laboratory of Metastable

Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The whole roller flatness meter is the development trend of the contact type flatness meter for cold rolling. Under the action of dead-weight and external load, the bending deformation of the detection roller will change the pre-tightening force of the sensors that are installed in the meter. The additional signals are generated, which are similar with sinusoidal waveforms. They will affect the accuracy of flatness detection by superposition with the effective signals. This paper studies the generation mechanism. The recognition and elimination method of this interference signal is also studied. Firstly, according to the experimental calibration and industrial testing results, the wave characteristics of the flatness signal and the interference signal are found and analyzed. The effective flatness waveform distributed along the wrapping angle is located on the peak and trough of the interference waveform distributed along the circumference. Secondly, the elastic theory is applied to calculate and analyze the stress and deformation caused by the beding of the flatness roller. It reveals that the periodic change of the pre-tightening force of the sensor is the cause of the interference sinusoidal waveform. Finally, based on the detection signal data outside the wrapping angle range, a mathematical model that has accurate and quick feature to identify and eliminate the interference signal waveform is formulated, which utilizes the curve fitting optimization method of minimum error. The industrial application show that the proposed method can effectively eliminate the beding signal and improve the effect of flatness detection and control by 1~2 I.

**Keywords:** flatness meter; whole roller; bending interference signal; fast recognition; elimination method

收稿日期:2020-12-19 Received Date: 2020-12-19

\* 基金项目:河北省高端人才和“巨人计划”创新团队(2019)项目资助

## 0 引言

板形是冷轧带材的重要质量指标,板形检测与控制是冷轧带材的关键技术,板形仪和板形控制系统是生产高品质冷轧带材的标配技术装备,是生产高级冷轧带材的必然选择<sup>[1-9]</sup>。长期以来,我国高端带材冷轧机板形仪被国外垄断。近年来,燕山大学板形测控技术团队自主研发了整辊无缝式板形检测辊和无线内嵌式信号传输处理装置<sup>[10-12]</sup>,并在工业冷带轧机上进行了一系列实际应用<sup>[13-14]</sup>。在板形检测过程中,如何识别并消除干扰信号的影响,提高检测精度,是一个重要的研究领域。

关于板形检测信号的消噪和误差补偿,相关学者进行了一些研究。杨利坡等<sup>[15-17]</sup>推导了冷轧带钢原始波形信号的数学表达式,研究了板形信号零点漂移的产生机理,建立了相应的工艺误差补偿模型。李志明等<sup>[18]</sup>通过锁相放大原理进行板形信号提取,采用滤波技术得到有效板形信号。李荣民等<sup>[19-20]</sup>基于截点法建立了针对检测辊挠度动态变化的原始波形零点补偿模型,基于几何关系和板形检测理论,建立了针对检测辊安装误差的在线板形信号误差补偿模型。何力等<sup>[21]</sup>采用离散跟踪微分器,对板形检测数据进行了滤波消噪处理。单修迎<sup>[22]</sup>以人工智能理论为基础对板形信号进行了处理。王鹏飞等<sup>[23]</sup>制定了板形测量信号的标定及滤波处理方法,得到准确的板形测量值。包仁人等<sup>[24]</sup>考虑板形仪传感器分布不均对板形计算的影响,利用线性插值构造间距均匀的伸长率横向分布模型。Wu等<sup>[25]</sup>研究了板形辊温度变化对传感器预压力的影响,避免板形检测信号间断或消失。Liu等<sup>[26]</sup>通过对数据处理方法的分析,应用通道数插值和滤波等方法对检测数据进行处理,抑制板形检测数据中的干扰影响,提高了测量系统的抗干扰能力。王东城等<sup>[27]</sup>采用黄金分割优化算法,识别整辊式板形辊的挠度干扰信号,但没有研究零漂的问题。

在板形仪的实验标定和工业应用中发现,当板形辊无负载空转时(只受重力作用,不受标定压力和带材压力),检测单元会输出 $360^\circ$ 大范围的近似正弦波形信号;当板形辊受标定压力和带材压力后,这个大范围影响波形的幅值会变大,与带材包角小范围的板形信号叠加在一起,造成板形检测误差。特别是当轧制薄带张力较小时,这种板形检测误差可达15%以上。因此,必须研究提出识别和消除这种大范围影响波形的办法,提高板形检测精度。

本文根据整辊式板形辊的结构特点,经过力学分析揭示出,这种大范围的影响波形,是由于板形辊挠曲变形引起内部传感器预紧力变化造成的。进而根据误差最小原理,提出识别这种大范围影响波形的优化方法,包括幅

值、相位和零漂。通过应用实例表明,消除大范围影响波形后,显著的提高了板形检测精度。

## 1 板形辊结构与信号波形分析

整辊式板形仪检测辊结构如图1所示。根据板形辊旋转一周要检测的板形次数决定安装传感器的通孔数量,通常为2排或4排。对于轧制速度较高和板形辊辊径不大的情况,辊体中布置2排传感器即可满足应用要求。本文以2排传感器的板形辊为例进行研究,板形辊同一轴向位置的两个传感器(周向对称,相隔 $180^\circ$ )构成一个检测单元,又称检测通道。为了方便信号提取,每个检测单元单独接到一路电荷放大器和信号处理电路。一个检测单元中周向对称安装的两个传感器分别由两片石英晶体组成,并实施并联连接,以提高输出的灵敏度,如图2所示。

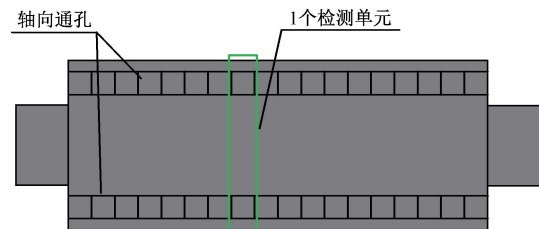


图1 整辊式板形检测辊结构

Fig. 1 Structure of the integral detection roller

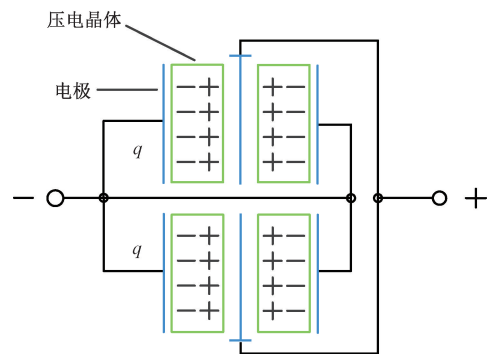


图2 传感器组成并联方式

Fig. 2 Parallel connection mode of sensors

实际检测板形时,带材对板形辊最大包角一般不超过 $60^\circ$ ,一个检测单元中的两个传感器不会同时被包覆。理想情况下,当检测单元的一个传感器被包覆并输出压力信号时,同一检测单元的另一个不受带材作用力的传感器输出的有效信号应为零,即板形信号应为间隔 $180^\circ$ 、小范围(包角区间)分布的单峰形状的压力信号波,如图3所示。图3中的两个半波段为压力信号的有效段,其峰值大小表征了传感器所受压力大小,两个半波形之

外的区域输出信号应该为 0。如果两个传感器性能相同,安装精度也足够高,两个波形的幅值与形状也应是完全相同的。当传感器不受任何外载时,两个波峰段也应当为零。

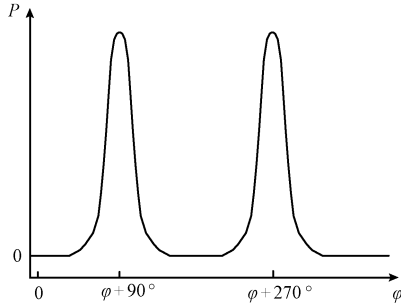


图 3 理想波形  
Fig. 3 Ideal waveform

为了研究板形辊传感器的输出特性,制做了板形辊实验标定平台,其中板形辊辊面长度 650 mm。板形辊标定装置加载方式如图 4 所示,标定时辊体旋转,压轮在摩擦力作用下与之相向转动,压轮通过标定砝码和一端铰接的标定杆对板形辊某一检测单元施加竖直向下的径向压力,通过调整砝码重量改变标定压力以调节信号强度。

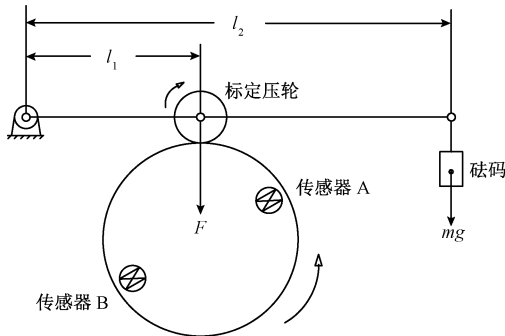
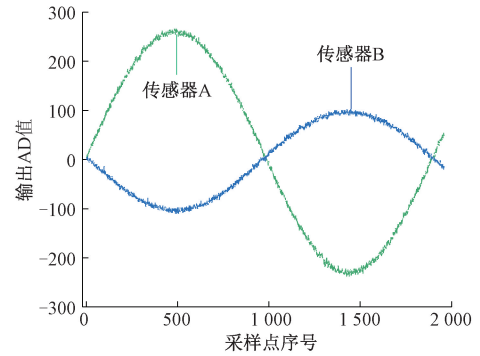
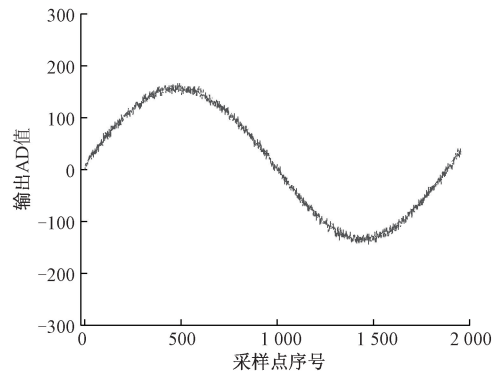


图 4 标定加载原理  
Fig. 4 Loading principle of the calibration device

以上述板形辊某一检测单元为研究对象,该检测单元由在辊体内的周向位置对称的 A、B 两传感器组成。将两个传感器分别接入采集电路,板形辊空转时输出信号波形如图 5 (a) 所示。由于没有加载,输出信号应是两条等于零的直线,而实际波形是两条相位相差 180°的正弦波。二者周期相同而幅值存在差异,传感器 A 的幅值为 280,传感器 B 的幅值为 102。当传感器 A 旋转到最下方,传感器 B 旋转到最上方时,A 输出最大值,B 输出最小值。当传感器 B 旋转到最下方,传感器 A 旋转到最上方时,B 输出最大值,A 输出最小值。将传感器 A 与传感器 B 并联后,板形辊空转时输出信号波形如图 5 (b) 所示,幅值为 175,近似等于两传感器单独连接时输出幅值之差,相当于原来 A、B 单独输出波形叠加的结果。



(a) 两个传感器单独输出  
(a) Two sensors output separately

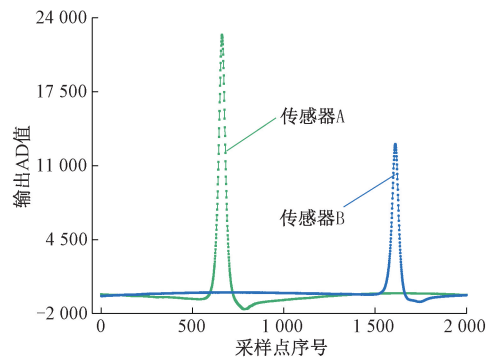


(b) 两个传感器并联输出  
(b) Two sensors output in parallel

图 5 空载时板形辊输出波形

Fig. 5 The waveforms output of the detection roller under no load

对该检测单元施加 380 N 标定压力,两个传感器分别输出的信号波形如图 6 (a) 所示,传感器 A 输出力信号与传感器 B 输出力信号的相位差为 180°。将两个传感器并联后接到信号采集电路,施加同样的径向压力,输出波形如图 6 (b) 所示,相当于图 6 (a) 两条波形相互叠加的结果。空载和加载时板形辊转速和采样频率相同,图 5 和 6 两组曲线在其各自单周期的时间长度内均对应 1 945 个采样点,即空载波形与加载波形周期相同。可见,两种信号实时叠加,造成检测误差。



(a) 两个传感器单独输出  
(a) Two sensors output separately

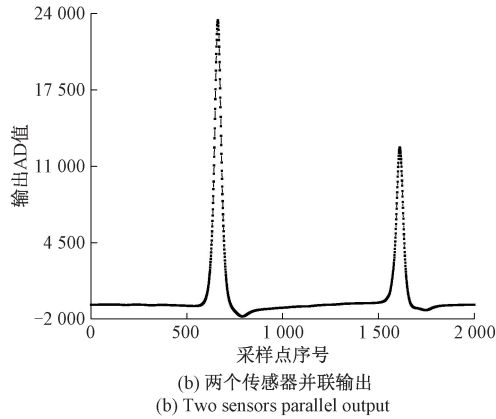


图6 加载时板形轴输出波形

Fig. 6 The waveforms output with the loaded detection roller

由图3和图6可见,理想波形与实际波形明显不同。理想波形之间有零值线,而实际波形在两峰区间外为非零值曲线。这表明,实际波形中有类似空载波形的干扰信号,影响板形检测精度。

以某厂1 550 mm冷轧机板形辊为例,空载时不同检测单元的波形幅值各不相同,变化范围为20~300。该轧机前张力范围为10~120 kN,按张力平均分布计算,对应的检测输出最小和最大AD值约为1 800和21 600。空载波形对检测信号的最小影响约为1.4%,最大影响可超过16%以上,严重影响检测精度。

## 2 板形辊挠曲与影响波形的机理分析

上述空载和加载条件下沿板形辊圆周大范围360°分布的正弦波形是影响板形检测精度的干扰波形,它是由于板形辊挠曲变形引起传感器预紧力变化造成的。如图7所示,板形辊在自重、标定压力或带材压力作用下,会产生向下的挠曲变形。板形辊旋转时,当传感器旋转到轴线上方时,其周围辊体受轴向压力作用使安装孔扩张,传感器所受的预紧力减小;当传感器旋转到轴线下方时,其周围辊体受轴向拉应力作用使安装孔收缩,传感器所受的预紧力增大。

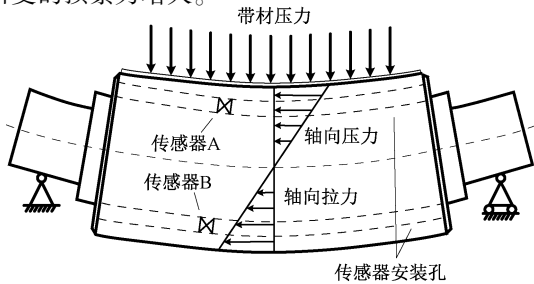


图7 实际检测时板形辊挠曲变形

Fig. 7 Bending deformation of the detection roller during actual testing

为进一步证明上述分析,利用弹性力学中简支深梁理论模型对板形辊应力应变进行计算<sup>[28]</sup>。在图8所示直角坐标系内,将板形辊近似为一个简支深梁,上方受有均布载荷 $q$ ,梁的长度为板形辊长度 $2l$ ,深度为板形辊直径 $D$ ,则深梁内部任意点 $(x, y)$ 处应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{6q}{D^3}(l^2 - x^2)y + q \frac{y}{D} \left(4 \frac{y^2}{D^2} - \frac{3}{5}\right) \\ \sigma_y = -\frac{q}{2} \left(1 + \frac{y}{D}\right) \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^2 \\ \tau_{xy} = -\frac{6q}{D^3}x \left(\frac{D^2}{4} - y^2\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_x$ 为 $x$ 方向正应力; $\sigma_y$ 为 $y$ 方向正应力; $\tau_{xy}$ 为切应力。

根据应力应变关系得到应变分量为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1 + \mu)}{E}\tau_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_x$ 为 $x$ 方向正应变; $\varepsilon_y$ 为 $y$ 方向正应变; $\gamma_{xy}$ 为切应变; $E, \mu$ 为板形辊的弹性模量和泊松比。

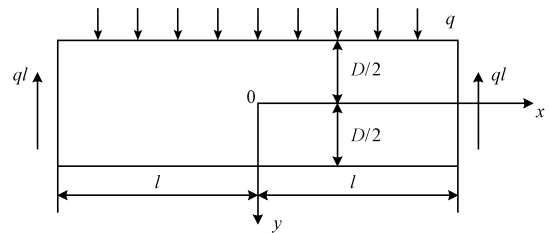


图8 板形辊深梁模型

Fig. 8 The detection roller deep beam model

以生产现场常用规格板形辊参数作为参考,取板形辊长度为1 500 mm,辊径为300 mm,弹性模量为 $2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3,均布载荷为 $q = 1$  MPa,在 $x = 0$ 的对称横截面处 $y$ 向正应变 $\varepsilon_y$ 分布如图9所示。在板形辊下部( $y > 0$ ),特别是辊面处( $y = 150$  mm), $\varepsilon_y$ 为负,产生压缩变形,安装孔变小,预紧力变大;在板形辊上部( $y < 0$ ),特别是辊面处( $y = -150$  mm), $\varepsilon_y$ 为正,产生拉伸变形,安装孔变大,预紧力变小。

传感器周向并联安装能在一定程度上降低挠曲影响,理论上当传感器安装精度和灵敏度完全一致时,挠曲信号可以完全抵消。而实际制造安装的过程中,不可能保证这种一致性,挠曲波形不能通过传感器并联方式完全消除。在轧制过程中,张力加载使辊体挠曲程度更大,挠曲波形的影响也相应变大。如果忽略其影响直接提取信号峰值作为径向压力大小来计算板形,势必产生明显

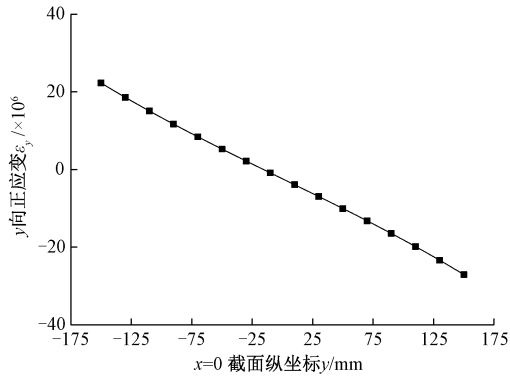


图9 板形辊对称横截面(0,y)处  $\varepsilon_y$  分布

Fig. 9 Distribution of  $\varepsilon_y$  at the symmetric cross section (0, y) of the detection roller

的检测误差。

板形辊挠曲变形随张力大小、张力分布、带材宽度和带材跑偏等参数的变化而变化,如果从理论上对不同工况条件下每个检测单元的挠曲波形进行精确分析,难度和工作量很大。从工程应用角度,不需要具体计算工艺参数和板形辊挠度产生的干扰波形,只要能够根据各检测单元的实际波形提取出相应的挠曲影响信号,就可从实测波形中消除挠曲影响波形,提高检测精度。

### 3 挠曲影响波形的识别和消除

采用傅立叶变换和数字滤波两种方法都可以基本消除挠曲影响信号。但是傅立叶变换方法速度慢,需要的采样点数多,可以进行分析而不适合在线应用;数字滤波法适用于轧制速度不变即影响信号和有效信号频率固定的情况,对于轧制速度和板形辊转速时变性强的工业板形检测很难应用。

为提高工业板形在线精测精度,本文提出一种快速识别和消除板形辊挠曲影响信号的曲线拟合最小误差优化方法,不但能够解决挠曲影响波形问题,而且能够解决零漂问题。

假设板形信号处理器采样频率为  $f$ ,板形辊直径为  $D$ ,板形辊线速度为  $v$ ,则板形辊旋转一周的采样点数为:

$$n = \frac{\pi D}{v} f \quad (3)$$

某采样点在一个周期内序号为  $i$ ,该采样点原始信号 AD 值为  $y_i$ ,则各采样点对应的 AD 值信号大小可表示为  $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ ,组成的采样曲线如图 10 中红色和黑色实线所示。

带材包覆板形辊的角度  $\theta$  对应的采样点数为:

$$n_\theta = \frac{n \cdot \theta}{2\pi} \quad (4)$$

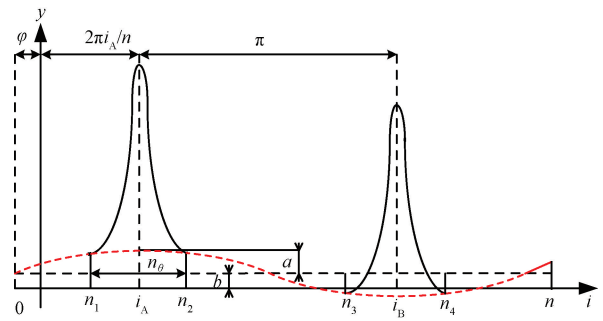


图 10 最小误差法消除附加信号示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the minimum error method to eliminate the additional signal

板形辊一个旋转周期内不参与挠曲波形识别计算的采样点数为:

$$r = m \cdot n_\theta \quad (5)$$

式中:  $m$  为每个检测单元周向布置传感器的个数,即一个旋转周期内信号波峰的个数,本文以  $m = 2$  为例,则  $r = 2n_\theta$ 。

假设挠曲影响信号波形曲线为:

$$y_c = a \sin\left(\frac{2\pi i}{n} + \varphi\right) + b \quad (6)$$

式中:  $a, \varphi$  和  $b$  分别为挠曲波形幅值、相位和零点漂移。

由于各检测单元传感器均为周向对称并联安装,传感器在辊体周向上的位置是固定的,各检测单元挠曲影响波形的相位为固定值,检测信号峰值和挠曲影响波形的波峰、波谷的位置都是固定的。设传感器 A 的检测信号峰值点号为  $i_A$ ,则传感器 B 的检测信号峰值点号为:

$$i_B = i_A + \lceil n/2 \rceil \quad (7)$$

挠曲影响波形的初始相位为:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi i_A}{n} \quad (8)$$

则挠曲波形曲线变为:

$$y_c = a \sin\left[\frac{2\pi}{n}(i - i_A) + \frac{\pi}{2}\right] + b \quad (9)$$

检测信号两个波峰边界的采样点序号,即不参与挠曲波形识别计算的采样点序号范围的边界分别为:

$$n_1 = i_A - \frac{n_\theta}{2}, n_2 = i_A + \frac{n_\theta}{2}, \quad (10)$$

$$n_3 = i_B - \frac{n_\theta}{2}, n_4 = i_B + \frac{n_\theta}{2}$$

采样数据与挠曲波形曲线的误差:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_c - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ a \sin\left[\frac{2\pi}{n}(i - i_A) + \frac{\pi}{2}\right] + b - y_i \right\}^2, \quad (11)$$

$(i \neq n_1 \sim n_2, n_3 \sim n_4)$

根据误差最小原理,得到控制方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n \left\{ a \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] + b - y_i \right\} \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] = \\ \sum_{i=1}^n \left\{ a \sin^2 \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] + b \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] - y_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] \right\} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n \left\{ a \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] + b - y_i \right\} = 0, (i \neq n_1 \sim n_2, n_3 \sim n_4) \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sin^2 \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] & \sum_{i=1}^n \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] \\ \sum_{i=1}^n \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] & n - r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix}, (i \neq n_1 \sim n_2, n_3 \sim n_4) \quad (13)$$

由此可解出波形幅值  $a$  和零点漂移  $b$ :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sin^2 \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] & \sum_{i=1}^n \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] \\ \sum_{i=1}^n \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] & n - r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix}, (i \neq n_1 \sim n_2, n_3 \sim n_4) \quad (14)$$

从板形检测原始信号  $y_i$  中消除板形辊挠曲影响波形  $y_e$ , 得到真实的板形检测信号  $y_e$  为:

$$y_e = y_i - a \sin \left[ \frac{2\pi}{n} (i - i_A) + \frac{\pi}{2} \right] - b \quad (15)$$

### 4 实验和工业应用

通过 650 mm 板形辊实验标定平台实时采集压轮加载时板形辊某检测单元输出的原始信号, 应用上文所述最小误差优化方法得到挠曲影响波形的识别与消除结果如图 11 所示, 挠曲波形的幅值  $a = 210$ , 相位  $\varphi = -0.05\pi$ , 漂移  $b = -305$ 。可见, 挠曲信号波形与原始检测信号波形在波峰段外的相位区域几乎完全重合,

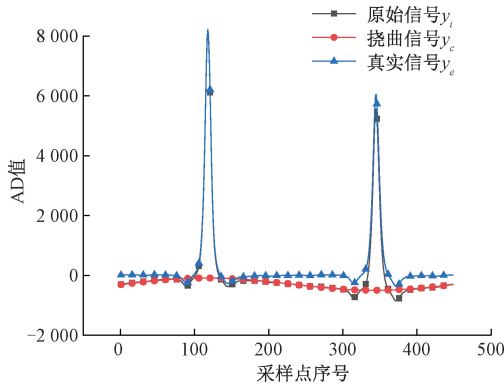
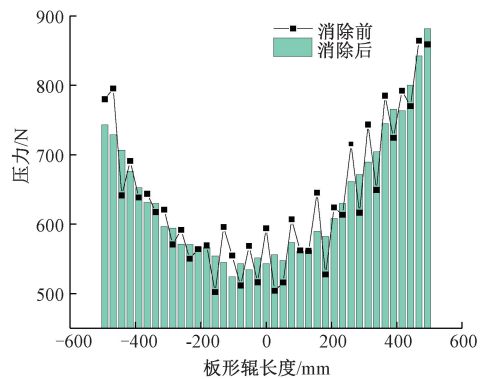


图 11 挠曲影响波形识别与消除结果

Fig. 11 Effectiveness of the minimum error method

消除挠曲信号波形之后的板形信号波形在波峰段外的相位区域非常平直, 证明了本文方法的有效性和精确性。该方法计算速度可控制在 ms 级, 应用该方法对检测单元的挠曲影响信号进行实时处理, 几乎完全消除了工艺参数等误差的影响, 使每个检测单元都能真实检测出实际受力大小, 提高精度。

以某现场应用的六辊冷轧机 1 720 mm 整辊式板形仪为例, 轧制带钢材质为 SPCC, 厚度为 0.800 mm, 宽度为 1 150 mm, 出口张力为 46 kN, 该板形辊挠曲影响消除前后的检测结果对比如图 12 所示。消除挠曲影响前, 径向压力和带钢板形分布存在明显的锯齿形特征, 板形整体差值约为 9 I, 相邻单元板形波动可达 2 I; 消除挠曲影响后, 板形整体差值约为 7 I, 相邻单元板形波动小于 1 I, 检测压力和板形分布趋于平滑, 符合现场实际情况。



(a) 压力分布

(a) Pressure distribution

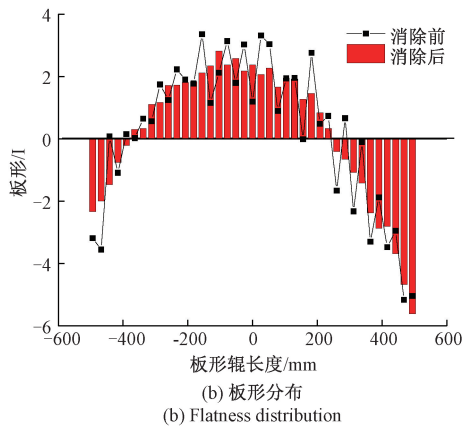


图12 影响信号消除前后的实测压力与板形对比  
Fig.12 Pressure and flatness distribution before and after eliminating of the interference signal

板形辊挠曲变形对板形检测结果影响显著,若不进行识别和消除,将会影响板形控制效果。以上述轧制条件某时段的板形测控效果为例,未消除挠曲影响的板形控制结果为中浪,消除影响后的板形控制结果为良好,二者相差约为1.5 I。除此之外,大量的工业应用表明,消除挠曲影响后,能使板形控制精度提高1~2 I,进一步证明本文研究成果的有效性。

## 5 结 论

板形辊在自重和外载作用下产生挠曲变形,使轴线上部辊体承受轴向压力,传感器安装孔扩大,传感器预紧力减小,输出信号减小;轴线下部辊体受轴向拉力,传感器安装孔缩小,预紧力增大,输出信号增大。这种由板形辊挠曲产生的影响信号,是沿圆周360°大范围分布的正弦波形,空载时存在,加载后幅度更大,属于干扰信号,应予以识别和消除。通过曲线拟合最小误差优化方法,可以精确快速的识别和消除挠曲影响信号,不但可识别消除波形,而且可识别消除零漂,具有普遍性和通用性。不仅使板形信号有效段外的范围变为近似零值线,而且计算速度满足对每个检测单元挠曲影响信号进行实时处理的应用要求。若不消除挠曲影响波形,检测的辊面压力和带材板形分布会出现明显的锯齿状,相邻通道板形波动可达2 I。消除挠曲影响波形后,压力和板形分布变的相当平滑,相邻通道板形差值在1 I以内,符合板形渐变的情况。消除挠曲影响后,能使板形控制精度提高1~2 I。

### 参考文献

[1] 曹建国, 黄小海, 赵秋芳, 等. 板带轧机通用变凸度板形控制技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),

2020, 51(10): 2772-2781.

CAO J G, HUANG X H, ZHAO Q F, et al. Universal variable crown technology for strip profile control in wide strip rolling mills [J]. Journal of Central South University, 2020, 51(10): 2772-2781.

[2] 张维召. 邯钢2 180 mm酸轧机组板形控制研究[J]. 轧钢, 2018, 35(1): 82-84.

ZHANG W ZH. Study on strip shape control technology of 2180 mm pickling and tandem cold mill of Hansteel[J]. Steel Rolling, 2018, 35(1): 82-84.

[3] 李靖, 马进峰, 王飞, 等. 四辊平整机板形前馈模型的研究与应用[J]. 轧钢, 2019, 36(1): 58-59.

LI J, MA J F, WANG F, et al. Development and application of flatness feedforward model for four high skin pass mill[J]. Steel Rolling, 2019, 36(1): 58-59.

[4] 彭艳, 牛山. 板带轧机板形控制性能评价方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 26-44.

PENG Y, NIU SH. Review on assessment methods for shape control performance of strip rolling mills [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 26-44.

[5] YU H X, WANG D C, LIU H M, et al. Modelling and application of signal decoupling of adjacent channels of a whole-roller seamless flatness meter [J]. ISIJ International, 2020, 60(5): 939-947.

[6] 于华鑫, 王东城, 刘宏民, 等. 冷轧带材板形辊传动方案设计[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 56-60.

YU H X, WANG D CH, LIU H M, et al. Electric drive scheme design of flatness meter for cold rolling strip[J]. Iron and Steel, 2019, 54(7): 56-60.

[7] 于丙强, 杨利坡, 刘宏民, 等. 冷轧带钢接触式板形仪研制及其工业应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 904-911.

YU B Q, YANG L P, LIU H M, et al. Development and industry application of contact shape meter with new structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 904-911.

[8] 李旭, 王青龙, 张宇峰, 等. 基于弹塑性有限元的板形控制机理研究现状与展望[J]. 轧钢, 2020, 37(4): 1-11.

LI X, WANG Q L, ZHANG Y F, et al. Present status and future prospects of strip flatness control based on elastic plastic finite element [J]. Steel Rolling, 2020, 37(4): 1-11.

- [9] 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): 180-189.  
ZHANG D H, SUN J, CHEN SH 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): 180-189.
- [10] 刘宏民, 刘军, 于丙强, 等. 带钢冷轧机整辊无线式板形仪和智能板形控制系统[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 87-93.  
LIU H M, LIU J, YU B Q, et al. Entire roller wireless shape meter and intelligent shape control system for cold steel strip mills [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 87-93.
- [11] 刘宏民, 于丙强, 杨利坡, 等. 整辊无缝无线式板形仪: CN101694368A [P]. 2010-04-14.  
LIU H M, YU B Q, YANG L P, et al. A whole roll seamless flatness meter: CN101694368A [P]. 2010-04-14.
- [12] 刘宏民, 于丙强, 杨利坡, 等. 一种用于冷轧带材板形仪的紧凑无线内嵌式信号处理器: CN105005287A [P]. 2015-10-28.  
LIU H M, YU B Q, YANG L P, et al. A type of seamless and embedded signal processor used for shapemeter: CN105005287A [P]. 2015-10-28.
- [13] 王国栋. 近年我国轧制技术的发展、现状和前景[J]. 轧钢, 2017, 34(1): 1-8.  
WANG G D. Development, current situation and prospect of Chinese steel rolling technology in recent years [J]. Steel Rolling, 2017, 34(1): 1-8.
- [14] WANG D C, LIU H M, LIU J. Research and development trend of shape control for cold rolling strip [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1248-1261.
- [15] 杨利坡, 于丙强, 付强. 冷轧带钢原始波形信号零点误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 927-934.  
YANG L P, YU B Q, FU Q. Original waveform signal zero error compensation method of cold rolling strip [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 927-934.
- [16] YANG L P, YU B Q, YU H X. Online shape dynamic wrapping angle compensation model of cold strip [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(7): 28-32.
- [17] 杨利坡, 于丙强, 李荣民, 等. 冷轧带钢板形检测误差及异常信号补偿模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 30-38.  
YANG L P, YU B Q, LI R M, et al. Compensation model of abnormal signal and shape detection error of cold rolling strip [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 30-38.
- [18] 李志明. 整辊镶块式板形仪信号处理及板形闭环控制方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.  
LI ZH M. Research on shape signal processing for shape meter of entire roller embedded with elastic blocks and shape closed-loop control method [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [19] 李荣民, 杨利坡, 于丙强, 等. 板形检测辊挠度变化对冷轧带钢原始波形信号的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(5): 41-45.  
LI R M, YANG L P, YU B Q, et al. Effect of shape detecting roll deflection on original waveform signal of cold rolling strip [J]. Iron and Steel, 2013, 48(5): 41-45.
- [20] 李荣民, 杨利坡, 于丙强, 等. 检测辊安装精度对冷轧带钢在线板形信号的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(7): 40-43.  
LI R M, YANG L P, YU B Q, et al. Effect of detection roll installation precision on online shape signal of cold rolling strip [J]. Iron and Steel, 2013, 48(7): 40-43.
- [21] 何力, 王京, 张飞. 离散跟踪微分器在板形识别上的研究与应用[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(2): 58-62.  
HE L, WANG J, ZHANG F. Research and application of discrete tracking differentiator in shape flatness recognition [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(2): 58-62.
- [22] 单修迎. 冷轧带钢板形控制的矩阵模型研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
SHAN X Y. Research on matrix model of shape control for cold strip mills [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [23] 王鹏飞, 张殿华, 刘佳伟, 等. 冷轧板形测量值计算模型的研究与应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 58-65.  
WANG P F, ZHANG D H, LIU J W, et al. Research and application of the flatness measurement calculation



model on cold rolling mill [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 58-65.

- [24] 包仁人, 张杰, 李洪波, 等. 冷轧板形平坦度计算方法[J]. 钢铁, 2014(12): 50-53.

BAO R R, ZHANG J, LI H B, et al. Calculation method of flatness index in cold rolling [J]. Iron and Steel, 2014(12): 50-53.

- [25] WU H M, CUI G H, ZHANG D, et al. Reliability evaluation and robust design of a sensor in an entire roller-embedded shapemeter [J]. Sensors, 2018, 18(7): 1988.

- [26] LIU J W, ZHANG D H, W J S. Deflection compensation model for flatness measuring roll [J]. Journal Of Iron And Steel Research, International, 2011, 12 (17): 35-37.

- [27] 王东城, 徐扬欢, 于华鑫, 等. 整辊内嵌式板形仪挠度干扰信号的消除方法[J]. 钢铁, 2020, 55(10): 56-62.

WANG D CH, XU Y H, YU H X, et al. Method of eliminating deflection interference signal of whole roll embedded flatness meter [J]. Iron and Steel, 2020, 55(10): 56-62.

- [28] 徐芝纶. 弹性力学 第四版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

XU ZH L. Theory of Elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

## 作者简介



**Yu Huaxin** Yu Huaxin received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Yanshan University in 2012, 2015 and 2019, respectively. He is currently a lecturer in the School of Mechanical Engineering at Yanshan University. His main research interests include intelligent measurement and control technology of strip flatness.

于华鑫, 分别在 2012 年、2015 年和 2019 年于燕山大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为燕山大学机械工程学院讲师, 主要研究方向为板形智能测控技术。

E-mail: 15033537589@163.com



**Liu Hongmin** (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Northeast Heavy Machinery Institute (renamed Yanshan University) in 1982, 1985 and 1988, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. advisor in the school of Mechanical Engineering at Yanshan University. His main research interests include theory of strip rolling and intelligent measurement and control technology of strip flatness.

刘宏民(通信作者), 分别在 1982 年、1985 年和 1988 年于东北重型机械学院(现更名为燕山大学)获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为燕山大学机械工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为板带轧制理论和带钢板形智能测控技术。

E-mail: liuhmin@ysu.edu.com

**Liu Hongmin** (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Northeast Heavy Machinery Institute (renamed Yanshan University) in 1982, 1985 and 1988, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. advisor in the school of Mechanical Engineering at Yanshan University. His main research interests include theory of strip rolling and intelligent measurement and control technology of strip flatness.