DOI: 10.3901/JME.2014.06.030

冷轧带钢板形检测误差及异常信号补偿模型^{*}

杨利坡^{1,2} 于丙强^{1,2} 李荣民^{1,3} 刘宏民^{1,2} 杜长征³

(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;

3. 河北钢铁集团衡水薄板有限公司 衡水 051000)

摘要: 针对冷轧带钢板形检测通道的信号误差或异常等问题, 基于接触式板形检测原理、压磁传感器及其电磁特性, 建立板形检测误差及异常信号补偿模型。综合理论模型和中试数据, 深入分析零点残存电压、带钢边部板形误差、检测辊挠度、安装精度等因素对原始板形信号的影响, 解决板形信号不稳定的问题。以 1050 冷轧机为例, 根据轧机配置和工艺参数, 在线计算带钢起始和末尾通道号、边部信号误差、检测辊挠度误差等补偿量, 制定满足在线板形控制要求的板形检测辊允许安装误差, 提出异常信号紧急处理措施, 防止板形误调事故, 实现稳定轧制, 有利于提高板形检测精度和板形控制精度。

关键词: 板形检测; 零点漂移; 异常信号; 误差补偿; 冷轧带钢

中图分类号: TP211

Compensation Model of Abnormal Signal and Shape Detection Error of Cold Rolling Strip

YANG Lipo^{1,2} YU Bingqiang^{1,2} LI Rongmin^{1,3} LIU Hongmin^{1,2} DU Changzheng³

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

Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. Hengshui Strip Rolling Co., Ltd., Hebei Iron & Steel Group, Hengshui 051000)

Abstract: Point to the unusual problems in the detection process, for example of the channel failure and not continuous transverse shape signal, the shape detection error and the abnormal signal compensation model are established based on the principle of contactless shape detection, piezomagnetic sensor and its electromagnetic characteristics. Comprehensive theoretical models and test datum, the effects of technological factors on the original shape signal, such as the zero remaining voltage signal, the strip edge error, the detection roll deflection and its installation accuracy and so on, are analyzed to solve instability problem of the original shape signal. For example of 1050 cold rolling mill, according to the mill model configuration and the rolling parameters, the start and the end channel numbers, the edge error compensation amount, the deflection change and the logical installation accuracies of the shape detection roll could be online calculated by the model to meet requirements of the online shape control, and appropriate emergency measures are advanced to prevent serious mistakenly regulation accident of mill caused by abnormal signal, and to achieve stable carefree rolling and improve the shape detection precision and the shape control precision.

Key words: shape detection; zero drift; abnormal signal; error compensation; cold rolling strip

0 前言

生产过程中, 冷轧带钢在较大前、后张力的作

用下, 在线板形缺陷常被隐藏, 仅凭经验无法定量检测、评价和控制在线板形^[1-2], 导致整卷带钢在全长范围内的板形稳定性不好, 开卷或退火后的带钢经常表现出多种多样的表现板形缺陷^[3-4]。

板形仪是检测冷轧带钢在线板形状况的核心设备^[5-6]。然而板形仪在安装、调试和标定过程中, 受

^{*} 国家自然科学基金(51305387)、国家科技支撑计划(2011BAF15B03)和河北省高等学校自然科学研究青年基金(Q2012104)资助项目。
20130301 收到初稿, 20130928 收到修改稿

零点残存电压等物理因素和挠度、安装精度等工艺因素的影响^[7-9], 原始板形信号总存在原始波形噪声大、板形信号不稳定等问题, 一定程度上影响冷轧带钢的离线板形标定精度和在线板形检测精度, 导致板形仪实时检测的原始板形信号未能准确反映在线冷轧带钢的板形变化。

基于压磁接触式板形检测原理, 研究板形检测辊内部传感器的电磁特性及其差动电路的补偿特性^[10], 深入分析零点残存电压、带钢边部信号误差、检测辊挠度、安装精度等干扰噪声及工艺误差对原始波形信号的影响, 建立板形检测误差及异常信号补偿模型。利用该模型, 在消除零点残存电压和做好屏蔽、隔离、滤波等措施的基础上, 对原始板形信号进行综合补偿, 补偿后的实测信号才能准确反映在线带钢的真实板形状况, 替代依赖经验的传统调控模式, 实时指导在线板形控制^[11-14]。这对于提高板形检测辊的标定精度、检测精度有明显的作用, 对于实现冷轧带钢的精细板形调控和提高板形控制的稳定性具有重要的理论意义和工程价值。

1 原始板形信号预处理

1.1 压磁特性曲线

检测辊是板形仪的核心部件^[5-6], 作用是检测原始板形信号, 其信号强弱和好坏直接影响板形检测精度和板形控制精度。

压磁传感器是检测辊获取压力信号的关键。压力与电压之间特性曲线如图 1 所示, 其中 *ab* 段为线性段, 检测辊工作范围尽量在该区域内。检测辊径向对称位置各安装 1 个压磁传感器, 两个传感器形成 1 个差动电路, 如图 2 所示, 构成板形检测辊的一个检测单元。传感器在受带钢施加给检测辊的径向压力的作用下, 铁磁材料的磁导率发生变化, 引起线圈的电感和阻抗变化, 当铁磁材料上同时绕有励磁绕组和测量绕组时, 磁导率变化将导致绕组间耦合系数的变化, 从而使输出电动势发生变化, 通过相应的测量电路, 就可以根据输出量值衡量检测通道所受的径向压力, 进而获得板形值^[10]。

图 1 压力特性曲线

图 2 差动补偿电路

1.2 板形信号差动电路

设差动电路励磁电源的电压峰值为 $U_{1\max}$, 有效值为 $U_1 = U_{1\max} / \sqrt{2}$, 角频率为 ω , 则励磁电压 $\dot{U}_1$ 可表示为 $\dot{U}_1 = U_{1\max} \sin \omega t$ 。设 R_{11} 、 R_{12} 分别表示一次绕组等效电阻, L_{11} 、 L_{12} 分别表示一次绕组等效电感。为了计算方便, 设一次等效电阻 $R_1 = R_{11} + R_{12}$ 、等效电感 $L_1 = L_{11} + L_{12}$, 则一次绕组的励磁电流 $\dot{I}_1$ 可表示为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1} \quad (1)$$

设 L_{21} 、 L_{22} 分别表示二次绕组的等效电感, R_{21} 、 R_{22} 分别表示二次绕组的等效电阻, R_w 为电位器或调零电阻, L_0 为调零线圈。设一次、二次绕组匝数分别为 N_1 、 N_2 , R_{m1} 、 R_{m2} 分别表示为通过一次绕组及两个二次绕组的磁阻。由于一次绕组中励磁电流 $\dot{I}_1$ 的存在, 在一次、二次绕组中分别产生磁通 ϕ_{21} 和 ϕ_{22}

$$\phi_{21} = \frac{N_1 \dot{I}_1}{R_{m1}} \quad \phi_{22} = \frac{N_1 \dot{I}_1}{R_{m2}} \quad (2)$$

则等效变压器的互感系数 M_1 、 M_2 分别为

$$M_1 = \frac{N_2 \phi_{21}}{\dot{I}_1} = \frac{N_2 N_1}{R_{m1}} \quad M_2 = \frac{N_2 \phi_{22}}{\dot{I}_1} = \frac{N_2 N_1}{R_{m2}} \quad (3)$$

二次侧两个等效变压器的感应电动势 $\dot{E}_{21}$ 、 $\dot{E}_{22}$ 分别表示为

$$\dot{E}_1 = -j\omega M_1 \dot{I}_1 \quad \dot{E}_2 = -j\omega M_2 \dot{I}_1 \quad (4)$$

因感应电动势产生的输出电压

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -j\omega(M_1 - M_2) \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1} \quad (5)$$

则有效输出电压

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \quad (6)$$

基于式(6)可知, 如果两个压磁传感器的特性相同, 则认为空载时两个二次绕组所在磁路的磁阻相同, 即 $\phi_{21} = \phi_{22}$, 或认为两个传感器的一次绕组和二次绕组之间的互感系数相等, 即 $M_1 = M_2 = M$ 。

在理想状态下, 当两个传感器不受力或受绝对

相同的力时,输出电压有效值 U_2 理论上应该恒等于零。因此可以理解当两组性能相同的传感器同时受到强磁、强振、高温等外界干扰时,因两者互感系数相等,就可以利用差动电路互相抵消外界干扰对输出电压的影响。

检测辊在理想状态工作时,如果 1 号传感器受力,其互感系数发生变化,表示为 $M_1 = M + \Delta M_1$,导致回路中的感应电流 i_1 随之变化,同时引起 2 号传感器的电压波动,等同于 2 号传感器的互感系数也随之变化,表示为 $M_2 = M + \Delta M_2$ 。此时,瞬间有效输出电压

$$U_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 = \frac{\omega(\Delta M_1 - \Delta M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \quad (7)$$

然而,在实际工作过程中,通常很难做到两个传感器的性能完全一致,即 $M_1 \equiv M_2$ 。假设两个传感器的性能差异引起的互感系数偏差为 ΔM ,则实际有效输出电压应表示为

$$U_2 = \frac{\omega(\Delta M_1 - \Delta M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 + \frac{\omega \Delta M}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \quad (8)$$

设实际工作时产生的有效电压偏差

$$\Delta U_2 = \frac{\omega \Delta M}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \quad (9)$$

设传感器理想励磁转换系数 K_0 和励磁偏差转换系数 ΔK_0 分别为

$$K_0 = \frac{\omega(\Delta M_1 - \Delta M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad \Delta K_0 = \frac{\omega \Delta M}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (10)$$

式中, K_0 表示一对传感器理想状况下的一次侧和二次侧之间的励磁转换关系, ΔK_0 表示因传感器性能差异及其外来因素引起的励磁转换关系,可表示为

$$\Delta K_0 = \Delta K_v + \Delta K_t + \Delta K_g + \Delta K_f + \Delta K_r + \Delta K_z + \Delta K_c \quad (11)$$

式中, $\Delta K_v, \Delta K_t, \Delta K_g, \Delta K_f, \Delta K_r, \Delta K_z, \Delta K_c$ 分别表示差动电路残余电压、温差、挠度、预压力偏差、离心力偏差、振动偏差和磁场偏差引起的励磁电压偏差转换系数。参考式(7)~(11),则式(7)又可表示为

$$U_2 = K_0 U_1 + \Delta U_2 = (K_0 + \Delta K_0) U_1 = K_m U_1 \quad (12)$$

式中, K_m 表示传感器的综合励磁转换系数。

1.3 周期极值信号

板形检测辊在 1 个旋转周期内,1、2 号传感器依次受力,除因传感器特性不同或受力略有差别外,幅值几乎相等,仅相位相差 π 。检测辊原始信号经调制放大后,利用相敏检波电路解调信号,再通过

低通滤波送入峰值锁存电路,最后将 AD 转换后的数字信号送入数字信号处理(Digital signal processing, DSP)系统,通过相应接口送入工控机,实现板形检测过程^[5]。

通常取一周内 1、2 号传感器分别受力时的峰值 $U_{2\max}^1$ 和 $U_{2\max}^2$ 绝对值的平均值作为检测辊旋转一周内的有效信号,或称之为周期平均值 $\bar{U}$,即

$$\bar{U} = (U_{2\max}^1 + U_{2\max}^2)/2 \quad (13)$$

1.4 零点残存电压

理想状态下,压磁传感器组成的差动电路的空载输出电压应等于零。但是由于压磁传感器受本身磁性材料、加工工艺、励磁电压波动及一组传感器非对称预应力的影响,两个二次绕组的电气参数及几何结构不可能完全对称,磁性材料在磁化时出现非线性(如磁饱和、磁滞)等现象,在零点常常存在一个零点残存值(从零点几 mV 到数十 mV),即在空载状况下,两个传感器的代数之和或输出电压将不等于零^[10]。在工作过程中,传感器受周围环境温度变化的影响,引起线圈及导磁体磁导率的变化,从而使线圈磁场发生变化,产生温度漂移,引起额外的零点漂移。如果零点残电压太大,将使线性度变坏,导致传感器的输出特性在零点附近范围内不灵敏,分辨力低,灵敏度下降,非线性误差增大。

在板形检测电路结构中,利用式(11)或式(12)能够消除绝大多数的噪声干扰,即采用理想差动电路能够有效地抑制零飘。板形检测辊在使用过程中,一旦有迹象表明传感器差动回路的零残电压太大时,就必须进行电路调整和重新标定。

2 在线板形检测误差及异常信号分析

在板形检测过程中,经常发生板形检测信号偏离实际板形状况情况,导致板形控制系统的误操作,甚至将原本平直的带钢误调出板形缺陷来^[15-17]。因此对检测辊原始板形信号的稳定性要求很高,需要对在线板形信号进行准确补偿和实时监控,尤其是在投入闭环过程中,技术要求更加苛刻,不允许出现任何异常信号,以免造成板形信号失真、板形调控参数紊乱甚至带钢断带紧急停机等意外事故。

由于冷轧带钢生产过程极为复杂,干扰因素众多,导致在线板形信号往往包含着板形偏差,不能反映在线带钢的真实板形状况,影响板形控制的效果^[7-9]。干扰因素可分为内因和外因:内因是检测辊板形分辨力、压磁特性、信号传输和通信等;外因是瞬变温差、钢卷卷形、带钢边部覆盖、包角大小、

检测辊挠度及其安装误差等。其中内因可以通过优化设计检测辊结构和信号处理硬件电路系统改善^[10], 外因则需要探索其产生机理, 建立相应的板形检测误差补偿模型^[7-9], 对原始板形信号进行必要的补偿校正, 才能准确反映在线带钢的真实板形状况, 提高板形检测精度和板形控制精度。

因此提高板形检测精度, 需要根据接触式板形检测原理, 探索在线板形补偿机理, 针对不同的板形误差建立相应的补偿模型和预防措施, 才能使检测信号准确地反映在线带钢的实际板形状况。

3 板形检测误差补偿模型

3.1 边部误差补偿模型

在众多影响因素中, 带钢边部覆盖引起的板形误差容易被忽略^[7], 然而经理论分析和工业验证, 带钢边部板形误差对于板形闭环控制过程至关重要。因为在板形检测过程中, 带钢边部很难恰好覆盖一个完整的检测通道, 导致带钢边部的板形值偏小, 不能反映真实的板形状态, 原始板形横向分布曲线表现为随偏移量而变化的高次曲线或不连续曲线。如果不对其进行必要的边部误差修正, 当偏移量发生变化时, 原始板形曲线可能偏离实际板形状况, 导致控制系统不能准确识别在线带钢的实际板形模式, 此时求解出的板形缺陷分量和板形调控量显然不够准确, 严重时导致板形控制的误操作, 将原本平直的在线带钢误调出不同程度的板形缺陷来, 恶化原板形状况。

如图 3 所示, 从操作侧至传动侧依次编号, 操作侧为左, 传动侧为右。设带钢偏移量为 δ_s , 左移为正, 右移为负。辊身长设为 L , 检测辊有效长度 L_v , 检测通道宽度 b_v , 带钢宽度为 B_v , 通道数为 n , 覆盖带钢的有效通道数为 n_v 。

图 3 板形检测通道示意图

带钢覆盖检测辊的起始通道号 i_{vl} 和末尾通道号 i_{vr} 分别为

$$i_{vl} = \left\lceil \frac{L_v - B_v - 2\delta_s}{2b_v} \right\rceil \quad i_{vr} = n - \left\lfloor \frac{L_v - B_v + 2\delta_s}{2b_v} \right\rfloor \quad (14)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil, \lfloor \cdot \rfloor$ 分别表示为上取整和下取整。覆盖带

钢的有效通道数

$$n_v = i_{vr} - i_{vl} + 1 \quad (15)$$

在操作侧, 带钢边部到检测辊辊面端部的距离设为 L_b , 则可求得

$$\delta_s = \frac{L - B_v}{2} - L_b \quad (16)$$

基于上述分析和基本定义, 针对轧制过程中带钢边部不完全覆盖检测通道造成的板形信号误差, 建立了比例补偿法和斜率补偿法两种补偿模型^[10]。在实际应用过程中, 根据带钢的横向偏移量, 利用式(14)~(16), 自动计算起始通道和有效通道数, 并根据带钢的边部覆盖率, 自动选择合适的误差补偿方法。

为了防止信号出现突变, 影响板形信号的稳定性, 根据偏移量自动计算覆盖率和补偿量。考虑现场复杂因素, 当带钢边部覆盖率低于完整检测通道宽度的 40% 时, 采用斜率补偿法; 当不低于 40% 时, 采用比例补偿法。在实际应用过程中, 可以结合带宽、材质、板形状态等参数, 适当调整切换补偿方法的板形覆盖率临界值, 以获得最佳的板形补偿状态为准。当某个检测通道的板形值低于两侧相邻通道的 50% 时, 认为该通道信号失效, 自动进入在线补偿模式。

3.2 检测辊挠度对原始波形的影响

在影响板形检测信号精度的众多因素中, 检测辊挠度变化是必须考虑的重要影响因素之一^[9]。在板形检测辊的离线标定过程中, 发现板形检测辊各检测通道的原始波形曲线或大或小始终存在不可消除的近似正弦波的零点偏差。初步分析是因为板形检测辊的挠曲变形导致检测辊内部检测单元(传感器组成的差动回路)的预应力或电压值随之发生变化引起的零点偏差。各通道的原始波形曲线表现为不可消除且不同程度的近似正弦波零点偏差。尽管与实际板形信号(径向压力)相比, 其幅值很小, 但在某种程度上影响板形检测辊的标定精度。

板形检测辊在工作过程中, 在一个周期 T 内, 载波信号 U_2 叠加上挠度产生的误差信号 U_4 后, 经相敏检波等信号处理后, 便出现了图 4 所示叠加信号 U_g 的波形规律。

板形检测辊在工作过程中, 主要受三种力的影响, 即带钢施加的径向压力、检测辊自身重力及其旋转时的离心力^[9]。当检测辊做好动平衡时, 利用差动特性, 可实时消除离心力对原始信号的影响。

图4 波形误差信号示意图

为了消除检测辊自重造成的离线零点误差信号,考虑在输出信号中减去人为设定的虚拟正弦信号,以获得稳定可靠的载波信号,使其仅传递调制波形信号(径向压力值或有效板形值)。观察检测辊波形曲线,其波形接近正弦波,因此考虑虚拟一条正弦波进行零点误差补偿。设实时采集的原始波形曲线为 $A(t)$, 设定的补偿正弦曲线

$$A_f(t) = A_{f\max} \sin(\omega t + \varphi_f) \quad (17)$$

式中, φ_f 为原始波形的基本相位, $A_{f\max}$ 为补偿正弦波的最大幅值,其与检测辊自重 G 、径向压力 F 和传感器预压力 F_0 等因素直接相关,回归关系式如下

$$A_{f\max} = \zeta(G + F + F_0) \quad (18)$$

式中, ζ 为综合补偿系数。补偿后的有效波形为

$$A'(t) = A(t) - A_f(t) \quad (19)$$

利用式(19),可实现检测辊稳态下的理想波形补偿。但是该方法在加减速或张力不规律波动等动态情况下,有一定的滞后性,导致补偿量不能及时作用,从而容易产生多余的板形偏差,反而更容易影响板形检测精度,因此该方法一般仅用于检测辊的离线标定过程。

3.3 安装精度对原始波形的影响

在影响板形检测精度的众多因素中^[7],检测辊安装精度对板形检测信号的影响较大,尤其对单边浪的影响明显,严重时影响轧制过程的稳定性。

然而在传统板形信号补偿模型中^[7-12],几乎没有从整体上综合考虑安装精度对板形的影响。工业现场每次安装板形检测辊时,受板形检测辊及其轴承座定位精度的影响,板形检测辊与前后导向辊必然存在一定的平行度误差和水平度误差,且每次平行度和水平度都会发生轻微的变化,故安装精度对带钢板形的影响每次也不一致,或大或小。这两种安装误差导致带钢沿板宽方向产生额外的残余应力

偏差,即引起多余的板形误差,当误差较大时,对板形检测信号的影响也较大,严重时导致信号失真。

检测辊安装误差补偿需要结合轧机设备特点和工艺参数,制定适合自身特点的检测辊允许安装误差,才能最大限度地提高板形检测精度^[10]。检测辊安装误差造成的张应力偏差与板形检测辊的安装位置有关,即与检测辊前导向辊和后导向辊的定位尺寸有关,因此需要针对不同的轧机结构参数计算张应力偏差。同时,需要根据实际操作经验制定严格的允许安装误差,才能保证板形检测精度。

4 实例验证

以1050板形仪为例,辊身长度为1050 mm,19路通道,单通道宽度为50 mm,有效检测宽度为950 mm。

图5示出了电路处理前后的零点残存电压对比,零点残存电压值从200~500 mV降低到了10 mV以下,显著提高原始板形信号的稳定性和信噪比。图6示出了综合补偿前后的零点位置AD值对比,AD值从补偿前400~1000降低到50以内,相应径向压力零点值偏差从100~150 N控制到补偿后的10 N以内。表明采用合理补偿后,板形检测辊的零点误差控制极好,显著提高了板形标定精度和检测精度。

图5 补偿前后零点残存电压对比

图6 补偿前后零点AD值对比

图 7 和图 8 为当带钢偏移量 δ_s 分别等于 0 mm、25 mm 时的原始曲线和补偿曲线。从图 7、8 中可以看出, 当一定宽度的带钢对中较好时, 即 $\delta_s = 0$ mm 时, 带钢两侧边部不能完整地覆盖板形检测辊的通道, 导致两侧的板形信号幅值显著低于其他通道, 随着偏移量的增加, 带钢两侧渐渐恰好近似覆盖完整的检测通道, 如 $\delta_s = 25$ mm 时, 此时板形信号近似反映真实的带钢板形状况。从图 7、8 中边部补偿的效果看, 比例补偿法和斜率补偿法的结果比较接近, 比例补偿法因利用了边部的真实信号, 理论上更真实和准确一些, 而斜率补偿法因抛弃了边部板形值, 由相邻两个通道的检测值差分所得, 曲线虽光滑, 但不能准确反映真实带钢边部板形状况。实际应用时, 如果能准确获得带钢边部的精确位置或偏移量, 尽量采用比例补偿法。

图 7 偏移量 $\delta_s = 0.25$ mm 的边浪情况

图 8 偏移量 $\delta_s = 0.25$ mm 的高次浪情况

图 9 水平倾斜量对板形的影响规律

图 10 垂直倾斜量对板形的影响规律

图 9 和图 10 为水平倾斜量和垂直倾斜量对板形的影响规律曲线。随着水平倾斜量的增加, 板形偏差急剧增加。随着垂直倾斜量的增加, 板形偏差缓慢增加。对于该轧机结构特点, 其水平倾斜量对板形曲线的影响较大, 因此在安装过程中应严格控制水平倾斜量。

对于图 11 所示的典型板形情况, 根据板形检测辊安装误差的正负定义, 当检测辊倾斜量为正值时, 安装误差将导致左单边浪幅值降低, 即当实际板形已经恶劣时, 而补偿前的板形曲线却显示较平直;

同理可以知道,如果是右单边浪,则将加大板形幅值,即当实际板形良好时,而板形曲线显示却有浪形;同理,可获得双边浪、中浪及高次浪的板形补偿前后效果。

图 11 补偿前后的板形曲线

因此,对原始板形检测信号进行检测辊安装误差补偿后,板形曲线才能更准确地反映实际板形状况。补偿后的板形曲线在很大程度上提高了板形检测精度,一定程度上可减少板形控制过程中的误判断和误操作,有利于提高在线带钢板形控制的命中率。

为了进一步提高板形控制效果,在对原始板形信号进行必要的物理机制补偿和工艺误差补偿后,利用四次或六次的最小二乘法拟合原始板形曲线,对其进行平滑处理,然后再利用标准曲线和勒让德最小二乘法对其进行模式识别,获得 1、2、3、4 次板形缺陷分量,如图 12 所示。根据各次板形分量,利用板形控制模型和各类板形调控手段(倾辊、弯辊、横移、分段冷却、辊型等),进行板形缺陷的精细调控操作,提高整卷带钢的板形质量。

为防止异常信号干扰,测试模型稳定性,如图 13 所示,人为调整第 2、第 6、第 18 通道为单通道异常信号,人为调整第 9、第 10 通道为连续双通道异常信号。依据失效通道判别准则和在线补偿模型,

对其自动识别和补偿,补偿后的板形状况几乎不受失效通道的影响,说明该补偿模型是可靠实用的。

图 12 板形模式分解

图 13 失效通道补偿效果

5 结论

(1) 基于板形检测原理和压磁传感器特性,详细推导了原始板形信号的产生机理,建立了冷轧带钢原始板形信号零点误差补偿模型。利用该模型,显著提高了原始板形信号的信噪比,零点残存电压值从 200~500 mV 降低到了 10 mV 以下,AD 零点值从补偿前的 400~1 000 控制到综合补偿后的 50 以内,相应的径向压力零点值偏差从 100~150 N 控制到补偿后的 10 N 以内。

(2) 针对工业实际,建立带钢两侧边部覆盖检测通道号的自动识别和在线误差补偿模型、检测辊挠度误差补偿模型和安装误差补偿模型等工艺误差补偿模型,并对板形信号进行必要的平滑处理,使其更准确地识别板形缺陷的各次板形分量,为板形闭环控制提供更可靠的在线板形数据。

(3) 考虑工业轧机的稳定性要求,建立了失效通道误差补偿。利用失效通道误差补偿模型,自动实现失效通道的自动识别和应急补偿,防止冷轧带钢过程中出现严重的现场板形调控事故,提高板形

检测和板形控制的稳定性。

参 考 文 献

- [1] YU Bingqiang, SUN Yabo, LIU Hongmin, et al. Compensation model for shape measuring of cold strip rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2010, 17(6): 21-26.
- [2] MANETTI M, MORANDINI M, MANTEGAZZA P. High precision massive shape control of magnetically levitated adaptive mirrors[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(12): 1386-1398.
- [3] 戴杰涛, 张清东. 冷轧薄板中浪板形缺陷的屈曲及后屈曲理论与轧制试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 44-50.
- DAI Jietao, ZHANG Qingdong. Analysis and experiment on central buckling and post buckling of thin cold-rolled sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 44-50.
- [4] 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[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 77-81.
- YAN Qintai, ZHANG Jie, JIA Shenghui, et al. Research on analyzing the flatness adjusting capacity for cold mill and its application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 77-81.
- [5] 刘宏民, 于丙强, 杨利坡, 等. 整辊镶块智能型冷轧带钢板形仪的研制与工业应用[J]. 钢铁, 2011, 46(12): 86-89.
- LIU Hongmin, YU Bingqiang, YANG Lipo, et al. Research on the entire roller inlayed block intelligence cold strip shape meter and its industrial application[J]. Iron and Steel, 2011, 46(12): 86-89.
- [6] YANG Lipo, YU Bingqiang, DING Dong, et al. Industrial shape detecting system of cold rolling strip[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(4): 994-1001.
- [7] 杨利坡, 于丙强, 孙亚波, 等. 冷轧带钢在线板形信号补偿技术及工业应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 56-61.
- YANG Lipo, YU Bingqiang, SUN Yabo, et al. Online shape signal compensation technology of cold rolling strip and its industry application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 56-61.
- [8] YANG Lipo, YU Bingqiang, YU Huaxin. Online shape dynamic wrapping angle compensation model of cold strip[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011, 18(7): 28-32.
- [9] 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 Rongmin, YANG Lipo, YU Bingqiang, et al. Deflection change effect of shape detecting roll on original waveform signal of cold rolling strip[J]. Iron and Steel, 2013, 48(5): 41-45.
- [10] 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 Lipo, YU Bingqiang, FU Qiang. Original waveform signal zero error compensation method of cold rolling strip[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 927-934.
- [11] 郝亮, 邸洪双, 龚殿尧, 等. 带钢冷轧闭环反馈控制最优优化算法程序开发[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 39-43.
- HAO Liang, DI Hongshuang, GONG Dianyao, et al. Development of optimization algorithm for closed-loop feedback control in cold strip rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 39-43.
- [12] 白振华, 韩林芳, 李经洲, 等. 四辊轧机非常态轧制时板形模型的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 77-82.
- BAI Zhenhua, HAN Linfang, LI Jingzhou, et al. Research of the plate-shaped model of four-roll mill when rolling under asymmetric state[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 77-82.
- [13] PIN G, FRANCESCONI V, CUZZOLA F A, et al. Adaptive task-space metal strip-flatness control in cold multi-roll mill stands[J]. Journal of Process Control, 2013, 23(2): 108-119.
- [14] SUN Jianliang, PENG Yan, LIU Hongmin. Coupled dynamic modeling of rolls model and metal model for four high mill based on strip crown control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 144-150.
- [15] 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 Pengfei, ZHANG Dianhua, LIU Jiawei, 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.
- [16] WANG Junsheng, JIANG Zhengyi. A flying gauge

change model in tandem cold strip mill[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204: 152-161.

- [17] 刘宏民, 丁开荣, 李兴东, 等. 板形标准曲线的理论计算方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 137-142.

LIU Hongmin, DING Kairong, LI Xingdong, et al. Theoretical computational method of shape standard curve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 137-142.

作者简介: 杨利坡, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为冷轧带钢板形检测和板形控制。

E-mail: yanglp@ysu.edu.cn

于丙强, 男, 1963 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为板形测量系统研制。

E-mail: ybingq@ysu.edu.cn

第 3 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

铝合金/APC-2 奈米复材积层板之高温机械与疲劳性能之探讨

作者: 宋宜骏

毕业学校: 中国台湾中山大学

指导教师: 任明华

本文主旨在于研制铝合金/碳纤维/聚醚醚酮三明治结构创新奈米复合材料积层板, 及深入探讨其奈米复材积层板在室温及高温环境之力学性能、钻孔力学性能、疲劳曲线及疲劳极限, 并观察其破坏机制将结果分析、讨论并提出结论。

首先, 为了克服未经表面处理之铝合金在复合材料制程上常见之脱层问题, 本文在材料前处理上采用二种常见之铝合金表面处理法, 分别为铬酸化学蚀刻法及铬酸阳极处理法, 二种方法经由一系列之试验与结果数据验证, 发现铬酸阳极法拥有更好的抗脱层表现, 且在力学性能试验结果中也优于铬酸化学蚀刻法。

制程方面, 碳纤维/聚醚醚酮奈米复合材料积层板则采用二种迭序, 分别为十字迭与类似均向迭, 再与经由表面处理后的 2024-T3 铝合金薄板热压成型, 制成铝合金/碳纤维/聚醚醚酮三明治结构创新奈米复材积层板, 其奈米复材积层板经由 ASTM D3039 规范切割成试片, 并采 MTS-810 万能材料试验机获得其机械与疲劳性能。

在力学性能上, 经由试验获得不同迭层在室温及高温下之应力-应变曲线, 将其结果分析并得出预测模型, 其预测应力-应变曲线与试验结果一致, 特别在转折点之预测也相当准确。在钻孔试片上, 本文将改良型 PSC 预测模型延伸成高温改良型预测模型, 并用此延伸模型预测室温与高温下之钻孔残留强度, 其预测结果再与试验结果比对下相当准确。

疲劳性能方面, 经由试验获得不同迭层在室温及高温下之应力-疲劳周期曲线与疲劳极限, 分析并验证试验结果, 其预测疲劳曲线与试验结果吻合。