

DOI: 10.3901/JME.2011.12.056

冷轧带钢在线板形信号补偿技术及工业应用*

杨利坡^{1,2} 于丙强^{1,2} 孙亚波^{1,2} 王军生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. 鞍钢股份有限公司 鞍山 114001)

摘要: 综合考虑冷带钢轧机现场实际工况条件, 根据板形仪在线板形检测原理、受力条件和几何关系, 研究带钢横向温差、带钢卷形、边部覆盖, 检测辊包角、挠度、安装几何误差和磨损量等因素对在线板形检测精度的影响, 与生产实际相结合, 建立一套满足工业应用的在线板形信号综合补偿模型。依托该模型开发的在线板形信号综合补偿技术, 成功应用于鞍钢 1 250 mm 六辊冷带钢轧机上, 使板形仪在线检测板形信号准确反映冷轧带钢真实板形状况, 兼顾后续深加工工艺要求, 根据不同轧制条件和产品规格制定动态板形标准曲线, 为板形闭环控制提供可靠板形数据, 显著提高冷轧带钢产品的板形指标和质量稳定性。总张力计算值与实测值误差在 3% 以内, 板形闭环控制投入后, 稳态时板形指标在 6 I 以内。

关键词: 冷轧带钢 信号补偿 板形仪 目标曲线 闭环控制

中图分类号: TP211

Online Shape Signal Compensation Technology of Cold Rolling Strip and Its Industry Application

YANG Lipo^{1,2} YU Bingqiang^{1,2} SUN Yabo^{1,2} WANG Junsheng³

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

Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. Anshan Iron and Steel Co., Ltd., Anshan 114001)

Abstract: Actual working conditions of cold rolling mill are comprehensively considered, and according to the online shape detecting principle, the stress analysis and the geometric relation of the shape meter, influence factors of online shape detecting accuracy such as the transverse temperature difference of strip, the crown of coil, the cover area of strip, the wrapping angle, the flexibility and the installation geometry errors of the detection roll are researched. Combined with the actual production, a set of online shape signal comprehensive compensation models are established to meet the requirements of industrial applications. And the online shape signal comprehensive compensation technology is successfully applied in Angang 1 250 mm 6-high cold strip mill. It ensures that the online detecting shape signal can accurately reflect the true shape status of cold rolling strip. With due consideration to the follow-up processing technology requirements, dynamic flatness standard curves are formulated according to different rolling conditions and product specifications, and reliable shape data are provided for close-loop shape control. Then the shape index and the quality stability of cold rolling strip are improved significantly, the errors between the calculated values and measured values of the total tension are less than 3%, and the shape index in steady state is within 6 I after the input of close-loop shape control.

Key words: Cold rolling strip Signal compensation Shape meter Target curve Close-loop shape control

0 前言

冷带钢是性能优异的高级冷轧板带产品, 尺寸

精确, 表面质量优越, 具有良好的力学性能和工艺性能(高强度、低屈服强度、良好深冲性能), 广泛应用于装饰板、建筑板、家电板和汽车板等工业领域。随着冷轧技术和生产效率的提高, 冷轧带钢向着更薄更宽方向发展(厚 0.08~3.00 mm, 宽 100~2 000 mm), 宽厚比达到了 10 000 以上。这对冷轧带

* 河北省自然科学基金钢铁联合研究基金资助项目(E2011203004)。20100811 收到初稿, 20110307 收到修改稿

钢的板形(平直度)控制提出了更高的技术要求^[1-5]。

生产过程中, 冷轧带钢在较大的前后张力作用下, 带钢不良板形被隐藏, 仅凭人工经验难以定量控制不良板形, 易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, 带钢潜在不良板形释放, 表现出多种多样的表现板形缺陷(边浪、中浪或复合浪等)。因此提高冷轧带钢板形质量的关键在于准确在线检测真实带钢板形状况。

板形仪是实现板形在线检测的“眼睛”, 是实现冷轧带钢板形闭环控制, 进而提高产品板形质量、生产高级精品冷轧带钢的前提、关键和核心^[6-12]。燕山大学刘宏民教授等^[13-18]针对板形检测辊的结构形式、板形信号集流传输方式、板形信号处理方式, 进行了深入的理论分析和关键技术研发, 提出了整辊镶块智能型板形仪, 实现了我国冷轧带钢板形仪的自主创新和国产化。

由于冷轧带钢生产过程极为复杂, 干扰在线板形信号的因素众多, 导致在线检测板形信号往往包含多种因素引起的复合板形偏差, 因此不能准确反映真实板形状况, 影响冷轧带钢的实际板形控制效果。总体上, 影响板形仪在线板形检测精度的干扰因素可分为内因和外因: 内因是板形检测辊的板形分辨力、板形信号处理系统检测精度等; 外因是带钢温差、钢卷卷形凸度、带钢边部覆盖、检测辊包角大小、检测辊挠度、磨损量及几何安装误差等。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^[13-14]; 外因需要通过探索其产生机理, 建立对应的板形信号误差补偿模型, 对在线检测到的原始板形信号进行综合补偿校正, 才能准确反映带钢真实板形状况, 提高板形仪的检测精度。在此基础上, 根据不同工艺特点, 制定动态板形标准曲线, 对冷轧带钢在线板形信号进行准确识别和计算板形控制调整量, 结合弯辊、倾辊、轧辊横移及分段冷却等板形调控手段, 最终实现板形闭环控制。

本文重点分析外因对板形检测精度的影响, 结合冷轧现场实际工况条件, 根据整辊式板形仪^[13-14]在线板形检测原理、受力条件和几何条件, 建立冷轧带钢在线板形综合补偿模型。该技术成功应用于鞍钢 1 250 mm 六辊 HC 可逆冷带钢轧机上, 实现了典型规格带钢及 0.18 mm 超薄带钢的板形闭环控制, 闭环控制精度达到 6 I, 取得了良好的工业应用效果。这对于提高板形仪在线板形检测精度、冷带钢轧机板形控制水平和带钢产品附加值, 优化冷轧带钢工艺制度和生产策略, 满足生产高端精品带钢的技术要求和生产要求, 提高下游产品的深加工精

度, 具有重要的理论意义和工程实用价值。

1 板形检测机理

当带钢包紧在检测辊上时, 检测辊受到与带钢张力成正比的径向压力, 沿检测辊横向分布的检测通道(压磁传感器)实时检测每个通道的径向压力大小, 如图 1 所示, 将各通道径向压力换算为张应力或残余应力, 即可得到带钢板形分布状况^[2]。

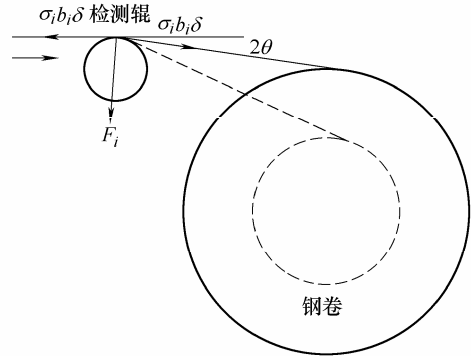


图 1 检测辊安装位置和受力示意图

假设沿检测辊横向划分 n 个通道, 带钢绕过检测辊的包角为 2θ , 第 i 通道的宽度为 b_i , 覆盖第 i 通道的带钢厚度为 δ_i 。根据力学关系和几何关系可知, 当板形仪检测出第 i 通道径向压力 F_i 后, 可得到实测张应力

$$\sigma'_i = \frac{F_i}{2b_i\delta_i \sin\theta} \quad (1)$$

设带钢板宽为 b , 平均厚度为 δ , 由张力计实测总张力为 F_z , 则带钢平均张应力 $\bar{\sigma}$ 可近似为

$$\bar{\sigma} = \frac{F_z}{b\delta} \quad (2)$$

为了快速计算和显示带钢板形, 假设带钢板宽 $b = nb_i$, $\delta_i \approx \delta$, $i = 0, 1, \dots, n$, 由式(1)可求得张应力横向分布表达式

$$\sigma_i = \bar{\sigma} \frac{\sigma'_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i} = \bar{\sigma} \frac{\frac{F_i}{2b_i\delta_i \sin\theta}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{2b_i\delta_i \sin\theta}} = \bar{\sigma} \frac{F_i}{\bar{F}} \quad (3)$$

式中, \bar{F} 表示各通道径向压力平均值。由式(2)和式(3), 可得残余应力(应力偏差)

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \bar{\sigma} = \frac{F_z}{b\delta} \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \quad (4)$$

同时, 由式(1)求得作用在板形检测辊上的总张力计算值

$$F'_z = \sum_{i=1}^n \sigma'_i \times b_i \times \delta_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

2 在线板形影响因素及补偿模型

2.1 带钢横向温差补偿模型

如果不考虑带钢横向温差,板形检测良好的带钢,冷却均温后,带钢横向热应力差将会使带钢出现双边浪^[15]。利用手持接触式数显温度仪测量带钢表面横向温度,对测量结果进行多项式拟合,得到带钢横向温度分布

$$T(y) = a_0 + a_2 \left(\frac{2y}{b} \right)^2 + a_4 \left(\frac{2y}{b} \right)^4 \quad (6)$$

式中, a_0 、 a_2 、 a_4 为拟合系数, y 和 b 为横向坐标和宽度。

根据式(5)计算带钢横向温差补偿量

$$\sigma_i(y_i) = \alpha_i \frac{E}{1-\nu^2} [\bar{T} - T(y_i)] \quad (7)$$

式中, \bar{T} 、 α_i 为带钢横向温度平均值和线膨胀系数, E 为弹性模量, ν 为泊松比。

2.2 带钢边部覆盖区补偿模型

一般情况下,带钢宽度往往不是检测辊通道宽度的整数倍,带钢边部只能覆盖到检测辊某通道的一部分,如图 2 所示。

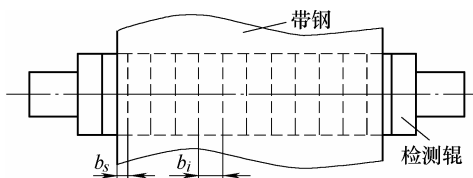


图 2 检测辊通道覆盖情况示意图

此处若用通道整个宽度计算张应力,则该通道的实测张应力就会小于真实张应力,故须对边部覆盖的通道检测结果给予补偿^[15],如第 i 通道的张应力表示为

$$\sigma_b(y_i) = \begin{cases} \frac{F_{zi}}{b_i \delta_i} & \text{带钢完全覆盖区} \\ \frac{F_{zi}}{b_s \delta_i} & \text{带钢两边不完全覆盖} \end{cases} \quad (8)$$

式中, F_{zi} 、 b_i 、 δ_i 分别表示为第 i 通道张力、宽度和厚度, b_s 为带钢边部实际覆盖的通道宽度。

2.3 检测辊挠度和带钢卷形补偿模型

轧制过程中,检测辊受到带钢施加的径向压力后,产生弯曲变形,如图 3 所示,检测辊弯曲变形造成带钢横向松紧程度发生变化;另外当轧后带钢带有凸度时,卷取后形成带卷凸度,如图 4 所示,

带卷外半径沿横向不等,导致带钢松紧程度发生变化。这两种情况都会导致带钢产生附加张应力^[15],影响板形检测精度。

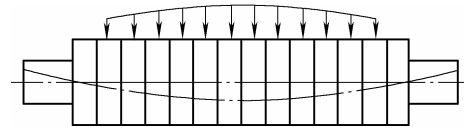


图 3 检测辊受力变形模型

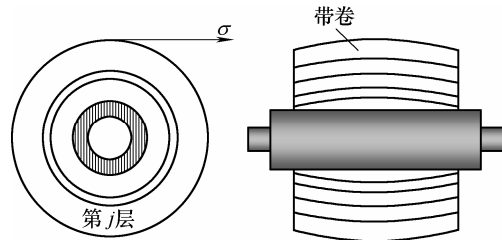


图 4 带钢卷形示意图

此时板形仪检测出的径向压力分布并不是由真实板形的前张力直接转化而来的,故应对板形检测在线数据给予补偿。根据几何条件和受力分析^[15],卷取第 j 层时,检测辊弹性变形和带钢卷形补偿量,即在检测数据中减掉张应力

$$\sigma_{fj}(y_i) = \frac{E}{1-\nu^2} \Delta \varepsilon_{i,j} \quad i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中, $\Delta \varepsilon_{i,j}$ 为检测辊弹性变形和带钢卷形对带钢拉伸应变造成的影响

冷轧带钢在卷取过程中,每卷取一层,带卷外半径沿横向将重新分布,此时带钢卷取张应力横向分布也随之发生微小变化,直到卷取完成。因此检测辊弹性变形和带钢卷形补偿量 $\sigma_{fj}(y)$ 随卷取层数 j 动态变化。

2.4 检测辊包角补偿模型

如图 1 所示,在轧制过程中,当包角不同时,带钢对检测辊施加的径向压力也不同。因此需要建立包角补偿模型,用于在线计算不同包角条件下径向压力与张力之间的关系。当包角小于临界包角时,径向压力随包角变化而变化;当包角大于临界包角时,径向压力与包角无关。

由于检测辊内部传感器受力状况复杂,包角补偿理论推导极为困难。传统理论公式计算的包角补偿量存在严重误差,无法满足工业要求。根据大量试验数据回归包角补偿式,综合考虑带钢跑偏、振动、温度、速度波动、板形不良等复杂工况条件的影响,可回归出包角补偿系数

$$\xi = \begin{cases} c_2 \theta^2 + c_1 \theta + c_0 & \theta < 18^\circ \\ 1 & \theta \geq 18^\circ \end{cases} \quad (10)$$

式中, c_0 、 c_1 、 c_2 为回归系数,则式(1)转换为

$$\sigma'_i = \frac{F_i}{2b_i \delta_i \xi \sin \theta}$$

2.5 检测辊安装误差和磨损量补偿模型

检测辊工作过程中, 当检测辊出现几何倾斜(垂直或水平)和表面磨损情况时, 经过检测辊的带钢沿横向总长度将发生变化, 从而引起张应力的变化, 使得板形测量值出现偏差。在大量现场试验与理论研究基础上^[11], 建立检测辊几何安装误差和磨损量综合补偿方案, 对于提高板形检测精度很有必要。检测辊几何安装误差和磨损量的综合补偿量

$$\sigma_z(y_i) = \Delta\sigma_h(y_i) + \Delta\sigma_s(y_i) + \Delta\sigma_m(y_i) \quad (11)$$

式中, $\Delta\sigma_h$ 、 $\Delta\sigma_s$ 、 $\Delta\sigma_m$ 为分别带钢因垂直度、水平度和检测辊表面磨损引起的张应力偏差。

3 在线板形目标曲线

3.1 板形控制动态目标曲线

在线板形目标曲线的设定以轧后带材失稳判别模型为依据, 充分考虑来料带材凸度及后续工序对带钢板形的要求, 在满足判别因子 $\xi > 1$ 的情况下, 前几个道次尽量减小带钢凸度^[2, 17]。在线板形目标曲线的一般形式为

$$\sigma(y_i) = \frac{A_b}{y_{os}^2} y_i^2 - \bar{\sigma} \quad (12)$$

式中, A_b 表示为基本板形目标曲线幅值, 其符号与来料带钢形貌有关; y_i 表示为以带钢横向中心为坐标原点的各个测量段的坐标, 带符号, 操作侧为负, 传动侧为正; y_{os} 表示为操作侧带钢边部有效测量点的坐标。

3.2 在线板形综合补偿量

从板形仪检测值中减掉板形上述补偿量, 就可以消除带钢横向温差、检测辊挠度、带钢卷形等因素对板形检测值的影响, 得到真实带钢板形。综合补偿后的张应力

$$\sigma_T(y_i) = \sigma_b(y_i) - \sigma_t(y_i) - \sigma_{fij}(y_i) - \sigma_z(y_i) \quad (13)$$

当板形平直时, 综合补偿量主要是横向温差补偿量和几何安装误差补偿量, 检测辊挠度补偿量、带钢卷形补偿量和磨损补偿量相对很小, 可忽略不计。板形为中间浪和双边浪时, 在卷取前 50 层, 综合补偿量变化较大, 中浪时综合补偿量逐渐变小, 边浪时综合补偿量逐渐变大, 之后随卷取层数的增加, 综合补偿量趋于稳定^[15]。

板形控制时, 残余应力 $\Delta\sigma(y_i)$ 可表示为张应力 σ_T 与其横向平均值 $\bar{\sigma}$ 的偏差值

$$\Delta\sigma(y_i) = \sigma_T(y_i) - \bar{\sigma} \quad (14)$$

利用弹性模量 E 和泊松比 ν , 将带钢残余应力转换为伸长率分布, 即实测板形 S 表示为

$$-\frac{(1-\nu^2)\Delta\sigma(y_i)}{E} \times 10^5 = \frac{\Delta l(y_i)}{l} \times 10^5 = S(y_i) \quad (15)$$

式中, S 单位为 I。在线实测板形 $S(y)$ 减去目标板形 $S_a(y)$ 得到板形偏差

$$\Delta S(y_i) = S(y_i) - S_a(y_i) \quad (16)$$

实际控制时, 板形仪在线检测的板形信号通常表现为复杂高次曲线, 需要合理制定板形控制策略。根据目标板形曲线, 综合利用多种板形调控手段在线自动调整板形偏差, 轧制高质量冷轧带钢产品。

3.3 板形控制工艺要求

目标板形曲线是板形控制的目标, 随设备条件(轧机刚度、轧辊材质、尺寸)、轧制工艺条件(轧制速度、轧制压力、工艺润滑)及产品情况(尺寸、材质)的变化而不同。生产过程中, 通过倾辊、弯辊、轧辊横移、分段冷却等板形调控手段, 使在线带钢板形最大程度逼近目标板形曲线, 尽可能消除两者差值^[2, 10-13]。

目标板形曲线是由补偿板形曲线叠加到基本板形曲线上形成。基本板形曲线以带钢不发生屈曲失稳为条件, 保证在对板凸度控制的同时, 不产生轧后瓢曲现象; 补偿板形曲线旨在消除带钢横向温差、带钢卷形轮廓形状、带钢边部覆盖区、检测辊挠曲变形、检测辊几何安装误差等因素对测量板形信号的影响, 以满足后续加工工序的严格技术要求, 保证最终产品板形良好和质量稳定^[2, 17]。

在鞍钢 1 250 mm 单机架六辊可逆冷轧机的板形控制系统中, 根据轧制工艺及后续工序对带钢板形的技术要求, 制定合理的动态板形目标控制方案: 在给定来料板凸度的前提下, 前三个道次以轧后带材不失稳为限制条件, 即以保证轧后带钢不发生翘曲为前提条件, 尽量减小板凸度; 后两个道次集中控制板形, 利用倾辊、弯辊、轧辊横移等常规调控手段, 在线实时调节典型板形偏差, 提高单卷带钢的板形质量, 使成品带钢尽可能具有较好的板形; 利用分段冷却, 精细调节成批钢卷存在的常规板形调控手段难以调整的剩余板形偏差, 提高成批钢卷的整体板形质量。

4 工业应用效果

鞍钢 1 250 mm 六辊冷带钢轧机板形控制手段齐全。图 5 示出了典型成品第 5 道次总张力计算值与张力计实测值对比效果, 误差在 3% 以内, 其中带钢宽度 1 090 mm, 成品厚度 0.6 mm, 压下率

33.3%，钢种 ST12。

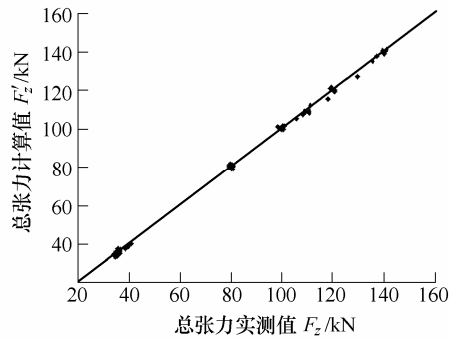


图 5 总张力计算值与实测值对比

图 6 示出了带钢板形控制效果。从图 6 中可见，板形闭环控制投入前，只有预设开环控制在起作用，板形偏差较大(15~20 I)，且有较大起伏。板形闭环控制投入后，板形偏差得到了很好的控制，具有较高的板形控制精度(小于 6I)。

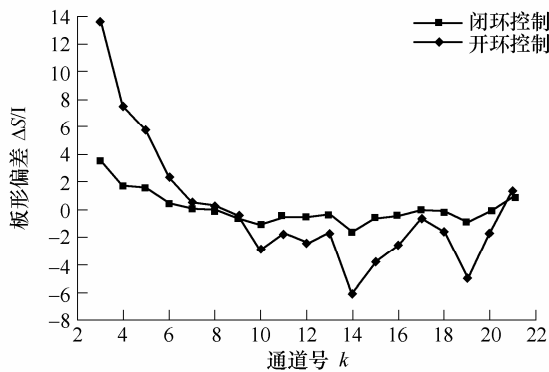


图 6 带钢宽度方向板形值

板形闭环投入后，带钢在全长数据范围内的板形控制效果良好。在起车阶段，轧机处于不稳定状态，闭环未投入，需要人工手动调节板形，板形有较大浮动，板形最大值为 11.47 I；轧机稳定运行后(如轧速大于 70 m/min 后)，闭环控制投入，实现自动控制，板形最小值为 1.140 I，板形平均值为 2.672 I。沿带钢长度方向的板形值稳定控制在 6 I 以内，板形正态分布在 1.14~4.26 I 范围内的占 62.86%，在 1.14~5.85 I 范围内的占 95.44%，在 1.14~7.44 I 范围内的占 99.73%。

5 结论

(1) 受带钢横向温差、卷形、边部覆盖，检测辊包角、挠度、几何安装误差和磨损量等因素的综合影响，在线检测板形信号与实际带钢板形往往会较大误差。因此需要结合冷轧带钢生产工艺，根据板形检测机理和实际工况，建立有效的在线板

形综合补偿模型，使冷轧带钢在线检测板形信号准确反映冷轧带钢的实际板形状况，达到冷轧带钢精确板形闭环控制的目的。

(2) 该技术成功应用于鞍钢 1 250 mm 六辊冷轧机上，显著提高了板形仪的在线板形检测精度，使在线板形检测信号准确反映真实的带钢板形状况，总张力计算值与张力计实测值误差在 3% 以内，板形闭环控制投入后，稳态时板形指标在 6 I 以内，满足高端精品带钢产品的生产技术要求。

(3) 该技术对于提高冷轧带钢在线板形检测精度、冷轧机板形控制水平和冷轧带钢产品附加值，优化冷轧带钢工艺制度和制定企业生产策略，满足生产高端精品冷轧带钢的技术要求和生产要求，提高下游产品的深加工精度，具有重要的理论意义和工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] 徐乐江. 板带冷轧机板形控制与机型选择[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
XU Lejiang. Shape control and mill type selection of cold mill strip [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [2] 连家创, 刘宏民. 板厚板形控制[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.
LIAN Jiachuang, LIU Hongmin. Control of strip thickness and shape [M]. Beijing: Engineering Industry Publishing Company, 1996.
- [3] 王军生, 白金兰, 刘相华. 带钢冷连轧原理与过程控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
WANG Junsheng, BAI Jinlan, LIU Xianghua. Theory and process control of cold strip rolling [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [4] WANG Junsheng, JIANG Zhengyi. A flying gauge change model in tandem cold strip mill [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204: 152-161.
- [5] 翟博, 孙荣生, 孙建林. 板形控制技术在鞍钢冷连轧机组的应用[J]. 鞍钢技术, 2009, 355(1): 49-52.
ZHAI Bo, SUN Rongsheng, SUN Jianlin. Application of sheet shape control technology on continuous rolling mills in Angang [J]. Aisc Techniques, 2009, 355(1): 49-52.
- [6] 赵启林, 王军生, 王国栋. 一种板形检测值处理方法的开发及应用[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(4): 294-296.
ZHAO Qilin, WANG Junsheng, WANG Guodong. Development and application of a measured flatness

- value processing method [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2009, 8(4): 294-296.
- [7] 刘佳伟, 王鹏飞, 张殿华, 等. 冷带卷取对板形测控的影响及其补偿[J]. 轧钢, 2008, 25(6): 22-24.
LIU Jiawei, WANG Pengfei, ZHANG Dianhua, et al. Influence and compensating means of coil shape on strip flatness measuring and control [J]. Steel Rolling, 2008, 25(6): 22-24.
- [8] 刘建, 王益群, 孙福, 等. 基于粒子群理论的板形模糊模式识别方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 173-178.
LIU Jian, WANG Yiqun, SUN Fu, et al. Fuzzy pattern recognition method of flatness based on particle swarm theory [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 173-178.
- [9] WANG Yiqun, SUN Fu, LIU Jian, et al. Application of smith predictor based on single neural network in cold rolling shape control [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(2): 282-286.
- [10] 魏立新, 李兴强, 李莹, 等. 基于改进自适应遗传算法的冷连轧轧制规程优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 136-141.
WEI Lixin, LI Xingqiang, LI Ying, et al. Optimization of tandem cold rolling schedule based on improved adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 136-141.
- [11] 周莲莲, 郑志刚, 白振华. 板带轧机板形检测设备系统误差综合补偿技术的开发[J]. 燕山大学学报, 2009, 33(3): 220-223.
ZHOU Lianlian, ZHENG Zhigang, BAI Zhenhua. Development of general compensation technology about system error for strip mill shape detection equipment [J]. Journal of Yanshan University, 2009, 33(3): 220-223.
- [12] 白振华, 李兴东, 连家创, 等. 局部浪形对冷轧钢卷起筋的影响[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 229-232.
BAI Zhenhua, LI Xingdong, LIAN Jiachuang, et al. Influence of local shape wave on ribbing of cold-rolled coil [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 229-232.
- [13] YU Bingqiang, LIU Hongmin, YANG Lipo, et al. A new type of contact shape meter and its industry application [C]//International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA2009), 2009, 4: 1058-1061.
- [14] 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 Bingqiang, YANG Lipo, LIU Hongmin, et al. Development and industry application of contact shape meter with new structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 904-911.
- [15] 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.
- [16] 林振波, 段振勇, 连家创, 等. 冷轧机板形标准曲线的分析及选择方法[J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(3): 55-58.
LIN Zhenbo, DUAN Zhenyong, LIAN Jiachuang, et al. Analysis on shape standard curve of cold rolling mill and its selection [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(3): 55-58.
- [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.
- [18] 单修迎, 贾春玉, 刘宏民. 板带轧机板形控制倾辊弯辊神经模糊PID模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 255-260.
SHAN Xiuying, JIA Chunyu, LIU Hongmin. Neural fuzzy PID model of tilting roll and bending roll flatness control for strip mill [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 255-260.

作者简介: 杨利坡(通信作者), 男, 1978年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为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检测和板形控制。

E-mail: ybingq@ysu.edu.cn