

基于循环统计量的轧机偏心线性预测及补偿控制

牛满科^{1,2)} 杨卫东¹⁾ 张丽娟³⁾

1) 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083 2) 军械技术研究所校准中心, 石家庄 050000

3) 卢沟桥文化旅游区办事处, 北京 100072

摘要 提出了一种轧机偏心特性曲线概念. 基于偏心测试信号的循环统计量建立线性预测模型, 在线确定轧机偏心补偿量数据, 实现轧机偏心的实时直接数据补偿控制. 该方法能够准确反映并跟踪轧机偏心扰动的实际变化, 满足对轧机偏心信号进行在线实时补偿控制的要求.

关键词 轧辊偏心; 特性曲线; 特征向量; 循环统计量; 线性预测模型; 补偿控制

分类号 TG 333.17; TP273+.2

Linear prediction and compensation control of roll eccentricity based on cyclic statistics

NIU Man-ke^{1,2)}, YANG Wei-dong¹⁾, ZHANG Li-juan³⁾

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

2) Center of Calibration, Institute of Ordnance Technology, Shijiazhuang 050000, China

3) The Cultural and Tour District Office of Lugou Bridge, Beijing 100072, China

ABSTRACT The concept of the characteristic curves of roll eccentricity was proposed. Based on cyclic statistics of the tested signal, a linear prediction model was established to on-line determine the compensation data of roll eccentricity for realizing the real-time compensation control of roll eccentricity. Simulation results show that the method can accurately trace roll-eccentricity-induced disturbances and meet the needs for real-time compensation for the control of roll eccentricity.

KEY WORDS roll eccentricity; characteristic curve; characteristic vector; cyclic statistics; linear prediction model; compensation control

现代轧钢生产中提高板厚精度的技术主要是厚度自动控制(automatic gauge control, AGC)^[1], AGC的控制精度是决定产品质量的主要因素. AGC模型的基本原理是借助于测量轧制力和辊缝, 通过模型计算来调整辊缝, 保持出口厚度不变. 普遍存在的轧机偏心缺陷是由于轧辊本身的椭圆度以及辊身与辊径不同轴等原因所导致的. 轧机偏心扰动所特有的表现是, 其对轧制力的波动影响与轧件厚度对轧制力的波动影响是反方向的, 因而 AGC 无法抑制轧机偏心所造成的反向波动, 也就是无法消除轧机偏心的影响; 相反会造成系统的误预报、误调节, 使得轧制厚度的精度控制能力更差. 因此, 轧机偏心

不仅对轧件厚度均匀产生直接的不良影响, 而且会使常规调节器的调节质量恶化, 对带材厚度均匀性产生间接的不良影响^[2]. 随着对带材质量要求的不断提高, 由轧机偏心所带来的不良影响越来越不容忽视. 为了解决这一难题, 必须深入研究轧机偏心扰动信号的特点, 有针对性的进行补偿.

存在偏心的轧机中因轧辊旋转形成的轧件周期性的厚度波动是一种复杂的周期性高频干扰波^[3-4], 很难用传统的数学模型来描述, 也无法通过反馈式 AGC 系统来控制^[5]. 随着轧制的进行, 轧机偏心会使轧制力呈现周期性波动, 因此对轧机偏心的处理基本是采用减小轧制力中偏心对应性波动的

收稿日期: 2009-04-23

作者简介: 牛满科(1970—), 男, 博士研究生; 杨卫东(1952—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ywd1952@126.com

补偿性策略.

为辨识由于轧机偏心造成的厚度波动^[6-7], 国外一般是采用快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)的方法来辨识轧机偏心的影响. 然而, 由于信号预处理方法的不完善及 FFT 方法的自身局限性^[8], 这些传统的方法并不能很好地辨识出轧机偏心的影响.

本文所提出的是一种基于统计信息的时域信号处理方法, 是通过对由辊缝测量装置采集到的等轧制力自动控制系统中辊缝信号进行合理的统计性算法处理, 实时获取可用于预报和补偿偏心的轧制相关信号数据, 实现在线监测轧机偏心的变化, 为进一步补偿控制带材的厚度提供依据.

1 轧机偏心与带材厚度的关系

1.1 直接影响

轧机偏心的存在导致辊缝的周期性变化, 从而造成带材厚度的波动. 如果偏心幅值为 $\Delta e_{\max}$, 则在带材上产生的最大厚差为:

$$\Delta h_{\max} = \frac{M}{M+Q} \Delta e_{\max} \quad (1)$$

式中, M 为轧机的刚度系数; Q 为轧件的塑性系数.

1.2 间接影响

在采用测厚仪的厚度反馈自动控制系统中, 由于测厚仪一般装在距离引起厚度波动的辊缝较远的地方, 使整个系统存在一定的时间延迟, 所以实际轧出的带材厚度波动不能在反馈信号中得到及时的反映. 为解决这一问题, 通常采用 GM-AGC 系统, 即在轧制过程中, 检测出轧制压力 P 和空载辊缝 S , 根据弹跳方程, 计算出成品厚度 h :

$$h = S + \frac{P}{c} \quad (2)$$

式中, c 为轧机刚度, 表示使轧机产生单位弹跳量所需的轧制压力.

GM-AGC 系统是通过测量轧制压力和辊缝宽度, 根据弹跳方程得出反馈厚度的. 实际上, 直接辊缝宽度不易测得, 参加计算的 S 是在支撑辊轴承处测出的间接辊缝, 轧机偏心的影响在这样测得的辊缝中反映不出来. 假设某时刻, 偏心对辊缝的影响为 e , 测得的间接辊缝为 S , 则实际辊缝值应为 $S+e$, 实际轧出的厚度应为:

$$h_e = S + e + \frac{P_e}{c} \quad (3)$$

式中, P_e 为偏心时实际轧制力. 产生的厚度变化量:

$$\Delta h_e = h_e - h = e + \frac{\Delta P}{c} \quad (4)$$

这种状态下, 如果把源于偏心效应的“虚”板厚变化 $\frac{\Delta P}{c}$, 作为实际厚度偏差量引入厚度反馈自动控制系统中, 就引入了偏心误差, 而且会导致控制质量的恶化. 轧机偏心对厚度的影响如图 1 所示.

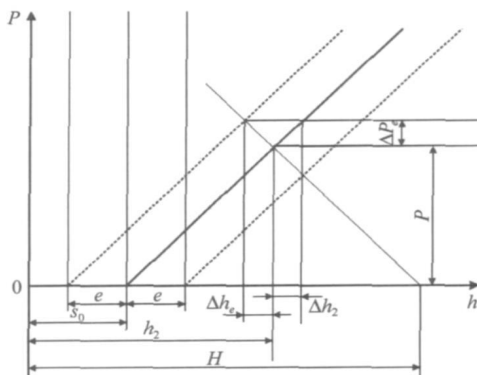


图 1 轧机偏心、轧制力和轧件厚度在 $P-h$ 图中关系

Fig. 1 Relation among roll eccentricity, force and gauge in a $P-h$ plot

当有偏心 e 存在时, 实际板厚减少了 Δh_e , 但由于同时轧制压力增大, GM-AGC 系统认为板厚增大了 Δh_e , 因而控制器就越发朝着使板厚减少的方向运动, 结果使其比没有 GM-AGC 系统时的板厚精度更加低劣^[2,9].

2 轧机偏心信号的特点

在采用等轧制力 AGC 系统的轧机控制系统中, 包含偏心特性信息的辊缝测量反馈数据的采样序列信号中, 偏心效应所表现出周期化的特性. 刘淑贞等^[10]通过理论分析和实验结果已经证明, 偏心曲线不是标准正弦波, 但完全可以用正弦波来近似.

引起轧机偏心的原因有两种: 一是由辊身和辊颈的不同轴度误差所产生的偏心, 二是由辊身本身所具有的椭圆度所造成的偏心. 轧机偏心反映在轧件厚度上是一个随轧制速度周期性变化的波, 在一定范围内可以用其基波分量来近似表示如下.

(1) 上支撑辊偏心的厚度变动分量表示为:

$$\Delta S_{\text{up}} = A_{\text{up}} \sin(\omega_{\text{up}} t + \varphi_{0\text{up}}) + \delta S_{\text{up}} \quad (5)$$

(2) 下支撑辊偏心的厚度变动分量表示为:

$$\Delta S_{\text{down}} = A_{\text{down}} \sin(\omega_{\text{down}} t + \varphi_{0\text{down}}) + \delta S_{\text{down}} \quad (6)$$

(3) ΔS_{up} 和 ΔS_{down} 为两个振幅近似相同、频率存在差异且相差很小的波形. 轧机偏心对轧件厚度的合成总量可以表示为:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{up}} + \Delta S_{\text{down}} =$$

$$A_{up}\sin(\omega_{up}t+\varphi_{0up})+A_{down}\sin(\omega_{down}t+\varphi_{0down})+\delta S$$

(7)

式中, ω_{up} 、 ω_{down} 分别近似为上、下支撑辊角速度, δS_{up} 、 δS_{down} 和 δS 为源自辊缝测量的均值为零的测试噪声信号, 其量纲与辊缝相同.

轧机偏心信号示意图如图 2 所示. 在图中可以看到, 包含由偏心扰动因素造成厚度变化的轧件厚度随着轧件长度上的位置变化而变化的厚度 (h)—长度 (L) 波形.

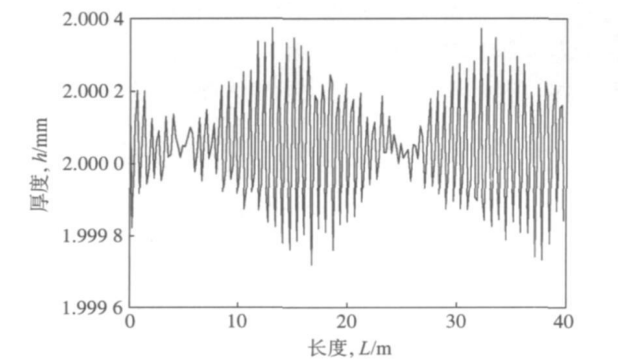


图 2 轧机偏心信号示意图

Fig.2 Demonstration of roll eccentricity signal

$h-L$ 曲线波形的振幅将随长度延伸作周期性的缓慢变化, 该变化源于轧机支撑辊的周期性转动, 在一定范围内用上、下两部分的基波分量合成来近似表示总的偏心效果, 其周期和频率分别为 f_b 和 T_b .

$$f_b=|f_{up}-f_{down}|, T_b=\frac{1}{f_b}=\frac{2\pi}{|\omega_{up}-\omega_{down}|}$$

(8)

3 轧机偏心特征

通过对偏心信号特点的分析能够得到, 轧机在轧制的过程中偏心扰动信号 y_B 随着轧制时间 t 增长的变化情况有如下形式:

$$y_B(t)=g(\overline{\omega}t), t\in[0,\infty)$$

(9)

式中, $\overline{\omega}$ 为轧机机架总体偏心扰动信号的平均角频率. 上式亦可表示为:

$$y_B(t)=g[2\pi f_B(t+kT_B)+\varphi_0],$$

$t\in[0,T_B), k=0,1,2,\dots$

(10)

式中, f_B 为偏心扰动信号的循环频率, T_B 为偏心扰动信号的循环周期, φ_0 为偏心扰动信号变动的初始相位. 将关系式(10)所表示的轧机的偏心扰动因素 y_B 随着时间 t 变化的函数曲线定义为连续状态轧机偏心特性函数(一类周期函数)曲线. 这里考虑在等轧制力控制的情况下, 测量辊缝的变化所代表的偏心扰动特性, 通过适当选择测量坐标的起点使得

$$y_B>0$$

(线性预测模型系数存在条件)

(11)

现在考虑对连续状态轧机偏心特性函数曲线进行采样, 从而得到离散状态轧机偏心(单周期等分间隔均匀采样点组成)特征向量, 这里约定如下前提条件.

(1) 依据轧机偏心扰动信号的一个循环周期 T_B 内包含曲线变化趋势, 确定合理的单周期内部 T_B 采样数据总量 N .

(2) 轧机偏心扰动信号离散化时的取样时间间隔 τ 确定如下:

$$\tau=\frac{T_B}{N}$$

(12)

(3) 对轧机偏心扰动信号离散化, 在一个循环周期 T_B 内, 从零点开始以时间间隔 τ 采样轧机偏心扰动信号 y_B 得到:

$$y_i=y_B((i-1)\tau), i=1,2,\dots,N$$

(13)

(4) 将在一个循环周期 T_B 内采样取得的全部 y_i 值按照时间先后顺序排列形成一个 N 维量 $\mathbf{Y}$, 即:

$$\mathbf{Y}=[y_1\ y_2\ \cdots\ y_N]$$

(14)

定义由上式表示的向量为离散状态轧机偏心特征向量, 其具有如下的性质——循环更新性质.

在系统性质保持相对稳定的情况下, 在轧机的轧制进程中, 当经过一个采样间隔时间 τ 后, 获得一个新的采样值 y' 后, 离散状态轧机偏心特征向量循环更新:

$$y_i=y_{i+1}, i=1,2,\dots,N-1;$$

$y_N=y'; \mathbf{Y}'=[y_2\ \cdots\ y_N\ y']$

(15)

4 轧机偏心线性预测模型

为了对轧机的偏心特性进行主动补偿, 即依据在线识别更新当前离散状态轧机偏心特征向量, 预测即将到来的下一个时间点的偏心扰动信号 $\hat{y}'$, 对进一步进行偏心主动补偿控制提供数据支持. 本文使用线性预测模型对信号 $\hat{y}'$ 进行预测, 模型结构如图 3 所示, 具体建模如下.

在线性预测模型中, 对当前组成轧机偏心特征向量的 N 个元素作为样本值, 即:

$$y(m-N)=y_1;$$

$y(m-N+1)=y_2;$

$\cdots$

$y(m-N+i-1)=y_i;$

$\cdots$

$y(m-1)=y_N.$

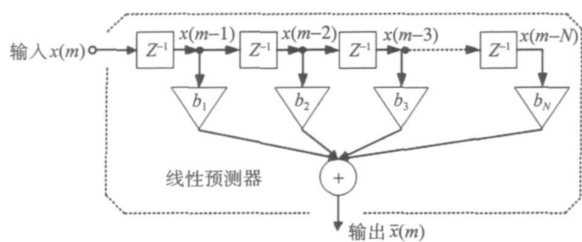


图 3 线性预测模型图

Fig.3 Linear prediction model

得到

$$[y(m-N), y(m-N+1), \dots, y(m-1)] \quad (16)$$

进行线性加权, 预测估计出下一个时刻 m 的信号值 $y(m)$:

$$\hat{y}(m) = \sum_{k=1}^N b_k y(m-k) \quad (17)$$

式中, 整数变量 m 为离散时刻, $\hat{y}(m)$ 为 $y(m)$ 的预测估值, b_k 为预测系数。

确定模型的预测系数关系, 对用于预测的前 N 个样本点个数的选择遵循下面的规则。

对于 N 个预测系数 b_k 的确定, 基于偏心特征曲线具有与轧机辊面形状相关的形态不变性, 考虑轧辊的磨损为均匀磨损情况, 基于偏心特征曲线形态相似的性质, 考虑单一一个目标点 i 补偿用预测值与自目标预测点前一点开始的前 N 个采样值的比例, 确定预测系数 b_k 的确定方式:

$$\frac{\hat{y}_i(m)}{y(m-j)} = \frac{y(m-N)}{Ny(m-j)} \quad (18)$$

移项可得特征值预测关系:

$$\hat{y}_i(m) = \frac{y(m-N)}{Ny(m-j)} y(m-j) = b_j y(m-j) \quad (19)$$

预测系数 b_k 的确定关系:

$$b_k = \frac{y(m-N)}{Ny(m-k)}; \quad k=1, 2, \dots, N \quad (20)$$

这样就有:

$$\hat{y}(m) = \sum_{k=1}^N \hat{y}_k(m) = \sum_{k=1}^N b_k y(m-k) \quad (21)$$

在得到预测值 $\hat{y}(m)$ 之后, 采用线性插值的方式获取在到达下一个采样间隔 τ 之前进行主动偏心补偿的偏心补偿量 y_c , 即由

$$\frac{y_c - y(m-1)}{\Delta t} = \frac{y(m) - y(m-1)}{\tau} \quad (22)$$

得到

$$y_c = \left[\frac{y(m) - y(m-1)}{\tau} \Delta t \right] + y(m-1) \quad (23)$$

至此, 已经建立了完整的用于轧机偏心特征曲线信息预测的线性预测模型, 并利用该模型的预测值得到轧机偏心补偿量, 基于轧机偏心补偿量的实时获取, 就可以建立包含偏心补偿的高精度 AGC 系统。

5 轧机实时偏心预测补偿控制

利用离散状态轧机偏心特征向量的概念, 基于线性预测模型, 采用对包含轧机偏心信息的辊缝变化信号进行统计特性提取、线性预测以及插值计算等处理, 实施数据补偿来消除偏心信号的方法, 解决轧机偏心对带材轧出厚度的影响, 提高带材厚度轧制精度。

具有轧机偏心预测功能的偏心补偿控制系统如图 4 所示, 其中 S 为辊缝变动的测量信号。通过对轧制反馈信号的统计分析, 获取轧机偏心特征向量, 利用偏心补偿数据预测单元产生偏心补偿量信息。采用在线偏心特征向量提取和在线实时参数补偿相结合的方法, 确定轧机偏心补偿控制的方案, 实现轧机偏心特性的提取与在线补偿控制。首先, 在轧辊预压靠时, 对辊缝测量装置测出的辊缝变动信号进行采样, 采用统计识别方法提取轧机偏心特征向量, 然后运用线性预测器对进行补偿量预测处理, 再经过线性插值得到偏心补偿量, 此补偿量即为当前偏心控制补偿的关键。

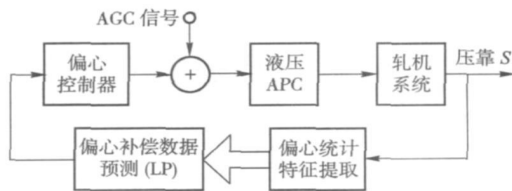


图 4 LP 偏心补偿控制示意图

Fig.4 Eccentric control system with LP compensation

6 系统仿真分析

本文利用 Matlab7.0 进行轧机偏心特征曲线信息提取仿真, 以六机架热连轧机为控制对象, 带钢速度为 $540 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 支撑辊直径 1500 mm , 则近似求得偏心信号基波的角频率为 $\omega = 12 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 又假设被测信号由如下成分组成:

$$f(t) = 0.15\sin(3t) + 0.25\sin(12t) + 0.25\sin(13t) + B(t) \quad (24)$$

式中, $0.15\sin(3t)$ 为水印成分, $0.25\sin(12t) + 0.25\sin(13t)$ 为轧辊偏心成分, $B(t)$ 为随机噪声。

轧机偏心特性的统计信息如图 5 所示。图 5 中

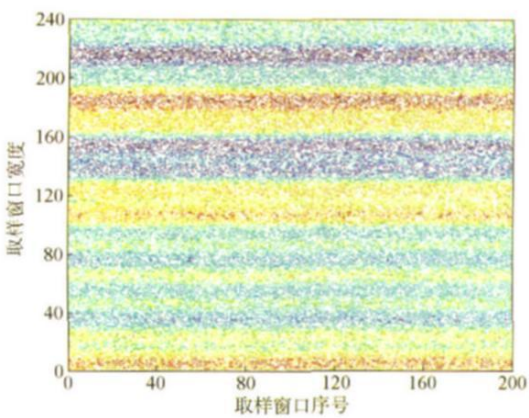


图 5 轧机偏心特性统计信息

Fig.5 Statistic information of roll eccentricity

所示轧机偏心特性统计信息为在合适的矩形取样窗口下,包含噪声的轧机偏心信号采样信息的平面图

形. 图中纵坐标为取样窗口宽度,横坐标为按照时间顺序的取样窗口序号,图中的灰度值表示轧机偏心特性信号的强度. 从图中可以看到明显的周期性波动.

为了从轧机偏心反馈信息中提取轧机偏心特征向量,需要利用某种测试装置同步获取轧机的精确偏心特性时间窗口,使用该窗口取样数据序列,进行统计处理后获取偏心特征向量. 轧机偏心特性提取过程中的典型信息如图 6 所示.

图 6(a)中曲线为偏心信号的时域仿真曲线,该曲线的变化趋势很难直观确定;图 6(b)中的曲线组为在一个采样窗口中的各个组成信号的各自独立曲线;图 6(c)中的曲线为在一个采样窗口中的偏心特征向量的一个观测向量;图 6(d)中的点为偏心特征向量的一个估计向量中各个点的图形.

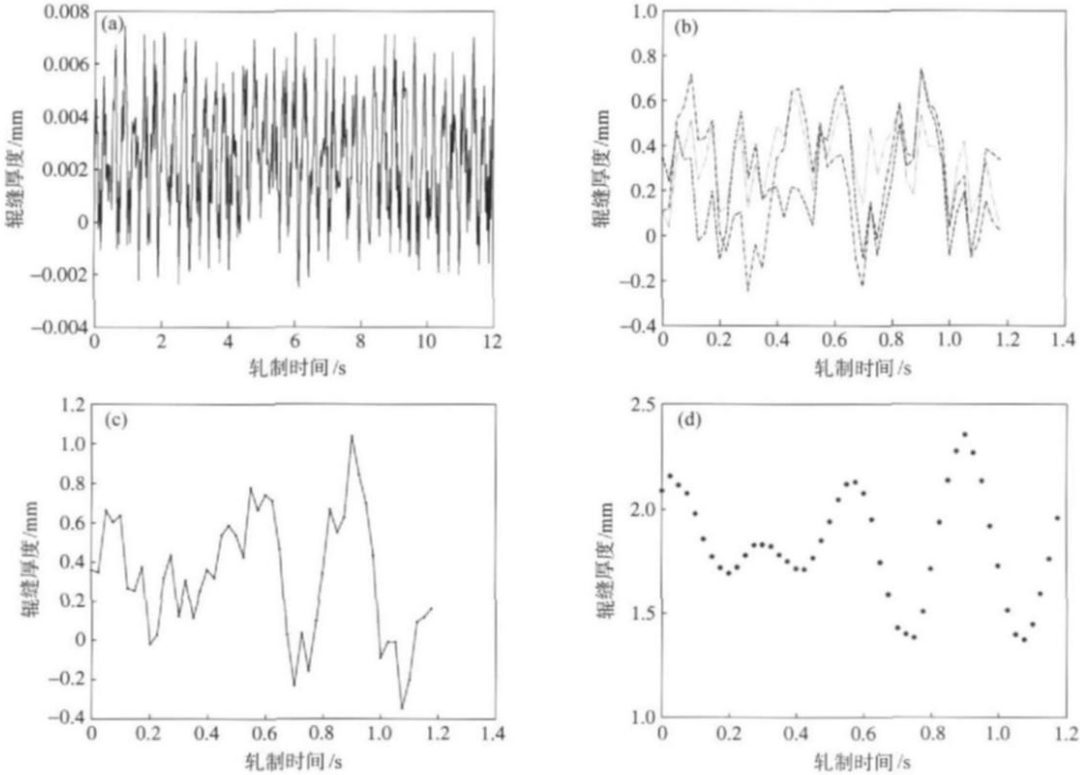


图 6 轧机偏心特性曲线提取. (a) 轧机测试信号; (b) 周期化测试信息; (c) 偏心周期信号; (d) 偏心特征信息

Fig.6 Character extraction for roll eccentricity: (a) roll signal tested; (b) periodical multi-info tested; (c) periodical eccentricity signal; (d) characteristic information of eccentricity

采用统计分析的方法进行偏心特征向量的提取具有实时性和合理性. 不依赖于时间域、频率域之间的变换处理. 对偏心信号的变动具有较高的时域灵敏度和实施补偿的直接性与直观可信性. 在经过 $n(n\geq 3)$ 个精确偏心特性时间窗口取得基本的偏心特征估计向量之后,在开始进行补偿的同时,依据新获得的完整精确偏心特性时间窗口数据,继续优化

偏心特征估计向量,可以获得如图 7 所示的基于循环统计量的轧机偏心线性预测补偿控制结果.

图 7(a)中曲线为偏心信号的时域仿真曲线,在该曲线中来源于板带厚度变化的波动信息并不清晰;图 7(b)中曲线为包含了偏心补偿的轧制力控制信息曲线,显然在进行了偏心补偿之后,轧制力控制信息变化主要是相应于板带厚度的波动. 采用基于

循环统计量的方法提取轧机偏心特性信息,无需事先对轧机的偏心特性信息曲线作任何形式的假定,

易于计算提取并具有良好的适应性.

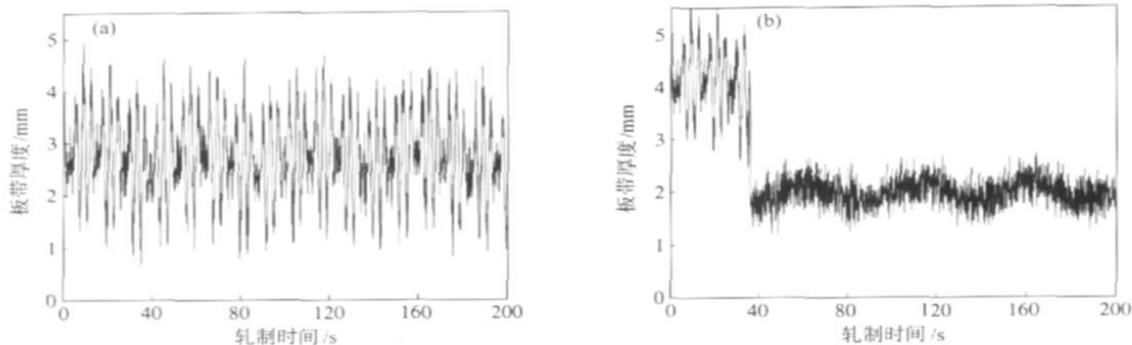


图 7 轧机偏心特性补偿控制. (a) 轧机测试信号; (b) 偏心补偿控制效果

Fig. 7 Compensation control for roll eccentricity: (a) roll signal tested; (b) effect of compensation control for eccentricity

7 结论

本文通过研究分析轧机偏心缺陷的成因及其特点,依据轧机偏心扰动所呈现出的周期性,提出轧机偏心特性曲线和特征向量的概念.采用统计分析的方法,提取用于偏心控制补偿量线性预测的轧机运行实时偏心特征向量,通过线性预测和插值计算的方式得到符合在线实时偏心补偿需求的偏心补偿数据.用于偏心补偿控制,实现对轧机偏心扰动的实时补偿控制.从仿真结果看,使用统计的方法提取轧机的偏心特征向量能够很好地反应出实际轧制过程中的偏心扰动变动细节信息,采用合理的同步技术,依据偏心特征向量预测所得的偏心补偿数据,进行轧机偏心补偿控制,具有更好的实时性和合理性.因此,本文中给出的偏心信号提取及控制方法具有较好的实用性.

参 考 文 献

- [1] De Wit C C, Praly L. Adaptive eccentricity compensation. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2000, 8(5): 757
- [2] Ma N, Liu D, Zheng G, et al. Detection and control of eccentricity in a cold mill based on stochastic approximation method. *Heavy Mach*, 1999(6): 31
(马宁,刘丁,郑岗,等.随机逼近法对轧辊偏心信号的检测与控制.重型机械,1999(6):31)
- [3] Zhou J X, Yang W D, Ye S, et al. Roller eccentricity signal pick-up and adaptive control based on lifting wavelet transform and self-optimization. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(5): 562
(周建新,杨卫东,叶双,等.基于提升小波的轧辊偏心信号提取及自适应控制.北京科技大学学报,2008,30(5):562)
- [4] Wu W, Zhang W J, Zhang X T, et al. Online algorithm with memory range for identification of roll eccentricity. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(4): 499
(吴巍,张武军,张晓彤,等.一种设定记忆长度的轧辊偏心在线检测算法.北京科技大学学报,2009,31(4):499)
- [5] Wang Z Y, Wang J, Ma M X, et al. Method for improving precision in spectrum analysis of roll eccentricity signal. *Iron Steel*, 2005, 40(8): 56
(王哲英,王君,马明旭,等.提高轧辊偏心信号频谱分析精度的方法.钢铁,2005,40(8):56)
- [6] Li Y M. The modified fast Fourier transform and its application to the compensation of eccentricities in cold mill rolling. *Acta Autom Sin*, 1990, 16(2): 151
(李育苗.改进的快速富里叶变换及其在轧钢机偏心补偿中的应用.自动化学报,1990,16(2):151)
- [7] Kugi A, Haas W, Schlacher K, et al. Active compensation of roll eccentricity in rolling mills. *IEEE Trans Ind Appl*, 2000, 36(2): 625
- [8] Zeng S C, Shen H, Yu Z L, et al. FFT based spectrogram analysis and display of signal using Matlab. *Bull Sci Technol*, 2000, 16(4): 241
(曾尚瑾,沈华,俞振利,等.基于 Matlab 系统的信号 FFT 频谱分析与显示.科技通报,2000,16(4):241)
- [9] Chen L G, Yang W D, Yang B H, et al. Cold-rolling gauge-meter-type AGC based on robust two-degrees-freedom and gain adaptive Smith predictor. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(6): 632
(陈连贵,杨卫东,杨斌虎,等.基于鲁棒二自由度增益自适应 Smith 预估器的冷轧厚度计型 AGC.北京科技大学学报,2007,29(6):632)
- [10] Liu S Z, Sun Y K. Signal compensation located by phase of roll eccentricity control. *Steel Rolling*, 1991(4): 42
(刘淑贞,孙一康.轧辊偏心控制中信号相位的确定与补偿.轧钢,1991(4):42)