

文章编号:1004-4213(2011)08-1186-5

# 辊型 CCD 检测法中轧辊轴线偏移的补偿

郭媛<sup>1</sup>, 王玉田<sup>2</sup>

(1 齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 齐齐哈尔 黑龙江 161006)

(2 燕山大学 电气工程学院, 秦皇岛 河北 066004)

**摘 要:**根据激光线阵 CCD 检测技术原理, 提出一种快速、高准确度的轧辊辊型检测方法, 阐述了系统组成与检测过程. 针对辊型检测过程中易出现的轴线偏移现象, 从垂直检测平面和平行检测平面两个方向采取补偿措施, 有效地提高了系统检测准确度. 同时检测系统对 CCD 信号进行处理时, 采用浮动阈值法, 有效降低噪音对 CCD 成像质量的影响, 保证了系统的分辨率与检测准确度. 实验证明, 系统的检测准确度可达到实际生产过程中辊型检测的要求, 为实现辊型在线检测的高速、高准确度、高自动化提供了一种新的研究方法.

**关键词:**辊型; CCD; 轴线偏移; 补偿

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1186

## 0 引言

轧辊是轧钢厂的重要冶金工具, 其工作状态直接决定轧制产品的质量. 轧辊长时间工作后, 轧辊表面不断受到变形、热膨胀、磨损等因素影响, 导致轧制钢材的板形和板厚难以控制, 进而使产品质量下降. 因此, 及时、准确地检测出轧辊辊型是目前轧制生产的迫切要求<sup>[1-2]</sup>.

国外在线检测技术研究比较活跃的是日本与德国, 目前常用的轧辊辊型检测法主要有超声波和电涡流两种. 虽然这两种方法在测量准确度上能达到要求, 但在满足环境和抗干扰要求方面都存在问题, 从而影响测量的可靠性<sup>[3-4]</sup>. 国内的辊型检测系统仍然以进口产品为主.

本文提出了一种利用线阵 CCD 进行辊型在线检测的方法, 将辊型变化( $R$  的变化)转化为 CCD 阵列上的成像位置  $h$  的值, 具有放大倍数高, 对被测位移量影响小且适时显示性能好等优点. 利用半导体激光器做光源与线阵 CCD 相结合, 可实现对轧辊磨损度的在线测量, 其测量准确度高, 抗电磁干扰能力强<sup>[5-6]</sup>. 由于轧辊在轧制过程中的旋转, 其轴线可能会产生微小的偏移, 不能保证每次检测中轧辊的轴线方向相同, 会对检测结果带来误差<sup>[7-8]</sup>. 本文引入轧辊轴线偏移的补偿算法, 对轧辊轴线偏移从平行和垂直检测平面方向进行补偿, 减小了检测误差, 保

证了系统检测准确度.

## 1 检测基本原理及系统组成

当从光源发出的光照射到轧辊表面时, 在轧辊表面会发生光反射现象. 如果保证入射光线的位置和方向不变, 那么反射光线方向的变化就直接反映出轧辊表面的形状变化<sup>[9]</sup>, 工作原理如图 1(a). 当轧辊长期工作后, 其表面会受到不同程度的磨损而使辊型发生变化, 即轧辊不同位置的半径发生变化.

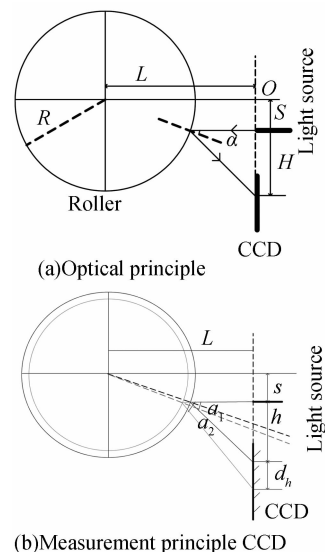


图 1 CCD 检测法的工作原理  
Fig. 1 Principle of CCD measurement system

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60672015)资助

第一作者: 郭媛(1974-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电检测与传感器技术. Email: guoyuan1974@yahoo.com.cn

导 师: 王玉田(1952-), 男, 教授, 主要研究方向为检测技术和光电传感. Email: Ytwang@163.com

收稿日期: 2011-03-27; 修回日期: 2011-06-06

根据光学原理,轧辊表面发生变形处的反射光线方向(红色线条标记),必然与初始辊型的反射光线方向不相同,通过精确探测反射光线的位置,即可计算出轧辊表面切面的方向,从而得到轧辊的辊型,工作原理如图 1(b). 其中各参量含义为, $R$ :轧辊半径; $L$ :检测平面(指发出入射光线的光源和 CCD 阵列组成的平面)与轧辊轴线之间的距离; $S$ :光源距离垂直入射轧辊轴心面的距离; $h$ :发射光线和反射光线的距离; $d_h$ :反射光线偏移的距离.

若光源沿轧辊轴向以一定步距扫描整个轧辊,则在 CCD 阵列上可记录下各采样点的反射光线位置,即可得到各位置轧辊的实际半径,从而获得辊型的精确数据,构成辊型的完整曲线.

检测开始时,检测系统置于轧辊的一端,轧辊的标称半径为  $R$ ,反射光线在 CCD 阵列上的成像位置与入射光线的距离为  $H$ ,则可计算出轧辊轴线与检测平面的距离  $L$  为

$$L = H / \tan 2\alpha + \sqrt{R^2 - S^2} \quad (1)$$

其中  $\tan 2\alpha$  为入射光线与反射光线夹角的正切值,可由式(2)计算出

$$\tan 2\alpha = 2S \sqrt{R^2 - S^2} / (R^2 - 2S^2) \quad (2)$$

代入式(1)可得  $L$  为

$$L = \frac{H + 2S}{2S} \sqrt{R^2 - S^2} - \frac{HS}{2\sqrt{R^2 - S^2}} \quad (3)$$

当光源沿检测平面匀速移动扫描整个轧辊时,检测系统沿轨道从轧辊的一端移动到另一端,可记录下反射光线在 CCD 阵列上的成像曲线<sup>[10]</sup>. 轧辊的实际半径为  $r$ , CCD 阵列上的成像位置为  $h$ ,由式(3)可得  $h$  与  $r$  之间的函数关系为

$$h = \frac{2SL \sqrt{r^2 - S^2} - 2S(r^2 - S^2)}{r^2 - 2S^2} \quad (4)$$

CCD 辊型在线检测系统由探头模块、信号采集模块、控制模块和电源模块组成. 探头主要负责信号的采集,并具备自动调整功能,同时负责对传感探头提出开启、停止、调整位置等命令信号;信号采集模块负责将探头输出的微弱光电信号放大,并转换成数字信号,增强信号传输过程中的抗干扰能力;控制模块负责调度整个系统的运行,以及与上位计算机的通信;电源模块负责为系统工作供电. 检测系统的工作原理如图 2.

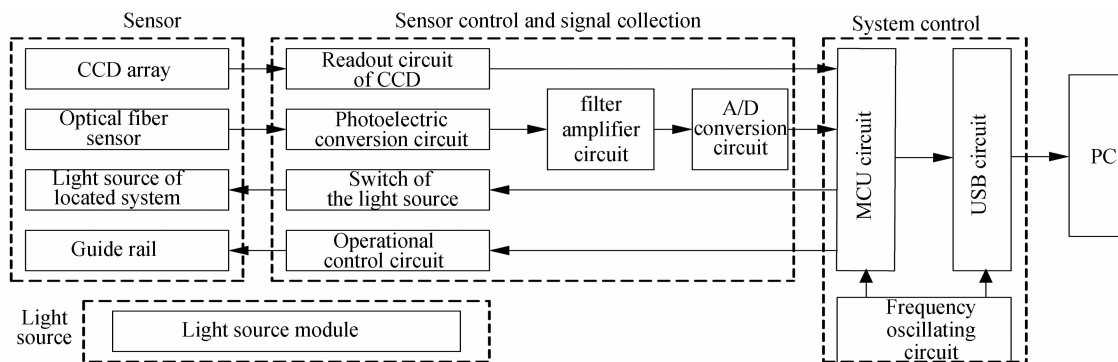


图 2 CCD 辊型在线检测系统原理

Fig. 2 Flow chart of the roller shape measurement system based on CCD

## 2 轧辊轴线偏移的补偿

因为轧辊在轧制过程中不停的旋转,可能产生轴线微小的偏移,难以保证每次检测中轧辊的轴线方向相同,而使检测结果产生误差<sup>[11]</sup>. 所以,引入轧辊轴线偏移的补偿算法来保证检测结果的准确度.

在检测过程中,可将轧辊轴线偏移情况的偏移量分解为两个方向:即垂直于检测平面方向和平行于检测平面方向. 通过分析这两个方向的补偿算法,进而确定对轴线偏移的补偿方法.

### 2.1 垂直于检测平面的轴线偏移

垂直于检测平面的轴线偏移指轧辊轴线与检测平面的距离发生变化,各方向视图如图 3. 各小图表示轧辊轴线和检测平面发生的轴向偏移.

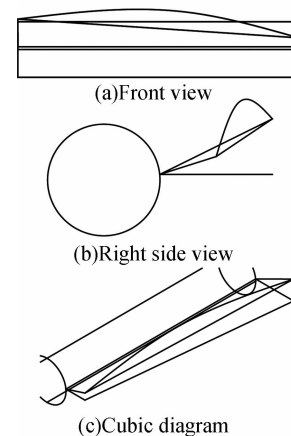


图 3 垂直于检测平面的偏移

Fig. 3 Vertical direction shifting

把此情况投射到平面,如图 4. 图中各参量为: $A$ ,被测轧辊的长度; $x$ ,检测系统距检测初始点的移

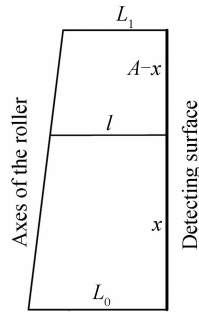


图 4 垂直于检测平面偏移的几何分析  
Fig. 4 Geometry analyzing chart of vertical direction shifting  
检测距离;  $L_0$ , 检测初始时, 轧辊轴线与检测平面的距离;  $L_1$ , 检测完成后, 轧辊轴线与检测平面的距离.

通过几何分析, 由图 4 可求得  $l$  (任意位置轧辊轴线与检测平面的距离) 与  $x$  的关系为

$$(L_1 + l)(A - x) + (l + L_0)x = (L_1 + L_0)A \quad (5)$$

进一步化简可得

$$l = \frac{x}{A}L_1 + \frac{A-x}{A}L_0 \quad (6)$$

### 2.2 平行于检测平面的轴线偏移

平行于检测平面的轴线偏移指光源距离垂直入射轧辊轴心面的距离, 各方向视图如图 5. 各小图表示轧辊轴线和检测平面发生的径向偏移.

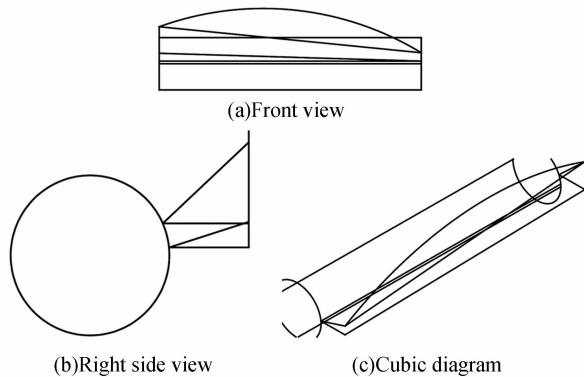


图 5 平行于检测平面的偏移  
Fig. 5 Horizontal direction shifting

把此情况投射到平面, 如图 6. 图中各参量为:  $S_0$ , 检测初始时, 光源距离垂直入射轧辊轴心面的距离;  $S_1$ , 检测完成后, 光源距离垂直入射轧辊轴心面的距离.

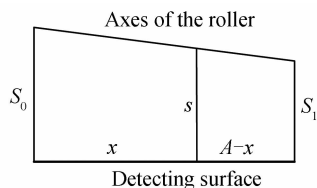


图 6 平行于检测平面偏移的几何分析  
Fig. 6 Geometry analyzing chart of horizontal direction shifting

通过几何分析, 由图 6 可求得  $s$  (任意位置光源距离垂直入射轧辊轴心面的距离) 与  $x$  的关系

$$(S_1 + s)(A - x) + (s + S_0)x = (S_1 + S_0)A \quad (7)$$

进一步化简可得

$$s = \frac{x}{A}S_1 + \frac{A-x}{A}S_0 \quad (8)$$

将式(6)、(8)代入到式(4)即可获得进行轧辊轴线偏移补偿后  $h$  和  $r$  的函数关系

$$h = 2\sqrt{r^2 - \left(\frac{x}{A}S_1 + \frac{A-x}{A}S_0\right)^2} \left(\frac{x}{A}S_1 + \frac{A-x}{A}S_0\right) \cdot \frac{\left(\frac{x}{A}L_1 + \frac{A-x}{A}L_0\right) - \sqrt{r^2 - \left(\frac{x}{A}S_1 + \frac{A-x}{A}S_0\right)^2}}{r^2 - 2\left(\frac{x}{A}S_1 + \frac{A-x}{A}S_0\right)^2} \quad (9)$$

### 3 实验结果与讨论

实验系统采用像元中心距离为  $6.5 \mu\text{m}$  的线阵 CCD, 实验标定脉冲当量值为  $0.63 \mu\text{m}$ , 理论上系统的最小分辨率为  $0.63 \mu\text{m}$ , 实际由于各种因素影响, 要小于此分辨率. 实验对  $\phi 1000 \times 2600$  冷连轧机工作辊模型进行检测. 为减小各种因素所造成的误差, 进行多次检测, 对检测结果取平均值. 实验中, 先对静止轧辊进行检测, 轧辊工作时, 再对其按补偿前后两种方式进行检测. 表 1 为从一系列检测点中抽取的 8 个检测点的检测结果.

表 1 检测结果  
Table1 Results of the detecting

Detective points /mm	Static h/mm	Before compensating		After compensating	
		h/mm	Error/ $\mu\text{m}$	h/mm	Error/ $\mu\text{m}$
100.0	341.0	337.6	3.4	338.4	2.6
500.0	347.0	345.1	2.2	345.6	1.7
800.0	354.5	351.4	3.1	352.2	2.3
1 100.0	361.4	364.1	2.7	362.5	1.1
1 400.0	364.9	367.3	2.4	366.1	1.2
1 700.0	357.9	353.7	4.2	356.2	1.7
2 000.0	351.1	348.5	2.6	348.9	2.2
2 400.0	344.3	341.2	3.1	343.0	1.3

CCD 输出信号的处理采用基于梯度强度均值法的浮动阈值法, 利用梯度信息求取合理的阈值, 改善阈值化的鲁棒性和快速性, 解决了去噪、边缘检测和特征信息提取等关键技术, 从而抵消了 CCD 输出视频信号因光源不稳定而造成的误差.

针对检测系统的工作原理, 用 vb 6.0 编写了该系统的软件仿真程序. 如图 7, 经过仿真实验, 获得反射光线在 CCD 上的成像位置, 同时由式(9)计算出理论上的成像位置; 最后, 对轧辊半径  $R$  的变化和反射光线成像位置  $H$  的变化进行数据比较和图像比较.

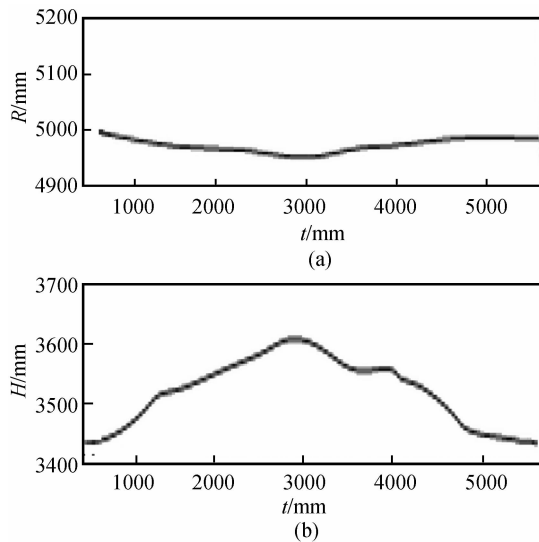


图7 CCD 辊型检测仿真结果

Fig. 7 Simulation result of CCD measurement system for roller shape

通过对  $R$ 、 $H$  的数据和图像进行比较,可以发现  $H$  的变化要比  $R$  的变化明显很多. 这样,可以利用 CCD 阵列获取  $H$  的变化,进而计算出轧辊半径  $R$  的变化. 证明了检测系统实施的可行性.

如果需要更大的放大倍率,可以增加光源偏离垂直入射的距离  $S$  或轧辊轴线与检测平面的距离  $L$ . 另外,也可以在反射光线成像之前增加一级光学系统,以增加该系统的放大倍率.

## 4 结论

本文提出了一种利用线阵 CCD 进行辊型检测的方法,对其基本原理进行了分析,并对检测过程中可能出现的轴线偏移做了分析和补偿. 对补偿前后的检测过程进行了实验研究,设计了该系统的软件仿真程序,分析了获取的实验数据. 实验证明检测系统具有实现简单、放大倍数高、检测准确度高且适时显示性能好等优点. 在低成本情况下,该方法是一种有效的辊型检测方法.

### 参考文献

- [1] CAO Jian-guo, WEI Gang-cheng, ZHANG Jie. VCR and ASR technology for profile and flatness control in hot strip mills [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, **15**(2): 264-270.
- [2] BYON S M, PARK H S, LEE Y. Experimental study for roll gap adjustment due to roll wear in single stand rolling and multi-stand rolling test [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, **22**(5): 937-945.
- [3] GUO Yuan, WANG Yu-tian, DAI Xue-feng, et al. Study on an optical fiber on-line measurement system for roller shape [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **332**(12): 82-85.  
郭媛,王玉田,戴学丰,等. 辊型光纤在线检测系统的研究 [J]. *光电工程*, 2005, **332**(12): 82-85.
- [4] GUO Yuan, WANG Yu-tian. An optical fiber system for on-line detecting roller shape based on neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **22**(4): 416-419.  
郭媛,王玉田. 基于神经网络的辊型光纤在线检测系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, **22**(4): 416-419.
- [5] TAN Lu-wen, LI Jing-zhen, LU Xiao-wei, et al. Design of linear CCD driving circuit with flexible working modes based on the CPLD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 436-440.  
谭露雯,李景镇,陆小微,等. 基于 CPLD 工作模式可调的线阵 CCD 驱动电路设计 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 436-440.
- [6] GARBER E A, SHALAEVSKII D L, KOZHEVNIKOVA I A. Applicability of the laws of elasticity for the determination of the elastic-region length in the deformation zone during cold rolling [J]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2008(3): 205-209.
- [7] WANG Yu-tian, ZHANG Yan-lin, WANG Jin-yu. Oil identification technique based on analysis of three-dimensional fluorescence spectra feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1330-1333.  
王玉田,张艳林,王金玉. 基于三维荧光光谱特征分析的油种鉴别技术的研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1330-1333.
- [8] WANG Bo, BAI Yong-lin, OU YANG Xian, et al. Spectrum data acquisition system based on linear CCD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 441-445.  
王博,白永林,欧阳娴,等. 基于线阵 CCD 的高速光谱信息采集系统的研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 441-445.
- [9] YAO Rui, ZHANG Yan-ning, SUN Jin-qiu, et al. Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star-sky image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 413-418.  
姚睿,张艳宁,孙瑾秋,等. 星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 413-418.
- [10] XIE Yin-zhong, ZHANG Song-lin, ZHANG Bao-zhou. Research on calibration of spectrometers based on linear CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **21**(3): 546-550.  
谢印忠,庄松林,张保洲. 基于线阵 CCD 的光谱仪定标研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, **21**(3): 546-550.
- [11] SONG Ji-dong, ZHANG Wan-zhen, LIN Bin. A new optical angle measurement and compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 354-357.  
宋继东,张万祯,林斌. 一种新的光学角度测量与补偿 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 354-357.

## Compensation for Axes Shifting during Detection of Roller Shape by CCD

GUO Yuan<sup>1</sup>, WANG Yu-tian<sup>2</sup>

(1 *College of Computer and Automation, Qiqihaer University, Qiqihaer, Heilongjiang 161006, China*)

(2 *College of Electric Engineering, Yan Shan University, Qin Huangdao, Hebei 066004, China*)

**Abstract:** Based on the technology of laser-linear array CCD, a kind of high speed and high accuracy method on detecting the roller shape was put forward. Also the composition of the detective system and the operation process were expatiated. Aiming at the axes shifting of the roller during the detecting process, compensation steps were adopted from vertical and parallel the detecting surface. And it enhanced the accuracy of the detecting system effectively. At the same time the gradient intensity averaging method to process the signal of the CCD was adopted, which reduced the influence of the noise to the CCD image contrast, and enhanced the speed of data processing effectively. It also enhanced the accuracy and the resolution of the system remarkably. The experiments prove that the accuracy of the system can reach to the demand of practical production process. It provides a new method for the high speed, accurate and automatic on line detection of the roller shape.

**Key words:** Roller shape; CCD; Axes shift; Compensation