

基于 RBF 神经网络的高精度在线激光测厚算法

韩振松¹, 杨永立¹, 吴树元²

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:为进一步提高单 CCD 双光路激光三角法动态在线测厚系统的测量精度,提出了一种基于 RBF 神经网络的 CCD 靶面上光斑位置与被测物厚度之间函数关系的拟合算法。通过理论分析之后,设计了基于 RBF 神经网络直接拟合 CCD 靶面上两光斑位置信息与被测物厚度之间关系和现有的最小二乘法拟合三次多项式模型方法进行实验对比,两种方法分别得到了一个网络和一个近似数学模型。通过使用十组标准厚度塞尺在不同位置进行验证实验,发现前者方法计算出的厚度值更加靠近塞尺的客观值。实验结果表明,用 RBF 神经网络拟合两个光斑坐标和被测物厚度之间的关系,成功地提高了现有系统精度,鲁棒性好,时间复杂度尚可。

关键词:信息光学;激光测厚;双光路;光斑

中图分类号:TN249;TH744.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.11.004

The online algorithm of high-accuracy laser thickness measurement based on RBF neural network

HAN Zhen-song¹, YANG Yong-li¹, WU Shu-yuan²

(1. Wuhan University of Science and Technology, College of Information Science and Engineering, Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement technology, Ministry of Education, Wuhan 430081, China;

2. Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract:To improve the accuracy of the single CCD dual light path laser triangulation dynamic online thickness measurement system, a method that fitting the relationship between the position of spots on CCD target surface and the thickness of the measured object based on RBF neural network was proposed. After theoretical analysis, the experiments with two methods were carried out and compared, the one is that fitting the relationship between the position of two spots on CCD target surface and the thickness of the measured object based on RBF neural network, the another is that the existing least squares fitting method of three polynomial models, and the two methods get a network and an approximate mathematical model respectively. Experiments are done in different locations through using ten standard thickness gauges, and it is found that the first method is better than the second method obviously. The results show that the method that fitting the relationship between two spots and the thickness of the measured object based on RBF neural network can improve the accuracy of existing system, and it has strong robustness and meets the requirements of time complexity.

Key words:information optics; thickness measurement with laser; double optical paths; facula

作者简介:韩振松(1992-),男,硕士研究生,现在主要从事嵌入式,图像处理,薄膜测厚的研究。E-mail:785241619@qq.com

收稿日期:2017-03-14;**修订日期:**2017-04-14

1 引言

随着现代工业的发展,薄膜、板材类产品也广泛地应用在各行各业,其加工精度及检测精度也变得越来越严,实现高精度动态在线测量不仅可提高生产效率,而且能减少成本和提高性能。

目前实现高精度在线测量常采用发射超声波或 X 射线的方式,其成本高,对人体有害。单 CCD 双光路激光三角测厚使用激光作为发射源,相比其他高精度测厚方式有着健康环保、测量同步等优点^[1-2]。

现有的高精度激光动态在线测厚系统测量精度在 $\pm 5 \mu\text{m}$,精度要求一旦提高便不适用,现需要改进该系统的各个部分使得系统提高测量精度,尽可能提高精度在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 内。

现有的系统计算被测物厚度是采用将 CCD 靶面上两光斑横坐标代入三次多项式,多项式的系数则通过进行光学标定实验计算得出。此方法尚存一些缺点,首先三次多项式是近似该系统的数学模型,与真实数学模型有一定差别。其次最小二乘拟合法将误差都分散到各个方程,测量过程中数据也存在误差,误差偏大的样本组数过多,拟合不真实,存在过拟合且抗干扰差。最后标定过程中用量程内取得的数据去拟合,测量时被测物在量程范围内,但是不在用来拟合的数据区间内,测量出的结果相当于预测,误差较大。

基于此,本文提出了一种基于 RBF 神经网络拟合 CCD 靶面上两光斑坐标与被测物厚度之间关系的方法,将 CCD 靶面上两个光斑横坐标作为网络的输入,被测物的厚度作为输出,设计了新方法 with 现有方法的对比实验。

2 系统整体设计及原理

2.1 系统框图

高精度激光在线测厚系统主要由三部分构成,如图 1 所示。机械结构部分主要由光路结构和运动结构组成。运动控制部分主要作用是承载光学测量机身来回动态扫描。上位机软件数据处理部分主要作用为提取光斑位置信息、标定、计算被测物厚度值。

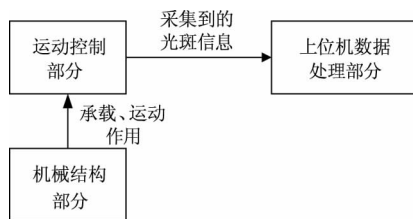


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

2.2 系统原理示意说明

如图 2 所示,上下激光器发出激光,透镜组通过其特性聚焦漫反射光,最后投射在 CCD 靶面形成光斑。被测物的上下表面可被看作为两个相对于中间轴线所在平面分别向上向下移动的距离为 H_1 和 H_2 的两个平面。

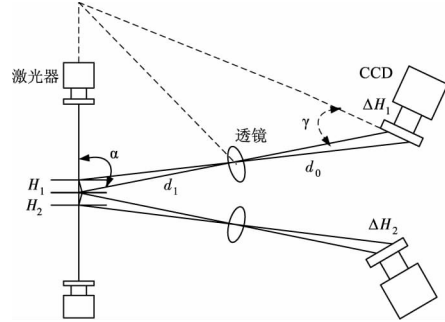


图 2 双光路激光三角法光路示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of dual-optical paths laser triangulation

当被测物从轴线所在平面向上移动 H_1 距离达到上表面位置,光斑发生 ΔH_1 距离的移动在上方 CCD 上, H_1 和 ΔH_1 满足相似三角形^[3]:

$$\frac{H_1 \sin \alpha}{d_1 - H_1 \cos \alpha} = \frac{\Delta H_1 \sin \gamma}{d_0 + \Delta H_2 \cos \gamma} \quad (1)$$

式中, α 为上激光头发射出激光与上透镜轴心线的夹角; γ 为 CCD 表面和上透镜轴心线的夹角; d_1 为等效物距; d_0 为等效像距; H_1 为被测物上表面上移动距离; ΔH_1 为光斑在上方 CCD 移动距离^[4]。

整理可得, H_1 与 ΔH_1 关系如公式(2):

$$H_1 = \frac{d_1 \sin \gamma}{d_0 \sin \alpha + \Delta H_1 \sin \alpha \cos \gamma + \Delta H_1 \sin \gamma \cos \alpha} \times \Delta H_1 \quad (2)$$

同理,被测物下表面向下移动距离 H_2 与光斑在下方 CCD 移动距离 ΔH_2 也有如下关系:

$$H_2 = \frac{d_1 \sin \gamma}{d_0 \sin \alpha + \Delta H_2 \sin \alpha \cos \gamma + \Delta H_2 \sin \gamma \cos \alpha} \times \Delta H_2 \quad (3)$$

由以上推导可得,被测物客观真实厚度表达式为:

$$H = \frac{d_1 \sin \gamma}{d_0 \sin \alpha + \Delta H_1 \sin \alpha \cos \gamma + \Delta H_1 \sin \gamma \cos \alpha} \times \Delta H_1 + \frac{d_1 \sin \gamma}{d_0 \sin \alpha + \Delta H_2 \sin \alpha \cos \gamma + \Delta H_2 \sin \gamma \cos \alpha} \times \Delta H_2 \quad (4)$$

理论上,在被测目标厚度一定时, α 和 γ 两个角度在系统机械结构确定后可通过测量得到。因此

测得 ΔH_1 和 ΔH_2 后,可由式(4)计算待测物料厚度值。

在实际测量中,被测厚不确定,式(4)仅具有理论意义,都是在测得双光斑坐标后,利用拟合模型计算被测目标厚度。

2.3 实际系统组成

如图3所示,待测物料上下表面漫反射激光经过透镜汇聚之后的两光斑成像在同一个 CCD 上,光路结构得到改进。通过光学几何知识可知,在理想情况下^[5],待测物料厚度 h 与 CCD 上两个光斑距离 $|x_1 - x_2|$ 成正比。

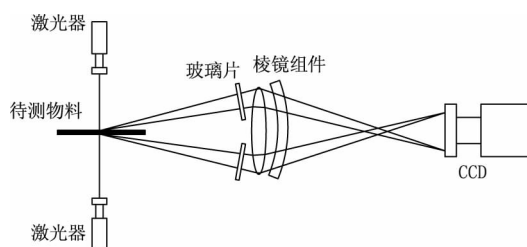


图3 测厚系统等效图

Fig.3 Equivalent diagram of thickness measurement system

如图4所示,将双光路激光三角法中的上下透镜和 CCD 安置在同一测量机身上,既可保证上下光路中图像采集和测量同步性又可优化光路结构^[6]。图4中上下激光头分别发射激光照射到待测物料上,待测物料两侧的漫反射光线首先通过透镜聚焦,再通过两次平面镜反射改变光路,将光斑成像到 CCD 感光面上。



图4 高精度激光在线测厚系统实物图

Fig.4 High-accuracyLaser on-line thickness measurement system

3 光斑中心坐标提取

3.1 光斑坐标提取流程

通过对 CCD 上获取的光斑图像进行处理,可得到两个光斑的中心坐标,进而可求出被测薄膜厚度。光斑坐标提取流程如图5所示,每采集到一幅图片后,首先利用双峰分割算法进行分离背景和目标区域,求每列像素点灰度值之和来确定是否有光斑存在,若存在继续寻找第二个光斑,找到有且只有两个

光斑为止。通过记录每一列像素点灰度值之和,确定灰度值之和最大所对应的列数,截取该列左右一定区域作为目标区域。利用灰度质心法求取两光斑重心坐标,用重心横坐标代替光斑中心横坐标。

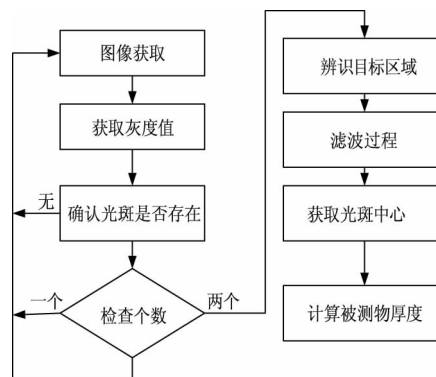


图5 光斑中心坐标提取流程图

Fig.5 Extraction of spot center coordinates of the laser faculae

3.2 图像减噪

CCD 靶面上存在两个光斑,理想情况下,靶面灰度值均为 0,光斑灰度值在横向和纵向呈现高斯分布。实际情况含有噪声,靶面在一个灰度级均匀分布,目标在另一灰度级均匀分布,目标与背景灰度直方图呈近双峰分布,对比度较大。在 CCD 没有出现光斑时,选取整个 CCD 靶面灰度最大值作为阈值 T ,运用双峰分割对图像进行二值预处理以减少噪声带来的影响。

3.3 光斑横坐标获取

图像预处理完之后,如图6所示,采用灰度质心法求出光斑重心,用重心代替光斑中心^[7],其表达式如公式(5):

$$X = \frac{\sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q i \times G(i,j)}{\sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q G(i,j)} \quad (5)$$

式中, i 是像素点横坐标; j 是像素点纵坐标; $G(i,j)$ 是坐标为 (i,j) 处的灰度值^[8]。

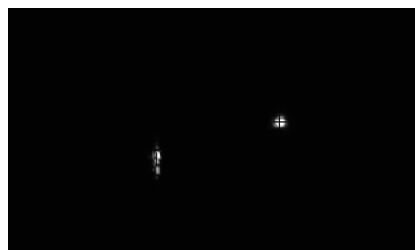


图6 CCD 靶面光斑成像图

Fig.6 The faculaeon CCD target

4 测量系统建模

测量系统能够直接测量的数据只有光斑的位置信息。为简化测量系统,提高测量速度和测量精度,实际测量系统是利用已知厚度塞尺的光斑位置信息反演塞尺厚度的。

系统标定本质就是获取已知厚度塞尺在不同位置下所对应 CCD 上光斑坐标的实验数据,即将已知厚度塞尺放置测量区,调好光路使得 CCD 上有两个清晰且距离合适光斑,获取两光斑坐标。在量程内移动塞尺,光斑也随之移动,再通过数学方法建立塞尺厚度和光斑位置信息的模型。实际测量时,测得光斑位置信息后,即可通过模型计算出被测目标的厚度。

实际测量情况和前面的分析可知,被测物真实厚度与两个光斑之间距离是一个复杂的非线性函数。现有的方法假定被测物厚度值在 0 ~ 1 mm 之间关系满足如下多项式模型:

$$h = Ax_1^3 + Bx_1^2 + Cx_1 + Dx_2^3 + Ex_2^2 + Fx_2 + G \quad (6)$$

其中, x_1 为 CCD 靶面上左光斑的横坐标; x_2 为 CCD 靶面上右光斑的横坐标; h 为待测物真实厚度; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 分别代表模型系数。

为提高系统测量精度,本文提出了基于 RBF 神经网络直接拟合输入 x_1 、 x_2 和输出 h 之间的函数关系的新的拟合方法。

RBF 是一种三层前向网络,第一层为输入层,第二层为隐含层,第三层为输出层。输入层结点个数由系统输入变量信息决定,隐含层的神经元变换函数是一种非负非线性函数在局部范围内,隐含层的神经元个数视具体情况确定,输出层可以看作是隐含层的线性加权。RBF 网络目的是把非线性低维不可分变为高维线性可分,输入空间到隐含层空间的变换是非线性的,而从隐含层空间到输出层空间的变换是线性^[9]。其拓扑图如图 7 所示。

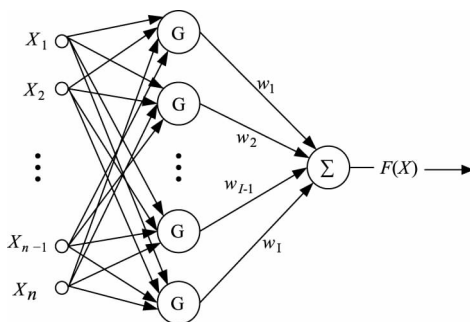


图 7 RBF 神经网络拓扑图

Fig. 7 Topological graph of RBF neural network

假设训练样本是 $\{X_n, Y_n\}$ ($n = 1, 2, \dots, N$), 其中 $X_n = [x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, \dots, x_{nM}]^T$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 为 M 结点的 N 组输入样本, Y_n ($n = 1, 2, \dots, N$) 为 1 个结点的 N 组输出样本, 通过训练得到网络中隐含层基函数的中心及隐含层与输出结点之间的权值。 $\phi(X, t_i)$ 为隐含层基函数, t_i ($i = 1, 2, \dots, D$) 为基函数的中心; w_i ($i = 1, 2, \dots, D$) 为隐含层与输出层之间的权值^[10-12]。

网络训练好后,将 X_n 作为此网络输入,那么输出为:

$$F(X_n) = \sum_{i=1}^D w_i \phi(X_n, t_i) \quad (7)$$

本次实验中隐含层基函数是高斯函数,将两光斑坐标 x_1 和 x_2 作为 RBF 神经网络的输入,被测物厚度值 h 作为 RBF 神经网络的输出,通过调用 MATLAB 工具箱中 newrb 函数。调整网络的参数均方误差 goal 为 0,径向基函数的扩展速度 spread 为 1,神经元最大个数 MN 为 500,两次显示之间添加的神经元数目为 5^[13]。使用 7868 组样本进行训练,经过训练后即得到系统网络。

5 实验结果及数据分析

通过使用 10 组标准厚度塞尺进行系统标定实验,它们分别是 0.05 mm、0.09 mm、0.18 mm、0.28 mm、0.38 mm、0.50 mm、0.65 mm、0.75 mm、0.85 mm、1.0 mm 使每组塞尺在 CCD 上成像光斑移动 6 个不同位置,对标定完成之后的数据进行最小二乘拟合,得出系统标定系数,即得到多项式模型。

用同样的方法测得 7868 组样本对本文提出的神经网络模型进行训练可得本文的神经网络模型。

模型建立后,另取十组标准厚度的塞尺进行实验,塞尺的规格是 0.06 mm、0.13 mm、0.15 mm、0.2 mm、0.28 mm、0.33 mm、0.4 mm、0.55 mm、0.6 mm、0.65 mm,用千分尺测量这十组塞尺待测部分 20 次,求取这 20 次测量值的平均值作为塞尺的真实值^[14],它们真实值分别是 0.0638 mm、0.1357 mm、0.1551 mm、0.1931 mm、0.2838 mm、0.3363 mm、0.4074 mm、0.5554 mm、0.6023 mm、0.647 mm。

每组塞尺在量程内的 6 个不同位置进行测试,提取出每个位置的坐标信息 x_1 和 x_2 ,将它们分别代入多项式模型和神经网络模型之中,即可得到被测目标厚度。图 8 和图 9 分别为标称值 0.28 mm 和标称值 0.19 mm 测量结果。图 10 为全部十组塞尺的厚度测试结果。

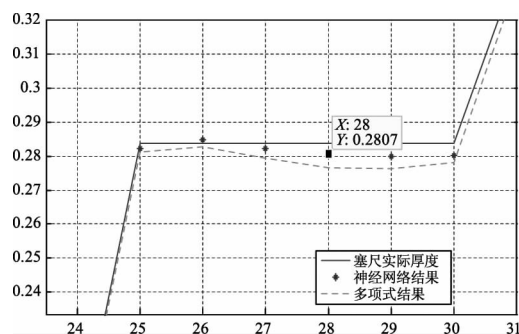


图8 标称值0.28 mm塞尺测量结果

Fig. 8 Measure result when Gauge thickness is 0.28 mm

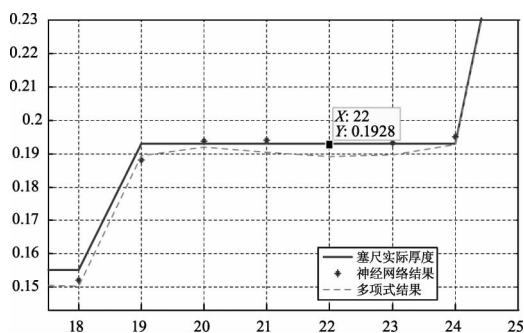


图9 标称值0.19 mm塞尺测量结果

Fig. 9 Measure result when Gauge thickness is 0.19 mm

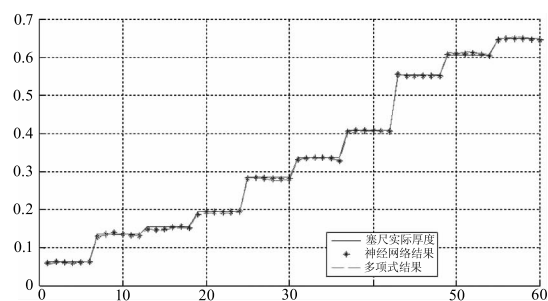


图10 十组塞尺厚度测量结果

Fig. 10 Thickness measure result of ten groups of gauges

利用两种不同的拟合方法,根据每组塞尺在六个位置得到的实验结果,得出它们的在每一个点的均方误差,将每组塞尺实测厚度的六个均方误差值进行算术平均作为此塞尺厚度的整体均方误差,可得表1所示数据。

从表1可以看出,在实验的十组塞尺中,本文提出的算法有8组测量结果的均方误差远优于多项式拟合方法,一组测量结果误差相当,仅有一组结果略差。因此本方法的测量精度优于多项式拟合方法。后期加大神经网络训练的数据量,可进一步提高本文测量方法的测量精度。

表1 塞尺均方误差表

Tab. 1 Mean square error table of Standard thickness gauge

塞尺标称值/mm	0.06	0.13	0.15	0.20	0.28	0.33	0.4	0.55	0.6	0.65
真实厚度/mm	0.0638	0.1357	0.1551	0.1931	0.2838	0.3363	0.4074	0.5554	0.6023	0.6070
多项式方法均方误差/ $\times 10^{-6} \text{mm}^2$	24.811	18.657	47.626	8.253	27.024	16.580	17.053	4.935	25.322	5.710
神经网络方法均方误差/ $\times 10^{-6} \text{mm}^2$	10.442	9.455	28.011	4.986	7.212	17.424	3.634	2.536	7.622	4.801

6 结论

所提的 RBF 神经网络直接拟合作为输入的两光斑横坐标 x_1 、 x_2 和作为输出的被测物真实厚度 h 之间的关系相比现有的最小二乘法拟合三次多项式求近似数学模型方法在提高测量精度方面优势明显。测厚系统应用现有的方法从数据上看,精度 $5 \mu\text{m}$,应用本文提出的新优化算法在绝大部分位置上都比现有的方法更靠近真实值,精度方面整体提高了 $2 \mu\text{m}$,改进之后的系统测量精度能达到 $3 \mu\text{m}$,测量边缘抗干扰性增强明显。还可增加 RBF 神经网络训练样本,得到网络会有更好的性能。通过上位机软件调用已经训练好的 RBF 神经网络进行测量,经统计该算法处理每一幅图的时间为 15ms ,现有的方法处理每一幅图时间为 5ms ,发现提高了精

度牺牲了点速度,时间复杂度目前满足测量需求,能成功地实现了薄膜板材等被测物厚度的测量。

参考文献:

- [1] WANG Chen, ZHAO Bin. Research of thin plate thickness measurement based on single lens laser triangulation [J]. Laser Technology, 2013 37(1): 6-10. (in Chinese)
汪琛,赵斌. 单镜头激光三角法薄板厚度测量研究 [J]. 激光技术, 2013 37(1): 6-10.
- [2] CHEN Haiping. Design of a single - CCD dual-optical path laser triangulation online thickness measurement system for wide-film [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 3-68. (in Chinese)
陈海平. 单 CCD 双光路三角法宽幅膜在线测厚研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 3-68.

- [3] WANG Dan, ZHAO Bin. Laser oblique illumination method for measuring steel plate thickness [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 2033 – 2036. (in Chinese)
王丹, 赵斌. 激光倾斜照明法测量钢板厚度[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2033 – 2036.
- [4] XIONG Zhiyong, ZHAO Bin. Design of a new laser thickness measurement instrument [J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 613 – 617. (in Chinese)
熊志勇, 赵斌. 一种新型测厚装置的设计[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 613 – 617.
- [5] ZHAO Bin, WANG Chen, CHEN Haiping. A thickness measuring instrument by Single lens laser triangulation: China, 102679892[P]. 2012 – 09 – 19 (in Chinese)
赵斌, 汪琛, 陈海平. 一种单镜头激光三角法厚度测量仪: 中国, 102679892[P]. 2012 – 09 – 19.
- [6] ZHOU Liping, GAO Yongsheng, LI Zhu. Triangulation system based on dual non-diffracting beams [J]. Laser Technology, 2001, 29(1): 11 – 13. (in Chinese)
周莉萍, 高咏生, 李柱. 双无衍射激光束三角测量系统[J]. 激光技术, 2001, 29(1): 11 – 13.
- [7] WANG Zhitao, LI Shuyong, TAN Zhiyong. Comparing study on the fitting method of compressor characteristic curve based on BP and RBF neural network [J]. Turbine technology, 2009, 51(2): 94 – 99. (in Chinese)
王志涛, 李淑英, 谭智勇. 基于BP和RBF神经网络压缩机特性曲线拟合方法的研究[J]. 汽轮机技术, 2009, 51(2): 94 – 99.
- [8] DU Zengchun, YANG Jianguo, et al. Thermal error modeling of CNC turning center using radial basis function neural network [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(1): 26 – 29. (in Chinese)
杜正春, 杨建国, 等. 基于RBF神经网络的数控车床热误差建模[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 26 – 29.
- [9] CAO Zhiying, ZHAO Bin. Research of on – line film thickness measurement system based on infrared dual – light path [J]. Laser Technology, 2014, 38(2): 196 – 200. (in Chinese)
曹智颖, 赵斌. 基于红外双光路的薄膜在线测厚系统的研究[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 196 – 200.
- [10] WANG Dongfeng, HAN Pu. Soft-sensing of Coal Load in Ball Mill Tube of Pulverizing System [J]. Journal of instrumentation, 2002, 23(3): 311 – 317. (in Chinese)
王东风, 韩璞. 基于RBF神经网络的球磨机负荷软测量[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 311 – 317.
- [11] FENG Xinxing. The spot image extraction and error compensation for real-time three-dimensional high-precision measurements [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 3 – 69. (in Chinese)
冯新星. 面向实时高精度三维测量的光斑图像提取与误差补偿[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 3 – 69.
- [12] SUN Ruining. Texture depth of asphalt pavement structure detection system based on line laser light [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 3 – 77. (in Chinese)
孙瑞宁. 基于线激光的沥青路面构造深度检测系统[D]. 西安: 长安大学, 2013: 3 – 77.
- [13] LV Fengming. The detecting system of furnace flame based on digital image processing technology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005: 3 – 57. (in Chinese)
吕凤鸣. 基于数字图像处理技术的炉膛火焰检测系统[D]. 北京: 华北电力大学, 2005: 3 – 57.
- [14] CHEN Zhaoling. Harmonic current detection and tracking control of active power filter [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013: 3 – 95. (in Chinese)
陈兆岭. 有源电力滤波器谐波电流检测与跟踪控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013: 3 – 95.