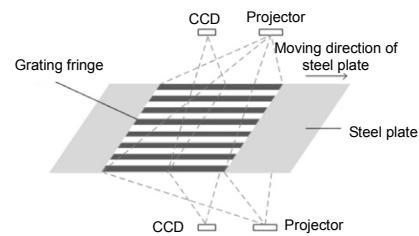


DOI: 10.12086/oee.2018.180032

钢板外观质量检测系统设计

刘桢杞, 金永*

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051



摘要: 针对钢板厚度及其表面缺陷的在线检测问题, 设计了钢板外观质量检测系统。通过线阵CCD相机采集钢板表面的云纹图像, 并对云纹图像进行小波变换, 提取小波脊处对应的小波变换系数的相位信息, 从而实现对钢板的三维重构。实验结果证明: 钢板的厚度测量精度为0.08 mm; 表面缺陷的测量精度为0.2 mm; 在线检测速度为6 m/s。能够同时实现钢板的厚度与表面缺陷的在线检测。

关键词: 光栅投影; 小波变换; 在线检测; 钢板质量检测

中图分类号: TG115.9

文献标志码: A

引用格式: 刘桢杞, 金永. 钢板外观质量检测系统设计[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 180032

Design of inspection system for exterior quality of steel plate

Liu Zhenqi, Jin Yong*

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract: In this paper, in view of the on-line inspection of the thickness of steel plate and its surface defects, a quality inspection system for appearance of steel is designed. The moire image on the surface of the steel plate is collected by a linear CCD camera. The fringe image is transformed by wavelet transform, and the phase information of wavelet transform coefficients corresponding to the wavelet ridge is extracted to reconstruct the 3D profile. Experimental results show that the thickness measurement precision of the steel plate is 0.08 mm and the measurement accuracy of the surface defect is 0.2 mm. The online detection speed is 6 m/s. The on-line detection of thickness and surface defect of steel plate can be realized.

Keywords: grating projection; wavelet transform; online detection; quality inspection of steel plate

Citation: Liu Z Q, Jin Y. Design of inspection system for exterior quality of steel plate[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(7): 180032

1 引言

不锈钢是现代生活的必需品, 被广泛应用于各个领域^[1]。然而在生产不锈钢的过程中由于各种原因会导致不锈钢钢板产生缺陷^[2], 这些缺陷不仅会影响钢

板美观, 而且也会影响不锈钢成品的用户体验。因此, 不锈钢钢板的外观缺陷在线检测对改进不锈钢钢板生产工艺和提高不锈钢钢板质量有重要意义。

人工检测由于错误率高、检测效率低下、人力耗费过大等缺点已经不能适应企业高速化、智能化、低

收稿日期: 2018-01-18; 收到修改稿日期: 2018-04-11

基金项目: 山西省回国留学人员科研自助项目(2016-084)

作者简介: 刘桢杞(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 596517278@qq.com

通信作者: 金永(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事图像处理、在线检测方面的研究。E-mail: jiny@nuc.edu.cn

成本以及高质量的要求。因此，使用机器自动检测成为解决目前钢板缺陷研究领域中研究最多的方法。目前常用的钢板缺陷的检测方法有涡流检测法、射线检测法、机器视觉法等^[3]。涡流检测法^[4]通过检测电涡流阻抗或者检测探头的幅值变化来判断钢板表面的状态，其优点是检测速度快，不受钢板表面杂质的影响；缺点是误检率较高，只能检测钢板表面缺陷，不能检测钢板的厚度。射线检测法^[5]需要放射源，操作复杂并且容易产生安全问题。机器视觉法^[6]是利用计算机对拍摄的图像进行识别判断和测量，虽然其检测速度较快、识别率较高，但其只能检测表面缺陷二维信息，无法检测缺陷的三维信息以及钢板的厚度。上述方法最大的缺点就是无法同时对钢板的厚度以及表面缺陷进行在线检测。光栅投影三维检测技术^[7]目前已经应用于各个领域的三维形貌测量中，其精确度高、成本低，能恢复钢板的三维形貌从而实现了钢板厚度与缺陷的同时检测。光栅投影三维检测技术可分为相移轮廓术、傅里叶轮廓术、小波变换轮廓术^[8-9]等。相移轮廓术虽然有较强的噪声抑制效果，但是需要拍摄至少三幅图像才能重构出钢板的三维轮廓。傅里叶轮廓术是目前研究最热门的方法之一，它只需一幅图像就能重构出钢板的三维轮廓，但其缺乏局部分析能力，同时容易出现频谱泄露，导致基频不能很好地提取，从而引发相位的计算误差，最终无法精确地重构出钢板的三维轮廓。小波变换轮廓术同样只需一幅图像就能完成钢板的三维重构，相比于傅里叶轮廓术，小波变换轮廓术无需提取信号的基频，有更好的局部信号的分析能力，同时也能够像傅里叶变换那样得到信号的整体特征。所以，使用小波变化轮廓术能避免频谱泄露及频谱混叠，在达到更高的测量精度的同时，能够实现钢板厚度及其表面缺陷的高速在线检测。

2 系统原理及设计

2.1 光栅投影原理

光栅投影三维轮廓测量技术是非接触的无损检测技术，它利用数字投影仪投影出一个在空间中呈周期分布的光栅场，并通过计算光栅场的相位信息来得到被测物体的三维形貌，其测量原理如下。

如图 1 所示，光栅投影技术采用三角测量法，投影仪和 CCD 的光心在同一平面上，它们之间的连线 PC 的长度为 d ，CCD 的光轴 CO 垂直于参考平面上的点 O，CO 的长度为 l ，投影仪的光路与 CCD 的光轴

在参考平面 O 点处相交，这样形成一个直角三角形。当参考平面无物体时，由投影仪投影到参考平面的光栅图像可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)] , \quad (1)$$

式中： $a(x, y)$ 为条纹背景光强， $b(x, y)$ 为条纹对比度， f_0 为载波频率， $\varphi_0(x, y)$ 是初始相位。

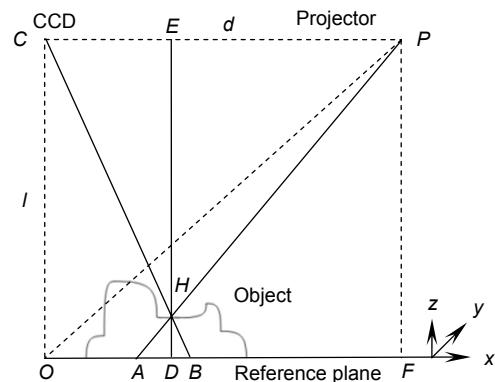


图 1 光栅投影光学系统

Fig. 1 Grating projection optical system

以物体上 H 点为例，此时参考平面上没有物体，CCD 拍摄到的相位点在 B 点；当参考平面有物体时，因为物体高度调制 CCD 拍摄的相位点就在 A 点。这个过程中光栅图像只有相位发生了变化，由此可得因调制产生的相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ ：

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_0(x, y) - \varphi_1(x, y) , \quad (2)$$

式中 $\varphi_1(x, y)$ 是因调制发生变化的相位值。

而 $\Delta\varphi(x, y)$ 与移动的 AB 距离 d_{AB} 之间的关系是：

$$\Delta\varphi(x, y) = 2\pi f_0 |d_{AB}| . \quad (3)$$

由于 ΔAHB 相似于 ΔCHP ，因此得到的 HD 高度 d_{HD} 与 d_{AB} 之间的关系：

$$\frac{d_{HD}}{l - d_{HD}} = \frac{|d_{AB}|}{d} = \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2\pi f_0 d} . \quad (4)$$

因此物体 HD 高度 d_{HD} 与相位差之间的关系如下：

$$d_{HD} = \frac{l \Delta\varphi(x, y)}{\Delta\varphi(x, y) + 2\pi d f_0} . \quad (5)$$

2.2 系统的设计

本文所设计的系统结构如图 2 所示。

在钢板上下表面设置 CCD 与投影仪，同时拍摄钢板上下表面的图像。如此，便可同时获得钢板上下表面及其三维形貌。

2.3 小波变换轮廓术原理

众所周知，小波基函数有很多种^[10]，常见的有 Gaussian 小波、Shannon 小波、Morlet 小波等，它们

各自的特征不同。因此，选择恰当的小波基函数显得尤为重要。小波变换可以看作小波函数与信号比较，相似度越高，其小波系数就越大，这样更有利于小波脊的提取，同时提高了噪声抑制能力^[11]。Morlet 小波是高斯包络下的正弦函数，与投影出的正弦图像有一定的相似性；同时 Morlet 小波具有较好的频域分析能力以及最佳的相位提取效果^[12]。因此，本文选用 Morlet 小波作为小波变换所使用的小波基函数。

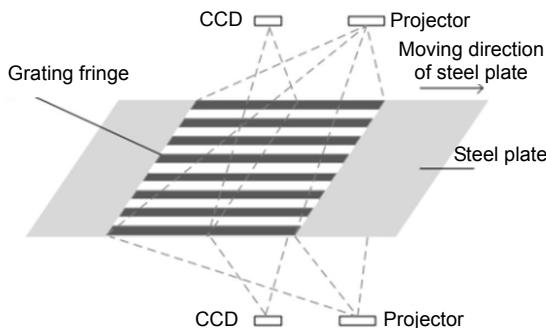


图 2 基于小波变换轮廓术的不锈钢板外观质量检测的成像方法

Fig. 2 Imaging method of appearance quality detection of stainless steel plate based on wavelet transform profilometry

Morlet 小波函数的表达式为

$$M(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_B}} \exp\left(j2\pi f_C x - \frac{x^2}{f_B}\right), \quad (6)$$

其中： f_C 是小波的中心频率， f_B 为带宽参数，根据实际情况选择具体的参数值。

无论是小波变换轮廓术还是傅里叶轮廓术^[13]，都需要从云纹图像中提取相位，而小波变换是通过定位小波脊，来提取小波脊处的相位。小波脊处的相位就是含有物体高度信息的相位。小波脊就是指沿着尺度方向，不同位置的小波变换幅值的最大值的连线形成一条路径，这条路径定义为小波变换的脊，同时该路径的复角就是小波脊处的相位。

本文采用一维小波变换对云纹图像的每行进行处理，以云纹图像任意一行为例，该行可以表示为

$$I(x) = a(x) + b(x) \cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x)]. \quad (7)$$

对式(7)进行一维小波变换：

$$W(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \psi_{s, \tau}^*(x) dx, \quad (8)$$

其中： $W(s, \tau)$ 是小波变换得到的系数， $\psi_{s, \tau}^*$ 表示经过尺度因子 s 和平移因子 τ 伸缩平移得到的小波子序列，“*”表示函数的复共轭。

小波系数的幅值：

$$A(s, \tau) = \sqrt{\{\text{Im}[W(s, \tau)]\}^2 + \{\text{Re}[W(s, \tau)]\}^2}, \quad (9)$$

小波系数的相位：

$$\varphi(s, \tau) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[W(s, \tau)]}{\text{Re}[W(s, \tau)]} \right\}. \quad (10)$$

这样通过式(9)计算出小波系数的幅值，并找到小波系数幅值最大值对应的小波相位，就能提取出小波脊的相位 $\varphi(x, y)$ ，其中 (x, y) 是图像中像素坐标。

由于小波系数的相位是由 \arctan 函数计算得出，此相位被称作截断的相位^[14]，相位分布在 $[-\pi, +\pi]$ 之间。

只有将截断的相位展开成真实的相位才能对钢板进行三维重构，而真实的相位 $\Phi(x, y)$ 由式(11)计算得出：

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2\pi \cdot n(x, y). \quad (11)$$

$n(x, y)$ 由式(12)确定：

$$n(x, y) = \begin{cases} 0, & |\varphi(x+1, y) - \varphi(x, y)| < \pi \\ -1, & \varphi(x+1, y) - \varphi(x, y) \geq \pi \\ 1, & \varphi(x+1, y) - \varphi(x, y) \leq -\pi \end{cases}. \quad (12)$$

理论上，式(11)计算得出的真实相位是唯一的，但是在实际操作中，噪声和缺陷会使得相邻两点的相位差发生变化，使得其中某点的相位展开发生错误，而且这个错误会向后传播，导致整个相位展开的结果和真实相位相差很大。

目前成熟的相位展开方法有：枝切法、质量图导引法、最小二乘法^[15]等。质量图导引法的运算速度很慢，展开时间过长，无法满足钢板在线检测的速度。最小二乘法的展开速度较快，但是展开结果的精度较低，对钢板进行三维重构时失真严重，无法满足钢板在线检测的精度。枝切法运算速度较快、精度较高，满足钢板在线检测的精度和速度的要求。

3 实验结果

3.1 实验场景

图 3 是检测系统的实验平台实物图。

其中 CCD 相机的分辨力为 3300 pixels×2500 pixels，拍摄的图像代表现实钢板的长度为 330 mm，因此图像的分辨力为 0.1 mm/pixels×0.1 mm/pixels。本文采用倾斜投影、垂直拍摄的方式采集钢板表面云纹图像。CCD 与投影仪相距 500 mm，投影仪与参考平面相距 1000 mm。

3.2 实验步骤

具体实验过程如下：

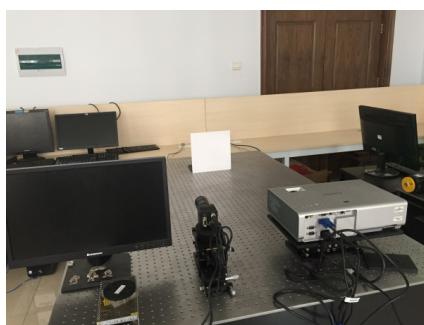


图 3 实验设备与环境

Fig. 3 Experimental equipment and environment

- 1) 使用投影仪投射出标准正弦云纹图到钢板表面，并使用线阵 CCD 相机拍摄钢板表面云纹图像与参考平面的云纹图像；
- 2) 对拍摄的云纹图像进行小波变换，使用式(10)计算出钢板表面云纹图像小波脊相位 $\varphi_1(x, y)$ 与参考平面云纹图像小波脊相位 $\varphi_0(x, y)$ ，从而通过式(2)得到相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ ；
- 3) 使用枝切法展开相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ ，并将展开的相位差带入式(5)可得钢板的三维形貌图。

3.3 实验结果

图 4 为六孔钢板的检测结果。图 4(a)是钢板光栅条纹图，图 4(b)是带有 6 个孔的钢板三维重构结果，使用螺旋测微仪(测量精度 0.01 mm)测量出 6 孔钢板的厚度范围为 9.91 mm~10.05 mm。使用本文方法测得其表面如图 4(c)所示；其厚度结果如图 4(d)所示。

钢板表面划痕缺陷测量结果如图 5 所示。

4 数据分析

在表 1 中前 6 个缺陷为图 4(c)中 6 个圆孔型缺陷，按照图 4(c)中从左至右，从上到下的顺序排列，第 7 个缺陷为图 5 所示划痕缺陷，表中第二列代表缺陷的最大边界像素距离，第三列代表本文所述方法测量的缺陷最大边界距离，第四列代表使用游标卡尺测量的缺陷最大边界距离。

表 2 是使用本文提出的基于小波变换轮廓术的钢板厚度测量结果与螺旋测微仪所测量结果的对比。

使用本文提出的方法测得的最大值与最小值代表钢板的厚度范围，使用螺旋测微仪所测结果的最大值与最小值代表单点测量的最大值与最小值。

表 3 为使用基于小波变换轮廓术的钢板表面缺陷测量结果与游标卡尺测量的表面缺陷大小对比。

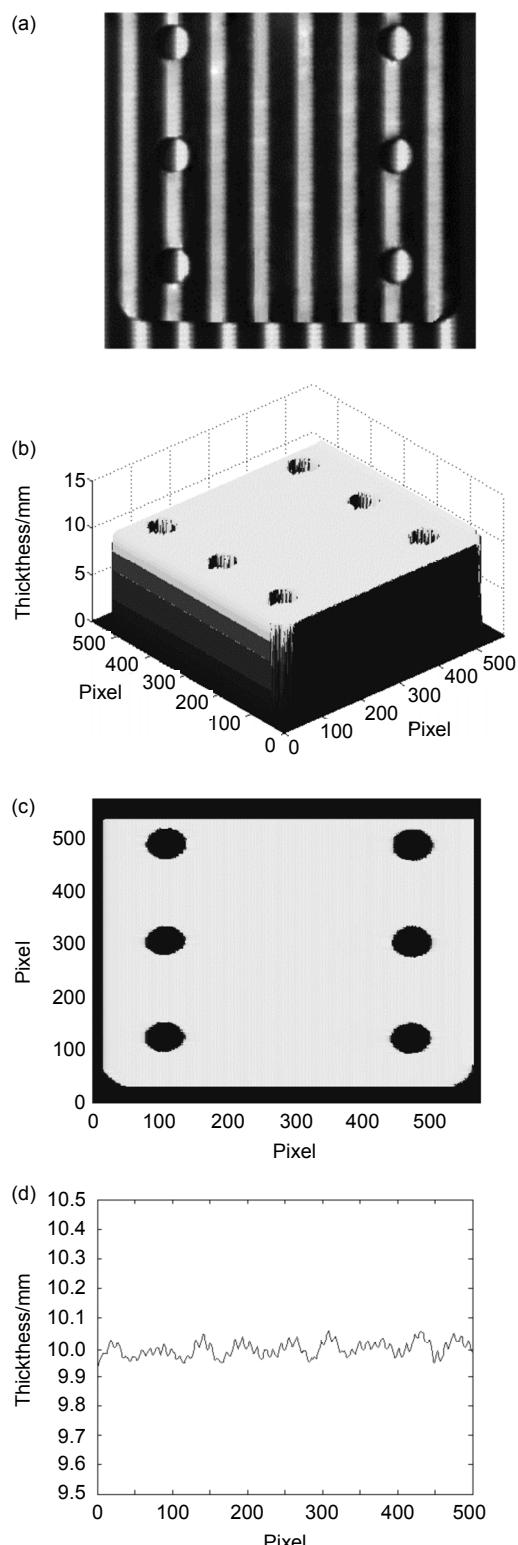


图 4 六孔钢板的检测结果

Fig. 4 Test result of steel plate with six holes

表 3 中数值是测量缺陷的最大边界距离之间的对比。油污、裂纹、划痕类缺陷由于 CCD 相机拍摄时会致使光栅条纹图的颜色发生变化如图 4(a)所示，致



图 5 划痕缺陷的检测结果

Fig. 5 Test result of scratch defect

表 1 表面缺陷的最大边界测量结果

Table 1 The measured maximum boundary of surface defects

Defect type	Maximum boundary pixel distance	Method measurement results in this paper/mm	Measurement results of vernier caliper/mm
Pass defect 1	60	6.0	5.99
Pass defect 2	59	5.9	6.10
Pass defect 3	62	6.2	6.10
Pass defect 4	65	6.5	6.45
Pass defect 5	62	6.2	6.21
Pass defect 6	63	6.3	6.25
Scratch defect	75	7.5	7.26

表 2 两种方法的厚度测量结果

Table 2 The measured thickness of two methods

Plate sample	Measurement results of spiral micrometer/mm		Method measurement results in this paper/mm	
	max	min	max	min
1	7.05	6.98	7.12	6.96
2	8.02	7.99	8.09	8.00
3	9.04	8.99	9.11	8.09
4	10.04	9.98	10.09	9.99
5	11.03	10.97	11.09	10.98
6	12.01	11.98	12.05	11.95
7	13.05	12.96	13.10	13.01
8	14.02	13.97	14.08	13.99
9	15.03	15.00	15.04	14.95
10	16.02	15.97	16.07	15.98

使条纹相位信息中并没包含正确的高度信息，因此只能重构出这几类缺陷的二维平面信息，无法正确测量出这几类缺陷的厚度信息；而凹槽、突泡类缺陷有高度变化，因此可以测量出其缺陷的深度或者高度。综上，只要缺陷能够引起钢板表面条纹的颜色变化就能被识别出来。

从实验结果可看出本文提出的测量方法的钢板厚度检测精度在 0.08 mm 之内，表面缺陷检测精度在 0.2 mm 之内。

本文所使用的计算机配置为：英特尔酷睿 i7 处理器、内存 16 G、显存 6 GB、固态硬盘 512 GB、64 位 windows 7 系统，在 Matlab 上编写运行程序，处理

表 3 两种方法的表面缺陷最大边界距离测量结果
Table 3 The measured maximum boundary distance of two methods for surface defects

Defect type	Measurement results of vernier caliper/mm	Method measurement results in this paper/mm
Scratch defect	50.33	50.2
Oil pollution defect	18.07	17.9
Crack defect	30.90	30.8
Grooves defect	15.53	15.7
Rust defect	46.97	46.8
Air hole defect	11.50	11.7

每幅云纹图像的速度约为 0.0549 s ,每幅云纹图像代表现实钢板的长度为 330 mm ,因此可以满足速度在 6 m/s 之内的在线检测。

5 结 论

根据现有钢板生产工艺 ,本文提出基于小波变换的钢板在线检测方法。相比于现有的钢板在线检测方法 ,本文所提出的方法能够同时测量钢板的厚度与钢板的表面缺陷 ;实验结果证明 ,此方法对钢板厚度的测量精度可达 0.08 mm ,表面缺陷的检测精度可达 0.2 mm ,并满足速度在 6 m/s 之内的钢板在线检测。

基于小波变换的钢板在线检测方法所需设备简单并且容易维护 ,随着硬件的升级以及图像处理算法的改进 ,其检测精度与速度会进一步提升。

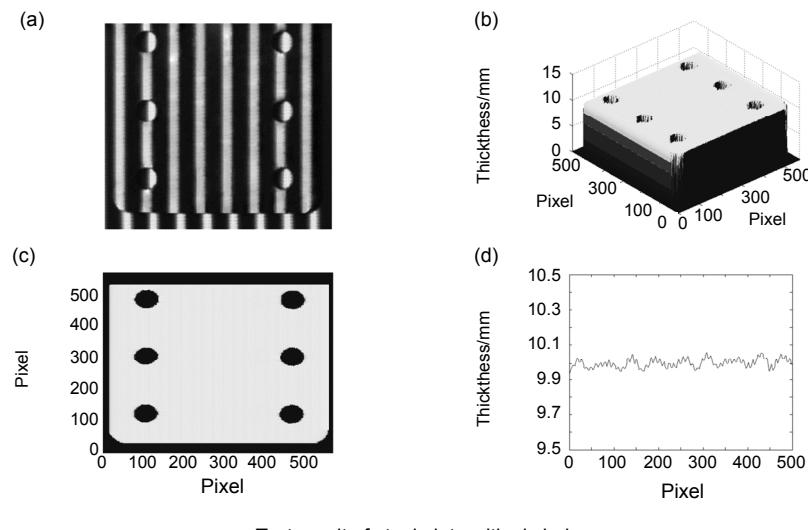
参考文献

- [1] Wu Y. Application of stainless steel and analysis of surface treatment technology[J]. *China Plant Engineering*, 2017(13): 105–106.
吴洋. 不锈钢应用及其表面处理技术分析[J]. 中国设备工程, 2017(13): 105–106.
- [2] Zhang H, Zhang Y J, Han J T, et al. Bright line defects of hot rolled plate for 2205 duplex stainless steel[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **470**: 15–18.
- [3] Li W B, Zhang Q Z, Sun J L, et al. Review of vision inspection technology for surface defect of steel bar[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **740**: 543–546.
- [4] Soni A K, Sasi B, Thirunavukkarasu S, et al. Development of eddy current probe for detection of deep sub-surface defects[J]. *IETE Technical Review*, 2015, **33**(4): 386–395.
- [5] Zhu Q F, Zhang X Y, Li D A. Application of X-ray measuring technique in hot strip mill[J]. *Nondestructive Testing*, 2008, **30**(5): 321–323.
朱秋峰, 张新燕, 李大安. X 射线测厚技术在热轧钢板生产中的应用[J]. 无损检测, 2008, **30**(5): 321–323.
- [6] Song Y H, Wang Z, Fu L H, et al. Improved illumination for steel ball surface inspection system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(11): 13–18, 25.
宋宇航, 王仲, 付鲁华, 等. 钢球表面质量视觉检测仪照明系统优化[J]. 光电工程, 2016, **43**(11): 13–18, 25.
- [7] An D, Chen L, Ding Y F, et al. Optical system model and calibration of grating projection phase method[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(2): 248–254.
安东, 陈李, 丁一飞, 等. 光栅投影相位法系统模型及标定方法[J]. 中国光学, 2015, **8**(2): 248–254.
- [8] Liang M, Zhang Z B, Zhong J G. Phase unwrapping guided by instantaneous frequency for wavelet transform profilometry[J]. *Journal of Optoelectronics-laser*, 2016, **27**(8): 853–862.
梁曼, 张子邦, 钟金钢. 瞬时频率引导的小波变换轮廓相位解包裹技术[J]. 光电子·激光, 2016, **27**(8): 853–862.
- [9] Tao W, Li W R, Zhang D, et al. A selection of wavelet basis function in tem signal processing based on wavelet transform[J]. *China's Manganese Industry*, 2016, **34**(6): 175–176.
陶伟, 李文尧, 张登, 等. 基于小波变换的 TEM 信号处理中小波基函数的选择[J]. 中国锰业, 2016, **34**(6): 175–176.
- [10] Xu D Y, Li S K, Wang X Z, et al. Wavelet ridge extraction method employing a cost function in two-dimensional wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4): 0412006.
徐东瀛, 李思坤, 王向朝, 等. 基于评价函数的二维小波变换轮廓小波脊提取方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(4): 0412006.
- [11] Huang H, Da F P. Novel phase unwrapping method for wavelet profilometry[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(2): 397–404.
黄昊, 达飞鹏. 小波变换轮廓术中快速相位展开方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(2): 397–404.
- [12] Zheng Y, Chen W J, Zhong M, et al. Study of profilometry measurement precision improvement based on morlet wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(11):148–155.
郑毅, 陈文静, 钟敏, 等. 提高基于 Morlet 小波“脊”处理方法的相位解调精度研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**(11):148–155.
- [13] Zhang T D, Lu R S, Zhang S Z. Surface defect inspection of TFT-LCD panels based on 2D DFT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(3): 7–15.
张腾达, 卢荣胜, 张书真. 基于二维 DFT 的 TFT-LCD 平板表面缺陷检测[J]. 光电工程, 2016, **43**(3): 7–15.
- [14] An D. Research of 3D surface measurement based on digital grating projection[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
安东. 基于数字光栅投影的三维表面测量技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [15] Lu Y F, Zhang T, Zheng J, et al. No-reference blurring image quality assessment based on local standard deviation and saliency map[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, **46**(4): 1337–1343.
卢彦飞, 张涛, 郑健, 等. 基于局部标准差与显著图的模糊图像质量评价方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, **46**(4): 1337–1343.

Design of inspection system for exterior quality of steel plate

Liu Zhenqi, Jin Yong*

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China



Test result of steel plate with six holes

Overview: Steel plate, as an indispensable raw material in daily life, has been widely used in various fields. Therefore, it is of great significance to detect the appearance quality of steel plate for improving the production process of steel plate. At present, the mainstream detection methods include eddy current testing, radiographic testing, machine vision detection and so on. These detection methods mainly detect the surface defects of steel plates, and cannot detect the thickness of steel plates while detecting the surface defects of steel plates. In this paper, the surface defects and the thickness of steel plate can be detected at the same time. The 3D reconstruction technique of the grating projection is applied to the steel plate detection, which can reconstruct the three-dimensional contour of the steel plate, and thus achieve the purpose of detecting the surface defect of the steel plate and the thickness of the steel plate at the same time. This paper focuses on the study of the on-line detection of steel plate. In order to meet the speed of on-line detection, wavelet transform profilometry is selected to calculate the phase of the moire image of the surface of steel plate. Both the wavelet transform profilometry and Fourier transform profilometry are the fastest way to calculate the phase of the moire image. But the Fourier transform profilometry occupies the advantage on the whole information of the image, and the wavelet transform profilometry pays more attention to the extraction of the local information of the image. At the same time, the noise resistance performance of wavelet transform profilometry is more effective than that of Fourier transform profilometry. Therefore, wavelet transform profilometry is more suitable for calculating the phase of moire image on steel plate surface. In the aspect of phase unwrapping, branch cutting is chosen as the method of phase unwrapping. Although the quality map guidance algorithm has a high accuracy of phase unwrapping, it is too slow. The phase by point phase unwrapping method has the fastest phase speed, but it is only suitable to unfold the phase without residual error point. Once the phase diagram has a residual error point, the drawing phenomenon will appear in the process of the phase unwrapping, so the error of the reconstructed steel plate will increase sharply. In terms of speed and accuracy, the branch cutting method is suitable for unwrapping the phase calculated from the moire image of the surface of steel plate. In laboratory environment, the accuracy of steel plate thickness detected by this method can reach 0.08 mm, and the accuracy of surface defect detection can reach 0.2 mm and the detection speed can reach 6 m/s.

Citation: Liu Z Q, Jin Y. Design of inspection system for exterior quality of steel plate[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 180032

Supported by Shanxi Scholarship Council of China (2016-084)

* E-mail: jiny@nuc.edu.cn