

文章编号 1004-924X(2016)增-0380-07

## 切割钢丝波高波长自动测量系统

田家田<sup>1</sup>, 赵 辉<sup>1</sup>, 闵学刚<sup>2</sup>, 邓凯鹏<sup>1</sup>, 陶 卫<sup>1\*</sup>

(1. 上海交通大学, 仪器科学与工程系, 上海 200240;

2. 江苏宝钢精密钢丝有限公司, 江苏海门, 226100)

**摘要:** 为了实现对切割钢丝波形与参数的自动化测量, 本文研发了一种基于图像处理的切割钢丝自动测量系统。该系统使用图像测量法对钢丝的单幅图像进行采集、识别与处理, 得出单幅图像中的波高波长参数。然后旋转钢丝, 在钢丝旋转一周的过程中采集多幅图像, 还原钢丝的 3D 结构模型, 分离出钢丝的大小波, 得出钢丝的真实参数。最后采用亚像素细分来提高图像测量的分辨率和重复精度。实验结果表明, 该系统的分辨率可达  $0.1\ \mu\text{m}$ , 大波波高测量精度小于  $\pm 1\ \mu\text{m}$ , 小波波高测量精度小于  $\pm 3\ \mu\text{m}$ , 不仅满足全自动、高重复精度的需求, 在大小波识别分离方面也有着很高的准确率。

**关键词:** 切割钢丝; 自动测量; 亚像素; 波高波长

中图分类号: TH711 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20162413.0380

## Automatic measurement system for wave height and length of sawing wire

TIAN Jia-tian<sup>1</sup>, ZHAO Hui<sup>1</sup>, MIN Xue-gang<sup>2</sup>, DENG Kai-peng<sup>1</sup>, TAO Wei<sup>1\*</sup>

(1. *Department of Instrument Science and Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;*

2. *Jiangsu Baogang Precision Steel Wire Co., Ltd. Haimen, Jiangsu, 226100)*

*\* Corresponding author, E-mail: taowei@sjtu.edu.cn*

**Abstract:** To realize the automatic measurement of waveform and parameters of sawing wire, this paper has researched and developed a kind of automatic measurement system of sawing wire based on image processing. The system collects, identifies and handles single image of steel wire by adopting image measurement method, and parameters of wave height and length in single image are obtained. Then, rotate steel wire, and collect several images in the process of rotation of steel wire for a period. Restore 3D structural model of steel wire; separate big and small waves of steel wire, and obtain actual parameters of steel wire. Finally, adopt sub pixel subdivision to improve resolution ratio and repeated accuracy of image measurement. Experimental results show that: the resolution ratio of this system may reach  $0.1\ \mu\text{m}$ ; the measurement accuracy of big wave height is less than  $\pm 1\ \mu\text{m}$ , while that of small wave height is less than  $\pm 3\ \mu\text{m}$ , which not only meets demands for full automation and high repeated accuracy but also has very high accuracy ratio in the aspect of identification and separation of

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20.

基金项目: 上海市科委资助项目 (No. 15JC1402500)

big and small waves.

**Key words:** sawing wire; automatic measurement; sub pixel; wave height and length

### 1 引 言

在化石燃料日趋减少的现状下,太阳能引起了国内外越来越多的关注。太阳能电池的主要生产材料是硅晶片,其优点是光电转换效率高、寿命长、稳定性好,但价格昂贵<sup>[1]</sup>。近年来半导体技术飞速发展,硅片的制造成本不断下降,然而太阳能电池所用硅片的切割成本较高,甚至占到太阳能电池制造总成本的 30%。

由于硅片价格昂贵,为确保硅片的成材率,切割工艺必须精确地平衡和控制钢丝直径、切割速度以及切割面积,才能够达到切割硅片不破碎,切割后硅片厚度一致等效果<sup>[2]</sup>。因此,对于切割钢丝的质量把控尤为重要。除了传统的直径、椭圆度、破断力等参数测量以外,钢丝波形的波高波长参数,对硅片切割表面的平整度也有较大影响。但目前国内还没有一个公认高效的方法对波高波长参数进行检测。

传统的波高波长测量方法是,操作员手动旋转钢丝,使用图像测量显微镜,通过肉眼判断出钢丝大波与小波所在平面的位置后,进行测量。传统的测量方式不仅效率低下,耗费大量人力,而且重复性差,易引入人为误差。

本文介绍了自主研发的切割钢丝自动测量系统。该系统通过图像检测的方式,在钢丝旋转过程中连续采集钢丝投影图像,不仅能够测量单幅图像中的钢丝参数信息,还能够通过多幅图像还原钢丝的 3D 结构模型,综合得出钢丝的最终参数。该系统具有非接触、高精度、高可靠性等优点,并实现了全自动测量,效率高,操作简单方便。

### 2 理论建模与分析

#### 2.1 钢丝单幅图像

单幅钢丝图像如图 1 所示,图中曲线为一根切割钢丝的两个边缘,可以看出钢丝拥有周期变化的波形。钢丝波长定义为两个波峰之间的距离,如图 1 中  $L$  所示。钢丝波高定义为上边缘波峰到下边缘波谷之间的垂直距离,如图中  $H$

所示。

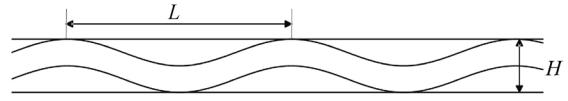
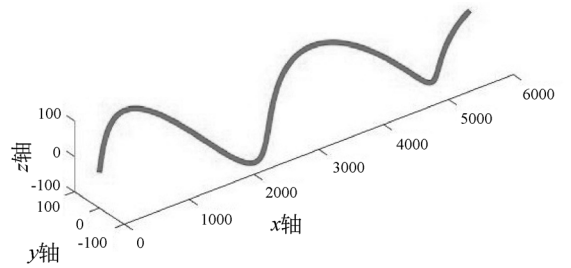


图 1 单幅钢丝图像示意图

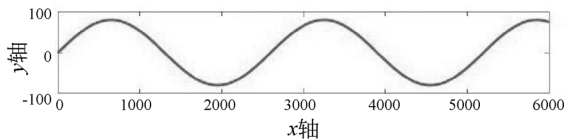
Fig. 1 Schematic diagram of single sawing wire image

#### 2.2 切割钢丝 3D 模型

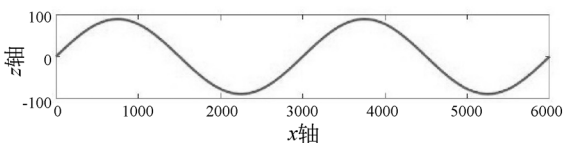
切割钢丝制作过程是将一根直钢丝线依次经过水平和竖直两个维度的齿轮轧制出两个正交的正弦波,经过矢量叠加后的空间 3D 模型如图 2(a)所示。钢丝在  $xoy$  平面和  $yo z$  平面的投影都是正弦曲线,如图 2(b)和 2(c)所示。



(a)轴切割钢丝3D模型  
(a) 3D model of sawing wire



(b)xoy平面投影  
(b) Projection on xoy plane



(c)xoz平面投影  
(c) Projection on xoz plane

图 2 切割钢丝 3D 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of steel sawing wire's 3D model

#### 2.3 切割钢丝 3D 模型的数学分析

使用空间中三维正弦合成曲线来模拟实际的

钢丝模型,数学描述如式(1)所示。在该情况下,推导出钢丝参数测量的基本方法:

$$\begin{cases} y = 80\sin\left[\frac{\pi}{1300}x\right] \\ z = 90\sin\left[\frac{\pi}{1500}x\right] \end{cases} \quad (1)$$

在上述模型下,钢丝的在  $xoz$  平面上分量峰的峰峰值为  $180 \mu\text{m}$ ,将其定义为大波。钢丝在  $xoy$  平面上分量峰的峰峰值为  $160 \mu\text{m}$ ,将其定义为小波。

#### 2.4 切割钢丝的大小波分离

测量的整个过程为在钢丝旋转一周过程中,拍摄出若干幅钢丝在  $xoy$  平面的投影图像,得出钢丝投影图像的峰峰值(波高值)的变化曲线。该过程等效于找寻一个与  $xoy$  平面夹角为  $\theta$  的平面  $\alpha$ ,如图 3 所示,根据钢丝在  $\alpha$  平面上投影曲线的  $C$ ,求出  $C$  的峰峰值  $H$  的变化曲线  $H(\theta)$ :

$$C = y\cos(\theta) + z\sin(\theta), \quad (2)$$

$$H(\theta) = \max C - \min C. \quad (3)$$

当  $\theta_1 = \frac{\pi}{2} + k\pi (k \in Z)$  时,投影图像对应大波图像,此时的波高  $H(\theta_1)$  即为大波波高,求出的波长  $L(\theta_1)$  为大波波长。当  $\theta_2 = \pi + k\pi (k \in Z)$  时,投影图像对应小波图像,此时的波高  $H(\theta_2)$  即为小波波高,求出的波长  $L(\theta_2)$  为小波波长。

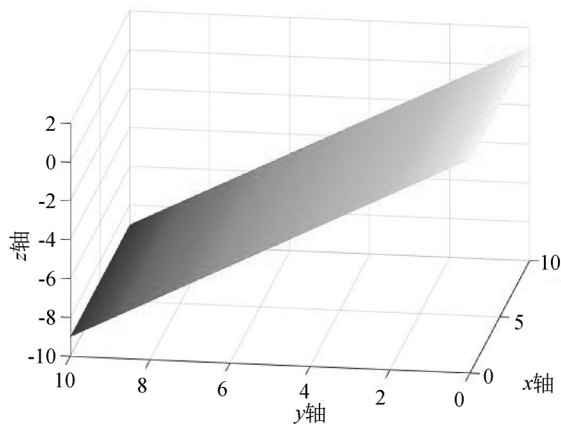


图 3 投影平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of projection plane

当  $\theta$  遍历  $[0, 2\pi]$  的过程中,绘制  $H(\theta)$  曲线如图 4 所示。曲线中的最小值点对应小波波高值,极大值点对应大波波高值。这给钢丝测量提

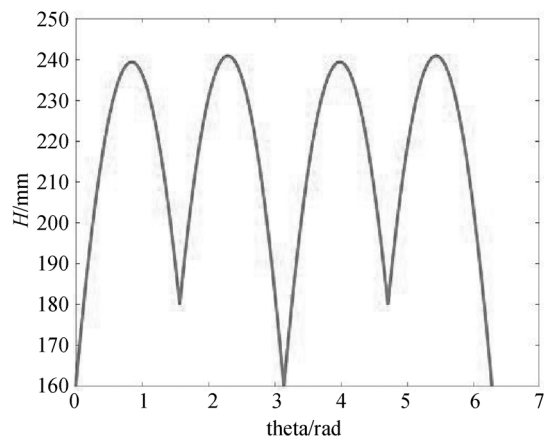


图 4 波高随旋转角  $\theta$  变化曲线

Fig. 4 Curve of waveheight with rotated angle  $\theta$

供了思路,即绘制波高曲线  $H(\theta)$ ,寻找曲线中的极小值和最小值,得出大波与小波波高,并根据大小波出现的位置,反推出大波与小波波长。

### 3 测量系统搭建

图 5 所示为切割钢丝自动测量系统的示意图,整个测量系统包括测量装置和计算机两大部分,使用千兆网线将其连接。测量装置使用了高分辨率的 CCD 相机(像素为  $2452 \times 2056$ , CCD 尺寸为  $2/3''$ ),放大倍数为  $0.8 \times$  的物方远心镜头,可以有效减小畸变系数和透视误差。测量装置的理论物方视场为  $11 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,  $y$  轴方向上的图像坐标系与实际物理坐标系距离转换因子  $3.9 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ,在图像处理过程中使用亚像素细分方法,可以使得测量装置的分辨率小于  $1 \mu\text{m}$ 。图 6 所示为自主研发的切割钢丝自动测量仪实物图。

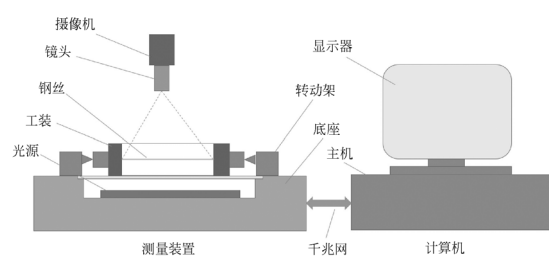


图 5 切割钢丝自动测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of automatic measuring system



图 6 切割钢丝自动测量仪实物图  
Fig. 6 Picture of automatic measuring instrument

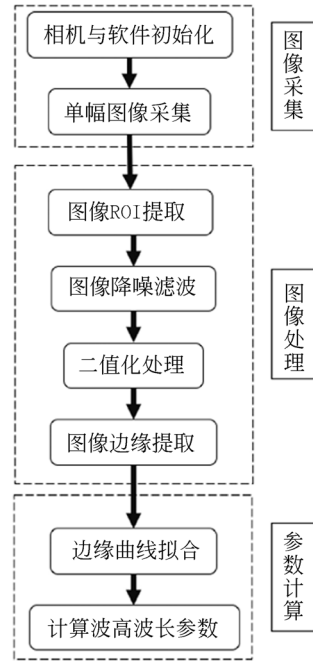


图 7 单幅图像处理流程图  
Fig. 7 Block diagram of single image processing procedure

#### 4 图像处理

图 7 所示为测量系统对单幅图像的处理流程。主要流程为:

- (1)图像采集:对计算机上软件进行初始化,使用 CCD 相机采集灰度图像。
- (2)图像处理:使用霍夫变换将钢丝作为 ROI 提取出来,进行降噪和二值化处理,使用 Canny 算子<sup>[3]</sup>提取钢丝图像的两个边缘。
- (3)参数计算:根据已提取出的边缘,使用正弦函数进行拟合,由拟合所得正弦函数周期与幅值参数,计算得出钢丝的波高和波长。

##### 4.1 提取 ROI

CCD 相机采集的每帧图像高达 500 万像素,若每次都整幅图像传输并处理,不仅会耗费大量的传输时间,浪费大量的运算时间,还可能引入大量无用的噪声信息,对于系统的实时性和精度都有很大影响。

因此在图像处理之前选定感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 十分必要。选定 ROI 会将待处理图像缩小至 ROI 区域内,直接排除了 ROI 区域以外的噪声信息,可以有效地提高系统的精度与稳定性。本文 ROI 区域即钢丝所在区域。在系统初始化后,采集一帧图像,分析得出钢丝所在的 ROI 区域后,设置相机参数,使相机仅采集

钢丝所在的 ROI 区域。减少相机每帧采集的像素数不仅可以提高传输的帧率,也可以有效提高后期的计算效率,缩短仪器的测量时间。

提取出的 ROI 效果如图 8 所示。首先启动相机采集一帧完整图像,使用霍夫变换找到图像中存在的最长直线 L,依据 L 位置提取出钢丝所在区域,得出 ROI<sup>[4-5]</sup>。最后设置 ROI 参数,使相机仅采集 ROI 区域图像,而后开始测量。



图 8 钢丝图像 ROI 提取效果图  
Fig. 8 Picture of ROI extraction

##### 4.2 图像降噪滤波

二维图像特征与参数的准确提取,对三维模型重建、物体定位、空间检测等后期目标有着重要影响。然而从摄像机直接获取的图像会存在很多

噪声,会使图像产生很多虚假的特征点。因此在进行图像处理之前,必须对灰度图像进行滤波降噪处理:

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

离散化的高斯函数如式(4)所示,用它生成一组  $3 \times 3$  的高斯核<sup>[6-7]</sup>:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\pi} e^{-1} & \frac{1}{2\pi} e^{-0.5} & \frac{1}{2\pi} e^{-1} \\ \frac{1}{2\pi} e^{-0.5} & \frac{1}{2\pi} & \frac{1}{2\pi} e^{-0.6} \\ \frac{1}{2\pi} e^{-1} & \frac{1}{2\pi} e^{-0.5} & \frac{1}{2\pi} e^{-1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

将其归一化后得到:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.075\ 1 & 0.123\ 8 & 0.075\ 1 \\ 0.123\ 8 & 0.204\ 3 & 0.123\ 8 \\ 0.075\ 1 & 0.123\ 8 & 0.075\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

使用归一化的高斯核对原图像进行卷积:

$$g(x, y) = \mathbf{H}(x, y) * f(x, y), \quad (7)$$

其中:  $f(x, y)$  为原始图像,  $g(x, y)$  为降噪处理后的图像。

### 4.3 边缘检测

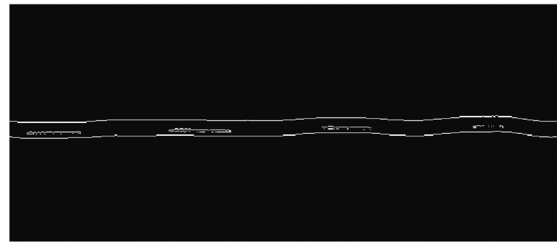
由于切割钢丝测量系统为专用测量设备,能够保证钢丝测量时的背景较为纯净,不会引入人为噪声。钢丝和纯净背景有很大的对比度,即钢丝与背景的灰度值差距较大,在图像的灰度直方图上呈现一个明显的双峰形态。因此选取合理的阈值能够较好地将图像进行二值化处理<sup>[8]</sup>。

本文使用 Canny 算子对二值化后的图像进行边缘的提取。由于钢丝表面光滑,会反射部分日光灯或太阳光,在图像上形成较为明显的光斑,如图 9(a)所示。在使用 Canny 算子的过程中,也会将光斑提取出来,如图 9(b)所示。光斑的存在会对后续的参数测量造成较大误差,为了消除光斑的影响,采用了一种简单高效的边缘滤波算法<sup>[9-10]</sup>。

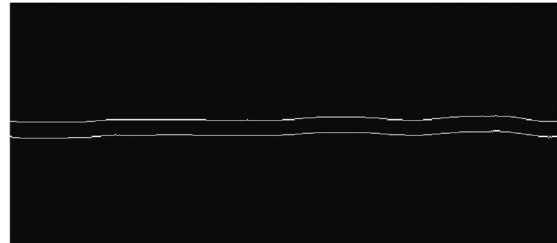
由于能够保证背景的纯净,加上高斯滤波,以



(a) 钢丝原始图像  
(a) Origin image of steel wire saw



(b) Canny算子提取边缘图像  
(b) Edge image extracted by canny operator



(c) 边缘滤波后的边缘图像  
(c) Edge image after edge filtering

图 9 钢丝的边缘提取

Fig. 9 Edge extraction of sawing wire

及合理的二值化阈值,可以消除钢丝以外区域的孤立噪点,即钢丝两条边缘以外不存在有用信息。因此选取一条平行于  $y$  轴的直线  $k$ ,对图像从左向右扫描,将与  $k$  相交的坐标最小与最大的边缘点认定为钢丝的上下边缘,舍弃两个极值之间的点。滤波后效果如图 9(c)所示,通过大量实验证明,该算法简单可行,滤波效果较好。

### 4.4 单幅图像中波高波长提取算法

提取出钢丝单幅图像的上下边缘后,需要对上下边缘进行分析,从而得出波高波长参数。由于钢丝在任意角度的投影,都可以近似视为两条正弦曲线,因此用两条正弦函数拟合实际的钢丝上下边缘,使用最小二乘函数作为拟合效果的评价标准。

已知实际数据集  $D = \{x_i, y_i\}$ ,使用已知数学模型  $y = f(x, \mathbf{p})$  拟合数据集,其中向量  $\mathbf{p}$  为数学模型中的待定参数。为了找寻待定参数向量  $\mathbf{p}$  的最优解,定义实际数据与拟合数据的平方误差和为:

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{N-1} e_i^2(\mathbf{p}), \quad (8)$$

其中:

$$e_i(\mathbf{p}, y_i, x_i) = \|y_i - f(x_i, \mathbf{p})\|, \quad (9)$$

问题转化为求解使  $J(\mathbf{p})$  最小的参数  $\mathbf{p}$ 。

实际数据集即提取后的钢丝边缘,拟合函数模型为  $y = A\sin(\omega x + \varphi) + B$ ,边缘拟合效果如图 10 所示<sup>[11]</sup>。

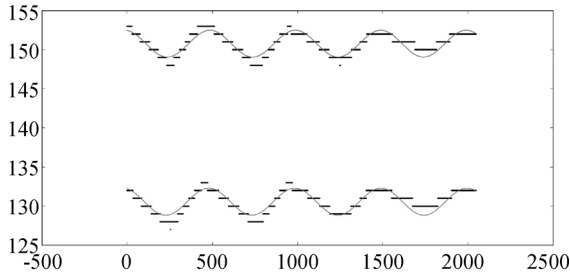


图 10 钢丝边缘拟合效果图  
Fig. 10 Edge fit of steel wire saw

拟合求解后,得到钢丝上下边缘的参数  $p_1 = (A_1, \omega_1, \varphi_1, B_1)$  与  $p_2 = (A_2, \omega_2, \varphi_2, B_2)$ ,由此可求出该幅图像中的波高与波长:

$$H = (A_1 + B_1) - (-A_2 + B_2), \quad (10)$$

$$L = \left(\frac{2\pi}{\omega_1} + \frac{2\pi}{\omega_2}\right)/2 = \frac{\pi}{\omega_1} + \frac{\pi}{\omega_2}. \quad (11)$$

#### 4.5 钢丝大小波分离

针对每幅图像求出了对应的波高  $H$  与波长  $L$  后,在钢丝旋转一周后,绘制出波高  $H$  关于旋转角  $\theta$  的曲线  $H(\theta)$ ,其中的最小值  $M$  即为小波波高,极小值  $N$  即为大波波高。依据大小波出现的位置,可以很简单的在波长曲线  $L(\theta)$  中得出大波与小波波长。

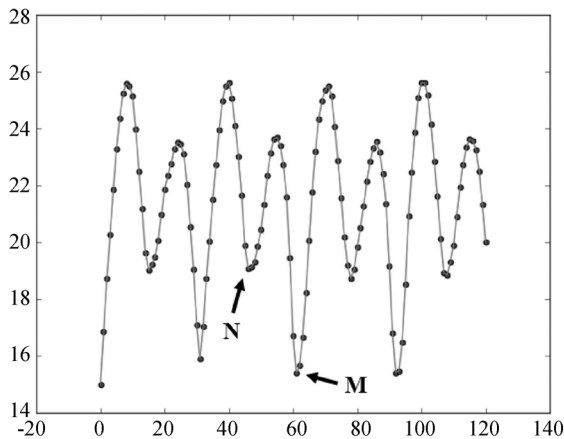


图 11 波高曲线实验数据  
Fig. 11 Experimental result of waveheight curve

#### 4.6 重复性测试

为测试整个系统的重复性,随机截取了一段钢丝,在保证钢丝张力相同的条件下,全自动重复测量 15 次,结果如图 12 和 13 所示。数据表明本系统在实现全自动与高精度的基础上,拥有较高的重复精度,大波波高重复精度小于  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,小波波高重复精度小于  $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

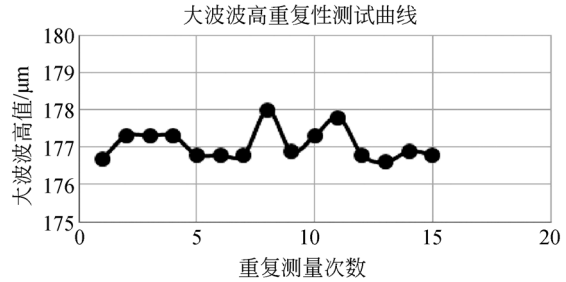


图 12 大波波高重复性曲线  
Fig. 12 Repeatability of big wave height

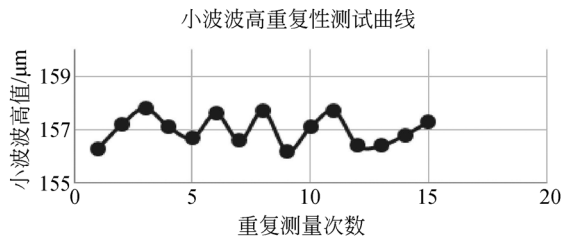


图 13 小波波高重复性曲线  
Fig. 13 Repeatability of small wave height

### 5 结 论

本文针对精密切割钢丝生产过程中,钢丝参数指标难以准确、高效测量的问题,提出了基于计算机视觉的非接触测量方法,立足于钢丝空间旋转的理论模型,研究了钢丝投影图像与空间 3D 模型的对应关系,给出了单幅图像中的图像处理方法、边缘提取与拟合算法。在此基础上,设计并研制出了全自动一体化的切割钢丝自动测量仪,实现了高检测精度与高重复性的要求,在检测速度上更实现了突破性的提升,单根钢丝的检测时间缩短至 30 s 以内。实验结果表明,该系统测量分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ ,大波波高重复测量精度小于  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,小波波高重复测量精度小于  $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

## 参考文献:

- [1] 崔影. 光伏太阳能硅片切割用钢丝生产[J]. 金属制品, 2013, 39(2): 15-18.  
CUI Y. Production of sawing wire for photovoltaic solar wafer[J]. *Metal Product*, 2013, 39(2): 15-18. (in Chinese)
- [2] YAMADA T. Prediction of warping in silicon wafer slicing with wire-saw machine [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 2002, 51: 251-258.
- [3] DENG C X, WANG G B, YANG X R. Image edge detection algorithm based on improved canny operator[C]. In *Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR)*, 2013: 168-172.
- [4] WOODFORD O J, PHAM M T, MAKI A, et al., Demisting the Hough transform for 3D shape recognition and registration [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, 106(3): 332-341.
- [5] 刘桂雄, 申柏华, 冯云庆, 等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 337-340.  
LIU G X, SHEN B H, FENG Y Q. Study of image segmentation based on improved Hough Transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 337-340. (in Chinese)
- [6] YU H, ZHANG X J, WANG S et al., Alternative framework of the Gaussian filter for non-linear systems with synchronously correlated noises[C]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016.
- [7] KEE C W, Ratnam M M. A simple approach to fine wire diameter measurement using a high-resolution flatbed scanner [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(9-10): 940-947.
- [8] 张舜杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 294.  
ZHANG W J, YANG Y L, LI D et al., Key algorithms of automatic image measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 294. (in Chinese)
- [9] SHAFEEK H I, GADELMAWLA E S, ABDEL-SHAFY A A et al., Assessment of welding defects for gas pipeline radiographs using computer vision [J]. *NDT & E International*, 2004, 37(4): 291-299.
- [10] 王建民, 浦昭邦, 刘国栋. 提高图像测量系统精度的细分算法的研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 44-50.  
WANG J M, PU ZH B, LIU G D. The Research of Subpixel Algorithms of Improving the Accuracy of Image Measuring System [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 6(4): 44-50. (in Chinese)
- [11] BELEGA D, DALLET D, PETRI D. Performance comparison of the three-parameter and the four-parameter sine-fit algorithms[C]. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2011: 1-4.

## 作者简介:



田家田(1992—),男,江苏徐州人,硕士研究生,2010年于山东大学获得学士学位,主要从事软件开发与计算机视觉方面研究。E-mail: onlytjt@gmail.com



赵辉(1965—),男,博士,辽宁阜新人,教授,博士生导师,1986年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1989年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1994年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事现代传感器、机器视觉、光电检测技术等方面的研究。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn