DOI: 10.13382/j.jemi.B2003070

# 基于单目视觉的电梯曳引轮磨损检测系统研制*

刘士兴 周启航 马登科 刘光柱
(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院 合肥 230009)

**摘 要**:为了实现对电梯曳引轮绳槽磨损的非接触式精确测量,研制了基于单目视觉技术的曳引轮绳槽磨损检测系统。通过专用的卡具将工业相机固定在钢丝绳内侧,对准各绳槽采集图像。利用 OpenCV 进行图像预处理和绳槽边缘检测,采用最小二乘法进行绳槽边缘数值拟合,再根据物理模型结构对计算值给予遮挡补偿,实现钢丝绳触底距离实时精确测量。实验结果表明,系统测量均方根误差小于 0.07 mm,较传统的塞尺测量拥有高精度和简易性,能够准确测量绳槽磨损下沉量。

**关键词**:曳引轮;单目视觉;边缘拟合;遮挡补偿
**中图分类号**:TP274;TN29 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.4050

# Development of elevator traction sheave wear detection system based on monocular vision

Liu Shixing Zhou Qihang Ma Dengke Liu Guangzhu
(School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract**: In order to achieve non-contact accurate measurement of the mechanical wear of the elevator traction sheave rope groove, a wear detection system for the elevator traction sheave rope grooves was developed based on monocular vision technology. The industrial camera was fixed on the inner side of the steel wire rope through a special fixture, and the images were collected by aligning each rope groove. OpenCV was used for image preprocessing and rope groove edge detection, least squares method was used for rope groove edge numerical fitting, and then according to the physical model structure, the calculated value was compensated for the occlusion to achieve real-time accurate measurement of the bottoming distance of the wire rope. The experimental results indicated that the RMSE of system measurement is less than 0.07 mm, the system has higher accuracy and simplicity than traditional manual measurement methods, and can be used to accurately measure the amount of wear and sink of the sheave groove.

**Keywords**: traction sheave; monocular vision; edge numerical fitting; occlusion compensation

## 0 引 言

曳引式电梯是生活中使用最为广泛的一种电梯。曳引轮是为轿厢提供曳引力的重要组成动力部件,其可靠度对电梯的安全运行极为重要。目前,有关电梯曳引轮维护更换的国内现行标准是 GB/T 31821-2015《电梯主要部件报废技术条件》和 TSG T7001-2009《电梯监督检验和定期检验规则——曳引与强制驱动电梯》。

电梯运行所需曳引力是通过钢丝绳与绳槽摩擦产生的,绳槽磨损量超标,钢丝绳将发生打滑以致无法提供曳引力,可能导致冲顶、溜梯等电梯事故的发生。在电梯正常使用过程中绳槽产生磨损,使钢丝绳到绳槽底间距不断变小。当绳槽的磨损下沉量超过 4 mm 时,将对曳引轮的正常运转产生影响[1-3]。目前,对于曳引轮绳槽磨损情况的检测,通常以目视法、塞尺测量法以及橡皮泥或塑性胶法为主[4],这些方法测得数据精度低且操作复杂。李继波等[5]发明了一款结构简单的接触式高精度测量仪,但仍具有人工随机误差。孙悦[6]基于声发射特征方法对曳引轮磨损检测进行了研究,设备自动化程度高但不涉及磨损量尺寸评估。陈建勋等[7]基于激光三角法原理研制了非接触式曳引轮磨损检测仪,采用步进电机调

收稿日期:2020-04-12 Received Date: 2020-04-12
*基金项目:安徽省质量技术监督科技计划项目(2018AHQT26)资助

节相机与绳槽相对位置,但是未能考虑到支架因曳引轮装有保护外壳而无法固定的问题,并且该方法受杂光影响较大。为此有必要对非接触式曳引轮磨损测量方法进行改进。

非接触式光学测量方法,主要有时间飞行法[8]、相移法[9]、激光三角法[10]等,按相机数量划分则有多目视觉法[11]和单目视觉法[12]。单目视觉测量方法采用单个相机搭建监检测系统,具备系统结构简单、低成本的优势。相比多目系统,避免了多幅图像因遮挡而无法配准的问题。同时减少了处理器的任务量,提升了系统的实时性。本文基于单目视觉原理和图像处理技术,研制了一种基于单目视觉的电梯曳引轮绳槽磨损检测系统;以半径 200 mm、绳径 10 mm、五槽型带切口半圆槽的曳引轮为检测对象,采集钢丝绳与绳槽底部间隙的图像,通过轮廓匹配和边缘拟合算法得出测量值[13],并予以遮挡补偿,实现了曳引轮钢丝绳触底距离的非接触式测量,具有精度高、测速快、便于安装、低成本等优点。

## 1 系统测量原理

常见的曳引轮绳槽主要分为半圆槽、V 型槽、带切口的半圆槽和带切口的 V 型槽 4 种类型。本文以主流的带切口半圆槽规格的曳引轮为研究对象,其绳槽截面如图 1 所示。

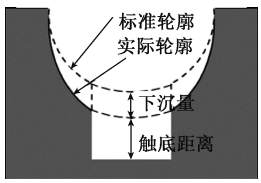


图 1 曳引轮绳槽截面

Fig. 1 Cross section of rope groove of traction sheave

### 1.1 图像采集系统设计

单目视觉小孔成像模型能够满足曳引轮绳槽间隙测量图像采集率计算的需求。式(1)所示为该模型的光学透镜成像比例关系,其符合相似三角形原理[14]。

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

$$\frac{u}{w_u}=\frac{v}{w_v} \tag{2}$$

式中:$u$、$v$ 分别对应摄像机的物距和像距;$f$ 镜头焦距;$w_u$ 目标物体实际尺寸;$w_v$ 目标物体在相机传感器中的投影尺寸。曳引轮在未磨损情况下,绳槽底部到钢丝绳外缘最大间距为 6 mm,当触底距离小于 3 mm 时需严密监测。根据式(1)、(2)分析图像传感器在不同物距下像素单元尺寸,结果如表 1 所示。

**表 1 图像传感器像元边长**

**Table 1 Analysis of camera pixel side length**

| 物距 | 焦距/μm | |
|---|---|---|
| | 20 mm | 30 mm |
| 300 mm | 3.571 | 5.556 |
| 400 mm | 2.632 | 4.054 |
| 500 mm | 2.083 | 3.191 |
| 600 mm | 1.724 | 2.632 |

为满足曳引轮绳槽磨损检测系统 0.05 mm 磨损量分辨率的要求,检测系统采用传感器像元尺寸为 2.2 μm×2.2 μm 的 500 万像素 CMOS 黑白工业相机,型号为 MV-GE500 M-T,像素尺寸为 2 592×1 944,镜头焦距在 20~30 mm 可调。相机在物距 300~400 mm 满足测量精度要求,实际测量时相机物距设定为 300 mm。

### 1.2 检测系统的标定原理

单目视觉摄像机模型如图 2 所示,$O_c$ 为相机光心,$X_c$、$Y_c$、$Z_c$ 为成像坐标系三维坐标轴。$M'$ 表示相机的成像平面,$M$ 是为方便直观计算而假设的图像平面。待测点 $P$ 通过镜头投影到图像传感器对应的点 $P'$。

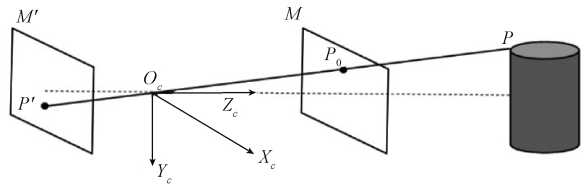


图 2 摄像机坐标系模型(针孔相机模型)

Fig. 2 Model of camera coordinate system (pinhole camera model)

为达到要求的测量精度,需要通过标定实验获取相机内部参数,以便通过坐标转换实现测量。本文采用张氏棋盘格标定法进行系统标定,选用尺寸为 15 mm×15 mm、12×9 规格棋盘格图案的标定板,由摄像机模型几何学关系以及像素坐标系与摄像机坐标系之间的转换关系[15-16],得出:

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{f}{\mathrm{d}x}&0&u_0&0\\0&\frac{f}{\mathrm{d}y}&v_0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}&\boldsymbol{T}\\\boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_1\boldsymbol{M}_2\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:$Z_c$ 表示相机物距;$u$、$v$ 为像素坐标系下待测点坐标;$f$ 为相机镜头焦距;$\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$ 为图像采集传感器像素单元的实际物理尺寸;$u_0$、$v_0$ 为像素坐标系原点到图像坐标系原点的距离;$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{T}$ 表示外参矩阵的旋转矩阵与平移向量,包含摄像机坐标系到世界坐标系的转换关系;$X_w$、

$Y_w$、$Z_w$ 表示待测点在世界坐标系下坐标;其中 $\boldsymbol{M}_1$ 是相机的内参矩阵,包含相机固有的内部参数信息; $\boldsymbol{M}_2$ 为外部参数矩阵,取决于相机摆放位置和姿态,以及世界坐标系的选取。

## 2　曳引轮检测系统平台构建

该系统结构如图 3 所示,主要由计算机、控制模块、图像采集平台组成。图像采集平台包括工业相机、照明光源和安装卡具,工业相机通过千兆网线和计算机进行连接;控制模块包括微处理器和控制继电器。检测过程中,工业相机设置为硬件触发模式;当控制模块接收到计算机控数据采集指令时,在继电器输出端产生边沿触发信号控制工业相机进行图像采集,并通过千兆网线将采集的图像文件传输至计算机端做进一步处理。

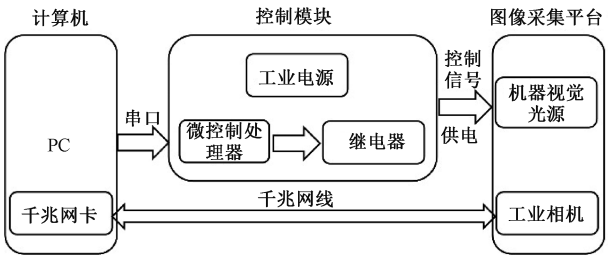


图 3　检测系统硬件结构

Fig. 3　Hardware structure of the detection system

模拟电梯机房搭建在实验室环境下的曳引轮检测实验装置,如图 4 所示。工业相机和照明光源安装在专用支架上,并固定在钢丝绳内侧,通过在水平方向上调节工业相机位置,使相机对准曳引轮各绳槽分别进行图像摄取。

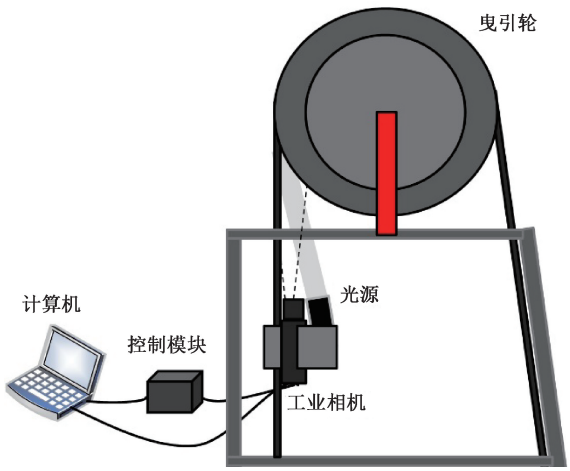


图 4　曳引轮检测实验装置

Fig. 4　Principle of traction sheave detection system

曳引轮绳槽测量软件流程如图 5 所示,该测量软件采用 OpenCV3(开源计算机视觉库)基于 Visual Studio 2017 平台开发曳引轮绳槽磨损量测量软件,利用 QT 库开发检测系统操作界面。该软件能够在线完成图像采集控制、系统标定、绳槽轮廓匹配以及边缘检测拟合,并能够实现对绳槽间隙受遮挡部分的补偿计算,实现了高精度实时检测。

图 5　曳引轮绳槽测量软件流程

Fig. 5　Measurement software flow

## 3　曳引轮绳槽磨损检测算法

### 3.1　轮廓定位与边缘拟合计算

首先采用迭代阈值法进行图像分割[17],然后通过连通域标记法对二值化图像进行轮廓检测[18]。再采用种子填充法对相连的同色区域标记,记录边界点坐标值,得出连通域的边缘坐标集合。对各轮廓坐标集合计算轮廓包围像素面积,其中像素面积等于对应连通域标记的像素点数。计算各轮廓包含像素点数记为轮廓面积,根据轮廓像素面积大小排序,保留面积较大的轮廓从而去除干扰光对下一步图像处理的干扰。

为了完成轮廓的筛选,定位目标绳槽间隙轮廓,采用一种不变矩的匹配方法。以标准轮廓形状作为模板,通过连通域标记法检测出模板和待测图像中全部轮廓,计算模板轮廓和待测图像中各轮廓的不变矩并比较其相似度。计算轮廓的不变矩[19-21],首先根据式(4)~(6)计算离散情况下 $(p+q)$ 阶几何矩和中心矩。

$$m_{pq}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}m^p n^q f(m,n) \tag{4}$$

$$\mu_{pq}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(m-\bar{x})^p(n-\bar{y})^q f(m,n) \tag{5}$$

其中, $\bar{x}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}mf(m,n)/\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}f(m,n)$; $\bar{y}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}nf(m,n)/\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}f(m,n)$。

$(m,n)$ 表示图像中像素点的坐标值,$f(m,n)$ 表示该坐标像素点的灰度值。根据式(6)归一化中心矩:

$$\eta_{pq}=\mu_{pq}/\mu_{00}^{(p+q)/2} \tag{6}$$

导出一组 7 个不变矩,并根据如下相似度公式计算轮廓相似度,确定目标绳槽间隙轮廓。

$$S(A,B)=\sum_{i=1}^{7}\left|\frac{\varphi_i^A-\varphi_i^B}{\varphi_i^A}\right| \tag{7}$$

边缘拟合过程如图 6 所示,取目标绳槽间隙轮廓的

最小包围矩形作为 ROI 区域进行边缘检测,经各边缘检测算子检测实验对比,选取检测效果较好的 Sobel 算子。对检测结果进行滤波和迭代阈值化,并采集绳槽轮廓边缘点,利用最小二乘法对钢丝绳和绳槽底面边缘点分别进行二次曲线和直线拟合[22-23]。图 7 所示为对绳槽边缘点拟合结果,确定了钢丝绳外缘与绳槽底部边缘之间最短线段。

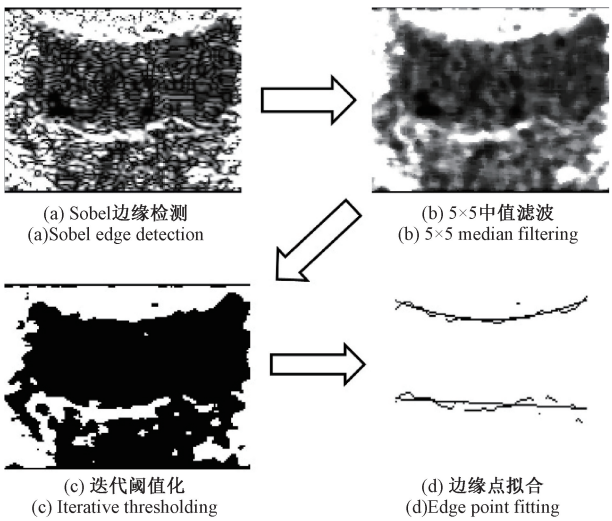


图 6 绳槽边缘拟合算法

Fig. 6 Fitting algorithm of rope groove edge

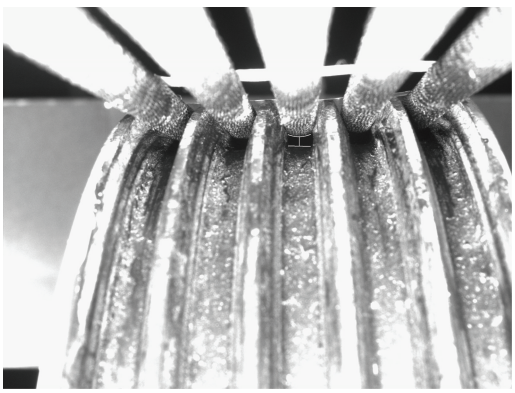

图 7 目标绳槽间隙拟合结果

Fig. 7 Fitting result of target rope groove gap

### 3.2 绳槽遮挡补偿量的计算

曳引轮绳槽底部表面为曲面,工业相机在拍摄时绳槽底部对绳槽间隙构成遮挡,如图 8 所示,其中,$R$ 为钢丝绳外缘到曳引轮圆心距离;$\theta$ 为绳槽对相机拍摄的遮挡长度;$r$ 为绳槽底部到曳引轮圆心距离;$Z$ 为相机垂直方向物距;$\delta$ 为绳槽槽底到钢丝绳外缘间距;$L$ 为相机光心到钢丝绳的距离;$\delta'$ 为相机拍摄待测区域的可见长度。

以曳引轮圆心为坐标原点建立坐标系,则相机受绳槽底部遮挡情况下拍摄待测区域的边缘坐标为 $(r+\theta,0)$,相机光心坐标 $(R-L,Z)$。代入直线方程 $y=kx+b$,设相机光心点与相机拍摄受遮挡点的连线上任意一点的坐标为 $(x_0,y_0)$,则有如下:

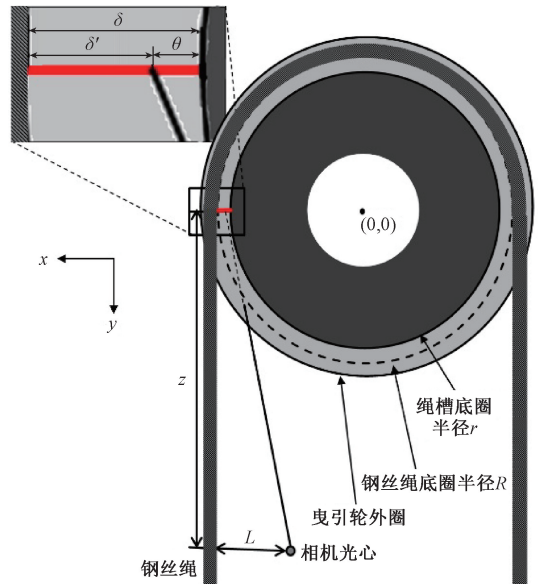


图 8 绳槽底部遮挡分析

Fig. 8 Occlusion analysis of the bottom of the rope groove

$$y_0=-\frac{Z}{(r+\theta)-(R-L)}x_0+\frac{(r+\theta)Z}{(r+\theta)-(R-L)} \tag{8}$$

由于相机光心与接触面极限可视点的连线,到曳引轮圆心的距离为 $r$,圆心到连线距离表达式为:

$$\frac{|-(r+\theta)Z|}{\sqrt{Z^2+(r+\theta-R+L)^2}}=r \tag{9}$$

由 $R=\delta+r,\delta=\delta'+\theta$ 可得表达式:

$$Z^2(r+\theta)^2-r^2(L-\delta')^2-r^2Z^2=0 \tag{10}$$

对于直径 400 mm 曳引轮,曳引轮绳槽底部与圆心轴距离 $r=183.5$ mm。在系统检测过程中,相机光心到钢丝绳距离 $L=21$ mm,当取物距 $Z=300$ mm 时,测量值与补偿值关系为:

$$\theta\approx 0.612\sqrt{(21-\delta')^2+300^2}-183.5$$

为了抵消绳槽底部遮挡影响,根据实际物距和计算结果对测量值 $\delta'$ 进行补偿,使最终计算结果趋近于绳槽间隙真实值 $\delta$。对绳槽间隙测量计算并予以补偿,结果如图 9 所示。

## 4 检测系统的测量精度评价

为验证检测系统测量精度,采用迈德威视的 500 万像素、分辨率 2 592×1 944 的 CMOS 黑白工业相机采集图像。测量精度评价以分辨率 0.01 mm 的高精度电子数显

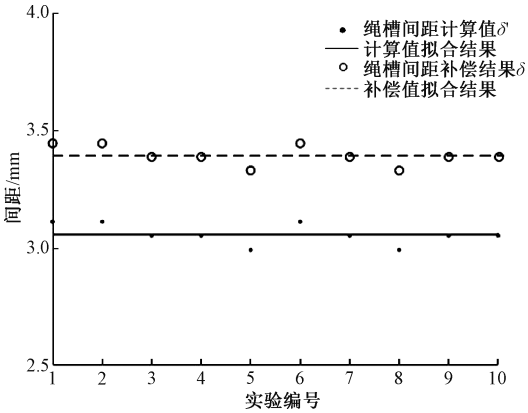


图 9　绳槽间隙计算值与补偿结果

Fig. 9　Calculation values and compensation results of groove gap

游标卡尺为标准长度进行对比实验,游标卡尺数显值为标准值。以游标卡尺的外测量爪间隙模拟绳槽间隙进行检测,采集游标卡尺外测量爪的图像,通过测量系统的图像处理算法确定游标卡尺外测量爪间隙边缘坐标,计算测量结果与标准值进行对比。

实验中相机物距为 300 mm,分别调节游标卡尺在 2~6 mm 取 9 个数值作为标准值,对各测量数值点重复 10 次采集图像进行非接触测量。如表 2 所示,检测系统间隙测量结果的均方根误差最大为 0.07 mm,相对误差率不超过±0.75%,满足绳槽间隙测量的精度需求。

**表 2　检测系统的测量对比实验结果**

**Table 2　Results of comparison measurement of the detection system**

| 编号 | 标准值/mm | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.00 | 2.20 | 2.40 | 2.60 | 2.80 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 |
| 1 | 1.99 | 2.22 | 2.42 | 2.63 | 2.82 | 3.07 | 4.08 | 4.96 | 5.96 |
| 2 | 2.05 | 2.22 | 2.36 | 2.57 | 2.76 | 3.07 | 4.02 | 4.96 | 5.97 |
| 3 | 2.05 | 2.22 | 2.36 | 2.57 | 2.76 | 3.07 | 4.02 | 5.02 | 5.97 |
| 4 | 2.06 | 2.28 | 2.49 | 2.63 | 2.89 | 3.07 | 4.02 | 4.90 | 5.97 |
| 5 | 1.94 | 2.28 | 2.49 | 2.63 | 2.83 | 3.01 | 3.96 | 4.96 | 5.97 |
| 6 | 2.00 | 2.09 | 2.36 | 2.57 | 2.83 | 3.01 | 4.02 | 4.96 | 5.97 |
| 7 | 2.00 | 2.22 | 2.42 | 2.57 | 2.83 | 3.01 | 4.02 | 4.96 | 5.91 |
| 8 | 2.00 | 2.22 | 2.42 | 2.57 | 2.76 | 2.89 | 3.96 | 4.97 | 5.97 |
| 9 | 2.06 | 2.15 | 2.36 | 2.57 | 2.83 | 2.89 | 3.96 | 4.97 | 5.92 |
| 10 | 2.00 | 2.15 | 2.36 | 2.57 | 2.76 | 3.01 | 4.03 | 5.03 | 5.98 |
| 均方根误差 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| 相对误差率/% | 0.75 | 0.23 | 0.17 | −0.46 | 0.25 | 0.33 | 0.23 | −0.62 | −0.68 |

## 5　结　论

针对电梯曳引轮绳槽磨损情况的检测需求,在分析国内常见的电梯曳引轮磨损检测方法得基础上,提出了一种基于单目视觉的电梯曳引轮磨损检测系统,实现了基于轮廓形状匹配与边缘拟合算法的绳槽磨损量的非接触测量,具有很高应用价值。所设计的检测系统利用单目相机获取曳引轮绳槽与钢丝绳间隙图像,采用 OpenCV 进行图像预处理,基于不变矩形状特征匹配定位绳槽间隙位置,利用最小二乘法对绳槽间隙进行边缘拟合,通过理论模型分析绳槽间隙图像中受遮挡部分,实现对计算值的补偿。实验结果表明,基于单目视觉的曳引轮磨损量检测系统能够实现对目标绳槽间隙的精确定位,在 2~6 mm 的测量范围内,检测系统间隙测量结果的均方根误差小于 0.07 mm,相对误差在±0.75%以内。

## 参考文献

[1] 王河,邹皓,陈德平. 电梯曳引轮轮槽磨损检验方法分析[J]. 技术与市场,2017,24(11):158-158.
WANG H, ZOU H, CHEN D P. Analysis of the inspection method for wheel groove wear of elevator traction sheaves [J]. Technology and Market, 2017, 24(11): 158-158.

[2] 梁坤. 浅谈曳引式电梯轮槽磨损原因及预防措施[J]. 化工管理,2018(11):228-228.
LIANG K. Talking about the causes of wheel groove wear of traction elevator and preventive measures [J]. Chemical Engineering Management, 2018 (11): 228-228.

[3] 于克勇,徐文晋. 电梯曳引钢丝绳疲劳寿命研究[J]. 金属制品,2014,40(4):59-66.
YU K Y, XU W J. Research on fatigue life of elevator traction wire rope [J]. Metal Products, 2014, 40(4): 59-66.

[4] 吴周立,陈建勋,林晓明. 电梯曳引轮轮槽磨损状况检验方法及研究[J]. 中国设备工程,2019,35(9):115-116.
WU ZH L, CHEN J X, LIN X M. Inspection method and research on the traction wheel groove wear of elevators [J]. China Equipment Engineering, 2019, 35(9): 115-116.

[5] 李继波, 李文鹏. 电梯曳引轮绳槽磨损量测量仪的研制[J]. 起重运输机械, 2017(1): 71-74.
LI J B, LI W P. Development of a measuring device for the amount of rope groove wear on elevator traction wheels [J]. Hoisting and Transportation Machinery, 2017 (1): 71-74.

[6] 孙悦. 基于声发射特征的电梯曳引轮磨损分析及寿命预测[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(4):60-62.
SUN Y. Elevator traction wheel wear analysis and life

prediction based on acoustic emission characteristics [J]. Electromechanical Product Development and Innovation, 2017, 30 (4): 60-62.

[7] 陈建勋, 吴周立,林晓明. 电梯曳引轮轮槽磨损状况的非接触检测方法研究[J]. 特种设备安全技术, 2019(5):45-47.
CHEN J X, WU ZH L, LIN X M. Research on the non-contact detection method for the traction wheel groove of elevators [J]. Special Equipment Safety Technology, 2019(5): 45-47.

[8] TSUI C L, SCHIPF D, LIN K R, et al. Using a time of flight method for underwater 3-dimensional depth measurements and point cloud imaging [C]. Oceans IEEE, 2014: 1-6.

[9] 刘今越,刘佳斌,郭志红,等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. 电子测量与仪器学报,2016, 30(12):1884-1891.
LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A 3D tool measurement system based on surface structured light [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1884-1891.

[10] 史尧臣,周宏,唐武生, 等. 基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 138-145.
SHI Y CH, ZHOU H, TANG W SH, et al. Measurement of tooth profile parameters of automobile synchronous belt based on laser triangulation [J]. Journal of Chinese Instrument, 2019, 40(6): 138-145.

[11] 付朋,陈新度,吴磊. 基于角点的双目视觉绝对定位研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(3):1-8.
FU P, CHEN X D, WU L. Research on absolute positioning of binocular vision based on corner points [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 1-8.

[12] 韩延祥,张志胜,戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1110-1117.
HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision measurement method for target ranging [J]. Optical Precision Engineering, 2011, 19(5): 1110-1117.

[13] DI Y, LI M Y, QIAO T, et al. Edge detection and mathematic fitting for corneal surface with Matlab software[J]. International Journal of Ophthalmology, 2017, 10(3):336-342.

[14] 谢广昊,刘士兴,朱妍. 基于间距匹配的物流条码定位算法[J]. 合肥工业大学学报, 2018, 41(10): 1372-1376.
XIE G H, LIU SH X, ZHU Y. Logistics barcode positioning algorithm based on spacing matching [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 41(10): 1372-1376.

[15] 周麒,杨永明,王振洲,等. 基于双目立体视觉的结构光测量技术[J]. 计算机工程,2018,44(7):244-249,258.
ZHOU Q, YANG Y M, WANG ZH ZH, et al. Structured light measurement technology based on binocular stereo vision [J]. Computer Engineering, 2018, 44(7): 244-249,258.

[16] 赵萍. 机器视觉测量方法及曲面重构技术研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2011.
ZHAO P. Research on machine vision measurement method and surface reconstruction technology [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.

[17] 邓林华,许骏,程向明. 基于迭代阈值的太阳像分割算法的应用研究[J]. 计算机与现代化, 2010(10): 72-74.
DENG L H, XU J, CHENG X M. Application research of sun image segmentation algorithm based on iteration threshold [J]. Computer and Modernization, 2010(10): 72-74.

[18] 罗志灶,周赢武,郑忠楷. 二值图像连通域标记优化算法[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版),2010, 16(4):34-39.
LUO ZH Z, ZHOU Y W, ZHENG ZH K. Optimal algorithm for connected domain labeling of binary images [J]. Journal of Anqing Teachers College (Natural Science Edition), 2010, 16(4): 34-39.

[19] 张震,程伟伟,吴磊,等. 基于不变矩和 SVM 的圆形交通标志识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(5):773-779.
ZHANG ZH, CHENG W W, WU L, et al. Research on circular traffic sign recognition method based on moment invariance and SVM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 773-779.

[20] 吴鹃. 基于轮廓分析与三阶不变矩的旋转目标定位算法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 164-167, 184.
WU J. Rotating target positioning algorithm based on contour analysis and third-order invariant moments [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(5): 164-167, 184.

[21] ZHANG Y Y, YANG B. Mosaic of printed circuit board image based on Gaussian-Hermite moment invariants[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2017, 22(5):380-386.

[22] 刘士兴, 宓逸舟, 张阳阳, 等, 改进型测量光幕体积计量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1313-1319.
LIU SH X, MI Y ZH, ZHANG Y Y, et al. Improved volumetric measuring system for measuring light curtains [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1313-1319.

[23] 方建中,许四祥,杨宇, 等. 基于边缘拟合的双目视觉定位与测量方法[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 412-417.
FANG J ZH, XU S X, YANG Y, et al. Binocular vision positioning and measurement method based on edge fitting [J]. Optical Technology, 2019, 45 (4): 412-417.

## 作者简介

**刘士兴**,2004 年于中国科学技术大学获得博士学位,现为合肥工业大学副教授,主要研究方向为光电探测技术、工业视觉检测等。
E-mail:liusx@ hfut. edu. cn

**Liu Shixing** received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests include photo electric detection technology, industrial visual detection, etc.

**周启航**,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为光电探测技术。
E-mail:546192001@ qq. com

**Zhou Qihang** is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology now. His main research interests include photo electric detection technology.

**马登科**,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为光电探测技术和自动化检测。
E-mail:2290230704@ qq. com

**Ma Dengke** is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology now. His main research interests include photo electric detection technology and automation detection.

**刘光柱**,2016 年于中国科学院等离子体物理研究所获得博士学位,现为合肥工业大学讲师,主要研究方向为光电探测技术、自动化技术与核科学技术。
E-mail:343546310@ qq. com

**Liu Guangzhu** received his Ph. D. degree from Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences in 2016. Now he is a lecturer at Hefei University of Technology. His main rsearch interests include photo electric detection technology, automation technology and nuclear science andtechnology.