

基于机器视觉的波纹补偿器轴向尺寸检测*

林思雨¹, 倪洪启¹, 李宝志¹, 孟宪春^{2,3}

(1. 沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 沈阳 110142; 2. 秦皇岛北方管业有限公司, 河北 秦皇岛 066004; 3. 河北省波纹膨胀节与金属软管技术创新中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了准确检测波纹补偿器的变形状况, 改善波纹补偿器传统检测方式的弊端, 提出了一种应用机器视觉的波纹补偿器轴向尺寸检测方法。首先, 使用张正友相机标定法对工业 CCD 相机进行标定并采集波纹补偿器图像信息, 然后提出一种改进 Canny 算子对图像进行边缘检测, 获得可处理的理想化二值图像, 遍历二值化图像进行水平倾斜校正后, 提取极限边缘特征点。最后, 计算出波纹补偿器在世界坐标系下的整体轴向尺寸和相邻波纹间的轴向尺寸。结果表明, 该方法能较为精确的计算出波纹补偿器在不同变形程度下的轴向尺寸, 并利用所计算出的尺寸数据准确地判断出了波纹补偿器的变形状况, 对于保证波纹补偿器平稳工作, 维护生产安全具有重要意义。

关键词: 机器视觉; 波纹补偿器; 改进 Canny 算子; 边缘特征点; 整体轴向尺寸; 相邻波纹间轴向尺寸
中图分类号: TG806; TP277 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.02.006

Axial Dimension Detection of Corrugated Compensator Based on Machine Vision

LIN Siyu¹, NI Hongqi¹, LI Baozhi¹, MENG Xianchun^{2,3}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Qinhuangdao North Pipe Industry Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. Hebei Province Corrugated Expansion Joint and Metal Hose Technology Innovation Center, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: In order to accurately detect the deformation of the corrugated compensator and improve the disadvantages of the traditional detection method of the corrugated compensator, a detection method of the axial dimension of the corrugated compensator based on machine vision is proposed. ZHANG Zhengyou camera calibration method is used to calibrate the industrial CCD camera and collect the corrugated compensator image information, and then an improved Canny operator is proposed to detect the edge of the image to obtain a processable ideal binary image. After traversing the binary image for horizontal tilt correction, the limit edge feature points are extracted. Finally, the overall axial size of the ripple compensator in the world coordinate system and the axial size between adjacent corrugations are calculated. The experimental results show that the axial size of the corrugated compensator under different deformation degrees can be accurately calculated, and the deformation of the corrugated compensator can be accurately judged by the calculated size data, which is of great significance to ensure the smooth operation of the corrugated compensator and maintain production safety.

Key words: machine vision; corrugated compensator; improved Canny operator; edge feature points; overall axial dimension; axial dimension between adjacent corrugations

0 前 言

自 20 世纪 80 年代起, 波纹补偿器作为一种

补偿元件被广泛地应用在工业管道中, 用来补偿管道因温度、振动、压力等因素引起的尺寸变化。但是波纹补偿器波纹管部分在进行管道补偿

*基金项目: 辽宁省科学技术基金资助项目“厚壁螺旋定子管内外分步高压胀形机理研究”(项目编号 20170540722)。

的时候很容易发生失稳变形,从而导致波纹补偿器损坏,一旦损坏轻则造成停工停产,重则引发爆炸,严重威胁工作人员生命安全,因此对波纹补偿器进行工作状态监测越来越受到重视^[1]。目前国内外对波纹补偿器的监测多采用指派专业维护人员到现场定期查看的方法,他们根据自己长期积累的经验识别该设备的常见故障,但多数维护人员缺乏足够的知识和经验,当波纹补偿器出现问题时很难及时发现故障并采取措施^[2]。

针对上述问题,提出了一种应用机器视觉技术的波纹补偿器轴向尺寸检测方法,应用图像处理技术计算出波纹补偿器的整体轴向尺寸以及相

邻波纹间的轴向尺寸,然后通过尺寸来判断波纹补偿器的变形状况,该方法对于保证波纹补偿器平稳工作,维护生产安全具有重要意义。

1 波纹补偿器轴向尺寸检测方案

应用工业 CCD 相机获取的波纹补偿器图像信息如图 1 所示,然后将图像信息发送至 PC 端,经过如图 2 所示方案进行图像处理之后得到可选取边缘特征点的理想二值化图像,最后对二值化图像中灰度值为 1 的部分进行极限边缘点检测,从而计算出波纹补偿器的整体轴向尺寸以及相邻波纹之间的轴向尺寸。



(a) CCD 相机获取图像



(b) 灰度化图像

图 1 波纹补偿器图像信息

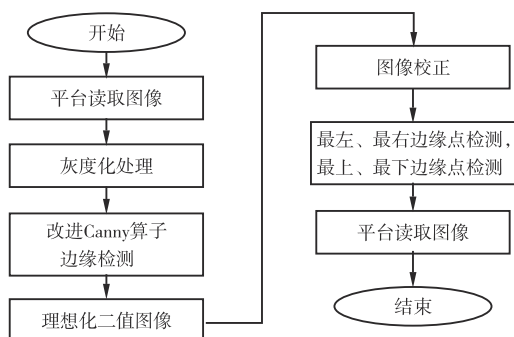


图 2 图像处理方案流程图

2 相机标定

为准确计算出三维空间中波纹补偿器的尺寸信息,需要对相机进行标定。本方法采用张正友相机标定法,将目标点的平面像素坐标值转换成三维坐标值^[3]。张正友相机标定法具体实现流程

如图 3 所示。

本方法选用 15 张棋盘格标定板进行相机标定,标定过程中相机水平放置、工作距离设置为 500 mm,由于模板图像较多,故仅列举三幅图像,如图 4 所示。

相机标定的原理实质上就是计算内部参数 A 、畸变系数 k 、外部参数(平移向量 T 、旋转矩阵 R)的过程^[4],相机标定结果如下:

$$A = \begin{bmatrix} 647.617 & 562.46 & 0 & 397.593 & 344.52 \\ 0 & 648.331 & 265.46 & 296.611 & 230.35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$k = [-7.688 \ 76 \quad 25.345 \ 8 \quad -0.172 \ 1 \quad -0.051 \ 44]$$

$$T = [-4.252 \ 715 \quad -2.865 \ 857 \quad 275.071 \ 027]^T$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.005 \ 287 & 0.999 \ 868 & 0.008 \ 165 \\ 0.940 \ 532 & -0.001 \ 102 & -0.353 \ 052 \\ -0.354 \ 232 & -0.009 \ 012 & -0.965 \ 491 \end{bmatrix}$$

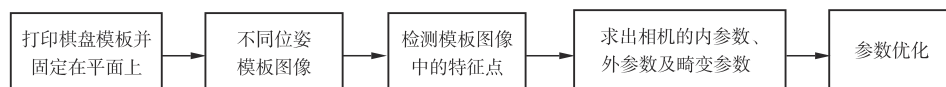


图 3 张正友相机标定法流程图



图4 不同位姿棋盘格标定板

3 边缘检测

3.1 传统Canny边缘检测算子

Canny算子能够尽可能多地标识出目标图像的

实际边缘, 且将标识出的边缘与实际图像中的边缘尽可能接近, 相比于Sobel、Laplacian等边缘检测算子, Canny算子更加准确^[5-7]。检测流程如图5所示, Canny算子检测结果如图6所示。

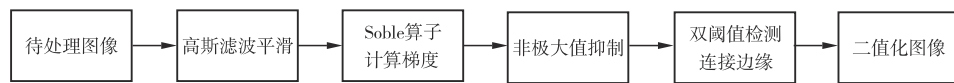


图5 传统Canny算子检测流程图



图6 Canny算子检测结果

从图6可看出, 传统Canny算子得出的图像信息较为模糊, 边缘信息没有明显的突出, 波纹线形状大多处于锯齿状, 甚至多处波纹线发生了

断裂现象, 难以得出理想化可操作的二值化图像信息, 对于后续极限边缘特征点的检测造成了很大的障碍。再者, 由于人为输入参数的不同, 结果图像也会随之发生变化, 这种凭借经验进行参数选取, 以提高检测效果的方法不适用于自动检测的要求, 因此必须在此基础上加以改进。

3.2 改进的Canny边缘检测算子

为提高波纹补偿器轴向尺寸计算的精确性, 本研究对Canny算子进行了3方面的改进, 提出了改进的Canny边缘检测算子。图7为改进后的Canny算法流程图。

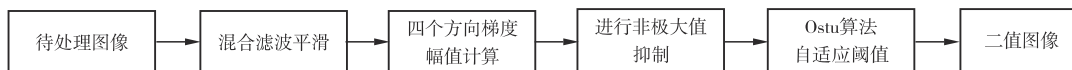


图7 改进的Canny算子流程图

3.2.1 混合滤波器设计

混合滤波的原理是将中值滤波的输出作为双边滤波的输入, 达到消除噪声保留边缘信息的目的^[8-10]。图8为降噪流程图。



图8 降噪流程图

(1) 中值滤波

中值滤波是一种非线性滤波, 其用像素点的邻域灰度值的中值来代替该像素点的灰度值^[8], 对消除椒盐噪声、保护边缘信息效果尤其显著, 公式为

$$g(i, j) = \text{median}_{(i, j) \in s_{ij}} \{f(i, j)\} \quad (1)$$

式中: s_{ij} ——中心点;

$f(i, j)$ ——原始图像;

$g(i, j)$ ——中值滤波后的图像。

(2) 双边滤波

双边滤波是一种非线性的滤波器, 它在卷积核分配权重值时, 既考虑了空间尺度的信息又考虑了颜色尺度信息^[11-13], 随着尺度的增大, 分配的权重逐渐变小。因此, 在边缘附近, 颜色差异较大的像素不会太多影响到边缘上的像素值, 从而滤波后达到保存边缘、去除噪声的目的, 公式为

$$g(i, j) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(i, j, k, l)} \quad (2)$$

式中： $\omega(i, j, k, l)$ ——加权系数，取决于空域核和值域核的乘积；

(i, j) 、 (k, l) ——两个像素点的坐标；

$g(i, j)$ ——输出的像素值；

$f(k, l)$ ——点 (k, l) 处的像素值；

$f(i, j)$ ——点 (i, j) 处的像素值。

其中，空域核表示为

$$d(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (3)$$

式中： σ_d ——空域标准差。

值域核表示为

$$r(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4)$$

式中： σ_r ——值域标准差。

3.2.2 改进的梯度幅值计算方法

传统的Canny边缘检测算子中，如果只关注水平和垂直两个方向的梯度信息，易受到来自外界噪声的干扰^[14]，很难精确的检测出波纹补偿器的轮廓边缘。而且传统的Canny算子中通常采用Sobel算子计算梯度幅值和方向信息，Sobel算子在计算8邻域偏导时极易受到噪声的干扰，

导致检测出虚假边缘，使得检测效果不佳^[15-16]。Scharr算子是对Sobel算子的差异性增强，两种算子计算效率基本相同，但是Scharr算子比Sobel算子在梯度幅值计算上更加精准，且不易受到噪声干扰^[17-18]。

因此本方法采用3×3邻域有限差分算法，增加Scharr算子45°、135°两个梯度方向，构成8邻域四方向上的一阶梯度模块，分别计算4个方向上的梯度幅值^[19]。4个方向上的模板为

$$\begin{aligned} G_x &= \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \\ G_y &= \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \\ G_{45^\circ} &= \begin{bmatrix} -10 & -3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 10 \end{bmatrix} \\ G_{135^\circ} &= \begin{bmatrix} 0 & 3 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \\ -10 & -3 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， G_x 、 G_y 、 G_{45° 、 G_{135° 为Scharr算子在水平、垂直、45°、135°四个方向上的梯度幅值模板。

设 I 为图像的灰度值，用式(5)中4个方向上的模板计算一阶偏导数，分别计算4个方向上的梯度。

$$\begin{aligned} \text{水平方向: } G_x(x, y) &= I[-3(x-1, y-1) + 0(x, y-1) + 3(x+1, y-1)] + \\ &\quad I[-10(x-1, y) + 0(x, y) + 10(x+1, y)] + \\ &\quad I[-3(x-1, y+1) + 0(x, y+1) + 3(x+1, y+1)] \\ &= I[3(x+1, y+1) + 10(x+1, y) + 3(x+1, y-1)] - \\ &\quad I[3(x-1, y+1) + 10(x-1, y) + 3(x-1, y-1)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{垂直方向: } G_y(x, y) &= I[-3(x-1, y-1) - 10(x, y-1) - 3(x+1, y-1)] + \\ &\quad I[0(x-1, y) + 0(x, y) + 0(x+1, y)] + \\ &\quad I[3(x-1, y+1) + 0(x, y+1) + 3(x+1, y+1)] \\ &= I[3(x+1, y+1) + 10(x, y+1) + 3(x-1, y+1)] - \\ &\quad I[3(x+1, y-1) + 10(x, y-1) + 3(x-1, y-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 45^\circ \text{方向: } G_{45^\circ}(x, y) &= I[-10(x-1, y-1) - 3(x, y-1) + 0(x+1, y-1)] + \\ &\quad I[-3(x-1, y) + 0(x, y) + 3(x+1, y)] + \\ &\quad I[0(x-1, y+1) + 3(x, y+1) + 10(x+1, y+1)] \\ &= I[10(x+1, y+1) + 3(x, y+1) + 3(x+1, y)] - \\ &\quad I[3(x-1, y) + 3(x, y-1) + 10(x-1, y-1)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
135^\circ \text{方向: } G_{135}(x, y) &= I[0(x-1, y-1) + 3(x, y-1) + 10(x+1, y-1)] + \\
&\quad I[-3(x-1, y) + 0(x, y) + 3(x+1, y)] + \\
&\quad I[-10(x-1, y+1) - 3(x, y+1) + 0(x+1, y+1)] \\
&= I[3(x+1, y) + 10(x+1, y-1) + 3(x, y-1)] - \\
&\quad I[3(x, y+1) + 10(x-1, y+1) + 3(x-1, y)]
\end{aligned} \quad (9)$$

式中: (x, y) ——像素点坐标;

$G_x(x, y)$ ——水平方向的梯度幅值;

$G_y(x, y)$ ——垂直方向的梯度幅值;

$G_{45^\circ}(x, y)$ —— 45° 方向的梯度幅值;

$G_{135^\circ}(x, y)$ —— 135° 方向的梯度幅值。

将 45° 方向和 135° 方向的梯度分别投影到水平和垂直两个方向, 求和得到新的水平、垂直两个方向上的梯度值。

新的水平方向梯度 $G_{x1}(x, y)$ 为

$$\begin{aligned}
G_{x1}(x, y) &= G_x(x, y) + \frac{\sqrt{2}}{2} G_{45^\circ}(x, y) + \\
&\quad \frac{\sqrt{2}}{2} G_{135^\circ}(x, y)
\end{aligned} \quad (10)$$

新的垂直方向梯度 $G_{y1}(x, y)$ 为

$$\begin{aligned}
G_{y1}(x, y) &= G_y(x, y) + \frac{\sqrt{2}}{2} G_{45^\circ}(x, y) + \\
&\quad \frac{\sqrt{2}}{2} G_{135^\circ}(x, y)
\end{aligned} \quad (11)$$

因此, 当前图像的梯度幅值和方向为

$$M(x, y) = \sqrt{G_{x1}(x, y)^2 + G_{y1}(x, y)^2} \quad (12)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_{y1}(x, y)}{G_{x1}(x, y)}\right) \quad (13)$$

3.2.3 Otsu 算法求高低阈值

本研究采用 Otsu 算子对非极大值抑制后的图像进行处理, 它是一种使类间方差最大的自动阈值法^[20]。假设图像像素数为 N , 灰度范围为 $[0, L-1]$, 对应灰度级 i 的像素数为 N_i , 概率为

$$P_i = \frac{n_i}{N}, i = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} P_i = 1 \quad (15)$$

将图像中的像素灰度值用阈值 T 分为两类 C_0 和 C_1 , C_0 由灰度值在 $[0, T]$ 的像素组成, C_1 由灰度值在 $[T+1, L-1]$ 的像素组成, 整幅图像的均值

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i \quad (16)$$

C_0 和 C_1 的均值为

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{L-1} \frac{iP_i}{\omega_0} \quad (17)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} \frac{iP_i}{\omega_1} \quad (18)$$

其中,

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^T P_i \quad (19)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} P_i = 1 - \omega_0 \quad (20)$$

由此可得,

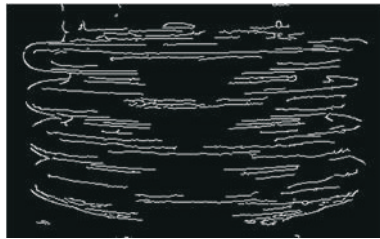
$$\mu_T = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \quad (21)$$

类间方差的定义为

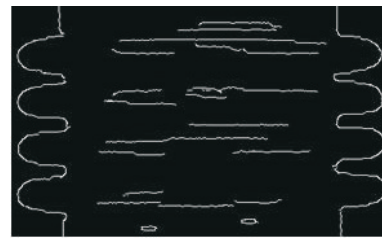
$$\begin{aligned}
\sigma_B^2 &= \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \\
&= \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2
\end{aligned} \quad (22)$$

使得 T 在 $[0, L-1]$ 范围内依次取值, 当 σ_B^2 为最大值时, 所取得的阈值 T 即为 Otsu 算法的最佳阈值。将此最优阈值设置为高阈值 T_h , 低阈值为 $T_l = T_h/2$ 。

图 9 (a) 为传统 Canny 算子人为设定阈值为(70, 160)时的效果图, 可以明显的看出,



(a) 传统Canny算子



(b) 改进Canny算子

图9 Canny算子检测效果

阈值设置不合理会导致轮廓不连续的现象出现,进而导致识别中无法准确获得特征点的尺寸信息。而使用Otsu算子自适应求取阈值来代替人根据自己的经验设置高低阈值,增强了Canny算法的自适应性,可以更好的保留边缘信息^[21-22]。改进Canny算子检测效果如图9(b)所示。

4 图像校正及尺寸计算

4.1 图像校正

波纹补偿器安装时会出现安装误差,导致波纹补偿器出现水平倾斜现象,因此需要对目标图像进行水平校正处理,水平倾斜二值化图像如图10(a)所示。本方法使用Hough变换法完成基准直线的检测,再根据检测出基准

直线的倾角进行旋转最终实现图像的校正。Hough变化法的基本原理是将图片所在直角坐标系中的直线等映射到Hough空间的一个点上形成峰值,从而将检测直线的问题转换成计算峰值的问题^[23-25]。基本Hough变换法得到基准直线如图10(b)加粗线所示,可以看出所检测的直线较多,如果将这些直线的倾斜角度都提取出来,势必造成错误的校正结果。因此通过概率Hough变化算法控制检测直线的长度、所拟合直线的最大间隔、直线间的最小密度,以提取出最优拟合直线^[26-27]。概率Hough变化法得到的最优拟合直线如图10(c)加粗线所示。最后从概率Hough变换运算法的返回值中可以得出倾斜角度信息,将角度带入仿射变换实现图像倾斜校正,图像水平校正的结果如图10(d)所示。

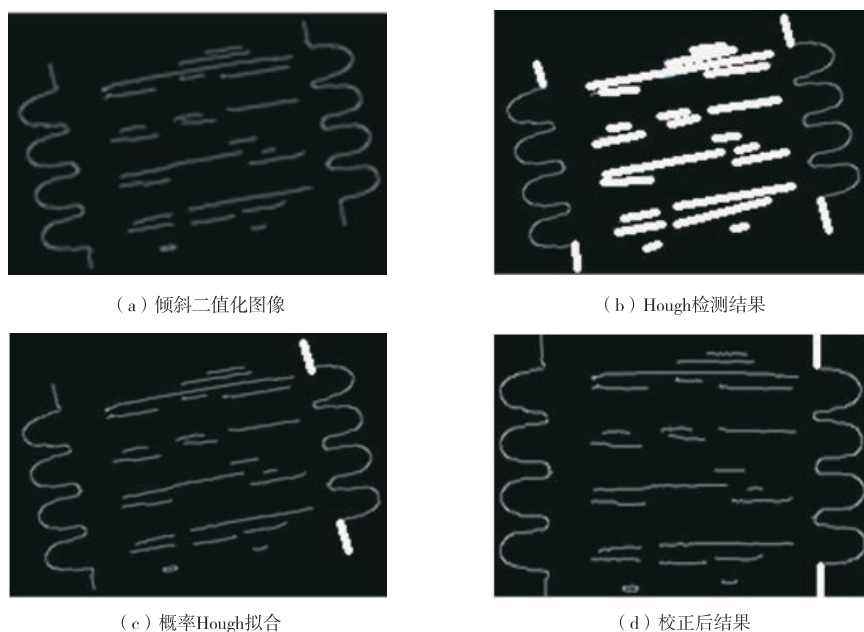


图10 图像校正结果

4.2 尺寸检测

利用波纹补偿器形状的特殊性,对二值化图像灰度值为1的部分进行遍历,获取极限边缘特征点,取点情况如图11所示。

得出极限边缘特征点坐标之后,利用相机标定参数,计算出上述极限边缘特征点在世界坐标系下的坐标,然后通过两点间距离公式计算出波纹补偿器的整体轴向尺寸以及相邻波纹间的轴向尺寸(波距)。两点间距离为

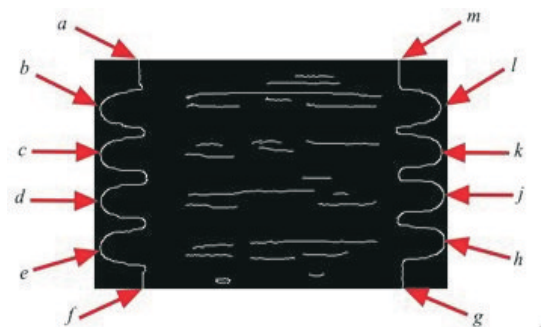


图11 标注特征点图像

$$L_k = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (23)$$

整体轴向尺寸包括 b 点与 e 点、 h 点与 l 点间的距离；相邻波纹间的轴向尺寸包括 b 点与 c 点、 c 点与 d 点、 d 点与 e 点、 h 点与 j 点、 j 点与 k 点、 k 点与 l 点间的距离。

5 压缩检测试验与结果分析

为验证应用机器视觉技术和使用改进 Canny

算子的波纹补偿器轴向尺寸检测方法的准确性，对波纹补偿器在轴向尺寸允许范围内进行不同程度的压缩检测试验；用0.02 mm游标卡尺分别测出波纹补偿器在轻压缩、深度压缩程度下的整体轴向尺寸以及波距，然后与本方法测出的轴向尺寸进行对比，所得结果见表1、表2和表3，其中 be 、 lh 分别对应波纹补偿器左侧整体轴向尺寸与右侧整体轴向尺寸， bc 、 cd 、 de 、 lk 、 kj 、 jh 对应为波纹补偿器相邻波纹间的轴向尺寸，也称为波距。压缩检测试验现场如图12所示。

表1 未压缩时轴向尺寸对照表

项目	轴向尺寸/mm						
	be	bc	cd	de	lh	lk	kj
理论计算值 L_k	90.10	30.00	30.00	30.10	90.10	29.90	30.00
卡尺测量值 $L_{卡尺}$	90.00	30.00	30.00	30.00	90.00	30.00	30.00
绝对误差	0.10	0	0	0.10	0.10	0.10	0

表2 轻度压缩时轴向尺寸对照表

项目	轴向尺寸/mm						
	be	bc	cd	de	lh	lk	kj
理论计算值 L_k	80.50	26.70	26.70	27.10	80.60	26.80	26.70
卡尺测量值 $L_{卡尺}$	80.58	26.74	26.74	27.10	80.72	26.90	26.72
绝对误差	0.08	0.04	0.04	0	0.12	0.10	0.02

表3 深度压缩时轴向尺寸对照表

项目	轴向尺寸/mm						
	be	bc	cd	de	lh	lk	kj
理论计算值 L_k	67.50	22.40	22.40	22.70	67.60	22.50	22.40
卡尺测量值 $L_{卡尺}$	67.62	22.42	22.42	22.78	67.82	22.60	22.44
绝对误差	0.12	0.02	0.02	0.08	0.22	0.10	0.04



图12 压缩检测实验现场图

对表1中的绝对误差数据进行分析得出，本方法所计算的轴向尺寸与用游标卡尺所计

算的尺寸存在些许误差，但是该绝对误差小于0.5 mm，可以忽略，证明本方法所检测的尺寸数据是可靠的。各相邻波纹间的轴向尺寸（波距）间的绝对误差小于0.5 mm，可认为各波距都是相等的，说明该波纹补偿器是在均匀的承受位移载荷，未发生失稳现象，并且所计算出的整体轴向尺寸未超过限值参数，故此结合上述两个条件判定该波纹补偿器工作状态为正常。

从表2可看出，波纹补偿器的工作状态是正常的，并且在表中绝对误差分析后得出，

本方法所计算出的尺寸信息依然是有效的,证明当波纹补偿器在被压缩时,本方法依然能准确的计算出它的轴向整体尺寸及相邻波纹间的轴向尺寸(波距);另外对相邻波纹间的轴向尺寸(波距)进行分析,也说明了该波纹补偿器在被压缩时其波纹之间是均匀变形的。

从表3可以看出,在深度压缩条件下(即将接近波纹补偿器下限值时)本方法仍然能准确的计算出各轴向尺寸数据;并且各波距间的误差在允许范围之内(默认波距是相等的),从而可判断出波纹补偿器每个波纹是在均匀的承受位移载荷;所计算出的整体轴向尺寸并未超过限值参数,在整体轴向尺寸未超限的情况下,波纹间又没有发生失稳,从而判断出深度压缩条件下波纹补偿器的工作状态是正常的。

经对上述压缩检测试验进行总体分析可得出,本方法可以较为精确地计算出波纹补偿器的轴向整体尺寸以及相邻波纹间的轴向尺寸,通过尺寸信息可以准确的判断出波纹补偿器的工作状态,从而说明本方法可以对波纹补偿器的变形状况进行有效地监测。相对于基于深度学习的目标检测算法受样本集的影响较大,需要大量的样本且对工控机的算力要求较高^[28-30],而波纹补偿器的几何特征明显,在实时检测和计算资源很有限时使用本方法可以更好的满足使用要求。

6 结 论

(1) 本方法可以准确计算出波纹补偿器轴向整体尺寸以及相邻波纹之间轴向尺寸的测量。

(2) 采用传统Canny算子时,阈值设置不当会导致波纹管的特征轮廓出现不连续的现象,本方法采用Otsu算法可以自适应获得阈值,不需人工输入阈值即可获得连续的特征轮廓图像。本方法提出的改进Canny算子,有效地提高了波纹补偿器边缘检测的准确性,且相比于传统Canny算子更加具有自适应性,更适用于波纹补偿器的轮廓检测。

(3) 通过机器视觉技术对整体轴向尺寸进行检测可以确定波纹补偿器的整体补偿量是否超过波纹补偿器的安全阈值;检测相邻波纹间的轴向尺寸可以判断波纹补偿器是否发生失稳变形,对于保证生产安全具有重要意义。

(4) 在实际应用中,波纹补偿器波纹数是针对实际情况而定的,对于不同波纹数的波纹补偿器,还需要对尺寸检测方案进行修改,为此下一步研究中,将逐渐完善尺寸检测方案,使得本方法能够自适应检测不同波纹数的波纹补偿器的轴向尺寸。

参考文献:

- [1] 倪洪启,李宝志,林思雨,等.应用移动终端的波纹补偿器监测系统[J].管道技术与设备,2021(3):49-52,58.
- [2] 倪洪启,金驰,冯霏.波纹补偿器故障诊断系统研制[J].工程设计学报,2019,26(3):354-363.
- [3] 施佳豪,王庆,冯悠扬.基于三维标定板的相机标定方法[J].传感器与微系统,2021,40(6):48-51.
- [4] 单宝华,霍晓洋,刘洋.张正友标定法在DIC位移测量中的应用[J].实验室研究与探索,2016,35(2):8-12,21.
- [5] DONG L, PAN S H. Improved canny edge detection algorithm based on deep learning [J]. Scientific Journal of Intelligent Systems Research, 2021, 3(2): 15.
- [6] YONG W K, INNILA R J, ADDAPALLI V N. A study on the effect of canny edge detection on downsampled images[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2020, 30(3): 32.
- [7] BADRI N M. Image edge detection techniques[J]. Accents Transactions on Image Processing and Computer Vision, 2019, 5(15): 13.
- [8] 丁登峰.基于混合滤波算法的智能边缘检测技术研究与应用[D].武汉:武汉纺织大学,2021.
- [9] JOSEP A, LUIS S. Hybrid filter based on fuzzy techniques for mixed noise reduction in color images [J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 243.
- [10] SREEJITH S, NAYAK J. Study of hybrid median filter for the removal of various noises in digital image [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1706(1): 012079.
- [11] 石野,王晓凯,刘慧锋.基于局部滤波模板的双边滤波算法研究[J].测试技术学报,2021,35(1):49-53.
- [12] RAKA K. A novel technique for texture and edge preservation using bilateral filter [J]. National Academy Science Letters, 2021, 44(2): 25.
- [13] ZHANG X L, DAI L Q. Fast bilateral filtering [J]. Electronics Letters, 2019, 55(5): 8.

- [14] MAI X. Research on simulation rendering technology of watercolor painting based on canny edge darkening[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748(2): 022011.
- [15] LADANYI L, KRÁLIK M. Automatic buildings detection using Sobel, Roberts, Canny and Prewitt detector [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 72(4): 33.
- [16] XU H Y, XU X L, ZUO Y B. Applying morphology to improve Canny operator's image segmentation method [J]. The Journal of Engineering, 2019(23): 12.
- [17] 李浩谊, 马春庭, 唐秀媛. 多方向 Scharr 的齿轮边缘检测与中心定位[J]. 工具技术, 2019, 53(2): 130-133.
- [18] 李浩谊, 马春庭. 基于改进的 Scharr 算法的海上舰船图像边缘检测[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(3): 103-106.
- [19] 吴房胜, 李如平, 施冬冬. 改进 Canny 算子在焊缝边缘检测中的研究[J]. 新乡学院学报, 2020, 37(9): 46-49.
- [20] LI N, LYU X, XU S K, et al. An improved water surface images segmentation algorithm based on the otsu method [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2020, 29(15): 17.
- [21] CAO Y Q, WU D, DUAN Y Y. A new image edge detection algorithm based on improved Canny [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2020, 20(2): 42.
- [22] 李宝芸, 范玉刚, 高阳. 基于 OTSU 和 Canny 算子的红外图像特征提取[J]. 陕西理工大学学报, 2019, 35(6): 33-40.
- [23] KE T, ZHANG R D. An improved canny edge detection algorithm [J]. International Journal of Civil Engineering and Machinery Manufacture, 2018, 3(1): 15.
- [24] 王琦, 宋伟东, 王竞雪. 基于 Hough 变换的直线提取方法及改进[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 214-217, 221.
- [25] DONALD B, YUAN C, STEVEN L M. Analysing arbitrary curves from the line hough transform [J]. Journal of Imaging, 2020, 6(4): 19.
- [26] 刁燕, 吴晨柯, 罗华, 等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 170-178.
- [27] WANG L H, Y Y, SHI J C. Measurement of harvesting width of intelligent combine harvester by improved probabilistic hough transform algorithm [J]. Measurement, 2020(151): 43.
- [28] 全京. 基于深度学习与机器视觉的零件检测系统的研究与实现[D]. 银川: 北方民族大学, 2020.
- [29] 杨艳. 基于深度学习的工件尺寸在线视觉检测关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [30] 黄寅礼. 基于传统方法与深度学习的 SAR 图像舰船检测对比分析与软件实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- 作者简介: 林思雨 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事波纹管故障诊断与自动化研究。

收稿日期: 2022-05-19

修改返回日期: 2022-09-11

编辑: 罗 刚

(上接第 31 页)

- [7] 李自力, 谢跃辉, 郝宏娜, 等. 埋地管道阴极保护电位测量方法研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 55-59.
- [8] 刘旭. CIPS 技术在天然气长输管道外检测中的应用[J]. 大众标准化, 2018(6): 34-36.
- [9] 张维景, 胡博, 于润桥, 等. 埋地管道腐蚀的瞬变电磁法检测探头优化设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(12): 37-40, 68.
- [10] 王浩, 石伟, 焦小兵, 等. 低频导波检测在埋地管道穿越段处管体缺陷检测中的应用[C]//第十五届宁夏青年科学家论坛石化专题论坛论文集. 银川: 宁夏石油学会, 2019: 297-299.
- [11] 何文, 王成, 石文芳, 等. 锚杆锚固质量的超声导波检测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(6): 567-572, 578.
- [12] 张丰, 赵晋云, 吴晓宁, 等. 埋地管道外检测方法的组合应用与验证[J]. 油气储运, 2009, 28(8): 35-37, 79.
- [13] 徐代英, 禹继贫. 输气管线绝缘防腐层缺陷检测及应用[J]. 天然气工业, 2000(5): 98-99.
- [14] 庞旭, 朱平, 张丹威. CIPS+DCVG 在高原埋地管道外防腐层检测应用[J]. 价值工程, 2018, 37(8): 195-197.
- [15] 金小军, 董训长, 张扬. 埋地钢管外防腐层腐蚀检测方法及应用[J]. 油气储运, 2001(7): 34-35, 58.
- 作者简介: 胡志强 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为天然气管道腐蚀与防护。
- 收稿日期: 2022-07-08
修改返回日期: 2022-11-25
编辑: 黄蔚莉