

基于机器视觉的碳毡装配检测算法系统设计

冯 雨¹, 方成刚¹, 张文东², 程丽娟³

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800;

2. 北京西融储能科技有限公司, 北京 102600;

3. 镇江艾牧智能科技有限公司, 江苏 镇江 212000)

摘要:针对碳毡装配过程中碳毡占位、边缘毛刺复杂, 人工检测效率低、成本高、接触产生不良影响等问题, 设计了一种基于机器视觉的碳毡装配检测算法系统。使用 Python 语言调用相机获取图像并进行预处理。随后, 对图像应用改进的 Sobel 算子进行初步的边缘检测, 获取边缘的粗略坐标信息。接着, 采用改进的插值法亚像素边缘检测算法对这些粗略坐标进行细化, 得到更精确的坐标信息。然后, 利用最小二乘法对这些精确坐标进行直线拟合, 得到图像中的四个角点。最终, 通过对这些角点的位置关系进行判断和分析。实验结果表明, 本系统可以稳定进行碳毡装配检测, 具有一定的鲁棒性。

关键词:机器视觉; 边缘检测; 亚像素边缘; 图像处理

中图分类号: TP23; TP29

文章编号: 1000-0682(2024)02-0039-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.007

Design of carbon felt assembly inspection algorithm system based on machine vision

FENG Yu¹, FANG Chenggang¹, ZHANG Wendong², CHENG Lijuan³

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Jiangsu Nanjing 211800, China;

2. Beijing Xirong Energy Storage Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China;

3. Zhenjiang Aimu Intelligent Technology Co., Ltd., Jiangsu Zhenjiang 212000, China)

Abstract: A machine vision-based carbon felt assembly detection algorithm system was designed to address issues in the assembly process, such as carbon felt misplacement and complex edge burrs. Manual inspection was found to be inefficient, costly, and prone to undesirable contact effects. The system utilizes Python to interface with a camera for image acquisition and preprocessing. Subsequently, an enhanced Sobel operator is applied to perform initial edge detection, obtaining approximate edge coordinates. Then, a refined interpolation-based sub-pixel edge detection algorithm is employed to enhance the accuracy of the coordinates. Following this, the least squares method is utilized to fit precise coordinates, thereby identifying the four corner points in the image. Finally, the positions of these corner points are analyzed to make determinations. Experimental results demonstrate that this system can consistently conduct carbon felt assembly detection with a certain level of robustness.

Keywords: machine vision; edge detection; subpixel edge; image processing

0 引言

碳毡在液流电池的组装中, 起到了增加双极板的导电性和便于电堆组装的作用。碳毡和双极板之

间会产生接触电阻, 这不仅会导致电池性能恶化和影响电池能量效率, 而且会影响装备过程中, 每组串联电池单元之间的性能一致性。所以在碳毡装配过程中, 需要检测装配合格与否。传统装配检测为人工检测^[1], 这种检测方式检测成本高、效率低下, 无法满足生产需求。随着制造业发展和进步, 工件装配领域也在不断创新和发展。将机器视觉技术应用到检测流程中^[2], 可以对工件进行非接触性实时检

收稿日期: 2023-11-07

第一作者: 冯雨(2000—), 男, 江苏泗阳人, 南京工业大学硕士生, 研究方向为机器视觉。

测。该方法不仅可以提高检测的精确度,而且还可以降低检测成本和提高检测速度。

张棋^[3]等针对传统 Sobel 算子仅使用两个方向模板的问题,提出增加梯度计算模板改进,得出模板方向越多、检测效果越好的结论。陈浩^[4]等以苹果为检测目标提出一种基于改进 Sobel 算子的自适应阈值边缘提取算法,实验表明该算法系统具有一定的可行性。邹华东^[5]等提出一种基于二次曲线拟合的二步定位亚像素边缘检测算法,确定出边缘点的准确坐标。戴凤强^[6]等设计一种机器视觉检测系统用来检测工件边缘毛刺尺寸,通过实验表明能够满足对应工件的加工精度要求。张洪^[7]等提出一种基于切线倾斜角的异常轮廓点搜索定位算法对 O 型密封圈进行毛刺检测,结果证明有准确的可靠性。

该文通过改进 Sobel 算法结合改进插值法提取碳毡亚像素边缘,获取边缘角点,完成对装配结果的判断。实验表明,该系统具有很高的精确度,可以满足工业检测的准确性要求。

1 系统整体方案设计

系统整体方案主要由检测平台、工业相机、光源和工控机组成,图像采集硬件组成图 1。当机械手将碳毡装配后,位移到适当位置,相机获得信号采集图像并发送给工控机后,通过工控机程序调用有关算法完成图像处理并得到装配结果。

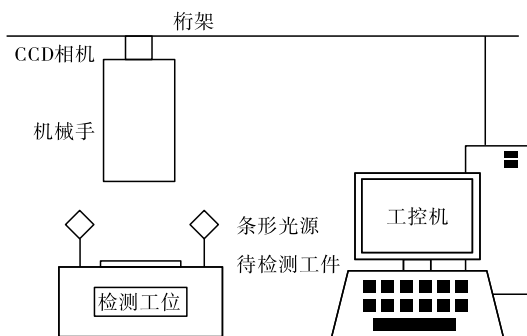


图 1 图像采集硬件组成图

1.1 硬件选型

1.1.1 光源选型

在机器视觉系统中,光源是其重要组成部分,其使用目的是突出物体的特征和消除物体的边缘阴影,使得成像质量有较大的提升,从而减轻后续图像处理的压力。LED 光源具有使用寿命长、稳定性好等优点^[8],因此本系统选择 LED 条形光源。

1.1.2 相机选型

工业相机按照芯片的种类可以将其划分为 CCD 和 CMOS 两种。其中 CCD 是一种发展较早、技术较成熟的芯片,具有较高的光感度和较低的噪声水平。所以选择芯片为 CCD 的工业相机,具体型号为 SW-A20001-PGM5。

1.2 算法框架设计

系统使用 Python 语言编写,调用 OpenCV 第三方扩展包来处理图像信息,计算机对图像进行图像预处理,利用改进的 Sobel 算子对碳毡进行边缘检测获取粗坐标,通过非极大值抑制细化边缘,结合改进插值法提取碳毡亚像素边缘精坐标,然后用最小二乘法进行拟合,通过两线相交从而得到角点坐标,判断是否装配成功。算法原理如图 2 所示。

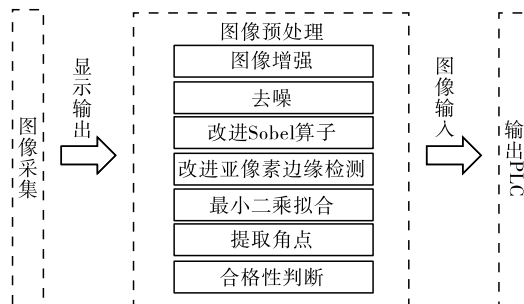


图 2 算法原理图

2 算法设计

2.1 滤波

由于图像采集、处理、传输等过程不可避免地会产生噪声,噪声会极大地干扰图像在处理后的呈现效果。噪声通常以单个像素或像素块的形式出现,它能产生强烈的视觉效应,但是它与图像的整体研究对象毫无关系,而滤波对于噪声的过滤有着非常良好的效果。图像滤波方法主要有高斯滤波、均值滤波和中值滤波三种主流方法。由于中值滤波在不模糊图像边缘的情况下还能有效的去处噪声,因此采用中值滤波^[9]。中值滤波对毛刺处理也有一定的效果。

设 $P(x, y)$ 为图像中第 i 行第 j 列的像素点的灰度值,使用 3×3 大小的滤波核,滤波后该像素点的新灰度值 $P'(x, y)$ 为:

$$P'(x, y) = \text{Med}\{P(x+i, y+j)\} \quad (1)$$

式中: i, j 取区间 $[-1, 1]$ 中的整数; Med 表示取该集合内像素点灰度的中值。

对于碳毡边缘的细小纤维,通过中值滤波亦能将其给过滤掉。图 3 和图 4 分别为碳毡原图和原图经过中值滤波后的处理效果区域图。

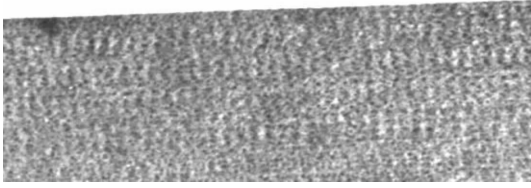


图3 碳毡原图

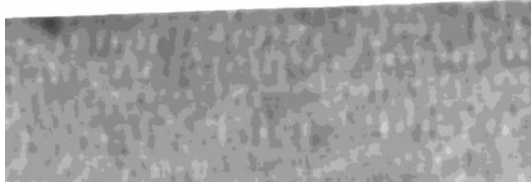


图4 碳毡中值滤波效果图

2.2 Sobel 算子的改进

2.2.1 传统 Sobel 算子

在图像检测中, Sobel 算子是最重要的一个算子,主要用于获取图像的阶跃。通过运用 Sobel 算子,可以得到图像的灰度近似值来检测图像的边界位置,具有简单易实现、计算速度快和抵抗噪声能力强的特点,但是容易出现丢失细节信息、定位不准确的问题。Sobel 是一个梯度的计算,常用梯度 ∇f 表示一幅图像 f 在 (x, y) 位置处的边缘方向。梯度的定义如式(2),梯度向量的幅值用 $G(x, y)$ 表示,计算方法如式(3);方向用 $\theta(x, y)$ 表示,如式(4):

$$\nabla f = \text{grad}(f) = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \approx |g_x| + |g_y| \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (4)$$

在式(2)中, $\text{grad}(f)$ 表示 f 在任意 (x, y) 处的梯度。在式(3)中,为了提高计算效率,可以近似梯度的幅值为函数在 X, Y 轴方向上的一阶偏导数的绝对值之和。式(4)中:梯度的方向 $\theta(x, y)$ 为 X, Y 方向上偏导数之比的反正切函数值。

Sobel 算子有水平和垂直两个方向的卷积核,窗口像素矩阵 A 、水平方向 g_x 与垂直方向 g_y 计算公式如式(5)(6)(7)所示,其中 A 为 3×3 的窗口矩阵, $I(x, y)$ 为坐标 (x, y) 处的像素值。

$$A = \begin{bmatrix} I(x-1, y-1) & I(x, y-1) & I(x+1, y-1) \\ I(x-1, y) & I(x, y) & I(x+1, y) \\ I(x-1, y+1) & I(x, y+1) & I(x+1, y+1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$g_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes A \quad (6)$$

$$g_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \otimes A \quad (7)$$

由于实际图像并不只是有 0° 和 90° 的边缘,而且传统 Sobel 算子存在检测边缘定位不够准确,容易产生伪边缘等问题,因此需要进一步研究改进。

2.2.2 改进 Sobel 算子

传统 Sobel 算子智能检测额横向和纵向的边缘,而在其他方向的检测效果则不太理想^[10]。该文对传统 Sobel 算子进行改进,采用多方向 Sobel 算子在不同方向上使用多个 Sobel 模板来检测图像中的边缘,从而获得更加全面的边缘信息。

该文使用的多方向 Sobel 算子根据传统的 Sobel 算子中水平、竖直方向模板,在其基础上增设六个方向,在模板中,如果位置越靠近中心、与中心的夹角越小,则其权值越大^[11]。改进的八方向 Sobel 算子的卷积核模板如图 5 所示。

<table><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table> 0°	1	0	-1	2	0	-2	1	0	-1	<table><tr><td>0</td><td>-1</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> 45°	0	-1	-2	1	0	-1	2	1	0	<table><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table> 90°	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1	<table><tr><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr></table> 135°	-2	-1	0	-1	0	1	0	1	2
1	0	-1																																					
2	0	-2																																					
1	0	-1																																					
0	-1	-2																																					
1	0	-1																																					
2	1	0																																					
-1	-2	-1																																					
0	0	0																																					
1	2	1																																					
-2	-1	0																																					
-1	0	1																																					
0	1	2																																					
<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table> 180°	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1	<table><tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td></tr></table> 225°	0	1	2	-1	0	1	-2	-1	0	<table><tr><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table> 270°	1	2	2	0	0	0	-1	-2	-1	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table> 315°	2	1	0	1	0	-1	0	-1	-2
-1	0	1																																					
-2	0	2																																					
-1	0	1																																					
0	1	2																																					
-1	0	1																																					
-2	-1	0																																					
1	2	2																																					
0	0	0																																					
-1	-2	-1																																					
2	1	0																																					
1	0	-1																																					
0	-1	-2																																					

图5 八方向的卷积核模板

通过 3×3 的窗口像素分别与八个方向的卷积核进行卷积运算,求得各方向的梯度值: $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7$ 和 G_8 , 中心像素的梯度值 G_r 求取如式(8)所示。

$$G_r = \max\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8\} \quad (8)$$

通过对原始图像进行卷积运算并合成获得梯度图像,然后对梯度图像使用非极大值抑制操作达到细化边缘的效果。

2.3 非极大值抑制

初始梯度图像会显示较宽的边缘区域,这些边缘比较粗糙,并不是我们所期望的细腻边缘。Sobel 算子使用加权卷积操作来增强对边缘的相应,但在边缘位置仍会产生屋脊带一样的边缘^[12]。非极大值抑制操作可以保留幅值局部区域中变化最大的点,细化屋脊带,从而确定边缘位置。

方法如下:通过遍历梯度图像中的每个像素,利用 3×3 的窗口,将当前像素的梯度值与其梯度方向上的两个相邻像素梯度值进行对比,如果当前像素得到梯度值比相邻的两个像素的梯度值都大,那么将该像素判断为边缘点;相反,如果当前像素的梯度值不大于相邻两个像素的梯度值,那么将其判断为非边缘点,并将其梯度幅值设为 0。

2.4 改进的亚像素边缘检测算法

亚像素边缘检测技术是一种高精度的边缘检测技术,他可以在像素级别之外对边缘位置进行更精细的定位。目前,通常使用的亚像素边缘检测方法大致分为三类:插值法^[13]、矩方法^[14]以及拟合法^[15]。这几种方法在图像处理领域中占据着重要地位,为精确测量和目标定位提供了关键支持。矩方法通过图像的矩信息进行亚像素边缘定位。插值法的基本思想是利用已知像素点的灰度值或梯度信息,通过差值技术来估计已知位置上的亚像素级别的灰度值或梯度信息,从而实现了对边缘位置的更精

细定位。拟合法的核心理念在于使用假设的边缘模型灰度值进行,以获取亚像素级别的边缘坐标。每种方法都有其优点、缺点以及使用。该文使用插值法作为亚像素检测方法。

2.4.1 插值法亚像素边缘检测算法原理

基于多项式插值理论,我们可以推导出插值函数如下:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{(x - x_i)}{(x_k - x_i)} y_k \quad (9)$$

式中: x_k 为插值点; y_k 为离散函数值。

对于边缘点 (x_i, y_i) ,在梯度图像 $R(i, j)$ 的 X 方向上取三点 $R(i-1, j), R(i, j), R(i+1, j)$,将这三个点的梯度幅值作为函数值, $i-1, i, i+1$ 作为插值基点,代入式(9),并令 $\frac{d\Phi(x)}{dx} = 0$;同理,在 Y 方向上取 $R(i, j-1), R(i, j), R(i, j+1)$ 三点做同样的操作,经过推导可以得到亚像素级别的边缘坐标 (X_e, Y_e) ,如式(10)所示。

$$\begin{cases} X_e = i + \frac{R(i-1, j) - R(i+1, j)}{2[R(i-1, j) - 2R(i, j) + R(i+1, j)]} R(i, j) > R(i-1, j) \text{ 且 } R(i, j) > R(i+1, j) \\ Y_e = j + \frac{R(i, j-1) - R(i, j+1)}{2[R(i, j-1) - 2R(i, j) + R(i, j+1)]} R(i, j) > R(i, j-1) \text{ 且 } R(i, j) > R(i, j+1) \end{cases} \quad (10)$$

2.4.2 改进的插值法亚像素边缘检测算法

通过分析可知,传统亚像素插值法,仅在 X, Y 方向,而不是在边缘的梯度方向进行,所以使用公式(10)会产生较大的误差。针对该影响,我们把未知的亚像素坐标点的梯度方向替换为已知边缘点的梯度方向,并进行插值操作,获取边缘的亚像素位置。

设 R 为灰度图中任意一点的梯度幅值, R_0 为边缘点 $R_0(i, j)$ 的灰度值梯度的幅值, R_{-1}, R_1 分别是在梯度方向上与 R_0 相邻的两个像素点 R_{-1}, R_1 的梯度幅值,经过推导可以得到改进亚像素坐标为:

$$\begin{cases} X_e = i + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{l}{2} \cos(\theta) \\ Y_e = j + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{l}{2} \sin(\theta) \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ 为梯度方向与 X 轴正方向的夹角; l 等于相邻像素点到边缘点的距离。

对图像使用改进插值法亚像素边缘检测算法,结果如图 7 所示。

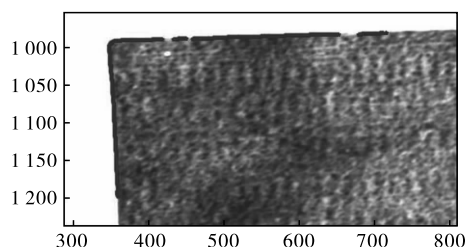


图 7 改进亚像素检测算法检测效果部分图

2.5 最小二乘法直线拟合原理

使用 Sobel 算子结合插值法提取碳毡边缘亚像素坐标时,获取的边缘轮廓为曲线,不利于获取角点,因此,该文采取最小二乘法对图像的边缘轮廓点进行拟合,以获得拟合后的直线模型。

提取边缘轮廓的亚像素轮廓点后通过观察可知,虽然这些像素点属于离散像素点,无法通过它们得出一个固定的描述这种关系的函数方程式,但这些数据近乎分布在一根直线两侧,所以使用某些方法可以找出一条能反应像素点位置的直线,使得这条直线“最贴近”已知的边缘点,设此直线方程为:

$$\hat{y} = ax + b \quad (12)$$

式(12)为回归直线方程。设 x_i 为 x 轴上各点的实际值,则 y_i 记为相应的 y 轴上各点的观察值,差值

$y_i - \hat{y}_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 描述了实际值 y_i 与回归线方程上对应值 \hat{y} 在纵坐标上的距离。若要使直线最靠近已知点, 则必须使得由 n 个差值所组成的总差值最小, 一般用 n 个差值的平方和来表示, 具体公式 (13) 如下:

$$\sum e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (13)$$

使用最小二乘法对边缘轮廓点进行拟合, 结果如图 8 所示。边缘深色框线为最小二乘拟合后的直线。

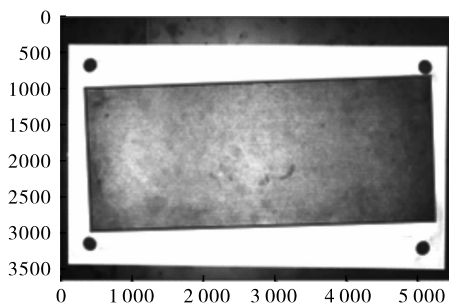


图 8 最小二乘拟合直线图

2.6 提取角点

根据 3.5 最小二乘法拟合直线拟合出碳毡的四条边的直线方程如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} y_1 = a_1x + b_1 \\ y_2 = a_2x + b_2 \\ y_3 = a_3x + b_3 \\ y_4 = a_4x + b_4 \end{cases} \quad (14)$$

式中分别为上、下、左、右四条边轮廓拟合出的函数方程, 从而计算出四个角点坐标分别为:

$$\begin{cases} A_1 = \left(\frac{b_3 - b_1}{a_1 - a_3}, a_1 \frac{b_3 - b_1}{a_1 - a_3} + b_1 \right) \\ A_2 = \left(\frac{b_3 - b_2}{a_2 - a_3}, a_2 \frac{b_3 - b_2}{a_2 - a_3} + b_2 \right) \\ A_3 = \left(\frac{b_4 - b_1}{a_1 - a_4}, a_1 \frac{b_4 - b_1}{a_1 - a_4} + b_1 \right) \\ A_4 = \left(\frac{b_4 - b_2}{a_2 - a_4}, a_2 \frac{b_4 - b_2}{a_2 - a_4} + b_2 \right) \end{cases} \quad (15)$$

3 实验结果和结论

该文的实验环境为: Windows 11 专业版, CPU: 2.8 GHz, RAM: 16 GB, OpenCV。在检测工位拍摄 100 张装配件图片, 人工检测下, 其中 92 张是合格品, 8 张为废品。自动检测采用传统 Sobel 检测算法和本算法进行检测, 检测结果如表 1 所示。

表 1 试验检测结果

	TP	FN	FP	TN	准确率	精确率	召回率
传统 Sobel 检测算法	80	12	2	6	0.860 0	0.975 6	0.869 6
该文改进算法	91	1	0	8	0.990 0	1.000 0	0.989 1

试验结果可以看出, 该文提出的算法系统相比于传统 Sobel 算法, 提高了准确率、精确率和召回率, 在各个方面均有提升, 达到了预期的效果, 能够准确的识别出碳毡是否占位。

4 结束语

该文设计了一种基于机器视觉的碳毡装配检测算法系统。对获取的图像应用改进的 Sobel 算子进行初步的边缘检测, 获取边缘的粗略坐标信息。然后采用改进的插值法亚像素边缘检测算法对这些粗略坐标进行细化, 得到更精确的坐标信息。然后, 利用最小二乘法对这些精确坐标进行直线拟合, 得到图像中的四个角点。最终, 通过对这些角点的位置关系进行装配信息判断和分析。通过实验表明, 该系统可以准确的识别出碳毡装配的结果。该文提出的方法也可推广到其他同列零件的检测中, 为该类零件的视觉检测系统的开发提供了参考。

参考文献:

- [1] 崔焱, 彭可, 杨玉娥, 等. 基于机器视觉的手机盖板表面缺陷检测系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(07): 75-79+96.
- [2] 张炳星, 高军伟, 王建冲, 等. 基于机器视觉的圆形垫圈尺寸测量系统设计[J]. 工具技术, 2023, 57(07): 141-145.
- [3] 丁统坤, 和晓军. 基于八方向 Sobel 算子的边缘检测系统设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42(02): 8-14.
- [4] 赵夫群. 基于改进中值滤波的图像去噪算法[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(02): 292-295+444.
- [5] 邹华东, 林胜鹏, 张志田, 等. 一种亚像素图像边缘检测算法及其在智能灌墨包装线上的应用[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(03): 93-99.
- [6] 陈金辉, 赵雷振. 密封橡胶圈毛刺缺陷检测方法的研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(12): 129-131+139.

(下转第 85 页)

度接近,且温升速率一致,其中制动工况 A、B 和 C 条件下碳陶制动盘均在制动时间为 65 s 时达到最高温度,制动工况 D 则在制动时间为 83 s 时达到最高温度。制动工况 E 对应的列车制动模式为最大常用制动,该条件下碳陶制动盘于 113 s 时达到峰值温度 899.3 °C。

列车在 4 种紧急制动工况下制动,碳陶制动盘盘面最高温度可达 941.4 °C,其极易使盘体因热疲劳而产生热裂纹,减少使用寿命;同时,巨幅热流使车下制动装置和转向架温度升高,增加了行车安全的风险。因此,列车在经历一次紧急制动后,应及时评估碳陶制动盘、制动缸及转向架的使用寿命。

4 结论

针对设置的 5 种制动工况,分别计算各工况下列车的制动距离,由于系统具有稳定及高数值的制动减速度,使用碳陶制动盘可以大幅降低列车的制动距离,在制动初速度为 350 km/h 及紧急制动 EP 模式下,列车的最大制动距离为 4630.1 m,远小于规定的最高 6500 m 的距离限值。

使用能量折算法仿真计算得到的盘面温升极限数值与实际测试结果比较相符。在设定的 5 种制动工况下,制动盘盘面的最高温度随制动坡度的增加而减小,不同制动模式下制动盘温升规律有所差别,温度极限值出现的时机也有所不同。

参考文献:

- [1] 张梦航,段俊杰,王晶晶. 碳纤维增韧陶瓷基摩擦材料的研究现状、挑战与展望[J]. 硅酸盐学报,2021,49(9):1878-1897.
- [2] 邵林,杨欣,郭奇宗. 时速 400 km 动车组紧急制动距离标准设计研究[J]. 铁道机车车辆,2021,41(5):144-148.
- [3] 章阳,吕宝佳,金哲. 高速动车组制动距离及制动减速度参数研究[J]. 铁道机车车辆,2020,40(03):11-16.
- [4] BAO Jiusheng, LIU Jing, YIN Yan, et al. Characterization and experiments on the friction catastrophe behaviors of brake material during emergency braking[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 55(2):55-62.
- [5] 农万华,熊启纯,韩晓明,等. 列车制动盘表面温度分布演变的研究[J]. 机械,2021,48(8):46-51.
- [6] 孙梦洁. 摩擦系数对制动盘温度的影响[D]. 大连:大连交通大学,2020.
- [7] LIANG Haiquan, SHAN Changsheng, WANG Xueping, et al. Matching Analysis of Carbon - Ceramic Brake Discs for High - Speed Trains[J]. Applied Science, 2023, 13(7):4532.
- [8] 薛应花,丁军君,王利军,等. 面向川藏铁路的机车车辆运行基本阻力研究[J]. 机车电传动,2021(3):67-72.
- [9] 左建勇,王雪萍,周苏芬,等. 动车组制动盘热仿真方法适用性研究[J]. 中国铁道科学,2022,43(5):78-86.
- [10] ALNAQI A A, BARTON D C, BROOKS P C. Reduced Scale Thermal Characterization of Automotive Disc Brake[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:658-668.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:173.
- [12] 王静,王海亮,向茂生,等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. 仪器仪表学报,2012,33(07):1460-1468.
- [13] LI Y, YOUNG Y T. Subpixel edge detection and estimation with a line scan camera[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1987, 35(1):105-112.
- [14] TABATABAI A J, MITCHELL O R. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1984, PAMI-6(2):188-201.
- [15] NALWA V S, BINFORD T O. On detecting edges. [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):699-714.
- [7] 张洪,周益华,吴静静. 基于改进 Canny 和异常轮廓点搜索的密封圈毛刺检测系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(10):126-130.
- [8] 陈浩,黄勋,赵志明. 一种基于改进 Sobel 算子的苹果图像边缘提取算法的研究[J]. 天津农业科学,2020,26(09):51-55.
- [9] ZHOU R, LIU D. Quantum image edge extraction based on improved sobel operator[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2019, 58(9).
- [10] 王春普,文怀兴,王俊杰. 基于机器视觉的大枣表面缺陷检测[J]. 食品与机械,2019,35(07):168-171.
- [11] 张棋,贾方秀,殷婷婷. 基于改进 Sobel 算法的实时图像边缘检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(02):101-104+108.

(上接第 43 页)