

# 微型齿轮的机器视觉检测系统设计

魏东亮<sup>1</sup>, 周迪斌<sup>1</sup>, 张家瑜<sup>1</sup>, 马建峰<sup>2</sup>, 解利军<sup>3</sup>

(1. 杭州师范大学 杭州国际服务工程学院, 杭州 311121;

2. 杭州手表有限公司, 杭州 310015; 3. 浙江大学 航空航天学院, 杭州 310028)

**摘要:** 微型齿轮在精密仪器设备中经常使用, 其齿长的误差大小与整个仪器的精密准确性密切相关; 传统微型齿轮检测以人工检测为主, 人工检测存在检测精度低、量化不准确的问题; 为了能够精确地计算齿长误差, 并给出量化结果, 文章提出一种基于机器视觉的微型齿轮齿长误差检测系统, 先通过小波变换去除图像噪声, 然后使用 Radon 变换算法矫正零件图像, 再使用一种基于局部区域特征的三次曲线模型提取感兴趣区域亚像素边缘信息, 并通过投影映射精确计算边界位置, 最后计算齿轮中心点的动态极差并以此数据作为判断齿长是否合格的标准; 实验结果表明, 该方法精度可达到  $2\ \mu\text{m}$ , 准确率可达到 99%, 单帧检测时间平均 18 ms, 一个零件大约 5 s 可以给出可靠的结论, 该方法效率高, 准确性好, 能够满足工业检测的要求。

**关键词:** 齿轮检测; 亚像素边缘; 直线检测; 动态极差

## Design of Machine Vision Inspection System for Micro Gears

Wei Dongliang<sup>1</sup>, Zhou Dibin<sup>1</sup>, Zhang Jiayu<sup>1</sup>, Ma Jianfeng<sup>2</sup>, Xie Lijun<sup>3</sup>

(1. Hangzhou International Service Engineering College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China;

2. Hangzhou Watch Co., Ltd., Hangzhou 310015, China;

3. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

**Abstract:** Micro gears are often used in precise instruments and devices, and the error of their tooth length is closely related to the precision of an entire instrument. Traditional gear detection is mainly performed manually, however, low precision and inaccurate quantification exist in manual detection. To accurately calculate the tooth length error and obtain quantified results, this paper proposed a system to detect the tooth length error of micro gears based on machine vision. In this system, firstly, the image noise was removed by wavelet transform; then Radon transform method was adopted to correct the part image; a cubic curve model based on local characteristics was employed to extract the sub-pixel edge information of an interested area, and the boundary location was accurately calculated through projection mapping; finally, the dynamic range of the gear center was calculated to judge the tooth length. The experimental results show that this method can reach a precision up to  $2\ \mu\text{m}$ , an accuracy rate up to 99%, and an average single-frame detection time of 18 ms, as well as obtain reliable conclusions of a part about 5 s. With efficiency and accuracy, this method can meet the requirements of industrial detection.

**Keywords:** gear detection; sub-pixel edges; line detection; dynamic range

## 0 引言

在精密机械行业, 微型擒纵轮 (见图 1) 是一种常见的微型齿轮。擒纵轮在生产过程中容易出现断齿的问题, 因此, 在组装设备之前必须进行质量检测。传统的检测方法主要是人工检测, 工人通过显微镜放大零件图像, 并对标准的图纸判断是否有断齿。人工检测依赖个人经验, 主观性强, 易疲劳, 导致产品质量管理的不稳定, 且难以量化评估。采用机器视觉技术进行质量检测是行业发展趋势, 其能有效保证产品检测的准确度和稳定性。

数字图像以像素 (pixel, px) 为基本单位, 在边缘检

收稿日期: 2019-08-31; 修回日期: 2019-09-15。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772301); 浙江省自然科学基金项目(LY17F020016); 杭州师范大学第二轮专业学位研究生课程教学案例库建设, 工业智能制造项目(横向)。

作者简介: 魏东亮(1987-), 男, 河南民权县人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉和人工智能方向的研究。



图 1 擒纵轮

测时, 为提高精度, 经常需要进行亚像素级别的定位。亚像素边缘是指将边缘附近的像素进行分解, 从而精确定位边缘<sup>[1]</sup>。常用的亚像素检测方法<sup>[2-3]</sup>有矩法、最小二乘方差法、插值法及拟合法等。

文献[4-5]提出了两种基于 Zernike 矩的亚像素边缘定位法。文献[6-7]提出了两种基于高斯拟合的亚像素边缘检测算法。文献[2, 8-9]提出了基于二次曲线拟合的亚像素定位模型, 该模型在理想条件下定位精准度高。文献

[10]提出了一种通过三次多项式拟合的亚像素边缘定位方法,该方法能够达到较高的精度。本文参考以上文献,使用一种基于局部区域特征的三次曲线模型来计算亚像素位置,这种模型考虑了局部的特征和边缘梯度,精度高,速度快,能够满足项目的需要。

对于齿轮齿长缺陷的检测,目前常用的方法有灰度值比较法<sup>[11]</sup>、直线拟合法<sup>[12]</sup>、图像特征识别的方法<sup>[13]</sup>等。这些方法一般都要要求镜头面向轮片,如果需要同时检测轮片的平整度就会迫使系统变得更加复杂。针对机械行业中微型齿轮需要同时检测齿长误差和轮片平整度等多个指标的情况,本文提出一种中点极差分析的方法,可以在齿轮竖直放立的情况下同时检测齿长误差和轮片平整度等多个指标,检测效率高。

## 1 系统总体设计

### 1.1 光学方案设计

根据本项目的特点,要求系统必须满足以下几点:1)所采用的光学系统成像要清晰,对比度好,噪声少;2)算法能够精确地计算出检测目标的边缘线;3)算法必须具有一定的鲁棒性,比如能够自动矫正一定的倾斜角度,能够在亮度不太理想的情况下自动矫正对比度,准确定位目标区域。

微型擒纵轮体积微小,为了减少拍摄产生的边缘虚影,所以选择平行背光源,镜头采用高分辨率低畸变的远心镜头。检测系统采用视频检测方式,零件放置在专用的工作台上,使用导气管送气吹动零件转动。工作台如图2所示。

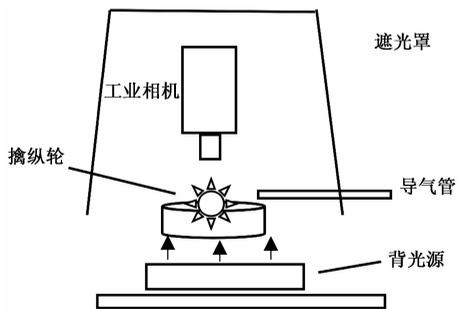


图2 工作台

### 1.2 算法框架

齿轮齿长误差检测依次经历如下步骤:图像采集与预处理,倾角矫正,感兴趣区域(region of interest, ROI)垂直边缘的亚像素位置计算,齿轮中心位置计算,中心位置动态极差计算,齿长合格判定。图3显示了这个流程框架。

## 2 边缘检测与亚像素定位

### 2.1 图像采集和预处理

#### 2.1.1 图像去噪

齿轮表面有时候会附着一些细小的灰尘颗粒,工作的环境也可能存在光线不理想等情况,这样得到的零件图像上常常会存在一些噪声。噪声的存在会干扰目标的识别和

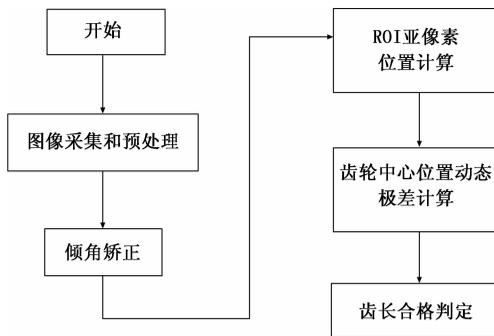


图3 算法流程

边缘的精确定位,所以需要去噪。

目前去噪的方法主要有空间域处理法和频率域处理法。空间域处理法常见的有均值滤波、中值滤波、高斯模板卷积等方法,这些方法在滤除噪声的同时往往会破坏图像边缘等细节,使图像变得模糊。本系统需要精确定位微型齿轮的边缘,所以空间域处理法不是首选。频率域去噪方法常见的有基于傅里叶变换的方法、基于离散余弦变换的方法、基于小波变换的方法等。其中小波变换方法在空域和频域都具有良好的局部化特性,在去除噪声的同时能保持图像细节,提高图像的质量。基于以上分析,本系统采用小波变换的方法进行去噪处理。

小波变换去噪方法的原理如下:使用滤波器把含有噪声的图像信号分解到各尺度中,在每一尺度下把属于噪声的小波系数去掉,保留并增强属于信号的小波系数,最后再经过小波逆变换恢复图像信号。小波变换使用的滤波器一般由一个低通滤波器和一个高通滤波器组成。图像信号通过低通滤波器得到其低频分量,通过高通滤波器得到其高频分量,噪声一般属于高频分量,高频分量可以再继续分解下去。小波变换可以选择不同的变换函数,以获得最佳的效果。使用coif2小波基函数进行去噪,效果如图4所示。

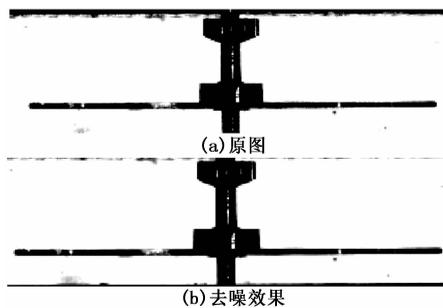


图4 小波去噪

从图4可以看出,小波变换可以满足项目需要的去噪效果。

#### 2.1.2 阈值分割

齿轮图像中背景为白色,目标为黑色,原图中在零件边缘处会有一些虚影,为增强对比度,消除虚影,需要进

行阈值分割。实验中分别使用固定阈值法、最大类间方差法、迭代阈值法、P 参数法进行二值化处理，结果表明固定阈值法二值化效果最好，最佳阈值的经验值为 100。固定阈值法实验结果如图 5 所示。

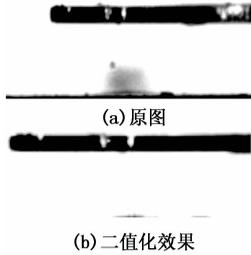


图 5 二值化

### 2.2 图像矫正

零件在采样的过程中容易存在一定的倾斜，倾斜的角度一般在水平线上下 30° 之内。目前常用的倾角矫正方法有：基于投影的方法、基于 Hough 变换的方法、基于 Radon 变换的方法、基于线性拟合的方法等。本文采用基于 Radon 变换的方法。

相比较于 Hough 变换方法，Radon 变换方法的抗干扰性更好，效率更高。Radon 变换直线检测算法采用穷举式搜索将待检测图像的灰度分布函数沿不同方向的直线积分路径积分，找出超过给定阈值的积分极大值点，则图像中待检测直线方向就垂直于该极大值点的直线积分路径。在 Radon 变换检测出的直线中，找到位于零件正常倾斜范围的直线，将其倾斜角度作为零件倾斜的角度，然后进行反向旋转即可矫正图像。

设  $f(x, y)$  为一个二维函数，则 Radon 变换<sup>[14-15]</sup>定义如下式：

$$g(\theta, \rho) = \iint f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy \quad (1)$$

Radon 变换将原图像空间中的直线映射为  $(\rho, \theta)$  参数空间中的点（线积分值），原来在图像空间上的一条直线的所有的点在参数空间上都位于同一点。记录参数空间上的点的积累厚度，便可知图像空间上的线的存在性。因而，对原图像中直线的检测可转化为对参数空间中点的检测。

Radon 变换矫正图像步骤为：

- 1) 读入原图像并转化为灰度图，使用 canny 算子进行边缘检测。
- 2) 对图像在  $-90 \sim 90^\circ$  上进行 Radon 变换。
- 3) 提取变换后最大峰值点对应的角度  $\alpha$ ， $\alpha = \alpha - 91$ ，如果满足  $-45 \leq \alpha \leq 45$ ，则将此  $\alpha$  作为图像的水平倾斜角，如果不满足则继续查找剩下的最大峰值对应的角度，直到找到属于  $[-45, 45]$  的角度并以此作为图像的倾角  $\theta$ 。
- 4) 对图像旋转  $-\varphi$ ，完成矫正。

使用以上方法能够矫正擒纵轮图像的倾斜，如图 6 所示。

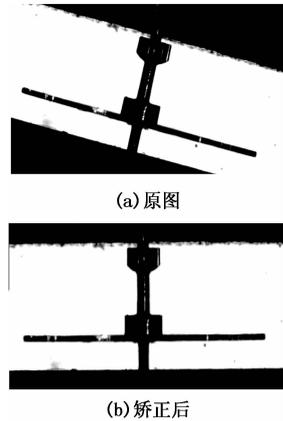


图 6 图像矫正

### 2.3 ROI 亚像素位置计算

本文采用一种基于局部区域特征的三次曲线模型来计算亚像素位置，该模型针对每个可能的边缘像素，选取一个  $5 \times 3$  的模板，并在模板区域内计算一个三次曲线，利用此曲线确定边缘点的亚像素位置。三次模型需要基于一次模型进行推导，故先介绍一次模型。

#### 2.3.1 一次函数模型

如图 7 所示，假设直线  $L: y = kx + b$  是图像中的边缘，且  $L$  将图像分成上下两部分，分别记做  $M$  和  $N$ 。这两部分的面积分别记做  $S_M, S_N$ ， $M, N$  也表示  $M, N$  两部分的平均灰度值。直线  $L$  所在的坐标系原点为  $(i, j)$ ，设  $(i, j)$  处像素的灰度值为  $F(i, j)$ ，它也表示整个模板区域的平均灰度值。设模板区域总面积为  $S$ <sup>[2]</sup>。则有：

$$S = S_M + S_N \quad (2)$$

$$F(i, j) = \frac{N \cdot S_N + M \cdot S_M}{S} \quad (3)$$

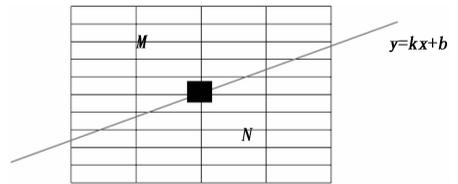


图 7 一次函数模型

考虑中间像素  $(i, j)$  的  $5 \times 3$  邻域模板，以  $L_2, M_2$  和  $R_2$  来表示模板中直线  $L$  下侧左、中、右列的像素面积，如图 8 所示。直线  $L$  坐标系原点的位置依然是  $O(i, j)$ ， $l$  列中心的横坐标是  $i - 1$ ， $r$  列中心的横坐标是  $i + 1$ ；最上一行的中心位置纵坐标是  $j + 2$ ，最下一行中心位置的纵坐标是  $j - 2$ ；设每个像素格的边长为  $w$ 。

$$L_2 = \int_{-\frac{3w}{2}}^{-\frac{w}{2}} (kx + b + \frac{5}{2}w) dx = (\frac{5}{2} - k)w^2 + bw \quad (4)$$

$$M_2 = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} (kx + b + \frac{5w}{2}) dx = \frac{5}{2}w^2 + bw \quad (5)$$

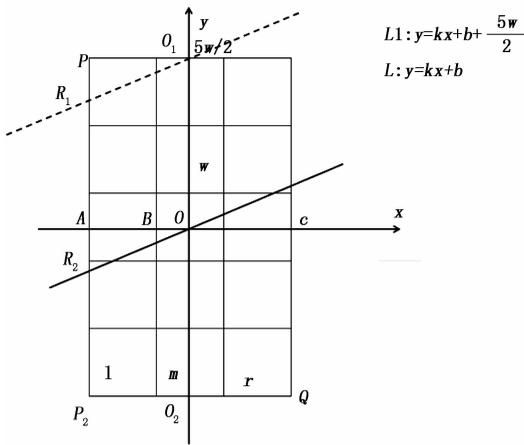


图 8 5×3 模板

$$R_2 = \int_{\frac{w}{2}}^{\frac{3w}{2}} (kx + b + \frac{5w}{2}) dx = (\frac{5}{2} + k)w^2 + bw \quad (6)$$

设 5×3 模板中左边一列的像素灰度值之和为  $T_l$ , 中间一列为  $T_m$ , 右边一列为  $T_r$ , 则有:

$$T_l = \sum_{j=j-2}^{j+2} F(i-1, j) \quad (7)$$

将式 (3) 代入, 可得:

$$T_l = 5N + \frac{M-N}{S} \sum_{j=j-2}^{j+2} S_M = 5N + \frac{M-N}{S} L_2 \quad (8)$$

$$T_m = \sum_{j=j-2}^{j+2} F(i, j) = 5N + \frac{M-N}{S} M_2 \quad (9)$$

$$T_r = \sum_{j=j-2}^{j+2} F(i+1, j) = 5N + \frac{M-N}{S} R_2 \quad (10)$$

### 2.3.2 三次函数模型

一次函数模型是三次函数模型三次项系数和二次项系数都为 0 时的特殊形式, 使用三次函数模型来预测边缘点的亚像素位置会比一次函数模型更精确一些。三次函数模型预测亚像素位置如图 9 所示。各数学符号还保持前面的定义, 假设曲线  $f: y = ax^3 + bx^2 + cx + d$  为图像中的边缘。

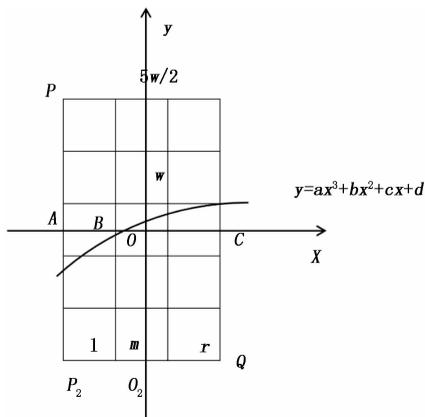


图 9 三次函数模型

边缘下侧左、中、右部分面积计算:

$$L_2 = \int_{-\frac{3w}{2}}^{\frac{w}{2}} (ax^3 + bx^2 + cx + d + \frac{5}{2}w) dx = -\frac{5}{4}aw^4 + \frac{13}{12}bw^3 + (\frac{5}{2} - c)w^2 + dw \quad (11)$$

$$M_2 = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} (ax^3 + bx^2 + cx + d + \frac{5}{2}w) dx = -\frac{5}{4}aw^4 + \frac{13}{12}bw^3 + (\frac{5}{2} - c)w^2 + dw \quad (12)$$

$$R_2 = \int_{\frac{w}{2}}^{\frac{3w}{2}} (ax^3 + bx^2 + cx + d + \frac{5}{2}w) dx = \frac{5}{4}aw^4 + \frac{13}{12}bw^3 + (c + \frac{5}{2})w^2 + dw \quad (13)$$

式 (8) ~ (10) 在 3 次函数模型中依然成立。将式 (11) ~ (13) 代入式 (8) ~ (10) 中, 可以解得:

$$d = \frac{26T_{m-120N-(T_l+T_r)}}{24(M-N)} S - \frac{5}{2} \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 三次函数模型下像素点  $(i, j)$  对应的亚像素位置为  $(i, j - d)$ 。

在上面的公式中,  $M, N$  代表了边缘两侧平均灰度值,  $|M - N|$  则代表了边缘两侧的梯度幅值, 其方向为边缘的梯度方向。

设点  $O(x, y)$  处沿  $x$  方向的偏导数为  $f_x$ , 沿  $y$  方向的偏导数为  $f_y$ 。当  $f_x \cdot f_y > 0$  时, 设  $\Delta x = 1$ ; 反之,  $\Delta x = -1$ 。

$$M = \frac{1}{2} [F(i, j+2) + F(i+\Delta x, j+2)] \quad (15)$$

$$N = \frac{1}{2} [F(i-\Delta x, j-2) + F(i, j-2)] \quad (16)$$

将式 (15)、(16) 代入式 (14), 即可求得三次函数模型下的亚像素位置。

在使用上述模型之前必须先粗略定位出边缘的位置。对于每个边缘点, 使用上述模型求解其亚像素位置。

### 2.4 计算边缘直线

如图 10 所示, 我们需要描绘出 ROI 垂直边缘的直线。可以使用投影法来生成直线。投影法是通过计算图像在水平和垂直边缘上的像素点的个数来确定边缘的位置。



图 10 ROI 垂直边缘线

投影法生成垂直线的方法如下: ROI (图中矩形框中的区域) 中以列为单位, 统计每列的像素数, 相当于往  $x$  轴投影, 如下面的式 (17) 所示, 其中  $f(i, j)$  为  $(i, j)$  处的像素值。为了利用计算前面得到的亚像素位置,  $i, j$  的增量都设置为 0.5 px, 即将 1 个像素点分解为 4 个亚像素点, 这样就可以将边缘精确到 0.5 像素:

$$V_i = \sum_{j=0}^{\Delta y} f(i, j) \quad (17)$$

其中：当  $f(i, j) > d$  时,  $f(i, j) = 1$ , 当  $f(i, j) \leq d$  时,  $f(i, j) = 0$ ,  $\Delta y$  是 ROI 在  $y$  轴方向的长度, 阈值  $d$  取 100。

在图 11 中, 从左往右依次是黑色区域, 白色区域, 所以生成的  $V_i$  数组从左往右依次是谷, 峰, 取峰值处的横坐标  $x_0$  为生成的垂直线段  $L_1$  的起点  $P_1$  的横坐标,  $L_1$  的终点  $P_2$  的横坐标也取  $x_0$ ,  $P_1$ 、 $P_2$  纵坐标取 ROI 沿  $y$  轴方向的起点和终点的纵坐标, 连接  $P_1$ 、 $P_2$  即得到垂直线段  $L_1$ 。

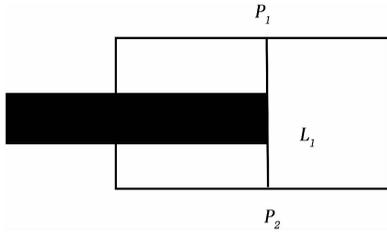


图 11 投影法原理

### 3 齿长误差测定

#### 3.1 中点极差法原理

实验中擒纵轮外围的齿数为 20 个, 属于偶数。从图 12 中可以看到, 20 个齿均匀分布在齿轮外围, 每个齿所占有的弧度相等, 齿的特征也完全相同, 所以整个齿轮呈现中心对称的特征。过圆心的直线与两端齿的交点总是处于齿的同一个特征位置。如图 13, 为了判断断齿情况, 可以利用齿轮直径的两个端点  $A$ 、 $B$  的位置计算出中点  $O$  的位置, 并通过计算一定数量帧的圆心  $O$  位置的极差来确定。这一方法在本文中称为中点极差法。



图 12 齿轮对称特性

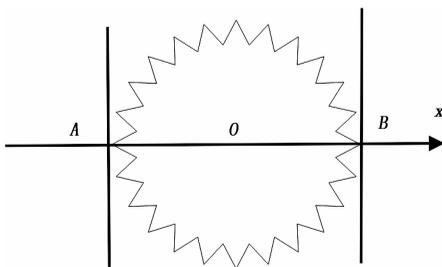


图 13 中点极差法图

齿轮在旋转的过程中, 如果各个齿的长度相同, 则圆心  $O$  位置没有变化, 反之, 圆心  $O$  的位置会发生变化。如图 14 所示, 设各点坐标  $A(x_1, 0)$ 、 $B(x_2, 0)$ 、 $O(x_m, 0)$ , 当有断齿情况出现时,  $A$  点偏移到  $A'(x'_1, 0)$ ,  $B$  点偏移到  $B'(x'_2,$

$0)$ ,  $O$  点偏移到  $O'(x'_m, 0)$ 。

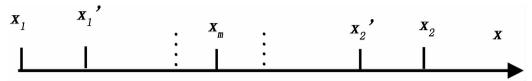


图 14 断齿偏移分析图

无断齿时, 有:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (18)$$

设断齿所缺失的部分长度为  $d$ , 先考虑右侧断齿情况:

$$d = |x_2 - x'_2| \quad (19)$$

$$x'_m = \frac{x_1 + x'_2}{2} \quad (20)$$

中点偏移量  $\Delta x_{m1} = x_m - x'_m = \frac{d}{2}$ ,  $x'_m$  向左移动。

当断齿旋转到左侧  $x_1$  位置时,  $x'_m$  向右移动, 且中点偏移量  $\Delta x_{m2} = -\Delta x_{m1}$ , 由于这两个中点偏移量都是因同一个断齿所产生, 记:

$$\Delta x_m = |\Delta x_{m1}| + |\Delta x_{m2}| = d \quad (21)$$

由式 (21) 可知, 中点位置偏移量  $\Delta x_m$  可以代表断齿的缺失长度  $d$ , 所以, 可以通过计算一定数量的中点位置极差来判断断齿情况。

#### 3.2 中点偏移量有效范围

中点偏移量只能在一定范围内表示断齿的缺失长度。如图 15 所示, 设  $OP$ 、 $OQ$  是紧邻的两个齿,  $OP$  位于水平位置。

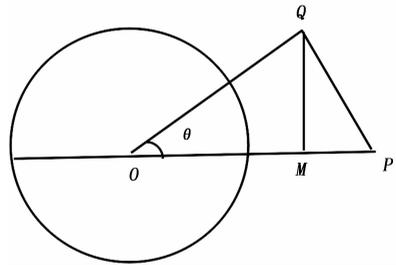


图 15 中点偏移量有效范围

$$\theta = \frac{360^\circ}{20} = 18^\circ \quad (22)$$

$$PM = OP - OM = OP - OQ \cdot \cos\theta \quad (23)$$

中点偏移量:

$$\Delta x_m \leq |PM| \quad (24)$$

所以, 使用  $\Delta x_m$  代表  $d$  仅当  $d \leq |PM|$  时成立。代入产品的参数, 可以求得  $|PM| = 21 \text{ cmm}$  (忽米, 丝)。

#### 3.3 单位换算关系

工业上描述微观尺寸误差时经常使用的测量单位是忽米, 而数字图像的单位是像素。如图 16 所示, 测量得到轮片的厚度为 30 px, 实际厚度为 12 cmm, 所以得出换算关系:  $1 \text{ cmm} = 2.5 \text{ px}$ ,  $1 \text{ px} = 0.4 \text{ cmm}$ 。

### 4 实验结果与分析

根据企业的规定, 本文所述的这种擒纵轮齿长的合格



图 16 擒纵轮厚度测量

标准是最大偏差小于等于 2 mm。根据前面的分析, 中点极差法中点位移偏差在 21 mm 以内都是有效的, 所以中点极差法适合测量此种类型的擒纵轮。

为了检测算法的稳定性, 对 400 个零件进行了测试, 其中 200 个合格品, 200 个断齿缺陷品。对于每一个零件的检测结果, 都与人工检测结果进行比对。软件检测结果如表 1 所示。

表 1 软件检测实验

|     | 被检数量 | 正确检测数量 | 误检数量 | 正确率/% |
|-----|------|--------|------|-------|
| 合格品 | 200  | 196    | 4    | 98    |
| 缺陷品 | 200  | 200    | 0    | 100   |
| 合计  | 400  | 396    | 4    | 99    |

经分析, 出错的原因在于当擒纵轮轮片不平整情况严重时会导致图像左右摆动幅度增大, 从而导致误判。轮片平整度偏差大于 2 mm 时属于不合格品。实验表明, 只有当轮片平整度超出合格范围时其对左右摆动的影响才会比较明显, 此时可能导致误判为断齿, 而平整度小于 2 mm 的合格品一般不会影响断齿的判定。所以, 虽然少数非断齿品可能误判为断齿, 但并不影响对该零件整体质量是否合格的判定。

通过亚像素算法得到的像素点的位置是浮点型数据, 根据下面的式 (25) 将亚像素位置精确到 0.5 px 的整数倍。

$$x = \begin{cases} [x], & x < [x] + 0.5 \\ [x] + 0.5, & x \geq [x] + 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

$$x \geq 0$$

从测试数据中选取有代表性的 5 个合格品和 5 个断齿缺陷品, 其检测数据见表 2。表中偏差值的单位是像素。

表 2 对比实验

| 序号 | 中点最大极差/px | 软件测试结论 | 人工检测结论 | 是否一致 |
|----|-----------|--------|--------|------|
| 1  | 1.2       | 合格     | 合格     | 是    |
| 2  | 2.2       | 合格     | 合格     | 是    |
| 3  | 4.5       | 合格     | 合格     | 是    |
| 4  | 5         | 合格     | 合格     | 是    |
| 5  | 3.5       | 合格     | 合格     | 是    |
| 6  | 5.5       | 断齿     | 断齿     | 是    |
| 7  | 50.5      | 断齿     | 断齿     | 是    |
| 8  | 52.5      | 断齿     | 断齿     | 是    |
| 9  | 12.5      | 断齿     | 断齿     | 是    |
| 10 | 24        | 断齿     | 断齿     | 是    |

表 2 中, 产品序号为 1~5 的零件中点最大偏差值都小于等于 5, 属于合格品。产品序号为 6~10 的零件中点最大偏差值都属于 (5, 52.5], 属于断齿缺陷品。类似的数据在项目测试中普遍存在。21 mm 就对应 52.5 px, 上述实验数据也证明了 2.5.2 中得出的中点偏移量有效范围的正确性。

由实验中人工和软件检测结论的一致性可以进一步确定,  $5 \text{ px} \leq 2 \text{ mm}$ ,  $5.5 \text{ px} > 2 \text{ mm}$ 。

$$\begin{cases} 5 \text{ px} \leq 2 \text{ mm} \Rightarrow 0.5 \text{ px} \leq 0.2 \text{ mm} \\ 5.5 \text{ px} > 2 \text{ mm} \Rightarrow 0.5 \text{ px} > 0.18 \text{ mm} \\ 0.18 \text{ mm} < 0.5 \text{ px} \leq 0.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (26)$$

由式 (26) 可知, 使用 0.5 px 代表 0.2 mm 的误差小于 0.02 mm。

在该项目中, 亚像素位置的精确计算对于系统精度起着重要作用。项目中的精确度为 0.5 px, 对应 0.2 mm 的实际长度, 这一对应关系误差小于 0.02 mm。这能够满足工厂对该零件的检测要求。

系统运行实况如图 17 所示, 其中 OK 表示合格品, NG 表示缺陷品, 垂直字样就代表对齿长误差的判定。

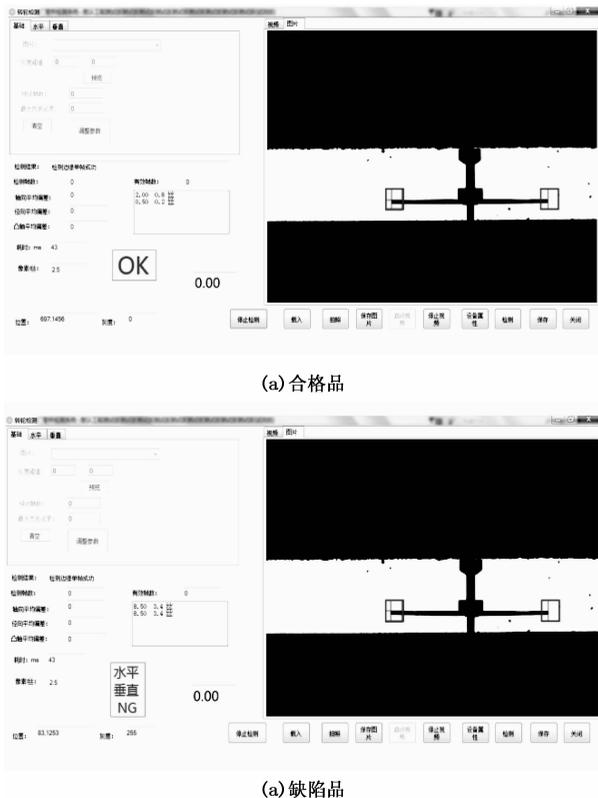


图 17 系统工作实况

### 5 结束语

目前微型零件检测逐步向非接触式、数字化检测方向发展, 引入机器视觉检测技术, 既能保证检测结果的准确性, 又能缓解工厂招工困难的问题, 深受企业的欢迎。

本文提出一种微型擒纵轮的机器视觉检测方法, 算法

的平均准确率为 99%，系统精度达到 2 μm，单帧检测时间平均 18 ms，一个零件可以在 5 s 左右给出可靠的结论。实验结果表明：该算法能够实时和准确地检测擒纵轮的齿长缺陷问题，能够满足工业检测的要求。

微型擒纵轮是一种常见的微型齿轮，文章提出的检测方法，对于其他具有中心对称特征的微型齿数具有借鉴意义。

**参考文献：**

[1] 吴 鹏, 徐洪玲, 宋文龙, 等. 基于非线性四阶图像插值的亚像素边缘检测算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36 (2): 243 - 247.

[2] Trujillo P, Agustín, Krissian K, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect [J]. Image and Vision Computing, 2013, 31 (1): 72 - 90.

[3] 凌 程, 耿修瑞, 杨炜曦, 等. 一种改进的基于奇异值分解的亚像素级图像配准算法 [J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36 (1): 101 - 108.

[4] 李慧鹏, 刘缤艳, 魏晓马, 等. 基于 Zernike 矩的圆形插针特征点提取算法研究 [J]. 半导体光电, 2019, 40 (1): 129 - 133.

[5] Xiang F, Wang Z, Yuan X. Subpixel edge detection: an improved zernike orthogonal moments method [A]. International Conference on Intelligent Human - machine Systems & Cyber-

netics [C]. IEEE, 2013.

[6] 段振云, 王 宁, 赵文珍, 等. 基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (1): 219 - 225.

[7] 韩 东, 李煜祺, 武彦辉. 基于高斯拟合的亚像素边缘检测算法 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (6): 210 - 213, 229.

[8] 贺忠海, 王宝光, 廖怡白, 等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (2): 195 - 197.

[9] 赵爱明. 基于二次曲线拟合的图像亚像素边缘定位算法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11 (3): 68 - 70.

[10] 陈 静, 尚雅层, 田军委. 快速多项式拟合亚像素边缘检测算法的研究 [J]. 应用光学, 2011, 32 (1): 91 - 94.

[11] 李 凯, 王化明, 沈 玮, 等. 粉末冶金齿轮的视觉缺陷检测方法研究 [J]. 电气与自动化, 2019 (2): 173 - 176.

[12] 丁洪昌, 程 远. 基于机器视觉检测齿轮加工质量的研究 [J]. 长春师范大学学报, 2019, 38 (6): 24 - 29.

[13] 张 曼, 陈 宁. 图像识别智能化处理技术在塑料齿轮缺齿检测中的应用 [J]. 塑料科技, 2019, 47 (5): 89 - 94.

[14] 许亚杰, 韦海成, 肖明霞. 基于特征域聚类下 Radon 变换的火车票图像方向检测算法研究 [J]. 液晶与显示, 2018, 33 (12): 1033 - 1039.

[15] 彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜, 等. 基于二分查找的 Radon 变换直线检测改进算法 [J]. 半导体光电, 2019, 40 (3): 438 - 443.

(上接第 45 页)

键信号的电气参数。其故障测试功能也可检测当前供电设备的控制导引电路的电气参数是否与国标规定的电气参数相一致。经试验结果表明，该控制导引功能检测系统适用于检测是否符合 GB/T 18487.1—2015 规定的电动汽车交流供电设备，包括缆上控制与保护装置、交流充电桩、非车载充电机等；同时也可以作为新能源汽车专业在交流充电教学过程的实训装置。

**参考文献：**

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 18487.1—2015 《电动汽车传导充电系统 第 1 部分：通用要求》[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 20234.1—2015 《电动汽车传导充电用连接装置 通用要求》[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 20234.2—2015 《电动汽车传导充电用连接装置 交流充电接口》[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[4] 张建伟, 杨 芳, 秦 俭, 等. 电动汽车交流充电控制导引系统设计 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (5): 78 - 82.

[5] 徐 坤, 周子昂, 吴定允, 等. 电动汽车交流充电桩控制系统

设计 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (3): 47 - 52, 7.

[6] 韩 帅, 曾 博. 一种电动汽车充电控制导引系统设计 [J]. 电工电气, 2014 (10): 56 - 58.

[7] 郭 瞻, 肖祖铭. 电动汽车交流充电桩智能控制系统设计 [J]. 河南科技, 2018 (28): 110 - 111.

[8] 桑 林, 徐洪海, 管 翔. 电动汽车交流充电接口控制导引电路试验设计 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (2): 112 - 115, 120.

[9] 郭 瞻, 肖祖铭. 电动汽车交流充电桩智能控制系统的设计 [J]. 计算机产品与流通, 2019 (4): 288.

[10] 田 奕. 基于 STM32F103RCT6 的电动汽车交流充电桩的硬件系统设计 [J]. 科学技术创新, 2018 (28): 61 - 62.

[11] 杨海英, 赵安国, 周华良, 等. 一种交流便携式电动汽车充电箱的系统设计 [J]. 电子技术应用, 2014, 40 (2): 65 - 67.

[12] 桑 林, 徐洪海, 管 翔. 电动汽车交流充电接口控制导引电路试验设计 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (2): 112 - 115, 120.

[13] 袁金云, 王向东, 王冬青, 等. 基于 PLC 的电动汽车交流充电桩控制系统研究 [J]. 青岛大学学报 (工程技术版), 2015, 30 (2): 38 - 41, 51.