

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.006

基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法研究*

邵 勇 张 钰 婷 顾 桂 鹏 顾 金 鑫 答 鹏

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200072)

摘要:提出了基于齿轮外轮廓最小凸包及凸包缺陷的直齿圆柱齿轮齿数及缺齿识别算法,采用二值图像连通域跟踪提取齿轮外轮廓,然后进行外轮廓最小凸包及凸包缺陷检测,去除伪凸包缺陷后进行齿数检测及缺齿部位识别。根据直齿圆柱齿轮外形特征,提出了基于齿轮外轮廓凸包顶点的齿顶圆检测方法,以及基于齿轮外轮廓凸包缺陷最深点的齿根圆拟合方法,实现了直齿圆柱齿轮的特征圆参数快速测量。实验结果表明,齿数及缺齿识别算法正确率高达98.48%;与现有两种典型方法对比,齿轮特征圆拟合算法可以实现各种情况下齿顶圆和齿根圆的高速高精度定位。

关键词:直齿圆柱齿轮;最小凸包;缺齿检测;齿顶圆拟合;齿根圆拟合

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Research of spur gear detection method based on minimum convex hull

Shao Yong Zhang Yuting Gu Guipeng Gu Jinxin Zan Peng

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A spur gear tooth number and missing teeth identification algorithm based on minimum convex hull and convex defects of outer contour is presented in the paper. Firstly, the connected domain of binary image is adopted to trace the outer contour of gear. Then, the minimum convex hull and convex defects of outline are detected, and fake convex defects need to be removed before identifying tooth number and missing teeth part. According to the shape characteristics of spur gear, an addendum circle detection method based on the convex hull vertices of gear outer contour and a dedendum circle fitting method based on the deepest point of convex defects are proposed, which have realized the rapid measurement of characteristic circle parameters of spur gear. The experimental results show that the accuracy of the proposed tooth number and missing teeth recognition algorithm is as high as 98.48%. Compared with the existing two kinds of typical methods, the proposed characteristic gear circle fitting method can achieve high speed and high precision positioning of addendum circle and dedendum circle under various conditions.

Keywords: spur gear; minimum convex hull; missing teeth detection; addendum circle fitting; dedendum circle fitting

0 引言

齿轮作为机械传动中的重要零部件,其精度将直接影响系统的性能及寿命。除精度不合格外,齿轮产品还可能存在齿崩、缺齿、齿歪和披峰等缺陷。专用的齿轮检测仪设备昂贵,且使用和维修对专业技术要求高,所以大多数企业依旧采用传统机械测量仪器进行人工检测。传

统机械测量方法的效率极低,无法和生产流水线融合。

近年来,图像处理在齿轮检测中的应用研究较少,且现有成果存在一些不足之处。刘君等人^[1]研究了基于IMAQ Vision的小模数直齿圆柱齿轮的几何量参数的测量方法,通过虚拟圆形检测线与齿轮边缘交点个数除以2来得到齿数,该方法在有断齿情况且断齿高度大于圆形检测线时会发生误判断;张少军等人^[2]利用数字图像处理技术对直齿圆柱齿轮进行几何尺寸检测,通过二值

图像的重心作为齿轮的近似几何中心,但在有缺齿情况时齿轮重心会发生偏移,无法准确拟合出齿顶圆及齿根圆;杨淑莹等人^[3]研究了基于互信息和小波融合的齿轮外观缺陷检测算法,通过计算实物旋转图像与齿轮设计图的互信息,找出实现最佳配准的旋转角度,然后进行小波融合,但需要在融合的基础上通过人眼判断重合效果,并没有实现齿轮缺陷的全自动检测;贺秋伟等人^[4]利用支持向量机构造了齿轮缺陷识别的模型,实现了微型齿轮的缺陷检测,但针对不同型号齿轮需要构建不同的支持向量机并进行大量样本训练。

本文基于直齿圆柱齿轮的外形特征,提出了一种基于外轮廓最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法,包括齿数及缺齿检测和特征圆拟合两部分。实现了直齿圆柱齿轮齿数的快速检测以及缺齿部位准确识别,而且在缺齿或断齿的情况下,可以高速高精度拟合齿顶圆及齿根圆^[5]。

1 齿轮外轮廓检测

1.1 图像预处理

1) 图像滤波

将CCD拍摄的齿轮图像灰度化后,采用大小为 3×3 的离散化的高斯滑动窗口模板对灰度图像进行卷积,对一个 $(2k+1) \times (2k+1)$ 维的离散高斯核矩阵,其元素 $H_{i,j}$ 的计算公式为:

$$H_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: σ 为方差,核矩阵的维数由 k 确定。取 $k=1$, $\sigma=1$,得到 3×3 的高斯卷积核。经高斯滤波处理后的输出像素值 $G(i,j)$ 是输入像素值 $F(i+k,j+l)$ 和高斯核 $H(k,l)$ 的加权和:

$$G(i,j) = \sum_{k,l} F(i+k,j+l) H(k,l) \quad (2)$$

2) 灰度阈值图像分割

对模糊后的齿轮图像进行直方图统计并归一化,设齿轮灰度图共有 N 个像素点,灰度值为 i 的像素点的个数为 n_i ,则灰度值 i 在图像中出现的概率 P_i 为 n_i/N 。最大灰度值为 G_{\max} ,通过一个灰度阈值 $T(T \in (0, G_{\max}))$ 将像素点分为两部分 Part_A 和 Part_B 。出现的概率 u 和均值 v 可表示为:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum_{i=0}^T P_i = u(T), u_B = \sum_{i=T+1}^{G_{\max}} P_i = 1 - u(T) \\ v_A &= \frac{\sum_{i=0}^T i \times P_i}{u_A} = \frac{v(T)}{u(T)}, v_B = \frac{\sum_{i=T+1}^{G_{\max}} i \times P_i}{u_B} = \frac{v - v(T)}{1 - u(T)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $v = \sum_{i=0}^{G_{\max}} i \times P_i$ 是整个图像的灰度值平均值。则

Part_A 和 Part_B 的类间方差 $\sigma^2(T)$ 为:

$$\sigma^2(T) = u_A(v - v_A)^2 + u_B(v_B - v)^2 \quad (4)$$

阈值 T 从 $0 \sim G_{\max}$ 依次改变,当类间方差 $\sigma^2(T)$ 取得最大值时的 T 值即为齿轮灰度图的最佳阈值。

传统最大类间方差法^[6]需要从 $0 \sim G_{\max}$ 依次计算类间方差值,其中包含了大量无效搜索,通过缩小分割阈值的搜索范围,可以大大提高算法效率。在实际实验时,可以对典型的齿轮灰度直方图进行分析,确定其双峰间的谷底灰度值的集中范围,将阈值搜索区间从 $[0, G_{\max}]$ 缩小至该范围内,搜索效率将大大提高。

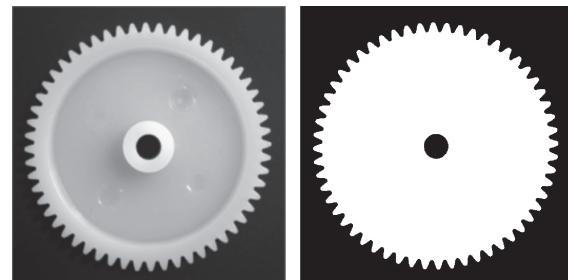


图1 齿轮图像预处理

Fig. 1 Preprocessing of gear image

1.2 基于二值连通域的外轮廓跟踪

齿轮的外轮廓包含了齿轮的一系列形状特征信息,包括齿形、齿数、齿顶圆、齿根圆等等。在对齿轮的齿数以及特征圆几何参数进行检测之前,需要获取齿轮的外轮廓。

在二值图像中,齿轮目标是一个连通的区域,采用基于二值图像连通域的轮廓跟踪方法得到齿轮的外轮廓点集序列。为了便于后续检测,从外轮廓纵坐标最小的点开始沿逆时针方向进行轮廓跟踪。具体轮廓跟踪方法如下。

1)如图2所示,从齿轮二值图像左下角开始按从下到上、从左到右的顺序遍历图像像素点,第一个灰度值为255的点即为第一个齿轮外轮廓点 $C_0(x_0, y_{\min})$ 。

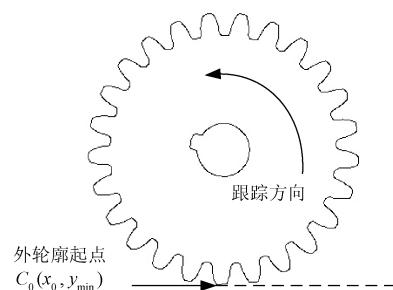


图2 齿轮外轮廓跟踪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gear outline tracking

2)定义一个齿轮外轮廓的搜寻模板 $Mask_c$,包括当

前轮廓点 C_{now} 及其八邻域的点,如图 3 所示,从右下角开始沿逆时针方向依次标记为(7,0,1,2,3,4,5,6),则下一个轮廓点 C_{next} 必定是其中一点,通过搜索 C_{now} 的八邻域点可以得到下一个外轮廓点 C_{next} 。

3	2	1
4	C	0
5	6	7

图 3 外轮廓搜寻模板 Mask_e

Fig. 3 Searching mask Mask_e of outline

对于齿轮外轮廓的起点 C_0 ,可知 5、6、7 必定为背景点,从 0 开始沿逆时针方向搜索,第一个灰度值为 255 的点即为下一个轮廓点。

当前轮廓点 C_{now} 和上一轮廓点 C_{pre} 的相对位置有两种情况:

$$C_{\text{pre}} = \begin{cases} \{f(x, y) \mid f(x, y) \in N_4(C_{\text{now}})\} \\ \{f(x, y) \mid f(x, y) \in (N_8(C_{\text{now}}) - N_4(C_{\text{now}}))\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $N_4(C_{\text{now}})$ 表示当前轮廓点的四邻域, $N_8(C_{\text{now}})$ 表示当前轮廓点的八邻域。

3) 对于外轮廓上任意一点 $C_i(x_i, y_i)$, 记 $C_{\text{pre}}(i)$ 在当前八邻域 $N_8(C_{\text{now}})$ 中的位置为 L (L 为八进制)。当 $L=1, 3, 5, 7$ 时, 可知点 $(L+1) \bmod 8$ 必定不是一个外轮廓点, 当 $L=0, 2, 4, 6$ 时, 可知点 $(L+1) \bmod 8$ 和 $(L+2) \bmod 8$ 均不为外轮廓。 $C_{\text{next}}(i)$ 起始搜索位置 D_{next} 和 L 的关系为:

$$D_{\text{next}} = \begin{cases} (L+2) \bmod 8, L = 1, 3, 5, 7 \\ (L+3) \bmod 8, L = 0, 2, 4, 6 \end{cases} \quad (6)$$

4) 当回到外轮廓起始点 C_0 时搜索结束, 得到一个闭合的单像素宽的齿轮外轮廓的点集序列 $\text{Seq}_{\text{outline}}(C_0, C_1, \dots, C_n)$, 其中起点为最下方的外轮廓点, 沿逆时针方向包围, 如图 4 所示。

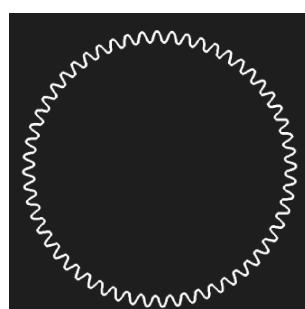


图 4 齿轮外轮廓跟踪结果

Fig. 4 Result of gear outer contour tracking

错误的情况,在跟踪完毕后需要对轮廓周长进行判断,若不在设定阈值范围内则视其为噪声,予以剔除后重新进行初始点选取与轮廓跟踪。

2 齿数检测及缺齿识别

本文提出了一种基于最小凸包的齿轮齿数及缺齿检测方法,主要包括 3 个部分: 齿轮外轮廓最小凸包拟合, 基于凸包缺陷的齿数检测, 缺齿部位识别。

首先对检测到的齿轮外轮廓点集序列 $\text{Seq}_{\text{outline}}$ 进行凸包拟合,在外轮廓凸包的基础上进行下一步检测。

凸包是一个计算几何学中的概念^[7]。对于一个实数向量空间中的集合 X , 其凸包 S 可以通过线性组合 X 内所有点 (x_1, x_2, \dots, x_n) 来构造:

$$S = \left\{ \sum_{j=1}^n t_j x_j \mid x_j \in X, \sum_{j=1}^n t_j = 1, t_j \in [0, 1] \right\} \quad (7)$$

对一个给定平面上的有限点集,存在无数多个凸多边形可以完全包围这个点集,其中最小的凸多边形就是该点集的凸包。在二维欧几里得空间中,齿轮的凸包可以想象成一条刚好包着齿轮外轮廓的橡皮圈。

通过观察齿轮外轮廓,可以发现一系列外形特征。对于连续大面积缺齿或断齿的缺陷齿轮可在上一步通过判断外轮廓面积范围予以剔除,以下特征均基于齿轮无大面积缺齿或断齿情况。

- 1) 合格齿轮的齿数 Z 与齿槽数相等;
- 2) 齿轮外轮廓的凸包顶点位于轮齿齿廓上,且每一个合格轮齿上都存在至少一个凸包顶点;
- 3) 齿槽可看作是凸包与齿轮外轮廓之间存在的凸包缺陷,但并不是所有的凸包缺陷均为齿槽,只有当缺陷最大深度在一定范围内时该缺陷才是齿槽;
- 4) 缺齿或断齿的情况下,缺齿部位相邻两个齿槽会被视作一个凸包缺陷,缺齿或断齿数量与凸包缺陷减少数量相等。

基于以上直齿圆柱齿轮的外形特征,可以通过检测齿轮外轮廓的凸包缺陷来计算齿数,判断是否缺齿。

2.1 齿轮外轮廓凸包拟合

常用的凸包检测方法有卷包裹法(gift wrapping)和 Graham 扫描算法(graham scan algorithm)^[8-10]。传统卷包裹算法在获取下一个凸包顶点时将轮廓点集中的每个点都和现有的最外侧点比较从而得到新的最外侧的点。由于直齿圆柱齿轮独特的结构特征,正常情况下,相邻凸包顶点必定位于当前轮齿或相邻的轮齿轮廓上,有断齿或缺齿的情况时,凸包顶点位于与断齿或缺齿部位相邻的完整轮齿轮廓上。基于这一特点,可以将齿轮外轮廓点集序列 $\text{Seq}_{\text{outline}}$ 进行等分,在进行下一个凸包顶点搜索时,无需计算 $\text{Seq}_{\text{outline}}$ 中所有的点,只需要对与当前凸包

顶点相邻的一定范围内外轮廓点进行搜索。搜索范围 $Area$ 与齿数 Z 的关系为:

$$Area = 4 \times Seq_{outline}/Z \quad (8)$$

从参考点开始沿逆时针方向依次选择此时最外侧的点,筛选完毕时回到最初的参考点,此时所选出的点集序列即构成齿轮外轮廓的最小凸包 Seq_{convex} ,具体算法如下。

1) 取 $Seq_{outline}$ 中纵坐标最小的点 P_0 作为参考点,如果有多个纵坐标相同的点,取其中横坐标最小的点,则 P_0 必为一个凸包顶点,从 P_0 开始沿逆时针方向依次对外轮廓点标号,记为 (P_0, P_1, \dots, P_n) 。

2) 设 H_u 为当前凸包顶点,利用向量的叉积确定下一个齿轮外轮廓凸包顶点,即最外侧的点。将现有最外侧点 H_u 的逆时针方向 $Area$ 邻域内的外轮廓点 $(P_i, P_{i+1}, \dots, P_{i+Area})$ 依次进行比较。

利用式(9)计算向量 $\overrightarrow{H_u P_v}$ 和向量 $\overrightarrow{H_u P_w}$ 的叉积,若计算结果大于 0,则 $\overrightarrow{H_u P_v}$ 逆时针转向 $\overrightarrow{H_u P_w}$,即 P_w 在 P_v 内侧, P_w 不是凸包顶点;若计算结果小于 0,从 $\overrightarrow{H_u P_v}$ 到 $\overrightarrow{H_u P_w}$ 为顺时针方向旋转, P_w 在 P_v 的外侧;若计算结果等于 0,说明 $\overrightarrow{H_u P_v}$ 和 $\overrightarrow{H_u P_w}$ 共线。

$$\begin{aligned} & \overrightarrow{H_u P_v} \times \overrightarrow{H_u P_w} = \\ & ((x_v - x_u), (y_v - y_u)) \times ((x_w - x_u), (y_w - y_u)) = \\ & (x_v - x_u)(y_w - y_u) - (x_w - x_u)(y_v - y_u) \end{aligned} \quad (9)$$

3) 当凸包边上存在其他外轮廓点,即出现共线情况时,取外轮廓序列索引最大的点,即该凸包边上最后搜索到的凸包顶点。

不同齿数的齿轮外轮廓凸包拟合结果如图 5 所示,其中,白色为齿轮外轮廓,绿色为拟合凸包。可以发现,当模数减小齿数增多时,直齿圆柱齿轮的外轮廓凸包逐渐向圆形逼近。

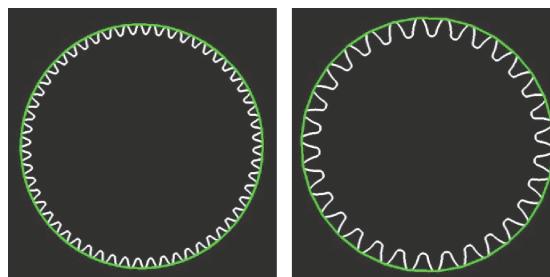


图 5 不同齿数齿轮外轮廓凸包拟合结果

Fig. 5 Convex hull fitting result of different gears

2.2 基于凸包缺陷的齿数检测

通过比较齿轮的 $Seq_{outline}$ 和 Seq_{convex} ,可以检测出齿轮外轮廓的所有凸形缺陷。通过凸包缺陷来检测齿轮齿数,具体算法如下。

1) 凸包缺陷检测

在凸包检测中,可以得到每个凸包顶点 H_i 在 $Seq_{outline}$ 中的索引值 $index_{H_i}$,对于两个相邻的凸包顶点 H_m 和 H_{m+1} ,其对应的凸包缺陷可表示为:

$$\begin{aligned} Defect(H_m, H_{m+1}) = \\ \{P_i \mid i \in [index_{H_m}, index_{H_{m+1}}], i \in Z, P_i \in Seq_{outline}\} \end{aligned} \quad (10)$$

2) 缺陷深度计算

根据式(11)计算 $Defect(H_m, H_{m+1})$ 中各点 (x_i, y_i) 的缺陷深度 $Depth_i(m, m + 1)$,得到该缺陷深度的最大值 $Depth_{max}(m, m + 1)$ 以及对应点的索引。其中 (x_m, y_m) 为 H_m 点坐标, (x_{m+1}, y_{m+1}) 为 H_{m+1} 点坐标。

$$Depth_i(m, m + 1) =$$

$$\left| \frac{(y_m - y_{m+1})x_i + (x_{m+1} - x_m)y_i + (x_m y_{m+1} - x_{m+1} y_m)}{\sqrt{(y_m - y_{m+1})^2 + (x_{m+1} - x_m)^2}} \right| \quad (11)$$

3) 伪缺陷去除

当一个轮齿上检测到的凸包顶点个数大于 1 时,会存在伪凸包缺陷,即该凸包缺陷并不是齿槽,在进行齿数检测时需要去除伪缺陷。

相对于齿槽,伪缺陷深度较小,设定一个阈值范围 (T_{min}, T_{max}) ,当 $Depth_{max}$ 满足该阈值范围时,该凸包缺陷可以确定为齿槽,否则对该凸包缺陷予以剔除。统计所有 $Depth_{max}$ 满足阈值范围的凸包缺陷数量,即为齿槽数量,由于齿轮齿槽数量和齿数相等,故可确定齿轮的齿数。

不同齿数齿轮凸包缺陷检测结果如图 6 所示,其中蓝色圆圈表示凸包顶点,红色圆圈表示凸包缺陷最深点。可见,凸包顶点位于齿顶,经伪缺陷去除后的缺陷最深点均位于齿根,且缺陷数量与齿数保持一致。

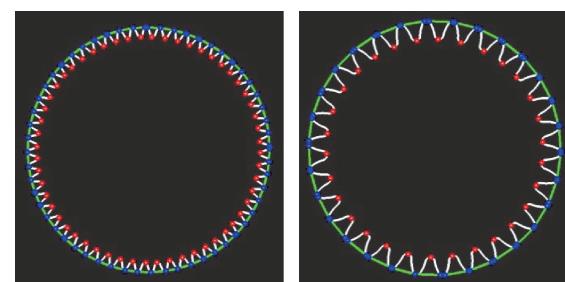


图 6 不同齿数齿轮凸包缺陷检测结果

Fig. 6 Convex hull defects detection result of different gears

合格轮齿与缺齿部位轮齿凸包缺陷检测结果如图 7 所示,对于合格轮齿,一个凸包缺陷对应一个轮齿,而缺齿情况下,凸包缺陷数量相应减少。

2.3 缺齿部位识别

对于齿轮外轮廓的凸包缺陷 $Defect(H_m, H_{m+1})$,根

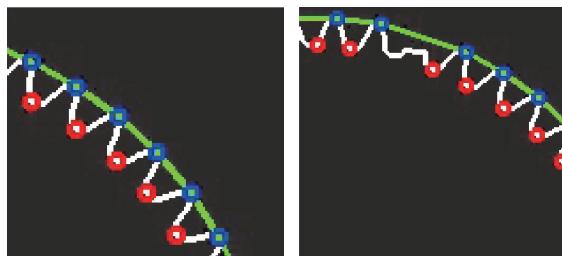


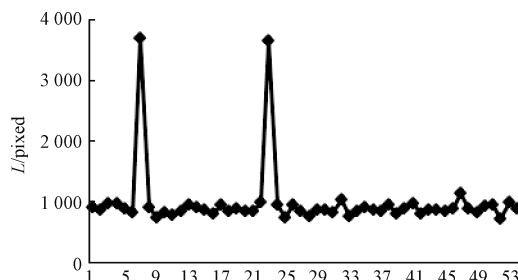
图7 合格与缺齿情况的凸包缺陷

Fig. 7 Convex hull defect of normal and abnormal gear teeth

据式(12)计算其相邻凸包顶点间的距离 $L(m, m + 1)$:

$$L(m, m + 1) = \sqrt{(x_m - x_{m+1})^2 + (y_m - y_{m+1})^2} \quad (12)$$

图8所示为一个56齿缺2齿齿轮的 L 值分布,对于正常轮齿, L 的值在一个很小范围内波动,缺齿情况发生时, L 会急剧上升,在图中形成一个尖峰。

图8 相邻凸包顶点距离 L 值分布Fig. 8 Distribution of L between adjacent convex hull vertices

对求得的所有的距离 L 的值进行排序,得到凸包缺陷相邻顶点的最小距离 L_{\min} ,对于任一个凸包缺陷 $L(a, a + 1)$,若满足式(13),则判断该凸包缺陷处为缺齿部位,如图9所示。

$$L(a, a + 1) - L_{\min} > \frac{3 \times L_{\min}}{4} \quad (13)$$

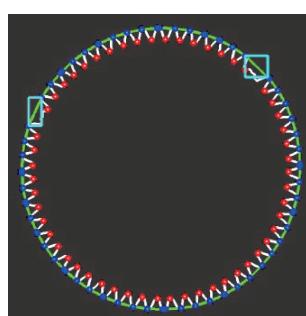


图9 缺齿部位识别结果

Fig. 9 Detection result of missing teeth parts

3 齿轮特征圆参数测量

3.1 基于凸包的齿顶圆检测

齿顶圆即为齿顶缘所在的圆周,显然,对于标准直齿圆柱齿轮,外轮廓凸包顶点必定在齿顶圆上,基于这一特征,在拟合齿顶圆时将候选点的范围从图像所有像素点缩小至齿轮外轮廓凸包顶点序列 $\text{Seq}_{\text{convex}}$ 。首先根据 $\text{Seq}_{\text{convex}}$ 进行齿顶圆粗拟合,在粗拟合的基础上寻找最小二乘意义下的最优拟合。

将 $\text{Seq}_{\text{convex}}$ 按顺序分成3部分 M_1, M_2, M_3 ,各部分表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} M_1 = \{H_i(x, y) | 0 \leq i < n/3, i \in Z\} \\ M_2 = \{H_i(x, y) | n/3 \leq i < 2n/3, i \in Z\} \\ M_3 = \{H_i(x, y) | 2n/3 \leq i \leq n, i \in Z\} \end{cases} \quad (14)$$

在 M_1, M_2, M_3 中各取一个点,记为 P_{1i}, P_{2i}, P_{3i} ,将这3点的坐标代入二维空间中圆的方程:

$$(x_{ni} - a)^2 + (y_{ni} - b)^2 = r^2 \quad n = 1, 2, 3 \quad (15)$$

通过式(16)、(17)得到拟合齿顶圆圆心坐标 (a_i, b_i) 和半径 r_i :

$$(a_i, b_i) = \left(\frac{BF - CE}{BD - AE}, \frac{CD - AF}{BD - AE} \right) \quad (16)$$

$$r_i = \sqrt{(x_{ni} - a_i)^2 + (y_{ni} - b_i)^2} \quad n = 1, 2, 3 \quad (17)$$

其中,各参数值由式(18)得到:

$$\begin{cases} A = 2 \times (x_{1i} - x_{2i}), B = 2 \times (y_{1i} - y_{2i}) \\ C = x_{1i}^2 - x_{2i}^2 + y_{1i}^2 - y_{2i}^2 \\ D = 2 \times (x_{1i} - x_{3i}), E = 2 \times (y_{1i} - y_{3i}) \\ F = x_{1i}^2 - x_{3i}^2 + y_{1i}^2 - y_{3i}^2 \end{cases} \quad (18)$$

为了使拟合的齿顶圆与实际齿顶圆更为吻合,依次在 M_1, M_2, M_3 中取点进行圆拟合,得到 $(n/3)$ 个拟合圆,找到一组拟合圆使其到 $\text{Seq}_{\text{convex}}$ 中各点的欧氏距离之和在非线性最小二乘意义上^[11-16]达到最小。

凸包顶点 (x_k, y_k) 到拟合圆中心的距离表示为:

$$R_{k-i} = \sqrt{(x_k - a_i)^2 + (y_k - b_i)^2}$$

$$k = 0, 1, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n/3 \quad (19)$$

拟合圆到实际凸包顶点的距离表示为:

$$\delta_{k-i} = |R_{k-i} - r_i|$$

$$k = 0, 1, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n/3 \quad (20)$$

取所有凸包顶点到拟合圆距离平方和最小为最小二乘意义下的最优拟合:

$$Q_i = \sum_{k=0}^n \delta_{k-i}^2 \quad i = 0, 1, \dots, n/3 \quad (21)$$

当 Q_i 取得最小值时所对应的 (a_i, b_i) 即为最优拟合齿顶圆圆心,记为 $O_A(x_0, y_0)$, r_i 为最优拟合齿顶圆半

径,记为 D_a 。

3.2 基于凸包缺陷的齿根圆拟合

对于标准直齿圆柱齿轮,在第三节检测到的凸包缺陷最深点均匀分布于齿廓的根部,即齿根,且理论上齿顶圆与齿根圆圆心相同,均为齿轮的中心。根据以上两个特点,采用基于圆心约束的最小二乘圆拟合法^[17]拟合齿根圆。

记 $Seq_{Deep}(D_1, D_2, \dots, D_n)$ 为外轮廓凸包缺陷最深点集,将 $O_A(x_0, y_0)$ 作为理想齿根圆圆心,基于圆心约束的最优拟合的齿根圆半径 D_f 使得 Seq_{Deep} 中各点到拟合圆的距离平方和最小,其目标函数为:

$$F(x_0, y_0, D_f) = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - D_f)^2 \quad (22)$$

式中: (x_i, y_i) 为 Seq_{Deep} 中各点坐标。

图 10 所示为两组直齿圆柱齿轮的特征圆拟合结果,外圈为拟合齿顶圆,内圈为拟合齿根圆。

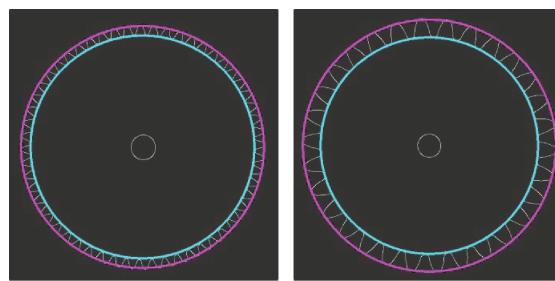


图 10 齿顶圆与齿根圆检测结果

Fig. 10 Detection result of addendum and dedendum circle

4 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法的性能,分别从齿数检测与缺齿识别实验以及齿轮特征圆拟合实验两个方面进行考核。实验硬件平台为 Intel(R) Core(TM) i3 CPU, 2.4 GHz, 4.0 GB 计算机, 软件平台为 Microsoft Visual Studio 2012, 算法采用 C++ 语言实现。

4.1 齿数检测与缺齿识别实验

本文取各种不同型号的直齿圆柱齿轮,包括合格齿轮与缺齿齿轮各 30 个,进行重复实验,得到合格齿轮与缺齿齿轮图像各 330 幅。利用本文算法检测结果统计如表 1 所示,主要指标有正确率、漏检率、误检率及平均检测时间。其中漏检特指缺齿漏检,即将缺齿或断齿误认为合格齿,误检特指合格轮齿误检,即将合格轮齿误认为缺齿。检测时间单位为 ms。

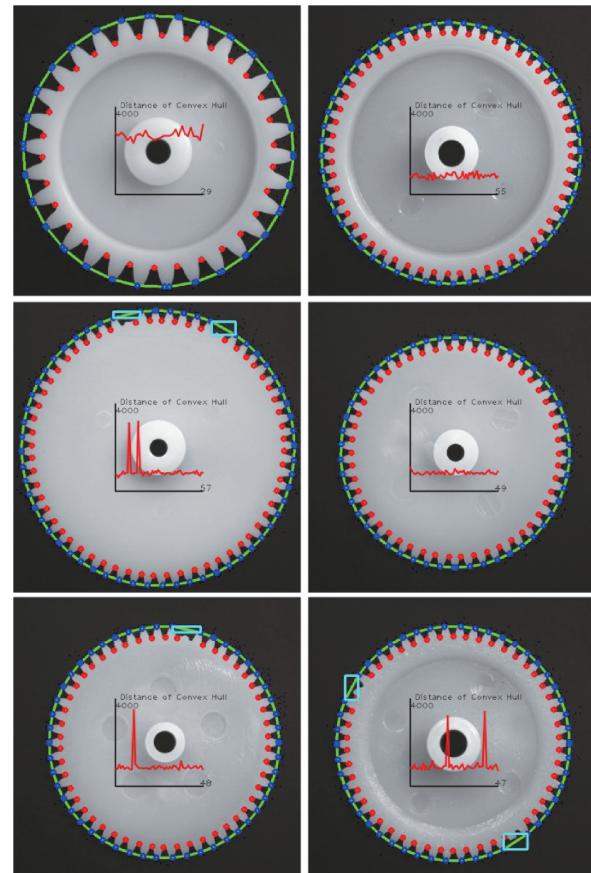
表 1 齿数及缺齿检测结果统计

Table 1 Statistics of detection result of tooth number and missing tooth

	检出	漏检	误检	正确率/%	漏检率/%	误检率/%	平均时间/ms
合格	327	0	3	99.09	0	0.91	18.171 3
缺齿	323	2	5	97.88	0.61	1.52	18.992 8
综合	650	2	8	98.48	0.30	1.21	18.582 1

由表 1 可见,本文提出的基于最小凸包的齿轮齿数及缺齿检测算法的综合正确率为 98.48%,对于合格齿轮检测正确率可达 99.09%。错误率分为漏检率和误检率两部分,由于将合格轮齿误检为缺齿对工业生产的影响小于缺齿漏检,漏检率相对误检率来说是一个更为重要的指标,本文算法的平均漏检率较低,为 0.30%。与其他文献的齿轮缺陷检测方法对比,文献[3]的缺陷检测算法正确率为 98%,文献[4]的正确率为 97.8%,均低于本文算法。本文齿数及缺齿的综合平均检测时间为 18.582 1 ms,可以满足工业检测对实时性的要求。

图 11 所示为 10 幅典型的不同型号齿轮齿数检测及缺齿部位识别结果图像,图中标记了检测到的齿轮外轮廓最小凸包、凸包顶点和凸包缺陷最深点,图像中间为 L 值的分布曲线,方框标记部位为缺齿或残齿部位。



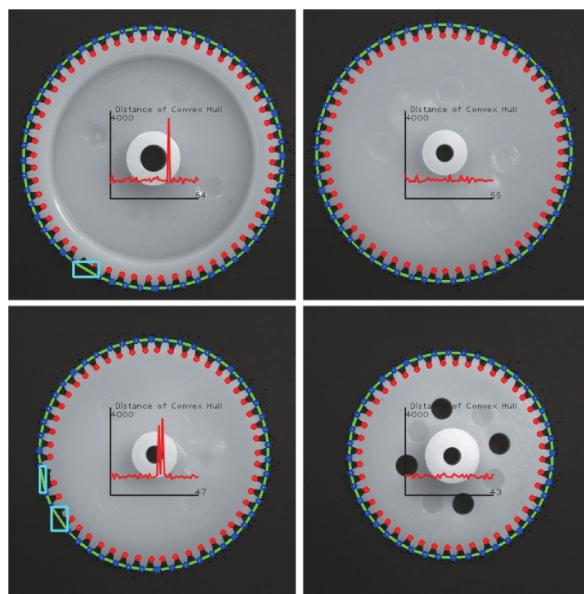


图 11 齿数及缺齿检测结果图像

Fig. 11 The images of detection result of tooth number and missing teeth

表 2 统计了图 11 中 10 幅典型齿轮的检测结果, 图像从上到下依次编号 1 ~ 10。可见, 初始检测到的凸包缺陷经伪缺陷去除后可以得到正确的直齿圆柱齿轮齿数, 通过 L 值的分布判断缺齿数量及部位。不同型号齿轮检测时间均低于 21 ms。

表 2 齿数及缺齿检测结果

Table 2 Detection result of tooth number and missing teeth

编号	凸包缺陷	伪缺陷	齿数	缺齿	时间/ms
1	54	24	30	0	12.547 7
2	63	7	56	0	20.458 5
3	68	10	58	2	20.610 3
4	55	5	50	0	19.432 3
5	53	4	49	1	18.539 7
6	53	5	48	2	18.189 8
7	65	10	55	1	20.078 7
8	60	4	56	0	20.267 7
9	48	0	48	2	18.476 8
10	48	4	44	0	16.866 9

4.2 齿轮特征圆检测实验

为了验证本文提出的基于外轮廓凸包顶点与凸包缺陷最深点的齿轮特征圆检测方法的性能, 将本文方法与文献[2]提出的基于齿轮重心的特征圆检测方法和文献[5]提出的基于 Hough 变换检测轴孔的特征圆拟合方法进行比较。采用模数为 0.5, 齿数为 42 的直齿圆柱齿轮进行对比实验, 其 D_a 标准值为 22 mm, D_f 标准值为 19.75 mm。表 3 为一组实验所得数据, 其中 a 为合格齿

轮, b 和 c 为有缺齿或断齿的齿轮。

表 3 齿轮特征圆检测对比

Table 3 Contrast of gear characteristic circle detection

方法	D_a/mm	D_f/mm	D_a 误差	D_f 误差	时间/ms
重心法	a	22.117 8	19.426 8	0.117 8	0.323 2
	b	22.141 3	19.355 3	0.141 3	0.394 7
	c	22.180 6	19.309 1	0.180 6	0.440 9
Hough	a	22.008 2	19.797 7	0.008 2	0.047 7
	b	22.015 3	19.785 2	0.015 3	0.035 2
	c	22.012 9	19.790 4	0.012 9	0.040 4
本文方法	a	22.007 2	19.725 7	0.007 2	0.024 3
	b	22.005 5	19.722 8	0.005 5	0.027 2
	c	22.005 4	19.722 6	0.005 4	0.027 4

由表 3 可见, 本文方法检测精度优于其他两种方法, 所检测到的齿顶圆半径绝对误差在 8 μm 以下, 且轮齿缺陷对本文方法检测精度基本无影响, 具有良好的鲁棒性。文献[2]方法的检测精度在不同环境下无法得到保证, 受噪声影响较大, 而且在有轮齿缺损情况时, 重心发生偏移, 所拟合出的齿顶圆与齿根圆发生较大偏差, 最大齿根圆半径偏差达到 440.9 μm , 已无法满足实际运用的精度要求。文献[5]方法的齿顶圆检测精度保持在 15 μm 左右, 但该基于 Hough 变换检测轴孔中心的方法对齿轮外形有限制, 对于无中心轴孔的齿轮无法应用, 而且在轴孔为键槽而非圆孔时, 还需进行聚类分析来区分优弧与直线。再者, 该方法在检测不同型号的齿轮时参数难以调整, 鲁棒性较差。

在算法效率方面, 本文方法检测所需时间控制在 2 ms 以内, 明显小于其它两种方法。本文方法检测时间由最小凸包与凸包缺陷检测和特征圆拟合两部分组成, 其中凸包与凸包缺陷的检测时间在 1 ms 左右, 且在检测齿数与缺齿时已完成凸包与凸包缺陷检测, 实际用于特征圆拟合的时间在 0.7 ms 以下。文献[2]方法在检测到重心后需要对边缘点到重心距离进行排序, 其中排序所需时间大于 10 ms。文献[5]方法涉及 Hough 变换, 运算量大且存在大量无效累积, 平均检测时间在 50 ms 以上。

综上, 本文提出的齿轮特征圆检测方法在保证检测精度的同时, 算法效率远高于其他两种方法。对于直径 44 mm 的直齿圆柱齿轮, 齿顶圆检测误差控制在 8 μm 以内, 且当齿轮模数或直径减小, 图像分辨率增大时, 检测精度将继续提高。

5 结 论

本文提出了一种基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测算法, 并对多种不同型号直齿圆柱齿轮进行了实验与结

果分析。基于齿轮的结构特征,该算法首先通过齿轮外轮廓的最小凸包及凸包缺陷来检测齿数,判断齿轮是否缺齿并对缺齿部位进行识别,在凸包顶点的基础上检测齿顶圆,然后根据齿顶圆圆心及凸包缺陷最深点拟合齿根圆,实现对齿轮特征圆参数的测量。实验结果表明,该算法检测效果良好,具有很好的工业应用前景。

参考文献

- [1] 刘君,郭晓然,晏克俊. 基于 IMAQ Vision 的小模数直齿圆柱齿轮测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2008, 29 (5):1044-1048.
- LIU J, GUO X R, YAN K J. Study on small modulus spur gear measurement method based on IMAQ vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (5): 1044-1048.
- [2] 张少军,苟中魁,李庆利,等. 利用数字图像处理技术测量直齿圆柱齿轮几何尺寸[J]. 光学精密工程, 2004, 12 (6):619-625.
- ZHANG SH J, GOU ZH K, LI Q L, et al. Digital image processing technology for spur gear measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12 (6) : 619-625.
- [3] 杨淑莹,任翠池,张成,等. 基于机器视觉的齿轮产品外观缺陷检测[J]. 天津大学学报,2007, 40 (9) : 1111-1114.
- YANG SH Y, REN C CH, ZHANG CH, et al. Defect inspection of gear product appearance based on machine vision [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(9) : 1111-1114.
- [4] 贺秋伟,王龙山,于忠党,等. 基于图像处理和支持向量机的微型齿轮缺陷检测[J]. 吉林大学学报:工学版,2008, 38 (3) :565-569.
- HE Q W, WANG L SH, YU ZH D, et al. Defect detection for microgear based on image processing and support vector machine [J]. Journal of Jilin University : Engineering and Technology Edition, 2008, 38 (3) : 565-569.
- [5] 黎鹏,刘其洪. 基于机器视觉的直齿圆柱齿轮尺寸参数测量[J]. 计算机测量与控制,2009, 17 (4): 646-648.
- LI P, LIU Q H. Dimension measurement of straight-cut gear based on machine vision [J]. Computer Measurement and Control, 2009, 17 (4) : 646-648.
- [6] MA N, WANG J X. Dynamic threshold for SPWVD parameter estimation based on Otsu algorithm [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24 (6) : 919-924.
- [7] LIU G H, CHEN C B. A new algorithm for computing the convex hull of a planar point set [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2007, 8 (8): 1210-1217.
- [8] GAO Y, CHENG Y H, WANG X S. A quick convex hull building algorithm based on grid and binary tree [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(2) : 317-320.
- [9] 范敏,陈曦,王楷,等. 基于对比度与最小凸包的显著性区域检测算法[J]. 仪器仪表学报,2014, 35 (10) : 2328-2334.
- FAN M, CHEN X, WANG K, et al. Salient region detection algorithm based on contrast and minimum convex hull [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (10) : 2328-2334.
- [10] 宋怀波,张传栋,潘景朋,等. 基于凸壳的重叠苹果目标分割与重建算法[J]. 农业工程学报,2013,29 (3) : 163-168.
- SONG H B, ZHANG CH D, PAN J P, et al. Segmentation and reconstruction of overlapped apple images based on convex hull [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3) : 163-168.
- [11] 周封,杨超,王晨光,等. 基于随机 Hough 变换的复杂条件下圆检测与数目辨识[J]. 仪器仪表学报,2013, 34 (3) :622-628.
- ZHOU F, YANG CH, WANG CH G, et al. Circle detection and its number identification in complex condition based on random Hough transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34 (3) : 622-628.
- [12] 高君,高鑫,孙显. 基于几何特征的高分辨率 SAR 图像飞机目标解译方法[J]. 国外电子测量技术,2015, 34(8);21-28.
- GAO J, GAO X, SUN X. Geometrical features-based method for aircraft target interpretation in high-resolution SAR images [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015 , 34(8) : 21-28.
- [13] 周显恩,王耀南,李康军,等. 一种多次随机圆检测及拟合度评估的瓶口定位法[J]. 仪器仪表学报,2015, 36 (9):2021-2029.
- ZHOU X EN, WANG Y N, LI K J, et al. New bottle mouth positioning method based on multiple randomized circle detection and fitting degree evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015 , 36 (9) : 2021-2029.
- [14] 乔寅骐,肖健华,黄银和,等. 基于改进 RHT 的 SAR 图像机场区域提取算法[J]. 电子测量技术,2016,

- 39(2):56-60.
- QIAO Y Q, XIAO J H, HUANG Y H, et al. Extraction algorithm for airport region in spaceborne SAR imagery based on improved randomized hough transform [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2):56-60.
- [15] 韩江,高婷,江本赤,等. 非圆齿轮齿廓特性分析及偏差测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016, 30(10):1520-1533.
- HAN J, GAO T, JIANG B CH, et al. Tooth profile characteristics analysis and deviation measurement study of non-circular gear [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (10) : 1520-1533.
- [16] 高俊翔,汤善治,李明,等. 数控机床圆检验测量技术及应用[J]. 电子测量与仪器学报,2016, 30(12): 1805-1811.
- GAO J X, TANG SH ZH, LI M, et al. CNC machine tool circular test measurement technology and application [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12) : 1805-1811.
- [17] 朱嘉,李醒飞,谭文斌,等. 基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2486-2492.
- ZHU J, LI X F, TAN W B, et al. Measurement of short arc based on centre constraint least-square circle fitting[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10) : 2486-2492.

作者简介



邵勇,2002 年于上海大学获得硕士学位,2012 年于上海大学获得博士学位,现为上海大学副教授,主要研究方向为自动控制、智能控制。

E-mail:shaoyong@shu.edu.cn

Shao Yong received M. Sc. and Ph. D. both from Shanghai University in 2002 and 2012, respectively. Now he is an associate professor in Shanghai University. His main research interests include automatic control, and intelligent control.



昝鹏(通讯作者),2004 年于南华大学获得学士学位,2009 年于上海交通大学获得博士学位,现为上海大学副研究员,主要研究方向为人工器官、医学生物信息处理。

E-mail:zanpeng@shu.edu.cn

Zan Peng (Corresponding author) received B. Sc. from Nanhua University in 2004 and Ph. D. from Shanghai Jiaotong University in 2009, respectively. Now he is an associate research fellow in Shanghai University. His main research interests include artificial organs, and biomedical information processing.