

文章编号 1004-924X(2009)02-0395-07

基于图像的轮廓度测量与评定

王 仲, 操晶晶, 张立昆, 张 进

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对微小型平面零件给出了一种基于图像的轮廓度测量与评定方法。包括实现轮廓度测量的理论轮廓数据建模方法、对应理论点的扩展极角定界搜索方法以及满足最小条件的最小极偏差轮廓度误差评定方法。通过实例将最小极偏差轮廓度评定方法(LDM)与传统的最小二乘轮廓度评定方法(LSM)进行了分析和比较。结果证明,对于不同实际零件,最小极偏差评定方法较最小二乘评定方法收敛于最小值的迭代次数减少了0~3次,精度优化了4%~12.6%,可以满足微型零件高精度、高效率轮廓度检测的要求。

关键词:微型零件;轮廓度误差;图像处理;最小极偏差;最小二乘

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A

Measurement and evaluation for profile tolerance based on images

WANG Zhong, CAO Jing-jing, ZHANG Li-kun, ZHANG Jin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments of
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A profile measurement and evaluation method for the micro-parts based on the images is presented. This method includes the method of profile data modeling in theory, bound searching method of expansion polar angle corresponding theoretical points and evaluation method of least-deviation profile error. The evaluation method of least deviation profile error and classical least-square profile error are analyzed and compared based on several examples. The experiments on actual image show that the iterative times of the least deviation method are 0~3 fewer and the accuracy are 4%~12% higher than that of least-square method, which can meet the requirements of high accuracy and fast profile tolerance measurement of micro-parts.

Key words: micro-parts; profile tolerance error; image processing; least-deviation method(LDM); least-squares method(LSM)

收稿日期:2008-04-21;修订日期:2008-07-10.

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(No. 043612111)

1 引言

具有复杂外形曲线的微型零件在工程中发挥着重要作用,因此精确高效地评定其轮廓曲线具有重要意义。其中规则曲线轮廓度评定已经有很多成熟的方法^[1-3],而复杂零件外形曲线多为不规则的自由曲线,对其轮廓的测量和评定非常困难。已有的样板法、投影法和仿形法等,均因测量精度和效率较低而不能满足要求。相对于传统的测量方法,坐标测量机(CMM)有着高精度和可编程控制的优点,因此被广泛用于精度要求高的零件外形检测中,但其精度受测量策略影响较大,如采样模型的建立(采样点数目、分配)及评定的方法都直接影响测量的效率和评定精度^[4-5]。

国家标准规定,形位误差的基本评定原则是最小条件,即被测要素对其理想要素的最大变动量为最小。评定时以符合最小条件的最小包容区域的宽度或直径表示形位误差^[6]。现大都采用最小二乘法来近似评定待测零件的轮廓度误差^[7-8]。最小二乘评定使偏差的平方和最小,它不满足最小条件原则^[1-3],其评定的平均结果大于最小区域评定结果的 10% 左右^[2]。

对相同实际零件,不同的测量方法或不同的评定方法都会得到不同的测量结果。对微型零件的完整成像可以快速获取被测轮廓的高精度采样,为实现微型零件高精度在线检测以及实现最小条件评定提供了基础^[9]。因此,本文给出了一种基于图像的轮廓度测量方法,提出实现轮廓度测量的理论轮廓建模方法、扩展极角定界搜索方法及满足最小条件的最小极偏差评定方法。

2 基于图像的轮廓测量原理与实现

基于图像的轮廓度测量方法主要适用于对轮廓尺寸精度要求高、需要批量检测的微型平面零件。主要分为以下几步:获取微型零件的完整图像,利用亚像素技术提取待测零件的高精度轮廓边缘点;建立待测零件的理论轮廓数据模型;通过特征点预定位调整被测轮廓与理论轮廓位姿偏差;利用扩展极角定界搜索快速确定实测轮廓点对应的理论轮廓点;利用最小极偏差方法评定零件轮廓误差。由于亚像素技术不是本文讨论的

重点,所以以下只详细介绍理论轮廓建模方法、特征点预定位方法和扩展极角定界搜索方法。

2.1 被测零件的理论轮廓建模

理论轮廓模型是轮廓度测量和评定中的标准量,它的精度决定测量结果的准确性,而建立理论轮廓模型的效率和可操作性直接决定这种测量方法能否被广泛地应用于实际在线测量中。目前,广泛使用计算机辅助(CAD)系统进行零件设计,零件的几何形状、几何尺寸、相互位置关系及公差要求等信息均以数据格式存储在文件中,这些文件中的数据可以存储成数据接口文件供其他系统使用,如 AUTOCAD 的 DXF 文件。本文直接读取 DXF 文件,提取组成轮廓的几何实体要素,搜索、离散建立理论轮廓数据模型。

(1) 导入 DXF 文件并建立几何实体(Entity)集 E。提取 DXF 文件中几何实体元素添加到 E 中。

(2) 搜索实体集 E 并建立轮廓回路(Loop)集 L。平面零件的理论轮廓可认为是由多条轮廓回路组合而成的。轮廓回路可以分为两种:一种是单一轮廓回路,指那些仅由一个标准方程描述的几何实体,如圆、椭圆等,搜索到此类实体即可视为一个回路添加到回路集 L 中,并将对应的实体从实体集 E 剔除;另一种是复合轮廓回路,轮廓回路是由多个弧段实体首尾相连而成。搜索实体集 E,将搜索到的第一个弧段实体作为回路 l_i 的起始弧段(Sect) s_{i1} ,取弧段实体的一个端点为回路 l_i 的起始点。继续搜索实体集 E,得到回路 l_i 的第二个弧段 s_{i2} ,且其一个端点与起始弧段的另一个端点距离小于搜索精度(一般 10^{-4} mm)。依次搜索得到 s_{i3} 、 s_{i4} ...,直到弧段端点与回路起始点的距离 $<$ 时,回路 l_i 搜索完毕。将回路 l_i 添加到回路集 L 中,并将属于回路 l_i 的所有实体弧段从实体集 E 剔除。当实体集 E 为空时,轮廓回路集就建立完成。

(3) 从离散轮廓回路集 L 得到理论轮廓数据模型。以离散精度(一般 5×10^{-3} mm)将各回路的弧段等距离散化,得高精度的理论离散点,记 $p_{ijk}^d(x_{ijk}^d, y_{ijk}^d)$ 为第 i 条回路第 j 个弧段中第 k 理论点。理论点按回路分弧段存储,便于搜索访问。

(4) 建立弧段极角边界(Boundary)集 B。由点 $p_{ijk}^d(x_{ijk}^d, y_{ijk}^d)$ 可得其极角 $\theta_{ijk}^d = \arctan(x_{ijk}^d,$

y_{ijk}^d),从而可得第 i 条回路第 j 个弧段的极角边界 $b_{ij} [b_{ij}^1, b_{ij}^2]$, 其中下边界 $b_{ij}^1 = \min_k [y_{ijk}^d]$, 上边界 $b_{ij}^2 = \max_k [y_{ijk}^d]$, 每个极角边界代表一个弧段的极角范围。

理论轮廓数据模型由有序的理论点组成,为后续的预定位、搜索以及轮廓度评定提供了基础。

2.2 被测轮廓预定位

由于被测轮廓在测量坐标系 (MCS) 中获取,理论轮廓在设计坐标系 (DCS) 中创建,它们之间存在位置和方向 (简称位姿) 偏差^[3]。因此,在进行轮廓度误差评定前,必须对被测轮廓进行位姿调整,使得调整后被测轮廓数据所代表的零件位置与理论轮廓一致。本文采用对应特征点法将 MCS 下的被测轮廓做平移、旋转变换,实现实际轮廓与理论轮廓的预定位。所谓特征点,即具有特殊含义、便于计算机识别的点,如曲线的重心、圆的圆心、离重心或圆心最近最远点等。

设已得到实际轮廓特征点矢量 v_1^m, v_2^m , 与之对应的理论轮廓特征点矢量为 v_1^d, v_2^d 。选取 v_1^m 和 v_1^d 为对应定位特征矢量, $l^m = v_2^m - v_1^m, l^d = v_2^d - v_1^d$ 为对应定向特征矢量。则对于被测轮廓上任一点矢量 p , 经过平移、旋转转换成新的点矢量 p' , 有:

$$p' = v_1^d + kA(p - v_1^m), \quad (1)$$

其中: k 为 MCS 相对于 DCS 的坐标当量, $A =$

$$\begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{bmatrix} \text{ 为旋转变换矩阵, 且} \\ = \left(\frac{l^m \cdot l^d}{l^m \cdot l^d} \right) \cos^{-1} \left(\frac{l^m \cdot l^d}{l^m \cdot l^d} \right), \quad (2)$$

为 l^m 相对于 l^d 的偏转角, 以逆时针方向为正。预定位后被测轮廓与理论轮廓处于小偏差状态。

2.3 扩展极角定界搜索

当被测轮廓与理论轮廓位置一致时,可以采用被测离散点与理论离散点的最小偏差来进行轮廓度误差评定。评定的关键问题是如何快速找出被测点对应的理论点。图像处理时是按轮廓跟踪得到被测轮廓回路, 所以根据被测点所在的回路很容易确定对应的理论轮廓回路。

由弧段极角边界集 B 建立对应扩展边界集 EB , 设第 i 条回路第 j 个弧段的扩展极角边界为 $eb_{ij} [eb_{ij}^1, eb_{ij}^2]$, $eb_{ij}^1 = b_{ij}^1 - \delta$, $eb_{ij}^2 = b_{ij}^2 + \delta$, 为扩展角。如图 1 所示, 弧段 s_{ij} 和 s_{ij+1} 的极角边界为 b_{ij} 和 b_{ij+1} , 其对应的扩展极角边界为 eb_{ij} 和 eb_{ij+1} 。设被测点 p_s 和 p_t 的极角为 θ_s 和 θ_t , 对应的理论

轮廓回路均为 l_i 。可知 $\theta_s \in eb_{ij+1}$, 所以 p_s 对应的理论弧段为 s_{ij+1} , 在弧段 s_{ij+1} 的所有理论点中必能找到最优的理论点 p_s^d 。又 $\theta_t \in eb_{ij}$ 且 $\theta_t \in eb_{ij+1}$, 所以 p_t 对应的理论弧段为 s_{ij+1} 和 s_{ij} , 对应的理论点必在弧段 s_{ij+1}, s_{ij} 中取得。

可见, 当被测点位于两弧段交界处时, 扩展极角定界能保证从两个相邻弧段中找出最优理论点, 保证搜索的精度。确定被测点对应的弧段后, 通过黄金分割法就可以从这个弧段的所有理论点中快速找出与被测点距离最短的对应理论点。

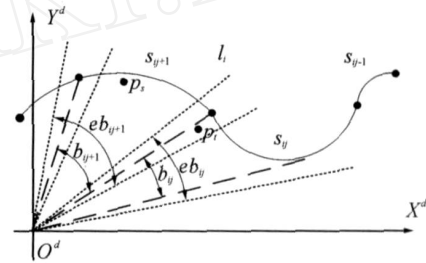


图 1 扩展极角定界

Fig. 1 Boundary ascertained by expanded polar angle

设已得到被测点 p_s 对应的理论点为 p_s^d , 则可得其轮廓偏差 $e_s = s_d s$, d_s 为 p_s 与 p_s^d 的距离, $s = \pm 1$ (当 p_s 位于理论轮廓回路外侧时, 取 +1, 内侧时取 -1)。根据轮廓度误差定义, 得轮廓度误差:

$$f = d_s^1 - d_s^2, \quad (3)$$

其中: 最大上偏差 $d_s^1 = \max_{1 \leq s \leq S} [d_s]$, 最大下偏差 $d_s^2 = \min_{1 \leq s \leq S} [d_s]$ 。

3 轮廓度误差评定

预定位只能粗调整被测轮廓与理论轮廓的位姿偏差, 得到的轮廓度误差因仍含有位姿偏差而较大。轮廓度误差的评定, 就是找出并消除位姿偏差对测量数据的影响, 使得轮廓度误差 f 为最小。目前, 广泛使用的轮廓度评定方法都是基于 L_p 范数估计^[1]。 L_p 范数定义如下:

$$L_p = \sum_{s=1}^S |e_s(u)|^p, \quad (4)$$

其中, S 为被测轮廓点数; $e_s(u)$ 为被测轮廓点轮廓偏差; $u = (a, b, \dots)$ 为位姿偏差; $1 \leq p < \infty$ 。当 p

$= 2$ 时, $L_2 = \sum_{s=1}^S |e_s(u)|^2$, 可得基于 L_2 -范数的

最小二乘评定模型: $\min \left\{ \sum_{s=1}^S |e_s(u)|^2 \right\}$, 即被测轮廓上所有点的偏差的平方和最小。当 $p =$ 时, $L = \max_s |e_s(u)|$, 可得基于 L -范数的轮廓度评定模型: $\min \left\{ \max_s |e_s(u)| \right\}$, 即被测轮廓上所有点的偏差的最大值最小。根据图像测量的充分采样、轮廓度误差定义以及最小条件原则, 本文采用基于 L -范数的最小极偏差轮廓度评定模型:

$$\min \left\{ \max_s |e_s(u)| - \min_s |e_s(u)| \right\}, \quad (5)$$

这个评价模型使被测轮廓点极大偏差与极小偏差之差最小, 它满足最小区域原则。

设被测点 $p_s(x_s, y_s)$ 对应的理论点为 $p_s^d(x_s^d, y_s^d)$, 位姿偏差 $u = (a, b, \dots)$, 则 $p_s(x_s, y_s)$ 可依式(6)变换得到近似最佳位置点 $p_s(x_s, y_s)$ 。

$$\begin{cases} x_s = x_s \cos \theta - y_s \sin \theta + a \\ y_s = x_s \sin \theta + y_s \cos \theta + b \end{cases} \quad (s=0, 1, \dots, S), \quad (6)$$

可得被测轮廓点时轮廓偏差:

$$e_s(u) = \sqrt{(x_s - x_s^d)^2 + (y_s - y_s^d)^2}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得到关于 (a, b, \dots) 的无约束非线性三维优化模型, 可采用单纯形直接搜索法求解^[10]。

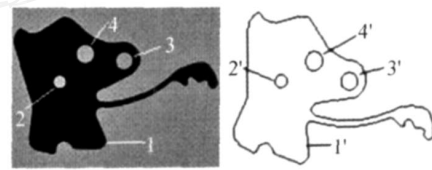
优化求解得到位姿偏差 (a, b, \dots) 值后, 利用式(6)对实测点进行坐标系变换, 得到新的实测点坐标, 再次扩展极角定界搜索其对应的新的理论点, 求出各点的轮廓偏差, 而后由式(3)可得消除位姿偏差的轮廓度误差。由于搜索得到的与实测点对应的理论点只是离实测点距离最短的近似点, 实测点的轮廓偏差也是一种近似计算, 所以进行一次优化得到的位姿值并不是最优解, 必须采用循环迭代的方法, 在进行一次优化计算后, 进行坐标系平移和旋转, 将测量基准移至设计基准位置, 再进行下一轮优化运算, 如此循环下去直到找出符合最小条件的理想位置, 具体循环迭代计算步骤参考文献[11]。设前一次优化评定得到的轮廓度误差为 f_1 , 当前优化评定得到的轮廓度误差为 f_2 , 则有循环迭代的收敛条件: $f_2 - f_1 < \epsilon$ (取 10^{-3} mm)。

4 实例分析与对比

基于图像的轮廓度测量系统采用 Basler A102F CCD(分辨率为 $1\,392 \times 1\,040$), Carl Zeiss

Visionmes 22/11/0.05 远心镜头, 标定后系统当量为 $0.012\,913$ mm/pixel。建立理论轮廓数据模型时搜索精度 $= 1 \times 10^{-4}$ mm, 离散精度 $= 1 \times 10^{-3}$ mm, 定界扩展角 $= 0.017\,5$ rad。

以手表中常用的微型零件定挡簧(图 2(a))、上条轮和离合杆为实例, 对基于图像的轮廓度测量与评定方法进行验证分析。为了便于说明此测量与评定方法的优越性, 首先详细介绍定挡簧的测量与评定过程, 而后将其测量结果与上条轮和离合杆的测量结果进行分析对比并给出结论。



(a) 定挡簧 (b) 定挡簧理论轮廓模型
(a) Catch spring (b) Theoretical profile model

图 2 定挡簧与定挡簧理论轮廓模型

Fig. 2 Catch spring and its theoretical profile model

4.1 定挡簧

对于定挡簧, 通过图像处理和亚像素技术可以得到 4 条高精度被测回路, 与理论建模得到的 4 条理论轮廓回路对应(图 2(b))。这里只对定挡簧外轮廓回路 1 进行轮廓度测量与评定。定挡簧外轮廓回路 1 采样点数为 4 516, 对应的理论轮廓点数为 63 775。设被测轮廓回路 2、3 与理论轮廓回路 2、3 可分别拟合出圆心 c_2 、 c_3 和 c_2 、 c_3 。首先以 c_2 和 c_2 为对应定位特征点, 向量 $c_2 c_3$ 和 $c_2 c_3$ 为对应定向特征向量, 对被测轮廓与理论轮廓进行预定位。而后利用扩展极角定界搜索得到与被测轮廓点对应距离最小的理论轮廓点, 从而可得定挡簧外轮廓上每个被测点相对于理论轮廓的轮廓度偏差, 其轮廓点偏差曲线如图 3 所示。偏差曲线图的横坐标为定挡簧外轮廓回路的点序, 纵坐标为每个被测点的轮廓偏差。得到最大上偏差 $d^1 = 52.6 \mu\text{m}$, 最大下偏差 $d^2 = -81.5 \mu\text{m}$, 所以被测轮廓回路 1 的轮廓度误差 $f = 134.1 \mu\text{m}$ ($f = d^1 - d^2$)。由于预定位得到的轮廓度误差 f 含有位姿偏差, 因此误差偏大。

分别采用最小极偏差方法(LDM)和最小二乘方法(LSM)对定挡簧外轮廓回路 1 进行轮廓

度评定。两种评定方法迭代优化次数均为 9 次。
LDM 评定:迭代 4 次取得最小值, $f_{\min} = 68.5 \mu\text{m}$,图 4 为迭代 4 次定挡簧外轮廓点的偏差曲

线。LSM 评定:迭代 5 次取得最小值, $f_{\min} = 77.1 \mu\text{m}$,图 5 为迭代 5 次定挡簧外轮廓点的偏差曲线。

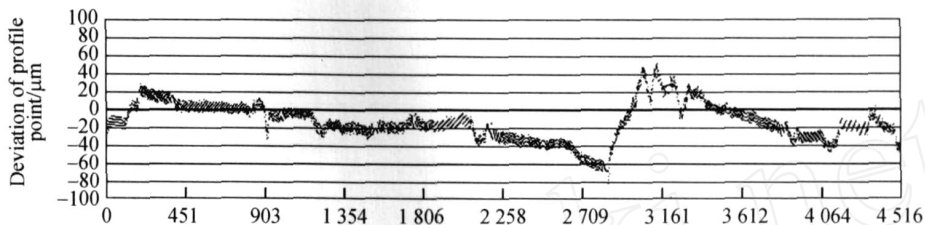


图 3 预定位后定挡簧外轮廓点偏差曲线

Fig. 3 Deviation curve of outer profile points of catch spring after anticipated orientation

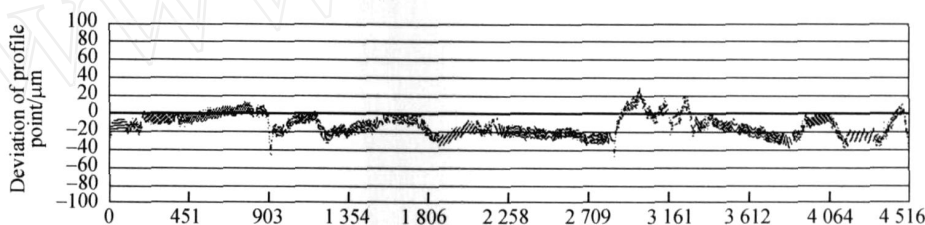


图 4 LDM 评定后定挡簧外轮廓点偏差曲线(迭代次数 4)

Fig. 4 Deviation curve of outer profile points of catch spring after LDM evaluation (number of iterations: 4)

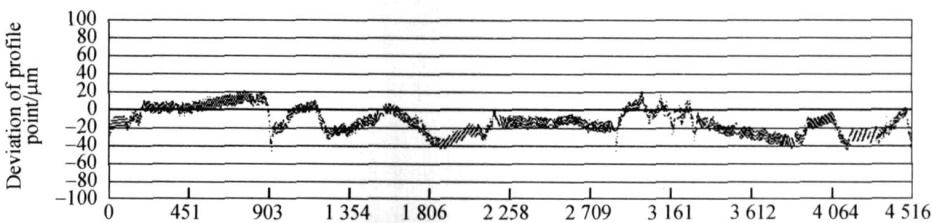


图 5 LSM 评定后定挡簧外轮廓点偏差曲线(迭代次数 5)

Fig. 5 Deviation curve of outer profile points of catch spring after LSM evaluation (number of iterations: 5)

4.2 比对分析

利用上述介绍的方法对上条轮(图 6)和离合杆(图 7)的外轮廓也进行了轮廓度测量和评定。评定时迭代优化次数均为 9 次。预定位后上条轮轮廓度误差 $f = 79.3 \mu\text{m}$,利用 LDM 评定需迭代 3 次,得到 $f_{\min} = 46.7 \mu\text{m}$;利用 LSM 评定也需迭代 3 次,得到 $f_{\min} = 50.7 \mu\text{m}$ 。预定位后离合杆的轮廓度误差 $f = 97.5 \mu\text{m}$,LDM 评定需迭代 5 次,得到 $f_{\min} = 38.0 \mu\text{m}$;LSM 评定需迭代 8 次,得到 $f_{\min} = 39.5 \mu\text{m}$ 。

定挡簧、上条轮和离合杆的轮廓度误差评定与迭代次数曲线分别如图 8、9 和 10 所示。由图



图 6 上条轮

Fig. 6 Wound wheel

可见,对于定挡簧、上条轮和离合杆,LDM 评定方法在逼近最小轮廓度误差或速度上均有优于 LSM 的表现;而且从图中可以看出,LDM 评定在达到最小值后继续迭代优化能保持稳定;而 LSM

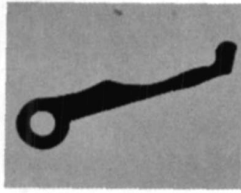


图 7 离合杆

Fig. 7 Tripping level

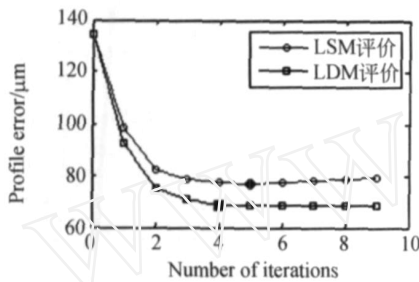


图 8 定挡簧的 LSM 与 LDM 评定

Fig. 8 LSM&LDM evaluation of catch spring

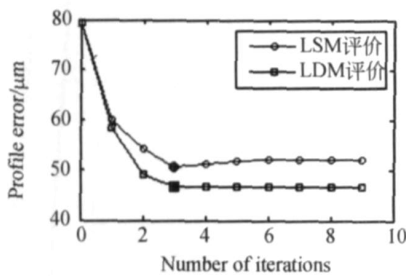


图 9 上条轮的 LSM 与 LDM 评定

Fig. 9 LSM&LDM evaluation of wound wheel

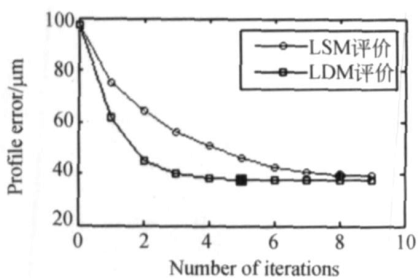


图 10 离合杆的 LSM 与 LDM 评定

Fig. 10 LSM&LDM evaluation of tripping lever

评定在达到最小值后继续迭代优化轮廓度误差会反弹增大。可见,最小二乘评定模型并不适合轮廓度误差的评定。

表 1、2 列出了对 3 个零件进行 LDM 和 LSM

评定结果在精度和迭代次数上的比对。

表 1 LDM 和 LSM 评定结果($f_{\min}/\mu\text{m}$)

Tab. 1 Results of LDM & LSM evaluation

实例	LDM 评定	LSM 评定	相对增加
定挡簧	68.5	77.1	12.6 %
上条轮	46.7	50.7	8.6 %
离合杆	38.0	39.5	4 %

表 2 LDM 和 LSM 评定结果(得到 f_{\min} 需迭代次数)

Tab. 2 Results of LDM & LSM evaluation

(The minimum number of iterations)

实例	LDM 评定	LSM 评定	相对增加
定挡簧	4	5	1
上条轮	3	3	0
离合杆	5	8	3

由上述分析可知,最小极偏差评定方法(LDM)较最小二乘方法(LSM)能够更加快速、精确地收敛于最小值。

5 结 论

本文给出了一种基于图像的自由轮廓测量与评定方法,该方法包括实现轮廓度测量的理论轮廓数字化建模方法,理论点的扩展极角定界快速搜索方法,最小极偏差轮廓度误差评定方法等多项内容。文中分别以定挡簧、上条轮和离合杆为例,验证了这种测量方法的实用性和高效性。通过用最小极偏差方法和最小二乘方法对不同零件的外轮廓进行轮廓度评定对比分析,得出最小极偏差评定方法较最小二乘评定方法收敛于最小值的迭代次数减少了 0~3 次,精度优化了 4%~12.6%。可见,最小极偏差评定方法在评定速度和精度上要优于最小二乘方法。

另外,当零件是由两个或两个以上的轮廓回路组成的,那么对于每个轮廓回路的轮廓度误差迭代评定都可以得到一个高精度的位姿偏差(a , b),通过各自轮廓回路的位姿偏差可以评定各轮廓回路间的复合位置度,如齿轮的径跳、孔组的位置度等。该方法为微小型平面零件实现高精度、自动化测量打开了一条新的通道。

参考文献:

- [1] CARR K, FERREIRA P. Verification of form tolerances. part I: basic issues, flatness, and straightness[J]. *Precision Engineering*, 1995, 17(2): 131-143.
- [2] GOU J B, CHU Y X, LI Z X. A geometric theory of form and orientation tolerances [J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(2): 79-93.
- [3] 熊有伦. 精密测量的数学方法[M]. 北京:中国计量出版社, 1989.
XIONG Y L. *Mathematical Method of Precision Measuring*[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [4] WECKENMAZ A, KNAUER M. The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-Measurements [J]. *CIRR Annals-Manufacturing Technology*, 1998, 47(1): 451-454.
- [5] RAGHUNANDAN R, RAO P V. Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(3): 477-482.
- [6] GB/T 1958-2004, 产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差 检测规定[S].
GB/T 1958-2004, Geometrical product specifications (GPS)-geometrical tolerance-verification prescription[S]. (in Chinese)
- [7] 刘文文, 聂恒敬. 一种自适应的平面线轮廓度误差评定方法[J]. *计量学报*, 1999, 20(1): 27-31.
- LIU W W, NIE H J. An auto-spotting evaluation method of plane profile of any line [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, 20(1): 27-31. (in Chinese)
- [8] LI Z F, CUI CH C, CHER SH, et al.. Comparison of genetic algorithm based evaluation of roundness with evaluation of roundness based on least squared method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3): 256-261.
- [9] 张俊杰, 操晶晶, 贡力, 等. 微型零件图像测量清晰度算法的选择与综合评价[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(3): 543-550.
ZHANG J J, CAO J J, GONG L, et al.. Selection and synthesis evaluation of image measurement definition algorithm for miniature parts[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 543-550. (in Chinese)
- [10] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 1989.
CHEN B L. *Optimization Theory and Algorithm* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. (in Chinese)
- [11] 杨密, 李平, 卢春霞, 等. 逐次逼近法评定自由曲线的轮廓度误差[J]. *西安工业学院学报*, 2006, 26(1): 33-35.
YANG M, LI P, LU CH X, et al.. An approaching method to evaluate profile error of free curve [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2006, 26(1): 33-35. (in Chinese)

作者简介:



王 仲(1953 -),男,天津人,教授,主要研究方向为视觉检测、精密机械等;
E-mail: wangzhong@tju.edu.cn



张立昆(1983 -),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事视觉测量及相关领域的研究; E-mail: zlk251029@yahoo.com.cn



操晶晶(1984 -),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事图像测量算法及相关领域的研究。E-mail: blueblood_jing@126.com



张 进(1985 -),男,安徽淮北人,博士研究生,主要从事图像处理算法、视觉测量及相关领域的研究。E-mail: zhangjinhi_2005@china.com.cn