

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311384

曲轴连杆颈圆度误差的测量与评定方法研究*

田慧慧^{1,2}, 王亚晓^{1,2}, 王洪喜^{1,2}, 王冠伟^{1,2}, 焦艳梅³

(1. 西安工业大学机电工程学院 西安 710021; 2. 西安工业大学精密与超精密加工及测量国家地方联合工程研究中心 西安 710021; 3. 西安文理学院机械与材料工程学院 西安 710065)

摘要:曲轴轴颈圆度是评价曲轴合格性和加工精度的一项重要指标。针对曲轴综合测量过程中连杆轴颈沿主轴颈公转运动,导致连杆轴颈的检测数据无法直接用于圆度误差评定的问题,建立基于运动坐标系的圆度误差检测模型,实现了连杆轴颈检测数据转换处理。同时,深入分析用于圆度误差评定的3种最小二乘法的适用条件,结合采样数据的特点实现了连杆轴颈圆度误差的高精度检测。以某型号发动机曲轴为例进行大样本误差检测试验,并与最小区域评定结果进行对比,偏差在1 μm以内。数据分析表明了所提出的曲轴连杆轴颈圆度误差检测方法理论上的正确性及工程实践的可行性。

关键词:曲轴;连杆颈;圆度误差;最小二乘法

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on roundness error measurement and evaluation for crankshaft pin journal

Tian Huihui^{1,2}, Wang Yaxiao^{1,2}, Wang Hongxi^{1,2}, Wang Guanwei^{1,2}, Jiao Yanmei³

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Precision and Ultra-precision Machining and Measurement, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 3. School of Mechanical and Material Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Crankshaft journal roundness is an important indicator for evaluating the qualification and machining accuracy of the crankshaft. To address the problem of the inability to directly use the detection data of the crankpin for roundness error evaluation due to the revolving motion of the crankpin along the main journal during the measurement process, a roundness error detection model based on a motion coordinate system is formulated to realize the conversion and processing of the detection data of the crankpin. Meanwhile, by deeply analyzing the applicable conditions of three least squares methods used for roundness error evaluation and combining the characteristics of the sampled data, high-precision detection of the roundness error of the crankpin is achieved. Take a certain model of engine crankshaft as an example, a large sample error detection test is carried out, and the results are compared with the minimum zone evaluation, with a deviation within 1 μm. The data analysis shows the theoretical correctness and practical feasibility of the proposed method for detecting the roundness error of the crankpin.

Keywords: crankshaft; crankpin; roundness error; least square method

0 引言

曲轴是发动机的关键零件之一,其加工质量直接影响发动机的性能和寿命。在曲轴的结构中,主轴颈主要是安装在缸体曲轴室内起支撑作用,连杆轴颈与连杆连

接,将往复直线运动转化为旋转运动,并由此产生绕其本身轴线的力矩,对外输出转矩。因而曲轴轴颈的形状误差直接决定发动机的运转平稳性^[1]。面对曲轴产品本身设计精度高,加工精度高,大批量生产需求的现状,国内许多生产厂家通过引进数控机床、全自动柔性流水线等方式,已实现了曲轴的自动或半自动化生产,然而大多数

收稿日期:2023-05-05 Received Date: 2023-05-05

* 基金项目:西安市未央区科技计划(202113)项目资助

厂家对成品曲轴形状误差的检测仍处于手工抽样检测的阶段。这种检测方式不仅精度低,检测项目单一,而且很多关键参数如曲轴轴颈的圆度、圆柱度等形状误差均无法进行高精度检测。部分曲轴生产厂家通过购买国外曲轴综合检测设备完成曲轴形位误差检测,但价格高昂。

近年来,国内许多高校、科研院所和精密仪器制造公司在曲轴检测方面取得了越来越多的研究成果。夏丰^[2]提出了一种曲轴综合测量仪的设计方法,可以实现对曲轴主轴颈及开档尺寸的测量。田应仲等^[3]采用跟踪测量方法对曲轴连杆颈圆度误差进行了在线检测,所提出的三点跟踪圆度误差分离方法提高了测量精度。俞红祥^[4]针对连杆颈偏心运动特征提出基于V形基准块、自适应伸缩随动支撑架的圆度检测机构,该机构适用于切点跟踪法磨削曲轴的圆度在线检测。张学昌等^[5]搭建了基于图像域的汽车曲轴轴颈形状误差检测试验台,通过建立基于误差转换的平面曲线和空间曲线误差数学模型,采用遗传优化算法实现了曲轴轴颈形状误差的高精度检测。钱晓明等^[6]根据曲轴主轴颈和连杆颈在测量时的不同运动状态,分别设计了主轴颈测量模块和连杆颈随动式测量模块,实现了对曲轴主轴颈和连杆颈的同步采样和数据计算。总之,受限于曲轴复杂的结构,主轴颈与连杆颈运动状态不一的特点,国内在曲轴检测方面的研究工作大多停留在理论研究和初步试验阶段,自主研发且已投入生产的曲轴测量设备相对较少。和同阶段国外检测仪器相比,国内研发的曲轴精密测量设备在测量项目、测量精度以及重复精度方面还有一定的提升空间。

工件表面结构主要由形状误差、粗糙度和波纹度3个特征组成。形状误差属于宏观几何误差,包括圆度、直线度、平面度等,对各种零件的装配和配合过程有至关重要的影响^[7]。作为曲轴关键形状误差参数之一的轴颈圆度误差,直接影响零部件的配合精度、旋转精度、摩擦、振动、噪声等^[8]。圆度误差是指包容同一横剖面的实际轮廓且半径差为最小的两同心圆之间的距离。根据JB/T 6727—1993《内燃机曲轴技术条件》,曲轴轴颈的圆度误差 ≤ 0.005 mm。圆度误差的精确测量与评定对判断零件的合格性和圆度误差产生的原因十分重要。GB/T 7235—2004规定了4种圆度误差的评定方法,最小二乘法(least squares circle, LSC)、最小区域法(minimum zone circle, MZC)、最小外接圆法(minimum circumscribed circle, MCC)和最大内切圆法(maximum inscribed circle, MIC)。其中,只有最小区域法符合国标关于圆度误差的定义,其圆度误差是最小的,根据国家标准,有争议时按照最小区域法仲裁^[9]。但是,最小二乘法因其理论成熟、鲁棒性好、可方便地用数学方法运算求得等优点,应用最为普遍^[10-11]。国际上流行的最小二乘圆心的计算公式最早由英国学者于1966年提出,它已列入英美的国家标准,本

文中称之为传统法^[12]。我国学者吴蔚^[13]和颜景平^[14]分别在1986年和1989年提出两种计算最小二乘圆心及半径的新方法,本文中称之为变一法和变二法,且该两种方法目前应用也比较广泛^[15-17]。由于3种最小二乘法在公式推导过程中使用了不同的处理方法,这对测量数据的采集提出了不同的附加条件。

测量方法与评定方法的选择对圆度误差最终的检测精度有重要影响。本文基于自主研发的曲轴综合检测设备,以曲轴连杆颈圆度检测为切入点,建立了连杆轴颈圆度误差的测量模型,分析出连杆轴颈圆周数据采集的特点,结合对圆度误差评定的3种最小二乘法适用性及精确性的深入分析,实现了曲轴连杆轴颈圆度误差的高精度检测。解决了使用曲轴综合测量仪进行连杆颈圆度检测时采样数据无法直接应用于圆度误差评价的问题,为曲轴连杆颈圆度误差的高精度检测提供了一种新思路。

1 连杆轴颈圆度测量过程

1.1 曲轴综合测量装置

曲轴综合测量仪如图1所示。该装置的径向测量系统主要由伺服电机、高精度直线导轨、丝杠、位移传感器和随动测头装置组成。测量过程中,测头在径向伺服电机及传动装置的带动下到达测量位置,并通过测头装置的弹簧保证测板与曲轴轴颈表面轮廓始终以一定的测量力保持接触,回转主轴带动曲轴旋转,位移传感器检测测点的径向位移。轴向运动机构带动测头装置上下运动,完成轴颈不同截面参数的测量。这种测量方案,一次装夹,可以完成曲轴主轴颈和连杆颈多项形位误差的测量,测量效率高。然而连杆颈与主轴颈的运动方式不同,采用曲轴综合测量仪进行连杆颈圆度误差检测时其回转中心与工件中心不重合,无法直接采集到轴颈的径向跳动,光栅测得的径向位移不能直接参与圆度误差计算。

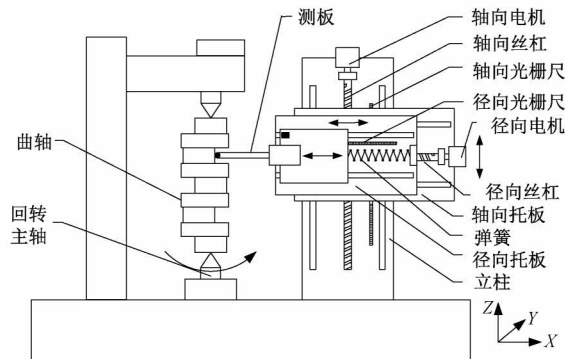


图1 曲轴综合测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the crankshaft measurement

1.2 连杆颈圆度测量模型

为了解决上述问题,基于以上测量方法,通过分析连杆颈的测量原理,建立如图 2 所示的连杆颈圆度误差测量模型并分析模型所引入的测量误差。由图 2 可知,设备主轴以 O 为回转中心带动曲轴做旋转运动,测板始终与连杆颈被测轮廓相接触并沿 x 方向运动; O_2 为主轴颈理想圆圆心;连杆颈基准圆的圆心为 O_1 、半径为 R ,以 O_1 为坐标原点建立运动坐标系 $x_1O_1y_1$,其中 x_1 轴在 OO_1 的延长线上,运动坐标系随连杆颈一起绕回转中心 O 旋转;圆心 O_1 到主轴回转中心 O 的距离为 D ; p_i 为第 i 个采样点 ($i = 1, 2, 3, \dots, n, n$ 为采样点的数目), x_{Ai} 为测板的径向位移, δ_i 为采样点相对于基准圆圆心 O_1 的跳动值; θ_i 为主轴回转角, ϕ_i 为测点在运动坐标系中的回转角度。

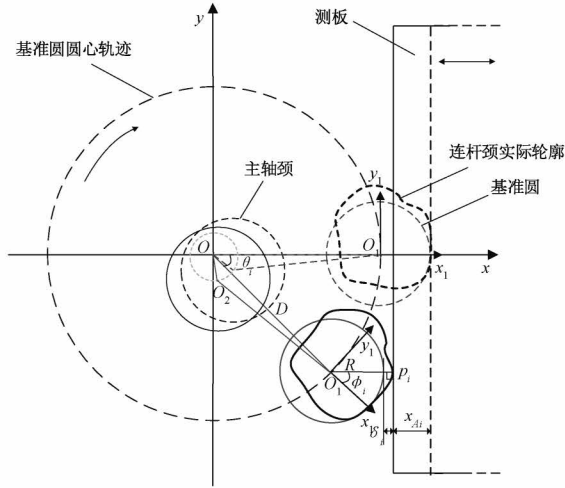


图 2 曲轴连杆颈圆度误差测量模型
Fig. 2 Measurement model of the crankpin

由上述测量模型可知 $\phi_i = \theta_i$, 连杆颈由初始测量位置(图 2 中虚线位置)旋转到任一位置时有式(1)成立。

$$D + R = D\cos\theta_i + R + \delta_i + x_{Ai} \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$\delta_i = D - D\cos\theta_i - x_{Ai} \quad (2)$$

1.3 测量误差分析

由测量模型可见,主轴颈安装偏心不影响连杆颈轮廓径向跳动的测量。板型测头的设计实现了一次装夹即可完成对主轴颈和连杆颈多项参数测量的功能,但是在测量轴颈圆度时会引入测量误差。如图 3 所示,根据所提出的测量模型,理想测点应该在 A 点,板型测头的设计导致实际测点在 p_i 点,从而 $\phi_i \neq \theta_i$, 此时有式(3)成立。

$$D + R = D\cos\theta_i + R\cos(\phi_i - \theta_i) + \delta_i + x_{Ai} \quad (3)$$

因此直接用式(2)计算圆跳动 δ_i 会有测量误差存在。

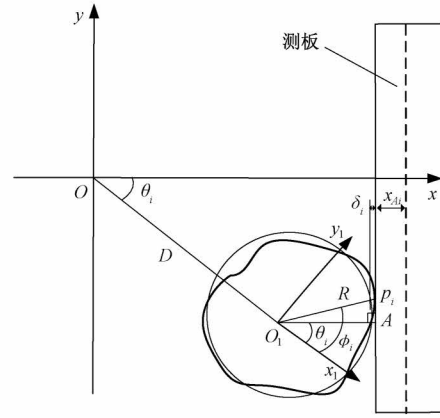


图 3 曲轴连杆颈测量误差原理图
Fig. 3 Schematic diagram of measurement error for crankpin

2 最小二乘圆度误差评定模型

圆度误差的最小二乘法旨在求出实际轮廓的平均圆(实际轮廓到该圆距离的平方和为最小的一个圆)作为最小二乘圆,由该最小二乘圆到实际轮廓最高点和最低点距离的绝对值之和,即为用最小二乘法确定的圆度误差,如图 4 所示。由于用解析法求解最小二乘圆时对极值函数的处理方法不同,出现了以下 3 种常见的最小二乘法。

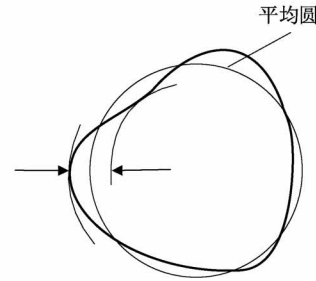


图 4 最小二乘圆度误差
Fig. 4 Least square roundness error

2.1 传统最小二乘法

当 $e \ll R$ 时,经线性化处理,根据最小二乘原理,令:

$$\sum_{i=1}^n [r_i - R - e\cos(\theta_i - \phi)]^2 = \min \quad (4)$$

式中: r_i 和 θ_i 分别为任一测点的测量半径和相角, R 为最小二乘圆半径, e 和 ϕ 分别为最小二乘圆心与回转中心之间的偏心量和偏心起始角。

设测点等角度均匀分布,根据极值定理得:

$$\begin{cases} R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \\ a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cos\theta_i \\ b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \sin\theta_i \end{cases} \quad (5)$$

将测量半径 r_i 换为测点对某一基准圆的跳动值 Δr_i , 进一步推导可得:

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta r_i \\ a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta r_i \cos \theta_i \\ b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta r_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: (a, b) 为最小二乘圆心的坐标, n 为采样点的数目。下文中 a, b, R 的定义均与此相同。

由最小二乘圆的求解过程可知传统法的适用性如下: 1) 测量点按回转中心等角间隔采样; 2) 小偏差假设: 即在测量之前必须调整零件的回转线, 使 a, b 极小; 3) 小误差假设: 即零件的圆度误差和其半径相比是一个微量; 4) 可以直接利用跳动值算圆度误差; 5) 计算量小, 运算速度快。

$$\begin{cases} a = \frac{\left(Q - \frac{T^2}{N}\right) \left(W + V - \frac{P + Q}{N} S\right) - \left(H - \frac{ST}{N}\right) \left(Z + U - \frac{P + Q}{N} T\right)}{\left(2P - \frac{2S^2}{N}\right) \left(Q - \frac{T^2}{N}\right) - \left(2H - \frac{2ST}{N}\right) \left(H - \frac{ST}{N}\right)} \\ b = \frac{\left(P - \frac{S^2}{N}\right) \left(Z + U - \frac{P + Q}{N} T\right) - \left(H - \frac{ST}{N}\right) \left(W + V - \frac{P + Q}{N} S\right)}{\left(2P - \frac{2S^2}{N}\right) \left(Q - \frac{T^2}{N}\right) - \left(2H - \frac{2ST}{N}\right) \left(H - \frac{ST}{N}\right)} \\ R = \sqrt{a^2 + b^2 - \frac{2Sa}{N} - \frac{2Tb}{N} + \frac{P + Q}{N}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $S = \sum_{i=1}^n x_i, H = \sum_{i=1}^n x_i y_i, T = \sum_{i=1}^n y_i, U = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i,$

$$V = \sum_{i=1}^n x_i y_i^2, P = \sum_{i=1}^n x_i^2, Q = \sum_{i=1}^n y_i^2, W = \sum_{i=1}^n x_i^3,$$

$$Z = \sum_{i=1}^n y_i^3.$$

由推导过程可见变一法的适用性如下: 1) 适用于非完整圆周以及直角坐标采样数据; 2) 对偏径比要求不严格; 3) 与传统法相比计算量偏大。

2.3 变二法

该方法所求的最小二乘圆心经常作为各种优化算法求解圆度误差时的初始点。算法建立的基础是令 $\sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R]^2 = \min$, 文献[14]根据数理统计规律推导出如下结论: 当测量点 $p_i(x_i, y_i)$ 均布于整个圆周且测点个数 n 足够大时, 最小二乘圆心的数学期望 \bar{a}, \bar{b} 为:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (11)$$

在 n 为指定值并随机采样时, 则:

$$\hat{a} \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \hat{b} \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (12)$$

2.2 变一法

变一法实质上是拟合圆法。已知圆方程为:

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = R^2 \quad (7)$$

式中: (x_i, y_i) 为各测量点的坐标, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, $n \geq 3$ 。测量点到最小二乘圆周的距离 ε_i 为:

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R \quad (8)$$

根据最小二乘原理, 要使实际轮廓到最小二乘圆的距离的平方和最小, 应有 $\sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R]^2 = \min$ 。为了求得 a, b, R 的显函数, 文献[13]引出如下平方和方程:

$$S = \sum_{i=1}^n [(\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R)^2] \quad (9)$$

利用最小二乘原理解得:

式中: \hat{a}, \hat{b} 为 a, b 的最可能值。当 a, b 确定后, 半径 R 由式(13)确定:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} \quad (13)$$

变二法的适用性如下: 1) 测量点按最小二乘圆心等角间隔采样, 且数量足够大; 2) 对偏心比较敏感, 不适合极坐标采样。

3 曲轴连杆颈圆度误差测量试验

在实验室搭建的曲轴综合检测设备样机如图5所示。曲轴连杆颈圆度误差检测需要在轴颈圆周上进行采样。精密转台带动曲轴旋转, 并检测曲轴的回转角度。随动测头上安装的 RENISHAW 直线光栅配有 RGH20 型读数头, 测量范围内的精度为 $0.5 \mu\text{m}$, 用于检测曲轴回转一周过程中测点的径向位移。对曲轴4个连杆轴颈依次进行测量, 每个轴颈从下至上进行下、中、上3个截面的测量, 每个截面记录3圈的采样数据。由于回转工作台的驱动电机在初始和最后阶段存在加减速现象, 每圈的采样点数不同, 第1圈采样点数为 935 ± 3 , 第2圈采样点数为 620 ± 2 , 第3圈采样点数为 840 ± 3 , 满足采样定理要求。

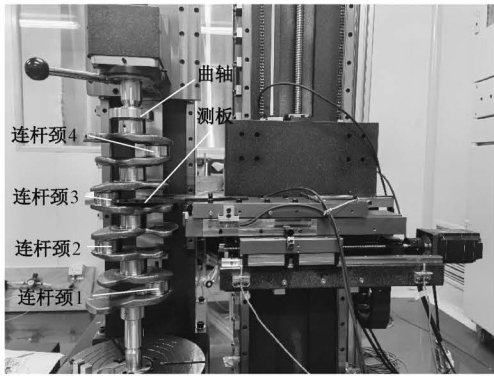
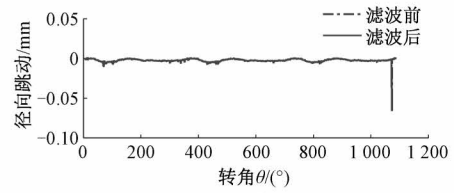


图 5 曲轴综合测量仪样机

Fig. 5 Prototype of crankshaft comprehensive measurement instrument

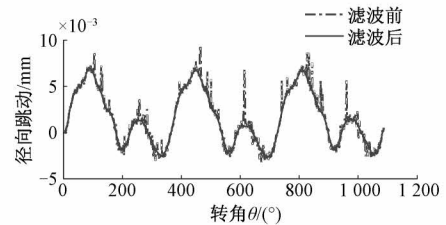
根据式(2)对采样数据进行处理,得到采样点对基准圆的跳动值 δ_i 。由测量模型图 2 可知 D 的取值会影响连杆颈最小二乘圆心与基准圆心之间的偏心量,为减小偏心对评定精度的影响,在此取 $D = (\max(x_{Ai}) - \min(x_{Ai}))/2$ 。圆度误差属于宏观形状误差,在进行圆度误差计算前采用 MATLAB 滤波函数 `smooth(y, span, 'rloess')` 对跳动值进行了鲁棒均值滤波处理,该函数的滤波方式为鲁棒线性拟合,其局部回归使用加权线性最小二乘和一阶多项式模型,并在回归中对异常值分配较低的权重,对于曲轴轴颈的磨削加工表面跨度参数 `span` 取值 50,在保证拟合精度的同时可有效滤除随机误差。各截面采样点到基准圆周的跳动值如图 6~9 所示。由于连杆颈上存在油孔,导致每个连杆颈中截面的测量值存在较大跳动。轴颈表面的灰尘、油污等亦会导致测量值出现异常跳动。



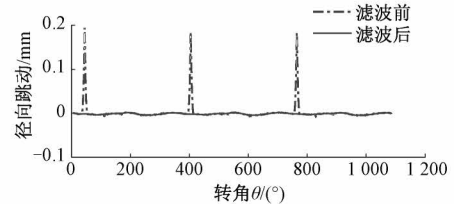
(c) 下截面
(c) Lower section

图 6 连杆颈 1 的径向跳动曲线

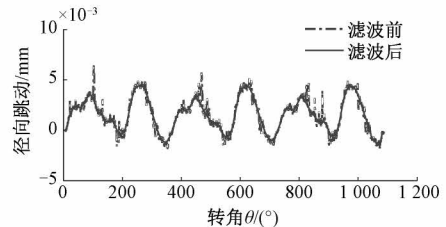
Fig. 6 Radial runout curve of crankpin 1



(a) 上截面
(a) Upper section



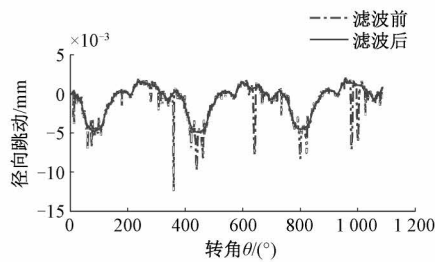
(b) 中截面
(b) Middle section



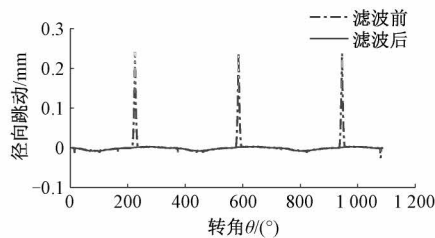
(c) 下截面
(c) Lower section

图 7 连杆颈 2 的径向跳动曲线

Fig. 7 Radial runout curve of crankpin 2



(a) 上截面
(a) Upper section



(b) 中截面
(b) Middle section

以连杆颈 2 下截面 3 圈的采样数据为例,后一个采样点与前一个采样点的相角差如图 10 所示。由于回转主轴驱动电机在启动后和停止前存在加减速,导致第 1 圈和第 3 圈采样点的相角均匀性较差,第 2 圈采样点均匀性较好,角度间隔在 0.58° 附近。其余各截面的采样情况与此类似,在此不再赘述。

基于本文提出的测量模型对曲轴综合仪测得的数据进行处理,利用 3 种最小二乘法 and 最小区域法计算出连杆轴颈各个截面的圆度误差,结果如表 1~4 所示。

由表 1~4 可知,变二法圆度误差值与最小区域结果相差甚远,计算精确度太差,对角度偏差十分敏感,计算结果随角度偏差增大显著恶化,即使使用均匀性较好的

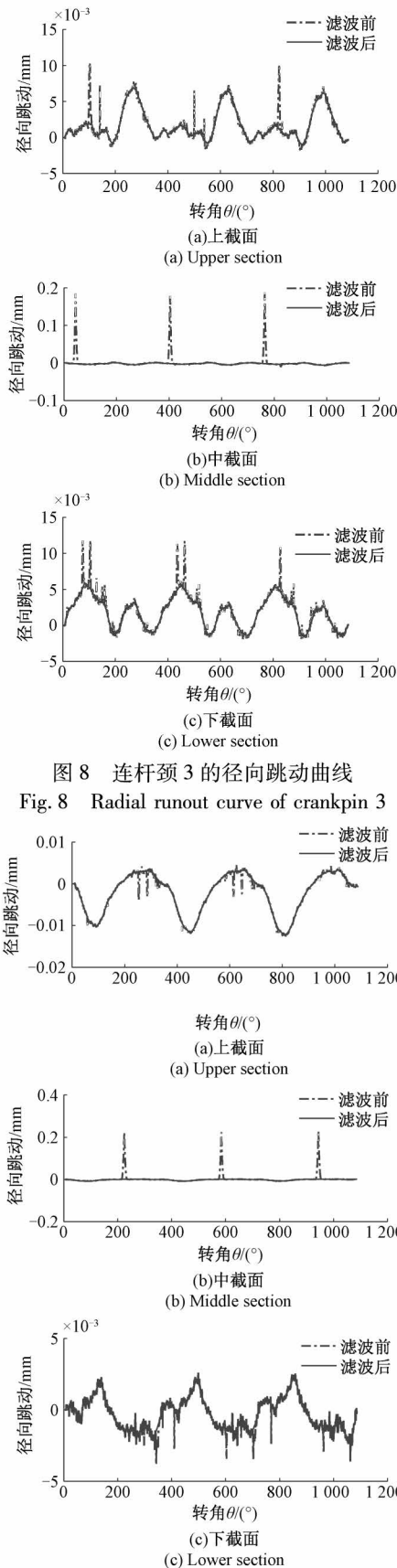


图8 连杆颈3的径向跳动曲线
Fig.8 Radial runout curve of crankpin 3

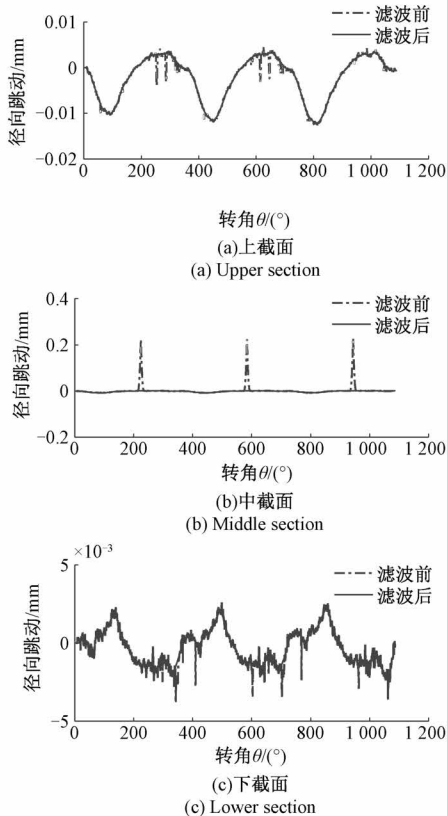


图9 连杆颈4的径向跳动曲线
Fig.9 Radial runout curve of crankpin 4

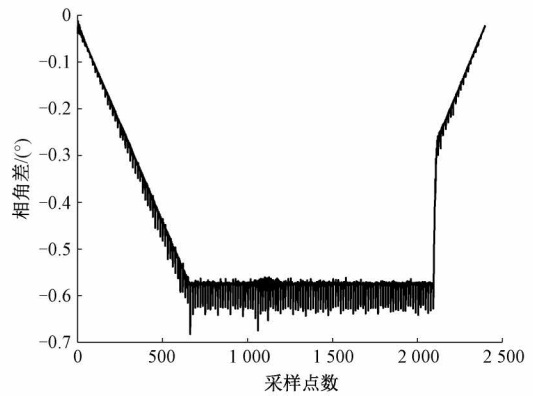


图10 连杆颈2下截面采样点间的相角差
Fig.10 Phase angle difference between sampling points of lower section of crankpin 2

表1 连杆颈1的圆度误差

Table 1 Roundness error of crankpin 1 mm

截面	周期	传统法	变一法	变二法	最小区域
1下	1	0.007 1	0.003 4	12.195 8	0.002 9
	2	0.003 6	0.003 6	0.030 4	0.003 1
	3	0.004 5	0.003 5	11.463 2	0.003 0
2中	1	0.004 4	0.003 6	12.237 6	0.003 0
	2	0.003 2	0.003 2	0.041 4	0.002 8
	3	0.009 1	0.003 8	11.465 8	0.003 2
3上	1	0.004 9	0.005 3	12.206 6	0.004 4
	2	0.004 6	0.004 6	0.019 1	0.004 0
	3	0.005 4	0.004 9	11.476 1	0.004 2

表2 连杆颈2的圆度误差

Table 2 Roundness error of crankpin 2 mm

截面	周期	传统法	变一法	变二法	最小区域
4下	1	0.006 7	0.005 9	12.176 0	0.005 3
	2	0.005 4	0.005 4	0.072 2	0.005 1
	3	0.006 1	0.006 2	11.451 5	0.005 3
5中	1	0.006 1	0.005 8	12.180 4	0.005 1
	2	0.005 5	0.005 4	0.023 8	0.005 1
	3	0.005 3	0.005 9	11.498 1	0.005 0
6上	1	0.006 2	0.005 3	12.184 7	0.004 9
	2	0.005 1	0.005 1	0.061 6	0.004 9
	3	0.005 4	0.005 6	11.459 9	0.004 9

第2圈的采样数据,评定结果依然不可用。变二法实质上要求测量点以最小二乘圆心为中心等角度均匀采样,这种要求在实际测量中难以满足,因此计算精确度

表 3 连杆颈 3 的圆度误差

Table 3 Roundness error of crankpin 3 mm

截面	周期	传统法	变一法	变二法	最小区域
7 下	1	0.006 6	0.006 3	12.206 0	0.005 3
	2	0.006 0	0.005 9	0.063 4	0.005 3
	3	0.006 1	0.006 6	11.479 8	0.005 3
8 中	1	0.006 5	0.006 6	12.186 7	0.005 4
	2	0.006 3	0.006 2	0.038 0	0.005 4
	3	0.006 2	0.006 9	11.473 5	0.005 5
9 上	1	0.006 0	0.006 3	12.204 3	0.005 2
	2	0.006 0	0.005 9	0.057 1	0.005 2
	3	0.005 7	0.006 4	11.458 4	0.005 1

表 4 连杆颈 4 的圆度误差

Table 4 Roundness error of crankpin 4 mm

截面	周期	传统法	变一法	变二法	最小区域
10 下	1	0.006 5	0.004 8	12.186 2	0.004 4
	2	0.005 4	0.005 4	0.022 6	0.004 4
	3	0.006 7	0.004 9	11.485 9	0.004 3
11 中	1	0.005 6	0.004 6	12.184 5	0.004 2
	2	0.005 3	0.005 3	0.016 1	0.004 3
	3	0.006 1	0.005 0	11.502 5	0.004 5
12 上	1	0.002 2	0.002 3	12.215 1	0.001 9
	2	0.002 0	0.002 0	0.028 5	0.001 9
	3	0.002 8	0.002 1	11.476 9	0.002 0

差。该方法不适用于曲轴综合测量仪检测连杆颈的圆度误差。

将表 1~4 中由各截面第 2 圈的测量数据算出的圆度误差值以柱状图显示,如图 11 所示。传统法与变一法第 2 圈的评定结果基本一致且精度较高,与最小区域评定结果的偏差在 1 μm 以内。传统法与变一法计算出的各截面的圆度误差以柱状图显示,如图 12~13 所示。传统法与变一法第 1 圈和第 3 圈的绝大多数评定结果比第 2 圈精确度差,偏差基本在 1 μm 以内。由此可见第 1 圈和第 3 圈的非等角度采样导致传统法和变一法的评定精度均有所下降,且变一法比传统法对角度偏差的适应能力更好。由此可见,使用该曲轴综合测量仪进行圆度误差检测时尽量避免采用初始和最后周期的采样数据。传统法与变一法 3 圈测量数据的圆度评定重复精度如图 14 所示,可见变一法计算精度更高且稳定性更好。

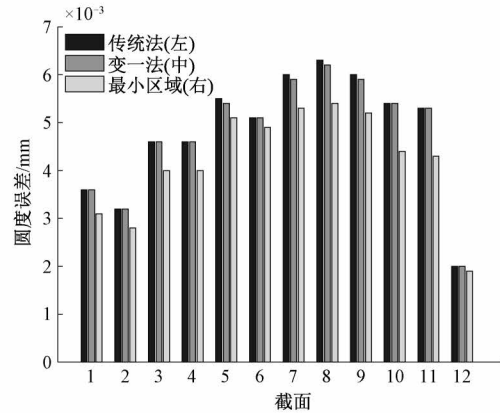


图 11 截面第 2 圈的圆度误差

Fig. 11 Roundness error of the second circle of the section

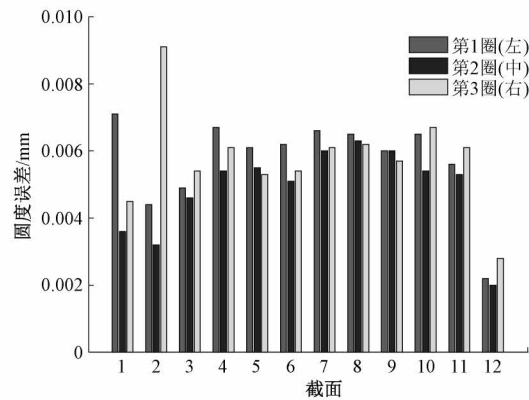


图 12 传统法圆度误差

Fig. 12 Traditional method roundness error

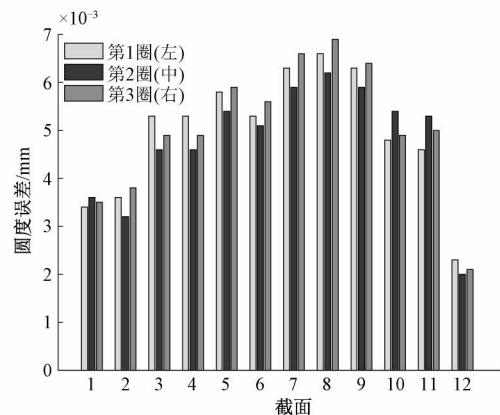


图 13 变一法圆度误差

Fig. 13 Variable method 1 roundness error

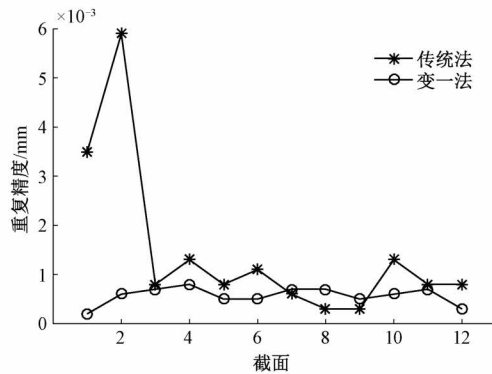


图14 重复精度

Fig. 14 Repeated accuracy

4 结 论

搭建了曲轴综合检测设备样机。针对连杆轴颈测量过程中围绕回转中心做偏心运动且测得的数据无法直接用于圆度误差计算的问题,建立了连杆颈圆度误差检测模型。通过大样本数据分析了3种最小二乘法

对曲轴综合测量仪的适用性,实现了曲轴综合测量仪对连杆颈圆度误差的高精度检测。然而对板型测头引入的测量误差,角位偏差导致的评定误差,回转主轴的随机误差等所引入的不确定度还有待进一步研究。

参考文献

- [1] KRZYSZTOF N, ZENON G, PAWEL D, et al. Determining geometrical deviations of crankshafts with limited detection possibilities due to support conditions[J]. *Measurement*, 2022, 189: 110430.
- [2] 夏丰. 曲轴综合测量仪[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
XIA F. The synthetically measure instrument of crank shaft[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002.
- [3] 田应仲, 李明, 李伟, 等. 曲轴连杆颈圆度误差跟踪测量策略[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 118-122.
TIAN Y ZH, LI M, LI W, et al. Crankshaft roundness tracing measurement strategy in noncircular grinding process[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 118-122.
- [4] 俞红祥. 曲轴连杆颈圆度在线检测与补偿研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(10): 2249-2254.
YU H X. Research on online roundness measurement and compensation for crankshaft pin journal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(10): 2249-2254.
- [5] 张学昌, 梁涛, 张旭, 等. 基于误差转换的汽车曲轴圆度及圆柱度误差评价数学模型构建研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(2): 91-98.
ZHANG X CH, LIANG T, ZHANG X, et al. Research on automobile crankshaft roundness and cylindricity errors evaluation mathematical model based on the error conversion[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(2): 91-98.
- [6] 钱晓明, 崔巍, 楼佩煌. 高精度曲轴轴颈同步测量及误差分析研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 113-121.
QIAN X M, CUI W, LOU P H. Research on synchronous measurement and error analysis of crankshaft journal's high-precision measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 113-121.
- [7] YAZID S, YUSRI Y, KAMRAN L, et al. Roundness holes' measurement for milled workpiece using machine vision inspection system based on IoT structure: A case study[J]. *Measurement*, 2022, 195: 111072.
- [8] YU H X, XU M C, ZHAO J. In-situ roundness measurement and correction for pin journals in oscillating grinding machines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 548-562.
- [9] 曹麟祥, 王丙甲. 圆度检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
CAO L X, WANG B J. Roundness measurement and verification techniques[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [10] ZHENG P, LIU D L, WANG M, et al. In-process measuring method for the size and roundness of workpiece with discontinuous surface in cylindrical grinding process[J]. *Measurement*, 2020, 166: 108240.
- [11] DEEP S, ARUNACHALAM N, SRINIVASU D S. A novel iterative-based field search technique for roundness evaluation[J]. *Procedia Manufacturing*, 2021, 53: 268-275.
- [12] 黄蔚远. 三种最小二乘法计算圆度误差的评比探讨[J]. *计量学报*, 1991, 12(1): 22-28.
HANG W Y. Discussion on the comparison of roundness error calculated by three least square methods[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1991, 12(1): 22-28.
- [13] 吴蔚. 圆零件测量的数据处理[J]. *计量学报*, 1986, 7(2): 141-144.

- WU W. Data processing of round parts measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 1986, 7(2): 141-144.
- [14] 颜景平. 最小二乘圆参数的计算问题[J]. 计量学报, 1989, 10(2): 132-137.
- YAN J P. Calculation of least square circle parameters[J]. Acta Metrologica Sinica, 1989, 10(2): 132-137.
- [15] LEI X Q, SONG H W, XUE Y J, et al. Method for cylindricity error evaluation using geometry optimization searching algorithm [J]. Measurement, 2011, 44: 1556-1563.
- [16] ROSSI A, LANZETTA M. Optimal blind sampling strategy for minimum zone roundness evaluation by metaheuristics [J]. Precision Engineering, 2013, 37: 241-247.
- [17] 苏永帅, 王亚晓, 王洪喜. 曲轴连杆颈圆度的离线测量方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(12): 83-87.
- SU Y SH, WANG Y X, WANG H X. Research on the offline roundness measurement method for crankshaft pin journal [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(12): 83-87.

作者简介



田慧慧, 2008年于河南科技学院获得学士学位, 2014年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为西安工业大学讲师, 主要研究方向为精密测量理论、精密仪器及机械。
E-mail: yezifairy@163.com

Tian Huihui received her B. Sc. degree from Henan Institute of Science and Technology in 2008, and received her Ph. D. degree from Xidian University in 2014. She is currently a lecturer at Xi'an Technological University. Her main research interests include precision measurement theory and precision instruments and machinery.



王亚晓(通信作者), 1997年于陕西理工大学获得学士学位, 2004年于西北工业大学获得硕士学位, 现为西安工业大学副教授, 主要研究方向为计算机辅助精密测量、机电系统设计与控制。

E-mail: 461696704@qq.com

Wang Yaxiao (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 1997 from Shaanxi University of Technology, received her M. Sc. degree in 2004 from Northwestern Polytechnical University. Now, she is associate professor in Xi'an Technological University. Her main research interests include precision measurement and electromechanical system design and control.



焦艳梅, 2004年于重庆交通大学获得学士学位, 2011年于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为西安文理学院讲师, 主要研究方向为机械结构分析。

E-mail: 285654584@qq.com

Jiao Yanmei received her B. Sc. degree from Chongqing Jiaotong University in 2004, and received her M. Sc. degree from Xidian University in 2011. She is currently a lecturer at Xi'an University. Her main research interest is mechanical structure analysis.