

仪表技术

基于光电技术的圆度测量及最小二乘评定

纪小辉 陈 彤

(西安工业大学光电工程学院, 西安 710032)

摘 要 提出了一种基于光电技术测量圆度误差的新方法。该方法将圆度误差转化为轴上物点的移动,利用理想光组轴向放大率理论来实现微位移的放大,并通过采用位置敏感探测器将光斑像点的位移转化为电信号的输出,从而实现位移与电信号的转化;在测量圆度的同时,采用圆光栅来测量工件转角,实现整周的圆轮廓实时记录;对于圆度误差的评定采用最小二乘法,并经过对比实验,证实该方法的测量原理可行,实现了圆度误差的整周连续测量,其测量精度可以达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词 圆度误差 轴向放大率 位置敏感探测器 最小二乘法

中图法分类号 TH161.1;

文献标志码 A

回转类零件的重要形状误差之一是其圆度误差,实际圆轮廓对理想圆的变动量被称作圆度误差。常用的测量方法有平台打表法、半径法、直角坐标法和特征参数法。对应的测量工具有千分尺、立式光学计、圆度仪、坐标机等,其中圆度仪的测量精度最高,可达到 $0.025\text{ }\mu\text{m}$ 。常用的圆度误差评定方法有最小区域法、最小二乘法、最大内切圆法、最小外接圆法,其中以最小区域法评定的圆度误差最准确,最小二乘法最常用。在这些方法中,多数方法采用离散点测量,手工记录数据,得不到精确轮廓图形。随着对加工精度和测量过程自动化要求的不断提高,需要一种能快速、准确获得被测件的圆度误差并能得到精确轮廓图形的方法。为此,本文设计了基于光电技术的圆度误差的自动测量系统,该系统利用理想光学系统的轴向放大理论,将对被测件圆度误差的测量转化为对光斑位移的测量,利用 PSD 作为光斑位移变化的接收装置,并通过与微机相联,对数据进行自动处理,从而实现了圆度误差的自动化和高精度测量。

1 测量原理

1.1 微位移的放大原理^[2]

根据几何光学的相关理论可知,在一焦距为 f 的理想光组中,垂轴放大率 β 为像高 y' 与物高 y 的比值;轴向放大率 α 是像移动量 dx' 与物移量 dx 的比值;当垂轴物面位于一倍焦距以外两倍焦距以内,可以得到倒立的放大的实像,那么当物面光轴上 A 点(焦物距为 x)相对初始位置沿光轴有微小移动时有 $\alpha = \beta^2 = dx'/dx$,如图 1 所示。

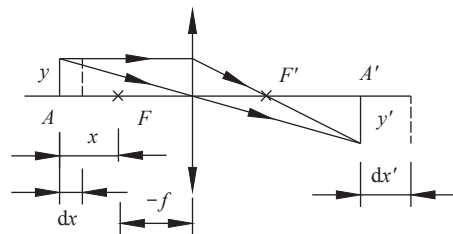


图 1 理想光组的轴向放大率

1.2 微位移的转化原理

位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector——PSD) 是一种基于半导体 PIN 结横向光电效应的光电器件,它能连续地检测入射光斑的位置。具有分辨率高、响应速度快、信号处理相对简单、检测位置的同时还能检测光强等优点,适用于位置、距离、

2010 年 6 月 21 日收到,7 月 1 日修改

第一作者简介:纪小辉(1970—),男,陕西西安人,讲师,硕士,研究方向:光电仪器设计。

位移、角度以及其它相关物理量的精密测量^[3]。一维 PSD 器件有一个完整的光敏面,在光敏面两端有两个接触点,其断面结构示意图如图 2 所示。

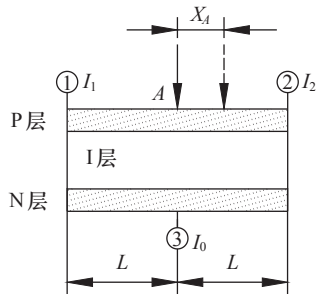


图 2 一维 PSD 断面结构示意图

当入射光斑照射在光敏面上时,在入射位置表面下就产生与光强成比例的电荷,此电荷通过 P 层向电极流动形成光电流。由于 P 层的电阻是均匀的,所以由两极输出的电流分别与光点到两极的距离成反比。设两电极的距离为 $2L$,经电极①和电极②输出的光电流分别为 I_1 和 I_2 ,则电极③上输出的总电流为 $I_0 = I_1 + I_2$ ^[1]。若以光点在 PSD 的中心点为初始位置,当光点有位置偏移 x_A 时,则有

$$I_1 = I_0 \frac{L - x_A}{2L} \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 \frac{L + x_A}{2L} \quad (2)$$

$$x_A = L \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (3)$$

2 测量装置

2.1 微位移测量组件

微位移测量组件如图 3 所示。图 3 中 1 为光源,采用 CCS 公司的 LV-27-GR 型 LED 点光源 ($\lambda = 555 \text{ nm}$),准直镜 2 提供准直光,照亮分划板 3 的划分面,其中透光区为 $\varnothing 1 \text{ mm}$ 的小孔;经过聚焦透镜 4 将划分面的透光区会聚成像,形成光轴上的物点,且距物镜 5 ($f = 20 \text{ mm}$) 的焦点距离为 2 mm ;此位置的垂轴放大率 $\beta = 10$ 倍。由于 PSD 6 水平放置且 PSD 感光面包含光轴则在感光面上所成的投影像如图 4 所示,PSD 选用 HAMAMATSU 公司的 s3931 一维传感器,其感光区域为 $1 \times 6 \text{ mm}$,波长响

应范围 ($320 \sim 1100 \text{ nm}$),位置变化分辨率为 $0.2 \mu\text{m}$ 。分划板支架 7 与测量头 8 连接,图 3 中的 3、4、7、8 组成连动组件。当测头在测量过程中产生沿光轴的轴向移动时,分划板经聚焦透镜 4 所成的像也沿光轴同向移动,当测头沿光轴有 $dx = 1 \mu\text{m}$ 的位移时,分划板在 PSD 感光面上的像沿光轴有同方向的 $\beta^2 \times dx$ 倍的位移 $dx' = 0.1 \text{ mm}$ 。因此 PSD 能很灵敏地分辨出被测量 $1 \mu\text{m}$ 的变化。

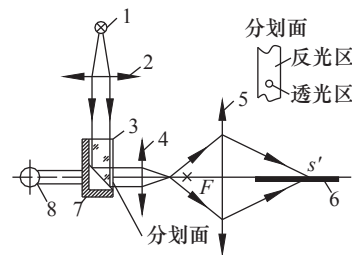


图 3 测量组件

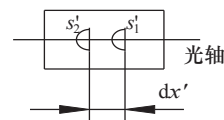


图 4 PSD 感光面上的像

2.2 圆度误差测量装置

测量装置如图 5 所示。被测工件一端由三爪卡盘加持,另一端由可移动顶尖支撑,工件的转动由三爪卡盘的转动带动,三爪卡盘的转动角度和转动量可由光栅角度盘计数,从而可以精确地测得工件的转动量^[4]。

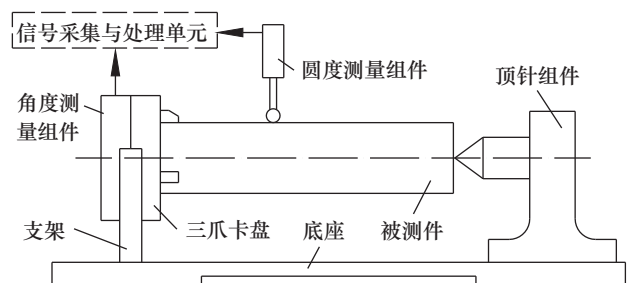


图 5 圆度测量装置

测量头与工件的最高母线接触,这时将 PSD 的信号处理单元值初始值,同时将角度处理单元值零值^[5];三爪卡盘在步进电机的带动下,匀速转动从而

带动工件转动,角度测量单元开始计数,将角度信息输出到信号采集与处理单元;由于工件圆度误差存在,测量头上下移动,从而引起在 PSD 光敏面上光斑的移动,造成 PSD 两端电流的变化,根据式(3)就可得到测头的放大位移量 x_A ;在信号采集与处理单元中将角度信息和 PSD 两端的电流信号综合处理,可以得到角度和测头位移量的对应关系,如图 6 所示,测量数据反映出被测件在一周内半径的变化情况。

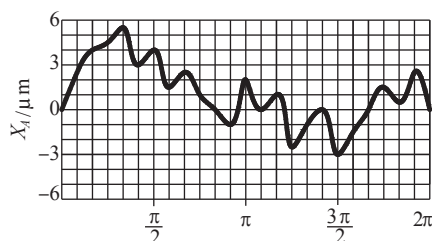


图 6 角度与测头位移

3 测量数据及圆度误差的评定

3.1 测量步骤与数据

按图 5 所示搭建实验平台,被测件为半径 $r_0 = 20$ mm 的直轴,测量截面选择在轴的中部,采用量块打表法选择测量起始点,此点距记录中心点 O(回转中心)的半径为公称半径 $r_0 = 20$ mm。工件旋转一周,得到整周范围内半径相对起始点的半径的变化情况如图 6 所示。按每 15° 间隔取一个偏移量,得到表 1 的测量数据。

表 1 径向偏差表

测量位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta r_i/\mu\text{m}$	0	2.5	4	4.5	5.5	3	4	1.5	2.5	1	0	-1
测量位置	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\Delta r_i/\mu\text{m}$	2	1	-2.5	-1	0	-3	-1.5	0	1.5	0.5	2.5	0

3.2 圆度误差的评定

在得到工件转动角度和所对应的测头位移量数据后,并不能直接得到被测件的圆度误差。根据 GB/T 7235—2004 对圆度误差的定义需对测量数据进行处理和圆度误差评定,常用的评定方法为最小二乘法。它是以被测实际轮廓的最小二乘圆作为理想圆,

最小二乘圆圆心至轮廓的最大距离与最小距离之差即为圆度误差值。最小二乘圆是指在被测实际轮廓内找出这样的一点,使实际被测轮廓上各点到该点为圆心所作的圆的径向距离的平方和为最小^[6-8],即:

$$\sum_{i=1}^n (r_i' - R')^2_{\min}; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

r_i' 为被测实际轮廓上第 i 点到最小二乘圆圆心 O' 的径向距离,圆心 O' 的坐标 (a, b) 和半径 R' 可由下式近似求得^[2]:

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6)$$

$$R' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (7)$$

$$x_i = r_i \cos \theta_i \quad (8)$$

$$y_i = r_i \sin \theta_i \quad (9)$$

x_i, y_i —轮廓图上等分点 P_i 的坐标值(记录中心点 O);

r_i —等分点 P_i 到坐标原点(记录中心点 O)的径向距离;

n —轮廓等分点间隔数;

θ_i —轮廓图上等分点的转角(记录中心点 O)。

圆度误差可由下式得到:

$$t = r'_{\max} - r'_{\min} \quad (10)$$

$$r'_i = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2} \quad (11)$$

$$x'_i = x_i + a \quad (12)$$

$$y'_i = y_i + b \quad (13)$$

t —圆度误差;

$r'_{\max}, r'_{\min}$ —等分点 P_i 到最小二乘圆圆心 O' 的最大和最小距离;

r'_i —等分点 P_i 到最小二乘圆圆心 O' 的距离;

x'_i, y'_i —等分点 P_i 到最小二乘圆圆心 O' 的坐标值。

表 1 中所得为每个测量点的半径与公称半径的差值,则对应测量点的半径为

$$r_i = r_0 + \Delta r_i \quad (14)$$

按照上述公式对表 1 的数据进行处理,可得

$$a = 0.8 \mu\text{m}; b = 2.2 \mu\text{m}; R' = 20.001 \text{ mm};$$

$r_{\max} = 20.003\ 2\ \text{mm}$; $r_{\min} = 19.999\ 2\ \text{mm}$; $t = 4\ \mu\text{m}$ 。

由以上数据表明本方法的测量精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$ 。

3.3 测量方法的比较

3.3.1 平台打表法

对同一直轴采用平台打表法进行测量,将被测件用光学分度头的顶尖支承,测量截面仍然选择在轴的中部,旋转角度由光学分度头确定,用千分表读取一周内的最大和最小读数值,采用最小外接圆法进行评定得到圆度误差为 $9\ \mu\text{m}$ 。

3.3.2 圆度仪测量

对同一直轴用 MC012—DTP—2000C 型圆度仪进行测量,测量截面仍然选择在轴的中部,采用最小二乘圆法评定得到圆度误差为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。

3.4 测量精度分析

影响圆度误差测量精度的因素很多,本装置中的影响因素有测头导轨的运动精度、被测件回转轴的径向跳动及轴向窜动、PSD 的响应精度及信号处理过程中的运算精度。机械量的精度可以控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以内;PSD 的响应精度主要受暗电流和非线性的影响,合理选择 PSD,控制环境温度和在光路中增加消杂光装置,尽量选择 PSD 的中心区域作为响应区等都可以提高 PSD 的响应精度;在信号处理过程中采用高精度的信噪分离电路,并提高数模转换精度等措施都可以有效地提高装置的整体测量精度,并控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以内。

4 结论

本文所论及的微位移及圆度测量方法,经实验以及同其它方法的比较,证实此方法可行,其测量精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$,此种精度对应用到圆度误差的测量是可以满足实际需求的,并且可以得到被测件在整周范围内连续的径向尺寸变化情况,有利于分析工件的实际轮廓形状,并对有效改善加工方法和过程提供参考。

参 考 文 献

- 1 梁国明. 长度计量人员实用手册. 北京:国防工业出版社,2000:139—141
- 2 李湘宁. 工程光学. 北京:科学出版社,2005:35—37
- 3 段 洁,孙向阳. PSD 在激光位移检测系统中的应用研究. 红外与激光工程,2007;(6):281—282
- 4 单小磊,刘 超. 基于 PSD 的转轴测量系统研究. 光学仪器,2007;29(2):18—20
- 5 陈强华,吴 健. 双频激光远程直线度和同轴度测量系统. 中国激光,2002;A29(7):625—626
- 6 范淑果,郝宏伟. 最大内接圆法评定圆度误差值的程序设计技术. 燕山大学学报,2005;29(3):264—268
- 7 侯学锋,黄富贵,田树耀. 圆度最小二乘评定结果的不确定度估计. 工具技术,2008;42(9):102—104
- 8 畅为航. 圆度误差算法的研究. 工具技术,2008;42(9):97—99

Measuring Circularity Based on Photo Electricity Technology and Evaluation by Least Squares Mean Circle Method

Ji Xiao-hui, CHEN Tong

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, P. R. China)

[Abstract] A new method of measuring the roundness error based on photo electricity is proposed. Roundness error was converted to the displacement of a point on optical axial by this method, to amplify micro-displacement based on ideal optical system longitudinal magnification theory. The displacement fluctuation of light spot image is converted to electric signal outputting by PSD (Position Sensitive Detector). The rotation angle of the piece is measured by circular optical grating when measuring the circularity of the piece, thus the information of complete cycle outline real time can be acquired. Assessment of circularity error uses the method of least square approximation. The measuring method is correct by opposite experiments is verified. The goals of measuring complete cycle outline are reached, and the accuracy of circularity error is $1\ \mu\text{m}$.

[Key words] roundness error longitudinal magnification PSD least square approximation