

文章编号: 1001-3806(2004)02-0166-04

以无衍射光为基准的内孔同轴度测量仪

张新宝, 李 柱

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 沿着 z 轴方向传播的无衍射光决定了一条空间直线。加之无衍射光束的光轴比准直激光束稳定, 适于作空间直线度/同轴度误差测量的直线基准。以无衍射光为基准, 结合圆度测量及其修正技术, 实现了一种内孔同轴度的高精度测量技术。介绍了内孔同轴度测量技术的工作原理, 并从误差的理论分析和试验来作了证明。

关键词: 无衍射光; 高精度对准; 直线度误差的修正; 内孔同轴度测量

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A

A coaxial measuring system for a hole using non-diffracting beam

ZHANG Xin-bao, LI Zhu

(School of Mechanical Science and Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using the non-diffracting beam along the axes z , a spatial straight line can be reasonably obtained. Furthermore, the non-diffracting beam has better tolerance properties to the drift of laser beam than that of the common collimated laser beam and its optic axes is more stable than the enlarged laser beam. So it is more suitable to be used as the spatial datum-line for straightness error or coaxiality error measurement. Based on the non-diffracting beam datum-line and combining roundness measuring technology with its amending technology, a high precision coaxial measurement method for a hole has been proposed in this paper. The principle of the measuring system is introduced and theoretical error analysis and test are made to verify it.

Key words: non-diffracting beam; high precision alignment; straightness error corrected; coaxiality measurement for a hole

引 言

直线度/同轴度测量是几何量计量领域里最基本的计量项目之一,因而历来受到各国学者的重视,并做了许多研究工作。

现有的直线度/同轴度测量方法有打表法、电感测量法、测微准直望远镜方法、双频激光干涉仪及其直线度附件测量直线度/同轴度的方法^[1],单模光纤的尾纤结合半导体激光器激光基准测量法^[2]。这些方法多数是接触测量,直线基准的精度也有一定的限制,且由于测量系统的结构特点不适于测量内孔的直线度/同轴度,还有机械附件倾斜时的偏心误差及其它误差,测量精度不易保证。

而现代机械生产中对工件的制造精度和装配精

度的要求越来越高,研制相应的测量方法和仪器也成为迫切需要解决的问题。激光束经 axicon 可产生有限距离的无衍射光。沿着 z 轴方向传播的无衍射光决定了一条空间无衍射光束中心直线,因而,无衍射光的光轴可以用作直线度误差/同轴度误差测量的直线基准^[3]。因此,下面将介绍以无衍射光为基准,与其它圆度测量技术相结合用于中小孔径同轴度的高精度测量方法。

1 孔的同轴度误差测量系统的原理

孔的同轴度误差的测量方式是沿 z 轴测量多个圆度的误差曲线的测量方式。

测量系统的工作测量原理(见图 1):首先, z 向直线工作台驱动位移探测器至 $z = z_0$ 处,位移探测器测量孔半径的相对一个初值(y_0)的测量值,同时 CCD 测得无衍射光束的截面图像。

然后旋转轴带动位移探测器和 CCD 旋转,在此截面内来测量圆度和旋转轴上的点对无衍射光直线

基金项目:武汉市 2002 年青年科技晨光计划资助项目(20025001001)

作者简介:张新宝(1965-),男,工学博士,副教授,从事精密测量工作。

E-mail: zhangxinbao1@meci1.hust.edu.cn

收稿日期:2003-05-19;收到修改稿日期:2003-08-11

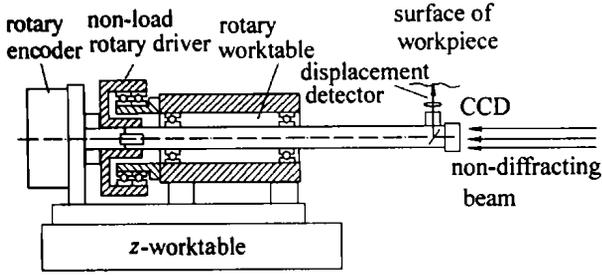


Fig. 1 The working principle of the measuring system

基准的偏移曲线。旋转轴带动位移探测器和 CCD 以 θ 逆时针转一周,每转 4° ,位移探测器测一个半径的相对值,同时,CCD 测一个无衍射光束的截面图像。旋转编码器记录转角。

基于旋转坐标系,由系列的无衍射光束的截面图像的中心可以求得旋转轴的理论旋转中心和实际中心。用实际中心的测量曲线修正位移探测器的圆度误差曲线,则测量系统的圆度误差曲线的直线基准就是无衍射光束。进而可求得孔的相对半径值和基于无衍射光直线基准的圆心坐标。

z 向直线工作台驱动位移探测器至不同的 z 处,测量并求得所有孔的相对半径值和圆心坐标。最后求得孔的直线度/同轴度。

2 孔的同轴度误差数据处理

2.1 测量系统的坐标系图解

2.1.1 基于绝对坐标系的测量系统示意图(见图 2) 定义无衍射光的轴线 $O_n(0,0,z)$ 为 z 轴, z 轴向右为正;定义铅垂方向为 y 坐标,向上为正即为位移探测器的起始基准方向, x 轴向内为正,定义垂直于旋转轴并包含位移探测器的平面与旋转轴的交点为旋转轴的理论旋转中心 $O_{LD}(x_n, y_n, z)$,位移探测器的安装位置基准点 $O_{11}(r_{11}, \theta_{11}, z)$,位移探测器对基准方向 y 轴沿 x 向的起始安装倾斜角 θ_x ,位移探测器对基准方向 y 轴沿 z 向的起始安装倾斜角 θ_z 。

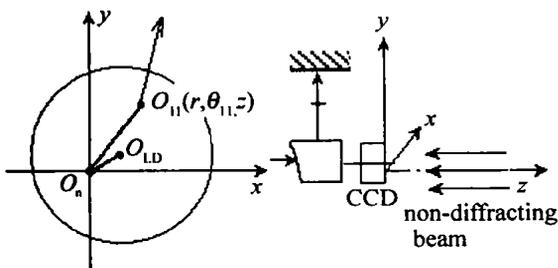
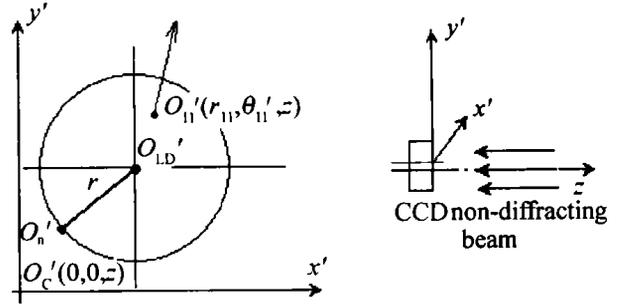


Fig. 2 The measuring system in absolute coordinates

2.1.2 基于旋转轴坐标系的测量系统示意图(见图 3) 定义 CCD 图像基点为起始计算基点 $O_c'(0,0,z)$ 。基于旋转轴建立坐标系(见图 3),定义原点为 $O_c'(0,0,z)$,定义 z 轴不变,起始位置 y 轴和 x 轴



的方向与 y 轴和 x 轴的方向相同,旋转轴的理论旋转中心为 $O_{LD}'(x_o', y_o', z)$,贝塞尔光环中心 $O_{n_i}'(x_i', y_i', z)$,旋转轴的实际中心 $R_{LD_i}'(x_o' + \Delta x_i', y_o' + \Delta y_i', z)$ 。绝对坐标 $O_n(0,0,z)$ 对应贝塞尔光环中心的起始坐标 $O_{n_i}'(x_1', y_1')$ 。旋转轴的实际中心 $R_{LD_i}'(x_{LD_i}', y_{LD_i}', z)$ 对其理论旋转中心 $O_{LD}'(x_o', y_o', z)$ 的坐标差是 $(\Delta x_i', \Delta y_i')$ 。

2.2 旋转轴的实际中心坐标和孔径的修正半径的求解算法

测量圆度时,则贝塞尔光环中心 O_{n_i}' 相对旋转轴的理论旋转中心顺时针转一周,旋转轴理论旋转中心 O_{n_i}' 将依测量顺序均匀排列在近似半径为 r 的圆上。旋转轴理论旋转中心的绝对坐标 O_{LD} 为:

$$x_{o_n} = x_o' - x_1' \quad (1)$$

$$y_{o_n} = y_o' - y_1' \quad (2)$$

设预设计算偏心值的起始位置的角度 θ_0 过 $O_n(0,0,z)$ 和 $O_{LD}(x_{o_n}, y_{o_n}, z)$, 所以:

$$\Delta x_i' = r \cos(\pi + \theta_0 - \theta) + x_o' - x_i' \quad (3)$$

$$\Delta y_i' = r \sin(\pi + \theta_0 - \theta) + y_o' - y_i' \quad (4)$$

预先限定位移探测器的安装误差,并忽略它们的影响。设位移探测器的测量值为 dis ,则孔径的修正半径:

$$\Delta R_i = dis + \Delta y_i' \quad (5)$$

2.3 圆心坐标的算法

吴蔚^[4]介绍的圆心坐标的最小二乘算法适用于直角坐标的测量数据,但要求圆心坐标的初值位于理论最小二乘圆的圆内且偏心量与最小二乘半径的比值小于 0.01。

用搜索优化算法作为一种求初值方法:目标函数 $\sum [(x - a)^2 + (y - b)^2 - r^2] < \delta$,辅助函数 $\Delta a < \delta_1$ 和 $\Delta b < \delta_2$ 。迭代直到辅助函数 Δa 和 Δb 小于设定值,所求初值即为 $a = \sum a_i, b = \sum b_i$ 。

2.4 孔中心的绝对坐标及其同轴度

用(美国标准)ANSI. B. 89. 3. 1-72 可以求得孔截

面的中心对旋转轴理论旋转中心的相对坐标:

$$\Delta a = 2 \sum \Delta R_i \cos(\theta + \pi/2) / n \quad (6)$$

$$\Delta b = 2 \sum \Delta R_i \sin(\theta + \pi/2) / n \quad (7)$$

孔截面中心的绝对坐标:

$$s_x = x_{O'} - x_1' + \Delta a \quad (8)$$

$$s_y = y_{O'} - x_1' + \Delta b \quad (9)$$

所有截面的孔中心的绝对坐标即可获得其同轴度误差。

3 理论分析和试验结果

图4和图5是实验系统的记录角度的旋转编码器和测量头的照片。位移探测器为LVDT,其测量不确定度为0.4μm,测量范围-200μm~+200μm;旋转编码器ZE-54的角度分辨率±4'。y₀=45000μm。

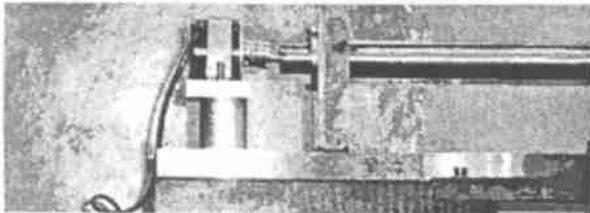


Fig.4 The photo of rotary encoder for recording the rotated angle value of the measuring system

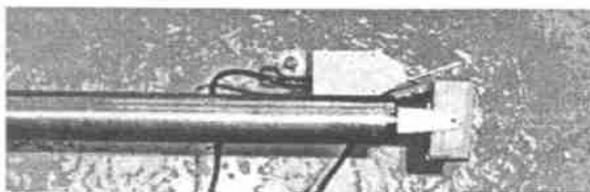


Fig.5 The photo of the displace detector and CCD of the measuring system

3.1 设计参数说明

工作条件:20℃±10℃,基本屏蔽光干扰,隔振。

- (1) CCD工作区有像元568×768,单个像元面积6.5μm×6.5μm,即CCD工作区的面积±1.846mm×±2.496mm,取CCD的量为±0.975mm×±1mm;
- (2) 无衍射光的轴线O_n(0,0,z)与旋转轴的实际中心的间距100μm~400μm;
- (3) 旋转中心O_{LD}与测量对象——孔的轴线的安装同轴度小于∅100μm;
- (4) 直线导轨的形状误差引起的旋转中心O_{LD}在x和y方向的位置变动小于∅140μm,其中,旋转时,旋转中心O_{LD}的圆跳动小于∅30μm;
- (5) 位移探测器的安装位置基准点O₁₁(r₁₁,θ₁₁,z)与旋转中心O_{LD}的安装同轴度小于0.4%主轴颈(∅360μm);
- (6) θ_x和θ_z小于0.8,它们的变动量小于0.0271。

3.2 误差分析

3.2.1 无衍射光直线基准的关联不确定度 无衍

射光直线基准的关联不确定度Δr₁与直线基准漂移误差0.2333μm、无衍射光直线基准的CCD测量误差0.65μm、CCD倾斜角±0.8102°引起的余弦误差0.2μm有关。所以:Δr₁=(0.2333²+0.65²+0.2²)^{1/2}μm=0.72μm。

3.2.2 旋转中心O_{LD}(x_{O_n},y_{O_n},z)的运动偏心引起的误差 O₁₁,θ_x和θ_z旋转中心O_{LD}与测量对象(孔的轴线)的安装同轴度以及直线导轨的形状误差引起的旋转中心O_{LD}在x和y方向的位置变动可简化为它们对测量对象轴心的当量偏距,主要影响位移探测器测量的初值y₀(见图6),使测量值变小。旋转中心O_{LD}的圆跳动小于∅30μm,当量偏距取极限值为(360+100+140)μm/2=300μm,运动偏心误差∅60μm,主轴颈∅90mm,相应的最大误差:Δr₂=45μm-(45²-0.33²)^{0.5}μm-[45-(45²-0.27²)^{0.5}]μm=0.401μm。

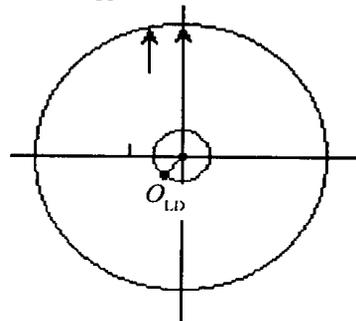


Fig.6 The maximum installing error of the displacement detector produced by the eccentricity of the center of the rotating shaft

3.2.3 其它误差 由于其它因素的影响,误差Δr₃=0.54μm。

3.2.4 总的测量不确定度U_R U_R=√ΣΔr²=√(0.72²+0.401²+0.54²)μm=0.98μm,总的测量不确定度优于1μm。

3.3 试验结果

该方法的设计对象为了测量一个柴油发动机的7个主轴承的同轴度。主轴颈∅90mm,精度IT7的公差T=0.035mm。跨距:1~2,2~3,5~6,6~7,132mm;3~4,4~5,136mm。同轴度:0.025mm(M)

在不同测量距离z处,主轴承孔截面几何中心的坐标值见表1。

Table 1 The coordinates of the theoretical center of the hole at different position

z/mm	18	150	282	554	418	686	818
s _y /μm	45.37	24.78	-1.75	-25.40	-57.33	-70.90	-61.61
s _y /μm	109.84	105.77	107.46	147.31	176.90	207.21	236.62

基于最小二乘法,从表 1 可得评估误差的空间基准直线为:

$$\begin{cases} x = 0.1518z + 42.4719 \\ y = 0.1745z + 82.9485 \end{cases} \quad (10)$$

主轴承孔的同轴度误差曲线 ($\Delta s_x, \Delta s_y$) 见图 7。在 $z = 282\text{mm}$ 处,最大同轴度误差为 $24.7269\mu\text{m}$ 。因此,由试验结果可以说明,该系统可以获得测量的高精度。

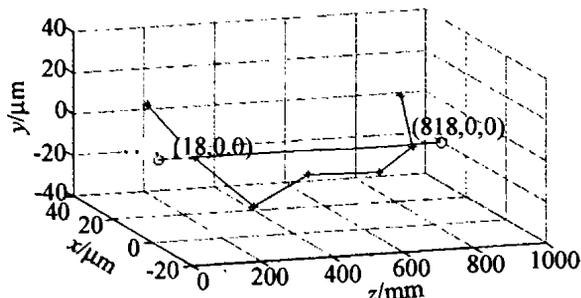


Fig. 7 The coaxiality error curve of the principal axis neck

(上接第 149 页)

由图 6 和图 7 比较可以看出,采用本文中的方

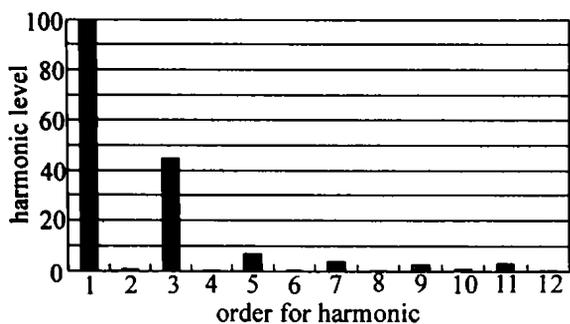


Fig. 6 The harmonic level of proposed power supply
fundamental = 100 %

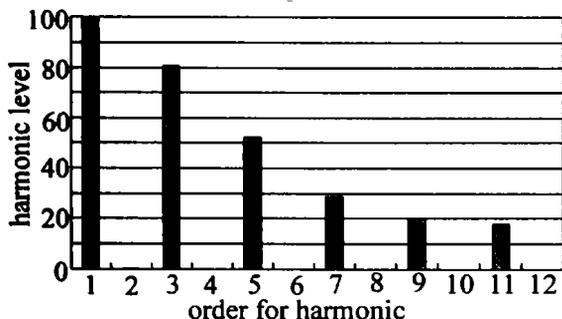


Fig. 7 The harmonic level of condenser input type power supply
fundamental = 100 %

4 结 论

(1) 以无衍射光为基准,与其它圆度测量技术相结合,开发了一种可以用于孔的同轴度的高精度测量的同轴度误差测量系统。

(2) 工作距离 1.5m 以内时,无衍射光直线基准的关联不确定度小于 $0.72\mu\text{m}$,当测量圆度的位移传感器的测量不确定度为 $0.4\mu\text{m}$,测量范围 $-200\mu\text{m} \sim +200\mu\text{m}$ 时,系统的测量不确定度可以小于 $1\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] CHENG Q H, WU J, YIN Ch Y. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29 (7) : 625 ~ 630.
- [2] LU N G, DEN W Y, YAN B X *et al.* Proc SPIE, 2000, 4222 : 383 ~ 386.
- [3] ZHANG X B, ZHAO B L, Zhu J. Opt. A: Pure Appl Opt, 2002, 4(1) : 78 ~ 83.
- [4] 吴 蔚. 计量学报, 1986, 7(2) : 141 ~ 144.

法设计的电源,其功率因数与传统方法相比高次谐波成分已大大降低。

4 结 论

采用本文中所述的原理设计制作 YAG 激光充电电源,具有成本低(与变压器升压方式相比)、输出功率稳定、功率因数大、高次谐波幅度小等优点,制作结果证明了理论设计的正确性。很明显,这种技术同样也可以用于 3 相大功率充电电源当中,在有良好散射设计及采用并联 FET 技术的情况下,也能够制作出电网电压 380V 稳定输出功率在 20kW 以上的激光电源。设计制作 20kW 以上的激光电源和采用图 2 所示电路框图制作低压半导体二极管泵浦用激光电源成为今后努力的目标。

参 考 文 献

- [1] 叶志生, 撒 昱, 金贞姬 *et al.* 电力电子技术, 2002, 36(2) : 7 ~ 9.
- [2] 段 军, 唐霞辉, 赵 霞 *et al.* 激光杂志, 1995, 16(1) : 19 ~ 24.
- [3] 宁喜发, 姚建铨, 陆 颖 *et al.* 激光杂志, 2002, 27(5) : 63 ~ 65.
- [4] KAZERANI M, ZIOGAS P D, JOOS G. IEEE TRAN on Industrial Electronics, 1991, 38 (1) : 72 ~ 78.
- [5] 町田 博. トランジスタ技術, 1992, 29(8) : 537 ~ 548.