

回转激光位移传感器逼近式孔心定位方法

王 仲 苏 野 刘新波 刘红光

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 对于提高大型工件轴孔加工的精度和效率,孔心的精确定位至关重要。提出了一种基于激光位移传感器的非接触式回转逼近孔心定位方法。将传感器固定于机床的执行切削的旋转主轴上,并将主轴旋转中心置于理想圆心附近。在机床旋转的同时,分别沿与主轴轴线正交且相互垂直的两个方向上移动主轴,直到测量变化量达到最小(理论上可以为零),此时可以认为轴孔中心达到重合。利用逼近式孔心定位方法,可以快速精确定位与机床关联的圆心的相对坐标,从而指导后续加工。由于采用非接触测量方法,保障了测量的安全性。实验结果表明,此方法能够提高孔心的定位精度和效率。

关键词 测量;非接触测量;激光技术;孔心定位;大型工件;激光位移传感器

中图分类号 TH-3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0608001

An Approximation Hole Center Positioning Method by Rotating Laser Displacement Sensor

Wang Zhong Su Ye Liu Xinbo Liu Hongguang

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Pinpointing hole center is crucial for machining shaft hole of large-scale workpiece. In order to improve the precision and efficiency of workpiece machined, an approximation hole center positioning method is proposed by rotating laser displacement sensor without angular coordinate. Laser displacement sensor is installed on the rotatable spindle, and the rotatable spindle is placed randomly at a different position around hole center. Spindle is moved along two directions respectively, which are mutually perpendicular and both perpendicular to spindle on machine tool, result in the alteration of sensor data. With the application of the approximant positioning method of hole center, relative coordinate of hole center to machine tool can be obtained quickly and accurately, which could accurately guide the subsequent machining. The experimental results show that this method can be used to improve the accuracy and efficiency of hole center positioning.

Key words measurement; non-contact measurement; laser technique; centering location; large-scale workpiece; laser displacement sensor

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.1880; 140.3430

1 引 言

箱体类工件,孔是其重要定位要素和加工、测量对象。大型箱体类工件加工,需要大型机床。由此引发一系列问题,例如设备昂贵;传统测量、定位方法效率低、补偿不便,而高精度定位与加工需多次反复才能完成;测量、定位时间成为限制辅助工时的主要因素。

以船用发动机箱体零件加工为例,通常加工的

第一个问题就是工件在机床上的安放问题,即精确定位。要求箱体某轴线与机床某运行方向平行或垂直是最常见的定位内容之一,但非常耗费工时,因此,减少工件定位工时变得很有意义。

获取箱体轴线的基础性测量是获取单一截面孔心,并由于轴线可以由两个截面的孔心连线测定,大型箱体工件轴线定位的问题进而转化为孔心的快速测取问题。

收稿日期: 2012-02-27; 收到修改稿日期: 2012-03-21

基金项目: 国家高档数控机床与基础制造装备重大科技专项(2009ZX04014-092)资助课题。

作者简介: 王 仲(1953—),男,教授,主要从事视觉检测、精密机械等方面的研究。E-mail: wangzhong@tju.edu.cn

如果是离位测量,可以实现孔心求取的方法有多种,如三坐标机、各种位移传感器的多点测量方法等。而目前的孔心在位测量方法存在不同方面的缺憾。实际应用中,孔心定位最常见的有百分表(或千分表)多点测取法。这种方法条件简单,但要求操作人员于测量要素附近操作、读数或引导,限制了自动测量的可行性,效率低且不能实现与机床坐标系的关联。采用坐标机测量头的方法,在小型机床上确有成功案例,且小型机床便于实现人工引导,但在大型机床上应用时,如果在测量过程中超出测头的触发范围,就必须使带有测头的机床主轴在此方向上立刻停止进给(包括机床系统的反映时间),否则探针杆就会被撞断,造成经济损失^[1]。因此在大型机床上使用测量头对大型工件进行测量时,往往要搭脚手架,人工引导困难且安全性低。可以用来测取孔心的非接触方法有图像分析法^[2~4]、多传感器测量法^[5~10]、电容位移传感器测量法^[11]和气动量仪测量法^[12]等。图像分析法能够快速完成孔心的定位,但受其相对测量精度影响,难以实现较大轴孔的精确定心。并且图像采集系统在加工现场安装困难且难以将孔心与机床的坐标关联起来。多传感器测量法根据所采用的传感器不同又可以分为多种方法,但由于多传感器测量法对采用的多个传感器的安装要求严格,实际测量时往往达不到要求。电容位移传感器和气动量仪虽然与被测物表面无接触,但是测量间隙过小^[13],难以成为通用测量器具。

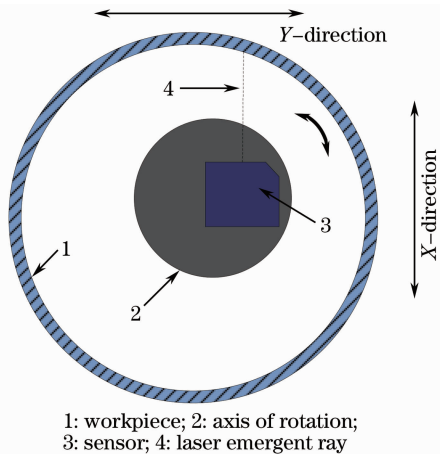
本文提出了一种基于回转激光位移传感器^[14]逼近式孔心定位方法。该方法采用高精度的激光位移传感器实现非接触测量,无需系统提供回转部件的角坐标,能精确快速地捕捉到孔心,具有操作方便、定位信息实时数显、将孔心的位置与机床坐标系相关联的特点。此方法可以实现不同尺寸孔径的孔心在位测取。

2 测量原理及测量数学模型

2.1 测量原理

测量时将传感器安装在机床的主轴上,并将主轴伸入到待测孔内。粗调待测工件的位置,使工件孔的中轴线与主轴轴线接近平行(后文将证明,即使两轴线之间存在一定角度对本方法不会造成影响)。图1为测量过程模型模拟图,控制主轴旋转,使得传感器能够连续测量待测轴孔某一截面上的点到传感器出射点的距离。保持主轴旋转,并沿机床上与主轴轴线正交的两个相互垂直的方向上移动。当传感

器测量值变化量逐渐减小时,表明主轴回转中心正在和孔心接近。将传感器测量的数据绘制成曲线,当曲线随着调整呈直线状态时(理想状态),主轴与待测孔心在被测截面上达到重合。以下以找最大值为例进行论述。



1: workpiece; 2: axis of rotation; 3: sensor; 4: laser emergent ray

图1 测量过程模型模拟图

Fig. 1 Simulation figure of measurement model

2.2 测量数学模型

在大型机床上,设主轴轴线方向是Z轴,与主轴的轴线正交的两个相互垂直的方向分别是X轴和Y轴,主轴可沿X轴和Y轴移动。图2是模拟主轴在不同位置传感器测量待测轴孔的某一截面的简易图,图中的圆代表传感器测量待测工件时的截面。假设初始时传感器在A点,图中可以看出,当传感器测量A'点时是测量整个圆周的测量值中的最大值,最大值 $d_{AA'}$ 为

$$d_{AA'} = r + l. \tag{1}$$

此时将主轴沿X轴方向移动,当将主轴分别移

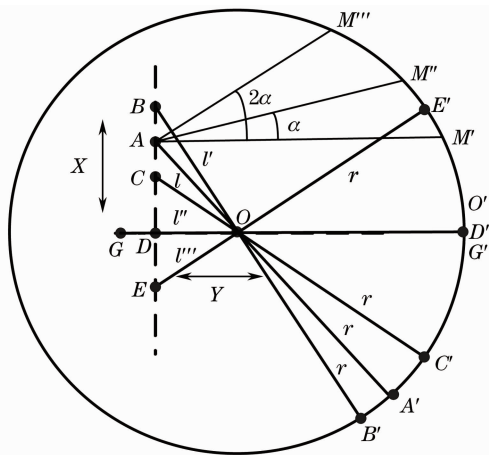


图2 旋转轴在不同位置时测量情况图

Fig. 2 Measured situations figure when axis of rotation in different positions

动到 B 点、C 点、D 点和 E 点时,最大值分别出现在 B'、C'、D' 和 E' 点,最大值 $d_{BB'}$ 、 $d_{CC'}$ 、 $d_{DD'}$ 和 $d_{EE'}$ 分别是

$$d_{BB'} = r + l', \quad (2)$$

$$d_{CC'} = r + l'', \quad (3)$$

$$d_{DD'} = r + d_{OD}, \quad (4)$$

$$d_{EE'} = r + l'''. \quad (5)$$

因为 $d_{BD} > d_{AD} > d_{CD} > d_{OD}$,从(2)~(5)式可以得到关系式 $l' > l > l'' > d_{OD}$,也就是 $d_{BB'} > d_{AA'} > d_{CC'} > d_{DD'}$ 。从而证明当移动主轴沿 X 轴往远离圆心的方向移动时,传感器测量一周的最大值逐渐变大;当将主轴沿 X 轴方向往接近于圆点的方向上移动时,传感器测量一周的最大值逐渐变小;当将主轴由 D 点移动到 E 点时,由于 $l''' > d_{OD}$,所以最大值在增大。通过以上可以证明当主轴移动到 D 点(也就是在 X 轴上与圆心点最接近的点)时,传感器测量一周的最大值会变得最小。同理,将主轴沿 Y 轴移动。因为 $d_{OG} > d_{OD} > d_{OF}$,所以 $d_{GG'} > d_{DD'} > d_{FF'}$,从而证明当主轴沿 Y 轴移动到 O 点(也就是圆心点)时,此时主轴在 Y 轴上移动,传感器测量一周的测量值中的最大值是最小的。

为了方便观察,将此模型在 Matlab 软件中模拟验证^[15]。假定主轴旋转时每次传感器测量的起始方向都与 Y 轴平行。主轴的旋转是通过给控制主轴旋转的电机发送脉冲实现的,所以传感器近似以一定的角度测量的,设为 α 。在图 2 中传感器测量的是 M、M'、M'' 点,传感器测量值为 d_{AM} 、 $d_{AM'}$ 、 $d_{AM''}$ 的长度依次类推。以原点 O 为圆心 X 轴和 Y 轴两方向为坐标系,此时 M'、M'' 点等分别为方程

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (6)$$

$$y = \tan(i\alpha)(x - m) + n \quad (7)$$

的交点坐标。式中 (m, n) 为测量截面上传感器测量点的坐标, i 为 $1, 2, \dots, 2\pi/\alpha$ 。

传感器测量值即是 O 点到 M、M' 点等的距离值。在 Matlab 绘出传感器在 A、B、C、D、E、G、F 和 O 点的曲线图如图 3(a)与(b)所示,曲线逐渐被拉直。

3 测量中所需参数的确定

3.1 传感器旋转一周的测量点数

传感器旋转一周测量点数 s 既影响测量精度又影响测量效率,所以测量点数的合理设置是非常重要的。如图 4 所示,测量时相邻两测量点与偏心点的连线之间的夹角为 α ,待测轴孔的半径为 r 。当传感器两测量点 B、C 均匀地分布在待测截面一周上

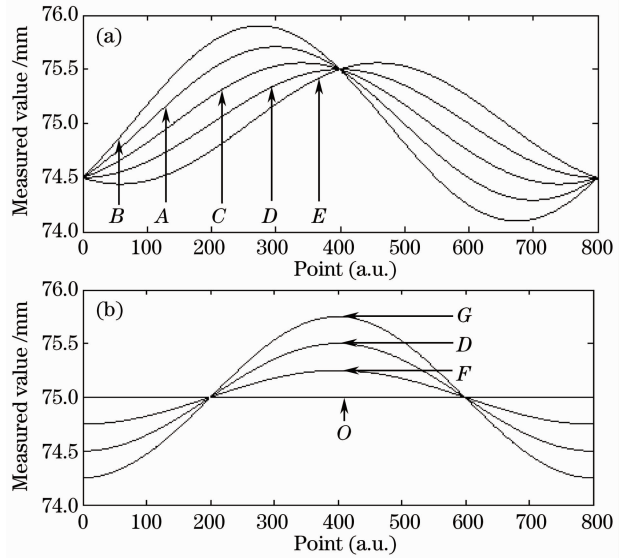


图 3 传感器在不同点的曲线图。(a)沿 X 轴移动时曲线变化图;(b)沿 Y 轴移动时曲线变化图

Fig. 3 Curves when spindle is in different positions. (a) Curve variation when spindle moves along X-axis; (b) curve variation when spindle moves along Y-axis

与偏离点最远的 D 点的两侧时,测量一周的最大值点就变为 B 点或 C 点,此时由于测量方法引起的误差 δ 最大。通过推导得

$$d_{AD} = d_{AO} + d_{OD}, \quad (8)$$

$$\cos\angle OAC = \frac{d_{OA}^2 + d_{AC}^2 - d_{OC}^2}{2d_{OA}d_{AC}}, \quad (9)$$

$$\delta = d_{AD} - d_{AC}. \quad (10)$$

式中 $\angle OAC = \alpha/2$ 。

由(8)~(10)式可得,

$$\angle OAC = \arccos\left[\frac{d_{OA}^2 + (d_{AD} - \delta)^2 - d_{OC}^2}{2d_{OA}(d_{AD} - \delta)}\right]. \quad (11)$$

测量点数

$$s = \frac{2\pi}{\alpha}. \quad (12)$$

通过(11)式求出当 δ 取某一固定值时,两次测量间隔的角度,从而通过(12)式求出测量点数 s 。由于该方法采用的是相对测量,在保证采样密度的前提下不要求采样间隔的均匀性,故无需角坐标编码器。

3.2 轴孔轴线与主轴轴线的夹角

本文提出的方法是在传感器的测量截面是圆的基础上实现的,实际测量的发动机箱体的轴孔轴线长度在 3 m 以上,定位前工件摆放在机床上。如图 5 所示, c 为轴孔的轴线长度,取最小值 3 m, r 为

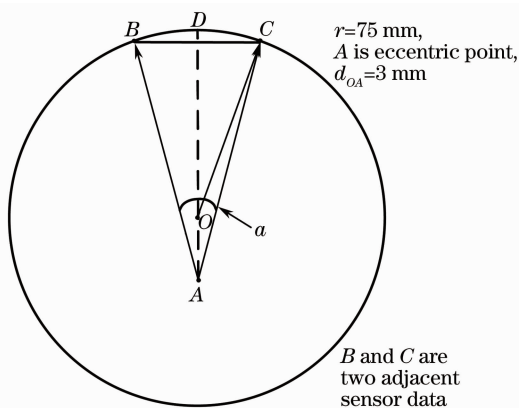


图 4 测量点确定图

Fig. 4 Figure of measured points selection

待测轴孔的半径,长度为 75 mm, h 是待测截面(实际上是一个椭圆)的长轴的长, a 、 b 分别为工件轴线两端到机床某一坐标轴的距离, β 为轴孔的轴线与机床上某一坐标轴的夹角,从而得到

$$\cos \beta = \frac{r}{h} = \frac{\sqrt{c^2 - (b-a)^2}}{c}. \quad (13)$$

当 $h \leq 75.001$ mm 时,由两轴线的空间夹角引起的误差为 $0.5 \mu\text{m}$,在精度范围内可忽略不计,此时传感器测量的截面可以当作是圆。根据(13)式可以得出, $b-a$ 的长度为 15.492 mm。通过粗调易保证工件轴线两端到机床某一坐标轴的距离的差值在 15 mm 以内。

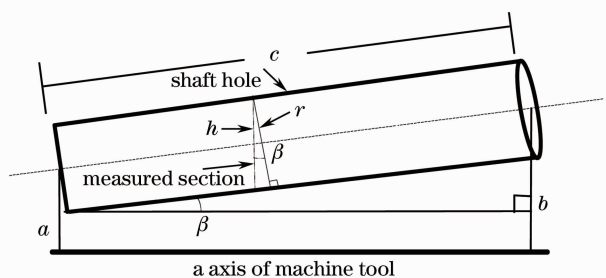


图 5 工件放置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of workpiece placement

4 测量实验及结果

在实验室中,用光学分度头的轴系代替机床主轴,二维移动台代替机床移动主轴(光学分度头)。环规架在铝型材上代替待测工件,如图 6 所示,在光学分度头上放置能够固定传感器的圆盘,传感器连接到计算机上。

方法中采用的激光位移传感器是德国米铨公司生产的 IDL 1700-10LL,如图 6 所示。该传感器采用的是激光三角法测量原理^[16,17],线性量程为

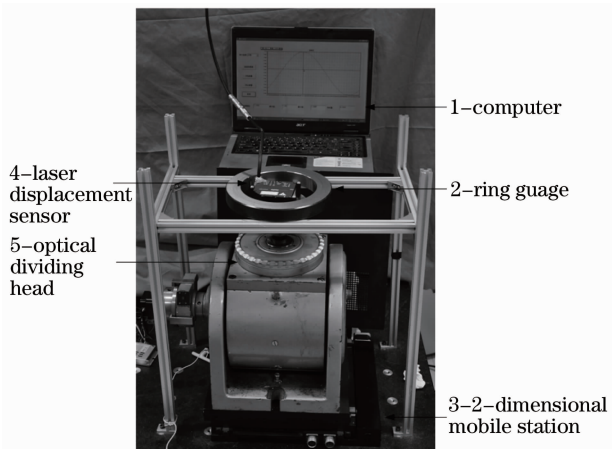


图 6 整体测量装置图

Fig. 6 Measurement device

10 mm,测量范围为 30~40 mm,绝对误差全量程不大于 $\pm 0.08\%$ 。经过双频激光干涉仪检验^[18],该传感器在量程范围内的误差优于所给指标,在 $3 \mu\text{m}$ 左右,满足测量要求。光学分度头的轴系是一个很精密的轴系,在实验前用千分表对光学分度头的锥孔内进行测量,测其径向跳动在 $1 \mu\text{m}$ 左右,对系统测量结果的影响可忽略不计。

测量时待测环规的半径为 75 mm,控制 $\delta \leq 0.1 \mu\text{m}$,此时测量方法引起的误差在精度要求范围内忽略不计。通过粗调易保证偏心点在 3 mm 以内,即(8)~(10)式中 $d_{OA} = 3$ mm, $d_{OD} = 75$ mm, $\angle OAC = \alpha/2$, $d_{OC} = 75$ mm, $\delta = 0.1 \mu\text{m}$ 。从而得到 $\alpha = 0.4578^\circ$,进而可得 $s = 360^\circ / 0.4578^\circ \approx 785$ 。通过以上分析,当测量点数大于 785 时就能够满足精度要求,为了方便计算又不降低效率,在实验中取整数 800。

正如上节论证过的,测量时为保证传感器测量的截面在精度要求内能够近似成正圆,实验中光学分度头的旋转轴线与环规的中轴线的空间夹角 β 应保证很小。如图 7 所示的两轴线夹角图,由于 β 产生的测量误差

$$\delta_1 = \frac{\sqrt{d^2 + h^2} - d}{2}, \quad (14)$$

式中 $d = 2r = 150$ mm。

控制 $\delta_1 \leq 0.5 \mu\text{m}$ 时,引起的误差忽略不计。取 $\delta_1 = 0.5 \mu\text{m}$ 时, $h \approx 0.387$ mm。测量前将百分表安装在磁力吸座上,磁力吸座吸附在安装传感器的盘上,如图 8 所示。旋转磁力吸座,调整铝型架四周的高度直到百分表数值的变化在 0.387 mm 以内。通过调整易保证 h 的值在 0.08 mm 以内,测量截面近似为正圆。

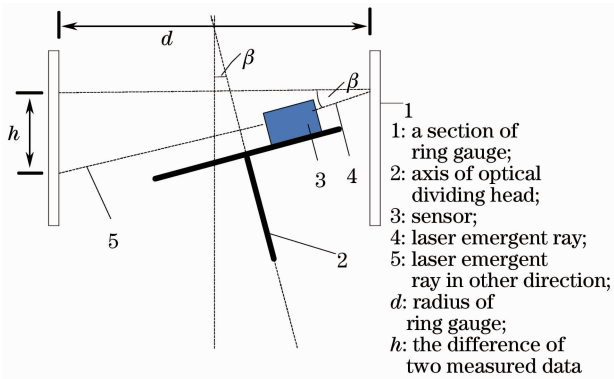


图 7 两轴线夹角图

Fig. 7 Angle between two axes

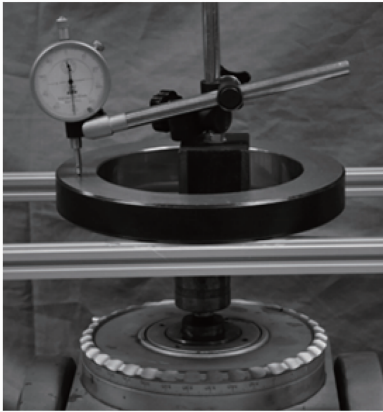


图 8 百分表测量两轴线夹角图

Fig. 8 Angle measurement by dial indicator

实验时通过调整光学分度头的位置来调整主轴的位置,调整时先将光学分度头沿二维工作台的一

个方向上慢慢移动。因为在测量中存在传感器本身的随机误差和测量过程中由于振动或者其他原因产生的粗大误差,所以测量的数据必须进行处理。采用中值滤波对数据中的奇异值进行滤除。利用卡尔曼滤波^[19]能够有效地消除传感器等测量仪器本身引起的随机误差。观察计算机上显示的旋转一周的测量值的最大值以及测量值曲线的变化,判断传感器的移动方向的正确性。在一个方向上移动光学分度头得到曲线图 9,在这个方向上已经移动到离圆心最近的位置。将光学分度头沿二维工作台的另一个方向上移动,同样观察曲线图和最大值的变化趋势,如图 10 所示。由图 9(b)可知,传感器测量一周的最大值逐渐变小,曲线图上的曲线接近于一条直线。与 Matlab 画出的理论曲线相似,测量曲线被逐渐拉直。此时光学分度头的轴系的中轴线与环规的中轴线在测量截面上相交,交点即为这一截面上的孔心。将此模型在机床上运用时,传感器固定在圆盘上,利用磁力吸片将圆盘吸附在机床的主轴上,如图 11 所示。当主轴的轴线与被测轴孔的轴线在被测截面相交时机床主轴的坐标值就是被测截面的圆心坐标值。

如表 1 所示,整个测量过程中的最大值逐渐减小而最小值逐渐增大。从表 1 可以看出,最大值与最小值的差值在 $6 \mu\text{m}$ 以内,证明偏心在 $3 \mu\text{m}$ 以内。

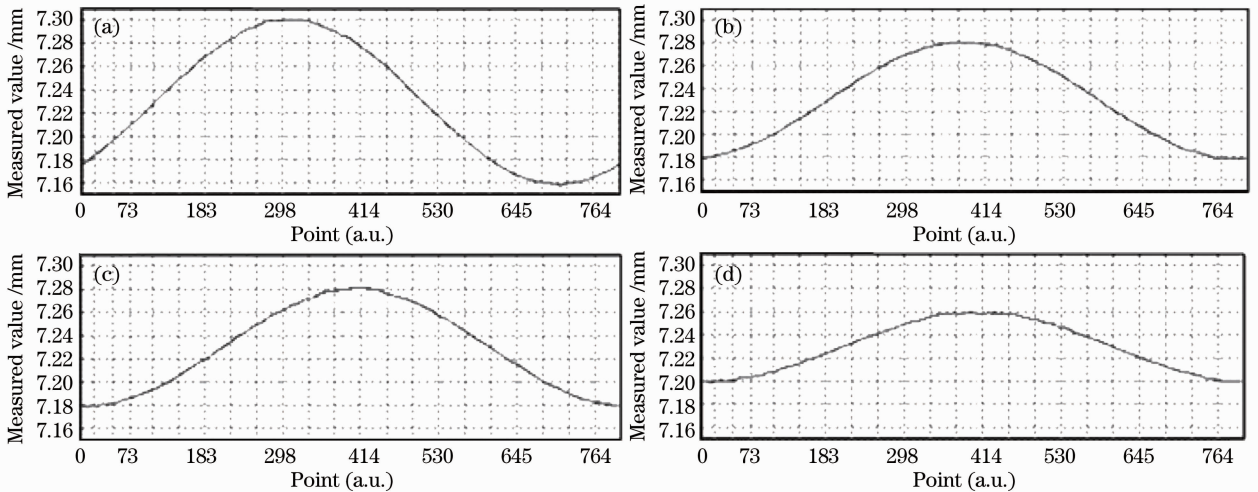


图 9 不同测量点数下一个方向上的曲线变化图。(a) 323 个点;(b) 359 个点;(c) 401 个点;(d) 411 个点

Fig. 9 Curves variation in one direction with different measured points. (a) 323 points; (b) 359 points;

(c) 401 points; (d) 411 points

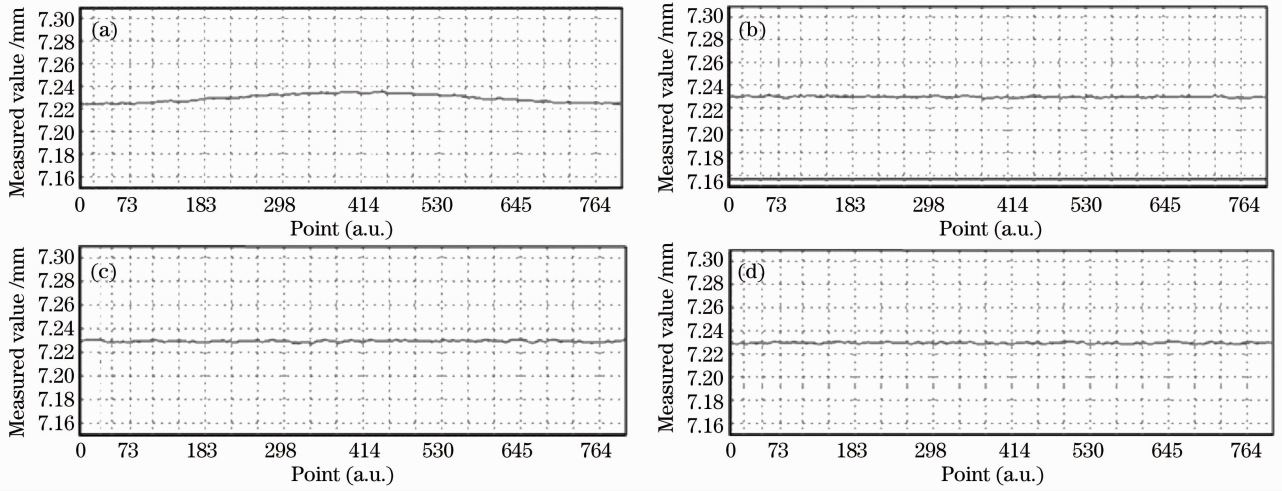


图 10 不同采样点下另一个方向上的曲线变化图。(a) 438 个点;(b) 538 个点;(c) 23 个点;(d) 281 个点
 Fig.10 Curves variation in the other direction with different measured points. (a) 438 points; (b) 538 points;
 (c) 23 points; (d) 281 points

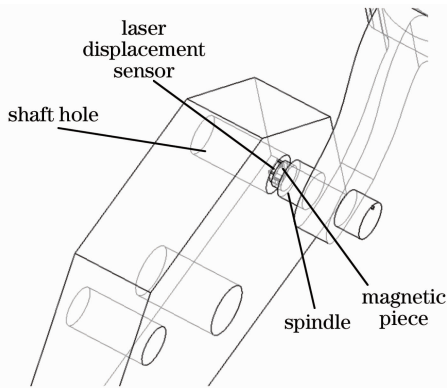


图 11 传感器在主轴上的安装图

Fig.11 Installation of sensor on spindle

表 1 测量过程中最大值变化表

Table 1 Extreme value in measurement process

Figure	Maximum /mm	Minimum /mm
9(a)	7.3016	7.1589
9(b)	7.2819	7.1789
9(c)	7.2808	7.1795
9(d)	7.2613	7.1997
10(a)	7.2368	7.2243
10(b)	7.2327	7.2283
10(c)	7.2326	7.2281
10(d)	7.2326	7.2286

5 结 论

基于非接触测量的逼近式孔心定位方法大大提高了孔心定位速度,将工业现场以小时计的定心方法缩短到以分钟计的水平。在现有条件下定心精度可以达到 $3 \mu\text{m}$,高于在加工现场用百分表找孔心的精度。由于是相对测量,该方法易受机床主轴回转

误差的影响。但当主轴回转误差很小且在精度要求范围内可忽略时,能够快速找到孔心。并且在测取孔心同时使切削主轴与孔心重合,进而可直接进入切削工艺。该方法在机床上实施时,借助机床数控系统,可使孔心测取过程自动或半自动完成。由于非接触测头远离被测表面,该自动或半自动过程具有足够安全性。这种方法有望成为工业在位测量的一种通用方法。

参 考 文 献

- Zhang Guangjie. Application of Measurement Head on Numerical Control Machine Tools[J]. *Ning Xia Machinery*, 2003, **2**(3): 20~23
 张光杰. 数控机床上测头的应用[J]. *宁夏机械*, 2003, **2**(3): 20~23
- Zhang Hu, Da Feipeng, Xing Dekui. Algorithm of centre location of ellipse in optical measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(6): 905~911
 张 虎, 达飞鹏, 邢德奎. 光学测量中椭圆圆心定位算法研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(6): 905~911
- Tian Yuanyuan, Huang Hecheng, Tan Qingchang *et al.*. Size measurement of parts based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011501
 田原媛, 黄合成, 谭庆昌 等. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011501
- Liu Jianping, Liang Liping, Huang Yun *et al.*. Application of the optical fiber probe in measuring micro deep hole of small laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708002
 刘贱平, 梁丽萍, 黄 云 等. 光纤测头在小型气体激光器微深孔检测中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0708002
- Huang Jie, Zhou Zhaofei, Deng Jianqing *et al.*. High precision method to detect serial hole center coordinate based on circle fitting[J]. *Tool Engineering*, 2004, **38**(4): 47~49
 黄 劫, 周肇飞, 邓建清 等. 基于圆拟合的孔系中心坐标高精度检测方法研究[J]. *工具技术*, 2004, **38**(4): 47~49
- Wu Jianzhong, Dong Yandong, Cheng Yaping. Accurate center positioning control and optimization during complete installation of

- offshore wind turbines[C]. Shanghai; Sponsored by Science and Technology Committee of Shanghai, 2000. 1~5
- 7 Zhang Mingzhu, Cao Huanrong. A new method of circle's center and radius detection in image processing [C]. International Conference on Automation and Logistics, 2008. 2239~2242
- 8 Lei Xianqing, Li Yan, Zhou Yanwei *et al.*. Separating method for eccentric motion of least square center of cross section[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, **37**(10): 153~156
- 雷贤卿, 李 言, 周彦伟等. 截面最小二乘圆心偏心误差运动的分离方法[J]. *农业机械学报*, 2006, **37**(10): 153~156
- 9 S. Hayakawa, Y. Yamada, N. Tsuchida. Shaft insertion for moving object by using robot manipulator with one dimensional PSDs sensor[C]. *Control Applications*, 2004. 1118~1123
- 10 S. Hayakawa, N. Tsuchida. Shaft insertion into moving object using robot manipulator with cross typed PSD[C]. *Industrial Electronics Society*, 2001, **3**: 1527~1531
- 11 Ye Xiangbin, Liu Zhengchun. Design of capacitive sensor for both displacement and angle measurement [J]. *J. Transducer Technology*, 2004, **23**(3): 34~37
- 叶湘滨, 刘正春. 一种可同时测量位移和角度的电容式传感器设计[J]. *传感器技术*, 2004, **23**(3): 34~37
- 12 Qian Wu. Experience in pneumatic measuring instrument [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2005, (6): 34~36
- 钱 武. 气动量仪在检测中的几点体会 [J]. *内燃机与配件*, 2005, (6): 34~36
- 13 Chen Hao, Zhu Jigui, Yang Xueyou. New multi-directional inner diameter measurement method [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011, (1): 95~97
- 陈 浩, 郝继贵, 杨学友. 新型多方向内径尺寸测量方法 [J]. *仪表技术与传感器*, 2011, (1): 95~97
- 14 Feng Qibo, Zhang Zhifeng, Chen Shiqian. A novel method for dynamically measuring diameters of train wheels using laser displacement transducers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1059~1062
- 冯其波, 张志峰, 陈士谦. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1059~1062
- 15 Zhang Zhiyong. Proficient MATLAB 6.5 [M]. Beijing: Beijing University Press, 2005
- 张志永. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2005
- 16 Xiong Zhiyong, Zhao Bin. Inner hole range-finding sensor with laser triangulation based on trapezoid prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1212001
- 熊志勇, 赵 斌. 基于梯形棱镜的激光三角法内孔测距传感器 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1212001
- 17 Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000
- 孙长库, 叶声华. 激光测量技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000
- 18 Wang Tao, Zhong Sidong, Yu Xuefeng. Calibration method by laser for the diameter measurement sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 261~265
- 王 涛, 仲思东, 余学锋. 对径测量传感器的激光校准方法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 261~265
- 19 Peng Dingcong. Basic principles and application of the Kalman filter [J]. *Software Guide*, 2009, **8**(11): 32~34
- 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基础原理及应用 [J]. *软件导刊*, 2009, **8**(11): 32~34