

基于单激光束旋转的圆孔直径在机测量方法

刘新波^{1,2} 王 仲² 罗庆跃¹ 付鲁华²

¹邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422000

²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 在大型精密工件的制造现场,内孔直径在机测量任务极为普遍。介绍了一种单激光束旋转测量法,在两条虚轴——回转轴线和激光中心线的位置关系不确定的条件下,研究回转轴线上固定点和被测点的距离极限值同传感器的数值极限值之间的关系,提出了一种适用任意曲面极限被测点的搜索模型。依据该模型,搜索内孔直径方向上的端点,并基于比较测量法,实现圆孔等规则内孔的几何尺寸测量。实验验证了该方法的有效性。该测量模型仅需一个可旋转的主轴,无需编码器等其他辅助测量部件,易于在加工现场实施内孔直径的测量,对推进大型工件上内孔的加工测量一体化进程具有实用意义。

关键词 测量;单激光束旋转;极限点搜索模型;回转轴线;非接触测量;比较测量

中图分类号 TH-39

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041204

On-Machine Measurement of Hole Diameter Based on Single Laser Beam Rotation

Liu Xinbo^{1,2} Wang Zhong² Luo Qingyue¹ Fu Luhua²

¹Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China

²State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The on-machine measurement of hole inner diameter for large precise workpieces is very common. A single laser beam rotation measurement method is presented. Through the analysis of the limit distance between a fixed point of the rotary axis and the measuring points with a sensor's value, a searching model with limiting point can be set up for any surface. The operation method is suitable for measuring workpieces on machine. The hole inner diameter can be measured by searching the end points in the direction of diameter on the basis of the model and with the comparative measurement combined. The model can be implemented easily because it just needs a rotating spindle without any encoders or other auxiliary parts. The experimental results show that the method is valid. It is of great significance in the integration of machining and measurement for the hole on large workpieces.

Key words measurement; single laser beam rotation; limiting point search model; rotating axis; non-contact measurement; comparative measurement

OCIS codes 120.4640; 140.3430; 150.4065; 240.6380

1 引言

随着我国制造能力的提升,大型装备在国民经济中的作用越来越明显,对其性能的要求也越来越高。内孔的制造精度是确保装备装配精度的核心,因而要求在大型工件加工时,对内孔孔径进行现场测量,进而调整工艺参数,提高加工精度^[1]。特别是对于大型工件上有配合级精度要求的关键结构——内孔,一旦发生超差,只能报废,损失极大。由于大型工件体积和质量较大,而被加工内孔往往位于不便于工人操作的位置,因此大型工件的内孔测量一直是个难题^[2-4]。

目前,对工序中的内孔测量,现场使用最多的是大型卡尺、卡规、千分尺、千分表等传统的尺寸测量工具,并常需搭建辅助装置以建立测量条件。这种方式不但精度不高,而且辅助测量耗费大量工时,成本高^[5]。

收稿日期: 2015-10-12; 收到修改稿日期: 2015-12-04; 网络出版日期: 2016-03-22

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划(4JCYBC18600)

作者简介: 刘新波(1985—),男,博士,讲师,主要从事非接触式在机测量方面的研究。E-mail: liu33-33xinbo@163.com

另一种常用方法是离机测量,即将大型工件置于大型三坐标测量机之上,此方法虽然测量精度高,但是若离机测量后仍需再上机重定位进行加工,会引起定位基准发生变化,降低加工精度^[6]。Renishaw 公司^[7-8]尝试利用大型机床本身的坐标系统,采用三坐标机的测量模式以及触发式测头,对被测结构的尺寸进行测量。目前,这种尝试在中小型机床上已有较好的效果,但在大型机床上的测量在国内外均未获得突破。究其原因,通用大型机床的坐标精度低于中小型机床,更低于三坐标测量机,因此不建议采用大型机床组合接触式测头的方式对大型工件进行测量^[9]。

本文提出了一种单激光束旋转的极值点搜索模型,适用于任意曲面。利用此模型搜索规则曲面的几何特征,如圆孔直径方向上的端点,结合比较测量法,可以实现圆孔直径测量。该方法以加工机床为执行系统,而机床的直线运动机构仅承担运载工具的作用,其坐标定位精度并不影响测量结果。采用所述的测量模型,使得以单一高精度激光位移传感器为核心元件的测量设备独立输出孔径值,适用于机床上的孔径在机测量任务^[10-11]。

2 测量系统的构成

大型工件配合级尺寸非接触在机测量系统的总体布局如图 1 所示。系统由以单个激光位移传感器为核心的非接触式测头、大型机床、大型工件以及数据处理系统(可由数控系统替代)组成。将非接触式测头安装在机床主轴上,可随主轴一起运动,并且可以直接测量工件尺寸。在结构上,一台加工设备将被改装为测量设备。这种布局方式的测量区域大、安全性好,并且在利用测头直接测量目标尺寸时,机床仅承担运载工具的作用,其直线运动精度与测量精度无关。

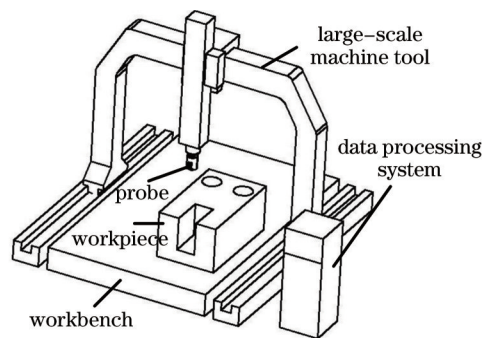


图 1 大型工件孔径在机测量模型图

Fig.1 Illustration of on-machine measurement of holes in a large workpiece

图 1 中测头的设计应以自身的功能属性为依据:被测对象为直径不同的圆孔,则要求测头的测量范围可调;测头旋转时禁止绕线,除高精度的激光位移三角法传感器外^[12-14],测头中还需供电和数据无线传输器件;测头与主轴相连,则装置中还需连接部件。根据上述要求,将总体结构模块化,分为调节部分、固定部分以及连接部分。如图 2 所示,调节部件采用双直线槽结构,高精度激光位移传感器双面紧贴在移动架上,可随

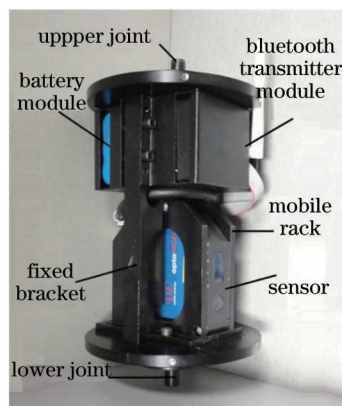


图 2 单激光束机床测头

Fig.2 Machine probe with a single laser sensor

移动架移动以测量不同尺寸的圆孔;固定部件主要为测架,依靠螺纹连接紧固蓄电池和无线蓝牙模块;连接部件经中心孔定位固定在测架上,同时顶部、底部根据不同要求皆可设计与机床主轴相连的机构。

3 原理

3.1 极限点搜索模型

激光束的中心线和机床的回转轴均为虚拟轴线,两者的位姿关系难以直接度量。在激光束中心线和机床回转轴线两者位姿未知的情况下,单激光束在回转扫描任意曲面时,以回转轴线上一点和被测点的距离极限值为因变量,探索其与传感器的读数极限值(激光束方向上的一条线段长度)的关系。

如图3所示,在固定测量头上装有一个激光位移传感器,激光位移传感器发出一束激光,与被测曲面相交于点A,设被测曲面为任意形状。测量头围绕图3中的回转轴线旋转。回转轴线和激光光束之间没有确定关系,即这两条直线为夹角未知、距离未知的异面直线。 O 、 C 是异面直线的公垂线段上两个端点,其中 C 点绕回转轴旋转可形成圆形轨迹——轨迹1。设 B 点为激光位移传感器的测量起始点,起始点绕回转轴旋转也可形成圆形轨迹——轨迹2。以 O 为原点(该点固定不动),回转轴为 Z 轴,以垂直于 Z 轴且相互正交的两直线建立坐标系 $O-XYZ$ 。

\overline{AB} 表示位移传感器的测量值, \overline{OA} 表示原点至被测点的距离。在激光光束距离 \overline{AC} 绕回转轴回转的过程中,直角三角形 OBC 的形状始终不变,而直角三角形 OCA 由于 A 点变化, \overline{OA} 以及 \overline{AC} 均发生变化。

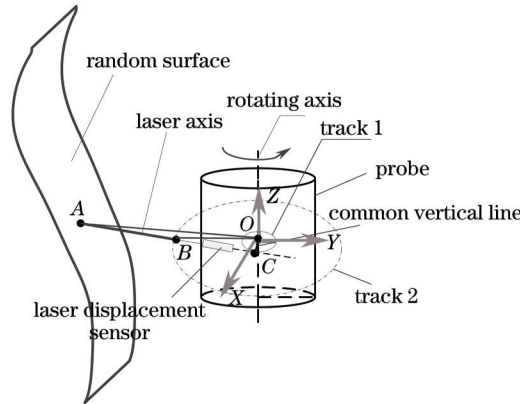


图3 基于单激光束旋转的极值搜索模型

Fig.3 Extremum searching model based on single laser beam rotation

在直角三角形 OBC 中有

$$\overline{BC}^2 + \overline{OC}^2 = \overline{OB}^2. \quad (1)$$

在直角三角形 OAC 中有

$$(\overline{AB} + \overline{BC})^2 + \overline{OC}^2 = \overline{OA}^2. \quad (2)$$

结合(1)式和(2)式有

$$y = \overline{OA}^2 = \overline{AB}^2 + 2\overline{AB} \times \sqrt{\overline{OB}^2 - \overline{OC}^2} + \overline{OB}^2, \quad (3)$$

(3)式中 \overline{OB} 、 \overline{OC} 恒定不变,对自变量 \overline{AB} 进行求导可得

$$y' = 2\overline{AB} + 2\sqrt{\overline{OB}^2 - \overline{OC}^2}. \quad (4)$$

由于距离 \overline{OA} 、 \overline{AB} 值恒为正,使得导函数恒为正数,即 \overline{OA} 与 \overline{AB} 具有相同的单调性。因而,当 \overline{AB} 出现极限值时, \overline{OA} 也将出现极限值。这意味着即使激光光束和回转轴保持任意相对位姿,只要测量值 \overline{AB} 出现极限值,则被测点至回转中心 O 点的距离也将出现对应的极限值,反之亦然。

3.2 单自由度旋转孔径测量模型

圆孔直径的测量在机械制造中是最常用的操作之一,在加工现场,回转轴线一般平行于被加工圆孔的中心线^[13]。分析此状态下的圆孔测量模型,其立体模型如图4(a)所示,当回转轴与激光光轴垂直时,立体测量模型转化为平面模型,如图4(b)所示。

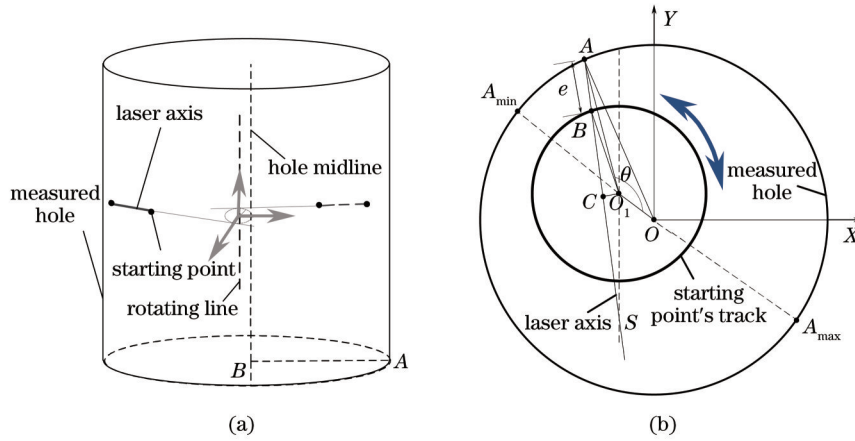


图4 单传感器回转测量孔径模型。(a) 立体模型; (b) 平面模型

Fig.4 Hole diameter measurement model by single sensor rotation. (a) Spatial model; (b) planar model

如图4(b)所示,圆 O_1 是指激光位移传感器测量起始点绕回转中心旋转轨迹,被测孔为圆 O 。由3.1节可知,激光位移传感器的激光光轴 AS 绕回转轴 O_1 旋转,当测量值 \overline{AB} 出现极值, $\overline{AO_1}$ 也将出现极值。而根据被测圆孔内的几何关系, \overline{AO} 出现极值的位置为 OO_1 的延长线与被测圆轮廓的交点 A_{\min} 和 A_{\max} 。因此,利用位移传感器测量值的极限值,可以搜索到直径的两端点。更为重要的是, $\overline{A_{\min}O_1}$ 与 $\overline{A_{\max}O_1}$ 之和为被测圆孔的直径 D ,并有

$$D = \overline{A_{\min}O_1} + \overline{A_{\max}O_1} = \sqrt{(\overline{A_{\min}B} + \overline{BC})^2 + \overline{O_1C}^2} + \sqrt{(\overline{A_{\max}B} + \overline{BC})^2 + \overline{O_1C}^2} = (\overline{A_{\min}B} + \overline{BC}) \sqrt{1 + \frac{\overline{O_1C}^2}{(\overline{A_{\min}B} + \overline{BC})^2}} + (\overline{A_{\max}B} + \overline{BC}) \sqrt{1 + \frac{\overline{O_1C}^2}{(\overline{A_{\max}B} + \overline{BC})^2}} \quad (5)$$

$\overline{O_1C}$ 、 \overline{BC} 在测量中始终保持恒定,因此对这两个参数进行标定。将测量时的极限值代入(5)式,直接计算 D 。本文采用另一种更便利的方法——比较测量法,通过测量一个已知尺寸的标准件,再计算被测件和标准件的尺寸之差,则被测件的尺寸为

$$D = D_0 + \Delta D, \quad (6)$$

式中 D_0 为标准圆孔的直径。在利用该测量模型测量标准圆孔时,相应的极限点为 $A_{0\min}$ 、 $A_{0\max}$,因此对应传感器测量的极值为 $\overline{A_{0\min}B}$ 和 $\overline{A_{0\max}B}$,则有

$$D_0 = (\overline{A_{0\min}B} + \overline{BC}) \sqrt{1 + \frac{\overline{O_1C}^2}{(\overline{A_{0\min}B} + \overline{BC})^2}} + (\overline{A_{0\max}B} + \overline{BC}) \sqrt{1 + \frac{\overline{O_1C}^2}{(\overline{A_{0\max}B} + \overline{BC})^2}} \quad (7)$$

令 $f(t) = \sqrt{1+t^2}$, $t = \frac{\overline{O_1C}}{\overline{A_xB} + \overline{BC}}$, $\overline{A_xB}$ 表示测量不同圆孔直径时对应的极大值或极小值。当 $\overline{A_xB} + \overline{BC}$ 取70 mm以上(要求被测孔直径大于140 mm),将 $\overline{O_1C}$ 控制在0.5 mm以内(可由机械装配来保证),此时 $0 \leq f(t) - 1 \leq 0.000025$,因而,将 $f(t)$ 近似取1,有

$$\Delta D = D - D_0 = (\overline{A_{\min}B} + \overline{A_{\max}B}) - (\overline{A_{0\min}B} + \overline{A_{0\max}B}). \quad (8)$$

由 $f(t)$ 近似为1所引入的最大误差为

$$e = 0.000025 \times \Delta D. \quad (9)$$

当采用的位移传感器量程在10 mm以内,即使极限情况下取 $\Delta D = 20$ mm,测量值 e 也仅为 $0.5 \mu\text{m}$,此误差相对于直径较大的圆孔而言,属可承受误差。

4 实验及误差分析

4.1 圆孔直径测量实验

实验在台塑公司生产的HARDINGE VMC 600 II立式铣床上进行,如图5所示。实验时对已知尺寸的环规进行测量,第一个环规用作标准环规,用以确定测头的标定初始值;第二个环规用作被测环规,所测量的

尺寸和已知尺寸进行对比,可以衡量测量效果。具体步骤如下:

- 1) 将测头固连在机床主轴上,并调节两个已知尺寸的被测环规的中心轴与主轴回转轴线平行;
- 2) 测量其中一个环规(随机测量6个位置),利用该环规的已知尺寸减去传感器在回转过程中的极大值和极小值之和,以确定测量初始值;
- 3) 测量另一个已知尺寸的环规(随机测量6个位置),并分析测量数据。

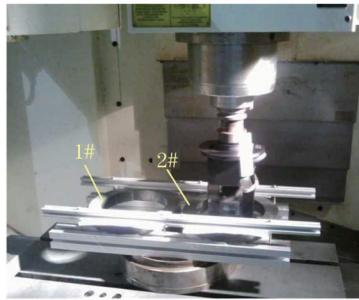


图5 单传感器回转圆孔直径测量

Fig.5 Measurement of hole diameter by single sensor rotation

被测环规1的作用是确定测量初始值,其标准尺寸为150.0076 mm(由天津计量院检定,不确定度为 $2\ \mu\text{m}$,下同)。测量的实验数据如表1所示,其中测值表示传感器在回转一周内的极大值和极小值之和,其平均值为4.1772 mm。将被测环规1的标准尺寸与测量时的平均值相减,可得测量初始值为145.8304 mm。为了验证方法的有效性,对被测环规2进行测量,其标准尺寸为150.0182 mm。测量数据如表2所示,6次测量的平均值为4.1825 mm,与测量初始值相加后得到被测环规2的测量值为150.0129 mm,与被测环规2的标准尺寸仅相差 $5.3\ \mu\text{m}$ (对于制造精度为IT7的 $\Phi 150\ \text{mm}$ 孔而言,测量精度须在 $13\ \mu\text{m}$ 以内),相对精度可达 3.3×10^{-5} ,验证了该方法具有较高的测量精度。两个环规的测量方差值均小于 $1\ \mu\text{m}$,亦可证明该方法具有良好的重复测量精度。

表1 单传感器回转对圆孔直径1的测量数据(单位:mm)

Table 1 Measured data of hole 1 by single sensor rotation (unit: mm)

Position	1	2	3	4	5	6	Mean	Variance
Value	4.1778	4.1765	4.1768	4.1770	4.1775	4.1776	4.1772	0.0005

表2 单传感器回转对圆孔直径2的测量实验数据(单位:mm)

Table 2 Measured data of hole 2 by single sensor rotation (unit: mm)

Position	1	2	3	4	5	6	Mean	Variance
Value	4.1820	4.1810	4.1827	4.1831	4.1821	4.1839	4.1825	0.0009

4.2 误差分析

4.2.1 传感器误差

该误差由所选用的传感器本身决定,所选激光位移传感器的精度越高,孔径测量精度越高^[14-15],实验中传感器为德国米铨optoNCDT1700-10,测量范围为10 mm,德方标定精度为 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 。

4.2.2 径向跳动的影响

目前机床主轴径向跳动已有了较大提升,中高端机床可达到微米量级以内^[16]。值得说明的是,径向跳动对测量精度的影响并不显著,因为若将径向跳动看作一组信号,其中存在与主轴转速相同的周期成分,那么采用比较测量法时,这部分周期信号将被抵消。

4.2.3 极值附近的空问采样密度 α

理论上,传感器在测量值取极限值的位置附近,测点越密集越好,以便获取最理想的极限值^[17]。但测点数越多,测量效率越低,所以测点数量是有限度的。如图6所示,假定测量时相邻两测点与偏心点的连线之间的夹角为 α ,待测轴孔的半径为 r ,偏心距为 d 。主轴旋转过程中,当传感器两测量点 B 、 C 均匀地分布在待测截面一周上与偏心点最远的 D 点的两侧时,传感器测量一周的最大值点就变为 B 点或 C 点,而不是原本应该是最大值的 D 点,此时由于测量方法引起的最大值的测量误差 δ 最大。通过推导可得

$$\overline{AD} = r + d \quad , \quad (10)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{d^2 + \overline{AC}^2 - r^2}{2 \times d \times \overline{AC}} \quad , \quad (11)$$

$$\delta = d + r - \left(d \cos \frac{\alpha}{2} + \sqrt{r^2 - d^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) . \quad (12)$$

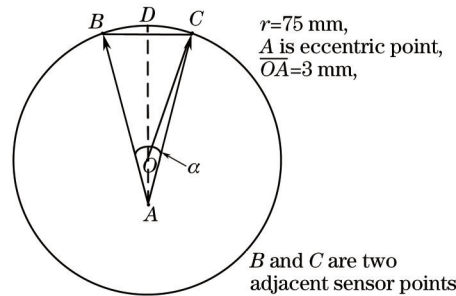


图6 空间采样密度误差分析图

Fig.6 Analysis of space sampling density error

5 结 论

以回转测量过程中的极限测量值为依据,搜索被测轨迹至回转轴上一固定点距离值的极限被测点。通过采用单激光束回转极值搜索法和定值比较测量法建立孔径精密测量模型,实验证明了该方法的有效性,且结果的相对精度高达 3.3×10^{-5} 。该方法具有非接触、在机测量、易于自动化等特点,便于实现对大型工件内部结构的测量,具有实用推广价值。

参 考 文 献

- 1 Yuan Julong, Zhang Feihu, Dai Yifan, *et al.*. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177.
袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15): 161-177.
- 2 Zeleny J, Janda M. Automatic on-machine measurement of complex parts[J]. *Modern Machinery Science Journal*, 2009, 23(3): 92-95.
- 3 Yu Baohua, Hu Xiaoping, Ye Hongxian. Research on in process pneumatic measurement system for inner hole honing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 202-206.
于保华, 胡小平, 叶红仙. 内孔珩磨尺寸在线气动测量系统[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 202-206.
- 4 Li Shengyi, Dai Yifan. On line measurement and error separation for the precise and ultra-precision machining technique[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2007.
李圣怡, 戴一帆. 精密和超精密加工在位检测与误差分离技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
- 5 Cui Zien. The measurement technique in NC machining[J]. *CAD/CAM and Manufacturing Informatization*, 2005, (12): 68-84.
崔滋恩. 数控加工中的检测技术[J]. *CAD/CAM与制造业信息*, 2005, (12): 68-84.
- 6 Mears L, Roth J T, Djurdjanovic D. Quality and inspection of machining operations: CMM integration to the machine tool [J]. *Journal of Manufacturing, Science and Engineering*, 2009, 131(1): 1-13.
- 7 Renishaw P L C. Development and application of digital and intelligent technology for machine tool probe[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2007, 17(2): 107-109.
- 8 Kim K D, Chung S C. Synthesis of the measurement system on the machine tool[J]. *International Journal of Production Research*, 2001, 39(11): 2475-2497.
- 9 Sang Hongqiang, Liu Libing, Liu Fen. The application of touch trigger probe in setting workpiece coordinate system[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2009, 37(8): 169-170.
桑宏强, 刘丽冰, 刘 芬. 触发式测头在确定工件坐标系中的应用[J]. *机床与液压*, 2009, 37(8): 169-170.
- 10 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0722001.

- 巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 11 Qiao Hongchao, Zhao Jibin. Design and implementation of online laser peening detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071401.
乔红超, 赵吉宾. 激光冲击强化在线检测系统设计及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 071401.
- 12 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.
- 13 Liu Xinbo, Wang Zhong, Su Ye, *et al.*. Measuring the parallelism between rotating axis and guideway of a machine tool based on approximation hole center positioning method[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108015.
刘新波, 王 仲, 苏 野, 等. 基于逼近式定心法测量机床回转轴对导轨的平行度[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108015.
- 14 Tang Minghui, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, *et al.*. A high stability mapping stitching method for structured light three-dimensional measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112006.
汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112006.
- 15 Shortis M R, Fraser C S. State of the art of 3D measurement systems for industrial and engineering applications[C]. 21th International Congress of FIG, Brighton, 1998.
- 16 Jiang Jiadong, Yuan Pu. Online non-contact method to measure and adjust the concentricity of the cylindrical axis[J]. Measurement Technique, 2005, 23(9): 19-22.
蒋家东, 袁 蒲. 非接触法在线测量和调整圆柱轴线同轴度研究[J]. 计量技术, 2005, 23(9): 19-22.
- 17 Wang Zhong, Su Ye, Liu Xinbo. An approximation hole center positioning method by rotating laser displacement sensor[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0608001.
王 仲, 苏 野, 刘新波. 回转激光位移传感器逼近式孔心定位方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0608001.

栏目编辑: 何卓铭