

基于逼近式定心法测量机床回转轴对导轨的平行度

刘新波^{1,2} 王 仲¹ 苏 野² 刘红光² 郝继贵¹

(¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)
(²天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 为测量机床主轴回转轴线与同向导轨间的平行度,研制了一种基于激光位移传感器的机床测头,并结合逼近式孔心定位法提出一种新的平行度检测方法。该方法以回转轴线不变为前提,借助一标准环规,让环规的同一截面位于主轴轴线的不同点,利用两次精确定位所获得的坐标值,计算导轨和机床回转轴线的平行度。利用该检测方法,可消除实物芯轴类测量方法所涉及的一些缺陷,可在主轴高速旋转时完成测量。实验证明,该方法能够完成机床主轴轴线与同向导轨平行度的测量,有望作为一种新的检测手段对机床进行校验。

关键词 测量;机床检验;平行度;孔心定位;导轨;回转轴线;非接触测量

中图分类号 TH-3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108015

Measurement of Parallelism Between Rotating Axis and Guideway of a Machine Tool Based on Approximation Hole Center Positioning Method

Liu Xinbo^{1,2} Wang Zhong¹ Su Ye² Liu Hongguang² Zhu Jigui¹

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

²MOEMS Key Laboratory of Ministry of Education of China, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract For measuring the parallelism between the Z guide and the rotating axis of spindle on the machine tool, a new detection method which combines a machine tool probe based on laser displacement sensor with the approximation hole center positioning method is proposed. On the rule of keeping the rotating axis invariant, the same center of a ring gauge which lies on different points of the rotating axis is located twice and the obtained coordinate values can be used to calculate the parallelism. The detection method can eliminate some of the drawbacks involved in the measurement methods with the physical mandrel, meanwhile, they can achieve measurement as the spindle is rotating in high speed. The experimental results show that this method can complete parallelism measurement of the guide and the rotating axis of spindle, so it is expected to be a new means for the calibration of machine tools.

Key words measurement; inspection of machine tool; parallelism; centering location; guideway; rotating axis; non-contact measurement

OCIS codes 120.4640; 140.3430; 150.4065; 240.6380

1 引 言

针对主轴以回转运动为主的各类机床而言,常要求回转轴线和一条导轨平行,这是机床的一个重要指标。以一台立式镗床为例,镗孔时,主轴回转轴

线、Z轴导轨二者往往要求严格平行,以确保被加工孔的圆柱度^[1,2],因此,需有效测量出该参数以便控制被加工工件的精度。

目前有以下测量平行度的方法:1)对试切工件

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期**: 2012-07-30

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

导师简介: 王 仲(1953—),男,硕士,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

进行检测,间接测量主轴回转轴线同 Z 轴导轨的平行度。此方法对操作者的经验要求较高,测量精度有限,且会造成一定的资源浪费。2) GB/T 6477-2008 规定的方法为将精密芯轴插入主轴孔内,千分表相对芯轴轴向移动,利用表针变化量求得平行度^[3,4]。此方法的优点是测量过程简单,但缺点在于一方面选用实物芯轴代替回转轴线,引入的误差有锥孔轴线相对于回转轴线的偏差、锥孔和锥柄轴线的偏差、锥柄轴线和芯轴素线的偏差以及芯轴圆柱度误差等,误差层层累积使得实际测量结果的可信度不高;另一方面,接触式的方式要求测量必须在主轴手动慢速回转的状态下进行,而实际加工时往往转速较高,回转轴线的位置差异可能很大,这种测量方法难以满足实际要求。3) 国内外学者研究测量主轴回转轴线同 Z 轴导轨间平行度的方法,主要集中在误差分离技术^[5~8],即在标准检测方法的基础上分离出平行度误差值。这种方法不需要很高精度的芯轴,具有较高的测量精度,但操作复杂,依然局限在低速旋转的测量中。

由于这些方法所具有的缺陷,机床厂商和机械加工单位一直希望有更合适的测量方法。本课题组^[9]曾提出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,可以快速精确地定位回转轴线通过被测孔截面的圆心。本文以逼近式孔心定位法为基础,使用可以首尾颠倒安装的非接触式机床测头,尝试设计了一种新的回转轴线和 Z 轴导轨平行度测量方法。该方法具备以下特点:1) 采用测头旋转,回转轴线的位置可直接反映到测头的采样数据上,与采用实物芯轴相比,误差源减少;2) 激光传感器具有数字化测量的特点,辅之以无线通讯技术,还可使自动测量变得简单,便于实施;3) 非接触的测量方式,可实现实际加工速度下的测量。

2 测头结构

激光测头设计以功能为依据^[10]。被测对象为直径不同的圆孔,这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^[11,12],测头中还需提供电力和数据无线传输

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^[13]。如图 1 所示,调节部件采用双直线槽结构,高精度激光位移传感器单面紧贴在移动架上,可随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,同时顶部可根据不同要求设计与机床主轴相连的结构,测头上下均设有连接部件,以便首尾颠倒后仍可连接在机床上,这一特点是构成新的平行度测量方法的核心内容之一,后续将进行详细介绍。

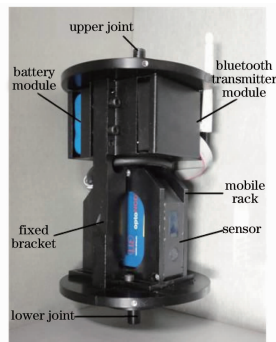


图 1 孔心定位机床测头

Fig. 1 Hole center positioning probe

3 工作原理

3.1 逼近式回转定位法

当被测圆孔轴线和机床测头回转中心平行时,模型如图 2(a)所示。 O 为被测圆孔的轴心, O_1 为测头旋转轴轴心, SP 为传感器的入射光轴, T 为 O_1 至光轴的垂足, e 为测量值, θ 为传感器的转动角坐标,并且,传感器可沿水平和垂直方向移动。分别令 $\overline{O_1O}$ 、 $\overline{O_1T}$ 、 $\overline{O_1Q}$ 、 $\overline{O_1P}$ 和 \overline{OP} 为 a 、 b 、 r 、 L 和 R ,在三角形 O_1TP 中,有

$$L = \sqrt{(\sqrt{r^2 - b^2} + e)^2 + b^2}, \quad (1)$$

在三角形 OO_1P 中,有

$$L = \sqrt{R^2 - a^2 \sin^2 \theta} - a \cos \theta. \quad (2)$$

结合(1)式和(2)式,得

$$e = \sqrt{R^2 + a^2 \times \cos 2\theta + 2 \times a \times \cos \theta \times \sqrt{R^2 - a^2 \sin^2 \theta} - b^2} - \sqrt{r^2 - b^2}. \quad (3)$$

由(1)式可知,如果 r 和 b 保持恒定,那么当 e 在整个圆周上取不同值时, L 必然有最大值和最小值,

且 L 的最大(小)值和 e 的最大(小)值一一对应。

由(3)式可知,传感器始终保持旋转状态,当角

速度一定时, e 是一条关于时间的“类正弦”的曲线。从某点出发, 测头整周回转, 找出 e 的峰峰值, 记为 A , 并沿 X 轴平动, 找出 A 的最小值, 如图 2(a) 所示。然后在 Y 轴上, 采用同样措施, 如图 2(b), 找出 A 的最小值。理论上一次移动即可, 但考虑到实际操作

未必能一次找准单一方向上 A 的最小值, 有时需若干次在 X 、 Y 轴方向上交替移动, 才能找出 A 在平面内的最小值, 此时, L 的峰峰值也最小, 进而得知回转轴线通过孔心, 完成定心操作。

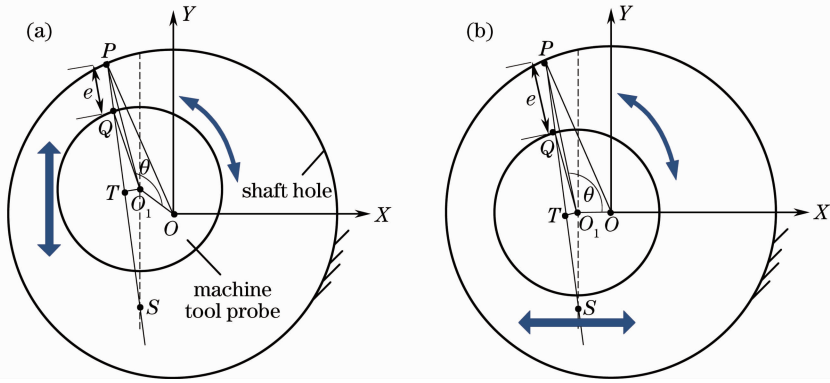


图 2 逼近式孔心定位法模型。(a)沿 X 轴方向移动主轴;(b)沿 Y 轴方向移动主轴
Fig. 2 Approximation hole center positioning model. (a) Moving the main axis along X direction;
(b) moving the main axis along Y direction

3.2 平行度测量原理

如图 3 所示, 建立坐标系 O - XYZ , Z 轴与导轨方向平行, X 轴垂直于 Z 轴向右。将一标准环规放置在工作台上, 其中中心线经粗略调节与回转轴线平行, 以方便利用逼近式孔心定位法确定圆心坐标^[14], 环规可随工作台沿 X 、 Y 、 Z 三个导轨方向移动。

首先, 将环规置于位置 N , 如图 3(a) 所示, 通过逼近式孔心定位法, 使回转轴线过标准环规被测截面的圆心, 并得到当前机床坐标值 (X_1, Y_1, Z_1) ; 然后, 将测头首尾颠倒, 环规相应沿 Z 轴导轨移动至图 3(b) 的位置 M , 使测头能检测环规的同一截面, 再通过逼近式孔心定位法平移环规至图 3(c) 所示位置, 获得机床坐标值 (X_2, Y_2, Z_2) 。

核心步骤之一。

确定一条直线的空间姿态, 需要在给定坐标系中至少获得该直线上不同的两个点的坐标值。其中至关重要的一环是“该直线上的两点”。回转轴线是一条虚轴, 采用实物芯轴, 这条虚轴是被代表的, 不可避免要引入前文所述的实物芯轴的种种误差。还有一种方法: 采用主轴伸缩的方法, 获得随工作台升降后环规第二次中心坐标, 但从严格意义上讲, 两次测量值并不来自同一条回转直线。而测头首尾倒置, 保持了虚拟轴线的不变性, 加之旋转动态测量, 保证了被测轴线的逼真性。

在计算平行度时, 将平行度分解为 YOZ 面上的分量和 XOZ 面上的分量^[15]。 YOZ 面上的平行度计算分析如下。假设回转轴线的跳动误差不计, 主轴从

采用测头首尾倒置进行两次测量, 是本方法的

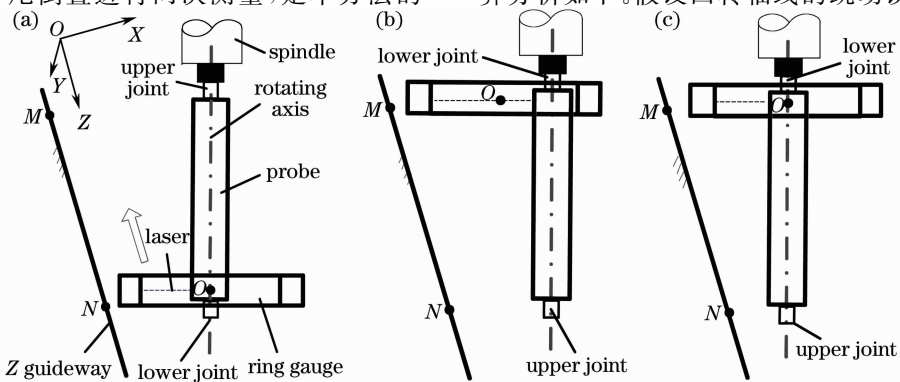


图 3 平行度测量原理。(a)环规位于 N 且已定心;(b)环规位于 M 且未定心;(c)环规位于 M 且已定心
Fig. 3 Principles of measuring parallelism. (a) Ring gauge located in N and positioned; (b) ring gauge located in M but not positioned; (c) ring gauge located in M and positioned

图 3(a) 至图 3(c), 在 X 方向, 机床需移动的距离为机床坐标变化量 $X_2 - X_1$, 此变化量 (0.01 mm 量级) 相对于导轨直线段 \overline{MN} (100 mm 量级) 很短, 计算两轴在 XOZ 面上的夹角可参考下式:

$$\theta_y = \arctan\left(\frac{X_2 - X_1}{Z_2 - Z_1}\right). \quad (4)$$

同理, YOZ 面上的夹角为

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{Y_2 - Y_1}{Z_2 - Z_1}\right). \quad (5)$$

3.3 环规位置调整

逼近式孔心定位模型是在假设被测孔截面为圆形的基础上建立的, 为满足此要求, 需要考虑环规内孔轴线与主轴回转轴线的夹角。

如图 4 所示, 当环规内孔轴线与主轴回转轴线存在夹角时, 实际的待测截面将和 BC 面相同 (实际上是个椭圆)。AB 为环规直径, 长度为 150 mm, 当 $\overline{BC} \leq 150.0002$ mm 时, 在精度范围内可忽略不计, 认为所测截面为标准圆。在三角形 ABC 中,

$$h = \frac{\overline{AB} \sqrt{\overline{BC}^2 - \overline{AB}^2}}{\overline{BC}}. \quad (6)$$

由(6)式可得, h 的允许值为 0.24 mm, 这不是一个很苛刻的条件, 可在主轴端面上安放百分表对标准环规的端面进行检定, 测出 h 的值。检定后, 使用螺纹调节机构对标准环规位置进行调节。为减少环规轴线与主轴回转轴线不平行对测量结果产生的影响并且不增加操作复杂度, 应使 h 的值尽可能小^[16,17]。

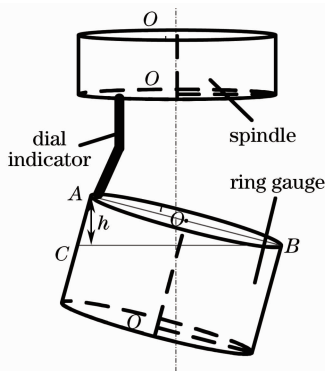


图 4 环规调整图

Fig. 4 Ring gauge adjustment chart

4 实验及分析

本文首先采用逼近式孔心定位法, 使标准环规某一截面的圆心通过回转轴线。而逼近式孔心定位法是一种平移主轴或被测件以搜索圆心的方法, 本实验平移被测环规, 按 3.1 节介绍的原理移动机床

X 轴和 Y 轴。图 5 是主轴旋转速度为 120 r/min, 激光传感器的采样频率为 1.25 kHz 的状态下, 峰峰值最小时的软件界面截图, 可以看出, 此时峰峰值为 $7.2 \mu\text{m}$, 而偏心误差为 $3.6 \mu\text{m}$ 以内。本实验装置能控制峰峰值在 $9 \mu\text{m}$ 以内, 具有很好的可重复性。

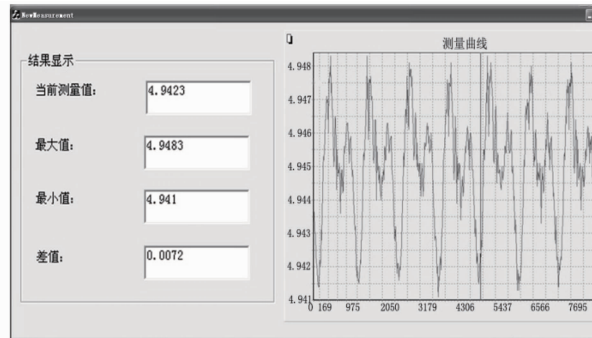


图 5 定心终了时测量软件界面

Fig. 5 Interface of measuring software after positioning

测量回转轴线和 Z 向导轨间的平行度, 至少在两条线上各选两点, 如图 6(a) 所示, 需让环规和传感器处在 BB' 、 CC' 两处。环规跟随工作台上下移动, 可方便安置在 B、C 处; 主轴回转轴线作为被测对象之一, 位置不可改变, 要求主轴保持静止, 故传感器不可随主轴伸缩而上下移动。交换测头的顶面和底面, 同主轴夹头进行连接, 使其在 B' 、 C' 处轮换。在设计测头时, 使出射光到测头顶面和底面的距离 $\overline{OB'}$ 、 $\overline{OC'}$ 分别为 35 mm 和 155 mm, 可知 $\overline{B'C'}$ 为 120 mm。

图 6(b)、(c) 分别表示测头顶面、测头底面与夹头相连的测量状态。利用逼近式孔心定位法使孔心过回转轴线后, 记录千分表数据, 如表 1 所示。测试分三次进行, 每次测量时环规重新摆放, 以验证测量结果的重复性, 而在第二次测量中环规相对工作台不动, 上下连续两次测量, 以观察被测环规在相同状态下测量的重复性。

在表 1 中, 平行度为

$$\zeta = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} / \overline{B'C'}, \quad (7)$$

式中 d_x 、 d_y 分别表示两次定心时 X 坐标和 Y 坐标上的差值。

从三次测量结果来看, 平行度的均值为 0.036 mm/120 mm, 并且方差很小。从表 1 还可以看出, 三次对应的 d_x 、 d_y 的差别也不大, 即表明两条轴线的平行度沿 X、Y 轴的分量也较一致。可见, 本实验的重复性较好。

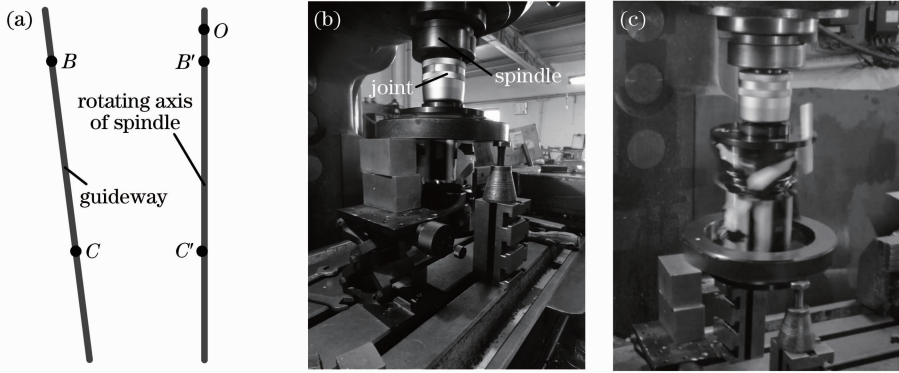


图6 测量位置图。(a)测试对象示意图;(b)顶面与夹头连接;(c)底面与夹头连接
Fig. 6 Figures of measuring position. (a) Measured targets; (b) joint connecting with probe on its top surface; (c) joint connecting with probe on its bottom surface

表1 对万能铣床XA6132的实验结果

Table 1 Experimental results for XA6132 milling machine

	First time		Second time		Third time	
	X /mm	Y /mm	X /mm	Y /mm	X /mm	Y /mm
Position B	9.528	6.951	7.732	8.215	8.072	8.878
Position C	9.492	6.935	7.701	8.203	8.041	8.892
Position B			7.733	0.011		
Difference (B to C)	0.036	0.016	0.031	0.012	0.031	0.014
Difference (C to B)			0.032	0.013		
Parallelism	0.038/120		0.034/120		0.035/120	

本方法的测量对象为回转轴本身,因而方法误差很小,其测量误差 η_{\max} 决定于所选用器件,包括决定孔心定位精度 η_1 的激光位移传感器以及决定 X、Y 方向平移精度 η_2 、 η_3 的两根标尺,可由下式进行误差估计:

$$\eta_{\max} = \eta_1 + \sqrt{\eta_2^2 + \eta_3^2}, \quad (8)$$

从而选用不同器件可以匹配不同的精度要求。另外,在保证主轴每转的采样点数一定的情况下,通过选用更高采样频率的激光位移传感器可以匹配更高的主轴旋转速度。

5 结 论

介绍了一种新的测量方法——基于激光位移传感器的新型测头和逼近式孔心定位方法的平行度测量法,能够实现机床主轴回转轴线与同向导轨间的平行度动态测量。与传统的千分表加标准检验棒的接触式测量相比,该方法消除了实物芯轴代替回转轴线所引入的原始误差,同时非接触的特性使检测过程具有足够的安全性,采用采样频率高的激光位移传感器亦可使平行度在高速下进行测量,使检测对象更接近主轴实际工作状态。数据表明,该方法行之有效。需要说明的是,本文强调的是测量方法

本身,测量结果的精度随所选择的传感器精度的不同而不同。限于方法验证阶段,测头、环规夹持方式尚未达到产品级优化。开发代价更加低廉、操作更加便利的测量装置,有望使本方法作为一种新的检测手段向机床工业推广。

参 考 文 献

- Ding Wenzheng, Huang Xiaodiao, Wang Mulan. Dynamic characteristics of feed system for large-scale machine tool remanufacturing[J]. *J. Mechanical Engineering*, 2011, **47**(3): 135~140
丁文政,黄筱调,汪木兰. 面向大型机床再制造的进给系统动态特性[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(3): 135~140
- He Yingwei, Li Ping, Feng Guojin. Analysis of a sub-aperture scanning machine with double rotating arms for large-aperture optical system transmittance measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112004
赫英威,李平,冯国进. 大口径光学系统测试用双回转子孔径扫描装置设计与误差分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112004
- Shi Qingwei. A Study on the Automatic System for Measuring Inner and Outer Surfaces of Rotating Parts Made of Special Brittle Materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007
史庆伟. 特种脆性材料回转体零件内外表面自动测量系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2007
- Modern Use and Design Manual for Machine Tool Editorial Board. Modern Use and Design Manual for Machine Tool[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 496~499
现代使用机床设计手册编委会. 现代使用机床设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 496~499

- 5 Zhuo Xingren, Huang Zan. The parallelism error separation between the guideway and the axis of rotation[J]. *Measurement Technique*, 1999, (4): 10~13
卓兴仁, 黄 旻. 导轨对回转轴线的平行度误差分离法[J]. 计量技术, 1999, (4): 10~13
- 6 Lei Xianqing, Zhou Yanwei, Li Yan *et al.*. Precision measurement of parallelism error between machine guideway and the axis of spindle[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2006, **15**(5): 68~70
雷贤卿, 周彦伟, 李 言等. 机床导轨对主轴回转轴线平行度的精密测量[J]. 制造技术与机床, 2006, **15**(5): 68~70
- 7 S. Weikert. R-Test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, **53**(1): 429~432
- 8 B. Bringmann, P. Maglie. A method for direct evaluation of the dynamic 3D path accuracy of NC machine tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, **58**(1): 343~346
- 9 Wang Zhong, Su Ye, Liu Xinbo *et al.*. An approximation hole center positioning method by rotating laser displacement sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0608001
王 仲, 苏 野, 刘新波等. 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
- 10 Fan Yuming, Zhang Guoxiong, Gao Xiang *et al.*. A study of dynamic confocal laser probe based on time difference measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 514~518
樊玉铭, 张国雄, 高 翔等. 基于时间差法主动调焦式激光测头的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 514~518
- 11 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
- 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 Sang Hongqiang, Liu Libing, Liu Fen *et al.*. 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 芬等. 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
- 14 Xu Yang, Tang Feng, Wang Xiangzhao *et al.*. Measurement error analysis of absolute flatness test[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008009
徐 洋, 唐 锋, 王向朝等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1008009
- 15 Wang Gaowen, Qu Xinghua, Xing Shujian *et al.*. Research on inclination measurement in large size pipe for automatic measuring machine[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, **32**(1): 63~68
王高文, 曲兴华, 邢书剑等. 大直径内孔自动测量机构倾斜度测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(1): 63~68
- 16 Jiang Jiadong, Yuan Daocheng, Pu Jie. Online non-contact method to measure and adjust the concentricity of the cylindrical axis[J]. *Measurement Technique*, 2005, (9): 19~22
蒋家东, 袁道成, 蒲 洁. 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, (9): 19~22
- 17 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258
敖 磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 253~258

栏目编辑:何卓铭