

基于单激光束旋转的深孔直线度测量方法

刘新波¹, 王 仲², 林 立¹, 王 龙^{1*}

¹邵阳学院多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室, 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 基于激光位移传感器旋转,以回转轴线为基准,提出和验证了一种测量深孔零件直线度的方法。实验结果表明,在选用的激光位移传感器精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的情况下,该方法实现了圆孔直线度的在机测量,与三坐标测量机给出的相对真值对比,误差低于12%。该测量模型仅需机床主轴及其进给部件,易于实施。

关键词 测量; 仪器科学技术; 直线度检测; 极限点搜索模型; 单激光束旋转; 最小包容圆

中图分类号 TH-3 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.031203

Measuring Method for Deep Hole Straightness Based on Single Laser Beam Rotation

Liu Xinbo¹, Wang Zhong², Lin Li¹, Wang Long¹

¹Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Based on the rotation of laser displacement sensor, and taking the rotating axis as measuring basis, one novel method for measuring the deep hole straightness is presented and also verified. The experimental results show that, with the precision of laser displacement sensor of $\pm 2 \mu\text{m}$, the on-line measurement of the hole straightness can be done with the proposed method. Compared with the relative true value offered by three-coordinate measuring machine, the error is less by 12%. The model just needs the spindle and the feed component of machine tool and can be implemented easily.

Key words measurement; instrument science and technology; straightness measurement; limited point searching model; single laser beam rotating; minimum circumscribed circle

OCIS codes 120.3940; 120.4640; 120.6650; 140.3295

1 引 言

深孔类零件在航天、航海、电力等大型装备领域应用广泛,且异形件逐渐增多,制造难度越来越大。直线度作为一种机械配合型几何要素,深孔加工完成之后,一般需要对其进行检测^[1],即检测实际孔心线与理想孔心线之间的空间变动量。相对其他几何误差,深孔直线度误差的检测难度大,测量水平低。这是由于受内部空间限制,探测设备的可达性差,且中心线是一条虚轴,无法直接测量。

测量深孔直线度的方法主要有卡尺测壁厚判断法、综合量规判别法、坐标机测量法、激光准直法和图像检测法等^[2]。陈振亚等^[3]以激光准直法为基础,提出了基于功率谱密度(PSD)的深孔轴线直线度检测方法,结构简单,精度高,但此方法要求深孔两端无干扰,需安装众多辅助设备,耗时多,成本高。Schalk等^[4-5]深入

收稿日期: 2016-10-28; 收到修改稿日期: 2016-11-01

基金项目: 湖南省科技计划(2016GK2021, 2016TP1023)

作者简介: 刘新波(1985—),男,博士,工程师,主要从事精密几何量测量方法方面的研究。

E-mail: liu33-33xinbo@163.com

* 通信联系人。E-mail: wanglong.212@163.com

研究了光视觉检测技术,该技术操作简单,误差环节少,但仍需借助大量辅助装置。目前,美国劳伦斯伯克力国家实验室和日本大阪大学等致力于直线度检测技术的研究^[6],测量水平达 $0.2 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

本文阐述和验证了一种基于单激光束旋转的极值点搜索模型和逼近式圆孔定心模型的深孔直线度测量方法。该方法以回转轴线作为测量基准,操作简单且无需辅助,适用于内孔类零件的在机测量。

2 测量系统的构成

图1为基于单激光旋转的深孔直线度的在机测量系统,系统主要由数控机床、测头^[7]、被测孔和Z向调节结构组成。数控机床为测量系统提供二维平面运动以及回转轴线的空间坐标;测头以单个高精度激光位移传感器为核心,辅以自主供电和无线数据发射功能,在安全范围内,输出值是孔内扫描点至传感器零位点的距离;测头和Z向调节结构固连,当两者随机床主轴旋转时,即使测头的Z向位置变动,其回转轴线的位姿仍然恒定,以满足回转轴线作为测量基准的基本条件。

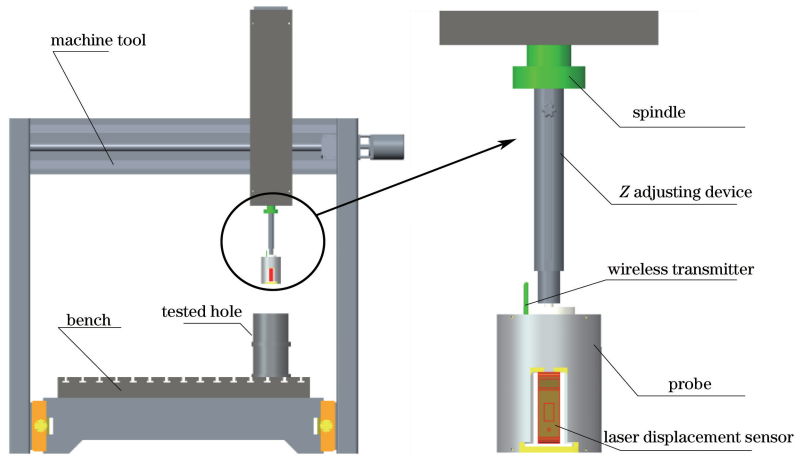


图1 基于单激光旋转的深孔直线度在机测量系统

Fig. 1 On-line measurement system for deep hole straightness based on single laser beam rotation

3 测量原理

3.1 极限点搜索模型

利用激光位移传感器回转扫描圆孔内表面^[8],其简化空间模型如图2所示。考虑到激光位移传感器的安装偏差,激光出射线 AB 同回转轴线既不垂直也不相交,即两者异面,存在公垂线 OC ,其中,点 C 绕回转轴旋转可形成圆形轨迹——轨迹1。设 B 点是激光位移传感器的零位点,零位点的回转轨迹为轨迹2。以 O 为原点,回转轴线为 Z 轴,可建立坐标系 $O-XYZ$ 。在图2中, AB 表示激光位移传感器的输出值, OA 为被测点至原点的距离。

由图2可知,激光束在回转扫描时,三角形 $\triangle OBC$ 的形状保持恒定,而在 $\triangle OAC$ 中,线段 OA 、 AC 的长度不断变化。

在 $\triangle OBC$ 中有 $|BC|^2 + |OC|^2 = |OB|^2$,在 $\triangle OAC$ 中有 $|AB + BC|^2 + |OC|^2 = |OA|^2$,因此

$$y = |OA|^2 = |AB|^2 + 2 \times |AB| \times \sqrt{|OB|^2 - |OC|^2} + |OB|^2. \quad (1)$$

由于 $\triangle OBC$ 在传感器旋转过程中形状不变,则 $|OB|$ 、 $|OC|$ 恒定不变,对(1)式中变量 $|AB|$ 求导得

$$y' = 2 \times |AB| + 2 \times \sqrt{|OB|^2 - |OC|^2}, \quad (2)$$

$|AB|$ 恒为正,使得导函数亦为正,即 $|OA|^2$ 与 $|AB|$ 具有相同的单调性。因此,当测量值 $|AB|$ 出现极限值时,被测点至回转轴线的公垂点距离 $|OA|$ 也会出现极限值,即

$$\max |AB| \Leftrightarrow \max |OA|, \quad (3)$$

$$\min |AB| \Leftrightarrow \min |OA|. \quad (4)$$

若不改变深孔加工时机床主轴的姿态,则进行在机测量时回转轴线与圆孔中心线平行。当激光位移传

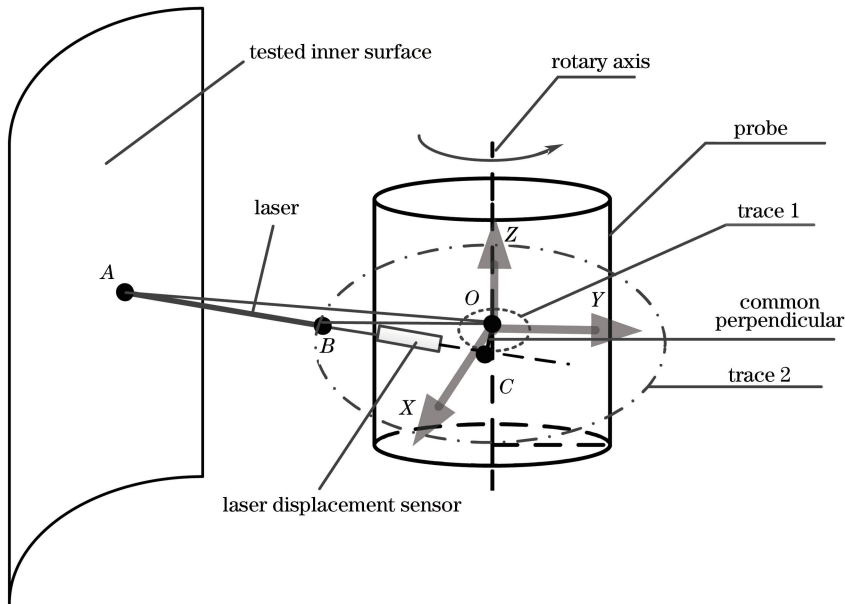


图 2 激光束回转扫描圆孔内表面模型

Fig. 2 Model for scanning inner surface of hole with laser rotation

传感器相对于主轴垂直安装时,图 2 所示的空间模型可转变成平面模型,如图 3 所示。当扫描点为图 3 中 A_{\max} 和 A_{\min} 时,由(3)、(4)式可知,传感器输出值 $|AB|$ 亦将出现极大和极小值。

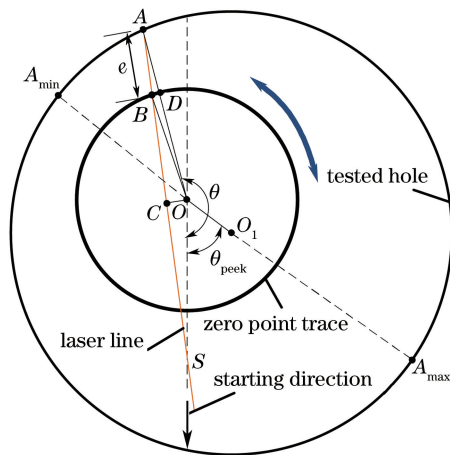


图 3 圆孔极限点搜索模型

Fig. 3 Searching model of limited point of hole

在设计测头时,作如下限制:回转轴线至零位测量点的距离不低于 70 mm,安装偏心 $|OC|$ 小于 0.1 mm,测量范围小于 10 mm,则在 $\triangle OAC$ 中, $|AB|$ 和 $|AD|$ 的最大偏差不超过 $0.05 \mu\text{m}$,可忽略不计,因而有

$$|OO_1| = \frac{|A_{\max}O| - |A_{\min}O|}{2} = \frac{|A_{\max}B| - |A_{\min}B|}{2} = \frac{s}{2}, \quad (5)$$

式中 s 表示传感器单周期内的峰谷值。由(5)式可以计算回转轴线至被测孔圆心的距离,所有数据均经过卡尔曼滤波处理以减小传感器的随机误差。

为求解圆心相对回转轴线的相对位置,除两者距离外,还需确定两者方位^[9]。为此,在对各个截面进行回转扫描时,预先固定一个起始方向,如图 3 所示。由于传感器采样时间极短且测量值呈周期变化,波峰出现的时间可以转化为波峰出现时激光束相对起始方向的角度 θ_{peek} 。由图 3 可知,当波峰出现时,被测点、圆心、回转轴线投影点三者共线,因而, θ_{peek} 即可表示圆心的方位:

$$\theta_{\text{peek}} = \frac{n_{\text{peek}}}{N_T} \times 2\pi, \quad (6)$$

式中 n_{peak} 表示单周期内起始扫描点至最大测距点之间的扫描总点数, N_T 表示单周期内扫描的总点数。

3.2 孔心定位模型

直线度的量值一般为微米量级, 而激光位移传感器的误差易受测距变化的影响, 因此在测头轴向平动进行直线度测量时, 要求测距变化不应过大。本方法在进行首圆截面测量时, 使回转轴线和圆心重合, 以减小传感器误差的干扰。基本原理如图 4 所示, 在机床 X 方向移动测头, $|OO_1|$ 是一个由大变小再变大的过程, 根据(5)式可知, 测量峰谷值 s 存在由大变小再变大的规律, 其极小值对应 P 点; 沿 Y 方向移动测头, 观测 s 的变化, 当回转轴线与孔心重合时, s 最小, 理论上可以一次定心。

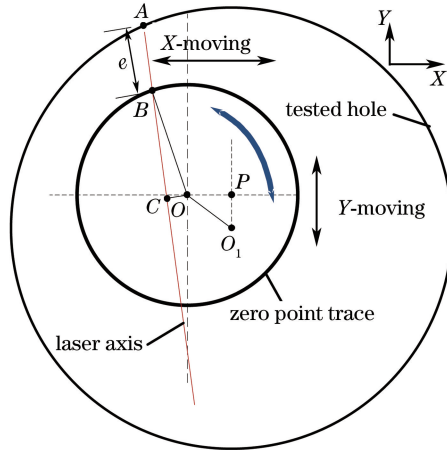


图 4 激光回转定心模型

Fig. 4 Model for center positioning with laser rotation

考虑到实际操作时机床平动误差和主轴回转径向误差等多因素, 有时需在 X 、 Y 轴方向上多次交替移动测头, 直至 s 最小, 使得 O 和 O_1 重合。

3.3 圆孔直线度测量方法

圆孔直线度的测量原理如图 5 所示, 其中 section 1 为初始扫描截面, section N ($N=2, 3, \dots, n$) 为其他任意扫描截面, 设起始测量方向为俯视图六点钟方向。根据定义, 圆孔直线度为各截面的圆心相对理想轴线的变动量, 若在轴线的中垂面上投影, 可表示为所有圆心投影点的最小包容圆直径^[10]。根据 3.1 节, 可测得各截面圆心相对回转轴线的极距和方位, 进而可绘制极坐标图, 并转成直角坐标图, 快速构建所有被测圆心的凸包^[11-12], 计算出最小包容圆。

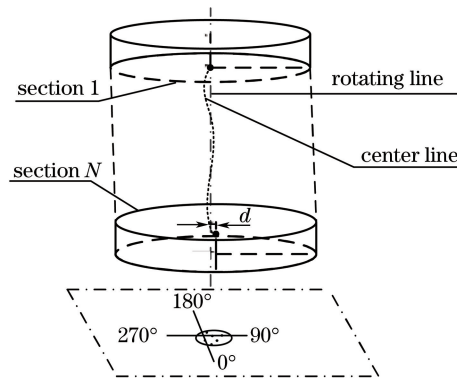


图 5 直线度测量模型

Fig. 5 Measurement model of straightness

执行步骤如下:

- 1) 确定起始扫描方向, 利用回转定心法使得回转轴线和 section 1 的圆心重合;
- 2) 下移测头至 section 2 (由 Z 向平移装置执行), 并对 section 2 进行回转扫描, 记录测头数据的输出曲线, 利用(5)式计算 section 2 的圆心与回转轴线之间的距离, 利用(6)式计算 section 2 波峰测量点的相对角度;

- 3) 以所测圆心与回转轴线之间的距离为极距,以波峰测量点的相对角度为极角,绘制极坐标图;
- 4) 下移测头至其他截面,重复步骤 2)、3),直至绘制出所有截面圆心的极坐标;
- 5) 将极坐标转换成直角坐标,利用最小区域拟合算法计算直径最小包容圆,其直径即为圆孔直线度。

4 实验结果与分析

实验中,采用德国米铨有限公司生产的 OptoNCDT1700 激光位移传感器,精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$,适用于粗糙金属表面;以美国哈挺集团生产的 VMC 600 II 立式铣床为实验平台,利用本文方法对直径为 160 mm、深度为 300 mm 的合金铸铁孔进行直线度的测量,如图 6(a)所示;采用海克斯康集团生产的 Global SF 桥式三坐标测量机(CMM)进行对比测量^[13],如图 6(b)所示。

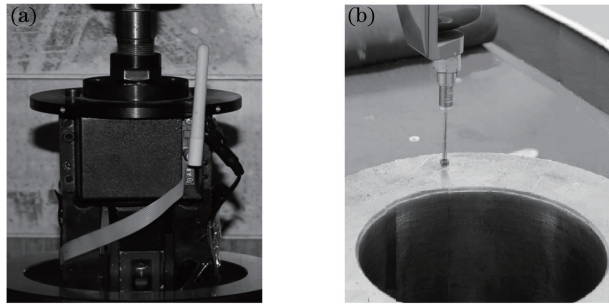


图 6 (a) 激光旋转测量;(b) CMM 离线测量

Fig. 6 (a) Measurement with laser rotation; (b) measurement with CMM

4.1 直线度测量实验

首截面定心结果如图 7(a)所示,受机床平移调节分辨率和平移误差的影响,定心时无法使所测曲线为一条平直的曲线,其定心偏差不超过 $2 \mu\text{m}$ 。

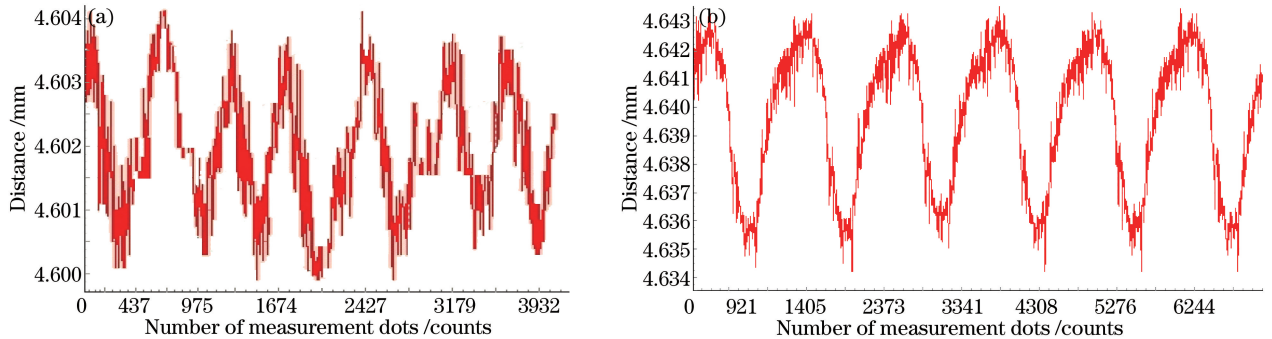


图 7 测量结果。(a)首截面定心;(b)截面距离

Fig. 7 Measurement results. (a) Center positioning for initial section; (b) section distance

对截面圆心的距离和方位的测算结果如图 7(b)所示,峰谷值约为 $10.2 \mu\text{m}$,则由(5)式可知,该截面圆心距离回转轴线的间距为 $5.1 \mu\text{m}$;单周期采样总点数和波峰位置分别约为 1200 和 210,因此,根据(6)式可知,该圆心对应的方位角为 63° 。共测量了 9 个截面,首尾截面之间距离约为 240 mm,其余均匀排布,所有截面采用相同方式计算,结果见表 1。

表 1 拟合圆心极坐标值

Table 1 Fitting polar coordinate value of hole center

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distance $s / \mu\text{m}$	2	5.1	10.3	12.6	8.5	12.6	10.6	7.3	9.6
Angle $\theta_{\text{peek}} / (^\circ)$	46	63	80	165	146	136	125	92	72

4.2 重复性实验

直线度测量实验重复 5 次,结果见表 2,可知直线度平均值为 $20 \mu\text{m}$,方差为 $1.7 \mu\text{m}$ 。

表 2 重复测量结果
Table 2 Result of repeated measurement

No.	1	2	3	4	5
Staightness / μm	18.1	21.2	19.5	22.6	18.6

表 2 对应点的直角坐标如图 8 所示,用 Matlab 软件编程计算其最小包容圆直径,得到初步结果为 $18.1 \mu\text{m}$ 。

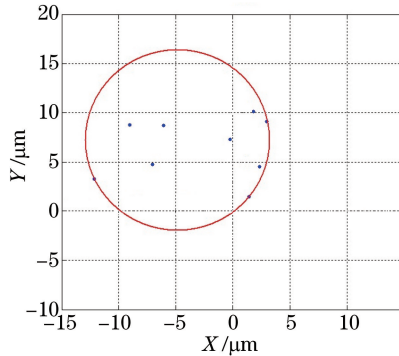


图 8 孔心最小包容圆

Fig. 8 Minimum circumscribed circle of all hole centers

利用三坐标测量机对相同截面进行孔心测量,同样采用最小包容圆算法,得测量值为 $17.6 \mu\text{m}$ 。对比表 2 的平均值可以看出,本方法相对误差小于 12%,由于直线度的量值很小,该精度可满足常规检测要求。另外,实验的方差为 $1.7 \mu\text{m}$,可知重复性误差约为 8.5%,说明本方法具有较好的重复精度。

4.3 实验分析

1) 首截面定心可使所有扫描点的输出值大致相同,降低测距差异过大引入的传感器测量误差;

2) 影响测量精度的因素有传感器误差、主轴的径向跳动和被测孔的光洁度等。由于本方法采用波峰和波谷的差分来求解圆心与回转轴线的距离,因此系统误差对测量结果无影响,一定程度上保证了本方法的精度;

3) 加装 Z 向平移机构而不采用机床 Z 轴作为测头轴向探伸部件,可保持回转轴线的空间唯一性,其实是加长主轴,跳动误差随之增大,影响了测量精度。为了解决这个问题,需针对不同情况设计不同的 Z 向平移机构;

4) 本装置要求被测孔的直径范围为 $140 \sim 220 \text{ mm}$ 。由于最小测量尺寸受限于传感器的外形尺寸,因此可选用更小的传感器来降低最小测量尺寸,如德国米铨有限公司生产的 optoNCDT IDL-1402 激光位移传感器最小测量孔径可至 90 mm ;

5) 装置随伸缩装置进入被测孔,即可得出所测数据,因此,除通孔外,本方法还适用于盲孔的测量。

5 结 论

提出和验证了一种基于单激光旋转的圆孔直线度测量模型,实验结果表明,重复测量精度约为 8.5%,而相对于坐标测量机,其测量误差低于 12%,满足常规条件下的测量要求。设计的测量实验装置,可完成深孔直线度的无损自动测量,具有结构简单、易于自动化、便于在机测量等特点,容易推广。

参 考 文 献

- [1] Li Yan, Kong Lingfei. Influence of initial deviation in vibrating deep hole drilling on hole straightness error[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 167-173.
李 言, 孔令飞. 振动切削深孔加工初始偏差对孔直线度误差的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 167-173.
- [2] Liu Zhanfeng, Ning Yanping, Liu Yanshu, *et al.* Present condition and development on linearity measure technique for exactitude deep hole[J]. New Technology & New Process, 2004, 24(11): 36-39.
刘战锋, 宁延平, 刘雁蜀. 精密深孔直线度测量技术的现状与发展[J]. 新技术新工艺, 2004, 24(11): 36-39.

- [3] Chen Zhenya, Shen Xingquan, Pang Junzhong, *et al.* Photoelectric measurement method of deep hole straightness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 362-366.
陈振亚, 沈兴全, 庞俊忠, 等. 深孔直线度光电测量技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 362-366.
- [4] Schalk R, Ofner R, Oleary P. Pipe eccentricity measurement using laser triangulation[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(7): 194-196.
- [5] Hao Yongpeng, Yu Daguo, Li Shaomin, *et al.* Linearity detecting system for deep holes based on the light vision technology[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016, 58(2): 51-53.
郝永鹏, 于大国, 李少敏, 等. 基于光视觉技术的深孔直线度检测系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 58(2): 51-53.
- [6] Meng Xiaohua. Theoretical research on model & methods of deep-hole straightness detection[D]. Taiyuan: North University of China, 2014: 1-10.
孟晓华. 深孔直线度误差检测模型与方法的理论研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 1-10.
- [7] Liu Xinbo, Wang Zhong, Su Ye, *et al.* Measurement of parallelism between rotating axis and guideway of a machine tool based on approximation hole center positioning[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108105.
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): 1108105.
- [8] Liu Xinbo, Wang Zhong, Luo Qingyue, *et al.* A hole diameter measurement model on machine based on single laser beam rotation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041204.
刘新波, 王 仲, 罗庆跃, 等. 基于单激光束旋转的圆孔直径在机测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041204.
- [9] Wang Guohui, Hou Xinzhong. Design of testing linearity decision in deep hole based on PSD[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2004, 18(4): 65-68.
王国辉, 侯新忠. 基于 PSD 器件的深孔直线度检测设计研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2004, 18(4): 65-68.
- [10] Xu Guangming, Liu Junqiang, Gao Xiaobing, *et al.* Real-time measurement of axis deflection in deep hole machining and error analysis[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(4): 300-303.
徐光明, 刘军强, 高晓兵, 等. 深孔加工中孔轴线偏斜的实时测量及误差分析[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(4): 300-303.
- [11] Luo Jun, Ma Jinxia, Liu Xueming, *et al.* High-precision and fast evaluation of spatial straightness error of 3D coordinate point set[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(5): 730-735.
罗 钧, 麻锦侠, 刘学明, 等. 三维坐标点集的轴线直线度高精度快速评定[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(5): 730-735.
- [12] Deng Liyuan. Coordinate measure machine apply in measure of diesel engine frame[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 9-16.
邓丽媛. 三坐标测量机在 GEVO16 型柴油机机体测量中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 9-16.
- [13] Wu Zhenggang, Zeng Zhoumo, Li Xingqiang, *et al.* Non-contact on-machine dihedral angle measurement approach based on rotary ray-scanning mechanism[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0508001.
吴振刚, 曾周末, 李兴强, 等. 非接触回转射线二面角在机测量方法[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508001.