

深孔直线度光电测量技术*

陈振亚^{1,2} 沈兴全^{1,2} 庞俊忠^{1,2} 辛志杰^{1,2} 郭婷婷¹

(1. 中北大学机械与动力工程学院, 太原 030051; 2. 山西省深孔加工工程技术研究中心, 太原 030051)

摘要: 基于光电原理,提出了一种利用输出电压的变化规律来准确测量深孔直线度的方法。分析了光电探测器发生平移运动和旋转运动时造成的实际孔心的变化规律。基于最小二乘原理,推导了深孔直线度与输出电压的关系,为深孔直线度光电测量提供了理论基础。利用光电测量原理,设计了一种具有自定位功能、实时显示深孔直线度误差的光电测量装置,可实现深孔直线度的无损自动检测。

关键词: 深孔 直线度 光电测量 最小二乘法

中图分类号: TG526; TH741

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2014)12-0362-05

引言

深孔直线度是指被测实际孔心线与理想孔心线的变动量,理想孔心线的位置应符合最小条件,深孔直线度的测量实质上是对任意方向空间直线度的评定^[1]。深孔直线度检测受制于内部空间的限制,难度很大,目前常用的深孔直线度测量方法有截距法、塞规法、全息法、臂杆法及基于散射场原理的电容传感器法等;空间直线度的评定方法有:简易算法、两端点连线法、最小包容四棱柱法和最小包容区域法等;以上测量或评定方法,不同程度的存在着精度不高或者计算量大的缺点,不易于推广使用^[2-3]。

使用激光准直仪法测量深孔不同截面圆的圆心,得到实际孔心线上测点的样本空间,通过拟合实际测点,得到理想孔心线空间直线方程,最后利用最小二乘原理评定深孔直线度,这种方法计算简单、便于应用^[4-5]。本文利用上述原理设计深孔直线度测量设备。

1 光电探测器测量深孔直线度的原理

深孔直线度检测装置,主要由激光准直仪、光电探测器和计算机3部分组成。激光准直仪发射的平行光,入射到光电探测器形成光斑;不同光斑对应不同的光电信号;信号输出到计算机,经处理得到不同的深孔直线度^[6-8]。

光电探测器是由4个性能、大小完全相同的光电池对称分布组成,每个象限占据1/4光敏面板面

积,如图1所示。测量时,由于存在直线度误差,光斑中心会在 x 和 y 方向上产生 Δx_i 和 Δy_i 的偏移量,改变了4个象限上的光斑面积。不同的光斑面积产生不同的电压信号,光斑中心偏移量正比于4个象限的入射光斑面积^[3]。

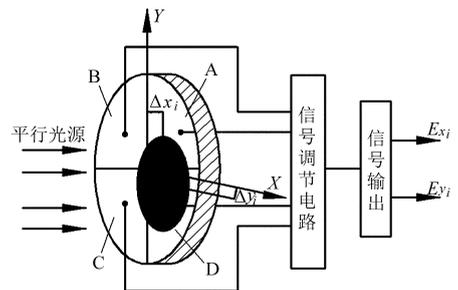


图1 光电探测器工作原理图

Fig.1 Photoelectric detector working principle diagram

光斑中心的偏移量可表示为

$$\begin{cases} \Delta x_i = k_x \frac{S_A + S_D - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = \\ k_x \frac{V_A + V_D - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} = k_x E_{xi} \quad (1) \\ \Delta y_i = k_y \frac{S_A + S_B - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = \\ k_y \frac{V_A + V_B - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} = k_y E_{yi} \quad (2) \end{cases}$$

式中 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D ——探测器各象限输出的信号电压

S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D ——探测器各象限光斑面积

收稿日期: 2013-12-19 修回日期: 2014-01-29

* 国家自然科学基金资助项目(51175482)、山西省研究生优秀创新资助项目(20133099)和中北大学研究生科技基金资助项目(20131007)

作者简介: 陈振亚, 博士生, 主要从事深孔加工技术研究, E-mail: czy1393518@163.com

E_{xi}, E_{yi} ——探测器在 x 和 y 方向上输出的电势差信号

k_x, k_y ——常量, 通过标定得到^[6]

2 测量模型

2.1 物理模型

由于光电探测器位置的变化, 光斑在光敏面板上会出现以下 4 种形态, 见图 2~5。

上述情况可用两空间向量 k 与 j 的位置关系表示, 见图 6。在 z 轴上取单位向量 $k(0, 0, 1)$ 为参照孔心线方向, 在实际孔心线上任取一点 $p(x_i, y_i, z_i)$, 其单位方向向量为 $j(a, b, c)$ 。

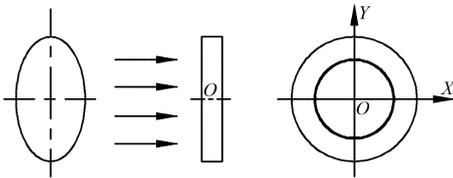


图 2 初始光斑形态及位置

Fig. 2 Shape and location of initial spot

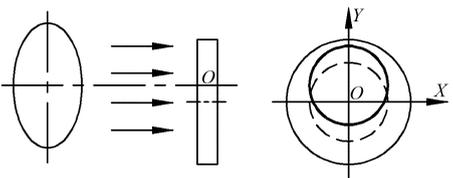


图 3 光敏面板发生平移

Fig. 3 Photosensitive panel with translation

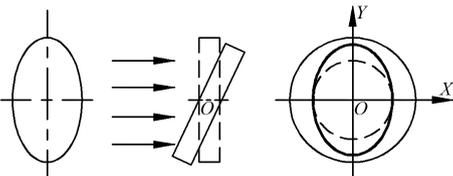


图 4 光敏面板发生转动

Fig. 4 Photosensitive panel with rotation

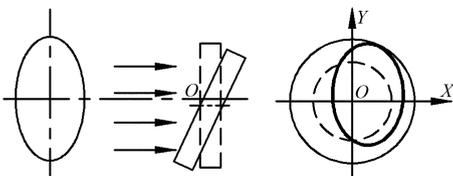


图 5 光敏面板既平移又转动

Fig. 5 Photosensitive panel with translation and rotation

向量 $j(a, b, c)$ 与向量 $k(0, 0, 1)$ 存在以下关系:

① j 与 k 重合, 光斑形式见图 2。光斑中心坐标为 $(0, 0, z_i)$, 在光敏面板上的形状为圆形, 方程为

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3)$$

光斑中心在光敏面板上的位移变化量为 0。

② j 与 k 平行, 光敏面板上光斑为圆形(图 3)。光斑形状没有发生变化, 但是光斑中心的坐标由 $(0, 0, z_i)$ 变为 (x_i, y_i, z_i) , 光敏面板上光斑方程变为

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r^2 \quad (4)$$

光斑中心在光敏面板上的位移变化为

$$\begin{cases} x_i = kE_{xi} \\ y_i = kE_{yi} \end{cases} \quad (5)$$

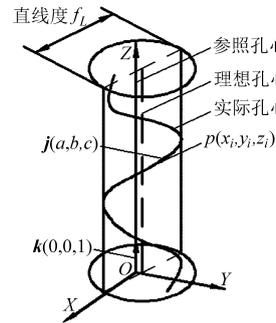


图 6 空间直线度评定模型

Fig. 6 Spatial straightness evaluation model

③ j 与 k 相交, 光斑中心坐标为 $(0, 0, z_i)$, 位置未发生变化, 但是形状变为椭圆(图 4)。假设椭圆长半轴、短半轴和平行圆光源的半径分别为 m, n 和 r , 在光敏面板上的椭圆方程为

$$\frac{y^2}{m^2} + \frac{x^2}{n^2} = 1 \quad (m > n > 0) \quad (6)$$

沿着坐标轴方向光斑的位移变化为

$$\begin{cases} x_i = n - r = k_x E_{xi} \\ y_i = m - r = k_y E_{yi} \end{cases} \quad (7)$$

假设光斑绕 x 轴作旋转运动, 椭圆的短半轴的长度等于平行光源的半径, 即 $n = r$ 。假设 j 与 k 的夹角为 ϕ , 则椭圆长轴与平行光源间的夹角也为 ϕ , 即

$$\cos \phi = \frac{r}{m} = \frac{r}{r + k_y E_{yi}} \quad (8)$$

$$\phi = \arccos \frac{r}{r + k_y E_{yi}} \quad (9)$$

④ j 与 k 互异, 光斑中心的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 在光敏面板上形状为椭圆(图 5)。假设椭圆长半轴和短半轴分别为 m, n , 光敏面板上的椭圆方程为

$$\frac{(y - y_i)^2}{m^2} + \frac{(x - x_i)^2}{n^2} = 1 \quad (m > n > 0) \quad (10)$$

令 $y_t = y - y_i, x_t = x - x_i$, 则椭圆方程为

$$\frac{y_t^2}{m^2} + \frac{x_t^2}{n^2} = 1 \quad (m > n > 0) \quad (11)$$

式(11)是 j 与 k 相交的情况, 此时沿着坐标轴方向光斑的位移变化为

$$\begin{cases} x_t = n - r = k_x E'_{xti} \\ y_t = m - r = k_y E'_{yti} \end{cases} \quad (12)$$

j 与 k 夹角为 $\phi = \arccos(r / (r + k_y E_{yt}))$ 。

因 $y_t = y - y_i, x_t = x - x_i$, 为 j 与 k 平行的情况, 此时光斑中心在光敏面板上的位移变化为

$$\begin{cases} x'_i = k_x E''_{xii} \\ y'_i = k_y E''_{yii} \end{cases} \quad (13)$$

沿着坐标轴方向光斑的位移变化为

$$\begin{cases} x_i = x_i + x'_i = k_x E_{xi} \\ y_i = y_i + y'_i = k_y E_{yi} \end{cases} \quad (14)$$

2.2 最小二乘评定法

使用最小二乘法来评定深孔直线度时,是利用最小二乘轴线代替理想孔心线^[9]。光斑中心的位移变化量 (x_i, y_i, z_i) 实际上是实际孔心线上测点的样本空间,利用最小二乘法原理拟合样本空间中的测点可得到的理想孔心线的轨迹^[10]。取理想孔心线与 xoy 坐标平面的交点为 $A_0(x_0, y_0, 0)$,其方向数为 $\mathbf{n}(\mu, \nu, 1)$,则理想孔心线的方程为

$$\frac{x'_i - x_0}{\mu} = \frac{y'_i - y_0}{\nu} = \frac{z_i}{1} \quad (15)$$

实际孔心线上的任意测点 $p(x_i, y_i, z_i)$ 到理想孔心线的距离为^[11]

$$d_i = \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ x'_i - x_0 & y'_i - y_0 & z_i \\ \mu & \nu & 1 \end{vmatrix}}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2 + 1}} \quad (16)$$

由最小二乘法原理,参数 x_0, y_0, μ, ν 必须满足

$$J(x_0, y_0, \mu, \nu) = \sum_{i=1}^n (d_i)^2 \rightarrow \min \quad (17)$$

即

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial x_0} = 0 & \frac{\partial J}{\partial y_0} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \mu} = 0 & \frac{\partial J}{\partial \nu} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

可求得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} & y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \\ \mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i^2} & \nu = \frac{\sum_{i=1}^n y_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \end{cases} \quad (19)$$

将式(14)、(19)代入式(15)可得到理想孔心线的方程

$$\begin{cases} x'_i = \frac{\sum_{i=1}^n k_x E_{xi}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i^2}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \\ y'_i = \frac{\sum_{i=1}^n k_y E_{yi}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i^2}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \end{cases} \quad (20)$$

将式(14)、(20)代入式(16)可得到任意测点

$p(x_i, y_i, z_i)$ 到理想空心线的距离为

$$d_i = \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ \sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i^2 / \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i^2 / \sum_{i=1}^n z_i^2 & z_i \\ \sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2 & 1 \end{vmatrix}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2\right)^2 + 1}} \quad (21)$$

如图6所示,以空间理想孔心线为轴心,包容实际孔心线上的各测点、且直径最小的圆柱体的直径就是被测实际孔心线的直线度^[12-15],即

$$f_L = 2 \min(\max(d_i)) \quad (22)$$

$$f_L = 2 \min \left(\max \left(\frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ \sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i^2 / \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i^2 / \sum_{i=1}^n z_i^2 & z_i \\ \sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2 & 1 \end{vmatrix}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n k_x E_{xi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n k_y E_{yi} z_i / \sum_{i=1}^n z_i^2\right)^2 + 1}} \right) \right) \quad (23)$$

3 深孔直线度测量装置的设计应用

3.1 装置的实际设计和应用

利用上述原理,设计了深孔直线度光电检测装置,见图7。T型拉杆穿过楔形体、套筒,经柔性拉绳、定滑轮、滚筒与电动机M相连;楔形件周向120°均分于工件孔壁上,与楔形体相互接触,同时与杠杆系中部铰接;杠杆系两侧装有滚动钢珠;楔形体用防转销钉固定于套筒上;光电探测器安装于隔离板上,隔离

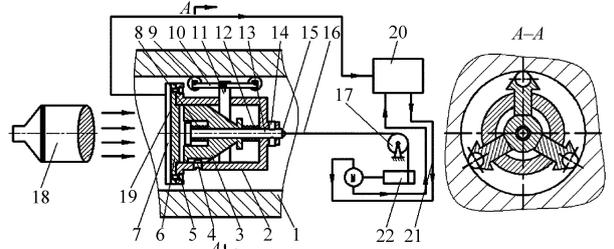


图7 深孔直线度光电检测装置

Fig. 7 Deep hole straightness photoelectric detection device

1. 工件 2. 套筒 3. 楔形体 4. 防转销钉 5. 螺钉 6. 隔离板
7. 光电探测器 8. 右弹簧 9. 滚动钢珠 10. 杠杆系 11. 楔形件
12. 左弹簧 13. T型拉杆 14. 卡销 15. 拉环 16. 拉绳
17. 定滑轮 18. 激光准直仪 19. 光电探测器 20. 计算机
21. 时间与速度反馈 22. 滚筒

板固定在套筒上,计算机与光电探测器相连^[16-18]。

检测前,将激光准直仪对准光电探测器,标定参照孔心线的位置,调节 T 型拉杆,通过弹簧的相互作用,楔形件与楔形体将相互滑动,实现楔形件伸出臂长度的变化;利用三点定心原理,主动适应被测孔径;插入卡销固定 T 型拉杆,使套筒内部各零件组成一个独立于外部牵引的动态平衡系统^[19]。检测时,电动机驱动滚筒转动,使四象限探测器机构沿孔中心移动,形成实际孔心线;若孔径小幅度变化,滚动钢珠受到孔壁压力将发生变化,在两个压缩弹簧作用下,楔形件与楔形体相对运动,从而使钢珠始终与孔内壁贴紧,自动适应孔径大小的变化,完成对实际孔心线测点的连续无损采集;最终得到理论孔心线的方程,并实时显示深孔直线度误差^[20]。

3.2 深孔直线度检测设备的考核评估

该深孔直线度检测设备曾对精加工的动车车轴的 $\phi 80 \text{ mm} \times 2 560 \text{ mm}$ 深孔孔心的直线度进行实测,测量与分析实物系统见图 8。测量过程中共采样了 3 组数据,每组采样点 20 个,步长 125 mm,实测结果,该设备分辨率可达 $3 \mu\text{m}$,3 组数据的重复度误差小于 $3 \mu\text{m}$ 。该检测装置,适用于 $\phi 58 \text{ mm} \sim \phi 160 \text{ mm}$ 内深孔直线度的无损测量。

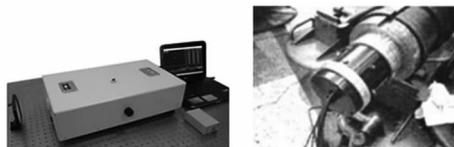


图 8 测量与分析实物系统工作图
Fig. 8 Measurement and analysis of physical system works diagram

4 结论

(1)激光准直仪发射的平行光源可作为参照孔心线,利用光电原理,得到深孔实际孔心轨迹的测点,基于最小二乘法原理拟合测点得到理论孔心线的方法,可以准确地描述深孔直线度。

(2)探测器的平移运动和旋转运动,会影响光敏面板上光斑形状位置的变化,可利用输出电压的变化,计算出实际孔心的轨迹线。推导的深孔直线度与输出电压的变化关系为直线度实时显示提供了理论基础。

(3)设计的深孔直线度光电检测装置,对孔有自定心、自适应、实时显示直线度等功能,可完成对深孔直线度的无损自动检测,装置原理简单,易于推广应用。

参 考 文 献

- 1 黄富贵,崔长彩.任意方向上直线度误差的评定新方法[J].机械工程学报,2008,44(7):221-224.
Huang Fugui, Cui Changcai. New method for evaluating arbitrary spatial straightness error[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(7):221-224. (in Chinese)
- 2 王宁侠.最小二乘法在空间直线度检测中的应用[J].陕西科技大学学报:自然科学版,2009,27(5):124-126.
Wang Ningxia. Application of least square method to space linearity surveying[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 27(5):124-126. (in Chinese)
- 3 张鹏伟,张智诠,谢劲冰.一种基于四象限探测器的深孔直线度测量方法的研究[J].光学技术,2007,33(5):745-750.
Zhang Pengwei, Zhang Zhiquan, Xie Jinbing. Study on a straightness measurement method based on the four-quadrant detector for deep hole[J]. Optical Technique, 2007, 33(5):745-750. (in Chinese)
- 4 Huang S T, Fan K C, Wu J H. A new minimum zone method for evaluating straightness errors[J]. Precision Engineering, 1993, 15(3):158-165.
- 5 胡仲勋,杨旭静,金湘中. LSM 算法评定空间直线度误差的分析与改进[J].湖南大学学报:自然科学版,2010,37(2):27-31.
Hu Zhongxun, Yang Xujing, Jin Xiangzhong. Analysis and improvement of the LSM algorithm for assessing spatial straightness error[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010,37(2):27-31. (in Chinese)
- 6 冯其波,刘依真,张斌,等.基于半导体激光光纤组件的激光准直仪[J].仪器仪表学报,2005,26(1):28-31.
Feng Qibo, Liu Yizhen, Zhang Bin, et al. A simple laser collimator based on single-mode fiber-coupled laser module[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(1):28-31. (in Chinese)
- 7 徐永凯,王信义,袁洪芳. EST 法测量深孔母线直线度的方案及误差分析[J].北京理工大学学报,2000,20(4):431-434.
Xu Yongkai, Wang Xinyi, Yuan Hongfang. Scheme and error analysis of generatrix straightness measurement for deep holes with EST[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000,20(4):431-434. (in Chinese)
- 8 沈兴全,庞俊忠.深孔加工关键技术研究[J].中北大学学报:自然科学版,2010,52(6):43-46.
Shen Xingquan, Pang Junzhong. Deep hole key technology research[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2010,52(6):43-46. (in Chinese)
- 9 马宏,盘毓学,车英,等.炮管直线度激光检测设备研究[J].兵工学报,2003,24(2):261-264.
Ma Hong, Pan Yuxue, Che Ying, et al. A study on a laser inspection device for the straightness of bore[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(2):261-264. (in Chinese)
- 10 徐航,焦冰,杨光瑜.测量深孔直线度的一种新方法[J].国防科技大学学报,2003,25(2):104-106.

- Xu Hang, Jiao Bing, Yang Guangyu. A new method of measuring linearity of deep hole [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(2):104-106. (in Chinese)
- 11 陈国强,赵俊伟. 最小条件下直线度误差评定的不确定度研究[J]. 农业机械学报,2008,39(1):169-171.
Chen Guoqiang, Zhao Junwei. Uncertainty of straightness error assessment with minimum condition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):169-171. (in Chinese)
- 12 陈立杰,张玉,张镭. 轴线直线度误差的理论研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2002,23(8):806-808.
Chen Lijie, Zhang Yu, Zhang Lei. Theoretical research on axis straightness error [J]. Journal of Northeastern University: Natural Sciences,2002,23(8):806-808. (in Chinese)
- 13 侯新忠,王国辉,杨明华,等. 火炮身管直线度检测数学模型研究[J]. 火炮发射与控制学报,2003(增刊1):109-111.
Hou Xinzong, Wang Guohui, Yang Minghua, et al. Research of mathematical model for examination of barrel linearity[J]. Gun Launch & Control Journal,2003(Supp.1):109-111. (in Chinese)
- 14 花世群. 一种新的直线度误差测量装置[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003,24(4):92-94.
Hua Shiqun. New apparatus of measuring departure from straightness [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003,24(4):92-94. (in Chinese)
- 15 张萍,林玉池,赵美蓉,等. 激光自准直仪的数据处理与误差估计[J]. 仪器仪表学报,2001,22(增刊1):127-130.
Zhang Ping, Lin Yuchi, Zhao Meirong, et al. Data processing and error estimation of laser autocollimator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2001,22(Supp.1):127-130. (in Chinese)
- 16 于大国,宁磊,孟晓华. 基于最小二乘法深孔轴线直线度误差评定[J]. 组合机床与自动化加工技术,2014(1):39-45.
Yu Daguo, Ning Lei, Meng Xiaohua. Error evaluation method for the axis straightness of deep-hole based on least-square principle[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2014(1):39-45. (in Chinese)
- 17 赵凤霞,张琳娜,郑玉花,等. 基于新一代GPS的空间直线度误差评定及其不确定度估计[J]. 机械强度,2008,30(3):441-444.
Zhao Fengxia, Zhang Linna, Zheng Yuhua, et al. Spatial straightness error evaluation and its uncertainty estimation based on GPS [J]. Journal of Mechanical Strength,2008,30(3):441-444. (in Chinese)
- 18 马清艳,王彪,武慧红,等. 深孔直线度检测系统[J]. 机械设计与研究,2013,29(3):54-57.
Ma Qingyan, Wang Biao, Wu Huihong, et al. Linearity detecting system for deep holes[J]. Machine Design and Research,2013, 29(3):54-57. (in Chinese)
- 19 李向荣,李国栋,王国辉,等. 火炮身管直线度检测系统总体设计[J]. 测试技术学报,2010,24(4):304-307.
Li Xiangrong, Li Guodong, Wang Guohui, et al. Design of linearity testing system for gun tube [J]. Journal of Test and Measurement Technology,2010,24(4):304-307. (in Chinese)
- 20 王鹏,余晓芬,孟凡良,等. 时域三点法测量直线度信息高精度获取方法研究[J]. 中国机械工程,2013,24(13):1733-1735.
Wang Peng, Yu Xiaofen, Meng Fanliang, et al. Research on accurate information acquisition of straightness errors with time-domain three-point method[J]. China Mechanical Engineering,2013,24(13):1733-1735. (in Chinese)

Photoelectric Measurement Method of Deep Hole Straightness

Chen Zhenya^{1,2} Shen Xingquan^{1,2} Pang Junzhong^{1,2} Xin Zhijie^{1,2} Guo Tingting¹

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. Research Center of Deep-hole Machining Engineering Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on the photoelectric principle, an accurate method to measure the deep hole straightness is built according to the changing rule of the output voltage. The changing rule of the actual hole center is analyzed when the photodetector has translational and rotational movements. Based on the least squares principle, the relationship between the deep hole straightness and the output voltage is deduced, which provides the theoretical foundation for deep hole straightness photoelectric measurement. According to the photoelectric measurement theory, a self-positioning, real-time display device of deep hole straightness measurement deviation is designed, which can effectively achieve automatic and non-destructive detection of deep hole straightness measurement.

Key words: Deep hole Straightness Photoelectric measurement Least squares