

## 温度对激光光斑跟踪不确定度的影响

肖韶荣<sup>1</sup>, 周洁<sup>2</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 黄新<sup>2</sup>

- (1. 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044;  
2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 对激光束四象限跟踪系统各通道输出电压随温度的变化进行了实际测量, 建立了一种校正光斑中心坐标的模型, 用于补偿温度变化导致的偏移量; 采取控制电路系统工作温度的措施, 减小光斑定位的不确定性; 根据探测系统光电信号处理方式, 用各象限接收的脉冲光强幅度值表述探测光束为调制脉冲串时光束中心坐标。通过测试四象限跟踪系统的输出特性, 确定该系统的线性工作范围, 以便保证光斑位于四象限探测器的最佳测量区域; 控制电路系统环境温度后, 系统跟踪分辨率达到  $1\ \mu\text{m}$ , 取决于单片机控制的步进电机步进准确度。

**关键词:** 光电探测; 四象限探测器; 跟踪; 不确定性

**中图分类号:** TN21    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0605-06

## Effect of temperature on uncertainty of laser spot tracking

Xiao Shaorong<sup>1</sup>, Zhou Jie<sup>2</sup>, Zhao Jing<sup>1</sup>, Huang Xin<sup>2</sup>

- (1. School of Physics & Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The output voltage of each channel of the four-quadrant tracking system under changing temperature was measured, and a model used to correct the spot center coordinates was established, which was used to compensate the deviation caused by temperature changes. The uncertainty of spot location was reduced via controlling temperature of circuit system operation. According to the photoelectric detection system signal processing way, center coordinate of light beam may be calculated with intensity magnitude of received light pulse of each quadrant. Output characteristics of the four-quadrant tracking system were also tested, the linear operation range of the system was determined which ensured the spot on the best measurement area of the four-quadrant detector. Under circuit system environment temperature controlled, the tracking resolution is  $1\ \mu\text{m}$ , which is dependent on the step accuracy of stepper motor which is controlled by microcomputer.

**Key words:** photoelectric detection; four-quadrant detector; tracking; uncertainty

收稿日期: 2012-07-07; 修订日期: 2012-08-12

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2010733); 气象行业专项(GYHY201106047)

作者简介: 肖韶荣(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事大气环境光电探测技术方面的研究。Email: sr.xiao@163.com

## 0 引言

光束对准自动跟踪技术对于激光测距<sup>[1]</sup>、激光通信<sup>[2]</sup>、激光制导<sup>[3]</sup>、大气能见度测量<sup>[4]</sup>、激光精密测试<sup>[5-9]</sup>等激光应用系统具有重要的意义。国内外在此领域进行了诸多研究,并取得重要的应用成果。大多使用四象限光电探测器探测光信号,近些年面阵 CCD 器件<sup>[10]</sup>也已应用到光束跟踪准直装置中。针对四象限探测技术,在光电信号检测方面设计了和差式、对角和差式、和差比幅式和对数相减式等信号处理电路,这些不同方式的检测方法具有各自的优缺点,都存在一定的固定偏差<sup>[11]</sup>。通常认为激光跟踪的主要误差来源有:光束强度或波阵面随机起伏、光电探测器噪声和控制误差。光束随机起伏主要决定于激光器或光源的输出特性稳定性和光束传输通道的介质光学参数的无规则变化;光电探测器的噪声主要表现为散弹噪声、像素(或探测区域)非均匀性和空间量子化起伏;控制噪声主要为机械补偿平台振动、机械滞后不确定性和控制电路漂移等噪声。实际上激光跟踪装置现场环境的不确定性也将带来可观的不确定性<sup>[12]</sup>,比如环境温度的变化影响等。

文中将激光跟踪技术应用到透射式能见度测量系统中,有效克服光束漂移带来的影响。针对环境温度对跟踪精度的影响,并考虑背景光干扰、系统信噪比、大气湍流、信号通道的非线性、四路均匀性<sup>[11]</sup>等影响因素,采用了相应的方法来降低影响。研究了四通道信号处理电路输出信号在一定温度变化范围内的一致性,对光电测器和控制环路电子系统进行温度控制,在光路中设置调制器和滤光片等消除背景光干扰、运用超低噪声精密运算放大器提高信噪比,有效提高了光斑中心的定位精度。

## 1 系统硬件结构与工作原理

光斑跟踪系统主要由光电探测器、前置放大电路、带通滤波电路、真值转换电路、次级放大电路、控制器和执行机构等 7 部分组成。系统框图如图 1 所示。

该实验系统中采用 He-Ne 激光器作为发射光源,激光器工作在基模状态,输出激光为跟踪目标,激光束由斩波器调制成 1 kHz 的脉冲串;选择硅 PIN 四象限探测器(Quadrant detector, QD)作为目标光检

测器,目标光信号经光学系统后成像在四象限探测器上, QD 探测器的 4 路光电流信号经过各自前置放大器后实现 I-V 变换,经过带通滤波后的信号进入真值转换电路被转换成直流信号;数据采集过程由 MSP430 单片机控制,并对采集到的各路数据进行处理,按照给定程序,控制电机驱动电路,使二维执行机构实时精确地调整探测器的位置,保证光束处于探测器中心位置附近。

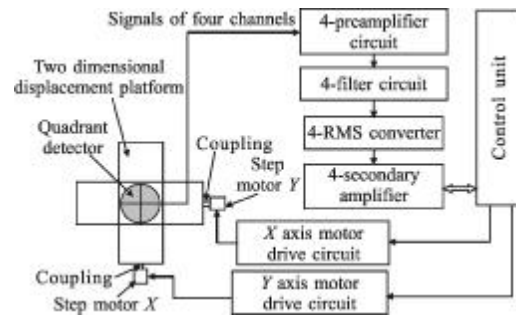


图 1 系统结构框图

Fig.1 Block diagram of system structure

具有较好一致性的四通道信号处理电路,各通道输出电压与各象限的光通量成正比,当光斑中心偏离探测器原点时,4 个象限上输出的信号幅度不相同。根据各象限上能量分布的比例计算出目标的亮度中心位置,以确定目标的空间位置,即检测目标具体方位可以归结为光斑相对于探测器中心的偏移量大小和方向的计算<sup>[13]</sup>。

## 2 光斑中心坐标计算

### 2.1 光斑特性影响

对于 He-Ne 激光器 632.8 nm 基横模输出的光束,正入射在四象限探测器上所形成的光斑的光强分布为高斯分布,输出激光强度是半径  $r$  的函数,光强的表达式为:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $I_0$  是指光斑中心的光强;  $\omega$  是探测器表面处光斑半径。设系统各通道光电信号的转换系数分别为  $G_k (k=1, 2, 3, 4)$ ,  $S_k$  为四象限探测器的各象限受光面积 ( $k=1, 2, 3, 4$ ),  $I_B$  为背景光的光照强度,均匀分布,则可得到每个象限的输出电压表达式为:

$$u_i = G_i \left[ \int_{S_i} I(r) ds + I_B \cdot S_i \right] \quad (2)$$

在目前光电器件制作工艺条件下,四象限探测器各象限的光电响应参数均匀性较好,合理设计电子线路参数,各通道光电信号转换系数接近一致,  $G_1 \approx G_2 \approx G_3 \approx G_4 \approx G$ 。由于在光路中设置了适用于目标光源波长的滤光片,可以部分减少背景光的干扰,在信号处理电路中,还设置了以调制器频率为中心频率的带通滤波电路,保证了只有被测激光光斑脉冲信号可通过后续的信号处理电路,通过这两种处理,基本可以忽略背景光的影响。

由此可以计算水平方向的误差信号  $\Delta u_x$  和垂直方向的误差信号  $\Delta u_y$ :

$$\Delta u_x = G \left[ \int_{S_1+S_2} \vec{I}(\vec{r}) ds - \int_{S_3+S_4} \vec{I}(\vec{r}) ds \right] \quad (3)$$

$$\Delta u_y = G \left[ \int_{S_1+S_2} \vec{I}(\vec{r}) ds - \int_{S_3+S_4} \vec{I}(\vec{r}) ds \right] \quad (4)$$

式中:  $\vec{I}(\vec{r})$  是激光束强度在四象限探测器上的分布,理论上由于高斯光束光强分布不均匀,不能使用经典的和差公式求解光斑坐标,但在实验中,每一象限输出信号是该象限总的辐射通量,因此,两对象限的输出信号之差能代表光斑中心的位置,即仍然可以用和差式或和差比幅式求解光斑坐标。

### 2.2 光斑中心坐标计算

在以往的文献中,被跟踪光束的光强几乎都是定值或随时间缓变的。文中四象限探测的应用目的是能见度测量<sup>[4]</sup>,为抑制环境光干扰,探测光束被调制成为方波脉冲串。公式(2)所表达的各象限输出为脉冲信号,因此,公式(3)、(4)亦呈脉冲变化,这使得光斑中心坐标的计算不能直接使用和差式或和差比幅式。文中将用各象限输出电压信号的幅度值表征光束在各象限的光强,从而计算光束中心坐标。

就目前探测器加工工艺而言,四象限探测器等同于 4 个相同的光电探测器,各象限光电转换系数均为  $\eta$ 。各通道探测器输出光电流为:

$$i_k(t) = \eta I_k(t) \quad (5)$$

式中:  $k=1, 2, 3, 4$ 。图 1 中 4 个通道前置放大器均由低噪声精密运算放大器 OP07 构成,它将光电探测器输出的光电流脉冲信号  $i_k(t)$  转换为电压信号  $u_{pk}(t)$ ,各前置放大器输出电压为:

$$u_{pk}(t) = R_k i_k(t) \text{ 或 } u_{pk}(t) = \eta R_k I_k(t) \quad (6)$$

式中:  $R_k$  为第  $k$  通道电流/电压转换系数。实验装置中,激光束调制频率为 1 000 Hz,设计的二阶压控有

源带通滤波器中心频率为 1 000 Hz,取  $Q$  值为 5.0,滤波器的实际带宽为  $\pm 97$  Hz。经过带通滤波器后的电压信号近似为正弦信号。利用精密有效值专用电路 AD736 将此准正弦信号转换为直流信号:

$$u_k(t) = \xi \eta R_k I_{mk} \quad (7)$$

式中:  $\xi$  为精密有效值 AD736 的转换系数;  $\xi$  与波形形态有关;  $I_{mk}$  为脉冲光强度幅度。因此,各象限通道输出电压  $u_k$  和该象限接收光强度幅度值成正比。可以用  $u_k$  代表各象限接收到的光斑光强,根据下式求出光斑中心坐标:

$$x = K \frac{(u_1 + u_4) - (u_2 + u_3)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \quad (8)$$

$$y = K \frac{(u_1 + u_2) - (u_3 + u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \quad (9)$$

式中:  $K$  为比例系数,与整个信号通道的电路结构和元件参数有关。

### 2.3 四象限探测系统输出特性

在无目标光源照射时,每个信号通道的总体噪声用  $u_{ni}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 表示。在环境温度为 20 °C 时,  $u_{n1}=0.67$  mV,  $u_{n2}=0.67$  mV,  $u_{n3}=1.00$  mV,  $u_{n4}=0.83$  mV。再通过程序将光斑中心定位到探测器的坐标原点,控制水平方向和垂直方向的步进电机分别正向转动 5 000 个脉冲,每步进 1 000 个脉冲,记录对应输出电压。经测试知 1 000 个脉冲对应的螺杆上的直线位移为 1.0 mm。用平滑样条函数对各组输出电压量和位移量进行线性拟合,得到探测器在水平方向的正向位移量和探测器 4 个象限的输出电压关系如图 2~图 5 所示,探测器在垂直方向的正向位移量和探测器 4 个象限的输出电压关系如图 6~图 9 所示。将实验测得的位移量和对应电压值的数字量代入公式(8)和公式(9),得到多组  $K$  值,其平均值为 1.09,取此平均值为标定的  $K$  值。

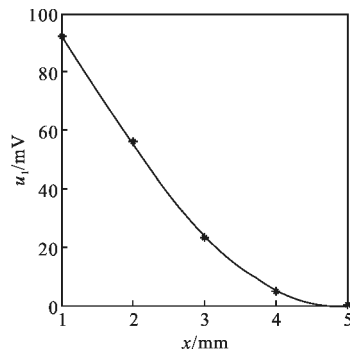


图 2 第一象限输出电压和位移关系曲线

Fig.2 Relation of output voltage and displacement in first quadrant

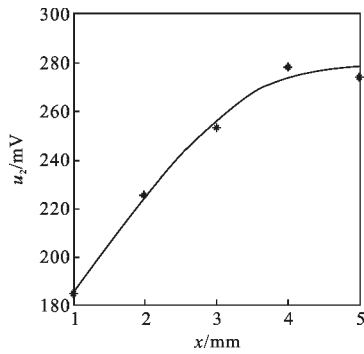


图 3 第 2 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.3 Relation of output voltage and displacement in second quadrant

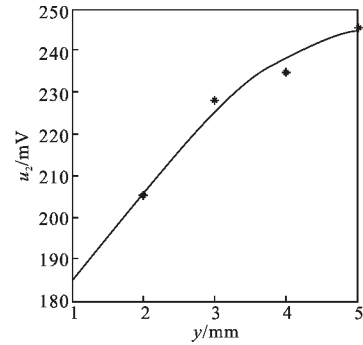


图 7 第 2 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.7 Relation of output voltage and displacement in second quadrant

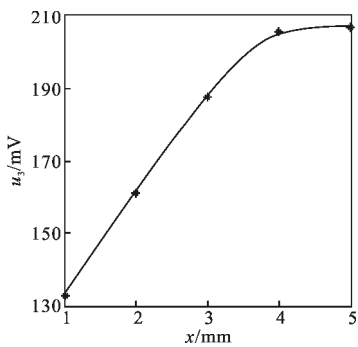


图 4 第 3 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.4 Relation of output voltage and displacement in third quadrant

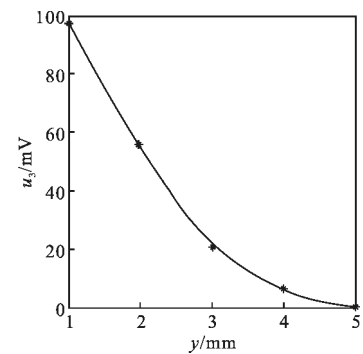


图 8 第 3 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.8 Relation of output voltage and displacement in third quadrant

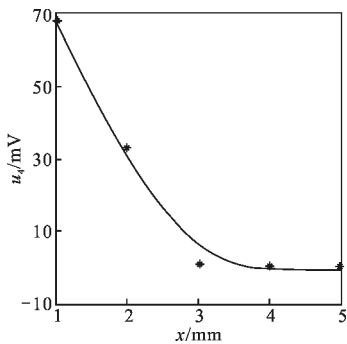


图 5 第 4 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.5 Relation of output voltage and displacement in fourth quadrant

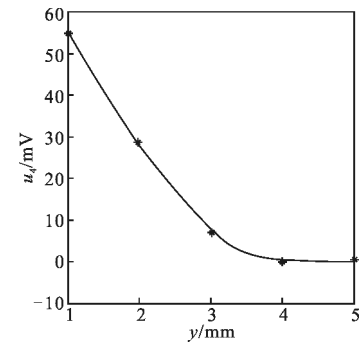


图 9 第 4 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.9 Relation of output voltage and displacement in fourth quadrant

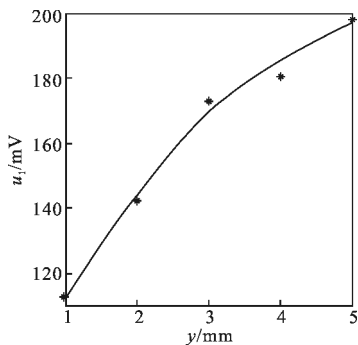


图 6 第 1 象限输出电压和位移关系曲线

Fig.6 Relation of output voltage and displacement in first quadrant

在图 2~图 9 中,存在一个共同现象,即光斑中心在区间(0,3)mm 偏移时,各象限通道输出电压与偏移量呈较好线性规律变化,光斑偏移 3.0 mm 后,各象限通道输出开始呈非线性变化。原因主要有两个方面:首先光斑为圆形,光斑中心与探测器中心重合时,各象限光强近似相等。实验中,光斑中心起始位置位于第 1 象限内,其坐标为(13,29),单位为  $\mu\text{m}$ ,保持 y 轴不动,探测器沿 x 轴正向位移,则光斑向相反方向位移,第 1 和 4 象限光斑面积减小,即接收到的光功率减小,对应通道输出电压减小,第 2 和 3 象

限对应通道输出电压则增大。根据公式(2),对于圆形光斑,位移较小时,第 1 和 4 象限光斑面积近似线性减小,相应输出电压线性减小,第 2 和 3 象限光斑面积近似线性增加。由于光斑是圆形,位移较大时,第 1 和 4 象限光斑面积快速减小,光斑首先完全离开第 4 象限,对应电压  $u_4$  降为 0mV,第 1 象限内还有部分光斑,因此  $u_1$  稍缓降为 0;对于第 2 和 3 象限,位移较大后,光斑面积增长开始减缓,光斑完全移到第 2 和 3 象限内,第 2 和 3 象限对应通道电压  $u_2$ 、 $u_3$  分别达到最大值。对  $y$  方向的位移可有类似的分析结果。其次该光斑为高斯型分布,光斑在探测器上位移时,各象限接收到的光斑功率不是均匀地增加或减小。

### 3 温度对四通道一致性的影响

在光电流处理电路中,两级运算放大电路的开环增益、输入偏置电流、输入失调电流、失调电压和有效值转换芯片的附加误差均容易受到温度的影响,使得在温度变化的环境中,四通道不能保持一致性。

在实验中,首先检测 4 个通道的输出电压和温度之间关系,温度变化范围为 15~55℃。运用最小二乘法对 4 组离散数据进行线性拟合,拟合阶数为四阶,得到的曲线如图 10 所示。

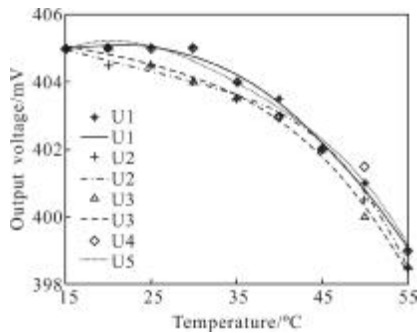


图 10 信号处理电路温度特性

Fig.10 Temperature characteristics of the four quadrant signals

由图 10 可以看出:实验中 4 路光电流处理电路的输出信号在一定的温度范围内具有良好的一致性,在  $T=20℃$  时,各象限输出电压信号之间的偏差小于 0.25%。在  $T=15℃$  时,各象限输出电压信号之间的偏差最小,这是因为在此温度时对各象限电路进行了平衡调试。

通过线性拟合可以得到 4 路信号处理电路输出电压和温度的关系表达式:

$$u_1 = -0.000 1T^3 + 0.001 9T^2 + 0.058 8T + 404.035 4 \quad (10)$$

$$u_2 = 0.000 3T^3 - 0.007 7T^2 + 0.024 6T + 405.593 4 \quad (11)$$

$$u_3 = 0.000 7T^2 - 0.059 6T + 405.835 9 \quad (12)$$

$$u_4 = 0.000 9T^3 - 0.046 9T^2 + 1.046 8T + 397.138 9 \quad (13)$$

由于在不同温度下,探测器的输出电流有差异,实验的环境温度是 20℃,可以求出在该温度下,温度变化引起的光斑中心坐标微小漂移。将公式(10)~(13)分别代入公式(8)和公式(9):

$$x = K \frac{0.000 5T^3 - 0.038T^2 + 1.140 7T - 10.255}{0.001 1T^3 - 0.054 7T^2 + 1.070 6T + 1 612.603 6} \quad (14)$$

$$y = K \frac{-0.000 5T^3 + 0.040 4T^2 + 0.903 8T + 6.654}{0.001 1T^3 - 0.054 7T^2 + 1.070 6T + 1 612.603 6} \quad (15)$$

设  $\Delta T$  为  $T$  的增量,则  $x(T)$  和  $y(T)$  的增量可表示为:

$$\Delta x = x(T + \Delta T) - x(T) = x'(T)\Delta T \quad (16)$$

$$\Delta y = y(T + \Delta T) - y(T) = y'(T)\Delta T \quad (17)$$

式中: $x(T)$  和  $y(T)$  分别为在温度为  $T$  时光斑中心坐标; $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为温度发生微小变化时光斑中心坐标在水平方向和垂直方向时的偏移量,已知  $K$  值为 1.09,当环境温度  $T=20℃$  时, $x(T)=9.11 \times 10^{-4}$ , $y(T)=-5.79 \times 10^{-4}$ ,对公式(14)和公式(15)求微分得: $x'(T)|_{T=20}=1.48 \times 10^{-4}$ , $y'(T)|_{T=20}=-8.58 \times 10^{-5}$ ,当  $\Delta T=1℃$  时, $\Delta x=1.48 \times 10^{-4}$ , $\Delta y=-8.85 \times 10^{-5}$ 。则光斑中心坐标被修正为  $(7.63 \times 10^{-4}, -4.93 \times 10^{-4})$ 。

根据以上分析,将温度控制在某一确定值附近,可以有效抑制光斑跟踪误差,特别是在某一温度,对四象限各信号通道进行平衡调试,并控制温度为该确定值,可使温度变化引起的跟踪误差最小。

### 4 结论

以四象限探测原理为基础的光斑跟踪系统,由于四个通道电子线路元件的离散性,必然存在通道间的输出特性差异,导致跟踪存在一定不确定性。其中环境温度变化对电子元件参数及电路性能影响较为显著,控制电路工作环境温度可以有效降低跟踪误差。可以根据四象限输出特性确定跟踪系统的线性工作范围,进一步减小跟踪的不确定度。

### 参考文献:

[1] Capineri Lorenzo, Masotti Leonardo, Mazzoni Marina, et al. A beam position sensor for low power infrared laser diodes[J].

- Review of Scientific Instrument, 1999, 70(2): 1341-1348.
- [2] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing, et al. Technology on spot detection and tracking based on four-quadrant detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1756-1761. (in Chinese)  
赵馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 基于四象限探测器的光斑检测跟踪技术[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1756-1761.
- [3] Tan Qianli. The application of quadrant photodetector module on laser guidance technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(2): 155-157. (in Chinese)  
谭千里. 四象限探测器组件在激光制导技术中的应用[J]. 半导体光电, 2005, 26(2): 155-157.
- [4] Xiao Shaorong, Xue Mingfang, Xia Jiangtao. Transmission type visibility measurement device and measuring method[P]. 2011, CN200910029358.6. (in Chinese)  
肖韶荣, 薛鸣方, 夏江涛. 透射式能见度测量装置及测量方法[P]. 2011, CN200910029358.6.
- [5] Koki Yamaji, Yoshihisa Muraoka. Motor driving control of an X-Y-Z table using a photoelectric device and optical pattern recognition [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1999, 11(4): 342-348.
- [6] Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. A novel calibration to structured light 3D vision inspection [J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34: 373-380.
- [7] Tang Xiaojun, Li Yujun, Liu Junhua, et al. Alignment and micro-displace measurement with four-quadrant photo-detector by system modeling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3): 746-751. (in Chinese)  
汤晓君, 李玉军, 刘君华, 等. 基于系统建模的四象限光电探测器对准与微位移测量系统 [J]. 中国激光, 2009, 36(3): 746-751.
- [8] Tang Xiaojun, Liu Junhua, Chen Jian, et al. Mathematic model of ray-path of four-quadrant photoelectric detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 421-426. (in Chinese)  
汤晓君, 刘君华, 陈剑, 等. 四象限光电探测器的光路数学模型[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 421-426.
- [9] Zhang Chunfu, Zhang Jun, Tang Wenyan, et al. Application of laser tracker on geometric parameters measurement of large dimensional workpieces [J]. Tool Engineering, 2002, 36(5): 26-29. (in Chinese)  
张春富, 张军, 唐文彦, 等. 激光跟踪仪在大尺寸工件几何参数测量中的应用[J]. 工具技术, 2002, 36(5): 26-29.
- [10] Russell D, Ansari H, Chen C C. Lasercom acquisition and tracking control using a CCD-based tracker [C]//SPIE, 1994, 2123: 294-303.
- [11] Feng Longling, Deng Renliang. Study on optical tracking with four-quadrant photodetector [J]. Infrared and Laser Engineering, 1996, 25(1): 16-21/15. (in Chinese)  
冯龙龄, 邓仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨 [J]. 红外与激光工程, 1996, 25(1): 16-21/15.
- [12] Zhang Chunfu, Zhang Jun, Xu Wenhai, et al. Evaluation of site measuring uncertainty of laser tracker [J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(1): 20-23. (in Chinese)  
张春富, 张军, 许文海, 等. 激光跟踪仪现场测量不确定度的评定[J]. 计量学报, 2005, 26(1): 20-23.
- [13] Bursanescu L, Vasiliu V. Laser system for high accuracy alignment and positioning [J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(5): 1606-1690.