

·测试、试验与仿真·

四象限探测器用于激光跟踪仪目标脱靶量测量

周培松¹, 卢荣胜¹, 周维虎², 董登峰², 李万红¹, 朱涵²

(1.合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009; 2.中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要:介绍了基于四象限探测器的激光跟踪仪目标脱靶量测量系统。根据四象限探测器的工作原理和跟踪激光的光斑特性,分析得出目标脱靶量与四象限探测器输出电流信号的关系为非线性。针对非线性关系不易快速解算的难题,文中采用了分段线性插值算法。使用高精度位移平台对测量系统进行标定并开展了测量实验。结果表明,该系统测量速度快,每秒测量次数可达600次以上;测量精度高,在 $\pm 500 \mu\text{m}$ 量程范围内测量精度可达 $5 \mu\text{m}$ 。该系统可以广泛应用于需要微小位移测量的相关领域。

关键词:四象限探测器;分段线性插值;脱靶量;激光跟踪仪

中图分类号: TN244; TN710.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0075-05

Measurement System for Laser Tracker's Target-missing Quantity Based on Four-quadrant Detector

ZHOU Pei-song¹, LU Rong-sheng¹, ZHOU Wei-hu², DONG Deng-feng², LI Wan-hong¹, ZHU Han²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The measurement system for laser tracker's target-missing quantity based on four-quadrant detectors is introduced. According to the operation principle of the detector and the facula characteristic of tracking laser, the relationship between target-missing quantity and the output current of the four-quadrant detector is nonlinear. According to the problem, piecewise linear interpolated algorithm is adopted. The measurement system is calibrated by a high-precision displacement platform and measurement experiments are performed. The results show that the system has a fast measurement speed and high measurement accuracy. The time of measurement per second is up to 600 times or more and the accuracy is 5 m within $\pm 500 \text{ m}$ measurement range. The system can be widely applied in the related fields.

Key words: four-quadrant detector; piecewise linear interpolation; target-missing quantity; laser tracker

激光跟踪仪是一种高精度的便携式三维坐标测量设备^[1],用于超大空间几何量精密测量和动态轨迹测量(三维坐标、尺寸、形状、位置、姿态等),在航空航天、造船、轨道交通、高端制造等领域具有广泛应用。激光跟踪仪一般由激光跟踪头、控制器、用户计算机、反射器(靶镜)及测量附件等组成^[2]。激光跟踪仪工作的基本原理是在目标点上安置一个反射器,跟踪头发出的指示激光入射到反射器上,又返回到

跟踪头。当指示光入射到反射器中心位置,则激光原路返回;当反射器移动,指示光偏离反射器中心时,反射光会在光电探测器上产生一个偏移值,即脱靶量。控制器会根据脱靶量控制电机转动以调整光束方向直到偏移值为零,实现对反射器的跟踪。

激光跟踪仪根据跟踪目标脱靶量控制方位、俯仰伺服电机跟踪目标。目标脱靶量的高精度实时测量对于提高激光跟踪仪的跟踪精度有很大的意义。

收稿日期:2013-09-28

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120022)

作者简介:周培松(1989-),男,河南省周口市人,硕士研究生,主要研究方向为测控电子学;卢荣胜(1963-),男,安徽庐江人,博士研究生导师,主要研究方向为机器视觉、自动光学检测与图像处理。

设计了基于四象限探测器的目标脱靶量测量系统,对测量原理进行了详细推导,给出了系统的设计方案,并搭建实验平台进行了验证。结果表明,该测量系统具有测量速度快、测量精度高等优点。

1 脱靶量测量的实现原理

四象限探测器是利用集成电路光刻技术将一个圆形或方形的光敏面分割成四个相互隔离的面积相等、形状相同、位置对称的象限区域^[3]。受到光照时,每个象限有独立的电流信号输出,电流的大小正比于所接收的光能信号,根据各象限上输出电流可以确定光斑中心的位置^[4]。

激光能量模型通常呈二维高斯分布

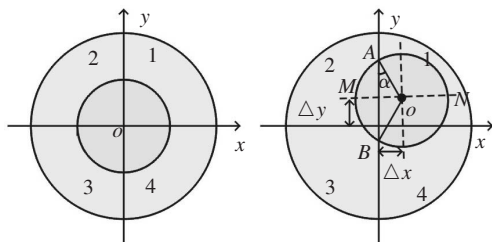
$$\Phi(x, y) = \frac{i}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (1)$$

其中, i 为系数, σ_x, σ_y 为激光器尺寸^[5]。

在实际应用中,激光跟踪仪发出的指示激光为圆形光斑。为了提高计算速度,激光能量模型一般被近似视为均匀分布,由此引起的误差可通过标定由补偿的方法来消除。

1.1 脱靶量的推导

激光跟踪仪指示激光经反射器反射,照射到四象限探测器的中心时,如图 1a 所示:每个象限输出的电流相等,即 $I_1 = I_2 = I_3 = I_4$, 这时偏差输出信号为 $(f_x, f_y) = (0, 0)$ 。



(a) 光斑照射在探测器中心 (b) 光斑偏离探测器中心

图 1 光斑位置与各象限照射面积的关系

当反射器移动时,所接收的反射光斑偏离探测器中心,如图 1b 所示,设光斑在每个象限的投影面积分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 , 每个象限对应的输出电流分别是 I_1, I_2, I_3, I_4 。偏差输出信号 (f_x, f_y) 与光斑在四个象限的投影面积差成正比^[6], 因此偏差输出信号可以表

示为

$$f_x = k \frac{I_1 + I_4 - I_2 - I_3}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = k \frac{S_1 + S_4 - S_2 - S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (2)$$

$$f_y = k \frac{I_1 + I_2 - I_3 - I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = k \frac{S_1 + S_2 - S_3 - S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (3)$$

其中, k 为标定系数, 可由标定得到。

设激光光斑的直径为 r , 由图 1b 及式 (2) 分析可知

$$f_x = k \frac{S_1 + S_4 - S_2 - S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = k \frac{S_{\text{扇}OANB} - S_{\text{扇}OAMB} + 2 \times S_{\Delta OAB}}{\pi r^2} \quad (4)$$

其中,

$$S_{\text{扇}OANB} = \frac{1}{2}(\pi + 2\alpha)r^2 = \frac{r^2}{2} \left[\pi + 2 \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x}{r} \right) \right] \quad (5)$$

$$S_{\text{扇}OAMB} = \frac{1}{2}(\pi - 2\alpha)r^2 = \frac{r^2}{2} \left[\pi - 2 \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x}{r} \right) \right] \quad (6)$$

$$S_{\Delta OAB} = \Delta x \sqrt{r^2 - \Delta x^2} \quad (7)$$

将式 (5)~式 (7) 代入式 (4), 得

$$f_x = k \frac{2 \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x}{r} \right) + 2 \Delta x \sqrt{r^2 - \Delta x^2}}{\pi r^2} \quad (8)$$

同理有

$$f_y = k \frac{2 \sin^{-1} \left(\frac{\Delta y}{r} \right) + 2 \Delta y \sqrt{r^2 - \Delta y^2}}{\pi r^2} \quad (9)$$

通过 Matlab 仿真发现, 偏差输出信号与光斑中心位置坐标 (即脱靶量) 并不成线性关系^[7]。

将式 (8) 右端记为 $f(\Delta x)$, 有

$$f_x = f(\Delta x) \quad (10)$$

因此, x 方向的脱靶量可以表示为

$$\Delta x = f^{-1}(f_x) = f^{-1} \left(k \frac{I_1 + I_4 - I_2 - I_3}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \right) \quad (11)$$

同理, y 方向上的脱靶量可以表示为

$$\Delta y = f^{-1}(f_y) = f^{-1} \left(k \frac{I_1 + I_2 - I_3 - I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \right) \quad (12)$$

1.2 脱靶量的解算

由推导过程可知, 脱靶量的解算方程为隐式方程。为解得脱靶量 $\Delta x, \Delta y$, 常用的解算方法有查表法、迭代法和分段线性插值法等。

查表法^[8]就是预先解出每一个 f_x, f_y 对应的 $\Delta x, \Delta y$ 值, 并将结果存放在表格内, 查表时根据查表地址

读取相应的数据即可得到最终结果。该方法计算量小,但所需程序存储空间较大。迭代法是根据初始值多次进行迭代运算,满足出口条件(一般为满足精度要求或者迭代次数上限)时停止迭代,并将迭代结果输出。这种方法程序存储量小,但计算量较大,对于实时性要求较高的场合不适用。分段线性插值法就是在小范围内用分段的直线去拟合曲线,并用直线段来代替曲线作近似处理的方法。该方法兼顾精度与速度,程序存储量相对较小、计算速度快,适用于对实时性和精度都要求相对较高的场合。

现采用分段线性插值算法将式(8)右端分段线性化,具体实现为:给定插值节点 $\Delta x_0 < \Delta x_1 < \dots < \Delta x_n$,这些插值结点对应的函数值为 $f(\Delta x_k)(k=0, 1, \dots, n)$,求一个分段函数 $I_h(\Delta x)$,使其满足:

$$(1) I_h(\Delta x) = f(\Delta x_k), (k=0, 1, \dots, n);$$

(2) 在每个区间 $[\Delta x_k, \Delta x_{k+1}]$ 上, $I_h(\Delta x)$ 是个一次函数。

由线性插值原理^[9], $I_h(\Delta x)$ 是个折线函数,在每个区间 $[\Delta x_k, \Delta x_{k+1}]$ 上, $(k=0, 1, \dots, n)$ 有

$$I_h(\Delta x) = \frac{\Delta x - \Delta x_{k+1}}{\Delta x_k - \Delta x_{k+1}} f(\Delta x_k) + \frac{\Delta x - \Delta x_k}{\Delta x_{k+1} - \Delta x_k} f(\Delta x_{k+1}) \quad (13)$$

标定实验时,使用精密位移平台移动激光器,使光斑在探测器表面产生已知脱靶量 Δx_k ,并由检测电路测出相对应的偏差输出信号 $f(\Delta x_k)$,得到一系列的 $(\Delta x_k, f(\Delta x_k))$ 值。其中, Δx_k 为 x 方向脱靶量, $f(\Delta x_k)$ 为对应的偏差输出信号, $(k=0, 1, \dots, n)$ 。这样就可以求得 $I_h(\Delta x)$,也即将式(8)右端分段线性化。

于是就可以根据偏差输出信号 f_x 很方便的解算出 x 方向脱靶量 Δx 。同理,可以解算出 y 方向脱靶量 Δy 。

1.3 脱靶量测量的分辨率

对式(8)、式(9)右端进行泰勒展开,分别取一级近似,有

$$f_x = k \frac{2\Delta x}{\pi r} \quad (14)$$

$$f_y = k \frac{2\Delta y}{\pi r} \quad (15)$$

因此,脱靶量测量的分辨率可以表示为

$$R_{\Delta x} = \frac{\pi r}{2} \Delta f_x \quad (16)$$

$$R_{\Delta y} = \frac{\pi r}{2} \Delta f_y \quad (17)$$

其中, $\Delta f_x, \Delta f_y$ 是电路所能检测到的最小变化量^[10]。

2 系统设计

激光照射在四象限探测器表面,探测器会输出四路与光能大小相关的弱电流信号,经 I/V 转换、放大滤波后将信号调理为0~5 V的标准信号,送入12位模数转换器ADS7864进行模数转换。处理器通过对数字量的分析计算得到脱靶量信息,并将脱靶量数据发送至上位机进行实时显示。

整个系统的硬件结构框图如图2所示。

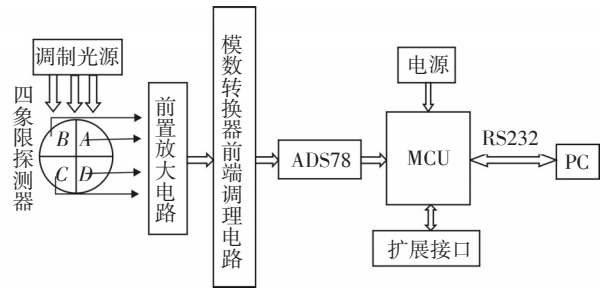


图2 脱靶量测量系统框图

为提高程序的可读性和可维护性,软件设计采用自顶向下、模块化设计的思想。程序主要包括ADS7864采集模块、定时器延时模块、脱靶量计算模块、误差修正模块以及串口发送模块等。为防止程序跑飞,保证测量系统稳定性,在程序中还加入了看门狗设计。

软件设计主程序流程图如图3所示。

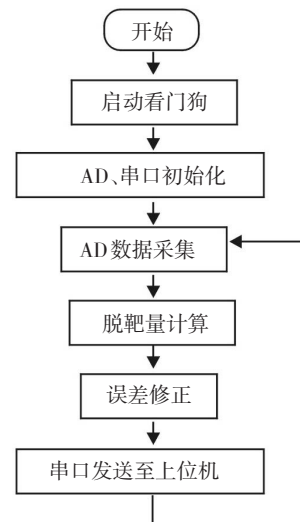


图3 主程序流程图

通过Keil仿真,程序每次脱靶量测量总执行时间为0.001 613 09 s。这样,该系统可以实现每秒钟619次目标脱靶量测量。

3 实验及数据分析

搭建激光-探测器位移标定平台,完成了对脱靶量测量系统的性能测试,并对测试数据进行了分析。实验所用激光器为半导体激光器,型号为DB650-2.5-3-FA,波长为650 nm,额定功率为2.5 mW;位移平台选用德国PI公司的M-112.1DG高精度电机驱动位移平台,精度为1 μm ;四象限探测器选用OSQ-100IC,实验环境为室内夜晚。

将激光器固定在位移台上,调整四象限探测器

的方位以使激光经光学系统后垂直入射在探测器表面。以0.1 mm为步长控制位移平台使激光在探测器表面移动,同时上位机接收处理器输出的脱靶量数据。实验装置如图4所示,

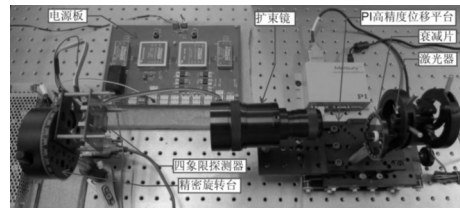


图4 实验光路图

为了使实验具有可重复性,在实验时进行了10组测量(Movement代表移动量,Mea代表测得值),测得结果如表1所示。

表1 测试数据表(单位: μm)

Movement	Mea1	Mea2	Mea3	Mea4	Mea5	Mea6	Mea7	Mea8	Mea9	Mea10
0	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1	0	1
100	98	100	102	99	98	98	98	100	98	97
200	201	204	200	201	200	199	202	202	201	201
300	297	301	299	300	301	300	304	298	304	297
400	402	400	401	402	400	398	401	400	404	400
500	502	504	502	504	500	500	499	502	502	502
600	601	599	597	604	602	602	596	597	599	604
700	693	700	697	697	697	704	700	700	695	693
800	802	802	803	798	801	803	803	801	798	798
900	900	901	897	901	906	902	904	900	895	904
1 000	996	1 003	998	1 008	998	1 006	1 000	997	1 003	1 006

将数据导入Matlab,绘出误差分布图如图5所示。

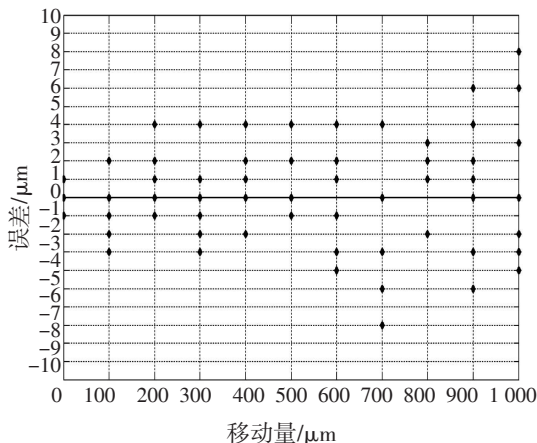


图5 测量误差分布图

由表1和图5可知,距离探测器的中心的距离越近,测量误差越小;距离探测器中心的距离越远,测量误差越大。在500 μm 的量程内,测量误差在5 μm 以内;在1 000 μm 的量程内,测量误差在8 μm 以内。

4 结束语

基于四象限探测器设计了激光跟踪仪目标脱靶量测量系统。实验表明,该系统测量速度快,每秒测量次数可达600次以上;测量精度高,在 $\pm 500 \mu\text{m}$ 量程范围内精度可达5 μm 。

设计所采用的分段线性插值算法可以根据需求进行更细小的分段,以达到更高的测量精度。如若将处理器MCU换成DSP,可以进一步提高测量速度;

将12位AD换成16位甚至24位AD转换器,可以进一步提高测量分辨率。该目标脱靶量测量系统可以广泛应用于微位小移测量的相关领域。

参考文献

- [1] 王孝坤.利用激光跟踪仪测量超长导轨直线度的方法[J].应用光学,2013,34(4):686-689.
- [2] 李广云.LTD500激光跟踪测量系统原理及应用[J].测绘工程,2001,10(4):3-8.
- [3] 余峰,何焯,李松,等.四象限光电检测系统的定位算法研究及改进[J].应用光学,2008,29(4):493-497.
- [4] 夏江涛.太阳能板自动对准装置的设计[J].光电技术应用,

2010,25(1):45-48.

- [5] 顾黎明.合肥光源同步光位置测量中关键技术的研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
- [6] 司栋森,李增智,王晓旭.采用四象限探测器的智能跟踪定位算法[J].西安交通大学学报,2012,46(4):13-17.
- [7] 张雷,张国玉,刘云清.影响四象限探测器探测精度的因素[J].中国激光,2012,39(6):1-5.
- [8] 郭绍忠,许瑾晨,陈建勋.一种改进的超越函数通用算法[J].计算机工程,2012,38(15):31-34.
- [9] 朱晓临.数值分析[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [10] 陈梦苇.基于象限探测器的光斑中心定位算法研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

(上接第70页)

3 电路实际设计与实验

为进一步验证变速调焦电路设计的正确性,对电路进行实际设计与实验。实际电路设计中,选用Xilinx公司XC3S400 FPGA作为可编程控制器件,选用LINEAR公司16位D/A转换器,通过LM358运算放大器、全桥驱动芯片L298和匹配晶体管NPN 2N5551和PNP 2N5401搭建模拟变速调焦电路,实际电路如图8所示。电路通过晶体管作为开关器件,无需继电器,工作稳定可靠。

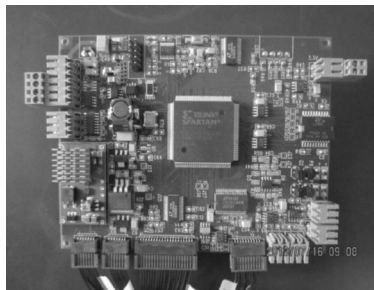


图8 调焦电路实物图

为检测电路的实际工作效果,将电动调焦镜头与变速调焦电路联合调试,镜头选用高清富士能电动变焦镜头HD17X7.5A-YN1。通过实验表明,电路具有良好的变速调节功能,电机的最大工作电压为10.5 V,实际效果达到预定技术指标。

4 结论

通过理论与实验结果表明,变速调焦电路设计

正确,功能可靠,能够有效应用于红外成像、可见光成像等焦距调节应用领域。由于电路具有变速调焦功能,可有效防止在聚焦环节由于过调或欠调引起的图像虚焦问题,另外变速调焦电路还可应用在自动聚焦系统中,特别是分段聚焦算法下,通过变速调焦,在最佳聚焦点搜索阶段采用快速模式,在最佳聚焦点附近采用慢速模式,从而节省聚焦时间,提高聚焦精度。该电路体积小、结构紧凑,无需继电器等机械开关,在视频监控应用领域前景广阔。

参考文献

- [1] 李朝辉,王智,乔克,等.三线阵立体测绘相机高精度调焦技术及实现[J].光电工程,2009,36(10):41-46.
- [2] 贾学志,王栋,张雷,等.轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验[J].光学精密工程,2011,19(8):1824-1831.
- [3] 黄和平,夏寅辉,安成斌,等.大口径、长焦距红外系统调焦机构设计[J].激光与红外,2005,35(10):745-747.
- [4] 孙利军.用于短弧氙灯的光学调焦机构[J].光电技术应用,2009,27(6):26-28.
- [5] 余孟凤,杨鸣,杨翠翠.基于CPLD的高分辨率视频展台快速自动聚焦方法及实现[J].光学仪器,2010,32(6):24-29.
- [6] 陈笠,俞信,吴旭斌,等.大型光电跟踪系统的调焦控制[J].红外与激光工程,1998,27(4):47-53.
- [7] 丁亚林.空间遥感相机调焦机构设计[J].光学精密工程,2001,9(1):35-38.
- [8] 杨金宝,杨桦,张挺,等.红外热像仪硬件通讯电路的设计与实现[J].光电技术应用,2013,28(2):62-66.
- [9] 康华光,陈大钦,张林,等.电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2006:34-36.