

文章编号 1004-924X(2017)12-3120-08

二维光电水平倾角测量系统

王洪远, 段发阶*, 蒋佳佳, 张 聪

(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:针对高端装备制造中对大尺度机床误差测量与补偿的要求,本文基于光学自准直原理和液体表面反射原理,研制了一种二维光电水平倾角测量系统以实现机床滚转角和俯仰角的测量。该系统使用半导体激光器发射激光,经光学自准直系统于待测硅油表面将被测倾角放大二倍。然后,由位置敏感探测器感测光斑位置变化,输出包含角度信息的光电流信号,并由低噪声四路同步微弱信号处理电路进行相同倍数的放大以减小误差。最终,由高速采集卡进行数据采集,经均值滤波、曲线拟合、解算处理后将其转化为倾角信息,从而实现二维角度测量。在光学平台进行了对比实验,结果表明:测量系统在 $-10\sim 10$ mm/m(约为 $-2\ 000''\sim 2\ 000''$)量程内,角度测量误差小于 ± 0.050 mm/m(约为 $\pm 10''$),线性度优于0.25%,满足大尺度机床二维水平倾角检测对大量程、高精度、高稳定性的要求。

关键词:水平倾角测量;自准直;液体表面反射;均值滤波;曲线拟合

中图分类号: TB922; TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3120

A two-dimensional photoelectric level inclination measuring system

WANG Hong-yuan, DUAN Fa-jie*, JIANG Jia-jia, ZHANG Cong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: fjduan@tju.edu.cn

Abstract: For error measurement and error compensation of large-scale machine tools in high-end equipment manufacture, a two-dimensional photoelectric level inclination measuring system was established based on the principle of optical auto-collimation and liquid surface reflection to measure the roll angle and the pitch angle of a machine tool. Firstly, a laser diode was used as a source of the system, and the inclination was doubled on the surface of the silicone oil through an optical auto-collimation system. Then, spot position changes were detected by a position sensitive detector, the photoelectric signal containing angle information was output and the four low noise I-V conversion and consistent amplifying circuits were used to amplify signals and to reduce errors. Finally, a high-speed data acquisition system was used to acquire data and to convert them into inclination information by mean filtering, curve fitting and solution processing to accomplish two-dimensional inclination measurement. A contrast experiment was performed on an optical platform. The results show that the angle errors are

收稿日期: 2017-05-27; **修订日期:** 2017-06-26.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0204800); 国家 863 计划资助项目(2013AA102402); 国家自然科学基金资助项目(No. 61501319); 天津市自然科学基金资助项目(No. 17JJCQNJC01100); 光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题资助项目(No. GD2015007); 海洋经济创新发展区域示范项目资助项目(No. cxsf2014-2); 教育部博士基金资助项目(No. 20130032110054); 微光机电系统技术教育部重点实验室(天津大学)开放基金资助项目(No. MOMST2015-7)

less than ± 0.050 mm/m (about $\pm 10''$) and the linearity exceeds 0.25% within the system measuring range of $-10-10$ mm/m (about $-2\ 000''-2\ 000''$). It concludes that the system meets the requirements of large range, high precision and high stability and achieves two-dimensional level inclination measurement of large-scale machine tools rapidly.

Key words: level inclination measuring; auto-collimation; liquid surface reflection; mean filtering; curve fitting

1 引言

角度作为精密制造、仪器仪表、天文研究、水利工程和导弹卫星发射等领域中的重要参数之一^[1-4],随着加工制造业的迅猛发展,现有工业体系对其测量范围、精度要求越来越高,研究角度精密测量具有重要意义。

国际上,美国 API 公司采用高精度“液体电子传感”技术,实现了在 $\pm 800''$ (± 5.8 mm/m) 范围内分辨力为 $0.1''$ ($0.48\ \mu\text{m}/\text{m}$),精度达 $\pm 1''$ ($\pm 4.8\ \mu\text{m}/\text{m}$);瑞士 WYLER 公司分辨力可达 $0.2''$ ($1\ \mu\text{m}/\text{m}$);国内方面,国立台湾大学的 Fan 等人^[5-6]通过结合 DVD 光学读取头和双层摆机械结构的方法在 $\pm 20''$ 的测量范围内实现 $\pm 0.5''$ 的精度;南洋理工大学 Cheng 等人^[7]通过迈克尔逊干涉的方法实现 $\pm 50''$ 范围内重复性 $0.1''$;天津大学 Wang 等人^[8]利用线性差动变压器式传感器最终实现 $\pm 400''$ 范围内分辨力 $0.1''$;中科院西安精密机械研究所的孙国燕等人^[9]通过二维自准直仪和坐标系旋转变换矩阵法设计了一种三维测角装置,实现在 $\pm 20''$ 视场范围内,偏摆角、俯仰角、滚转角测量精度分别达到 $2.2''$ 、 $2.5''$ 、 $8.7''$;哈尔滨工业大学、长春理工大学、西北工业大学也分别通过面阵摄像机参数标定、图像清晰度检测、导航传感器测角误差补偿等方法在角度测量方面取得较好的效果^[10-12]。

为实现高端装备制造中大尺度机床的阿贝误差测量与补偿需求,避免传统机床误差测量过程中需使用激光干涉仪等进行测量的复杂组件安装过程,针对不同形式大型三轴机床设计一种基于光学自准直原理和液体表面反射原理的二维光电水平倾角测量系统并配有机床倾角误差存储、处理以及误差补偿软件。测量系统利用液体在地表受重力静止时始终保持水平的原理,结合光学自准直原理,将其倾角放大 2 倍后由 PSD 进行光斑

位置变化感测,输出包含角度信息的光电流信号,由低噪声 4 路同步微弱信号处理电路进行放大,结合 4 通道 NI-9234 数据采集卡对数据进行采集,对输出数据进行处理,并将其转化为待测二维水平的倾角信息。实验证明本方法可在大量程范围内实现二维水平倾角测量,且具有高精度和高可靠性等特点,在工程实践中具有良好应用前景。

2 二维光电水平测量系统原理

2.1 PSD 定位原理

位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD),是一种基于非均匀半导体横向光电效应对入射光或粒子位置敏感的器件,其与 CCD 等的区别在于,PSD 为连续型模拟器件,克服了阵列型器件分辨率受像元尺寸限制的缺点,并且其探测的为光强重心,对光斑大小及均匀性无特殊要求^[13]。

本文采用德国 First Sensor 公司的双面型 PSD,其等效电路如图 1 所示,其中 P 为电流源, D 为理想二极管, C_J 为结电容, R_{SH} 为结电阻, R_P 为定位电阻。双面型 PSD 由于其电流分路少,具有高灵敏度、高线性度以及高分辨率等特点^[14]。

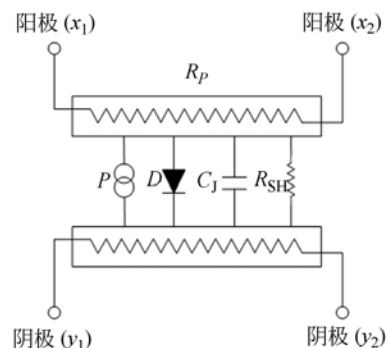


图 1 双面型 PSD 等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of duo-lateral PSD

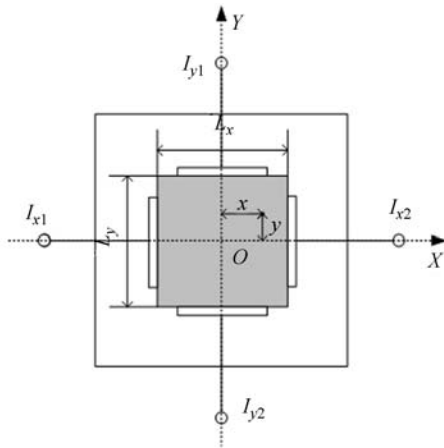


图 2 双面型 PSD 定位原理图

Fig. 2 Position schematic of duo-lateral PSD

图 2 为双面型 PSD 定位原理,根据基尔霍夫电压定律以及电阻计算公式,推导得到光斑重心位置,如式(1)、(2)所示:

$$\frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x2} + I_{x1}} = \frac{2R_s}{R_s + 2R_L} \cdot \frac{x}{L_x} = K \frac{x}{L_x}, \quad (1)$$

$$\frac{I_{y2} - I_{y1}}{I_{y2} + I_{y1}} = \frac{2R_s}{R_s + 2R_L} \cdot \frac{y}{L_y} = K \frac{y}{L_y}, \quad (2)$$

其中: I_{x1} 、 I_{x2} 、 I_{y1} 、 I_{y2} 分别为 PSD4 路输出电流信号, L_x 、 L_y 为 PSD 光敏面两方向边长, R_s 为表面层电阻, R_L 为负载电阻, x 、 y 为光斑重心位置。

2.2 系统自准直原理

测量系统结构示意图如图 3 所示。固定在装置侧壁上的 633 nm 半导体激光器发出的线偏振光经过立方体反射镜反射改变光路方向后,由偏振分光镜分为偏振方向互相垂直的两束光,其中偏振方向为 S 的偏振光作为无用光在偏振分光镜的分光面被反射;偏振方向为 P 的偏振光作为测量光则透过偏振分光镜射向四分之一波长波片变为圆偏振光,利用底部油罐中硅油的表面反射使其反射后再次通过波片,导致其相位发生 90° 偏移,返回偏振分光镜时,在分光面发生反射,最后由位于 PSD 和偏振分光镜间的聚焦透镜将其聚焦在 PSD 上。其中偏振分光镜和四分之一波长波片的组合避免了反射光反射回激光头,从而提高激光头输出稳定性。

2.3 系统角度测量原理

当装置相对于水平面发生二维水平倾角变化 θ 时,油面始终保持水平,光束经硅油表面反射,

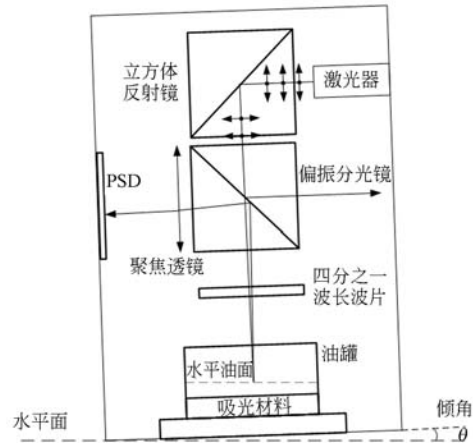


图 3 测量系统结构示意图

Fig. 3 Framework of measuring system

通过四分之一波长波片后,由偏振分光镜反射向聚焦透镜,再由聚焦透镜聚焦在位于透镜焦平面上的 PSD 光敏面上形成一个稳定的光斑,通过 PSD 进行位置变化感测。根据自准直原理,可知此时射向 PSD 的光束角度变化为水平倾角变化 θ 的 2 倍,从而提高了系统测量精度,使水平倾角更易于检测。

当装置整体保持水平时,由于内部硅油受重力作用,油面与水平面平行,此时光斑重心位于 PSD 光敏面中心位置。当装置整体在二维水平方向上发生角度偏移时,光斑位置会在 PSD 光敏面上发生变化。以俯仰角为例,装置角度偏移 θ 与对应光斑位移变化 d_y 关系如图 4 所示。

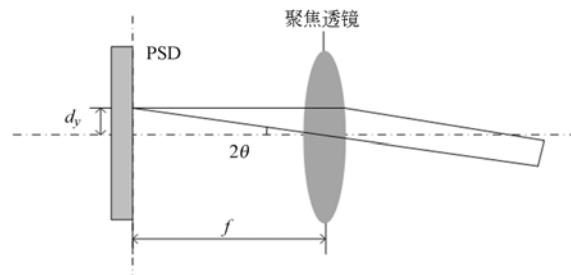


图 4 角度测量原理图

Fig. 4 Schematic of angle measurement

分析易知:

$$\tan(2\theta) = \frac{d_y}{f}, \quad (3)$$

其中: f 为聚焦透镜焦距, d_y 为光斑在 PSD 光敏

面上 Y 方向位移。X 轴方向,滚转角测量原理与之相同。

3 测量装置结构设计

为保证检测的准确性,整个装置需以水平面为参考对象,入射光线需垂直于装置底面以保证整个装置相对于水平面所产生的偏角即为待测倾角。固定 PSD 使其中心位置与聚焦透镜中心同轴,并通过螺纹结构对激光器位置进行微调,通过螺柱锁死结构适度调整输出光斑高度使其尽量照射在 PSD 的中心位置,设计如图 5 所示的机械结构以达到最佳检测效果。

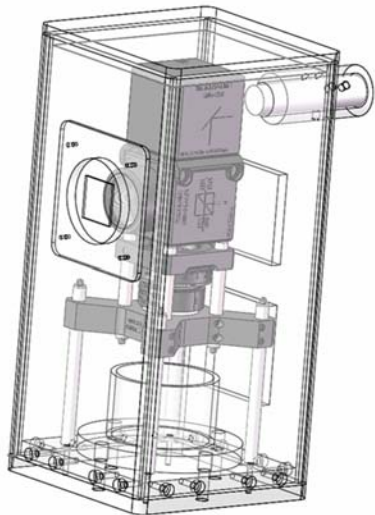


图 5 装置机械结构图

Fig. 5 Mechanical structure of device

由于入射光在硅油表面发生反射的同时还会发生折射,部分折射光通过油灌底面反射被聚焦透镜汇聚后,仍会被 PSD 所接收,对此光束光路进行分析,其模型如图 6 所示。其出射角 β 与水平方向上角度偏移 θ 之间关系可表示如下:

$$\beta = \arcsin\{n \cdot \sin[2\theta - \arcsin(\sin \theta / n)]\} - \theta, \quad (4)$$

其中: n 为液体折射率,若液体选用为运动粘度较大的硅油时,其折射率约为 1.4。通过 MATLAB 仿真可知,当 $n=1.4$,水平方向上角度偏移 θ 较小时, β 与 θ 之间近似成线性关系,其斜率 k 约等于 0.8,折射产生光斑与表面反射所产生光斑角

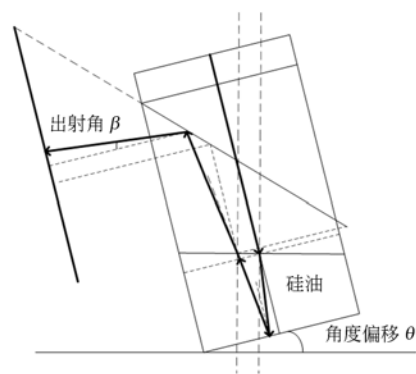


图 6 折射光路示意图

Fig. 6 Diagram of refraction

度变化速率不同,因此需在油罐底部添加吸光材料以避免折射光斑与反射光斑混叠对仪器测量准确性造成影响。

为消除室内背景光对仪器结果产生的影响,需对仪器进行封闭处理,并通过由优良纤维组成的黑色毛面自粘胶纸作为吸光材料对仪器内部进行背景光的吸收处理,以保证背景光降到最小,以提高仪器测量精度。

4 信号调理电路设计与数据采集

PSD 输出光电流量级由所接收光斑光功率和 PSD 灵敏度(激光波长为 633 nm 时,一般为 0.4 A/W)所共同决定,由于采用自准直原理和液体表面反射原理,PSD 接收到的光功率较小,导致其在测量过程中输出微安级直流缓变信号。本系统采用 4 路高精度 I-V 转换电路和斩波稳零放大器搭建的反比例放大电路对 PSD 输出的微弱电流信号进行电流-电压转换以及放大。

4.1 系统信号调理电路设计

为尽量实现 4 路信号放大倍数相同,不影响角度运算结果。系统采用 ADI 公司一致性较好的低噪声自稳零技术的超低失调、温漂、偏置电流 4 通道轨至轨放大器。其采用乒乓技术,同时通过自稳零和斩波稳零,无需外置滤波电路就可以消除在直流测量中的主要误差源 $1/f$ 噪声,减小了输出噪声,校正了直流和低频失调,从而满足高精度直流测量要求。

结合低温漂 0.1% 高精度精密电阻实现一致

性较好的 4 路电流-电压转换电路设计。其电路模型如图 7 所示。为避免运算放大器开环增益曲线和噪声增益曲线以 -40 dB 速度相交,导致系统不稳定,引起自激,通常需引入相位补偿电容 C_F 并联于反馈电阻两端,使放大器稳定工作,避免振荡。

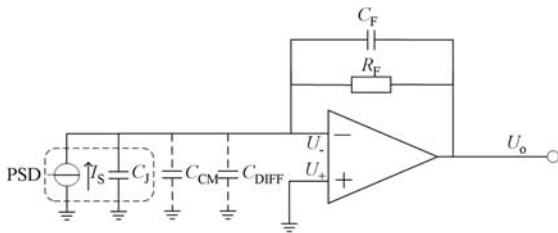


图 7 PSD 电流-电压转换电路模型图

Fig. 7 Circuit model of PSD I-V conversion

其中: I_S 为 PSD 输出光电流, C_J 为 PSD 结电容, C_{DIFF} 和 C_{CM} 分别为运算放大器自身所带的差模输入寄生电容和共模输入寄生电容。 C_F 采用温度补偿型陶瓷电容, 其容值大小满足公式(5)、公式(6):

$$\frac{1}{2\pi R_F C_F} = \sqrt{\frac{GBP}{4\pi R_F (C_J + C_{CM} + C_{DIFF})}}, \quad (5)$$

$$\frac{GP}{1 + \frac{C_J + C_{CM} + C_{DIFF}}{C_F}} > \frac{1}{2\pi R_F C_F}, \quad (6)$$

为进一步减小失调电压和温漂、提高共模抑制比、增大放大倍数,放大部分采用斩波稳零集成运算放大器实现反比例放大电路。其通过主放大器、校零放大器、补偿网络以及 2 个高品质记忆电容协调工作,利用动态较零技术降低失调和零漂,从而实现自动调零。

4.2 数据采集处理模块

数据采集部分采用 NI-9234 数据采集卡实现电压信号采集,其包含 24 位 4 路 ± 5 V 输入范围模拟电压的同步采样输入通道,采样率可达 51.2 kHz,具有 102 dB 的动态范围,并且每路模拟通道内置增益可调的放大器和可自动调节采样率的抗混叠滤波器。

通过上位机对 4 路输出电压信号进行平均值滤波后,求得位置相关变量 $(U_{x2} - U_{x1}) / (U_{x2} + U_{x1})$ 、 $(U_{y2} - U_{y1}) / (U_{y2} + U_{y1})$ 。

5 测量系统标定及测试

信号处理电路做外壳噪声屏蔽处理后,将系统置于位于高精度气浮光学平台上的可调旋转俯仰平台上,通过 DMI825 数显倾角仪对其标定后,并进行仪器对比实验以及仪器重复性测量试验。DMI825 为一款高精度双轴数显倾角仪,其角度分辨力可达 0.02 mm/m,且具有弧度、角度、毫米每米 3 种显示模式。

使用 DMI825 数显倾角仪将位于气浮平台上的可调旋转俯仰平台调平,实验通过将 DMI825 数显倾角仪安放在自主设计光电水平倾角测量系统顶部,改变可调旋转俯仰平台在待测方向的角度,同时保证另一方向角度不变,待液面稳定后,采集两仪器数据计算上述位置相关变量,将位置相关变量 $(U_{x2} - U_{x1}) / (U_{x2} + U_{x1})$ 、 $(U_{y2} - U_{y1}) / (U_{y2} + U_{y1})$ 通过 MATLAB 最小二乘拟合对所设计光电水平倾角测量系统进行系统标定,系统标定采用 PSD 中心区域精度较高的角度变化间隔为 0.1 mm/m 的两组数据,标定完成后对两仪器进行对比实验及仪器重复性测量实验。

光电水平倾角测量系统输出结果(mm/m)与 DMI825 数显倾角仪对比实验结果如表 1、表 2 所示。

表 1 仪器 X 轴方向对比实验结果

Tab. 1 Comparison of instrument at X-axis

光电水平倾角测量系统	数显倾角仪 (DMI825)	绝对误差 / (mm · m ⁻¹)
-9.978 84	-10.014	0.035 16
-8.968 69	-9.015	0.046 31
-7.893 35	-7.943	0.049 65
-7.038 27	-7.080	0.041 73
-6.010 51	-6.020	0.009 49
-4.897 51	-4.930	0.032 49
-3.952 6	-4.001	0.048 4
-3.014 65	-3.039	0.024 35
-1.918 66	-1.960	0.041 34
0.186 5	0.163	0.023 5
2.017 45	1.985	0.032 45
3.976 67	3.934	0.042 67
5.971 62	5.989	-0.017 38
8.001 28	7.960	0.041 28
10.015 12	10.018	-0.002 88

表 2 仪器 Y 轴方向对比实验结果

Tab. 2 Comparison of instrument at Y-axis

光电水平倾角测量系统	数显倾角仪 (DMI825)	绝对误差 / (mm · m ⁻¹)
10.044 18	10.045	-0.000 82
8.927 15	8.940	-0.012 85
7.941 3	7.975	-0.033 7
7.009 48	7.030	-0.020 52
6.041 96	6.060	-0.018 04
4.991 13	4.999	-0.007 87
4.085 21	4.060	0.025 21
3.009 55	3.020	-0.010 45
2.080 42	2.070	0.010 42
-0.362 46	-0.332	-0.030 46
-2.520 65	-2.491	-0.029 65
-3.997 12	-3.993	-0.004 12
-5.919 71	-5.926	0.006 29
-8.062 46	-8.081	0.018 54
-10.215 74	-10.180	-0.035 74

通过仪器对比实验,可知所设计基于自准直原理和液体表面反射原理的二维光电水平倾角测量系统,其角度测量对绝对误差在 ±0.050 mm/m(约为 ±10")内。

对光电水平倾角测量系统 X、Y 两轴分别做重复性测量实验,对仪器重复性进行验证。其折线图如图 8、图 9 所示。分别对每次测量结果进行数据处理,得出在 -10 ~ 10 mm/m(约为 -2 000" ~ 2 000")范围内,仪器线性度优于 0.25%。最小二乘拟合判定系数大于 0.999 9,可认为曲线自变量与因变量完全线性相关。由于 PSD 存在噪声极限精度,分析知仪器理论分辨力为 0.005 mm/m(约为 1")。

6 误差分析

6.1 PSD 非线性误差

由于 PSD 光敏面上硅片材料在制作时的不均匀性,导致光敏面上不同位置电阻率存在差异,使 PSD 输出具有非线性误差,因此一般将 PSD 光敏面划分为 A、B 两区域。其中 A 区域精度较高,为以 PSD 光敏面边长的 40%为直径的中心圆形区域。系统量程设定为 PSD 光敏面边长的 30%,此时 PSD 非线性导致系统测量误差约为

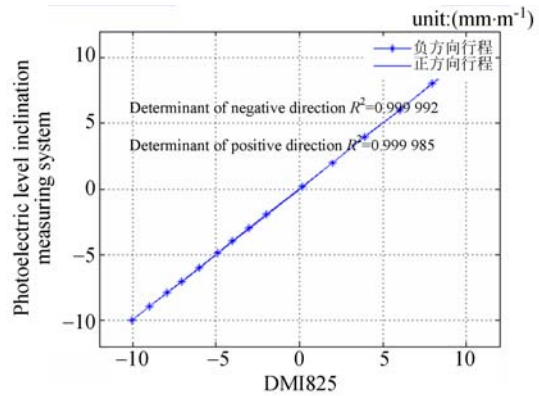


图 8 X 轴重复性实验图

Fig. 8 Repeatability test at X-axis

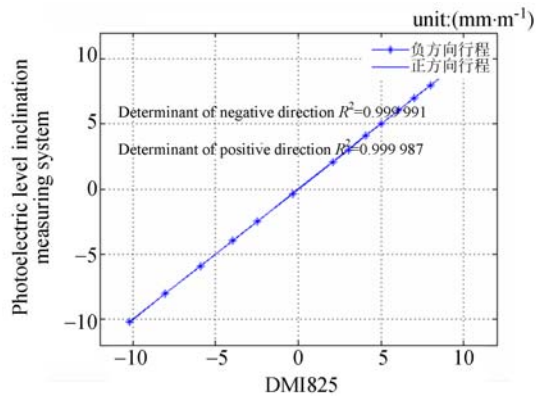


图 9 Y 轴重复性实验图

Fig. 9 Repeatability test at Y-axis

0.025 mm/m。

6.2 PSD 测量误差

PSD 暗电流会随温度变化而变化,不仅本身影响系统测量精度,而且其噪声会与电路噪声叠加在一起产生误差,PSD 暗电流典型值为 5 nA。

PSD 测量误差 ΔX_R 可通过等效电流输入噪声 I_{NSUM} 、暗电流 I_D 、光电流 I_S 以及 PSD 电阻长度 L 表示,如下公式(7)所示。

$$\Delta X_R = \frac{I_{NSUM} + I_D}{I_S} \cdot L \quad (7)$$

光电流与暗电流的等效电压输出噪声 V_S 可表示为公式(8),其中 R_F 为反馈电阻, B 为电路带宽, q 为电荷常数,等于 1.60×10^{-19} C。

$$V_S = R_F \sqrt{2q(I_S + I_D)B} \quad (8)$$

PSD 极间电阻 R_{IE} 热噪声等效电压输出噪声 V_J 可用公式(9)表示,其中, T 为绝对温度, K 为玻尔兹曼常数,等于 1.38×10^{-23} J/K。

$$V_J = R_F \sqrt{\frac{4KTB}{R_{IE}}}, \quad (9)$$

运算放大器等效电压输出噪声 V_{UN} 可表示为公式(10), 其中 U_N 为运算放大器等效电压输入噪声。

$$V_{UN} = \left[1 + \frac{R_F}{R_{IE}} \right] U_N B^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

同时还需考虑反馈电阻热噪声 V_{RF} 和运算放大器等效电流输入噪声 I_N 的影响, 如公式(11)、(12), 其中 V_{IN} 为运算放大器等效电流输出噪声。

$$V_{RF} = R_F \sqrt{\frac{4KTB}{R_F}}, \quad (11)$$

$$V_{IN} = R_F I_N B^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

总等效电压输出噪声 V_{NSUM} 、等效电流输入噪声 I_{NSUM} 分别为公式(13)、(14)。

$$V_{NSUM} = \sqrt{V_S^2 + V_J^2 + V_{UN}^2 + V_{RF}^2 + V_{IN}^2}, \quad (13)$$

$$I_{NSUM} = \frac{V_{NSUM}}{R_F}. \quad (14)$$

由公式(7)~(14)计算得电路噪声及 PSD 暗电流导致测量误差 ΔX_R 约为 0.013 mm/m。

6.3 光学畸变误差

光学系统中畸变误差会造成系统成像变形, 对本测量系统像质会有影响, 从而导致测量精度

下降。通过仿真计算得畸变误差对仪器测量精度影响约为 0.001 3 mm/m。

另外, 实际情况中由于激光垂直射向 PSD 时与激光斜射向 PSD 时其衍射光圈分布不同, 导致激光垂直入射到 PSD 时, 光斑中心与艾里光斑最大光强位置重合, 而斜射入时会稍有偏差; 以及光学系统中的像散和慧差等不对称误差也都会对系统检测精度造成影响。

7 结 论

本文设计实现了一种基于自准直原理和液体表面反射原理的新型二维光电水平倾角测量系统, 详细阐述了系统结构以及工作原理, 并对仪器进行了标定、对比实验、重复性实验以及误差分析。实验结果表明: 系统具有良好的重复性以及线性度, 在 $-10 \sim 10$ mm/m (约为 $-2\ 000'' \sim 2\ 000''$) 量程测量范围内, 角度测量绝对误差小于 ± 0.050 mm/m (约为 $\pm 10''$)。可实现二维水平倾角大量程、小体积、低成本、高精度检测, 在大量程水平倾角测量等工业领域中具有较为广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] CUI C X, FENG Q B, ZHANG B. Compensation for straightness measurement systematic errors in six degree-of-freedom motion error simultaneous measurement system[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3122-3131.
- [2] GAO W, HUANG P S, YAMADA T, *et al.*. A compact and sensitive two-dimensional angle probe for flatness measurement of large silicon wafers[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(4): 396-404.
- [3] 刘先一, 周召发, 张志利, 等. 数字天顶仪中倾角仪参数的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2325-2331.
- LIU X Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L, *et al.*. Calibration of inclinometer parameters in digital zenith camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2325-2331. (in Chinese)
- [4] 王向军, 曹雨, 周凯. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 274-280.
- WANG X J, CAO Y, ZHOU K. Methods of monocular pose measurement based on planar objects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 274-280. (in Chinese)
- [5] FAN K C, WANG T H, LIN S Y, *et al.*. Design of a dual-axis optoelectronic level for precision angle measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(5): 055302.
- [6] FAN K C, WANG T H, LIU Y C, *et al.*. Development of a dual-axis optoelectronic precision level [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2011, 8321:83213H.
- [7] CHENG F, FAN K C. High-resolution angle measurement based on michelson interferometry [J]. *Physics Procedia*, 2011, 19: 3-8.
- [8] WANG B G. Study on a new high accuracy dual-axis electronic level [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1998, 19(1): 22-27.
- [9] 孙国燕, 高立民, 白建明, 等. 三维姿态角高精度测量装置[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 963-970.
- SUN G Y, GAO L M, BAI J M, *et al.*. High ac-

- curacy three-dimensional attitude angle measuring device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 963-970. (in Chinese)
- [10] 赵振庆, 叶东, 张鑫, 等. 改进的精密测角法标定面阵摄像机参数[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1592-1599.
ZHAO ZH Q, YE D, ZHANG X, *et al.*. Calibration of area-array camera parameters based on improved exact measuring angle method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1592-1599. (in Chinese)
- [11] 丁健生, 史国权, 石广丰. 基于图像清晰度检测的光栅刻划平台调平装置[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 819-825.
DING J SH, SHI G Q, SHI G F. Grating ruling platform leveling device based on image clarity measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 819-825. (in Chinese)
- [12] 杨中光, 周军, 黄河, 等. 偏振导航传感器测角误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1424-1429.
YANG ZH G, ZHOU J, HUANG H, *et al.*. Analysis and compensation of angle errors of polarization navigation sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1424-1429. (in Chinese)
- [13] 黄梅珍. 位置敏感探测器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
HUANG M ZH. *Study on position sensitive detector*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [14] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
AN Y Y, ZENG X D. *Principle of Photoelectric Detector*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



王洪远(1993—),男,黑龙江佳木斯人,2015年于吉林大学获得学士学位,主要从事激光及光电测试技术方向研究。
E-mail: wanghy6511@.qq.com

导师简介:



段发阶(1968—),男,湖南郴州人,教授,博士生导师,1989年、1992年和1994年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事激光及光电测试技术、光纤传感技术、计算机视觉、仪器智能化、海洋声学探测技术等方向研究。E-mail: fjduan@tju.edu.cn