

文章编号 1004-924X(2015)06-1558-07

激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统

刘娇月^{1,3}, 杨聚庆^{2,3*}, 董登峰³, 周维虎³

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009;

2. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124;

3. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘要:考虑激光跟踪仪的光电瞄准与定位直接影响仪器的整体测量精度和使用性能,讨论了激光跟踪仪的光电瞄准和跟踪定位控制技术并提出了光电探测瞄准、信号调理采集、数字处理及智能跟踪伺服的系统整体技术方案。对系统关键部件进行选型,利用角锥棱镜和位敏探测器(PSD)作为光电探测核心,设计了探测光路和信号处理电路。研制了系统样机,搭建了目标位移量标准测试平台,对样机光电瞄准系统探测信号进行了测试。测试结果显示:采用该设计方案设计的激光跟踪仪样机的静态定位测量精度达到 $6\ \mu\text{m}$,随机动态跟踪测量速度大于 $1\ \text{m/s}$ 。结果表明:提出的方法可解决激光跟踪仪定位精度低、动态跟踪效果差等常见问题,可为研制高精度、大范围、大尺寸测量仪器提供技术参考。

关键词:激光跟踪仪;光电瞄准;光电跟踪;定位系统;位敏探测器;信号处理

中图分类号:TP273.5;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1558

Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker

LIU Jiao-yue^{1,3}, YANG Ju-qing^{2,3*}, DONG Deng-feng³, ZHOU Wei-hu³

(1. Henan Polytechnical Institute, Nanyang 473009, China;

2. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: yangjuqing@aoe.ac.cn

Abstract: As the optoelectronic aiming and orientation of an optoelectronic tracker effect directly the overall measurement accuracy and operational performance of instruments, this paper proposes an improved design scheme. Firstly, the optoelectronic aiming and orientation control technology of the laser tracker was analyzed, and a systemic technological scheme for optoelectronic detection and aiming, signal regulate acquisition, digital signal processing and intelligent tracking servo was proposed. The key components in the system were selected, and the detection optical path and signal processing circuit were designed by using a cube-corner prism and a Position Sensing Detector(PSD) as the photoelectric detecting core. Then, a system prototype was developed and a standard test platform for target displacement was established to test the detecting signals of photoelectronic aiming system in the prototype. The tested results demonstrate that the proposed system performance index

收稿日期:2015-01-15;**修订日期:**2015-02-26.

基金项目:科技部国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ120022);中国科学院科研装备研制项目(No. 090206A01Y);北京工业大学研究生科技基金资助项目(No. ykj-2014-11443)

has achieved, in which the static precision of the position measurement is up to $6\ \mu\text{m}$, and the stochastic dynamic tracking measurement speed is greater than $1\ \text{m/s}$. It shows that the proposed method improves orientation accuracy and tracking effect of the laser tracker and provides reference for development of measurement instruments with high accuracy and large-scale fields.

Key words: laser tracker; optoelectronic aiming; optoelectronic tracking; orientation system; position sensitive detector; signal processing

1 引言

激光跟踪仪主要用于超大尺寸空间几何量测量及动态轨迹测量,它具有测量功能多、精度高、速度快、量程大、可现场测量等特点,是大型科学工程和大型高端装备制造中重要的测量装备^[1]。目前,我国大型飞机零部件、工装型架测量以及总装测量、卫星安装测量等高端智能制造领域对激光跟踪仪测量的需求越来越大^[2-3]。

激光跟踪仪的光电瞄准与定位技术是实现目标空间坐标精确测量和空间运动轨迹动态跟踪测量的关键,它直接影响到仪器的整体测量精度和使用性能。由于测量对象具有典型的空间随动目标特性,采用空间运动目标光电探测瞄准和快速定位技术可以实现对大范围远距离运动目标的实时精确跟踪和精密测量。动态目标的快速位置探测与跟踪控制是空间坐标测量仪器实现动态精确测量的主要技术手段和发展方向^[4]。目前,国内激光跟踪仪研究大多还处于实验研究和试制阶段,仪器的整体设计、精确瞄准定位、系统动态跟踪精度等主要性能指标与国外主流激光跟踪仪相比还有一定差距。2009年中科院光电研究院联合多家单位在国内率先开始激光跟踪仪的研制工作,现在已经完成了样机测试。本文基于该激光跟踪仪样机对光电位置探测瞄准和跟踪定位控制技术及其应用进行了研究,为我国自主研制高精度大范围大尺寸测量高端仪器领域积累了技术与经验。

2 光电位置瞄准和跟踪定位控制系统方案设计

激光跟踪仪工作时,激光测距系统捕获目标到仪器的精确距离,方位和俯仰测角系统分别测出目标方位角和俯仰角,然后通过极坐标与直角坐标的转换关系,获得目标的空间直角坐标^[2]。根据激光跟踪仪的工作原理,本文设计了“角锥+

光电位敏探测器(Position Sensing Detector, PSD)”光电探测瞄准,“调理+现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)”信号采集处理,“DSP+伺服”智能跟踪控制的光电瞄准与定位系统技术方案。

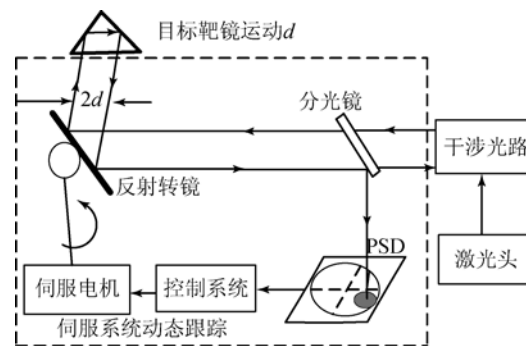


图1 系统动态跟踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic tracking system

系统工作原理如图1所示,激光器发出的测量光束通过跟踪反射镜射向目标靶镜,目标靶镜是一个内嵌角锥棱镜的光学反射器,用于测量和跟踪。跟踪头发出的激光束通过光学镜组入射到反射转镜上,转镜调整水平和俯仰角度将光束反射入目标靶镜,经目标靶镜反射的光线平行于原光束返回。返回的激光束到达分光镜后,一路光束被反射入PSD,另一路光束进入激光干涉距离测量系统。进入PSD的光束用于跟踪目标靶镜,当光束进入光学反射器角锥顶点位置时,返回光束相对于入射光束没有位置偏移,PSD输出信号为零,此时控制系统处于静态测量;当目标靶镜移动时,返回光束相对于入射光束产生位置偏差,PSD输出误差信号。通过DSP智能控制算法解算输出的控制信号驱动电机带动跟踪转镜旋转,改变进入目标靶镜的光束方向,使偏差信号减小,从而实现目标的动态跟踪测量。测量时,要求PSD实时探测经目标靶镜返回的激光光束在光敏面上的位置,并将位置偏移量信号同步传送到跟踪控制单元进行运算处理。

3 光电瞄准与定位

光电瞄准单元起到目标捕获与运动位置偏差精确指向的作用。通过捕获目标靶镜的反射光信号,精确探测靶镜移动产生的空间位置变化量,经过信号处理电路转换成数字量偏差的控制信号,最终提供给跟踪伺服控制单元进行动态跟踪测量。本文采用光斑位置检测法,利用物体移动时探测器上的测量光斑位置会相应改变的原理来进行静态精确瞄准和动态快速跟踪测量。光电瞄准探测单元主要由激光光源、准直光路、目标靶镜、PSD 等组成。

3.1 光路设计

光电瞄准探测光路如图 2 所示。瞄准探测单元和测距单元采用同一个半导体激光光源。半导体激光器发出的线偏振光经过法拉第光隔离器,由直角反射棱镜反射至 27% 分光片。该分光片将激光分为两路:一路为反射光,将 27% 激光分配到测距参考光探测器;另一路为透射光,经过光路补偿镜后进入偏振分光棱镜(PBS),透过 1/4 波片后转换为圆偏振光。圆偏振光通过 45° 反射镜经由一对调节反射镜精确调节光束方向进入 6 倍反射式扩束镜,扩束后出射经过双光楔和窗口玻璃,最后经由反射转镜出射后进行目标跟踪和

探测。其中双光楔的作用为调节光束中心线与跟踪转台中心竖轴重合。分光片配合使用补偿镜,其目的是为了校正经分光镜后光束的偏移量。实际光路中增加了滤波和遮光装置,来降低杂散光的影响。

光线到达目标靶镜后平行反射回 6 倍反射式扩束镜,光束直径缩小后,再经由调节反射镜后通过 1/4 波片,此时圆偏振光变换为线偏振光,返回光与出射光的偏振方向垂直,PBS 反射返回偏振光,反射光反射至 87% 分光片。光束被分光片分为两路:一路将 87% 功率的激光反射到测距模块;另一路将 13% 功率的激光透射经过补偿镜、衰减片和滤光片后,照射到 PSD 探测器上。

3.2 部件选型

目标靶镜是激光跟踪三维坐标测量系统的关键部件之一。它的作用有两个:首先目标靶镜起到光学逆反射器的作用,使所有沿光轴方向入射的光线沿原路返回,进入干涉系统,与参考光发生干涉,从而实现对位移的高精度测量;其次,目标靶镜作为系统的测头,直接与被测对象接触,“拾取”被测对象的形状和尺寸信息,并把这些信息传递到探测器的位置(或运动轨迹)上^[5]。理想的光学逆反射器可以将任意方向入射的光线无偏差地沿原光路反射回去,其效果如同光线总是沿平面镜的法线方向入射。

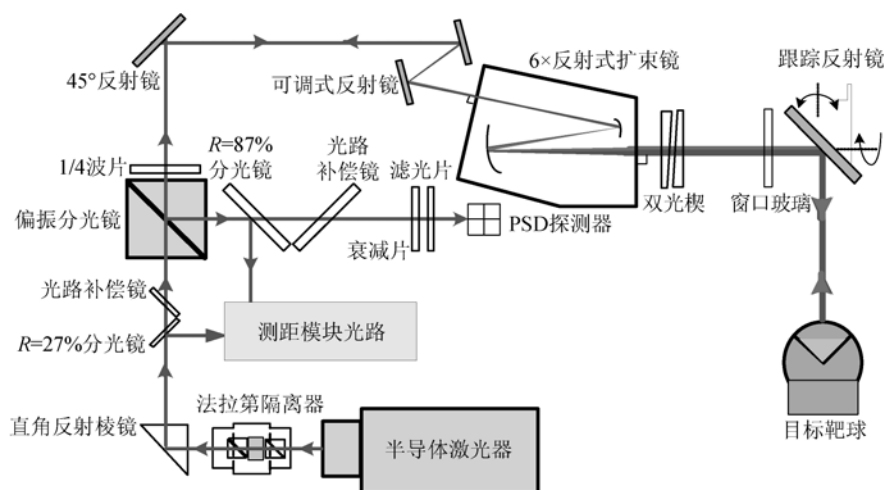


图 2 光电瞄准探测光路

Fig. 2 Optical path of photoelectric aiming detection

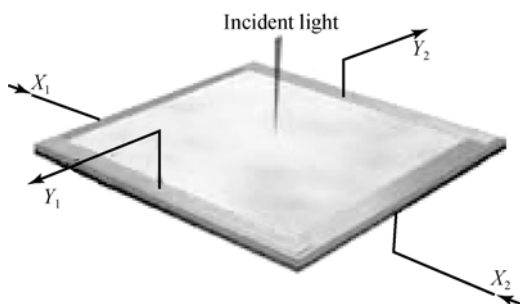
目标靶镜具有稳定的光学中心以及逆反射性、足够大的接收角范围、微小的光能损失、不改

变光束的偏振态等特点。目前,在激光跟踪系统中广泛应用的光学逆反射器主要有角锥棱镜和猫

眼反射器两种^[5]。其中,角锥棱镜的几何形状是3个侧面都是直角三角形的棱锥,并且3个侧面相互垂直,就像从立方体玻璃块上切下的一角。当光束从角锥棱镜底面入射后依次经3个侧面反射,然后仍从底面射出,出射光束与入射光束平行且方向相反,即具有逆反射特性。角锥棱镜分为实心角锥棱镜和空心角锥棱镜。实心角锥棱镜由光学玻璃制成,光束的光程随光束入射角的变化而变化。光束在底面折射时会造成光能损失,接收角通常在 $\pm 13^\circ$ 。空心的角锥棱镜比实心角锥棱镜少了两次折射,有效地减少了光能损失,且便于光路的调节^[6]。但角锥棱镜的最大接收角仅为 25.56° ,因此适用范围有限,无法应用于对接收角范围要求较大的多路激光跟踪坐标测量系统。本文采用空心角锥棱镜作为目标靶镜,以达到减小偏心误差,提高跟踪干涉测量精度的目的。

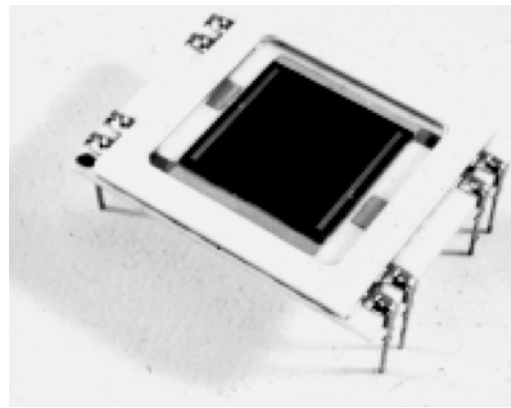
常用的光电位置探测器有 PSD 和四象限探测器。PSD 是连续工作型器件,具有光谱响应范围宽、响应速度快、分辨率高、可靠性好、光敏面内无盲区且处理电路简单等优点,其测量结果与光斑的尺寸和外形无关,只与其重心有关。由于 PSD 的测量精度高,光斑位置的微小变化都会引起输出电压值的变化,所以在精度要求高、测量速度快的场合常选用 PSD 作为位置探测器件^[7-9]。

本文选用瑞典 SiTek 公司的二维两面型 PSD 位置传感器,型号为 S2-0003(图 3),光敏面为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。PSD 上升时间(响应时间)的典型值为 80 ns ,最大值为 200 ns , $1/200\text{ ns} = 5\text{ MHz}$,A/D 采样时间及滤波时间 $\leq 100\text{ }\mu\text{s}$,可以满足 PSD 输出频率为 1 kHz 的要求。由光路的分析计算可知,到达 PSD 探测器靶面上的光功率约为 $300\text{ }\mu\text{W}$ 。



(a)两面型 PSD 工作原理

(a) Working principle of two-type PSD



(b) S2-0003

图 3 光电位敏探测器

Fig. 3 Photo-electric positioning detector

由于半导体激光器和光纤激光器的输出激光波长受温度影响较大,难以满足激光频率稳定性误差 0.01×10^{-6} 的要求。激光器采用美国 Melles Griot 的 25STP910 He-Ne 激光器,工作波长为 632.8 nm ,输出功率为 1 mW , 1 min 内的波长稳定性可达 $\pm 0.002 \times 10^{-6}$, 8 h 内的波长稳定性达 $\pm 0.006 \times 10^{-6}$ 。出射光束直径为 0.48 mm ,光束分歧为 1.7 mrad 。由于工作距离较远,必须压缩光束的分歧,以控制到达 PSD 光敏面上的光斑大小,提高测量精度。一般当出射光束和入射光束的重叠区域达到 10% 即可进行干涉测量。经扩束光路扩束后直径为 7 mm ,出射光束相对入射光束最多可偏离 6.3 mm ,最大测量距离为 35 m 时, $\sigma = \arctan 6.3/35000 \approx 37'' > 30''$,由此可知加工中所产生的两面角误差对角锥棱镜测量结果的影响可忽略不计。

3.3 信号处理

光电瞄准信号处理框图如图 4 所示。入射光通过光学系统后照射到 PSD 的靶面上,探测器将光斑的位置信号转化为电信号,经过前置放大、A/D 转换后被 FPGA 获取。FPGA 将数据进行运算处理后,得到光斑在 X 和 Y 方向的位置。最后,FPGA 以异步串行的方式通过低压差分信号(LVDS)发送器将 X 方向和 Y 方向的位置数据发送给数字信号处理器(DSP)进行计算和跟踪伺服控制。DSP 数字控制器为 PSD 信号处理模块提供外部同步时钟信号,频率为 1 kHz ,即要求 PSD 信号处理模块在 1 ms 内采样和计算出光斑的位置,并将数据发送给跟踪伺服控制系统。

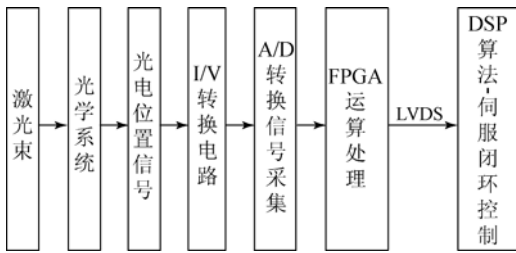


图 4 光电瞄准信号处理框图

Fig. 4 Diagram of signal processing for photoelectric aiming

FPGA 芯片基于查找表技术,适合做逻辑接口设计,具有处理速度快、兼具并行处理的特点^[7]。这里选用 Spartan-3E 系列的 XC3S500E 型号 FPGA,内置单元模块有可编程 I/O 单元 (IOB)、可配置逻辑块 (CLB)、RAM、专用乘法器以及娄字时钟管理 (DCM) 模块等^[10-11],主要起到产生系统同步控制信号、信号数据接收、采集与运算处理,以及 DSP 通信输出等作用。

PSD 探测器表面受到激光照射,输出微弱的电流信号,需对其进行处理才能获得光点的中心坐标。信号调理电路如图 5 所示,主要包括 I/V (电流/电压)转换、滤波电路、二级放大电路等部分。 X_1 为 PSD 管脚输出信号,电流信号经调理后转化成电压信号进行 A/D 转换。

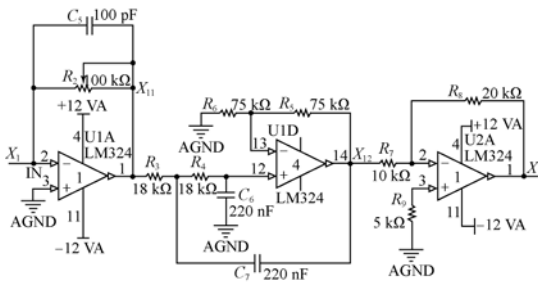


图 5 PSD 信号调理电路

Fig. 5 Signal conditioning circuit of PSD

A/D 转换器选用 AD7606BSTZ-4,通过外部输入基准电压,选用 AD 公司高精度、超低噪声电压参考芯片 ADR421X 产生外部参考电压,噪声为 $1.75 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ 。

D7606 与 FPGA 连接如图 6 所示,A/D 转换过程由 FPGA 控制,AD7606 读写操作是在 FPGA 内部通过状态机来实现的。FPGA 连续进

行 7 次 A/D 转换,并将 AD7606 四路转换结果读到 FPGA 内部寄存器,然后对它进行滤波和运算,得到光斑的位置数据^[12]如下:

$$X \text{ 方向: } P_X = \frac{L_X}{2} \cdot \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2}, \quad (1)$$

$$Y \text{ 方向: } P_Y = \frac{L_Y}{2} \cdot \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2}. \quad (2)$$

对于乘除法,在 FPGA 内部计算过程共需要 100 个时钟周期,运算时钟频率为 25 MHz 时,计算 X 和 Y 方向位置数据总共需要 $4 \mu\text{s}$ 。PSD 数据采集、滤波和运算总共耗时 $\leq 30 \mu\text{s}$,能够满足 PSD 数据输出频率 1 kHz 的要求。

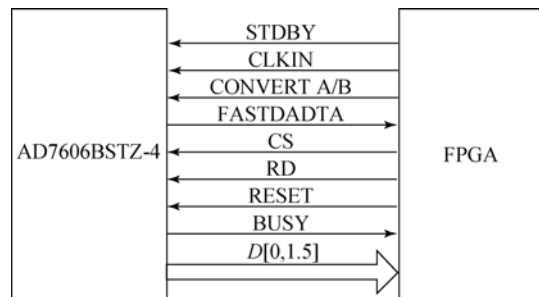


图 6 AD7606 与 FPGA 连接示意图

Fig. 6 Connection of AD7606 to FPGA

4 系统测试

本文搭建了目标位移量标准测试平台,对样机光电瞄准系统探测信号进行测试。实验环境为室内夜晚,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,行程为 25 mm,精度为 $1 \mu\text{m}$ 。目标靶镜固定在位移平台,距离跟踪仪反射镜 1 m,调整测试平台使反射镜出射光束基本与目标靶镜平行,分别以匀速固定步长和动态变化速度控制位移平台使目标靶镜移动。上位机接收处理器输出的位移信号数据。

4.1 定位瞄准测试

以 0.1 mm 为步长,分别匀速运行 $0 \sim 1 \text{ mm}$ 距离,然后进行了 10 组定位静态测量。用 MATLAB 软件处理测得数据结果,误差分布如图 7 所示。由图可知,PSD 的最大静态位置测量误差在 $6 \mu\text{m}$ 以内,能够达到激光跟踪仪的精度要求。

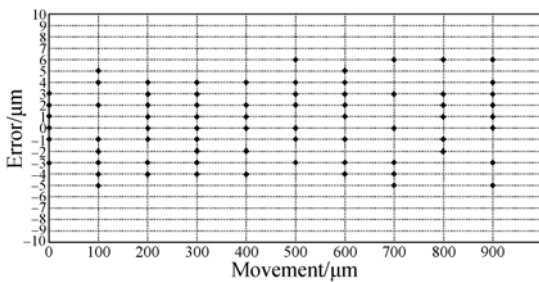


图7 静态瞄准测试的误差分布

Fig.7 Error distribution of static target test

4.2 动态跟踪测试

目标靶镜固定在平台移动导轨座上,与激光跟踪仪对准后,沿着导轨随意变化速度移动靶镜进行跟踪测量。测试显示,在一定速度下,跟踪仪能够始终跟踪目标,所记录靶镜位置坐标的移动速度如图8所示。

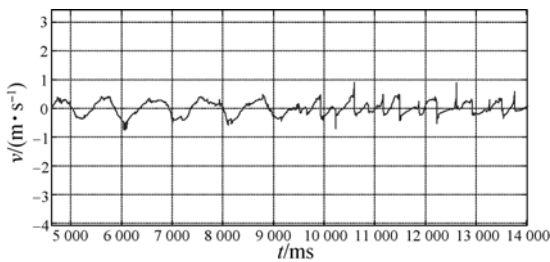


图8 靶球移动测试速度曲线

Fig.8 Speed curve of target ball movement test

参考文献:

- [1] 周维虎,丁蕾,王亚伟,等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4):851-856.
ZOU W H, DING L, WANG Y W, et al. A visual inspection system for on-line measurement application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):851-856. (in Chinese)
- [2] 周维虎,崔惠绒,丁金滨,等. 基于激光跟踪仪的天基望远镜安装测量技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37:250-252.
ZHOU W H, CUI H R, DING J B, et al. Assembly measurement technique for space based telescope system based on laser tracker system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37:250-252. (in Chinese)
- [3] 郭宁,李俊伟,邓江生. 光电跟踪系统纯角度滤波器

从靶球移动速度数据可以看出,在靶球移动的(线)速度 ≤ 1 m/s时,激光跟踪仪能够实现动态跟踪测量。实际使用时,一般被测物体距离激光测量仪约1 m以外,所以该指标能够满足实际使用需求。

5 结 论

本文针对激光跟踪仪的光电瞄准和跟踪定位控制技术进行了研究与设计,提出了“角锥+PSD”光电探测瞄准,“调理+FPGA”信号采集处理,“DSP+伺服”智能跟踪控制的技术方案。最后进行了样机研制和测试,解决了定位精度低,动态跟踪效果差等常见问题。样机测试结果显示,静态定位测量精度达到 $6\ \mu\text{m}$,随机动态跟踪测量速度大于1 m/s。结果证明,采用该设计方案的激光跟踪仪样机在测量精度和跟踪性能等关键方面已经接近和达到国际先进水平。光电瞄准与定位技术同时也是空间运动目标动态跟踪测量的关键,在空间飞行器、智能机器人、军事装备等领域具有重大意义和重要应用价值。

- 的设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7):1818-1824.
GUO N, LI J W, DENG J SH. Design of filter only by angle information in opto-electronic tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1818-1824. (in Chinese)
- [4] 王卫兵,王挺峰,郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 879-888.
WANG W B, WANG T F, GUO J. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(6):879-888. (in Chinese)
- [5] 徐涛,李博,刘廷霞,等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 782-789.
XU T, LI B, LIU T X, et al. Initial calibration of tracking turn table for vehicle-borne opto-electronic tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):782-789. (in Chinese)

- [6] 范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 136-150.
FAN D P, ZHOU Y, LU Y F, *et al.*. Overview of beam steering technology based on rotational double prisms[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 136-150. (in Chinese)
- [7] 张刚, 刘品宽, 张波, 等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 371-379.
ZHANG G, LIU P K, ZHANG B, *et al.*. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 371-379. (in Chinese)
- [8] 周维虎, 费业泰, 李百源, 等. 激光跟踪仪几何误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1): 56-63.
ZHOU W H, FEI Y T, LI B Y, *et al.*. The correction of geometric error for laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(1): 56-63. (in Chinese)
- [9] 王铭明, 陈涛, 王建立, 等. Mean-shift 跟踪算法及其在光电跟踪系统中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 332-338.
WANG M M, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Mean-shift tracking algorithm and its application in optoelectronic tracking system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 332-338. (in Chinese)
- [10] BARONTI F, LAZZERI A, RONCELLA R, *et al.*. FPGA/DSP-based implementation of a high-performance multi-channel counter [J]. *Journal of System Architecture*, 2009, 55(10): 310-316.
- [11] 贾龙, 林岩. 基于 DSP 和 FPGA 的高速数据采集系统的设计及实现[J]. 电子测量技术, 2007(5): 95-97.
JIA L, LIN Y. Design and implementation of a high speed data acquisition system based on DSP and FPGA [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007(5): 95-97. (in Chinese)
- [12] DE BAKEER M, VERBEEK P W. The PSD transfer function [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2002, 49(1): 202-206.

作者简介:



刘娇月(1974—),女,河南南阳人,硕士,副教授,1996年于西安工业学院获得学士学位,2007年于华中师范大学获得硕士学位,主要从事精密仪器、机电一体化技术及应用的研究。E-mail: 15838706952@139.com



周维虎(1962—),男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,2000年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为光电系统总体设计与集成测试、飞秒激光测量技术、光电精密测量技术、大尺寸几何量计量测试技术。E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)