

文章编号 1004-924X(2016)增-0148-08

激光跟踪仪高精度绝对测距系统

纪荣祎^{1*}, 周维虎¹, 黎尧¹, 柳淳², 乔亚丽³

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;

2. 北京理工大学, 北京 100081;

3. 北京信息科技大学, 北京 100192)

摘要: 设计了组合式激光绝对测距系统, 实现了激光跟踪仪的高精度绝对测距性能。首先, 介绍了激光跟踪仪的工作原理与性能特点, 设计了基于双飞秒激光测距与相位式激光测距的组合式绝对测距方案。然后, 根据相位激光测距原理设计了相位激光测距光路与信号处理系统设计。最后, 进行了飞秒测距系统测距精度比对实验和相位测距系统动态跟踪测量实验。实验结果表明: 在 60 m 的测量范围内, 飞秒激光测距可达到 $1\ \mu\text{m} + 0.5\ \mu\text{m}/\text{m}$ 的测距精度, 相位激光测距系统能够实现 $\pm 10\ \text{mm}$ 的动态测距精度, 可满足组合式测量对距离大数的测量精度要求。设计的组合式激光绝对测距系统能够满足激光跟踪仪对测距系统测量精度高、测量速度快、可动态测量的性能要求。

关键词: 激光跟踪仪; 飞秒激光测距; 相位激光测距; 数据处理

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0148

High absolute distance measurement system of laser tracker

Ji Rong-yi^{1*}, Zhou Wei-hu¹, Li Yao¹, Liu Chun², Qiao Ya-li³

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

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

Abstract: A combined laser absolute ranging system was designed to achieve the high-precision absolute ranging performance of laser tracker. Firstly, the operating principle and performance characteristics of laser tracker were introduced. Then an absolute range scheme combing the femtosecond laser distance measuring with the phase-shift laser ranging was developed. Based on the principle of the phase-shift laser ranging, the optical path and signal processing system were designed. Finally, the precisions of femtosecond laser distance measuring system and phase laser ranging were tested experimentally. The result indicates that the femtosecond laser distance measuring and the phase laser ranging can achieve a precision of $1\ \mu\text{m} + 0.5\ \mu\text{m}/\text{m}$ and a dynamic ranging precision of $\pm 10\ \text{mm}$ respectively within the measurement range of 60 m, which can satisfy the precision requirement of combined ranging system in long-distance measurement. The designed combined-type laser absolute ranging sys-

收稿日期: 2016-05-29; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项 (No. 2011YQ120022)

tem can meet the performance requirement of high precision, fast measuring speed and dynamic measurement.

Key words: laser tracker; femtosecond laser distance measurement; phase-shift laser ranging; data processing

1 引言

激光跟踪仪是一种大尺寸空间几何量测量仪器,集合了激光精密测距、精密测角、精密机械、快速跟踪控制等先进技术,不仅可对空间静止目标进行高精度坐标测量,还可对运动目标进行高精度跟踪测量,具有测量精度高、测量速度快、无导轨测量、通用性强等优点,是航空航天、大型装备制造、大科学工程等先进制造领域需求广泛的测量装备^[1-2]。目前,国际上现有的激光跟踪仪大都采用激光干涉原理进行距离测量,需要通过测量连续位移得到各点的相对空间坐标,不能实现对空间目标的绝对距离测量^[3-5]。传统的激光绝对距离测量技术包括脉冲激光测距技术、相位激光测距技术和多波长激光干涉测量技术等,但它们的测量范围、测量精度和测量速度难以同时满足激光跟踪仪的需求。因此,亟需研发可用于激光跟踪仪测量的量程大、精度高、测量速度快的绝对距离测量系统,以满足先进制造领域快速发展的应用需求。

飞秒激光测距技术是国际测量领域的研究热点,具有能够替代传统激光测距技术,实现大量程、高精度绝对测距的巨大潜力^[6-7]。本文提出采用飞秒激光测距技术和相位激光测距技术结合的测距方案,讨论了飞秒激光测距技术的测量原理与特点。结合激光跟踪仪对测距性能的要求,采用双飞秒激光测距技术作为距离精测方法;同时,根据双飞秒激光测距技术的特点和局限,设计了相位激光测距系统进行大距离的测量。针对激光跟踪仪测量系统内部复杂光路/电磁干扰和动态跟踪测量时的光束功率抖动,进行了测距系统的抗干扰设计和跟踪状态下的光束功率抖动修正。该系统可满足激光跟踪仪对高精度绝对测距的性能需求。

2 激光跟踪仪高精度测距系统设计

2.1 激光跟踪仪的工作原理

激光跟踪仪是基于球坐标原理的空间三维坐标测量仪器,主要由激光跟踪头、仪器支架、跟踪控制器、计算机和跟踪靶球等组成,如图 1 所示。



图 1 激光跟踪仪系统组成示意图

Fig. 1 Framework of laser tracker system

激光跟踪仪的测量原理如图 2 所示^[8]。通过测量仪器坐标原点到靶球的距离 r ,以及靶球相对激光跟踪仪的水平角 α 和俯仰角 β 。由球坐标计算公式,即可求得靶球在仪器坐标系下的空间三维坐标,求解公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} x = r \sin \beta \cos \alpha \\ y = r \sin \beta \sin \alpha \\ z = r \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

激光跟踪仪的突出特点是能够进行高精度动态跟踪测量,对测距系统的测量速度和测距精度均有很高的要求。目前国际上主流的激光跟踪仪主要采用激光干涉仪作为测距手段,测量速度可达 500~1000 次/秒,测距精度可达 5~10 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

激光干涉测量过程容易受到断光影响,需要回到测量原点重新测量,或者采用激光绝对测距系统测出绝对距离进行断光续接,影响测量效率,且容易降低后续测量精度。

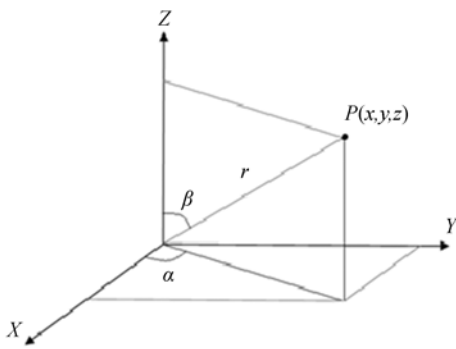


图 2 激光跟踪仪测量原理

Fig. 2 Measurement principle of laser tracker system

2.2 飞秒激光测距系统设计

为了解决由激光干涉测量引起的断光问题,提高激光跟踪仪的测量效率,这里采用飞秒激光测距技术作为高精度绝对测距的手段。飞秒激光测距技术是一种新型激光测距技术,具有大量程、高精度绝对测距的特点。目前,飞秒激光测距技术可分为高次谐波相位法、飞行时间脉冲互相关法、光谱分辨干涉法和双飞秒激光测距法等^[9-14]。其中,高次谐波相位测距法和飞秒脉冲互相关干涉法的测量速度慢,适合用于静态目标的测量;光谱分辨干涉法的测量范围小,且数据处理过程复杂,适合小范围绝对距离的测量。双飞秒激光测距法的测量速度与两个飞秒激光频率梳的重频差相关,可实现 kHz 以上的测量速度,同时在 km 量级的测程具有 nm 量级的距离分辨率,能够满足激光跟踪仪对测距系统的测量范围、测距精度和测量速度的性能要求。

双飞秒激光测距系统如图 3 所示,使用两台

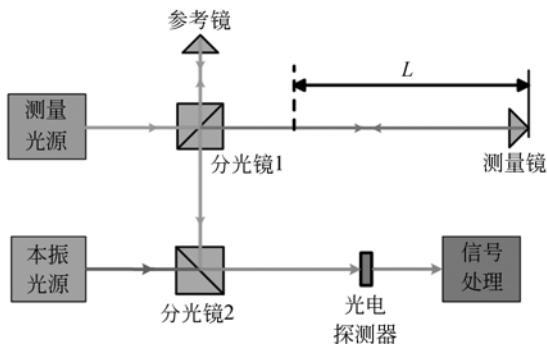


图 3 双飞秒激光测距系统原理图

Fig. 3 Principle scheme of dual femtosecond laser distance measurement system

具有微小重频差的飞秒激光频率梳,一个作为测量光源(脉冲重复频率为 f_{r1} , 脉冲间隔时间为 $T_{r1} = 1/f_{r1}$), 另一个作为本振光源(脉冲重复频率为 f_{r2} , 脉冲间隔时间为 $T_{r2} = 1/f_{r2}$)。测量光源发出的脉冲序列经过迈克尔逊干涉光路,在 $T = T_{r1} T_{r2} / (T_{r1} - T_{r2})$ 的时间间隔内,本振光源发出的脉冲会分别与参考镜和测量镜返回的脉冲发生一次从分离到叠加再到分离的过程,形成具有干涉峰的干涉信号包络信号。对干涉信号进行采样、截取及傅里叶变换(FFT)处理,可得到其携带的相位信息,从而解算距离值。

本文研制的双飞秒激光测距系统中,两台飞秒激光频率梳的脉冲重复频率分别为 $f_{r1} = 50$ MHz 和 $f_{r2} = 50.001$ MHz 时,本振脉冲与参考脉冲和测量脉冲分别重合一次的时间间隔为 $T = T_{r1} T_{r2} / (T_{r1} - T_{r2}) = 1$ ms,即每秒钟可实现 1000 次的脉冲重合。每次脉冲重合产生的波形如图 4 所示,脉冲相遇产生的干涉峰即为需要进行处理的信号。

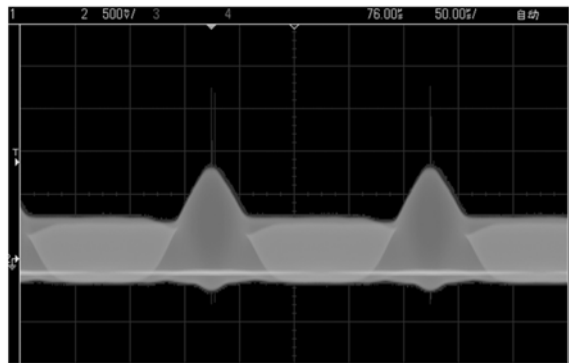


图 4 双飞秒激光测距信号波形

Fig. 4 Waveform of dual femtosecond laser distance measurement system

双飞秒激光测距技术能够实现 kHz 以上的测量速度,但当被测距离为飞秒脉冲间隔长度时,测量信号与参考信号会产生重叠,导致测得的距离数值为 0。飞秒脉冲间隔长度称为双飞秒测距系统的非模糊距离。当测量信号的脉冲重频为 50 MHz 时,其非模糊距离为 3 m。

2.3 组合式测距方案设计

由于飞秒激光的脉冲间隔长度有限,双飞秒激光测距系统存在非模糊测量范围的限制,只能计算得到一个非模糊范围内的测量数据。当测量

臂的变化超过一个非模糊范围时,需要提供距离大数。

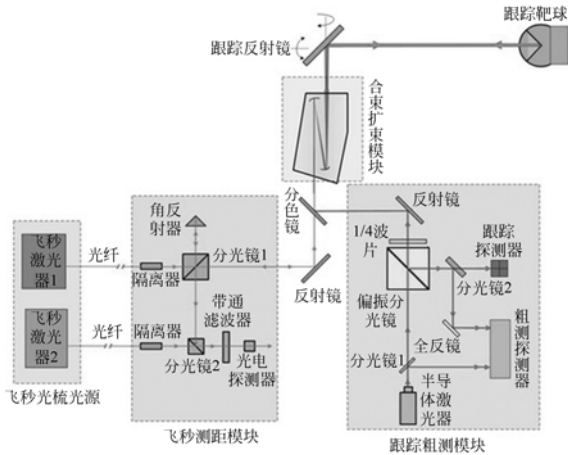


图 5 组合式绝对测距测量光路结构

Fig. 5 Optical path of combined absolute distance measurement system

根据双飞秒激光测距技术的性能特点,设计了飞秒激光测距与相位激光测距组合式绝对测距系统。测量光路如图 5 所示,该系统主要由飞秒激光器、飞秒激光测距光路、跟踪粗测光路、合束扩束输出模块、跟踪反射镜和跟踪靶球组成。飞秒激光器输出的飞秒脉冲通过光纤导入飞秒测距光路,与跟踪粗测光路在合束扩束输出光路中进行合束与扩束,扩束后的测量光束通过跟踪反射镜射向跟踪靶球。经跟踪靶球反射的光束平行于原光束返回,由分色镜分离后分别进入飞秒测距光路和跟踪粗测光路,进行距离精测量、距离大数测量和靶球脱靶量测量。

跟踪粗测光路中,由半导体激光器作为跟踪和粗测光源。半导体激光器发出的激光信号由分光镜 1 进行分光,反射部分作为粗测参考信号,透射部分经过偏振分光棱镜透射后经过 1/4 波片,与飞秒测距光路合束,经过跟踪转台射向测量靶球。由测量靶球返回的光束再次经过 1/4 波片,由偏振分光棱镜反射后,经过分光镜 2,一路进行跟踪位置探测,一路进行距离探测。

3 相位激光测距系统设计

3.1 相位激光测距系统设计

根据相位激光测距原理,设计的相位激光测距系统如图 6 所示。

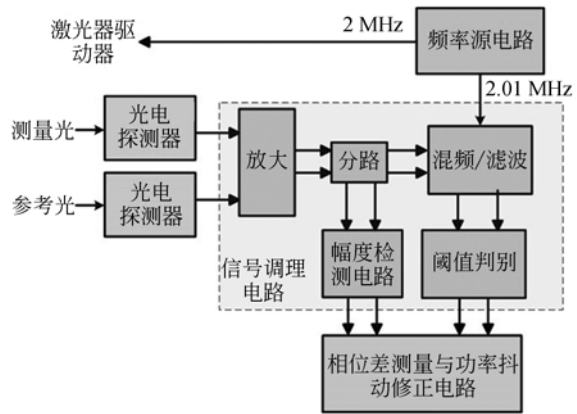


图 6 相位激光测距系统组成框图

Fig. 6 Framework of phase-shift ranging system

如图 6 所示,由频率源电路分别产生 2 MHz 和 2.01 MHz 的正弦波调制信号,一路输出到激光器驱动器,驱动半导体激光器输出调制激光;另一路输出到混频滤波电路,与接收信号进行混频。由两路光电探测器分别探测参考激光信号和测量激光信号,输出模拟电压信号到信号调理电路,进行放大后分为两部分,一部分进行混频滤波和阈值判别,用于相位差的测量,另一部分输出到幅度检测电路,用于检测测量信号幅度的变化量;相位测量与功率抖动修正电路对阈值判别后的测量信号和参考信号进行相位差测量,并根据幅度检测电路输出的幅度变化量进行幅度抖动误差的修正。为了实现快速实时的相位测量、幅度抖动补偿与数据传输,采用 FPGA 芯片作为控制与信号处理芯片。相位激光测距电路如图 7 所示。

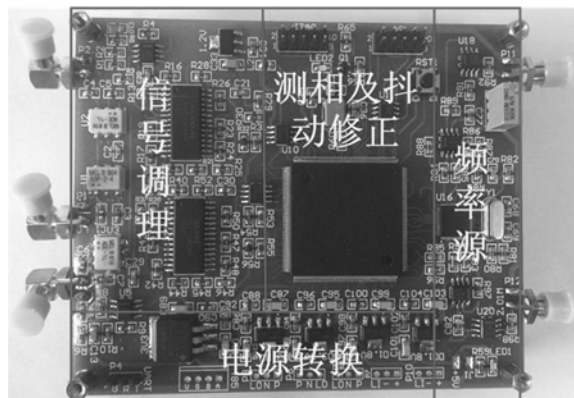


图 7 相位激光测距电路

Fig. 7 Circuit board of phase-shift ranging system

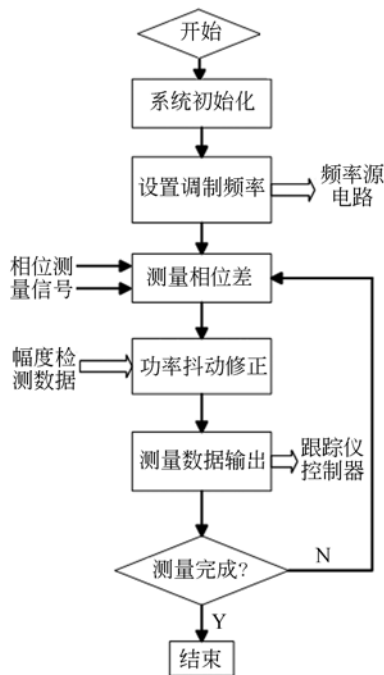


图 8 测量控制流程图

Fig. 8 Measurement flow chart of phase-shift ranging system

测量控制流程如图 8 所示。首先进行系统初始化,检测各部分的工作状态;随后,对频率源电路进行参数配置,产生 2 MHz 和 2.01 MHz 的正弦信号,进行激光器的调制;然后,开启相位测量模式,接收参考信号和测量信号,进行相位差测量;同时,接收由幅度检测电路传输的幅度变化信息,对相位差测量数据进行补偿修正,并将数据同步上传至控制器;最后,判断测量是否完成,转向相应处理流程。

3.2 相位激光测距系统抗干扰设计

在激光跟踪仪测量系统中,复杂的光路环境、电磁环境的干扰和动态跟踪测距状态时的测量光束抖动,都会引起相位测距信号幅度的变化,影响测距精度和测量稳定性。激光跟踪仪测量系统中的干扰主要来自以下方面:

- (1) 激光跟踪系统中,跟踪转台驱动电机、角度测量码盘等器件工作时产生大电流信号,对光电探测电路产生电磁噪声干扰;
- (2) 跟踪粗测光路中,分光棱镜、波片、反射镜、光楔等光学元件的残余反射形成鬼像,与测量信号一起被探测器接收,造成接收信号的干扰;
- (3) 在动态跟踪状态时,跟踪靶球的随机抖动

和跟踪转台的跟踪控制使得测量光束产生随机抖动,导致探测到的激光信号功率抖动,造成对接收信号的二次调制,影响相位测距精度。

为了消除以上方面引起的干扰,提高测距精度和测量稳定性,本文进行了系统抗干扰设计。

首先,对静态时的接收信号进行探测。当测量光束返回时,探测到的信号波形如图 9(a)所示;当测量光束未返回时,探测到的信号波形如图 9(b)所示。

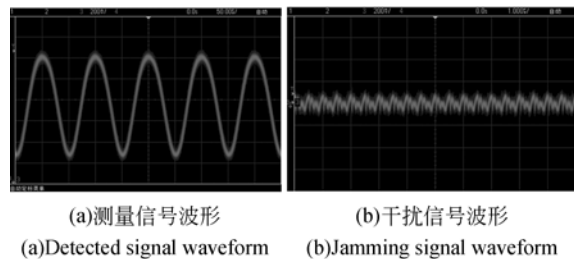


图 9 相位激光测距接收信号波形

Fig. 9 Signal waveforms of phase-shift ranging system

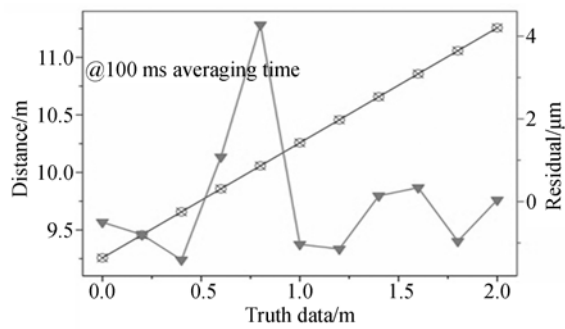
为了消除干扰信号,对信号调理电路进行了改进,分别对参考信号和测量信号进行阈值鉴别,将干扰信号滤除后产生测量方波信号送入相位差测量系统进行相位差的测量。

在动态跟踪状态时,测量光束的随机抖动造成了相位测量结果的抖动。为了减小测距结果抖动,进行了信号幅值检测电路与测量数据的修正。信号幅值检测电路采用幅相测量芯片 AD8302,输入信号为参考信号和具有幅度抖动的测量信号,输出信号为两路输入信号的幅度变化量信息。将对测量信号幅度抖动的探测信号输入到相位测量系统,对相位测量结果进行修正。

4 双飞秒测距信号处理与精度比对实验

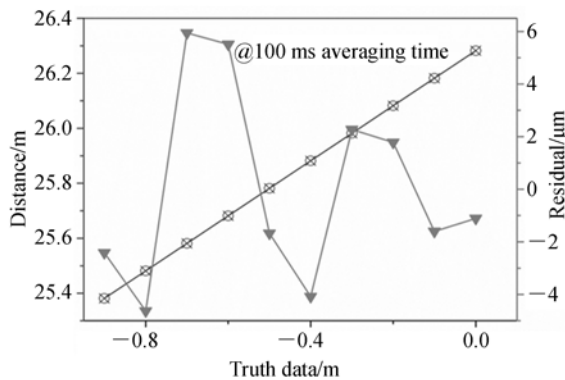
4.1 双飞秒激光测距精度比对实验

为了验证双飞秒激光测距系统的测距性能,将测量镜分别放置在 10, 26 和 61 m 的位置,以 100 mm 为步长,等间隔移动测量镜。每次移动后的测量镜到测距系统的绝对距离由双飞秒测距系统测量得到,测量镜位移的精确距离由激光干涉仪(Agilent 5510)测量得到。在不同距离时双



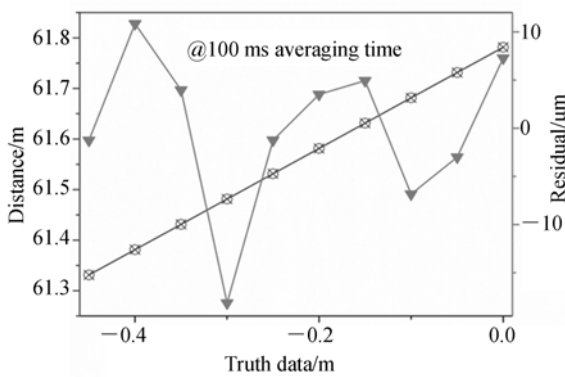
(a)距离为 10 m, 测距精度为±2 μm

(a)Distance is 10 m and measurement precision is ±2 μm



(b)距离为 26 m, 测距精度为±6 μm

(b)Distance is 26 m and measurement precision is ±6 μm



(c)距离为 61 m, 测距精度为±10 μm

(c)Distance is 61 m and measurement precision is ±10 μm

图 10 双飞秒激光测距精度比对

Fig. 10 Measurement precision of dual femtosecond laser distance measurement system

飞秒激光测距系统的测距数据与激光干涉仪测量数据的比对如图 10 所示。比对结果表明,双飞秒激光测距系统的测距数据与激光干涉仪的测量数据吻合良好,在 60 m 范围内能够达到 $1 \mu\text{m} + 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ 的测距精度。

4.2 相位激光测距系统精度测试

根据激光跟踪仪的测量特点,进行了相位激

光测距系统静态精度测试和动态跟踪精度测试。

静态精度测试时,将激光跟踪仪测量光束与直线导轨平行,将靶球安装到直线导轨上,在 10 m 距离处沿导轨方向进行测距实验。每次移动后的测量镜到测距系统的绝对距离由相位激光测距系统测量得到,测量镜位移的精确距离由飞秒激光测距系统测量得到。在不同距离时相位激光测距系统的测距数据与飞秒激光测距系统的测量数据如图 11 所示。

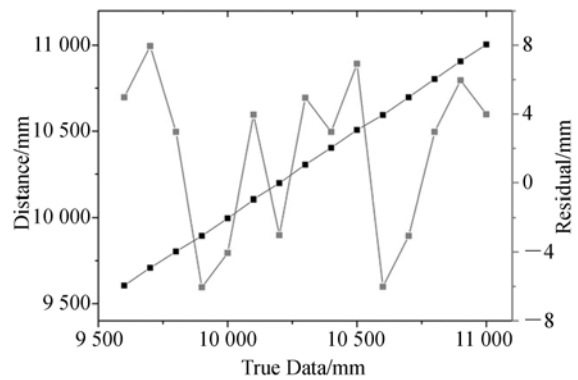
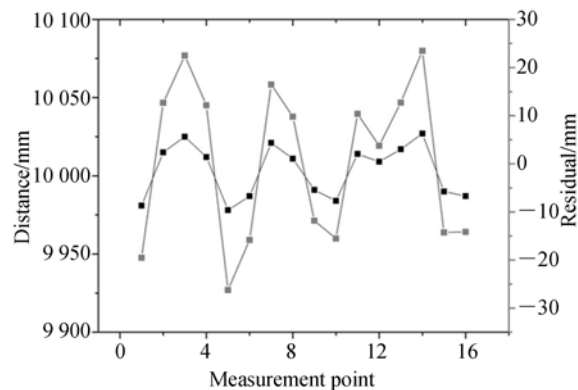


图 11 静态测量时的相位测距精度

Fig. 11 Static measurement precision of phase-shift ranging

动态测试时,在跟踪测量模式下,在 10 m 距离处手持靶球随机移动,测试相位激光测距系统的测量稳定性。图 12(a)为动态测试时的相位测距原始测量值,图 12(b)为修正测量信号幅度抖动导致的测量结果偏移后的测距值。

由以上测试结果可知,在静态测试时,相位激光测距系统能够达到 ±8 mm 的测量精度。在动态跟踪测量状态下,测量激光信号的功率抖动对测距结果影响较大,测量数据抖动范围为 ±30



(a)未修正幅度抖动的测量数据

(a)Uncorrected measurement data

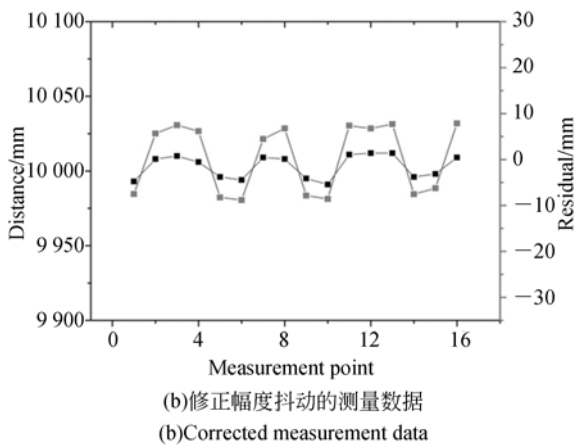


图 12 动态测量时的相位测距精度

Fig. 12 Dynamic measurement precision of phase-shift ranging

mm。通过检测测量信号的幅度变化,对动态跟踪测距结果进行修正,可将测量精度修正到 ± 10 mm 以内,能够满足组合式测量对距离大数测量精度的要求。

参考文献:

- [1] 张博,彭军. 激光跟踪测量系统[J]. 计测技术, 2006, 26(4):5-6.
ZHANG B, PENG J. Laser tracker system for measurement[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2006, 26(4):5-6. (in Chinese)
- [2] 李锐钢. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 477-483.
Li R G. Calibration of tools spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):477-483. (in Chinese)
- [3] 张逸飞. 激光跟踪仪快速跟踪测量关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG Y F. *Study on Rapid Tracking and Measurement of Laser Tracker*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [4] 李广云. LTD5000 激光跟踪测量系统原理及应用[J]. 测绘工程, 2001, 10(4):3-8.
LI G Y. The principle and application of the LTD5000 laser tracker system[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, 10(4):3-8. (in Chinese)
- [5] 王佳,路刚. 激光自动跟踪空间坐标测量系统的发
展[J]. 航空计测技术, 1997, 17(3):34-39.
WANG J, LU G. Development of laser automatic tracing space coordinate measurement system[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997, 17(3):34-39. (in Chinese)
- [6] 武腾飞,梁志国,严家骅,等. 飞秒光学频率梳测距技术的研究进展[J]. 计测技术, 2011, 31(5):41-44.
WU T F, LIANG ZH G, YAN J H, et al.. The progress on distance measuring technique with a femtosecond optical frequency comb[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, 31(5):41-44. (in Chinese)
- [7] 华卿,周维虎,许艳. 飞秒激光频率梳绝对测距技术综述[J]. 计测技术, 2012, 32(1):1-5.
HUA Q, ZHOU W H, XU Y. Review of absolute distance measurement with femtosecond optical frequency comb[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2012, 32(1):1-5. (in Chinese)
- [8] 刘娇月,杨聚庆,董登峰,等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, et al.. Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)

5 结论

本文针对激光跟踪仪的性能特点,提出了双飞秒激光测距与相位激光测距相结合的测量方案,以满足激光跟踪仪对大量程、高精度绝对激光测距的需求。首先介绍了激光跟踪仪的测量原理,然后分别设计了飞秒激光测距系统和相位激光测距系统,并针对激光跟踪仪内部复杂的光路环境和电磁环境,进行了测距系统的抗干扰设计和幅度抖动误差的修正。最后,分别测试了飞秒激光测距系统和相位激光测距系统的测量性能。实验结果表明,飞秒激光测距系统在 60 m 范围内的测距精度可达到 $1 \mu\text{m} + 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$; 相位激光测距系统能够有效抑制激光跟踪仪内部的干扰和功率抖动的影响,在动态测量时实现稳定测距,测距精度为 ± 10 mm,可满足组合式测量对距离大数的测距精度要求。

- [9] MINOSHIMA K, MATSUMOTO H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [10] YE J. Absolute measurement of long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29: 1153-1155.
- [11] JOO K N, KIM S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13):5954-5960.
- [12] JOO K N, KIM Y, KIM S W. Distance measurements by combined method based on a femtosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(24): 19799-19806.
- [13] LEE J, KIM Y J, LEE K, *et al.*. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10):716-720.
- [14] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, *et al.*. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.

作者简介:



纪荣祎(1984—),男,陕西渭南人,博士,助理研究员,2012年于北京理工大学获得博士学位,主要从事激光精密测距技术的研究。E-mail: jirongyi@aoe.ac.cn



周维虎(1962—),男,安徽合肥人,博士,研究员,2000年于合肥工业大学获得博士学位,现为中国科学院光电研究院激光测量技术研究室主任,主要从事光电系统总体设计与测试、飞秒激光测距技术、光电精密测量技术、大尺寸几何量计量测试技术的研究。E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn