

文章编号 1004-924X(2016)02-0309-10

激光跟踪仪精密跟踪系统的设计

董登峰*, 周维虎, 纪荣祎, 张滋黎, 劳达宝

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要:对激光跟踪仪的跟踪伺服控制系统进行了整体研究并给出了总体设计方案。针对跟踪目标的精密探测问题,研究了新型探测手段以及微弱光电信号的精细调理技术与数字滤波方法,使得脱靶量探测稳定性优于 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 。针对跟踪角度精密测量问题,设计了圆光栅数据采集系统,实现了角度脉冲的细分、辨向与准确计数;基于谐波分析方法建立了跟踪过程中的误差补偿模型,将角度测量精度由 $3.5''$ 提高到 $1.5''$ 。建立了跟踪伺服电机的数学模型,分析了电流环在跟踪控制中的作用机理,提出了电流、速度、位置三闭环控制结构和复合跟踪控制策略。跟踪实验表明:系统最远跟踪距离不小于 41.7 m ,跟踪速度不低于 2.0 m/s 。该项技术还能为空间动态目标跟踪、激光通信等提供有益借鉴。

关键词:激光跟踪仪;脱靶量探测;角度测量;跟踪控制

中图分类号: TP273.3; TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0309

Design of precise tracking system of laser tracker

DONG Deng-feng*, ZHOU Wei-hu, JI Rong-yi, ZHANG Zi-li, LAO Da-bao

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

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

Abstract: This paper focuses on the total research of tracking servo control system of a laser tracker and gives a total design scheme. For precise detection of the miss-distance of a tracking target, new detection methods, fine adjusting technologies and digital filtering methods for weak photoelectric signals were explored, by which the detection stability for miss-distance of the tracking target could be better than $\pm 2.0 \mu\text{m}$. To measure precisely tracking angles, a circular grating data acquisition system was designed, and the digital filtering, angle subdivision and accurate counting as well as data communication modules were achieved. According to the angle data, a tracking error compensation model was established based on harmonic analysis method, and the angle measurement precision was improved to $1.5''$ from $3.5''$. For tracking servo motor, a mathematical model was established to analyze the special function of current loop in tracking control process, then a three-closed-loop control structure including the current, speed, position and a compound tracking control strategy was proposed. The tracking experiment shows that the tracking distance and the tracking speed are not less than 41.7 m and 2.0 m/s respectively. The technology can also provide a useful reference for the dynamic

收稿日期:2015-10-12;修订日期:2015-12-07.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(No. 11YQ120022);精度测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学)开放课题(No. PIL1503);中国科学院科研装备研制项目(No. 090206A01Y)

target tracking, laser communication and so on.

Key words: laser tracker; miss-distance detection; angle measurement; tracking control

1 引言

激光跟踪仪是一种高端通用的光学精密测量仪器,不仅可对空间静止目标进行高精度三维测量,而且可对运动目标进行跟踪测量。它具有量程大、精度高、速度快、可现场测量等优点,是目前大尺寸工业测量和科学测量的重要手段^[1-2]。随着航空航天、汽车船舶、轨道交通等行业的飞速发展,与核物理、天文等大科学工程的建造开发,空间站组装对接测量、雷达面形检测、大型船舶与潜艇的装配对接、轨道交通机车制造、高能粒子加速器检测等高端智能制造和大型科学工程领域等都对激光跟踪仪提出了迫切需求^[3-4]。

目前,国际上激光跟踪仪的供应商主要有瑞士 Leica、美国 API 和 FARO 三家公司;由于市场需求巨大,德国 PI miCos 也于 2013 年推出了激光跟踪测量系统。国内有关科研机构对激光跟踪测量系统开展了大量研究,但仅限于原理性实验和试制阶段,距离实际工程应用还有较大差距。1997~2001 年间清华大学刘永东、王佳等^[5]设计了三站激光跟踪测量系统,在 1 m 的跟踪距离内实现了一维平面内合作目标的跟踪测量原理实验。天津大学的科研人员对激光跟踪测量系统进行了持续深入的研究:1997 年付继有、张国雄等^[6]采用两路悬丝转镜干涉仪组成的平面坐标测量系统,完成了两维平面内目标的跟踪原理试验;2003 年张国雄、李杏华等^[7]基于多边法测量原理建立了四路激光跟踪干涉柔性测量系统,并在 1 000 mm×1 200 mm×800 mm 的范围内开展了跟踪测量试验,跟踪速度为 0.4 m/s;2005~2010 年隋修武、陈曦、陈新华等^[8-10]改进了跟踪控制系统;2012 年张亚娟^[11-12]进一步研究了单站式激光跟踪测量系统,使跟踪系统能够在 3.2 m 的范围内对以 0.5 m/s 速度运行的目标进行跟踪测量。2012 年四川大学杨艳等^[13]提出了粗精结合的两级双轴联动控制系统,试图实现三维空间的目标跟踪,但仅开展了静态跟踪实验,没有开展动态跟踪实验。以上文献表明,尽管国内在激光跟踪测量原理及试验方面开展了多年研究,但由于

跟踪系统设计的复杂性、空间目标运动的随机性及光、机、电、控、算的高度精密集成性,激光跟踪技术一直没有取得实质性突破,跟踪距离近和跟踪速度慢成为国内自主研发激光跟踪仪的主要瓶颈。2009 年中科院光电研究院联合中科院西安光机所等多家单位开展了便携式、多功能精密激光跟踪测量系统的研究^[14],并在 2011 年承担了“新型飞秒激光跟踪仪研发”国家重大仪器设备开发专项。本文通过深入的分析和研究对激光跟踪仪的跟踪系统进行了集成创新,大幅提高了其跟踪性能。测试结果表明:该仪器的最远跟踪距离不低于 41.7 m,最大跟踪速度不低于 2.0 m/s,初步满足了工业应用需要,为我国自主研制高精度大尺寸测量光电仪器积累了技术与经验。

2 跟踪伺服系统方案设计

激光跟踪仪为极坐标测量系统,其基本原理是:由激光测距系统获得合作目标到仪器的距离,由二维测角系统测出合作目标的方位角和俯仰角,再通过极坐标与直角坐标转换关系式(1)获得目标的空间直角坐标,即:

$$\begin{cases} X = r \cos(E) \cos(A) \\ Y = r \cos(E) \sin(A) \\ Z = r \sin(E) \end{cases} \quad (1)$$

激光跟踪仪的工作原理如图 1 所示。激光器

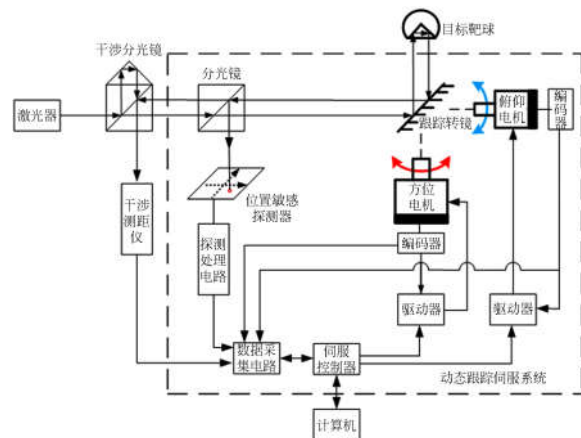


图 1 激光跟踪仪工作原理图

Fig. 1 Principle diagram of laser tracker

发射出的测量光束经过干涉分光镜分为两束,一束直接传输到干涉测距仪上,另一束通过跟踪转镜射向目标靶球反射器。经靶球反射的光线平行于原光束返回,到达分光镜后一部分光束经干涉分光镜反射进入激光干涉测距仪进行距离干涉测量,另一部分激光束被反射到位置敏感探测器(Position Sensing Detector, PSD)上,进行激光偏离靶球球心的脱靶量精密探测。数据采集电路同步采集两维脱靶量、测距、方位/俯仰角度,并发送至伺服控制器。伺服控制器根据脱靶量、测距、角度信息以及目标运动状态估计,发送命令至驱动器使跟踪转镜围绕反射基点进行两维旋转,从而改变进入目标反射器的光束方向,使脱靶量信息趋于 0,实现对目标靶镜的跟踪测量。

图 1 中的动态跟踪伺服系统用于确保激光跟踪头对合作目标的快速精密跟踪,是激光跟踪仪精确获得目标距离和方向(两维角度)的前提。由于受到激光干涉测距、目标反射镜与小巧型光机结构等的约束,在几十甚至上百米的跟踪距离范围内脱靶量均要小于几毫米,所以相对于传统的光电跟踪系统激光跟踪系统的视场极小。这要求脱靶量探测与角度测量响应快、精度高、分辨能力强,而在跟踪测量过程中目标运动速度快、随动性强,这需要执行机构反应快、伺服系统运算时间短。因此,本文基于 PSD 进行脱靶量精密探测,采用对径双读数头以及误差修正方法实现角度的高精度测量;采用快响应的永磁力矩电机以及三闭环的控制策略,尽可能提升电机的响应速度;设计“DSP+FPGA”的伺服控制与数据采集硬件架构,以缩短运算时间、保证同步性。

3 基于 PSD 的脱靶量精密探测

PSD 是一种利用横向光电效应探测光点位置、坐标信息的光电器件,它具有体积小、分辨率高、响应快、无死区等优点^[15]。这里在跟踪系统中通过 PSD 及其处理电路实时获得靶球反射光束入射在 PSD 表面的两维精密位置信息。通过与预先标定的跟踪零点(光束恰好经靶球中心反射后入射到 PSD 表面的位置)进行比对,探测单元能够获得激光偏离合作目标中心的脱靶量信息,从而为跟踪系统精密跟踪合作目标提供关键数据。

3.1 探测单元总体方案设计

基于 PSD 的脱靶量探测系统主要包括 PSD 及其信号调理电路、AD 采集模块、数据处理单元以及通信等,探测处理方案如图 2 所示。激光束经激光跟踪仪的内部光路入射到 PSD 光敏面上,PSD 输出的四路电流信号经 I/V 转换、电平移位放大等信号调理形成 0~10 V 的电压信号,通过同步并行采样、模数转换送由以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为核心的数据处理单元进行运算、滤波等处理,最后以差分 LVDS 电平形式高速上传至跟踪控制单元。



图 2 激光微位移检测方案

Fig. 2 Block diagram of laser spot displacement detection

3.2 信号调理与数字滤波

PSD 选用瑞典 SiTek 提供的高线性度二维位置传感器 2L10_SU7,光敏面为 10 mm×10 mm,位置非线性度最大为±0.8%,反偏电压典型值为 15 V,温漂最大为 200×10⁻⁶/°C,光敏面接收光强在 200~300 μw 为宜。实际系统设计中反偏电压取 15 V,光强为 260 μw。

由于激光跟踪系统的内部光路复杂,为了抑制仪器内部其他光源的干扰,在 PSD 之前设置窄带滤光片,仅允许与干涉激光同波长的光入射到探测器表面。同时 PSD 的输出电流源自光生电流,输出为 μA 级别的微弱信号,一方面将运放输入和印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上其他的大电压梯度隔离,并确保连线应尽可能短,即对 PSD 输出到运放间的线路进行低阻抗连接,以减小 PCB 上电流的泄露。另一方面,在电源输入端加旁路滤波电容、磁珠,选用不同量级并尽量靠近芯片引脚,以抑制电源纹波的影响。

上述手段一定程度上保证了模拟电流信号的质量,但实验发现信号存在一定的电源干扰噪声。为了进一步提高探测精度,本文提出将算术平均滤波和中值滤波算法相结合的方法。先以中值滤波初步剔除尖峰脉冲,再用均值滤波取均值以剔除不明显的噪声数据,即:将连续测量的 N 组采样值按照大小顺序排列,去掉最大值和最小值,再

对剩下的 $N-2$ 个采样值进行累加求和：

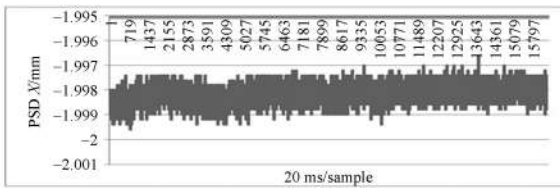
$$\sum_{i=2}^{N-1} X_{1,i}, \sum_{i=2}^{N-1} X_{2,i}, \sum_{j=2}^{N-1} Y_{1,j}, \sum_{j=2}^{N-1} Y_{2,j},$$

其中 i, j 为序号。为尽可能充分利用 AD 采样信息,对累加和进行整体运算,则光斑的 X, Y 坐标的计算公式为:

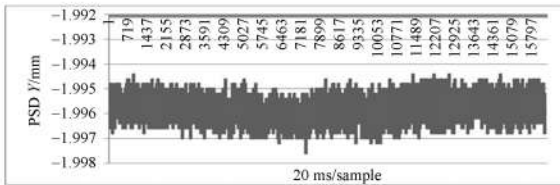
$$\begin{cases} x = k_x \frac{\sum_{i=2}^{N-1} X_{1,i} - \sum_{i=2}^{N-1} X_{2,i}}{\sum_{i=2}^{N-1} X_{1,i} + \sum_{i=2}^{N-1} X_{2,i}} \\ y = k_y \frac{\sum_{j=2}^{N-1} Y_{1,j} - \sum_{j=2}^{N-1} Y_{2,j}}{\sum_{j=2}^{N-1} Y_{1,j} + \sum_{j=2}^{N-1} Y_{2,j}} \end{cases} \quad (2)$$

3.3 脱靶量探测结果

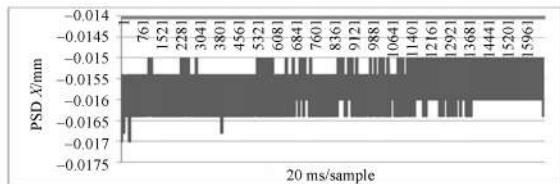
根据上述硬件方案和本文提出的滤波算法,针对 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光,通过手动调整二维微位移平台测试脱靶量探测结果的稳定性,实验结果如图 3 所示。



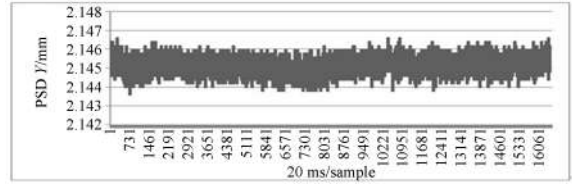
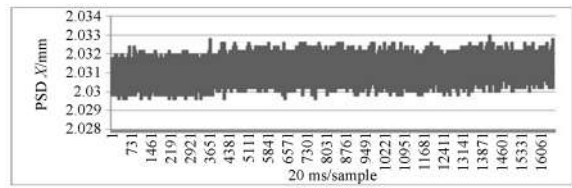
(a) 光斑在 $(-2.0, -2.0)$ 坐标附近的 PSD 测量结果
(a) Test result of spots near coordinate $(-2.0, -2.0)$



(b) 光斑在 $(0,0)$ 坐标附近的 PSD 测量结果
(b) Test result of spots near coordinate $(0,0)$



(c) 光斑在 $(2.0, 2.0)$ 坐标附近的 PSD 测量结果
(c) Test result of spots near coordinate $(2.0, 2.0)$



(c) 光斑在 $(2.0, 2.0)$ 坐标附近的 PSD 测量结果
(c) Test result of spots near coordinate $(2.0, 2.0)$

图 3 基于 PSD 的脱靶量探测稳定性试验结果

Fig. 3 Stability of miss-distance detection based on PSD

由图 3(a)可知光斑在 $(-2.0 \text{ mm}, -2.0 \text{ mm})$ 坐标附近, X 和 Y 波动的最大值分别为 3.2 和 $3.0 \mu\text{m}$ 。由图 3(c)可知光斑在 $(2.0 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm})$ 坐标附近, X 和 Y 波动的最大值分别为 3.4 和 $3.0 \mu\text{m}$ 。而在坐标原点附近, X 和 Y 波动的最大值均不超过 $2.0 \mu\text{m}$ 。这种中心区域效果好,边缘精度下降的现象是由于 PSD 内在的 PIN 结构及电阻层分布不均所产生的边缘效应所致^[16]。因此在 $x \in (-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$, $y \in (-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ 的方形区域内,探测结果稳定性优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

4 基于圆光栅编码器的角度精密测量

合作目标(靶球)的精确空间坐标位置取决于跟踪仪基准点到靶球的距离长度及当前的方位和俯仰角度。因此,角度测量不仅是跟踪测量的核心单元之一,也是实现目标快速精密跟踪的基础,其分辨率和精度直接制约仪器的跟踪性能和测量精度。为了在激光跟踪仪中实现角度精密测量,对光栅检测信号进行准确快速采集是一项前提条件。在此基础上应用误差修正技术是提高编码器使用精度的主要途径之一。本文针对圆光栅编码器设计了基于 FPGA 的角度信号滤波、倍频辨向计数及数据传输方案;基于角度数据,在上位机进行谐波分析,并建立误差修正模型。在跟踪测量过程中,系统根据模型对实测角度进行在线修正,以提高跟踪性能和测量精度。

4.1 圆光栅数据采集系统设计

激光跟踪仪中角度测量采用 Renishaw 的精巧型高精度圆光栅,其角度分辨率为 $0.63''$ 。为了消除偏心等误差,其读数头成对安装。角度脉冲数据采集系统采用自顶向下的设计思想,除时钟管理及同步控制外,分为数字滤波、辨向计数及数据通信三大模块^[17]。其中,数字滤波模块的主要功能是消除干扰脉冲对系统计数的影响,保证计数的准确性;辨向计数模块主要完成四倍频、正反转辨识和计数功能;数据通信模块主要负责将数据传输到 FPGA 等外部其他数据处理芯片,避免跨时钟域数据传输带来的各种不利影响。采集系统结构如图 4 所示。

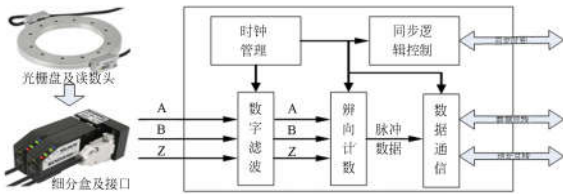


图 4 角度数据采集系统结构框图

Fig. 4 Block diagram of angle data acquisition system

4.2 基于 FPGA 的角度计数系统

激光跟踪仪在应用中会存在各种不确定性因素,从而使圆光栅细分盒输出的正交编码信号受到一定程度的干扰。其中比较典型的是跟踪控制过程中跟踪头的振动、抖动和现场环境中的电磁干扰。干扰噪声会使得输出脉冲产生毛刺,导致脉冲计数错误,从而严重影响测量精度。通过观察和分析抖动产生的毛刺信号发现,其持续时间通常极短,故频率一般都远高于圆光栅正常工作时所输出的脉冲频率,因此本文提出一种高频数字计数滤波方法。该方法根据系统允许的最高转速,结合所使用圆光栅的刻线数计算出最高转速下圆光栅输出的脉冲频率,并以此频率为临界点,将频率高于该临界点的脉冲视为干扰脉冲滤除。即只有持续时间超过允许的最短时间的脉冲才是正常计数脉冲,在此基础上进行编码器计数。根据 Renishaw 增量式圆光栅的基本工作原理:圆光栅输出的是 A,B 两路相差 $1/4$ 周期的方波信号,当 A 相超前 B 相 $1/4$ 周期表示电机正转,计数增加;当 B 相超前 A 相 $1/4$ 周期表示电机反转,计数减少。A,B 两相信号输出共产生 4 个跳变沿,基于 A 相和 B 相信号的跳变沿对圆光栅状

态进行划分。根据状态划分和时序,本文采用有限状态机对圆光栅的方波信号进行四倍频辨向计数,状态机还专设一路高速同步时钟对方波信号进行采样和滤波处理。将圆光栅输出信号 A,B 的高低电平分别用 1,0 表示,则两者组合共有 $A1B1$ 、 $A1B0$ 、 $A0B1$ 、 $A0B0$ 四种稳定状态。当圆光栅输出状态按 $A0B0 \rightarrow A1B0 \rightarrow A1B1 \rightarrow A0B1 \rightarrow A0B0$ 变化时,表示圆光栅正转,状态机计数增加;当状态按 $A0B0 \rightarrow A0B1 \rightarrow A1B1 \rightarrow A1B0 \rightarrow A0B0$ 变化时,圆光栅反转,状态机计数递减。圆光栅一旦转动,计数模块可以随时在正转和反转状态中自由切换。由于稳定状态是以 A 相信号和 B 相信号的脉冲边沿变化进行划分的,而 A,B 一个周期内边沿均变化两次,所以有限状态机在一个周期内会触发 4 次状态判断,完成信号的四倍频功能,提高了脉冲计数的分辨率。

为便于软件维护及升级,程序设计中引入 $A0B0+$ 、 $A1B0+$ 、 $A1B1+$ 、 $A0B1+$ 与 $A0B0-$ 、 $A1B0-$ 、 $A1B1-$ 、 $A0B1-$ 等 8 个状态,用于表示 A 相信号和 B 相信号在某个特定状态下发生变化后,所引起的有限状态机的操作。状态机的状态转换流程如图 5 所示。

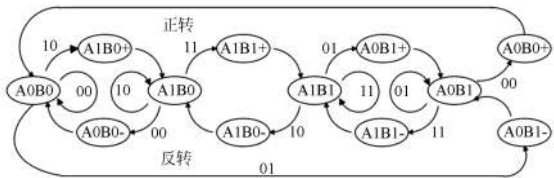


图 5 辨向计数模块状态机状态转换图

Fig. 5 Chart of state-machine transforming in counting module

4.3 角度误差分析与修正

圆光栅编码器测角误差主要来源于光栅盘的机械安装误差,柱面刻划误差以及细分盒的细分误差等周期性误差^[18-19]。机械安装误差包括偏心、倾斜、轴系晃动等。刻划误差指刻线实际位置与理想位置的偏差。细分误差指细分信号的非严格正交误差、幅度不等误差和电压信号的漂移误差。前两者以一转为一个基周期,属于中低频误差;后者以一个栅距为一个基周期,属于高频误差。但两者都具有周期性,因而可以采用谐波分析法对误差数据进行处理以提高测量精度,即在

基周期内取 N 等分测量点,将离散实验数据近似表示为傅里叶级数,通过数据拟合计算得到各阶谐波系数。当等分数 N 为偶数时,只能计算到 $m=N/2$ 阶系数;当 N 为奇数时,只能计算到 $m=(N-1)/2$ 阶系数^[19-20]。

一般地,对于 $0\sim m$ 阶误差谐波函数可以表示为:

$$\epsilon(\theta_i) = \sum_{k=1}^m c_k \sin(k\theta_i + \varphi_k), \quad (3)$$

式中: m 为测角误差谐波的最高阶数, c_k 为第 k 阶误差谐波系数, φ_k 为第 k 阶谐波误差的初相角。

实验测得的误差以 $\Delta\theta$ 表示,采用非线性最小二乘法求解下式:

$$e = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [\epsilon(\theta_i) - \Delta\theta_i]^2 \right\} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m c_k \sin(k\theta_i + \varphi_k) - \Delta\theta_i \right]^2 \right\}, \quad (4)$$

得到满足 e 为最小值时的谐波系数 c_k, φ_k 。

由于采用的是 8 面棱体,所以 $m=4$,根据表 1 及式(4),得到的计算结果如表 1 所示。

表 1 误差谐波函数参量计算结果

Tab. 1 Calculation of error harmonic function parameter

参量	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
c_k	0.62	1.04	0.91	-1.67	-0.68
φ_k	-0.68	0.83	1.27	1.29	1.37

由表 1 可知,谐波函数的一、二、三阶系数较大,权重较高,所以采用一、二、三阶谐波函数修正测量误差。重新开展一次实验,实测误差及修正后的结果如表 2 所示。

表 2 误差修正前后的结果对比

Tab. 2 Angles before and after error compensation

序号	标准值/(°)	测量误差/(")	修正后误差/(")
1	0.000 02	0.06	0.02
2	44.999 95	2.98	0.87
3	90.000 16	0.89	0.59
4	134.999 97	-0.90	0.88
5	179.999 97	1.50	-0.20
6	224.999 91	-1.00	0.57
7	269.999 84	-1.93	0.11
8	314.999 70	2.26	1.02

实验数据表明,测量误差由 $3.5''$ 减小到 $1.5''$ 以内,这说明误差谐波分析方法能够显著提高圆光栅的系统测量精度。

5 伺服电机建模与跟踪控制策略

激光跟踪仪的跟踪范围从不足一米至几十米甚至上百米。在跟踪目标移动速度基本稳定的情况下,跟踪速度相差几十甚至几百倍,这对跟踪系统的稳定性和可靠性要求很高。一方面必须确保伺服电机在驱动过程中不会因为速度差异大、力矩波动剧烈或系统反应慢等导致目标丢失;另一方面要建立准确的电机模型、设计合理的控制结构、采用适应能力强的控制策略。永磁式直流力矩电机是一种低速直流伺服电动机,其特点是力矩大、空载转速低;能够直接驱动负载、动态特性好、过载能力强。因此,执行机构选择永磁式直流力矩电机,并以此电机为基础建立了电机的数学模型,深入分析电流环的重要作用,设计三闭环控制结构,提出反馈加前馈的复合控制策略,以增强跟踪控制策略的适应能力。

5.1 动态建模及电流环分析

跟踪伺服系统的直流永磁力矩电机在额定励磁下的等效电路如图 6 所示。其中,电枢回路总电阻 R 和电感 L 包含电力电子变换器内阻、电枢电阻和电感以及可能介入的其他电阻和电感。

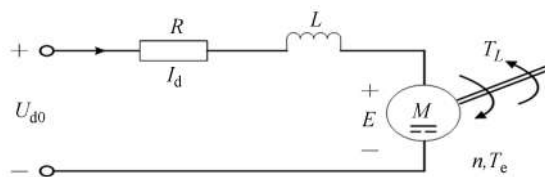


图 6 直流电机的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of DC motor

假定主电路电流 I_d 连续,则动态电压方程为:

$$U_{d0} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} + E, \quad (5)$$

$$E = C_e n, \quad (6)$$

式中: U_{d0} 为电机电枢电压, E 为电机反电势, C_e 为反电势系数, n 为电机转速。忽略黏性摩擦及弹性转矩,电动机轴上的动力学方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{dn}{dt}, \quad (7)$$

$$T_e = C_m I_d, \quad (8)$$

式中: T_e 为电磁转矩, T_L 为包括电动机空载转矩在内的负载转矩; C_m 为额定励磁下电动机的转矩系数; 通常电枢回路电磁时间常数定义为 $T_l = L/R$; 机电时间常数定义为 $T_m = JR/C_e C_m$, 将其代入式(5)和式(6), 并结合式(7)和式(8), 整理后得:

$$U_{d0} - E = R(I_d + T_l \frac{dI_d}{dt}), \quad (9)$$

$$I_d - I_{dl} = \frac{T_m dE}{R dt}, \quad (10)$$

式中 $I_{dl} = T_L/C_m$ 表示负载电流。对式(9)、式(10)进行拉氏变换, 得到电压与电流、电流与反电势之间的传递函数分别为:

$$\frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E(s)} = \frac{1}{R(T_l s + 1)}, \quad (11)$$

$$\frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dl}(s)} = \frac{R}{T_m s}, \quad (12)$$

考虑 $n = E/C_e$, 即得到额定励磁下直流电动机的动态结构框图, 如图 3 所示。

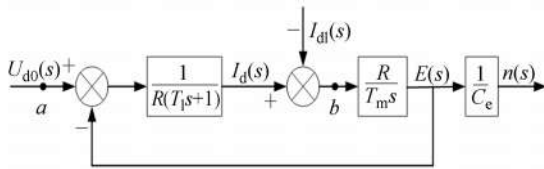


图 7 直流电动机的动态结构框图

Fig. 7 Scheme of dynamic control of DC motor

根据系统方案设计, 跟踪系统俯仰轴转动部分的质量为 1.0 kg, 转动惯量为 996.0 kg · mm², 俯仰最大加速度为 15 rad/s², 所需的驱动电机力矩为 0.015 N · m, 设计考虑 10 倍力矩储备, 电机驱动力矩最大为 0.15 N · m。考虑俯仰轴系的摩擦力矩为 0.05 N · m, 俯仰电机所需的驱动力矩约为 0.2 N · m。方位转动部分的质量为 4.5 kg, 转动惯量为 8 595.7 kg · mm², 方位最大加速度为 15 rad/s², 所需驱动力矩为 0.13 N · m, 考虑 10 倍力矩储备, 电机驱动力矩最大为 1.3 N · m。考虑方位轴系的摩擦力矩为 0.08 N · m, 方位电机所需的驱动力矩约为 1.38 N · m。

5.2 跟踪系统中的电流环作用分析

在传统的跟踪控制系统中, 多采用速度、位置

双闭环系统, 此时速度回路的控制对象为二阶惯性环节和振荡环节。其中二阶惯性环节代表伺服电机的机电特性和电气特性, 惯性环节的时间常数分别为电机的机电时间常数和电气时间常数; 振荡环节代表伺服机构的机械谐振特性, 基于此控制对象特性, 速度回路的低频增益受系统相位裕度的影响, 很难有大的提高, 这必然影响位置回路的跟踪精度。

由图 7 可知, 若采用电流环控制, 则电流环的信号输入点为 a, 电流环的电流反馈点为 b; 而速度环是通过反电势 $E(s)$ 对电流环产生影响。在实际系统中, 处于外环的控制对象的机电时间常数 T_m 比电流环的时间常数 T_l 大得多, 经电流环校正后输出量的动态过程变化很快, 而反电势 E (反映转速) 的变化过程相对来说是缓慢的, 因此在设计精密跟踪伺服控制器时必须引入电流环, 以加快伺服系统响应。

5.3 三闭环控制结构与复合跟踪策略

作为内环, 电流环用于提高系统刚性和加快系统响应; 作为中环, 速度环用来抑制系统的干扰、减小直流电动机的惯性和改善系统线性度; 作为外环, 位置环用于保证闭环精度、提高系统的跟随性能, 三者一体形成完整的反馈控制闭环。同时, 为提高系统对动态目标的跟踪能力, 在反馈控制的基础上增加一开环控制支路, 用以提供运动目标的速度预测。跟踪控制系统的控制结构如图 8 所示。

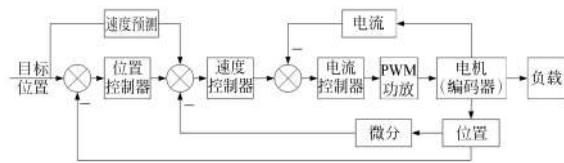


图 8 跟踪控制结构框图

Fig. 8 Block diagram of tracking and control system

在跟踪控制过程中, 由于 PSD 只能提供激光光斑偏离靶球中心的脱靶量, 不能预先给出目标的空间位置、速度和加速度信息, 因此前馈控制无法直接实现。本文采用速度、加速度滞后补偿的等效前馈控制: 即通过对角度、距离、PSD 数据处理合成获得激光的理论指向位置, 然后通过对理论指向位置的一次微分、二次微分及其滤波平滑处理, 实时预测合作目标的运动速度, 以提高动态跟踪性能。

6 跟踪实验

6.1 跟踪实验的电控方案设计

本文在获得目标的精密脱靶量、两维角度、绝对距离(限于篇幅本文不再讨论干涉测距内容)等的基础上,构建了一套基于“DSP+FPGA”架构的嵌入式系统,通过对信息进行并行高速实时处理,实现目标的精密跟踪。其中 FPGA 模块着重实现脱靶量、角度、距离及其他传感信息的同步采集与数据传输,DSP 模块重点实现跟踪控制算法开发、数据处理以及与上位机的通信,电控系统结构框图如图 9 所示。

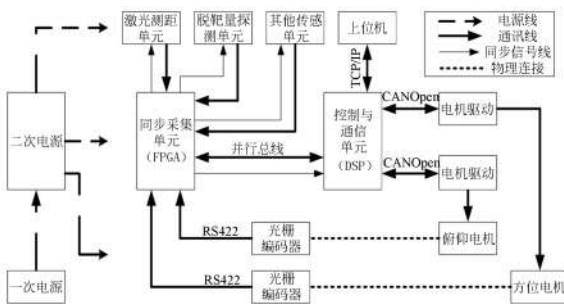


图 9 电控单元组成框图

Fig. 9 Block diagram of electronic control unit

如图 9 所示, FPGA 模块负责产生同步时钟。在同步时钟的时序控制下,脱靶量探测、角度测量、激光测距等单元进行信息同步处理并将结果依 LVDS 信号形式发送到 FPGA 模块;同时 DSP 模块(控制与通信模块)按照同步时序与 FPGA 模块以及上位机分别采用并行总线和 TCP/IP 协议进行数据交互。根据运动目标的位置反馈信息估计目标的运动状态,采用复合控制策略确定伺服电机的转动位置、速度和加速度,并按照 CANOpen 协议发送到伺服驱动器,实现对目标的精密跟踪。

6.2 跟踪实验结果

为了测试所设计跟踪系统的性能,开展了长距离跟踪实验,实验场景如图 10 所示。实验结果显示:激光跟踪仪的最远跟踪距离不小于 41.7 m,而在此之前国内尚无 5.0 m 以上距离的激光跟踪实验报道。

由于方位跟踪系统的驱动负载大并且存在导线随机拖拽与阻滞现象,导致跟踪性能上方位稍



图 10 跟踪距离测试实验

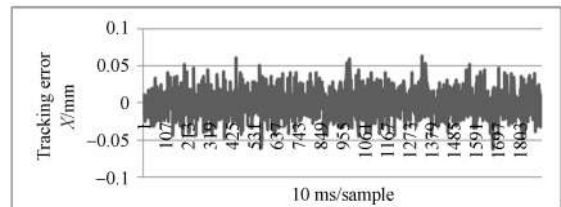
Fig. 10 Tracking distance testing experiment

逊于俯仰,因此综合跟踪能力受限于方位跟踪单元。根据《激光跟踪三维坐标测量系统校准规范》规定,跟踪性能以目标距离跟踪仪 3.0 m 处为准。为此将目标靶球放置在直线电机(固定在光学平台上)承载台上,如图 11(a)所示。当直线电机驱动目标以 2.0 m/s 的速度进行水平直线运动时,PSD 的跟踪误差如图 11(b)。



(a) 直线运动平台

(a) Linear moving platform



(b) 跟踪误差

(b) Tracking errors

图 11 方位跟踪实验

Fig. 11 Experiment of horizontal tracking ability

上述跟踪实验结果表明,激光跟踪仪的单轴跟踪能力优于 2.0 m/s,足以满足常规跟踪测量的速度要求。

7 结论

本文针对激光跟踪仪的跟踪伺服控制系统进行了整体研究与总体方案设计。提出了基于 PSD 的目标脱靶量精密探测方案,研究了信号调

理与数字滤波方法,使得脱靶量在 $x \in (-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$, $y \in (-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ 的方形区域内的探测稳定性优于 $\pm 2.0 \mu\text{m}$; 设计了圆光栅数据采集系统,实现了光栅信号的辨向、细分与准确计数,并在此数据的基础上分析了激光跟踪仪角度误差的形成机理,提出了角度误差的在线补偿方法,将角度测量误差由 $3.5''$ 降至 $1.5''$ 。建立了永磁直流力矩电机的数学模型,分析了电流闭环在动态跟踪中的关键作用,提出了三闭环的控制结构与

复合跟踪控制策略,构建了跟踪系统的完整电子学实验平台,系统解决了动态跟踪距离近、速度慢、精度低等问题。实验结果表明,单轴跟踪速度不低于 2.0 m/s , 最近跟踪距离不低于 41.7 m 。该技术指标为目前国内该领域的最好水平,并已接近国际水平。

激光跟踪是空间目标动态跟踪、引导、测量的关键技术,并有望推广应用于激光通信、智能机器人、军事装备等领域。

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): 851-857.
ZHOU W H, DING L, WANG Y W, *et al.*. A visual inspection system for online measurement application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 851-857. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 王金栋, 郭俊杰, 费致根, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 13-19.
WANG J D, GUO J J, FEI ZH G, *et al.*. Method of geometric error identification for numerical control machine tool based on laser tracker[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14): 13-19. (in Chinese)
- [4] KLAUS W, MATTHIAS F, FRANK H. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. *Measurement*, 2012, 45: 2339-2345.
- [5] 刘永东, 王佳, 胡朝晖, 等. 距离法运动目标激光跟踪测量系统的研究[J]. 光学仪器, 2001, 23(3): 12-16.
LIU Y D, WANG J, HU ZH H, *et al.*. Laser tracking system for coordinate measurement of moving target by length-measured method[J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(3): 12-16. (in Chinese)
- [6] 付继有. 多路激光跟踪干涉仪柔性坐标测量系统[D]. 天津: 天津大学, 1997.
FU J Y. *Flexible Coordinate Measuring System of Multi-Path Laser Tracker*[D]. Tianjin: Tianjin University, 1997. (in Chinese)
- [7] 张国雄, 李杏华, 林永兵. 多路法激光跟踪干涉测量系统的研究[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 23-27.
ZHANG G X, LI X H, LIN Y B. Study on the multi path laser tracking measuring system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(1): 23-27. (in Chinese)
- [8] 隋修武, 张国雄, 李杏华, 等. 四路激光跟踪柔性坐标测量系统的跟踪器设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1253-1256.
SUI X W, ZHANG G X, LI X H, *et al.*. Design of the tracker in four-beam laser tracking flexible coordinate measuring system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(12): 1253-1256. (in Chinese)
- [9] 陈曦. 激光跟踪系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2007.
CHEN X. *Design of a Laser Tracking System* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [10] 陈新华. 球坐标法激光跟踪控制系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
CHEN X H. *Research on the Laser Tracking Control System Based on Spherical Coordinate* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [11] 张亚娟, 袁祖荣, 李杏华, 等. 基于PSD的激光跟踪坐标测量系统的研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(7): 116-119.
ZHANG Y J, QIU Z R, LI X H, *et al.*. Laser tracking coordinate measurement system based on PSD [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(7): 116-119. (in Chinese)

- [12] 张亚娟. 单站式激光跟踪坐标测量系统研究[D]. 天津:天津大学,2012.
ZHANG Y J. *Stand Alone Laser Tracking System* [D]. Tianjin:Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [13] 杨艳,黄劼,曾力. 激光跟踪仪两级双轴联动闭环控制系统研究[J]. 中国测试,2012,38(1):90-93.
YANG Y, HUANG J, ZENG L. Study on closed-loop control system with dual-axis linkage for laser tracker[J]. *China Measurement & Test*, 2012, 38(1):90-93. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z L, ZHOU W H, LAO D B, *et al.*. Research and development of the laser tracker measurement system [J]. *SPIE*, 2012, 8759: 87593Z1-87593Z7.
- [15] KONG L C, LI E P, YANG D X, *et al.*. The PSD general response function [J]. *IEEE Electron Transactions on Devices*,2012,59(3):835-840.
- [16] 张敏,梁雁冰. 二维四边形位置敏感探测器实验研究[J]. 红外与激光工程,2013,42(2):459-464.
ZHANG M, LIANG Y B. Experiment on two dimensional quadrilateral position sensing detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2):459-464. (in Chinese)
- [17] 董登峰,王博,李万红,等. 激光跟踪仪角度采集系统设计及误差修正研究[J]. 计测技术,2014,34(5):13-16.
DONG D F, WANG B, LI W H, *et al.*. Research on angle acquisition system design and angle error compensation [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2014, 34(5):13-16. (in Chinese)
- [18] 高贯斌,王文,林铿. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1766-1762.
GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1766-1762. (in Chinese)
- [19] 赵人杰,马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. 仪器仪表用户,2009,116(3):69-71.
ZHAO R J, MA W L. Improving the accuracy of new type encoders using error harmonic compensation [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2009,116(3):69-71. (in Chinese)
- [20] KAUL S K, TICKOO A K, KOUL R, *et al.*. Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2008, 586(A):345-355.

作者简介:



董登峰(1981—),男,河南商丘人,博士,助理研究员,2004年于郑州大学获得学士学位,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事嵌入式系统设计、跟踪控制、激光精密测量等方面的研究。E-mail: dongdengfeng@aoe.ac.cn



周维虎(1962—),男,安徽合肥人,博士,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

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)