

文章编号:1002-2082(2011)05-0822-05

# 高精度光电弹道测量系统

寿少峻, 陆培国, 柳井莉, 刘小强, 邢军智

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 利用光电跟踪系统实时测量导弹类飞行目标已成为靶场测试手段的发展趋势之一, 光电跟踪系统需要具备高精度跟踪高速飞行目标、实时输出目标飞行轨迹数据以及目标飞行姿态等实时图像信息。提出一种新型车载光电弹道测量系统, 应用高强度轴承改善角位置输出的稳定性; 利用再生反馈控制技术抑制跟踪快速目标时产生的滞后误差, 提高光电弹道系统的测量精度; 将测量数据归一化为垂线测量坐标系中的测量值, 以 20 ms 的刷新率对外输出; 提出模拟航路检测方式, 可在野外条件下完成对光电设备性能检测, 实际稳态跟踪精度可达到 0.21 mrad。

**关键词:** 光电测量; 伺服控制; 坐标转换

中图分类号: TN206

文献标志码: A

## High precision electro-optical ballistic measurement system

SHOU Shao-jun, LU Pei-guo, LIU Jing-li, LIU Xiao-qiang, XING Jun-zhi

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Electro-optical tracking systems are widely used to make the real-time measurement of flying targets in test field due to their capabilities of tracking high speed targets precisely, as well as providing flight path data and flight attitude image in real time. A novel vehicle-borne electro-optical trajectory measurement system is presented. Rigid bearings were used to improve the stability of angular position output. Regenerative feedback technology was applied to suppress lagging error when a high-speed target was tracked. Measurement data with 20 ms update rate were normalized to rectangular coordinates to make data analysis conveniently. Besides, a simulated trajectory detection method to test system in the field is put forward. The system is flexible to be deployed and is able to measure trajectory of flying target promptly and precisely. The steady-state tracking accuracy can reach 0.21 mrad.

**Key words:** electro-optical measurement; servo control; coordinate transformation

## 引言

弹道测量系统是导弹武器试验的重要组成部分之一, 对保障导弹试验和促进导弹技术发展起着至关重要的作用。近年来, 光电弹道测量系统由于其测量精度高、直观性强、性能稳定可靠和抗干扰能力强等优点, 日渐成为导弹等飞行目标弹道测量的主要手段, 与雷达测量系统相辅相承, 完

成弹道测量任务。随着新技术的发展和应用, 光电测量系统逐步完成了系统小型化, 提高了探测器威力和伺服系统扰动隔离能力, 易于实现车载安装方式, 使光电系统具备了机动布站, 动态实时测量的能力, 成为起始段和弹道末段以及掠地类弹道测量的主要测试手段。弹道测量光电系统设计的关键是高速目标跟踪技术和机动方式下测试

收稿日期: 2010-09-29; 修回日期: 2011-04-28

作者简介: 寿少峻(1972—), 男, 浙江诸暨人, 高级工程师, 主要从事光电跟踪伺服控制系统的研发工作。

E-mail: smart\_show@hotmail.com

数据后期处理算法。

## 1 光电系统构成

光电系统采用双轴双环架结构,基座为方位伺服机构,安装有方位伺服电机、方位旋转变压器、方位角速度测量陀螺和导电划环。上置俯仰伺服系统,包括俯仰伺服电机和俯仰旋转变压器以及稳定框架<sup>[1-3]</sup>。电视探测器、红外热像仪、激光测距机等安装于俯仰稳定框架中,构成多复合跟踪系统。

系统安装有光纤陀螺和旋转变压器,作为速度和位置传感器。伺服系统通过速度和位置反馈构成的双环路控制模式<sup>[4]</sup>,方位和俯仰轴系的控制模式相同,单一轴系伺服原理框图如图1所示。

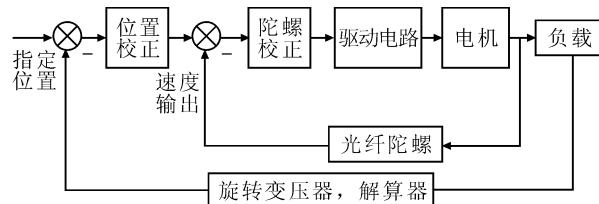


图1 单一轴系伺服原理框图

Fig. 1 Concept of single axis servo

单一轴系伺服系统的内环是陀螺稳定环,系统在惯性坐标系下将速度反馈给陀螺,陀螺产生

误差信号输出,经陀螺环控制环节校正后驱动负载,此环路为速度回路。外层为位置闭环,由旋转变压器输出瞄线角位置量,作为反馈量与指定位置求差,产生位置误差信号,经位置环节校正后向速度环路输出速度信号,与光纤陀螺输出(速度反馈)求差,得到速度误差信号,经校正后驱动负载,使瞄准线对准目标,这是光电系统的基本控制模式。不同于目前通行的光学测量设备,系统轴系采用可抵抗外扰动的高刚度轴承,保证了轴系转动时系统角位置输出的稳定性,系统的正交耦合误差达到0.05 mrad量级,且重复性很高,可视为系统误差进行补偿,从而提高了系统角位置输出量精度。

系统采用全数字控制方式,采样频率设置为1 000 Hz。全系统数据采集具有高实时性,系统测量精度高达3"。

## 2 跟踪方式

光电系统的基本跟踪方式如图2所示。光电系统捕获目标后,系统将切断旋转变压器反馈的角位置量(即图中虚线部分);改用视频跟踪器输出的目标空间位置角差作为位置反馈,构成空间位置闭环。同时系统无差度调整为2阶,确保系统跟踪精度。

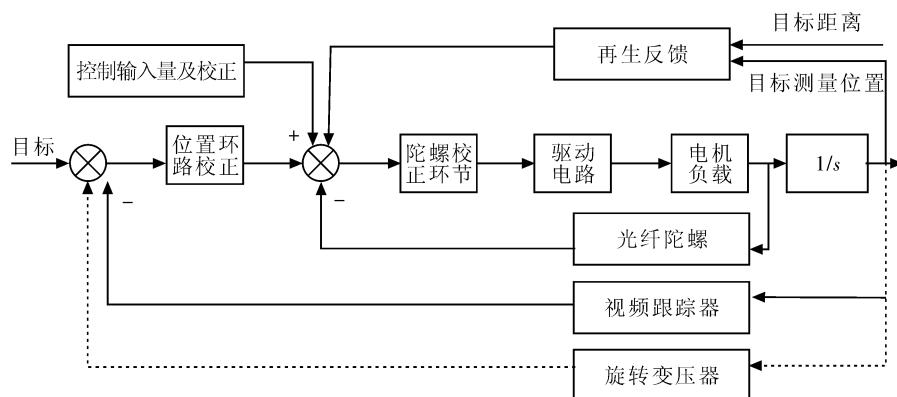


图2 伺服系统基本跟踪模式示意图

Fig. 2 Basic tracking mode of servo system

对于快速目标的跟踪,光电系统跟踪误差的主要来源是伺服系统存在跟踪滞后误差<sup>[5-8]</sup>。当目标飞近后,方位和俯仰轴系无法在空间二阶闭环跟踪模式下提供足够大的旋转速度导致跟踪滞后误差加大。采用远区二阶空间闭环和近区再生反馈2种不同的跟踪方式,系统自适应控制切换2种状态,可充分保证系统的跟踪精度。采用复合控制技术是解决跟踪滞后问题的有效途径,图3为并

联型复合控制示意图。

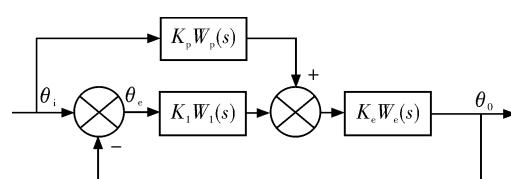


图3 并联型复合控制技术

Fig. 3 Shunt-wound compound control technology

图中系统的误差传递函数:

$$\psi_e(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1 - K_p W_p(s) \times K_c W_c(s)}{1 - K_1 W_1(s) \times K_c W_c(s)} \quad (1)$$

$$\text{令 } K_c W_c(s) = \frac{K_v}{s(\frac{s^2}{\omega_0^2} + 2\xi \frac{s}{\omega_0} + 1)}, K_1 W_1(s) =$$

$K_1; K_p W_p(s) = \frac{2\xi s^2}{\omega_0 K_1} + \frac{s}{K_1}$ 。代入(1)式计算可得到  $\psi_e(s) = \frac{s^3}{\omega_0}$ 。

由此可见,复合控制的本质是引入了目标速度信号作为附加控制信号进行前馈校正,提高系统的无差度,使系统的跟踪精度得到有效改善。

如果可以得到一个目标当前的速度量作为前馈信号,送入伺服系统的速度环路,即可构成上述前馈控制。然而复合控制使用的附加速度信号是由目标位置信号微分得到的,但在实际使用中目标位置信号无法直接获取。对于图2所示的控制系统,复合控制技术使用的是目标的位置误差信号,并非目标的位置信号,这给需要得到目标的速度信号来进行复合控制带来困难。其原因是同一时刻的输出与目标测量位置之间仅差一跟踪误差量  $\theta_e$ 。图2中实际输出  $\theta_o$  和目标测量位置  $\theta_i$  的关系为  $\theta_i = \theta_o + \theta_e$ 。当利用目标测量数据作为前馈输入时,微分结果中包含了对目标误差信号的求导量  $d\theta_e/dt$ 。 $d\theta_e/dt$  的加入将使系统稳定性急剧下降。系统趋于不稳定,无法工作。如果将  $d\theta_e/dt$  的信息滤除, $d\theta_i/dt$  中就只有目标运动速度的信息,就可以作为复合控制的输入,符合传统的复合控制方式。

因此,在目标飞行轨迹短时间内为匀加速直线运动的假设条件下,在惯性直角坐标系中进行窄带滤波,可以得到几乎纯粹的目标飞行速度的信息作为前馈控制的输入,这就是再生反馈技术的基本原理。

### 3 测试数据归一化

光电系统的实测数据为光电测量极坐标系下的数据,不利于弹道绘制和实验评价,因此在光电数据输出前需进行坐标转换,统一输出为垂线测量坐标系下的数据,以便进行后期数据处理。

#### 3.1 光电系统测量坐标系

光电系统测量坐标系定义如图4所示。

##### 1) 测量直角坐标系 XYZ

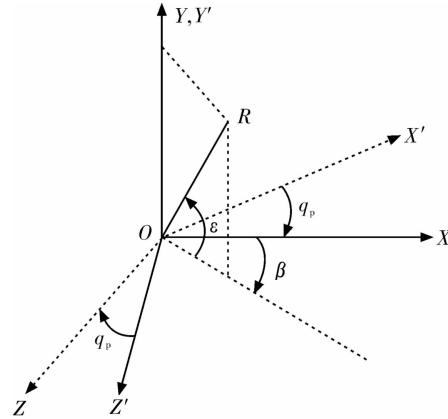


图4 光电系统测量坐标系

Fig. 4 Measurement coordinates of electro-optical system

O为坐标系原点,光电系统三轴交汇中心;OX轴在过O点的水平面内,为光电系统方位轴零线;OY轴为过O点的铅垂线,向上为正;OZ轴位于过O点的水平面内,为光电系统俯仰轴线,与OX轴、OY轴构成右手直角坐标系。

##### 2) 测量极坐标系 $R\beta\epsilon$

R为瞄准线方向或目标斜距;β为方位角,以OX为基准,顺时针方向为正;ε为仰角,以方位旋转平面为基准,向上为正。

##### 3) 垂线测量坐标系

O点为光电系统三轴交汇中心;OX'轴在过O点的水平面(水准面)内,指向天文北;OY'轴为过O点的铅垂线,向上为正;OZ'轴位于过O点的水平面(水准面)内,与OX'轴、OY'轴构成右手直角坐标系。

#### 3.2 坐标转换过程

##### 1) 测量极坐标系转换为测量直角坐标系

光电输出量应直接转化为对应坐标系下的直角坐标值,可用以下公式:

$$X = R \cos \epsilon \cos \beta$$

$$Y = R \cos \epsilon \sin \beta$$

$$Z = \sin \epsilon$$

##### 2) 转换为垂线测量坐标系

垂线测量坐标系和光电测量直角坐标系之间仅差台架零位和天文北的差角,见图4所示,其对

应的转化关系为  $\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ ;式中A矩阵,且  $A =$

$$\begin{bmatrix} \cos q_0 & 0 & -\sin q_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_0 & 0 & \cos q_0 \end{bmatrix}; \text{其中 } q_0 \text{ 是光电台架零位和}$$

天文北的差角。

#### 4 检测方式

光电系统跟踪精度是由伺服系统的跟踪能力保证的<sup>[8-10]</sup>。伺服系统的频域和时域特性不能确定伺服系统的跟踪能力,设计时,利用伺服系统的设计硬件冗余,设置模拟航路检测方式测试伺服系统的跟踪能力,即在显控计算机建立一个虚拟目标模型,伺服系统根据虚拟目标的空间轨迹进行实际的跟踪测试,以20 ms的周期记录伺服系统的跟踪状态和跟踪参数数据。模拟目标特性一般设定为水平直线飞行,飞行航路参数由航高H、航速V和航路捷径P所决定。如有必要,可依据实际目标航迹设定,表1为模拟航路跟踪结果。

表1 模拟航路跟踪结果

Table1 Tracking results of simulated trajectory

航路数据	方位误差统计		俯仰误差统计	
	系统误差 /mrad	随机误差 /mrad	系统误差 /mrad	随机误差 /mrad
$H:500\text{ m}$ ,				
$P:500\text{ m}$ ,	-0.050 32	0.114 6	-0.007 0	0.032 4
$V:238\text{ m/s}$				
$H:500\text{ m}$ ,				
$P:1500\text{ m}$ ,	-0.033 2	0.044 1	-0.008 2	0.030 1
$V:238\text{ m/s}$				
$H:50\text{ m}$ ,				
$P:100\text{ m}$ ,	-0.065 6	0.276 9	0.014 1	0.111 4
$V:1000\text{ m/s}$				

模拟航路检测方式无需添加额外检测设备,在目前设计的光电系统中直接转入模拟航路方式即可完成检测。该方法不仅用于伺服调试时对系统跟踪能力测试,同时也是光电系统机动布站后对光电系统控制部分全面检测的最佳手段。

图5是车载光电弹道测量系统实际测量某型掠海类导弹(速度2.3马赫即782 m/s)的跟踪误差曲线,数据表明,在完成过渡过程进入稳定跟踪后的峰值跟踪误差为0.21 mrad。

#### 5 结论

光电弹道测量系统采用复合控制技术减小快速目标跟踪的滞后误差,应用可抵抗扰动的高强度轴承改善轴系转动时角位置输出的稳定性,有

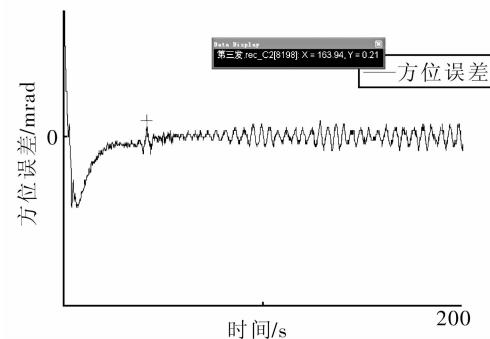


图5 跟踪导弹的误差曲线

Fig. 5 Error curve of missile tracking

效地提高了光电弹道系统的测量精度。通过对光电系统输出数据进行坐标系转换,归一化为统一的垂线测量坐标系,从而使这种光电系统具有车载机动布站的能力,可望成为其他弹道测量手段的比较标准。

#### 参考文献:

- [1] 陆培国,寿少峻.舰载光电系统高精度跟踪控制技术[J].应用光学,2006,27(6):476-483.  
LU Pei-guo, SHOU Shao-jun. The high accuracy tracking technology and its application to ship-borne opto-electronic equipment[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6):476-483. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 刘廷霞 李建海.水平式经纬仪坐标转换的研究与应用[J].测试技术学报,2009,23(5):377-380.  
LIU Ting-xia, LI Jian-hai. Study and application of coordinate transformation of the level mounting theodolite[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009, 23(5):377-380. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 杨秀华,吉桐伯,陈娟,等.预测滤波技术在光电跟踪系统中的应用[J].电光与控制,2003,10(3):11-15.  
YANG Xiu-Hua, JI Tong-bo, CHEN Juan, et al. Application of predicting filter in electro-optical tracking system [J]. Electronic Optic & Control, 2003, 10(3):11-15. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 张第.多轴数字伺服控制器的开发[D].天津:天津大学,2010.  
ZHANG Di. Development of multi-axis digital servo controller[D]. Tianjin : Tianjin University, 2010.
- [5] WU Jian-hua, PU Dong-lin, DING Han. Adaptive robust motion control of SISO nonlinear systems with implementation on linear motor [J]. Mecha-

- tronics, 2007, 17(4-5): 263-270. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 张智永. 光电稳定伺服机构的关键测控问题研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.  
ZHANG Zhi-yong. A study on key measurement & Control problems of electro-optical stabilization servo mechanism[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2006. (in Chinese)
- [7] 宋彦. 伺服系统提高速度平稳度的关键技术研究与实现[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.  
SONG Yan. Study and realization on key technology for improve velocity Stability[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics
- Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [8] GEORGE Ellis. 控制系统设计指南[M]. 第三版. 北京:电子工业出版社,2006.  
GEORGE Ellis. control system design guide[M]. 3rd ed. Beijing Publishing House of Electronics Industry,2006. (in Chinese)
- [9] MARTON LORINC, LANTOS BELA. Modeling, identification, and compensation of stick-slip friction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 511-521.
- [10] ZHAO S, PUTRA AS, TAN KK, et al. Intelligent compensation of friction, ripple, and hysteresis via a regulated chatter[J]. ISA Transactions, 2006, 45(3): 419-433.