

车载光电系统跟踪精度的分析与提高

马优恒, 赵磊, 赵振海, 刘彤, 李维杰
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:为提高车载光电系统作战性能,对系统跟踪精度的影响因素与误差源进行分析。进而根据误差的产生条件,对其进行分类与合成,推导出系统误差与随机误差的计算公式。并以某一光电系统为例分析计算,最后提出跟踪精度提高与补偿的方法。结果表明,该光电系统的方位系统误差为 0.325 mrad,俯仰系统误差为 0.283 mrad,随机误差为 0.276 mrad,均小于 0.5 mrad,满足技术指标要求。

关键词:车载光电系统;跟踪精度;误差源;系统误差;随机误差

中图分类号:TN206 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.019

Analysis and improvement of tracking precision in vehicle-mounted electro-optical system

MA You-heng, ZHAO Lei, ZHAO Zhen-hai, LIU Tong, LI Wei-jie
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the operational performance of vehicle-mounted electro-optical system, the influence factors and error sources of the system tracking accuracy are analyzed. Then according to the producing conditions of the error, the calculation formula of system error and random error are deduced. Taking a certain electro-optical system as an example, a method to improve the tracking accuracy and compensation was proposed through analysis and calculation. The results show that the azimuth system error, the elevation system error and the random error of the system are 0.325 mrad, 0.283 mrad and 0.276 mrad respectively, and the results are all less than 0.5 mrad, which meets the requirement of technical index.

Key words: vehicular electro-optical system; tracking accuracy; error source; system error; random error

1 引言

车载光电系统是一种以具有极高时域和频域分辨率的光波为信息载体,具有高探测能力和精密跟踪性能,在目标动态测量、轨迹跟踪记录、侦查监视、定位通信、制导瞄准等军事领域举足轻重的光电一体设备^[1]。光电系统设计的好坏直接影响武器系统的性能。针对被跟踪目标速度更快、机动性更强等情况的出现,对光电系统跟踪精度也提出了更高的要求^[2]。

然而实际作战环境十分复杂,战车会受到地形因素的影响而摇摆起伏。这种大幅度、低频率的干扰会使得光电跟踪系统跟随车体一起不规则地运动,由于运动的随机性,导致跟踪精度急剧降低^[3]。如何准确获得这些不确定性误差,并利用陀螺、快速反射镜等精确补偿器件对误差进行补偿,进而提高光电系统跟踪精度,是目前亟待解决的问题。本文针对车载光电系统的实际工作环境,分析跟踪精度影响因素与误差源,并将计算所得误差值带入补偿

环节,从源头提高跟踪精度,避免了补偿器件带来的额外负载量。以一种光电跟踪系统为例,对误差进行合成与分类计算。计算结果表明,方位、俯仰系统误差及随机误差均小于 0.5 mrad,满足此光电系统的技术指标要求。最终通过归纳与总结,提出跟踪精度补偿与提高的方法。

2 跟踪精度的影响因素与误差源分析

2.1 影响因素

光电系统对目标实施探测、捕获和跟踪,待测目标的信息要通过大气传输、光学系统、光电传感器、视频跟踪器、伺服控制系统和跟踪转台各环节变换传输^[4],如图 1 所示。在这个过程中,会产生不同种类的误差,这些误差对光电系统的稳定跟踪性能影响极大。

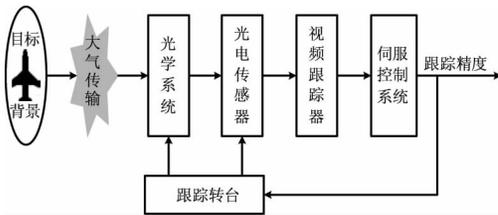


图 1 目标跟踪信息流程图

Fig. 1 Information flow chart of target tracking

2.2 误差源分析

(1) 大气扰动误差

由于大气湍流的影响,目标点像将在密度和位置上产生随机起伏,其高频成分使得像点弥散、能量分散;低频分量会造成像点偏移^[5]。把大气扰动引起的目标质心偏移作为大气扰动误差,按公式(1)计算:

$$\delta_{dq} = \frac{K \sec Z}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

其中, δ_{dq} 为大气扰动误差; K 为大气扰动角值; Z 为天顶角度值; D 为光电传感器口径。

(2) 光学系统误差

对于光学系统而言,彗差、倍率色差和畸变等均会引起像点中心的偏移,从而带来跟踪误差^[6],设计中应对这些像差进行修正,一般将最大偏移量控制在 1/4 像素以内,光学系统误差按公式(2)计算:

$$\delta_{gx} = 250 \arctan \frac{a}{f} \approx \frac{250a}{f} \quad (2)$$

其中, δ_{gx} 为光学系统误差; a 为每个像素的尺寸; f 为光学系统焦距。

(3) 光电探测器检测误差

造成光电探测器检测误差的因素有探测器分辨力和信噪比,两者引起的误差分别按公式(3)和公式(4)计算,信噪比引起的误差一般极小,通常忽略不计^[7]。

$$\delta_{xb} = 1000 \arctan \frac{1}{nf} \approx \frac{1000}{nf} \quad (3)$$

$$\delta_{xz} = \frac{0.62\lambda}{D} \times \text{SNR} \quad (4)$$

其中, δ_{xb} 为探测器分辨力引起的误差; n 为探测器的分辨力; δ_{xz} 为探测器信噪比引起的误差; λ 为平均波长; SNR 为探测器信噪比。

(4) 正交性误差

正交性误差是由跟踪转台轴系的倾斜,即方位轴误差、俯仰轴误差和瞄准轴误差引起的跟踪误差^[8]。

方位轴误差是指方位转轴与安装基面的垂直度误差,其引起的方位和俯仰的跟踪误差如公式(5)所示:

$$\begin{cases} \delta_{\text{ajA1}} = m \sin A' \tan E \\ \delta_{\text{ejE1}} = m \cos A' \end{cases} \quad (5)$$

其中, δ_{ajA1} 为方位轴误差引起的方位角误差; δ_{ejE1} 为方位轴误差引起的俯仰角误差; m 为方位轴误差; A' 为有方位轴误差时的方位角; E 为目标俯仰角。

俯仰轴误差是指俯仰转轴与方位转轴的垂直度误差,其引起的方位和俯仰的跟踪误差如公式(6)所示:

$$\begin{cases} \delta_{\text{ajA2}} = l \tan E \\ \delta_{\text{ejE2}} = \frac{l^2}{2} \tan E \end{cases} \quad (6)$$

其中, δ_{ajA2} 为俯仰轴误差引起的方位角误差; δ_{ejE2} 为俯仰轴误差引起的俯仰角误差; l 为俯仰轴误差。

瞄准轴误差是指光电传感器瞄准轴与俯仰转轴的垂直度误差,其引起的方位和俯仰的跟踪误差如公式(7)所示:

$$\begin{cases} \delta_{\text{ajA3}} = k \sec E \\ \delta_{\text{ejE3}} = \frac{k^2}{2} \tan E \end{cases} \quad (7)$$

其中, δ_{ajA3} 为瞄准轴误差引起的方位角误差; δ_{ejE3} 为瞄准轴误差引起的俯仰角误差; k 为瞄准轴误差。

综合方位轴误差、俯仰轴误差和瞄准轴误差,正交性引起的方位和俯仰的跟踪误差由公式(8)

计算:

$$\begin{cases} \delta_{jA} = \sqrt{\delta_{jA1}^2 + \delta_{jA2}^2 + \delta_{jA3}^2} \\ \delta_{jE} = \sqrt{\delta_{jE1}^2 + \delta_{jE2}^2 + \delta_{jE3}^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, δ_{jA} 为正交性引起的方位跟踪误差; δ_{jE} 为正交性引起的俯仰跟踪误差。

(5) 视频跟踪器解算误差

视频跟踪器解算误差主要取决于光电传感器视场和视频跟踪器解算分辨率,一般取视频跟踪器最小解算分辨率所对应的角度值,按公式(9)计算^[9]:

$$\delta_{sp} = \frac{\omega}{\beta} \quad (9)$$

其中, δ_{sp} 为视频跟踪器解算误差; ω 为光电传感器的视场; β 为视频跟踪器的解算分辨率。

(6) 伺服控制系统误差

伺服控制系统误差包括动态跟踪误差、驱动信号转换误差、不灵敏区误差、零点漂移误差和扰动力矩误差等^[10]。

动态跟踪误差是由于输入信号中包含比伺服系统所能跟踪的更高的输入导数所引起的误差。通常, I 型伺服控制系统为速度滞后(或超前)误差, II 型伺服控制系统为加速度滞后(或超前)误差,以此类推。这类误差由系统总的开环增益所决定。对于光电系统,大多采用 II 型伺服控制系统,其动态跟踪误差按公式(10)计算:

$$\delta_{dt} = \frac{\dot{\theta}(t)}{K_v} + \frac{\ddot{\theta}(t)}{K_a} \quad (10)$$

其中, δ_{dt} 为动态跟踪误差; $\dot{\theta}_i(t)$ 为跟踪角速度; K_v 为速度品质因数; 又称速度放大系数; $\ddot{\theta}_i(t)$ 跟踪角速度; K_a 为加速度品质因数, 又称加速度放大系数。

此外,还包括瞄准轴漂移误差、数据传输误差、电路噪声误差、测角单元误差等^[11],根据战车的具体作战环境及光电系统的工作状态,取值各有不同。

3 误差的分类与合成

3.1 误差的分类

根据误差的性质分出系统误差和随机误差。其中,系统误差是指在相同条件下,多次观测值服从某一确定规律(如定值、线形、多项式、周期性等函数规律)的误差;随机误差是指在相同条件下,多次观测值服从统计规律(如正态分布、均匀分布等)的误差,主要表现为误差结果的分散性,大小和极性不可确定性,产生的原因往往难以具体分析。

3.2 误差的合成

假设每个影响光电系统跟踪精度系统误差的因素为 δ_i , 误差数量为 j 个。其加权影响因子为 m_i 。那么经过合成的系统误差 δ_{xt} 由公式(11)表示:

$$\delta_{xt} = \sum_{i=1}^j m_i |\delta_i| \quad (m_i \geq 0) \quad (11)$$

假设每个影响光电系统跟踪精度随机误差的因素为 δ_p , 误差数量为 q 个。其加权影响因子为 n_p 。那么经过合成的随机误差 δ_{sj} 由公式(12)表示:

$$\delta_{sj} = \sqrt{\sum_{p=1}^q (n_p \cdot \delta_p)^2} \quad (12)$$

以某光电系统为例进行分析计算,该光电系统的系统误差主要由光学系统误差、探测器分辨率引起的误差、视频跟踪器解算误差、光电轴不重合误差、伺服动态跟踪误差、驱动信号转换误差、正交性误差、测角单元误差等组成;而随机误差主要由大气扰动误差、瞄准轴漂移误差、不灵敏区误差、零点漂移误差、扰动力矩误差、电路噪声误差、数据传输误差等组成。其技术指标中对系统误差和随机误差的要求均为不大于 0.5 mrad。误差合成结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,此光电系统的方位系统误差为 $\delta_{xtA} = 0.325$ mrad,俯仰系统误差为 $\delta_{xtE} = 0.283$ mrad,随机误差为 $\delta_{sj} = 0.276$ mrad,均小于 0.5 mrad,满足技术指标要求。

4 跟踪精度的提高与补偿

为了保证光电系统的可靠跟踪和精度测量,根据使用环境和使用目的,通常采用以下技术途径来提高系统的跟踪精度:

(1)通过对影响跟踪精度的误差源进行分析,客观评价各分项误差对总误差的影响,优化系统设计,充分考虑实际应用和成本合理进行误差分配;

(2)合理选择回转轴系布置形式,适当加大轴系中轴承之间的跨距,尽量提高加工及装调精度,减小方位轴误差、俯仰轴误差和瞄准轴误差等带来的正交性误差;

(3)改善伺服控制系统的性能,提高伺服响应速度,减少响应时间,合理提高系统带宽,适当增大速度品质因数和加速度品质因数,以减小伺服动态跟踪误差;

(4)根据光电系统已测量的目标的信息,采取

再生反馈跟踪技术,利用预测滤波算法,预推出目标未来信息,从而提高系统的快速性和跟踪精度;

表1 误差分类结果

Tab.1 Result of error classification

分类	名称	代号	示例误差值	
系统误差	光学系统误差	δ_{gx}	$\delta_{gx} = 0.009 \text{ mrad}$	
	探测器分辨率引起的误差	δ_{xb}	$\delta_{xb} = 0.035 \text{ mrad}$	
	视频跟踪器解算误差	δ_{sp}	方位	$\delta_{spA} = 0.051 \text{ mrad}$
			俯仰	$\delta_{spE} = 0.067 \text{ mrad}$
	光电轴不重合误差	δ_{zbc}	方位	$\delta_{zbcA} = 0.026 \text{ mrad}$
			俯仰	$\delta_{zbcE} = 0.033 \text{ mrad}$
	伺服动态跟踪误差	δ_{dt}	$\delta_{dt} = 0.204 \text{ mrad}$	
	驱动信号转换误差	δ_{qx}	$\delta_{qx} = 0.050 \text{ mrad}$	
	正交性误差	δ_{ji}	方位	$\delta_{jiA} = 0.187 \text{ mrad}$
			俯仰	$\delta_{jiE} = 0.071 \text{ mrad}$
测角单元误差	δ_{cj}	$\delta_{cj} = 0.108 \text{ mrad}$		
合计		方位	$\delta_{xtA} = 0.325 \text{ mrad}$	
		俯仰	$\delta_{xtE} = 0.283 \text{ mrad}$	
随机误差	大气扰动误差	δ_{dq}	$\delta_{dq} = 0.010 \text{ mrad}$	
	瞄准轴漂移误差	δ_{zp}	$\delta_{zp} = 0.150 \text{ mrad}$	
	不灵敏区误差	δ_{bl}	$\delta_{bl} = 0.100 \text{ mrad}$	
	零点漂移误差	δ_{lp}	$\delta_{lp} = 0.100 \text{ mrad}$	
	扰动力矩误差	δ_{rl}	$\delta_{rl} = 0.200 \text{ mrad}$	
	电路噪声误差	δ_{zs}	$\delta_{zs} = 0.150 \text{ mrad}$	
	数据传输误差	δ_{sc}	$\delta_{sc} = 0.030 \text{ mrad}$	
	合计		$\delta_{sj} = 0.276 \text{ mrad}$	

(5)实际产品不可避免有误差,可根据误差种类和分布,采取补偿措施。如测角单元误差,可以精密检测出编码器多个位置的误差值,通过拟合求出误差曲线,进而通过插值对编码器输出值进行修正;其他误差则需通过大量的测试和分析,找到误差分布规律,在一定程度上也可进行修正补偿^[12]。

5 结论

本文针对车载光电系统的实际工作环境与工作方式,分析了影响跟踪精度的各种因素。在总结误差来源及分类的基础上,给出系统误差与随机误差的合成公式。并以某一光电系统为例进行分析计算:合成后的方位系统误差为 0.325 mrad,俯仰系统误差为 0.283 mrad,随机误差为 0.276 mrad,均小于 0.5 mrad,满足技术指标要求。进一步提出跟踪精度提高与补偿的方法,为推算修正误差量的控制算法提供有力的理论依据,为最终达到车载光电系统高精度稳定跟踪的

目的打下坚实基础。

参考文献:

- [1] ZHANG Yan. A Study on key technology for improve tracking accuracy of ship - based optoelectronic equipment[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,2013. (in Chinese)
张艳.提高舰载光电设备跟踪精度的关键技术研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2013.
- [2] CAI Rong, QI Meng, LI Liya. Design of the lifting platform of vehicular electro-optical reconnaissance system[J]. Laser & Infrared,2014,44(3):273-276. (in Chinese)
蔡荣,祁蒙,李利亚.车载光电侦察系统升降平台设计[J].激光与红外,2014,44(3):273-276.
- [3] GE Qiangsheng, GONG Chikun. Reconnaissance performance analysis for vehicular laser warning device[J]. Laser & Infrared,2003,33(3):175-176. (in Chinese)
葛强胜,龚赤坤.车载式激光告警器探测性能分析计

- 算[J]. 激光与红外,2003,33(3):175-176.
- [4] LI Zeng, WU Zhiyong, TONG Gang, et al. Pointing error correction for vehicular platform theodolite[J]. Optics and precision engineering,2010,18(4):921-927. (in Chinese)
李增,吴志勇,佟刚,等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿[J]. 光学精密工程,2010,18(4):921-927.
- [5] CHEN Xiaosi, SHI Zhan, FAN Xiang, et al. Radiation characteristics analysis of background false alarm sources for vehicular infrared warning system[J]. Laser & Infrared,2013,43(4):409-413. (in Chinese)
陈晓斯,施展,樊祥,等. 车载红外告警系统空间背景虚警源辐射特性分析[J]. 激光与红外,2013,43(4):409-413.
- [6] MING Ming, WANG Jianli, ZHANG Jingxu, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. Optics and precision engineering, 2009, 17(1): 104-108. (in Chinese)
明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学精密工程,2009,17(1):104-108.
- [7] AN Ying, DONG Wei. UV-IR source for test of flame sensor[J]. Journal of Applied Optics,2011,32(3):498-504. (in Chinese)
安莹,董威. 火焰光谱探测器检测用光源设计[J]. 应用光学,2011,32(3):498-504.
- [8] YAN Chaochao, LIU Jin, YANG Haima, et al. Measurement accuracy research of position sensitive detector in ATP system[J]. Laser & Infrared,2015,45(5):524-531. (in Chinese)
颜超超,刘瑾,杨海马,等. ATP跟瞄系统中位置敏感探测器测量精度研究[J]. 激光与红外,2015,45(5):524-531.
- [9] ZENG Zhaoli, QU Xuemin, WEN Jun, et al. Design and error analysis of micro displacement measurement system based on laser high order feedback effect[J]. Laser & Infrared,2015,45(5):487-491. (in Chinese)
曾召利,屈学民,文峻,等. 激光高阶回馈微位移测量系统设计及误差分析[J]. 激光与红外,2015,45(5):487-491.
- [10] XU Tao, LI Bo, LIU Tingxia, et al. Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system [J]. Optics and precision engineering, 2013, 21(3): 782-789. (in Chinese)
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.
- [11] DU Junfeng, ZHANG Mengwei, ZHANG Xiaoming. Angle measurement accuracy of photoelectric theodolite [J]. Journal of Applied Optics,2012,33(3):466-473. (in Chinese)
杜俊峰,张孟伟,张晓明. 光电经纬仪测角精度分析[J]. 应用光学,2012,33(3):466-473.
- [12] WANG Tao, TANG Jie. Calibration compensation on the optical axis swing of the electro-optical theodolite[J]. Laser & Infrared,2015,45(1):63-65. (in Chinese)
王涛,唐杰. 光电经纬仪视轴晃动的标定补偿[J]. 激光与红外,2015,45(1):63-65.