

## 基于光纤陀螺的转台周期性误差抑制方法

杨永清, 梁雁冰, 李治国, 梁冬生

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为抑制测角系统周期性测量误差对光电跟踪系统速度平稳性和成像效果的影响, 采用光纤陀螺系统建立误差模型和误差补偿器, 对系统进行误差补偿控制。首先, 对测角系统测量结果中含有周期性误差的机理进行分析, 建立了周期性测角误差的数学模型; 其次, 采用高精度光纤陀螺建立了一套基于傅里叶理论的角度测量误差模型采集系统, 并通过七个步骤提取了测角误差模型的具体表达式; 然后, 根据提取的测角误差表达式, 分四个步骤对系统周期性误差进行补偿控制。最后, 通过跟踪成像实验来验证控制补偿的有效性。实验结果表明, 跟踪速度误差的最大值降低到  $0.04 (^{\circ})/s$ , 比未补偿控制时降低了 8 倍左右, 满足光学成像系统速度误差小于  $0.1 (^{\circ})/s$  的要求, 条纹成像效果得到了明显改善。

**关键词:** 光纤陀螺; 测角周期误差; 跟踪转台; 傅里叶理论

**中图分类号:** TP343.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1898-05

## Gimbals periodic error suppression based on fiber optic gyroscope

Yang Yongqing, Liang Yanbin, Li Zhiguo, Liang Dongsheng

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to suppress the periodic angle measuring error's fluctuation on gimbals and the imaging effect of photoelectric tracking, a measuring error model and an error control algorithm were established. Firstly, the mechanism of the measurement error of angular measuring system was analyzed, and a mathematical model for the periodic error was established in this paper. Secondly, a measuring error acquisition system based on the high precision fiber optic gyroscope and Fourier was established, and a specific expression of angle measurement error model was established through seven experimental procedures. Then, the periodic system error was compensated according to the measured angle error expressions through four steps. Finally, the effectiveness of control compensation was verified by tracking imaging experiments, and the experimental results show that speed error is reduced to  $0.04 (^{\circ})/s$ , is reduced 8 times. The error meets the requirement of the imaging system less than  $0.1 (^{\circ})/s$ , and the stripe imaging effect is greatly improved.

**Key words:** fiber gyro; angular periodic error; tracking gimbals; Fourier series

收稿日期: 2014-10-17; 修订日期: 2014-11-13

基金项目: 国家 863 计划(2014AA7088053); 陕西省自然科学基金(2012JM8021)

作者简介: 杨永清(1986-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间光电跟踪系统控制与仿真方面的研究。Email: yangyongqing@opt.cn

## 0 引言

高精度跟踪转台搭载成像相机,可完成对空间目标的跟踪成像,是一种典型的光电跟踪系统。为保证跟踪成像系统对空间非合作动态目标的清晰成像,则必须保证转台在规定的成像积分时间内对目标的平稳跟踪,两者保持相对静止。然而,在实际跟踪过程中,无法达到理想的相对静止状态<sup>[1-3]</sup>。例如,某转台搭载成像相机,相机视场为 $8^\circ \times 8^\circ$ ,象元数为 $512 \times 512$ ,积分时间最大可设置为50 ms,根据相机成像特性,若要满足成像清晰度要求,必须保证在成像时间内转台与空间运动目标的动态像移不能超过 $1/3$ 个像元,转台跟踪速度波动小于 $1^\circ/s$ 。在进行跟踪成像实验时发现,测角系统作为整个转台控制系统的闭环反馈,其测量误差的周期性造成了转台跟踪速度波动的周期性。常规PID控制受到带宽及增益限制,无法对此类周期性误差进行有效抑制<sup>[4]</sup>,影响了跟踪成像效果<sup>[5]</sup>。

针对上述问题,文中对测角系统测量误差产生机理进行了分析,并给出了测量误差模型,通过光纤陀螺建立了角度测量误差采集系统,并结合傅里叶理论提取了测角反馈误差的数学模型。在跟踪控制回路中设置误差模型来抑制转台跟踪速度的周期性波动。通过目标跟踪成像实验表明,利用陀螺提取的误差模型可以有效抑制跟踪速度的周期性波动,提高空间跟踪成像效果。

## 1 测角误差机理分析

如图1所示,转台跟踪系统包括转台结构体,电

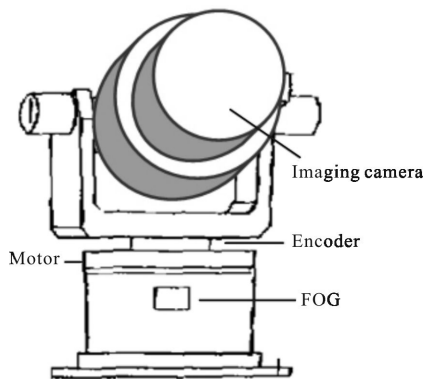


图1 跟踪成像系统的结构

Fig.1 Structure of tracking imaging system

机系统,测角单元,成像相机。其中转台测角系统的轴角测量元件,包括定子和转子两部分。采用单相转子激励,双相定子绕组,鉴幅感应信号处理方式获得角度信息<sup>[6-8]</sup>。单相转子的激励信号为:

$$U = u \times \sin(\omega t) \tag{1}$$

式中: $\omega$ 为激励信号频率; $u$ 为信号幅值。激励信号 $\theta$ 在转子里产生交变磁场,交变磁场在电气相差 $90^\circ$ 的正余弦定子里产生电动势,经过测角系统的放大、滤波、相移等处理后,产生相互正交、幅值相等的两路信号 $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ :

$$\begin{cases} U_{\sin} = U \sin \theta = u \times \sin(\omega t) \sin \theta \\ U_{\cos} = U \cos \theta = u \times \sin(\omega t) \cos \theta \end{cases} \tag{2}$$

将信号 $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ 送入比率乘法器和差分放大器,与上一时刻保留的数字角度值 $\phi$ 进行如下运算:

$$\begin{cases} U_a = U_{\sin} \cos \phi = u \times \sin(\omega t) \sin \theta \cos \phi \\ U_b = U_{\cos} \sin \phi = u \times \sin(\omega t) \cos \theta \sin \phi \end{cases} \tag{3}$$

角度变化对应的转角电压 $U_e$ :

$$U_e = U_a - U_b \tag{4}$$

将公式(3)代入公式(4)得:

$$U_e = u \times \sin(\omega t) \sin(\theta - \phi) \tag{5}$$

根据转角电压值,确定当前时刻角度值和上一时刻角度值的计数关系,并计算出当前角度值。

在转台控制系统中,由于制造和装调工艺缺陷,信号处理过程中电器元件的电气特性限制以及外界噪声干扰等因素,信号 $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ 无法保证绝对的正交和幅值相等,信号中存在直流偏移、幅值偏离和相位误差,无法真实的反应实际角度信息,产生测角误差。此时, $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ 可描述为:

$$\begin{cases} U_{\sin}' = u \times \sin(\omega t) \sin \theta \\ U_{\cos}' = (1 + \zeta) \times u \times \sin(\omega t) \cos(\theta + \nu) \end{cases} \tag{6}$$

式中: $U_{\sin}'$ , $U_{\cos}'$ 为引入偏差的正余弦信号; $\zeta$ 为正余弦幅值不等量; $\nu$ 为相位偏差。

将公式(6)代入公式(5),三角函数计算分解后,转角电压 $U_e'$ 为:

$$\begin{aligned} U_e' = U_a' - U_b' = & u \times \sin(\omega t) \sin \theta \cos \phi - (1 + \zeta) \times u \times \\ & \sin(\omega t) \cos(\theta + \nu) \sin \phi = U_e + u \times \sin(\omega t) \sin \phi \times \cos \theta - \\ & (1 + \zeta) \times u \times \sin(\omega t) \sin \phi \times \cos \theta \cos \nu + (1 + \zeta) \times u \times \\ & \sin(\omega t) \sin \phi \times \sin \theta \sin \nu + U_e + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\theta + \mu_i) \end{aligned} \tag{7}$$

则由于直流偏移、幅值偏离、相位误差等因素带来的角度测量误差 $\Delta U$ 为:

$$\Delta U = U_e' - U_e \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \mu_i) \quad (8)$$

由公式(7)可知,测角误差可由多个幅值、相位、频率不同的基波信号合成。其中  $A_i$  基波幅值,与正弦幅值不等量  $\zeta$  有关。基波频率与相位偏差  $\nu$  和实时角度值有关。

## 2 测角误差模型提取

### 2.1 转台控制结构

某跟踪转台控制系统采用位置环、速度环双闭环控制系统,测角系统为速度环和位置环提供反馈信号,系统控制周期为 100Hz,控制系统结构如图2所示。其中  $R(s)$  为输入信号,  $F(s)$  为输出信号。

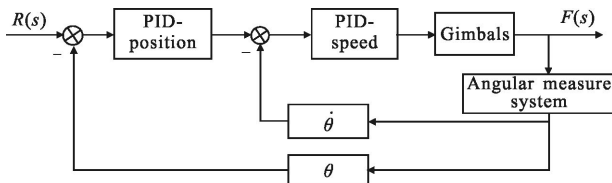


图 2 转台控制系统结构

Fig.2 Control system of spatial gimbals

若测角反馈存在误差不能得到有效抑制,将影响转台的跟踪平稳性,影响目标的捕获跟踪成像。

### 2.2 建立误差模型

为提取测角误差模型,在转台轴系平面安装测量精度  $0.0001 (^{\circ})/s$  的高精度光纤陀螺,建立如图 3 组成结构的测角误差采集系统。

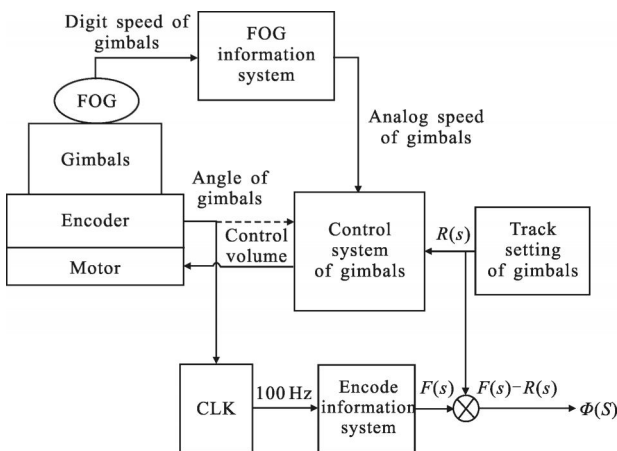


图 3 测角误差采集系统

Fig.3 Error acquisition system of angular measure

按照以上结构搭建测角误差采集系统,然后通过以下七个步骤可提取与理论分析相符的误差数学模型:

(1) 在转台轴向方向安装高精度光纤陀螺,通过陀螺信号采集系统对陀螺的测速信号进行数模转化,积分平滑等处理后替代测角系统作为速度环和位置闭环反馈信号,而测角系统的测量信号不参与转台闭环控制。

(2) 通过转台运动轨迹设定系统,设定输入  $R(s)$  为斜坡信号,则转台以恒定角速度转动。

(3) 通过锁存时钟信号,以 100 Hz 对转台测角系统的角度信号  $F(s)$  实时采集。

(4) 由于光纤陀螺测速具有较高的灵敏度和精度,且不受测角系统影响。若不考虑外界干扰,则测角系统的稳态输出  $F(s)$  可以无差的跟踪输入信号  $R(s)$ 。但是由于存在测角误差,实测  $F(s)$  如图 4 所示。

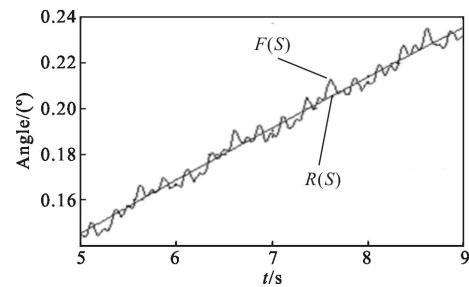


图 4 角度设定  $F(s)$  和实测角度  $R(s)$

Fig.4 Angle set  $F(s)$  & real measure  $R(s)$

(5) 通过  $\Phi(S) = F(s) - R(s)$  可分解出测角误差  $\Phi(S)$ ,如图 5 所示。

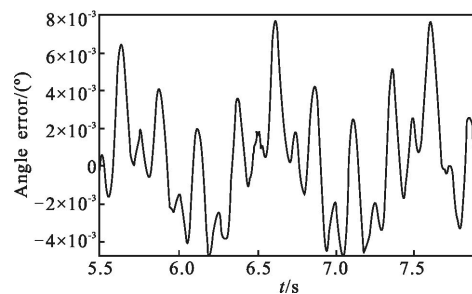


图 5 测角误差  $\Phi(S)$

Fig.5 Angular measure error

测角误差  $\Phi(S)$  可近似为幅度为,周期为一秒的周期信号,信号没有间断点、具有有限极大极小值、并且绝对可积,满足狄利克(Dirichlet)傅里叶级数条件,因此根据傅里叶理论测角误差  $\Phi(S)$  可表示为:

$$\Phi(S)=c_0+\sum_{k=1}^n c_k \sin(k\Omega_0 t+\mu_k) \quad (9)$$

(6) 对测角误差  $\Phi(S)$  进行 512 点 FFT 频谱分析, 如图 6 所示。

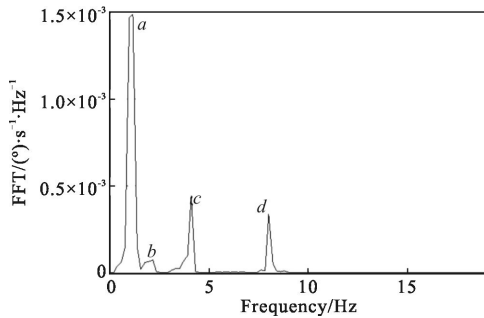


图 6 角度测量误差频谱

Fig.6 FFT of angular measure error

测角误差  $\Phi(S)$  主要包括四种频率成分:  $f_a=1$  Hz,  $f_b=2$  Hz,  $f_c=4$  Hz,  $f_d=8$  Hz, 可得出与理论分析  $\Delta U$  相符的测角误差模型:

$$\Phi(S)=\sum_{k=1}^4 c_k \sin(2\pi(f^*2^{k-1})t+\mu_k) \quad (10)$$

(7) 模型系数计算。

公式(10)中  $f$  为基波频率, 通过 FFT 频谱图可知  $f=1$  Hz;  $c_k$  为各正弦基波的幅值, 由于测角系统信号采集与数据处理存在 1 ms 延时, 因此  $c_k$  的大小与角速度  $\dot{\theta}$  有关, 计算公式如下:

$$c_k(\dot{\theta})=0.001 \times \dot{\theta} \quad (11)$$

$\mu_k$  为各正弦基波与测角系统实时测量值的相位差, 实验发现  $\mu_k$  与测角系统的 1 整度范围内的角分、角秒的刻划值  $f(\theta)$  有如下关系:

$$\mu_k(\theta)=2\pi \times f(\theta) \quad (12)$$

通过以上七个步骤可获得测角误差与时间  $t$ 、实时角度值  $\theta$  和实时角速度  $\dot{\theta}$  的数学模型  $Q(t, \theta, \dot{\theta})$  如下:

$$\begin{aligned} Q(t, \theta, \dot{\theta})= & 0.001 \times \dot{\theta} \times \sin(2\pi t+2\pi \times f(\theta))+ \\ & 0.001 \times \dot{\theta} \times \sin(4\pi t+2\pi \times f(\theta))+ \\ & 0.001 \times \dot{\theta} \times \sin(8\pi t+2\pi \times f(\theta))+ \\ & 0.001 \times \dot{\theta} \times \sin(16\pi t+2\pi \times f(\theta)) \end{aligned} \quad (13)$$

### 3 基于测角误差模型的控制补偿

对转台跟踪过程产生的周期性误差进行控制补偿, 过程如下所示:

首先, 在如图 2 所示的转台控制系统反馈回路中设置与时间  $t$ 、实时角度值  $\theta$  和实时角速度  $\dot{\theta}$  相关的测角误差模型  $Q(t, \theta, \dot{\theta})$  和级联的误差调节器  $M$ , 误差调节器  $M$  可以根据实际工程对测角误差模型的幅值和相位进行微调, 补偿算法如图 7 所示。

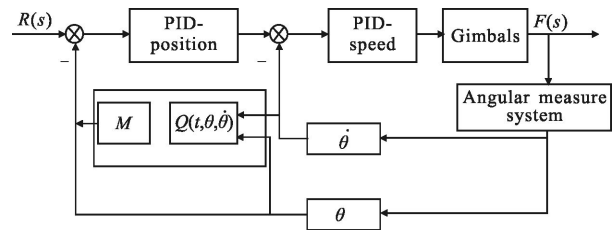


图 7 补偿后控制结构

Fig.7 Control system after compensation

其次, 根据工程经验, 通过误差调节器  $M$  对测角误差模型  $Q(t, \theta, \dot{\theta})$  中的各正弦基波函数中的幅值和相位进行迭代修正。

然后, 通过 Matlab 对转台速度信号进行 FFT 频谱分析。若谱线幅值分布不存在固定频率的大点, 说明测角系统带来的周期性误差得到有效抑制。

最后, 进行跟踪速度的平稳性测试实验和跟踪成像实验, 通过实验数据和成像清晰度来检验补偿效果是否满足要求。

### 4 补偿效果实验

为验证上述误差模型和补偿控制的有效性, 在暗室中搭建跟踪实验系统, 采用平行光管模拟无限远目标并产生干涉条纹, 旋转检测机架搭载平行光管模拟空间目标飞行过程, 并将搭载光学成像相机的跟踪转台安装在载物台上, 实验人员在暗室外面对进行实验控制, 并对转台跟踪过程的速度信息和相机成像效果进行采集分析。实验系统如图 8 所示。



图 8 跟踪成像实验系统

Fig.8 System of tracking and imaging

对干涉条纹图形和空间模拟目标进行跟踪成像,通过外置采样率 2 kHz、测量精度 0.000 1 (°)/s 的高精度光纤陀螺跟踪速度信号采集,进行 FFT 频谱分析,根据速度信号的谱线规律,通过控制补偿器,对误差模型中的各个基波信号的幅值系数和相位系数进行迭代修正,消除速度频谱谱线的固定峰值频率大点,并对补偿控制和大点消除前后的速度波动和成像实验效果进行对比。实验数据如下所示。

未对测角系统进行控制补偿前,跟踪速度信号 FFT 频谱存在固定频率大点,频谱分布如图 9 所示,周期性速度误差频率集中在 1 Hz、2 Hz、4 Hz、8 Hz。速度误差曲线如图 10 所示,跟踪误差达到 ,由于转台跟踪速度波动过大的原因干涉条纹明暗对比弱,图像模糊,如图 11 所示。

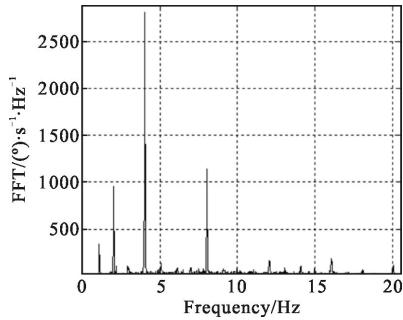


图 9 控制补偿前速度频谱

Fig.9 FFT of speed before compensation

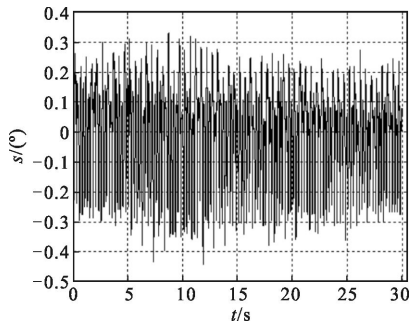


图 10 控制补偿前速度误差曲线

Fig.10 Speed errors before compensation

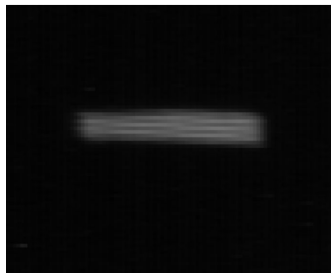


图 11 控制补偿前条纹成像

Fig.11 Image of fringe before compensation

对测角系统进行控制补偿后,跟踪速度信号 FFT 频谱分布如图 12 所示,谱线幅值降低近 10 倍,且频率成分增多,集中在低频的周期性误差得到了较好抑制。速度误差曲线如图 13 所示,跟踪误差缩小到。干涉条纹成像如图 14 所示,由于对测角反馈误差进行了补偿修正,跟踪速度稳定性有了较大改善,转台成像明暗对比以及图像质量都有了较大改善。

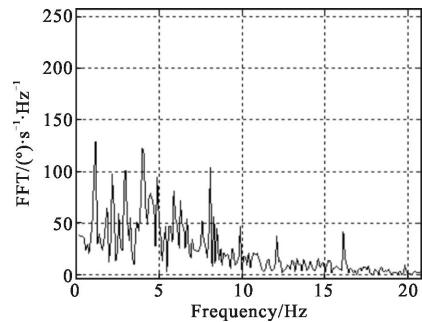


图 12 控制补偿后速度频谱

Fig.12 FFT of speed after compensation

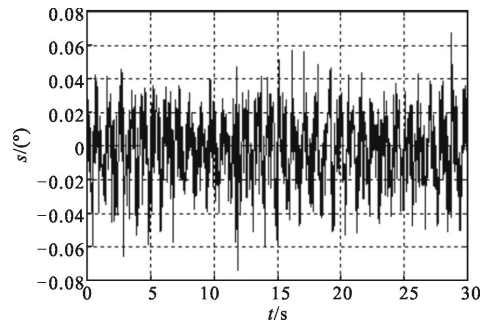


图 13 控制补偿后速度误差曲线

Fig.13 Speed errors after compensation

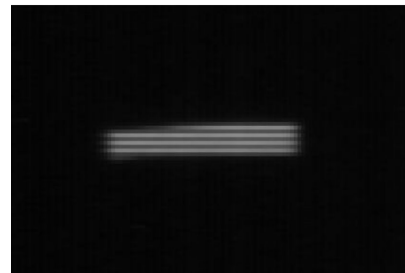


图 14 控制补偿后条纹成像

Fig.14 Image of fringe after compensation

实验证明,在光纤陀螺提取的测角误差模型基础上,在稳定的跟踪闭环系统内加入测角反馈误差补偿控制器,克服了 PID 算法无法有效抑制周期性误差的不足,减小了测角周期性误差带来的跟踪速度波动,提高了系统的跟踪速度平稳性,保证了成像效果。

## 5 结论

文中针对某跟踪成像实验跟踪速度周期性波动影响成像效果的问题,分析了速度误差周期性的原因为测角系统反馈误差的周期性。从理论上分析了测角误差模型的理论模型,并采用高精度光纤陀螺搭建了测角误差采集系统,并在傅里叶级数拟合的基础上,通过实验的手段确定了测角误差的具体数学表达式。并在跟踪控制回路中设置控制补偿器,阐述了补偿过程。最后在模拟暗室进行跟踪成像,验证误差模型的正确性和补偿算法的有效性。实验表明,利用陀螺测速提取的测角反馈误差正确,建立在误差模型上的补偿过程可以有效消除固定频率的周期性误差,使转台跟踪空间目标的速度平稳性提高了近8倍,保证了空间成像品质。

## 参考文献:

- [1] Downs James, Smith Steve, Schwickert Jim. High performance gimbal control for self-protection weapon systems[C]//SPIE, 2008, 3365: 77-86.
- [2] Akioy, Toshihiro, Takafumis, et al. Japanese first optical inter-orbit communications engineering test satellite(OICETS) [C]//SPIE, 2013, 2210: 30-38.
- [3] Sun Chengming, Yuan Yan, Huang Fengzhen, et al. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 2209-2215. (in Chinese)  
孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 2209-2215.
- [4] Men Tao, Yang Yue, Xu Rong, et al. Resolution of incremental photoelectric angular encoder with reference mark excursion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 497-501. (in Chinese)  
门涛, 杨悦, 徐蓉, 等. 增量式光电轴角编码器零点漂移问题解决[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 497-501.
- [5] Liu Junhui, Shan Jiayuan, Liu Yongshan. Tracking performance of gyro-stabilized seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2209-2215. (in Chinese)  
刘俊辉, 单家元, 刘永善. 动力陀螺式导引头跟踪能力分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2209-2215.
- [6] Zhao Ming, Bai Yang, Liu Hui. et al. Pointing error modeling and parameter calibration for seeker stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S02): 374-379. (in Chinese)  
赵明, 白杨, 刘慧, 等. 导引头稳定平台指向误差建模与参数标定[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S02): 374-379.
- [7] Zhu Chengjun, Long Kehui. Research on the method of signal amplitude automatic compensation for photoelectric encoder. [J]. *Opt Precision*, 2009, 28(9): 6-12. (in Chinese)  
祝成军, 龙科慧. 光电编码器信号幅值自动补偿方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 28(9): 6-12.
- [8] Kong Zhiyong, Zhao Hongying, Xiong Wengzhuo. Study on techniques of increasing the accuracy and resolution for the absolute photo electricity rotary encode [J]. *Opt Precision*, 2001,9(3): 261-265. (in Chinese)  
孔智勇, 赵红颖, 熊文卓. 采用衍射、干涉技术提高绝对式光电轴角编码器精度和分辨率[J]. *光学精密工程*, 2001,9(3): 261-265.
- [9] Xiong Wenzhuo, Kong Zhiyong, Zhang Wei. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt Precision Eng*, 2007, 15(11): 1745-1748. (in Chinese)  
熊文卓, 孔智勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1745-1748.
- [10] Geng Lihong, Cao Xuedong. The verification of accuracy and resolution for high-resolution photoelectric rotary and angle Encoders [J]. *Tool Engineering*, 1996, 30(9): 36-38. (in Chinese)  
耿丽红, 曹学东. 高分辨力光电轴角编码器分辨力和精度的检测[J]. *工具技术*, 1996, 30(9): 36-38.