

文章编号 1004-924X(2007)08-1293-07

航空光电成像平台角位置陀螺和 角速率陀螺的稳定效果分析

沈宏海^{1,2}, 刘晶红¹, 张 葆¹, 戴 明¹,
贾 平¹, 魏忠和¹, 熊经武¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:研究了角速率陀螺稳定平台在目标跟踪时瞄准线始终围绕视场中心做约 2 Hz 晃动的现象, 理论推导及数值分析认为引起这一现象的原因与光电稳定平台的静态力矩刚度为 0、隔离度仅为 71.4 dB 有关。采用基于角位置陀螺的光电稳定平台, 其静态力矩刚度为 1 732 Nm, 隔离度提高到 126 dB, 可以有效地消除这种晃动。

关键词:机载平台; 稳定平台; 陀螺; 力矩刚度; 隔离度

中图分类号: V241.53 文献标识码: A

Stabilization properties of airborne imaging platform based on position gyro and rate gyro

SHEN Hong-hai^{1,2}, LIU Jing-hong¹, ZHANG Bao¹, DAI Ming¹,
JIA Ping¹, WEI Zhong-he¹, XIONG Jing-wu¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Generally, a photoelectric imaging platform is used to isolate the carrier movement and set the platform stability relative to the inertial space. The high frequency jitter phenomenon of the target in the image center occurred in the rate gyro based platform is researched during tracking. The theoretical derivation and numerical analysis indicate that the reason is the torque rigidity of 0 and isolation degree of 71.4 dB for the rate gyro based platform, while the position gyro based platform has greater torque rigidity and isolation ability, which can greatly suppress this jitter.

Key words: airborne platform; stabilization platform; gyro; torque rigidity; isolation degree

1 引言

航空光电成像稳定平台主要用于隔离载体运动对光电仪器光轴的干扰以保证光轴相对惯性空间稳定,通常有两轴稳定和三轴稳定两类形式^[1]。在稳定平台中为隔离载体扰动实现光轴稳定的方法主要有两种,分别是基于角速率陀螺和基于角位置陀螺的方法。

基于角位置陀螺的光电稳定平台主要由框架结构、光电载荷、驱动电机、角位置陀螺、测速机等部分组成。平台用测速机作为速度内环的反馈元件,用角位置陀螺做位置回路的反馈元件,平台始终保持角位置稳定。

基于角速率陀螺的光电稳定平台主要由框架结构、光电载荷、驱动电机、角速率陀螺等部分组成。平台用速率陀螺敏感载体扰动的角速度去控制框架电机反向运动以实现光轴相对于惯性空间的角速率保持不变。在视频跟踪时采用脱靶量直接闭合实现对目标的跟踪。

在实际应用中,基于角速率陀螺的稳定平台在目标跟踪时瞄准线始终围绕视场中心以约 2 Hz 的频率抖动。针对此现象,本文从理论推导及 Matlab 仿真分析对引起这一现象的原因进行了分析。

2 理论分析

2.1 惯性稳定平台干扰源分析

在惯性稳定平台中,影响平台稳定精度的干扰源有^[1-5]:线绕力矩、摩擦力矩、风阻力矩、框架的不平衡力矩、载体角速度扰动以及反馈元件的漂移等。但是这些干扰的注入路径是有差别的。

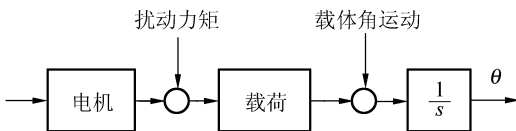


图 1 影响稳定平台的干扰源注入途径
Fig. 1 Input of disturbance

如图 1 所示,扰动力矩及反馈元件的漂移是直接作用到平台轴系上,而载体角运动的影响与平台的结构形式密切相关,对于直接驱动的平台

因为平台稳定轴有较大的转动惯量和较小的摩擦力矩,因而基座角速度难以完全向台体耦合。

2.2 力矩刚度及隔离度的引入^[1-2]

在惯性稳定平台中,通常采用力矩刚度来衡量平台在扰动力矩作用下保持角度稳定的能力。力矩刚度 $S(s)$ 等于扰动力矩与该扰动力矩引起的平台偏差角之比,如式(1)所示。力矩刚度越大,平台抑制扰动力矩保持角度稳定的能力越强。

$$S(s) = \frac{M_f(s)}{\theta(s)}, \tag{1}$$

对于载体角运动的影响通常用隔离度这一指标来衡量平台对此扰动的衰减程度。

为简化分析,这里仅考虑一个轴系的稳定。

2.3 基于角速率陀螺的稳定性能分析

基于角速率陀螺的稳定平台控制回路^[6]如图 2 所示,该控制回路由速率稳定回路和视频跟踪回路组成双闭环控制。载体扰动通过电机轴系耦合进入闭环回路。控制回路根据反馈信息经过迭代运算后输出控制量控制电机驱动轴系反向运动以抑制载体扰动实现光轴的惯性稳定。

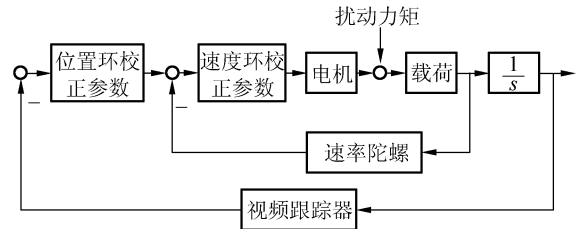


图 2 基于角速率陀螺的光电稳定平台控制原理框图
Fig. 2 Block diagram of control principle for rate gyro based stabilization platform

在图 2 中电机及载荷的传递函数^[7-8]如图 3 所示,其中 R_a 为电机的电枢电阻, L_a 为电机的电枢电感, K_T 为电机的力矩系数, K_e 为电机的反电势系数, J 为电机及载荷转动惯量, M_f 为进入电机轴系的扰动力矩。

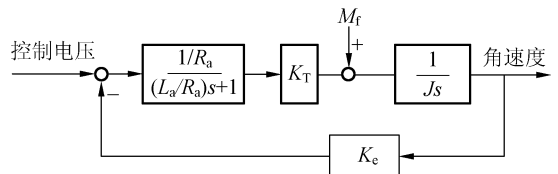


图 3 电机及载荷的传递函数
Fig. 3 Transfer function of motor and load

在实际使用中通常忽略反电势系数的影响,将 $T_m = \frac{JR_a}{K_e K_T}$ 代入上图,则简化后的传递函数如图 4 所示。

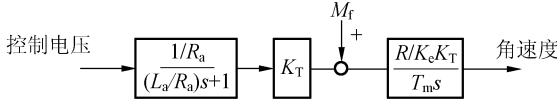


图 4 简化的电机及载荷的传递函数框图

Fig. 4 Block diagram of simplified transfer function of motor and load

取速度环校正参数为 K_{vadj} 、速率陀螺为 K_{velgyro} 、跟踪器为 K_{tracker} ,则该稳定平台的传递函数框图如图 5 所示,其中 T_m 为电机的机械时间常数, T_e 为电机的电气时间常数, θ 为瞄准线相对惯性空间的转角。

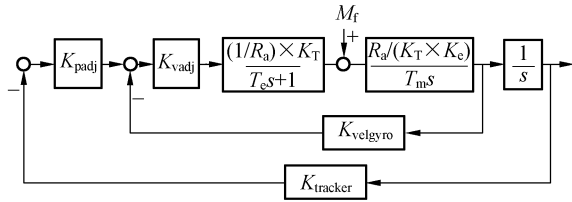


图 5 基于角速率陀螺的稳定平台传递函数框图

Fig. 5 Block diagram of transfer function of rate gyro based stabilization platform

载体扰动的传递函数为

$$K_{M_f B} = \frac{\omega(s)}{M_f} = \frac{\frac{R_a / (K_T \times K_e)}{T_m s}}{1 + \frac{1/K_e}{T_m s (T_e s + 1)} \times K_{\text{vadj}} \times K_{\text{velgyro}}}, \quad (2)$$

因为基于视频跟踪器实现的光电稳定平台在两场图像之间因为脱靶量反馈信号保持不变,可以视为平台工作于角速率稳定状态。假设此时脱靶量为 0,则平台的力矩刚度为:

$$S_{\text{vg}} = \frac{M_f}{\theta} = \frac{M_f}{\dot{\omega}/s} = s \times \frac{1}{K_{M_f B}}$$

其静态力矩刚度为 $S_{\text{vg}}|_{s \rightarrow 0} = 0$;

2.3 基于角位置陀螺的稳定性能分析

基于角位置陀螺的稳定平台采用测速机作为速度环反馈元件,采用角位置陀螺实现角位置闭环,由此实现瞄准线相对于惯性空间稳定。载体扰动的传递函数如式(4)所示。

$$K_{M_f B P} = \frac{\omega}{M_f} = \frac{\frac{R_a}{K_e K_T T_m s}}{1 + (K_{\text{vel}} + \frac{K_{\text{pgyro}} \times K_{\text{padj}}}{s}) \times K_{\text{vadj}} \frac{1/K_e}{T_m s (T_e s + 1)}}, \quad (4)$$

系统的传递函数框图如图 6 所示。

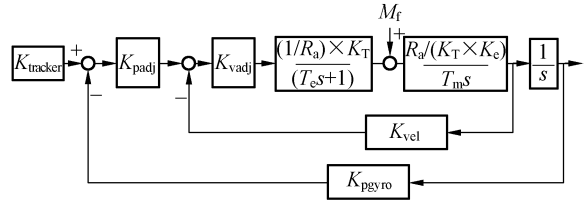


图 6 基于角位置陀螺的稳定平台传递函数框图

Fig. 6 Block diagram of transfer function of position gyro based stabilization platform

假设此时脱靶量为 0,则基于角位置陀螺的平台力矩刚度为

$$S_{\text{pg}} = \frac{M_f}{\theta} = \frac{K_e K_T T_m s^2 + (K_{\text{vel}} s + K_{\text{pgyro}} \times K_{\text{padj}}) \times K_{\text{vadj}} \frac{K_T}{(T_e s + 1)}}{R_a}, \quad (5)$$

其静态力矩刚度为

$$S_{\text{pg}}|_{s \rightarrow 0} = K_T \times \frac{K_{\text{pgyro}} \times K_{\text{padj}} \times K_{\text{vadj}}}{R_a}. \quad (6)$$

由此可见,采用角位置陀螺的平台其力矩刚度要明显优于采用角速率陀螺的平台,并且其力矩刚度与系统的开环增益成正比。

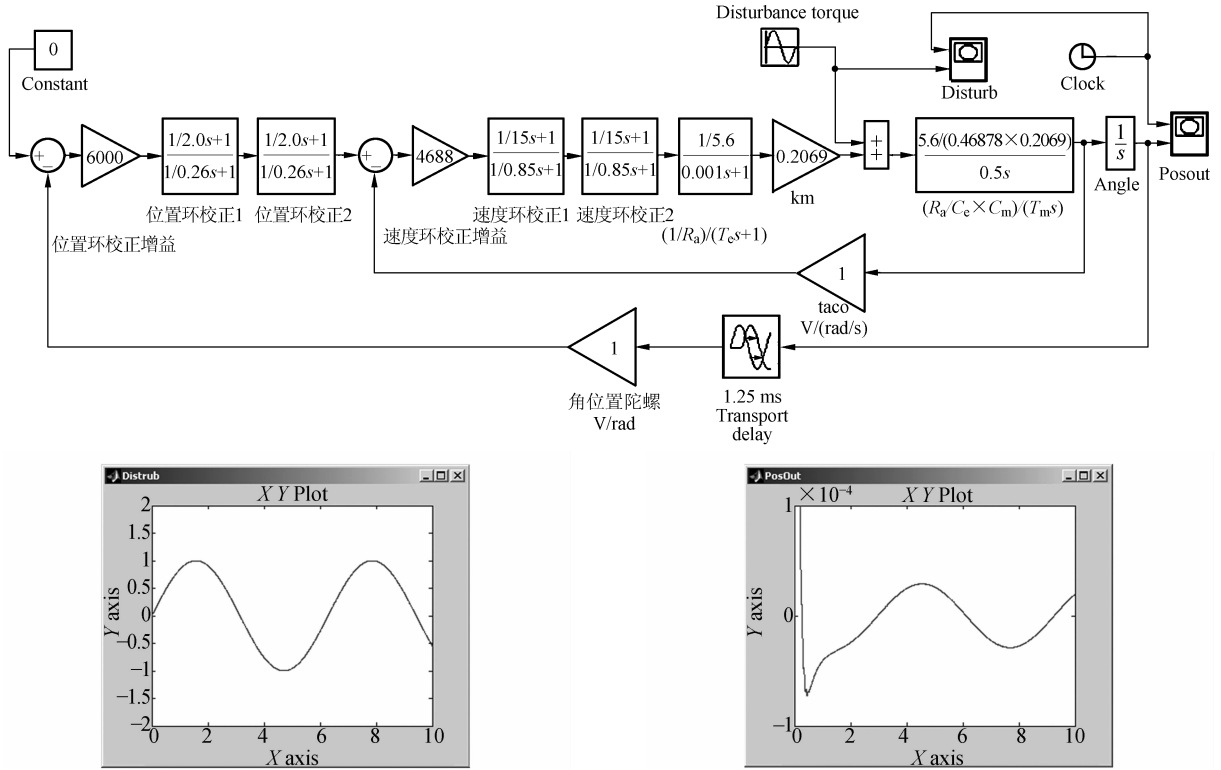
3 仿真结果

对实验模型进行仿真,速度环、位置环采用经典校正方法,取电机模型参数为 $R_a = 5.6 \Omega$, $T_m = 0.5 \text{ s}$, $T_e = 0.001 \text{ s}$, $K_T = 0.2069 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, $K_e = 0.46878 \text{ V/(rad/s)}$ 。

取速度环校正参数 $K_{\text{vadj}} = 4688 \times \frac{(0.067s + 1)^2}{(1.176s + 1)^2}$;

取位置环校正参数 $K_{\text{padj}} = 10 \times \frac{(0.5s + 1)^2}{(4s + 1)^2}$ 。

因为飞机等载体的力矩扰动频率及基座扰动频率都不会超过 1 Hz,本文取其上限,仿真结果如图(7)~(12)。

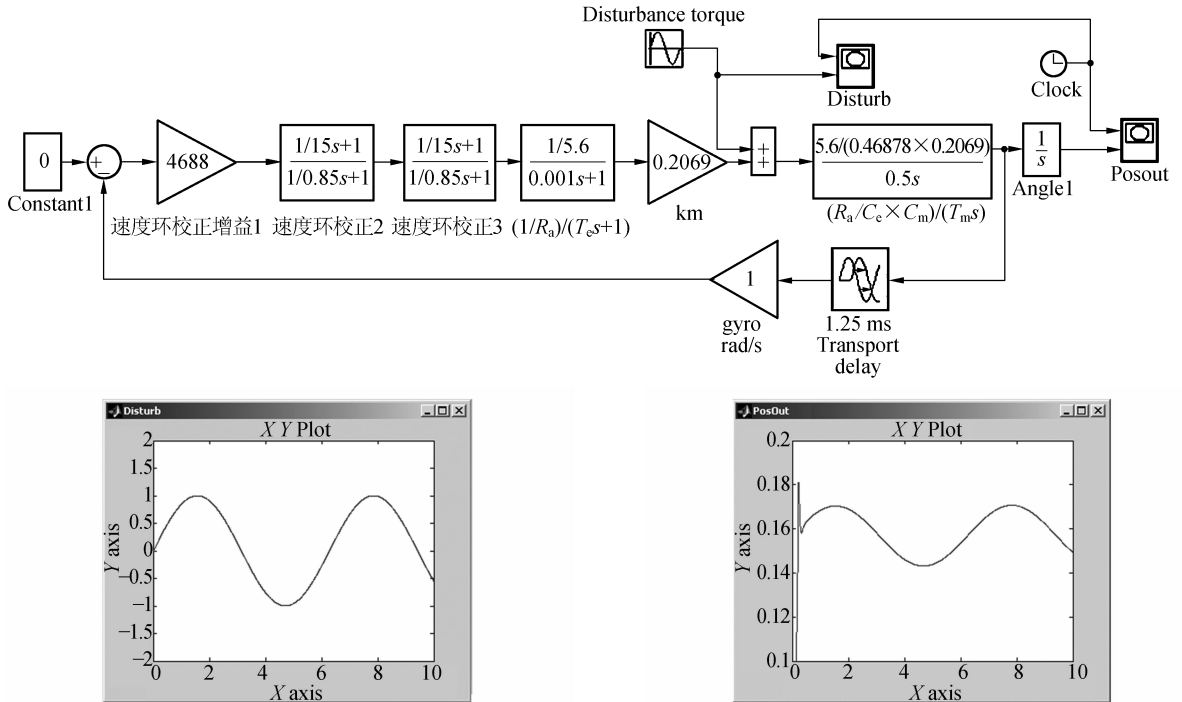


Disturbance torque

Position output

图 7 基于角位置陀螺的平台对轴系交变力矩扰动的仿真

Fig. 7 Simulation of alternative torque disturbance of position gyro based platform

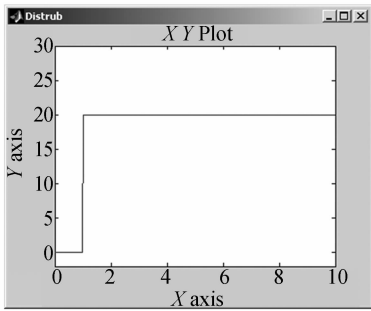


Disturbance torque

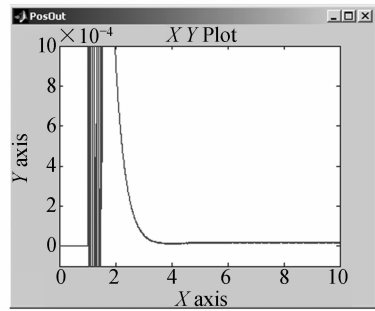
Position output

图 8 基于角速率陀螺的平台对轴系交变力矩扰动的仿真

Fig. 8 Simulation of alternative torque disturbance of rate gyro based platform



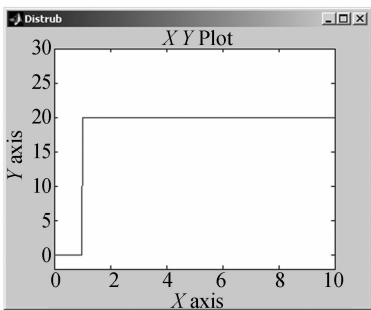
Disturbance torque



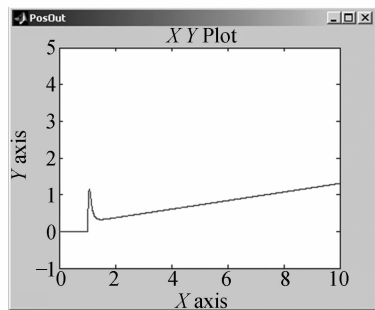
Position output

图 9 基于角位置陀螺的平台对轴系常值力矩扰动的仿真

Fig. 9 Simulation of constant torque disturbance of position gyro based platform



Disturbance torque



Position output

图 10 基于角速率陀螺的平台对轴系常值力矩扰动的仿真

Fig. 10 Simulation of constant torque disturbance of rate gyro based platform

3.1 基于角位置陀螺的稳定平台稳定效果仿真

由图 7、图 9、图 11 可见在输入 1 Hz、1 N·m 的扰动力矩作用下,角位置稳定平台输出角度误差的峰峰值约为 0.6×10^{-4} rad。平台对载体角扰动的隔离度为 126 dB,平台的静态力矩刚度高达 1732 N·m,可以有效地隔离常值干扰力矩的影响。

3.2 基于角速率陀螺的稳定平台稳定效果仿真

由图 8、图 10、图 12 可见,在 1 Hz、1 N·m 的扰动力矩作用下,角速率稳定平台输出除有固定角度偏差外并叠加了一个幅值为 0.028 rad 的正弦误差,固定偏差与其静态力矩刚度为零和信

号传输延迟有关,正弦误差与动态力矩刚度有关。平台对载体角扰动的隔离度为 71.4 dB。基于角速率陀螺的稳定平台因为其静态力矩刚度为零,对由常值干扰力矩引起的角度误差将随时间增长而增加。

由此可见速率稳定平台的稳定精度至少比位置陀螺稳定平台低一个数量级。当采用基于角速率的稳定平台做视频跟踪时,干扰力矩导致目标偏离视场中心,此误差又被馈入跟踪回路导致跟踪时目标在视场中心做高频抖动。而采用角位置陀螺的平台因为力矩刚度很高可以将此误差抑制到 0.06 mrad,实际上在两场视频信号之间的残差将更小而无法为跟踪器感应到,所以可以有效抑制这种高频抖动现象。

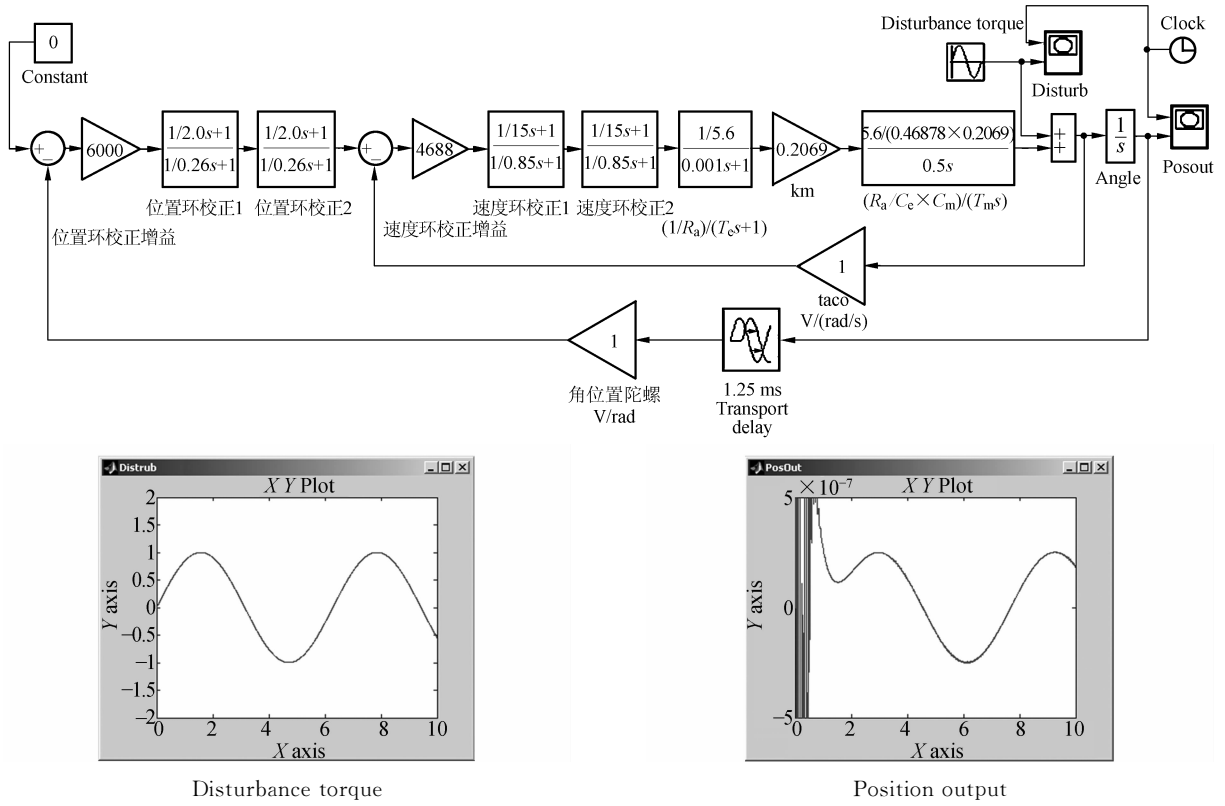


图 11 基于角位置陀螺的平台对基座扰动的仿真

Fig. 11 Simulation of foundation disturbance of position gyro based platform

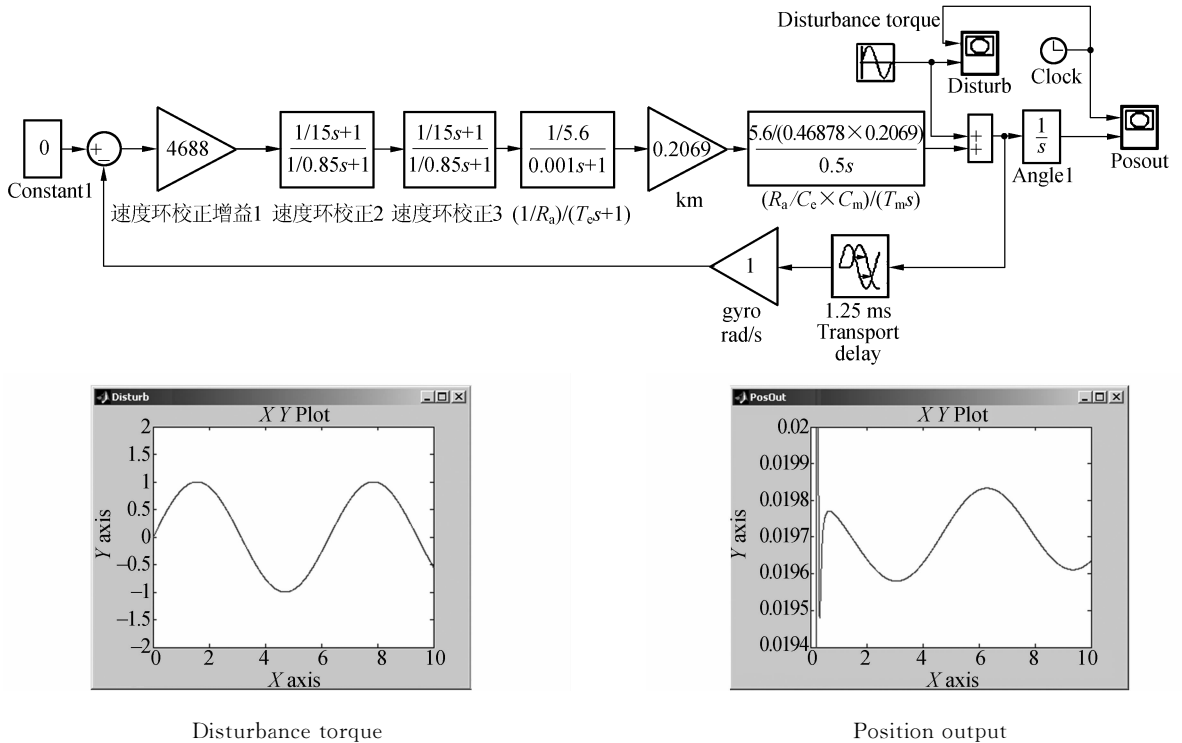


图 12 基于角速率陀螺的平台对基座扰动的仿真

Fig. 12 Simulation of foundation disturbance of rate gyro based platform

4 结 论

从力矩刚度角度进行公式推导分析了角速率稳定平台和角位置稳定平台的稳定性能,理论分析和仿真结果表明,采用角位置陀螺的稳定平台

可以有效地隔离载体的扰动,其稳定精度要远优于采用角速率陀螺实现的稳定平台。此分析没有考虑陀螺的标度因子的非线性及陀螺的随机游走影响,在角位置陀螺的实际使用中必须对上述两个指标严格要求才能实现高力矩刚度和高隔离度。

参考文献:

- [1] 郭富强,于波,汪叔华. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.
GUO F Q, YU B, WANG SH H. *Gyro Stabilization Equipment and its Application* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 郭富强. 惯导平台的隔离度研究[J]. 西北工业大学学报,1995,11(2):218-222.
GUO F Q. On degree of base-motion isolation of inertial navigation platform [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 1995,11(2):218-222. (in Chinese)
- [3] 张永安. 光纤陀螺视线稳定系统的设计与工程实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001.
ZHANG Y A. *Design and application of FOGSS stabilized platform* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001. (in Chinese)
- [4] 张乘华. 机载视轴稳定跟踪伺服系统[J]. 嘉兴高等专科学校学报,2000,13(4):6-8.
ZHANG B H. Airborne line-of-sight stability tracking servo system [J]. *Journal of Jiaxing College*, 2000, 13(4):6-8. (in Chinese)
- [5] KENNEDY D J, KENNEDY R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization [J]. *IEEE transaction on control system technology*, 2003,11(1):3-15.
- [6] 毕永利,刘洵,葛文奇,等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程,2004,31(2):16-18.
BI Y L, LIU X, GE W Q, et al.. Design of velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope stabilized Platform[J]. *Opto-electron. Eng.*, 2004,31(2):16-18. (in Chinese)
- [7] 易继镕,江祥贤,侯媛彬,等. 电气传动自动控制原理与设计[M]. 北京:北京工业大学出版社,1997.
YI J X, JIANG X X, HOU Y B, et al.. *The Principle and Design of Electric Drive Control System*[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 李东明,党纪红,郝颖. 惯性平台稳定回路的双闭环控制[J]. 应用科技,2003,30(8):48-50.
LI D M, DANG J H, HAO Y. Double closed-loop control of inertial platform servo loop [J]. *Applied Science and Technology*, 2003,30(8):48-50. (in Chinese)

作者简介:沈宏海(1976—),男,江苏人,长春光学精密机械与物理研究所助研,研究方向为光电设备的自动控制。E-mail: shenhh@ciomp. ac. cn