

文章编号 1004-924X(2015)02-0459-08

光电稳定平台中高阶扰动观测器的应用

汪永阳^{1,2*}, 戴明¹, 丁策^{1,2}, 王国华¹, 黄猛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. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 由于光电稳定平台在稳定视轴时易受到摩擦、风阻、不平衡以及载体扰动等干扰力矩的影响, 本文研究了利用高阶扰动观测器抑制扰动力矩的机理和方法。该扰动观测器由控制对象的逆模型和进行了高阶设计的改进型滤波器组成。提出的方法将观测量作为电流环的输入, 利用电流环超高的控制带宽抑制扰动力矩。对系统的扰动抑制能力进行了仿真, 结果显示高阶扰动观测器对高阶扰动模型具有很好的抑制能力: 对于阶跃扰动和斜坡扰动, 三阶扰动观测器的抑制率为 100%; 对于抛物波扰动, 三阶扰动观测器的抑制率为 99.9999996%。另外, 观测器对于控制对象模型的摄动具有很好的鲁棒性。提出的方法可以在提高伺服系统响应速度的同时保证系统的鲁棒性, 满足光电稳定平台的应用要求。

关键词: 光电稳定平台; 干扰力矩; 高阶扰动模型; 高阶扰动观测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0459

Application of high order observer in EO stabilized platform

WANG Yong-yang^{1,2*}, DAI Ming¹, DING Ce^{1,2}, WANG Guo-hua¹, HUANG Meng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: wangyongyang117@sohu.com*

Abstract: As Electric-Optic(EO) stabilized platform is effected by the disturbance of friction, windage, unbalance and base motion in stabilizing a Line of Sight(LOS), this paper explores the mechanism and method to eliminate the disturbance torque by a high order observer. The observer is consist of an inverse system of the control object and a modified filter, and the modified filter is implemented by a high order design. The observer is used for observing the disturbance torque, then the current loop with a very high bandwidth is utilized to compensate the disturbance torque. The eliminating disturbance ability of the system is simulated. The results show that the high-order disturbance observer has the ability to eliminate the high-order disturbance model; the 3th order observer eliminates the disturbance by 100% for the step and ramp disturbance; and eliminates the disturbance by 99.9999996% for the parabola disturbance. Moreover, the observer also has good robustness to the perturbation of the control object. The method improves the response speed of the servo system mean-

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-06-11.

基金项目: 吉林省重大科技攻关计划资助项目(No. 11ZDGG001)

while ensuring the robustness of the system, so that it satisfies the application requirements of the EO stabilized platform.

Key words: electro-optical stabilized platform; disturbance torque; high-order disturbance model; high-order disturbance observer

1 引言

传统光电稳定平台的速度稳定回路设计通常采用 PID^[1] 控制算法,其抗扰能力的强弱通常取决于伺服带宽的设计。现实中的光电稳定台由于受到体积、重量等限制,结构的谐振频率往往较低,导致平台的伺服带宽设计受限;光电稳平台若想提高自身的抗扰能力和取得高的稳定精度,需对外界扰动源进行观测和补偿^[2-3]。扰动观测和补偿器分为两大类:(1)采用控制对象逆模型和低通滤波器的组合^[4-5]; (2)采用控制对象标称模型和低通滤波器的组合^[6]。由于它们在设计过程中没有考虑到扰动模型与滤波器之间的匹配关系,从而对于高阶扰动源的抑制能力有限。虽然通过改进型的扰动观测器能够解决以上问题^[7],但是由于其运算过程占用大量时间,需对改进型扰动观测器进行简化,在简化过程中假设扰动源只处于低频段,从而缺乏普适性。

本文采用高阶扰动观测器针对扰动源设计了相匹配的低通滤波器,从而大幅提高了伺服系统对于高阶扰动的抑制能力。由于采用高阶扰动观测器会降低系统的鲁棒性,本文同时提出了在不影响系统鲁棒性的前提下,采用高阶扰动观测器的解决办法。

2 扰动观测系统

2.1 扰动观测器

图 1 所示为利用扰动观测器对扰动源进行补偿的伺服控制回路,图中 P 为控制对象, d 为扰动输入量, u 为电机的输入控制量, ξ 为速率传感器的测量噪声, \hat{d} 为利用点化线区域内扰动观测器对扰动输入量 d 的观测量。

控制对象 P 的传递函数表达式为:

$$P_n(s) = \frac{1}{a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + a_2 s^{m-2} + \dots + a_{m-1} s + a_m}$$

G 为低通滤波器,用于消除扰动观测器与真实扰

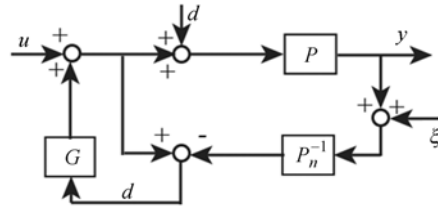


图 1 采用扰动观测器的伺服控制回路

Fig. 1 Servo control loop with disturbance observer

动源高频部分的不匹配,对于扰动源模型的建立采用^[8]:

$$d = 1/s^k, \tag{1}$$

则:

$$G(s) = \frac{g_{m+k-k} s^{k-1} + \dots + g_{m+k-2} s + g_{m+k-1}}{s^{m+k-1} + g_1 s^{m+k-2} + \dots + g_{m+k-2} s + g_{m+k-1}}. \tag{2}$$

通常情况下,针对扰动源为阶跃模型 ($k=1$) 设计出的观测器称为低阶扰动观测器^[9];对于 $k > 1$ 的扰动模型观测器称之为高阶扰动观测器。

2.2 采用扰动观测器的 2 自由度控制系统

图 1 的 2 自由度等效控制回路如图 2 所示, C_{obs} 为串行补偿器, F 为输入量 u 到中间量 z 的传递函数。

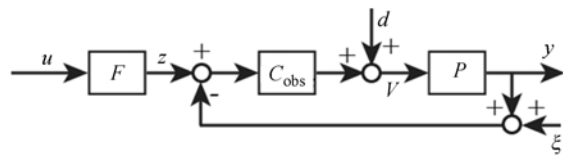


图 2 2 自由度控制回路

Fig. 2 Two-degree-of-freedom control system

其中:

$$\begin{cases} C_{obs} = GP_n^{-1}/(1-G) \\ F = P_n G^{-1} \end{cases}. \tag{3}$$

考虑到控制对象 P 与传递函数 P_n (理想模型)之间的模型摄动 ΔP ,图 2 的等效 2 自由度控制回路如图 3 所示^[10-11]。

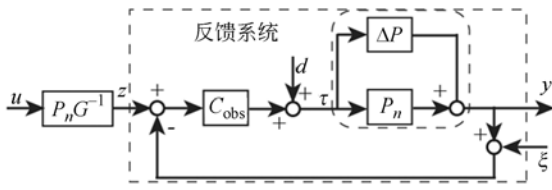


图 3 考虑模型摄动后的二自由度控制回路

Fig. 3 Two-degree-of-freedom control system considering model plant perturbation

其中:

$$\Delta P = P - P_n. \quad (4)$$

如果图 3 中的反馈系统能在滤波器 G 的截止频带内消除模型摄动 ΔP 和扰动 d 的影响,且满足 $G_{yz} = G$, 则 $G_{yu} = P_n$, 则意味着伺服系统的输入和输出之间的关系可不考虑外界扰动和模型摄动的影响。

反馈系统中采用灵敏度函数 S 来表示输出 y 对扰动 d 的抑制能力,补充灵敏度函数 T 表示输出 y 对输入 z 的跟随能力,图 3 中:

$$G_{yz} = T = \frac{C_{obs} P}{1 + C_{obs} P}, \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{1 + C_{obs} P}. \quad (6)$$

在分析反馈系统对于模型摄动 ΔP 和扰动 d 的抑制能力的过程中,先考虑 $\Delta P = 0$ 的情况,将式(3)代入(5)可得:

$$G_{yz} = T_n = G, \quad (7)$$

$$G_{yd} = (1 - G) P_n = S_n P_n. \quad (8)$$

根据式(8)可以得到扰动源 d 所引起输出量 y 变化的稳态误差^[12]:

$$e_{yd} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_{yd} \cdot d = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot S_n P_n \cdot d. \quad (9)$$

3 伺服系统分析

3.1 控制对象

考虑航空光电平台控制对象的实际模型($c_0 \neq 0$):

$$P(s) = \frac{s}{c_0 s^2 + c_1 s + c_2}. \quad (10)$$

根据 c_1 、 c_2 不同,将控制对象分为 3 种情况:(1) $c_1 = c_2 = 0$, (2) $c_2 = 0$, (3) $c_2 \neq 0$ 。其中(1)为电流控制的电机速度环模型,(2)为在(1)的基础上考虑黏性摩擦力矩,(3)为在(2)的基础上施加一个与位置成正比的反向弹性力矩,在工程应用

中光电稳定平台速度环通常采用式(10)作为辨识模型:

$$P_n(s) = \frac{1}{a_0 s}, \quad (11)$$

则式(2)中:

$$G(s) = \frac{g_1 s^{k-1} + \dots + g_{k-1} s + g_k}{s^k + g_1 s^{k-1} + \dots + g_{k-1} s + g_k}. \quad (12)$$

将式(10)和式(11)代入式(3),得到串行补偿器的表达式为:

$$C_{abs} = a_0 \frac{g_1 s^{k-1} + \dots + g_{k-1} s + g_k}{s^{k-1}}. \quad (13)$$

可以看出 $k=1$ 和 $k=2$ 时式(13)分别对应着比例(P)、比例积分(PI)控制器,随着阶数 k 的增加,串行补偿器中的积分项会逐渐增多,图 4 所示为 k 值分别为 1、2 和 3 时,串行控制器所对应的幅频和相频特性曲线(G 所有的极点配置在 $-1000 \pm j_0$, $a_0 = 1$),可以看出 k 的阶数越高,串行控制器的低频增益越大,系统的响应速度越快,但同时低频相位滞后越大,系统稳定性和鲁棒性会降低。

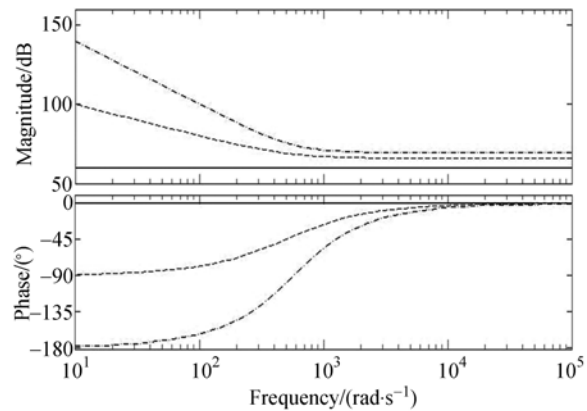


图 4 串行控制器波特图

Fig. 4 Baud plot of serial controller

3.2 灵敏度函数和补充灵敏度函数

为了提高反馈系统的响应速度和鲁棒性,要求反馈系统的补充灵敏度函数在不同的 k 值下的高频幅频特性相同,从而消除传感器噪声对于伺服系统的影响^[13];灵敏度函数在低频段尽量取小,可对低频扰动进行较好的抑制,同时为了不放大高频扰动对于反馈系统的影响,不同 k 值下的灵敏度函数幅频特性也应保持一致。根据以上对于灵敏度函数和补充灵敏度函数的约束,在针对不同 k 值时,需配置不同的低通滤波器极点位置。

如图 5 所示,当 $k=1$ 时,滤波器的极点位置为 $g = -1\ 000$; $k=2$ 时,滤波器的极点位置为 $g = -500$; $k=3$ 时,滤波器的极点位置为 $g = -333$ 。

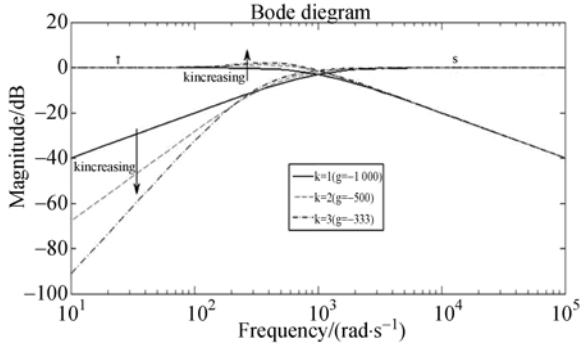


图 5 不同 k 值下,灵敏度函数和补灵敏度函数增益曲线

Fig. 5 Gain diagrams of sensitivity and complementary sensitivity functions for different k

3.3 高阶扰动观测器的抗扰能力仿真分析

根据式(1),扰动源的输入可分为阶跃扰动 d_0/s 、斜坡扰动 d_0/s^2 和抛物波扰动 d_0/s^3 。

若系统采用低阶扰动观测器(针对 $k=1$ 设计的反馈系统),并配置滤波器的极点 $g = -1\ 000$,则其针对各种扰动源的响应曲线 G_{yd} 为($a_0=1$):

(1) 对应阶跃扰动 d_0/s 的响应曲线($d_0 = 10$):

$$\frac{1}{100} - \frac{1}{100 \times \exp(1\ 000 \times t)} \quad (14)$$

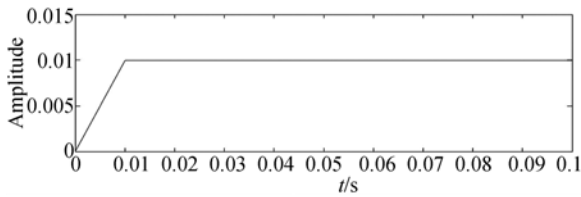


图 6 低阶扰动观测器抗阶跃扰动残差响应曲线

Fig. 6 Response of low order disturbance observer system for step disturbance

(2) 对应斜坡扰动 d_0/s^2 的响应曲线($d_0=10$):

$$\frac{t}{100} - \frac{1}{100\ 000 \times \exp(1\ 000 \times t)} - \frac{1}{100\ 000} \quad (15)$$

(3) 对应抛物波扰动 d_0/s^3 的响应曲线($d_0 = 10$)

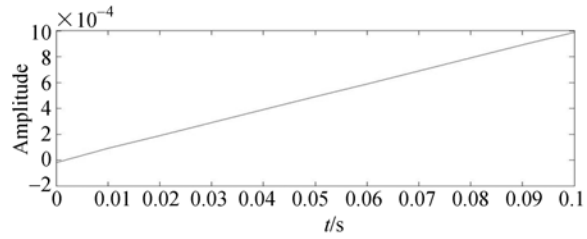


图 7 低阶扰动观测器抗斜坡扰动残差响应曲线

Fig. 7 Response of low order disturbance observer system for ramp disturbance

$$\frac{t^2}{200} - \frac{1}{100\ 000\ 000 \times \exp(1\ 000 \times t)} - \frac{t}{100\ 000} + \frac{1}{100\ 000\ 000} \quad (16)$$

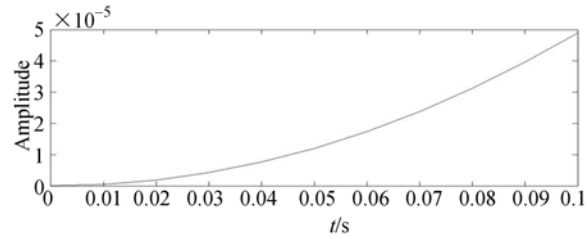


图 8 低阶扰动观测器抗抛物波扰动残差响应曲线

Fig. 8 Response of low order disturbance observer system for parabola disturbance

若系统采用高阶扰动观测器(针对 $k=2$ 设计的反馈系统),并配置滤波器的极点 $g = -500$,则其针对各种扰动源的响应曲线 G_{yd} 为($a_0=1$):

(1) 对应阶跃扰动 d_0/s 的响应曲线($d_0 = 10$):

$$\frac{10 \times t}{\exp(500 \times t)} \quad (17)$$

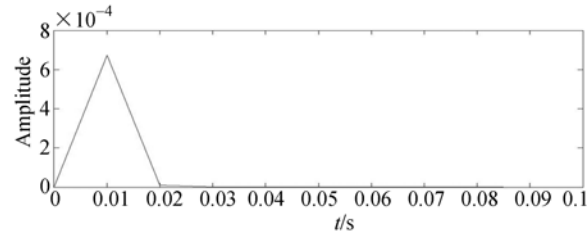


图 9 高阶扰动观测器($k=2$)抗阶跃扰动残差响应曲线

Fig. 9 Response of high order($k=2$) disturbance observer system for step disturbance

(2) 对应斜坡扰动 d_0/s^2 的响应曲线($d_0=10$):

$$\frac{1}{25\ 000} - \frac{t}{50 \times \exp(500 \times t)} - \frac{1}{25\ 000 \times \exp(500 \times t)} \quad (18)$$

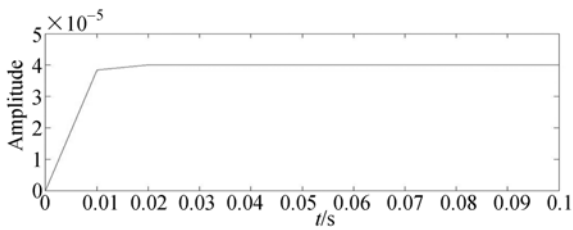


图 10 高阶扰动观测器 ($k=2$) 抗斜坡扰动残差响应曲线

Fig. 10 Response of high order ($k=2$) disturbance observer system for ramp disturbance

(3) 对应抛物波扰动 d_0/s^3 的响应曲线 ($d_0 =$

10)

$$\frac{t}{25\,000} + \frac{1}{6\,250\,000 \times \exp(500 \times t)} + \frac{t}{25\,000 \times \exp(500 \times t)} - \frac{1}{6\,250\,000} \quad (19)$$

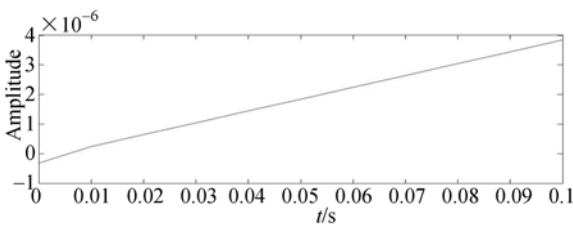


图 11 高阶扰动观测器 ($k=2$) 抗抛物波扰动残差响应曲线

Fig. 11 Response of high order ($k=2$) disturbance observer system for parabola disturbance

若系统采用高阶扰动观测器(针对 $k=3$ 设计的反馈系统),并配置滤波器的极点 $g = -333$,则其针对各种扰动源的响应曲线 G_{sd} 为 ($a_0 = 1$):

(1) 对应阶跃扰动 d_0/s 的响应曲线 ($d_0 = 10$):

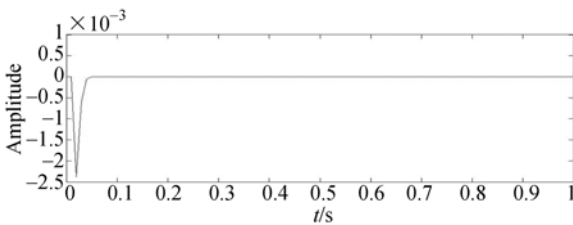


图 12 高阶扰动观测器 ($k=3$) 抗阶跃扰动残差响应曲线

Fig. 12 Response of high order ($k=3$) disturbance observer system for step disturbance

(2) 对应斜坡扰动 d_0/s^2 的响应曲线 ($d_0 =$

10):

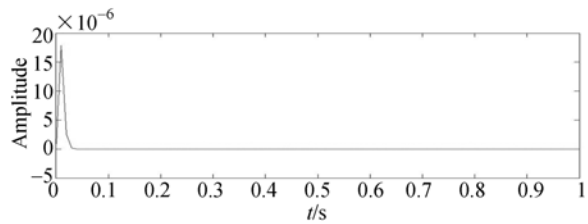


图 13 高阶扰动观测器 ($k=3$) 抗斜坡扰动残差响应曲线

Fig. 13 Response of high order ($k=3$) disturbance observer system for ramp disturbance

(3) 对应抛物波扰动 d_0/s^3 的响应曲线 ($d_0 =$

10)

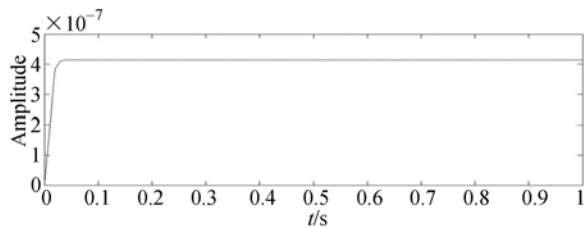


图 14 高阶扰动观测器 ($k=3$) 抗抛物波扰动残差响应曲线

Fig. 14 Response of high order ($k=3$) disturbance observer system for parabola disturbance

通过图 12、13 可以看出 3 阶扰动观测器对于阶跃扰动和斜坡扰动的抑制率为 100%,图 14 中对于抛物波抑制的残差为 4×10^{-7} ,从而抑制率为 99.9999996%。

3.4 高阶扰动观测器的抗扰能力实验数据

目前高阶扰动观测器已成功应用于 BZKxxx 无人机载光电平台中,并在外场飞行实验中得到了良好验证,稳台视轴稳定精度优于 $5 \mu\text{rad}$;在项目调试实验过程中可以通过在陀螺采集通道上分别加入 $\int \tau dt$ 和 $\int \tau t dt$, $\int \tau t^2 dt$ 等扰动信号等效阶跃扰动、斜坡扰动及抛物波扰动,其中 τ 值代表扰动的强度,实验时 τ 值取 10 000,陀螺采样时间间隔为 1 ms。由于阶跃扰动对于低阶和高阶扰动观测器较好克服,实验只对斜坡扰动和抛物波扰动进行分析响应曲线。如图 15 所示,图中纵坐标每个码值代表 $0.003\,05$ ($^\circ$)/s,横坐标每个码值代表 1 ms,黑色实线为一阶扰动观测器对斜坡扰动抑制的残差曲线,红色点线为 2 阶扰动观测器对斜坡扰动抑制的残差曲线,绿色点划线为 3 阶扰动观测器对斜坡扰动抑制的残差曲线(彩图见期刊电子版)。

抗抛物波扰动曲线如图 16 所示,图中纵坐标

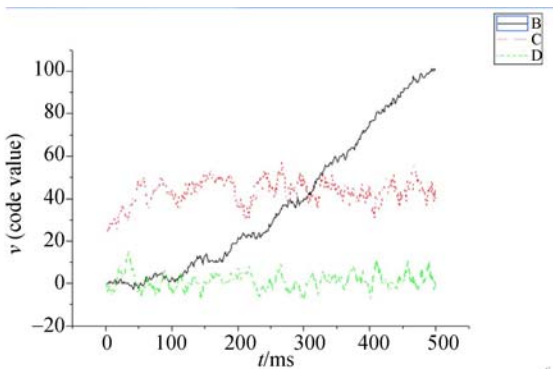


图 15 各阶扰动观测器抗斜坡扰动残差响应曲线
Fig. 15 Response of different order disturbance observer system for ramp disturbance

每个码值代表 $0.003\ 05(^{\circ})/s$, 横坐标每个码值代表 $1\ ms$, 黑色实线为一阶扰动观测器对抛物波扰动抑制的残差曲线, 红色点线为二阶扰动观测器对抛物波扰动抑制的残差曲线, 绿色点划线为三阶扰动观测器对抛物波扰动抑制的残差曲线(彩图见期刊电子版)。

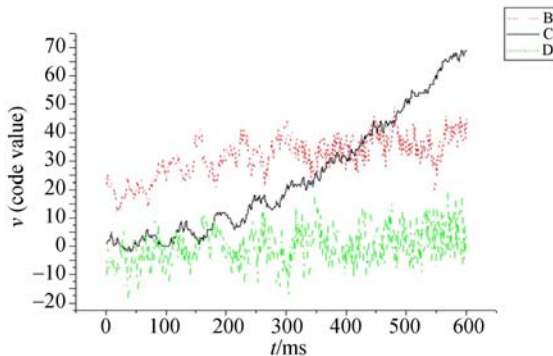


图 16 各阶扰动观测器抗抛物波扰动残差响应曲线
Fig. 16 Response of different order disturbance observer system for parabola disturbance

图 16 中一阶和二阶扰动观测器对抛物波扰动抑制的残差曲线由于受到陀螺噪声的影响, 很难判断是否为二次和一次曲线, 为了消除陀螺噪声的影响, 图 17 和图 18 分别为二阶和一阶扰动观测器抑制抛物波扰动残差拟合曲线。

通过上述数据可以看出 3 阶扰动观测器对于斜坡扰动可以完全抑制, 虽然理论上其对抛物波扰动不能起到完全抑制的作用, 但其 $99.999\ 999\ 6\ %$ 的理论抑制率并通过实验数据分析, 可将误差控制在 0 附近, 基本与陀螺的噪声水平一致。经过分析, 可以看出扰动观测器阶数越高, 其抑制高阶扰动的能力越强。

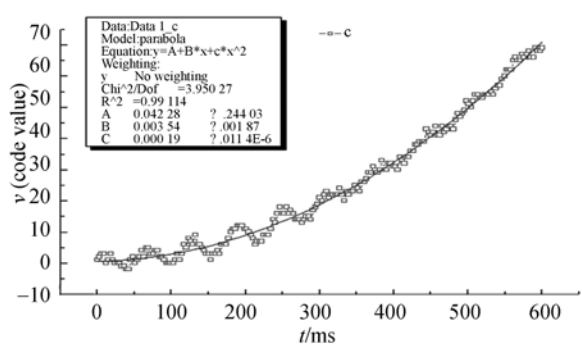


图 17 一阶扰动观测器抗抛物波扰动残差拟合曲线
Fig. 17 Fitting curve of 1st order disturbance observer system for parabola disturbance

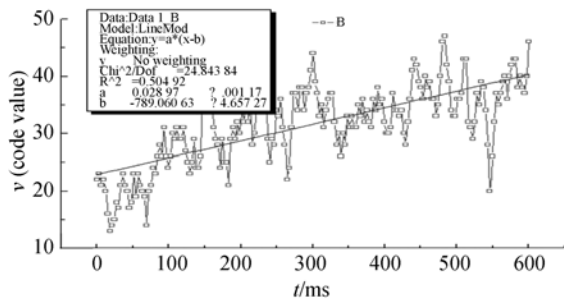


图 18 二阶扰动观测器抗抛物波扰动残差拟合曲线
Fig. 18 Fitting curve of 2nd order disturbance observer system for parabola disturbance

光电稳台实际控制对象模型为 3.1 节中的 $P(s)$, 辨识模型为 $P_n(s)$; 两者之间肯定会存在差异 ΔP :

- (1) a_0, c_0 之间存在差异;
- (2) $P_n(s)$ 中没有考虑 $P(s)$ 中的 c_1, c_2 ;

图 3 中 d 到 τ 的传递函数为:

$$\tau = Sd = S_n(1 + T \frac{-\Delta P}{P})d, \quad (20)$$

若定义 $d' = (1 + T \frac{-\Delta P}{P})d$, 则: $\tau = S_n d'$

情况(1)的控制对象, 且 $d = 1/s$:

$$d' = \frac{1}{s} + (T \frac{c_0 - a_0}{a_0}) \frac{1}{s}, \quad (21)$$

情况(2)的控制对象, 且 $d = 1/s$:

$$d' = \frac{1}{s} + (T \frac{c_0 - a_0}{a_0}) \frac{1}{s} + (T \frac{c_1}{a_0}) + \frac{1}{s^2}, \quad (22)$$

情况(3)的控制对象, 且 $d = 1/s$:

$$d' = \frac{1}{s} + (T \frac{c_0 - a_0}{a_0}) \frac{1}{s} + (T \frac{c_1}{a_0}) \frac{1}{s^2} + (T \frac{c_2}{a_0}) \frac{1}{s^3}. \quad (23)$$

通过对以上 3 种情况的分析, 可以看出模型

摄动时等效于改变扰动的输入形式,对于3种情况分别依次添加一阶扰动、2阶扰动、3阶扰动,若采用高阶扰动观测器来抑制高阶扰动,即可消除模型摄动所带来的影响。

4 结 论

本文通过比较高阶扰动观测器和低阶扰动观测器对阶跃扰动、斜坡扰动以及抛物波扰动等方

面的抑制能力,说明了在稳定平台速度环路中采用高阶扰动观测器的必要性,同时说明了高阶扰动观测器对于平台速度模型的摄动在低频区域也具有极强的抑制能力。虽然采用高阶扰动观测器会引入积分环节,降低系统的稳定裕度,但是通过配置滤波函数的极点位置,使高阶扰动观测器和低阶扰动观测器反馈系统的灵敏度函数和补充灵敏度函数在高频区域达到一致,便可以在提高伺服系统响应速度的同时保证系统的鲁棒性。

参考文献:

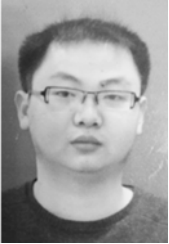
- [1] 鲁明,张欣,李耀华. SGCMG 框架伺服系统扰动力矩分析与控制[J]. 中国空间科学技术,2013,1:15-20.
LU M, ZHANG X, LI Y H. Analysis and control of disturbance torque in SGCMG gimbal servo system[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2013,1:15-20. (in Chinese)
- [2] 张艳,张淑梅,乔彦峰. 基于舰载光电设备参考模型扰动估计的前馈控制[J]. 光学精密工程,2013,21(5):1213-1221.
ZHANG Y, ZHANG SH M, QIAO Y F. Feedforward control based on reference model disturbance observer of carrier-based optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(5):1213-1221. (in Chinese)
- [3] 刘晶红,朱志强,沈云海,等. 加速度在控制系统扰动补偿中的应用[J]. 光学精密工程,2009,17(9):2191-2198.
LIU J H, ZHU ZH Q, SHEN H H, et al.. Application of control system based on acceleration to disturbance compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2191-2198. (in Chinese)
- [4] 贾松涛,朱煜,杨开明,等. 精密工作台扰动观测器的设计[J]. 微细加工技术,2007,4:39-42.
JIA S T, ZHU Y, YANG K M, et al.. The design of disturbance observer on precision platform[J]. *Micro Fabrication Technology*, 2007,4:39-42. (in Chinese)
- [5] 王琛琛,王新龙,黄海. 扰动观测器在惯导平台稳定回路中的应用方法[J]. 鱼雷技术,2012,20(3):195-200.
WANG CH CH, WANG X L, HUANG H. Application of disturbance observer to stabilization loop in inertial platform [J]. *Torpedo Technology*, 2012, 20(3):195-200. (in Chinese)
- [6] 李嘉全,丁策,孔德杰,等. 基于速度信号的扰动观测器及光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程,2011,19(5):998-1004.
LI J Q, DING C, KONG D J, et al.. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(5):998-1004. (in Chinese)
- [7] 谢巍,何忠亮. 采用改进型扰动观测器的控制方法[J]. 控制理论与应用,2010,27(6):695-700.
XIE W, HE ZH L. Control method with improved disturbance observer [J]. *Control Theory & Applications*, 2010,27(6):695-700. (in Chinese)
- [8] MURAKAMI T, OHNISHI K. Advanced motion control in mechatronics [J]. *Proc. IEEE Workshop on Intelligent Motion Control*, 1990,1:9-17.
- [9] 王琛琛,王新龙,黄海. 扰动观测器在惯导平台稳定回路中的应用方法[J]. 鱼雷技术,2012,20(3):195-200.
WANG CH CH, WANG X L, HUANG H. Application of disturbance observer to stabilization loop in inertial platform [J]. *Torpedo Technology*, 2012,20(3):195-200. (in Chinese)
- [10] YAMADA K, KOMADA S, ISHIDA M, et al.. Analysis of servo system realized by disturbance observer [J]. *Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, 1996:338-343.
- [11] 胡明慧,邵惠鹤. 基于灵敏度函数的二自由度控制系统设计与应用[J]. 上海交通大学学报,2007,41(11):1792-1795.
HU M H, SHAO H H. Design and application for two-degree-of-freedom control systems based on sensitivity function [J]. *Shanghai jiao tong University*, 2007,41(11):1792-1795. (in Chinese)
- [12] 胡寿松. 自动控制原理第三版[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

HU SH S. *The Principle of Control Systems (third edition)*[M]. Beijing: National defense industry press, 1985. (in Chinese)

- [13] 秦媛. 基于 LQG/LTR 方法的飞行控制系统设计与仿真[D]. 西安: 西北工业大学硕士论文, 2006.

QIN Y. *Design and Simulation of Flight Control System Based on LQG/LTR Method*[D]. XI'AN: The master thesis of northwestern polytechnical university, 2006. (in Chinese)

作者简介:



汪永阳(1982—),男,湖南岳阳人,博士研究生,助理研究员,2004年于天津大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为机载光电平台伺服控制。E-mail: wangyongyang117@sohu.com



戴明(1965—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,主要从事机载光电平台总体设计方面研究。E-mail: daim@vip.sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)