

文章编号 1004-924X(2015)10-2887-08

## 采用可变增益观测器的红外 导引头导气管扰动补偿

吴海龙<sup>1,2</sup>, 贾宏光<sup>1\*</sup>, 魏 群<sup>1</sup>, 姜湖海<sup>3</sup>

(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; 3. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为了提高红外导引头的跟踪精度, 降低导气管对导引头控制系统的影响, 提出一种新型可变增益扰动观测器。首先, 利用搭建的导引头实验系统研究了导气管干扰的扰动特性。然后, 在分析导气管扰动的系统特性基础之上, 结合经典扰动观测器理论, 设计了新型可变增益扰动观测器, 并分析了其鲁棒稳定性。最后, 针对某实际红外导引头系统, 设计了可变增益扰动观测器, 并进行了导气管扰动抑制实验。结果表明: 经典扰动观测器无法对导气管的扰动进行有效的抑制, 而采用可变增益扰动观测器后, 系统速度阶跃响应稳定精度提高 71.1%; 位置阶跃响应稳定精度提高 42.8%。研究表明可变增益扰动观测器可以有效地抑制红外导引头中的导气管扰动。

**关键词:** 红外导引头; 导气管扰动; 扰动观测器; 变增益; 扰动补偿

**中图分类号:** TJ765.333; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2887

## Compensation for gas tube disturbance of infrared seeker based on variable gain disturbance observer

WU Hai-long<sup>1,2</sup>, JIA Hong-guang<sup>1\*</sup>, WEI Qun<sup>1</sup>, JIANG Hu-hai<sup>3</sup>

(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;*  
3. *Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn.*

**Abstract:** In order to improve the tracing accuracy of infrared seeker and to reduce the influence imposed by the gas tube disturbances, a variable gain disturbance observer (VGDOB) is put up forward. First, based on the control system design platform of infrared seeker, disturbance characteristics is analyzed. Second, according to the characteristics of the gas tube disturbances and traditional disturbance observer theory, VGDOB is designed and its robust stabilization is also researched. Finally, experiment is implemented to restrain the gas tube disturbances by using the VGDOB. Experimental results indicate that with VGDOB, the velocity step response accuracy of the system is improved by 71.1%, and the position step response accuracy of the system is increased by 42.8%, while the tradition-

收稿日期: 2015-01-07; 修订日期: 2015-02-10.

基金项目: 中国科学院三期创新工程资助项目; 总装预研基金资助项目 (No. 51301060207)

al disturbance observer cannot compensate the gas tube disturbances. It can be concluded that the VG-DOB can suppress the gas tube disturbances that exist in the infrared seeker effectively.

**Key words:** IR seeker; gas tube disturbance; disturbance observer; variable gain; disturbance compensation

## 1 引言

随着精确制导武器的发展和战场环境的复杂多变,红外成像导引头因具有导引精度高、抗干扰能力强以及可进行多目标识别与跟踪等特点而成为重要的研究方向<sup>[1]</sup>。为了提高红外导引头的跟踪能力,通常采用稳定平台<sup>[2-3]</sup>结构来隔离外界干扰。而在影响稳定效果的各种扰动中,导引头的质量不平衡、摩擦和导线阻力的影响最大,它们会增加跟踪稳态误差,降低稳定时间,从而影响导弹制导精度<sup>[4-6]</sup>。

红外导引头可分为制冷型和非制冷型红外导引头<sup>[7]</sup>。制冷型红外导引头中需要增加制冷设备和导气管,导气管在随框架转动过程中会产生较大阻力,从而影响导引头的跟踪性能。导气管的阻力可以视为一种导线阻力。对导线扰动的抑制通常采用两种思路:一种是建立导线阻力扰动的数学模型,孙高<sup>[8]</sup>、Lin Chun-Liang<sup>[9]</sup>分别给出了导线扰动阻力的模型,但都没有给出模型中各项参数的具体确定方法。导线阻力一般是非线性的,且是变化的,数学模型的适用性和参数的确定都非常困难。另一种思路是采用扰动观测器对导线的阻力扰动直接补偿,目前导线扰动一般与其他系统扰动一起考虑。李华<sup>[10]</sup>对非线性系统提出一种基于扰动观测器的非线性系统的前馈控制方法,但该方法需要获得非线性系统的线性替代模型;任彦、王琛琛等设计的滑模干扰观测器对光电稳定跟踪系统中的摩擦等非线性因素进行了研究<sup>[11-12]</sup>,但仅局限于仿真研究。

本文针对某红外导引头中存在的导气管阻力进行了分析。首先通过实验证实导气管阻力是系统的主要影响因素,然后基于经典扰动观测器<sup>[13]</sup>,针对导气管阻力扰动提出一种新型实用的可变增益扰动观测器,最后在红为导引头系统实验平台上进行了实验,验证了该扰动观测器的有效性。

## 2 导气管影响分析

### 2.1 导气管布线方式

图 1 所示为红外导引头系统图。主要由光学系统、框架系统、控制系统和图像处理系统组成,其中探测器为图像处理系统的一部分。图 2 所示为红外导引头导气管内部布线图,探测器安装于俯仰框架,导气管一端与制冷氮气气瓶相连,另一端通过偏航轴和俯仰轴沿两框架内壁布置,最后连接到探测器。因绕轴布线时,导气管缠绕在内外框内壁上,在内外框转动过程中,导气管会随着

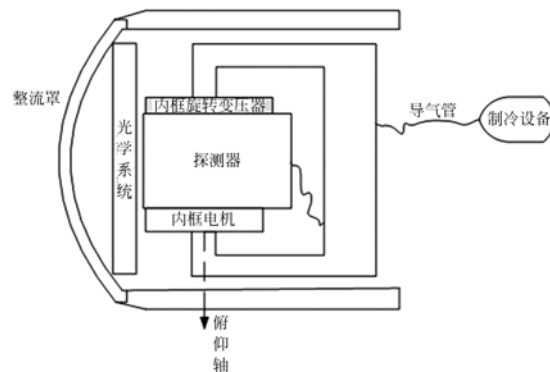


图 1 红外导引头系统图

Fig. 1 Block diagram of infrared seeker system

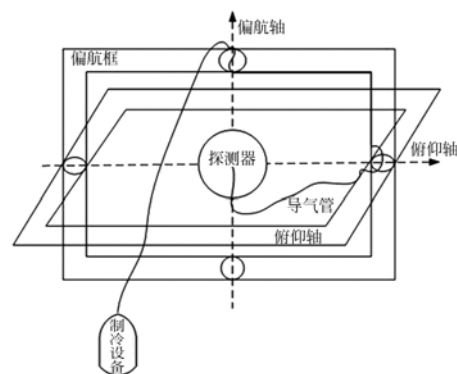


图 2 红外导引头导气管布线图

Fig. 2 Wiring diagram of infrared seeker's gas tube

内外框架的转动而产生扭转和阻力,从而会造成较大干扰力矩,影响控制精度。

### 2.2 导气管对系统的影响分析

导气管扰动力矩主要对红外导引头的控制精度和跟踪性能具有较大影响。为了研究导气管扰动力矩的影响,搭建了红外导引头 xPC 控制系统平台,如图 3 所示。

J

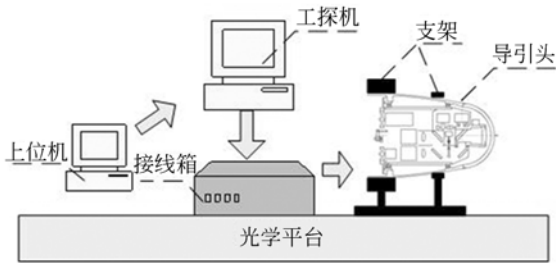


图 3 红外导引头 xPC 控制系统图

Fig. 3 xPC control system of infrared seeker

系统的软件环境为 Matlab 支持的 xPC 实时平台,在上位机中建立了导引头控制系统 Simulink 模型,进行系统的控制算法编写;研华科技的 610L 工控机用来执行程序,在工控机中集成了 Quatech-RS422 串行通讯卡用于采集光电编码器的输出数据,NI-AD/DA6229 用于模数和数模转换;上位机与工控机之间采用 TCP/IP 通信,接线箱用于布置线路和安置力矩电机驱动器。

为研究导气管对红外导引头的影响,首先在控制系统设计阶段进行分析。在控制系统设计前,一般需要对系统进行扫频实验<sup>[14]</sup>,获得系统实际模型。利用 xPC 实时控制系统并采用  $0.12\sin(2\pi ft)$  正弦信号对系统进行扫频实验,其

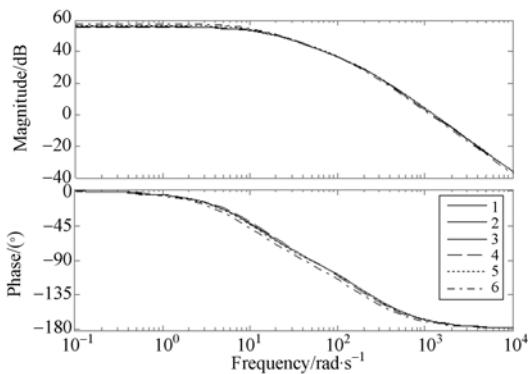


图 4 系统模型传递函数图

Fig. 4 Bode diagram of system model

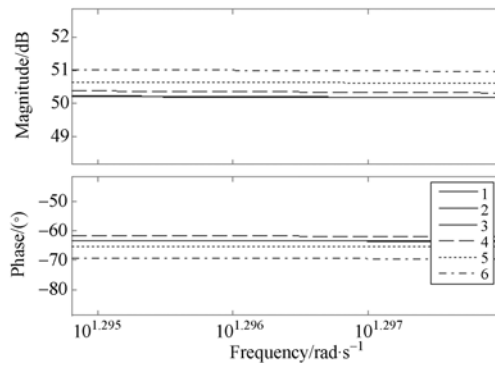


图 5 系统模型传递函数局部放大图

Fig. 5 Enlarged Bode diagram of system model

中  $f$  为  $45 \sim 1.5$  Hz,变化比例为 0.85。扫频完成后采用二阶系统进行拟合,其表达式如式(1)所示。多次扫频得到的传递函数见表 1,系统模型传递函数图和局部放大图分别如图 4 和图 5 所示:

$$G = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} \quad (1)$$

表 1 系统模型传递函数参数表

Tab. 1 Results of system's transfer function

组别	参数		
	K	$T_1$	$T_2$
1	614.7	0.000 385 1	0.085 58
2	614.7	0.000 387 5	0.085 68
3	614.7	0.000 384 5	0.085 54
4	593.6	0.000 392 7	0.079 91
5	681.8	0.000 414 9	0.091 94
6	785.5	0.000 580 6	0.104 4

表 1 中第 1~3 组是探测器不接导气管时系统的传递函数模型,3 组数据可近似视为相同数据;第 4~6 组是探测器接上导气管之后扫频得到的系统传递函数模型,与前 3 组差距较大。由图 4 可以看出,在接上导气管后,系统模型发生改变,并且每次扫频得到的系统模型均不一样。这充分表明导气管对红外导引头的不良影响,导气管在随内外框架运动过程中产生的较大阻力干扰,改变了系统的传递函数模型,这将会导致设计的控制器控制精度降低,甚至是失效。所以,为提高控制性能,在控制系统设计过程中必须采取有效措施来抑制和补偿导气管的扰动。

### 3 可变增益扰动观测器设计

#### 3.1 可变增益扰动观测器

导气管的扰动抑制一般可分为基于扰动模型进行补偿和直接观测扰动量进行抑制 2 种方式。线绕扰动作为一种非线性扰动,目前还没有被广泛认可的模型,且现有模型的参数确定较为困难。因此,本文采用第二种方法,设计扰动观测器,直接观测导气管的扰动力矩并对其进行补偿。

扰动观测器的基本思想是将外部力矩干扰及模型参数变化造成的实际对象与名义模型输出的差等效到控制输入端,即观测出等效干扰。然后在回路中引入等效的补偿,实现对干扰的有效抑制<sup>[15-16]</sup>。

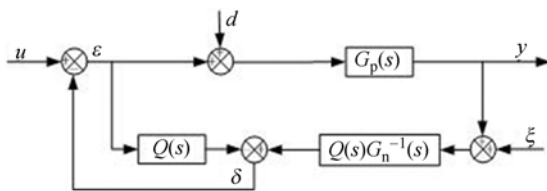


图 6 经典扰动观测器原理框图

Fig. 6 Diagram of typical disturbance observer

图 6 所示为经典扰动观测器的原理框图,图中  $u$ 、 $d$ 、 $\xi$  分别是系统输入、等效扰动和测量噪声,  $\hat{d}$  为观测得到的扰动量。  $G_p(s)$  为实际系统模型,  $G_n(s)$  为系统名义模型,  $Q(s)$  为低通滤波器。扰动观测器的性能分析和鲁棒稳定性分析可以参见文献<sup>[17-18]</sup>。

若采用图 6 所示经典扰动观测器,其输出的扰动量仅考虑导气管对系统模型在较小范围的改

变。根据表 1 可知,导气管的干扰是非线性变化的,其变化量具有不确定性,含有导气管时系统模型变化较大。因此,若采用经典扰动观测器时输出的扰动量与实际情况相比会存在较大偏差,而偏差过大会造成系统振荡或失控。在无法准确获得含导气管时系统模型的情况下,在经典扰动观测器基础上,通过在扰动输出部分增加一个增益调节参数,可以得到改进后的扰动观测器,原理如图 7 所示。因系统线绕阻力的不确定性,该可变增益值可通过不断改变参数值,直至系统性能满足要求后获得可变增益的最优值。在可变增益扰动观测器中,通过调整可变增益值  $K$ ,可以减小因系统模型的较大变动造成的系统偏差,有效避免过大扰动量造成的系统振荡。

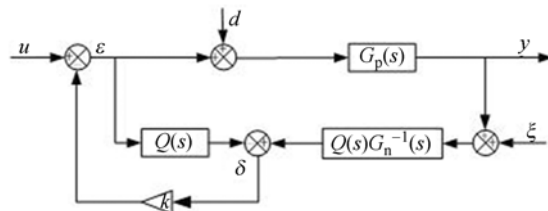


图 7 可变增益扰动观测器原理框图

Fig. 7 Diagram of variable gain disturbance observer

#### 3.2 可变增益扰动观测器的鲁棒稳定性分析

对可变增益扰动观测器的鲁棒稳定性进行分析,系统不确定模型可以用乘积摄动来表示:

$$G_p = G_n(s)(1 + \Delta(s)), \quad (2)$$

其中:  $\Delta(s)$  表示系统实际频率特性对名义模型的摄动。则根据图 7 可知:

$$G_{UY}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_n(s) + K[G_p(s) - G_n(s)]Q(s)}, \quad (3)$$

$$\Delta G_{UY}(s) = \frac{(G_p(s) + \Delta G_p(s))G_n(s)}{G_n + K[G_p(s) + \Delta G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} - \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_n + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} = \frac{G_n(s)\Delta G_p(s)G_n(s)(1 - KQ(s))}{\{G_n + K[G_p(s) + \Delta G_p(s) - G_n(s)]Q(s)\} \{G_n + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)\}}, \quad (4)$$

则灵敏度函数  $S(s)$  为:

$$S(s) = \lim_{\Delta G_p(s) \rightarrow 0} \frac{\Delta G_{UY}(s)/G_{UY}(s)}{\Delta G_p(s)/G_p(s)} = \frac{G_n(s)(1 - KQ(s))}{G_n(s) + K[G_p(s) - G_n(s)]Q(s)}, \quad (5)$$

在低频段,认为  $G_p(s) = G_n(s)$ , 则:

$$S(s) = 1 - KQ(s), \quad (6)$$

则不灵敏度函数  $T(s)$  为:

$$T(s) = KQ(s). \quad (7)$$

根据鲁棒稳定性原理:

$$\| \Delta(j\omega) T(j\omega) \|_{\infty} \leq 1, \quad (8)$$

其中:  $\| \cdot \|_{\infty}$  为  $H_{\infty}$  范数。

由此,满足鲁棒稳定性的充分必要条件为:

$$\| Q(j\omega) \|_{\infty} \leq \frac{1}{\| K\Delta(j\omega) \|_{\infty}}. \quad (9)$$

可以得出,可变增益扰动观测器的稳定条件是低通滤波器的低通滤波器  $Q(s)$  的  $H_{\infty}$  范数不大于模型摄动量与可变增益值  $K$  乘积的  $H_{\infty}$  范数的倒数。低通滤波器  $Q(s)$  的设计规则可以参看文献[13]。

## 4 实验与结果

### 4.1 实验

为了抑制和补偿导气管的扰动,利用红外导引头 xPC 实时控制半物理平台验证扰动观测器的效果。图 8 所示为系统半物理控制 Simulink 程序图,控制系统采用串级控制,速度回路和位置回路均采用 PI 控制器结构。图中虚线框内为可变增益扰动观测器,其中  $Q$  为低通滤波器,  $GQ$

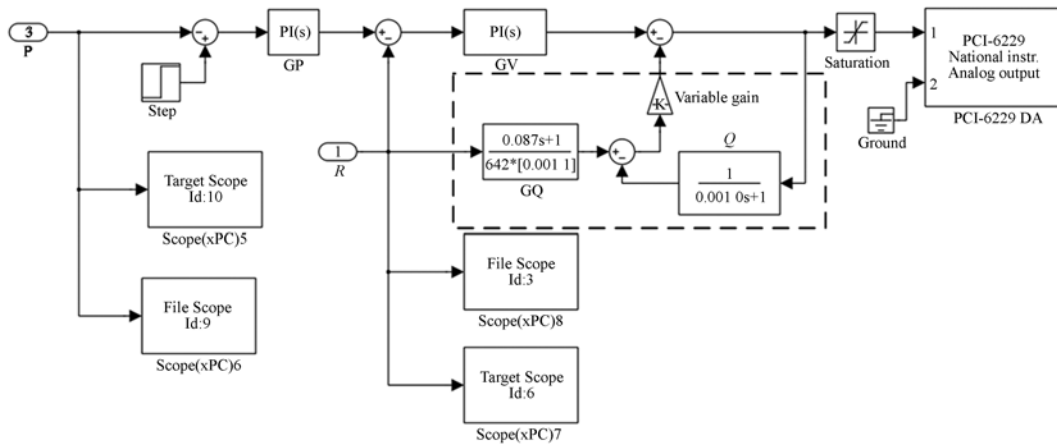


图 8 系统实验控制结构图

Fig. 8 Control system diagram

系统名义模型的逆与低通滤波器的乘积, Variable Gain 为扰动观测器可变增益。  $P$  为旋转变压器反馈的角位置信号,  $R$  为陀螺反馈的角速度信号,  $GP$  为位置回路控制器,  $GV$  为速度回路控制器,图 9 所示为系统实验实物图。

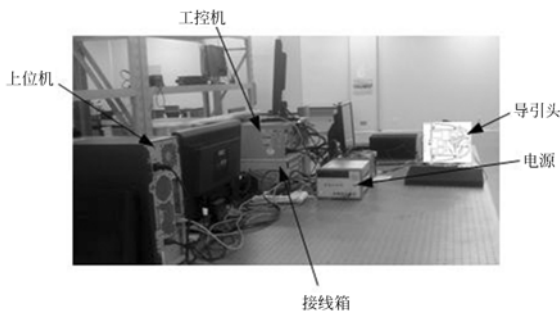


图 9 系统实验实物图

Fig. 9 Experiment setup diagram

系统名义模型  $GN(s)$  采用未接导气管时系统一阶模型拟合,表达式为:

$$GN(s) = \frac{642}{0.087s+1}. \quad (10)$$

因为系统模型和线绕阻力的不确定性,无法给出可变增益的具体计算公式,因而控制器参数确定和扰动观测器可变增益值的调整需要在实验过程中不断调试,直至满足系统的性能指标要求。首先根据控制性能要求,确定速度环 PI 控制器的参数,然后在此基础上调节可变增益值,直至系统扰动量达最小。在调试过程中,速度环和位置环分别输入  $1^\circ/s$  和  $1^\circ$  的阶跃指令,经过调试后,直接给出系统各项参数的最佳结果,式(11)和(12)分别为速度环和位置环的 PI 控制器表达式:

$$GV(s) = \frac{0.0056(s+60)}{s}, \quad (11)$$

$$GP(s) = \frac{15(s+0.005)}{s}. \quad (12)$$

考虑物理可实现性、噪声抑制能力和系统鲁棒稳定性,设计低通滤波器为:

$$Q(s) = \frac{1}{0.001s + 1} \quad (13)$$

图 10 所示为扰动观测器可变增益为 1.0 即采用经典扰动观测器时,系统的速度阶跃响应曲线。对图 10 与图 11 中不采用扰动观测器时系统阶跃响应曲线的对比可知,在采用经典扰动观测器时系统控制性能甚至不如不采用扰动观测器的系统性能。因此,在导气管干扰下,若采用经典扰动观测器,系统将存在稳态误差过大,甚至不稳定的情况。在考虑导气管扰动时,系统模型变化较大,需要根据实际情况对添加到系统的扰动量进行调节。

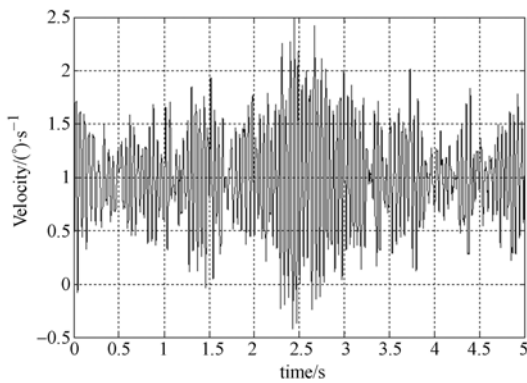


图 10 可变增益为 1 时系统速度响应曲线图

Fig. 10 System response for disturbance observer with gain of 1.0

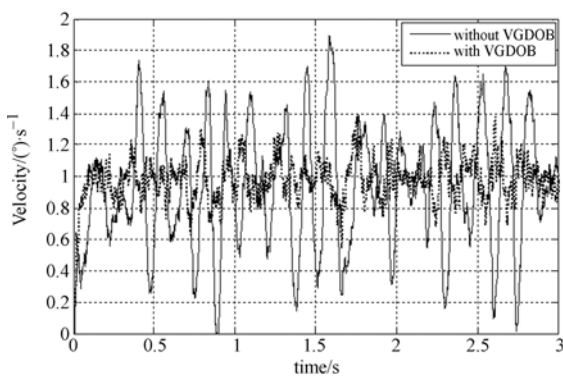


图 11 系统速度环阶跃响应图

Fig. 11 Step response of system's velocity loop

调节扰动观测器增益值,将经典扰动观测器改为可变增益扰动观测器。经调试取系统扰动观测器可变增益为 0.6。图 11 是系统在阶跃速度指令输入下,采用可变增益为 0.6 和 0 时系统的速度阶跃响应曲线图。在不采用扰动观测器时,系统的稳态误差较大,最大可达 0.9(°)/s,稳态均

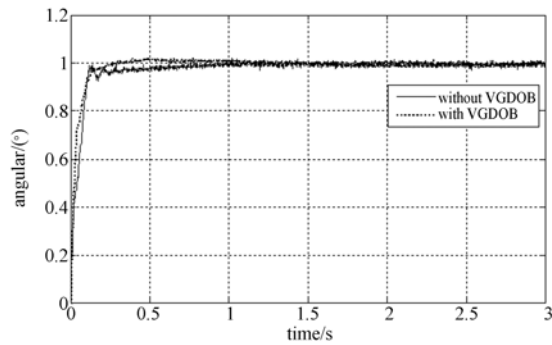


图 12 系统位置环阶跃响应图

Fig. 12 Step response of system's position loop

方差达到 0.346;在采用可变增益扰动观测器后,稳态误差最大为 0.3(°)/s,稳态均方差为 0.10,可见补偿效果明显。在采用可变增益扰动观测器后系统速度响应稳态均方差仍较大,这主要是受系统中系统摩擦、其他导线等因素的耦合影响。图 12 所示为系统在阶跃位置指令输入下,采用可变增益为 0.6 和 0 时,系统的位置阶跃响应曲线图。在不采用扰动观测器时,系统的稳态误差较大,最大可达 0.075(°)/s,稳态均方差达到 0.0098;在采用可变增益扰动观测器后,稳态误差最大为 0.0327(°)/s,稳态均方差为 0.0056,可见补偿效果明显。

图 13 和图 14 分别是系统在 10sin(πt)速度指令和 10sin(πt)位置指令输入下系统的速度和位置响应曲线图。图 15 是图 14 系统位置响应的局部放大图。由图 13 可知,采用可变增益扰动观测器后系统速度响应的波动次数和幅值明显减小。图 16 是系统的正弦位置响应误差曲线图,可知未采用可变增益扰动补偿时,系统位置响应曲线波动大,最大误差为 0.6803°,采用可变增益扰

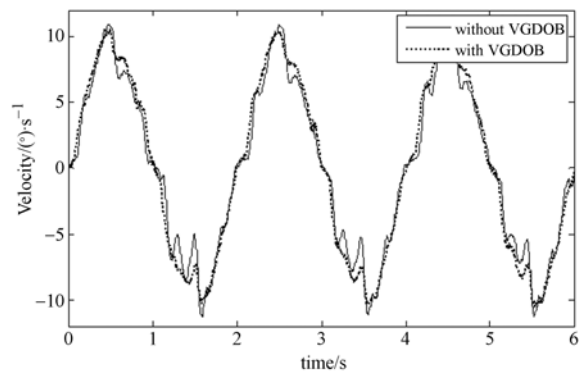


图 13 系统速度环正弦响应图

Fig. 13 Sine response of system's velocity loop

动观测器后,系统响应曲线明显光滑,最大误差为  $0.3^\circ$ 。

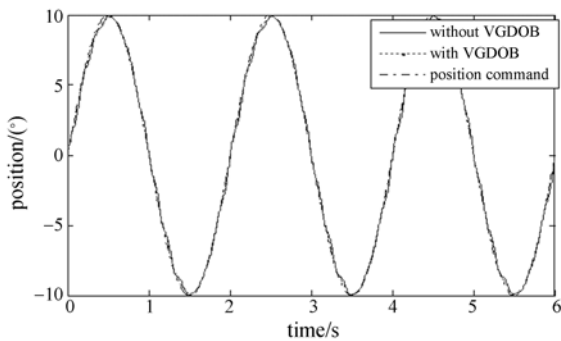


图 14 系统位置环正弦响应图

Fig. 14 Sine response of system's position loop

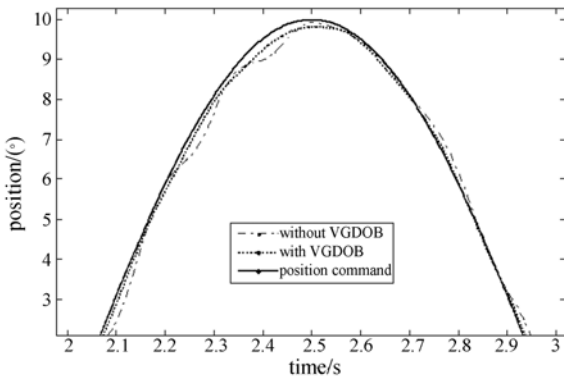


图 15 系统位置环正弦响应局部放大图

Fig. 15 Enlarged drawing of sine response of system

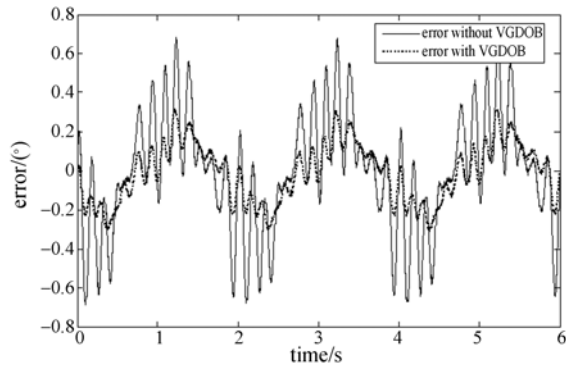


图 16 系统位置环正弦响应误差图

Fig. 16 Error diagram of sine response of system

## 5 结 论

本文针对红外导引头系统中导气管扰动问题,在经典扰动观测器基础上,提出一种适用于存在较大模型参数摄动的可变增益扰动观测器。在采用可变增益扰动观测器后,系统速度阶跃响应稳定精度提高 71.1%;位置阶跃响应稳定精度提高 42.8%。该方法简单有效,易于应用,不足之处是需进行离线调试以获得可变增益的最优值。针对导线和导气管的扰动问题,今后可以将走线排布方式与控制系统设计相结合,进一步研究减小线绕阻力的有效方法;也可以进一步研究可变增益参数的自适应改变,在线改变参数值,时时以最优值进行线绕抑制。

## 参考文献:

[1] 耿峰,祝小平. 精确制导武器红外成像导引头控制系统研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 535-538.  
GENG F, ZHU X P. The research of accuracy guidance weapon infrared imaging seeker control system [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 535-538. (in Chinese)

[2] 邵文冕,董浩. 扰动观测器稳定平台视轴稳定的控制方法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012, 22(2): 162-167.  
SHAO W M, DONG H. Stable platform line-of-sight stabilization control based on disturbance observer[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology*, 2012, 22(2): 162-167. (in Chinese)

[3] 吴鹏. 精确制导光电导引头稳定平台数字控制技术[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(3): 37-41.

WU P. The digital control technique on stabilization platform of precise guidance photoelectric seeker [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2002, 22(3): 37-41. (in Chinese)

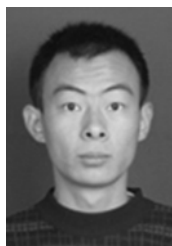
[4] LIN CH L, HSIAO Y H. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 19(1): 108-121.

[5] 鲍文亮,黄显林,尹航,等. 光电平台惯性稳定系统的自适应动态摩擦补偿[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 50-54.  
BAO W L, HUANG X L, YIN H, et al.. Adaptive dynamic friction compensation for an electro-optical platform inertial stabilization system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(4): 50-54. (in Chinese)

[6] MAHER A, AHMAD R V, ALIREZA T, et al.. Research on the cross-coupling of a two axes gimbal system with dynamic unbalance [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10:

- 357.
- [7] 刘珂,陈宝国,李丽娟.空空导弹红外导引头技术发展趋势及关键技术[J].激光与红外,2011,41(10):1117-1121.  
LIU K, CHEN B G, LI L J. Development tendency and key technology of IR seeker for air-to-air missile [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1117-1121. (in Chinese)
- [8] 孙高.半捷联光电稳定平台控制系统研究[D].北京:中国科学院,2013.  
SUN G. *Research on Control System of Semi-Strapdown Photoelectricity Stabilized Platform* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [9] LIN CH L, HSIAO Y H. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 19(1):108-121.
- [10] 李华,陈良.非线性系统的线性定常扰动观测器前馈控制[J].控制工程,2013,20(6):1037-1041.  
LI H, CHEN L. Linear time-invariant disturbance observer feedforward control for nonlinear system [J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(6): 1037-1041. (in Chinese)
- [11] 任彦,刘正华,周锐.滑模干扰观测器在低速光电跟踪系统中的应用[J].北京航空航天大学学报,2013,39(6):835-840.  
REN Y, LIU ZH H, ZHOU R. Application of low speed opto-electronic tracking systems based on sliding mode disturbance observer [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(6):835-840. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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. Feed-forward control based on reference model disturbance observer of carrier-based optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1213-1221. (in Chinese)
- [14] 王帅,陈涛,李洪文,等.光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J].光学精密工程,2009,17(1):78-84.  
WANG SH, CHEN T, LI H W. Frequency characteristic test and model identification for O-E tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):78-84. (in Chinese)
- [15] 付金宝,丁亚林,仲崇亮,等.带干扰观测器的航空相机前向像移补偿控制器[J].光学精密工程,2013,21(6):1456-1463.  
FU J B, DING Y L, ZHONG CH L, et al.. Compensation controller with disturbance observer for forward image motion of aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1456-1463. (in Chinese)
- [16] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].3版.北京:电子工业出版社.  
LIU J K. *Advanced PID control MATLAB simulation* [M]. 3th Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)
- [17] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1977, 7: 513-526.
- [18] LEE H S. *Robust digital tracking controllers for high-speed /high-accuracy positioning systems* [D]. Mech. Eng. Dep, Univ. California, Berkeley, 1994.

#### 作者简介:



吴海龙(1988—),男,山东济南人,博士研究生,2011年于中国石油大学(华东)获得学士学位,主要从事稳定平台控制系统设计研究。E-mail: wuhailong.2001@163.com

#### 导师简介:



贾宏光(1971—),男,黑龙江省五常人,研究员,博士生导师,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光机电系统微小小型化与精确制导技术研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn