

## 半捷联导引头混合自抗扰控制系统设计

陈开伟,温求道,夏群利

(北京理工大学 宇航学院,北京 100081)

**摘要:** 为了使半捷联导引头在干扰力矩和刻度尺误差引起的耦合干扰及其他不确定干扰下仍具有很强的鲁棒性,提出了伺服系统混合自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)方案。首先,建立了导引头半捷联稳定平台数学模型;其次,设计了半捷联导引头稳定平台混合自抗扰控制系统,通过对自抗扰稳定回路频带特性进行研究,分析了控制器参数对控制性能的影响,给出了控制参数设计原则;最后,对混合自抗扰控制方案进行了数字仿真验证。仿真结果表明:相比于传统控制器,混合自抗扰控制器能获得更好的控制精度,能有效克服干扰力矩和刻度尺误差对导引头的影响,在典型弹体频率 2 Hz 处隔离度幅值比传统控制器最多能降低约 67.9%。研究成果可为半捷联导引头稳定控制系统的设计提供指导。

**关键词:** 半捷联导引头; 自抗扰控制; 隔离度; 干扰力矩; 刻度尺误差

**中图分类号:** TJ765.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1131001

## Hybrid ADRC system design for semi-strapdown seeker

Chen Kaiwei, Wen Qiuqiu, Xia Qunli

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A hybrid active disturbance rejection control (ADRC) scheme for stable loop was proposed. In order to make the semi-strapdown seekers have strong robustness under the coupling disturbances induced by disturbance torques and scale error and other uncertain perturbations. Firstly, the mathematic model of the semi-strapdown stable platform was established. Secondly, a hybrid ADRC system for the stable platform of a semi-strapdown seeker was designed. The influence of controller parameters on the control performance was analyzed by studying the frequency characteristics of ADRC, and the design principle of control parameters was given. Finally, the hybrid ADRC scheme was verified by mathematical simulation. The simulation results show that, compared with the traditional controller, the hybrid ADRC achieves better control accuracy and can effectively overcome the influence of disturbance torque and scale error on the seeker. The amplitude of the disturbance rejection rate (DRR) can be reduced by about 67.9% under the typical attitude disturbance frequency (2 Hz). The research results can provide guidance for the design of semi-strapdown seeker stable control system.

**Key words:** semi-strapdown seeker; ADRC; DRR; disturbance torque; scale error

收稿日期:2018-06-13; 修订日期:2018-07-17

基金项目:国家自然科学基金(51575523)

作者简介:陈开伟(1991-),男,博士生,主要从事飞行器制导与控制方面的研究。Email:kwillchan@outlook.com

导师简介:夏群利(1971-),男,副教授,博士,主要从事导弹总体设计、制导控制方面的研究。Email:1010@bit.edu.cn

## 0 引言

半捷联导引头去掉稳定平台上的速率陀螺,利用弹体上现有的陀螺信号与稳定平台框架位置传感器信号相结合,以测定稳定平台的惯性速率<sup>[1-2]</sup>。这种稳定方式的机械结构简单,有利于实现导引头小型化和低成本,尤其适用于空间有限的战术导弹应用。

然而,导引头伺服系统存在的非线性摩擦等干扰力矩,会使弹体的运动耦合进导引头运动中,引起隔离度(Disturbance Rejection Rate, DRR)问题,半捷联稳定回路速率陀螺和框架角传感器动力学的不匹配又会加重弹体扰动耦合的影响,给系统带来更多的扰动和不确定因素。传统的 PID 控制、相位超前校正等控制器的设计依赖于对象的参数,且控制器鲁棒性不够好,不能很好地克服外界扰动及参数变化对系统的不利影响<sup>[3]</sup>。现代控制理论如最优控制理论、自适应控制理论等可以有效提高系统性能,但设计难度大,计算复杂,控制系统成本高,不易在实际工程中得到推广和应用<sup>[4]</sup>。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control,

ADRC) 技术把作用于被控对象的所有不确定因素都归结为总的未知扰动,利用对象的输入输出数据对它进行估计和补偿,从而使控制系统获得更好的闭环动态性能<sup>[5]</sup>。该控制器不依赖于对象精确模型,算法简单,具有较强的适应性、鲁棒性和可操作性。

半捷联导引头伺服控制系统的稳定回路和跟踪回路对弹体的姿态扰动都具有隔离作用。然而跟踪回路带宽频率一般较低,只对超低频率的弹体姿态扰动有隔离作用,在系统对隔离扰动起主要作用的是稳定回路,改善稳定回路的动态特性是实现高精度稳定平台的关键。因此文中提出半捷联导引头稳定平台混合自抗扰控制系统设计方案,在稳定回路设计自抗扰控制器以提高稳定控制精度,而跟踪回路保持原有设计不变从而实现对指令的快速性跟踪。

## 1 半捷联导引头控制系统数学模型

典型半捷联导引头稳定平台控制系统工作原理框图如图 1 所示。其中  $L$ 、 $R$  为电枢绕组的电感与电阻,  $K_T$  为电机电力矩系数,  $J$  为平台转动惯量,  $K_B$  为反电势系数,  $K_1$ 、 $K_2$  为运放与功放,  $\dot{\vartheta}$  为弹体姿态角

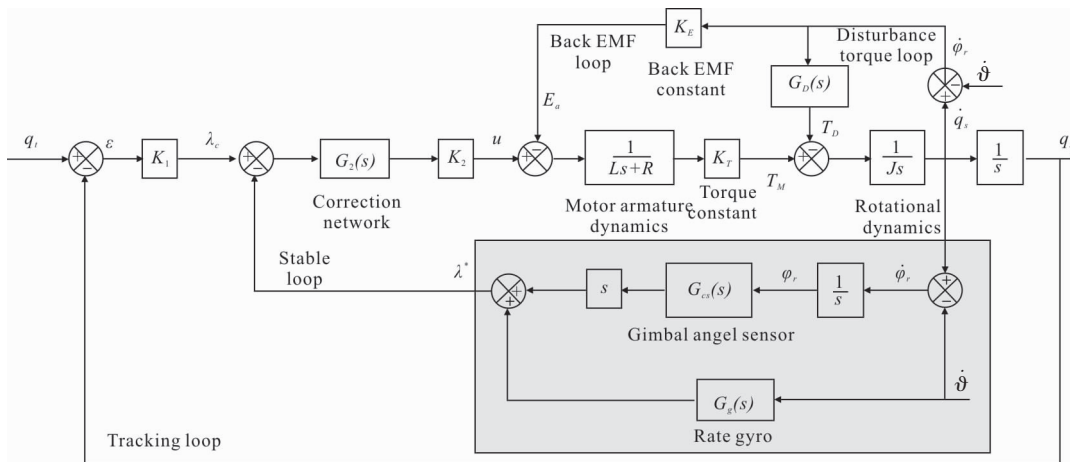


图 1 典型半捷联导引头稳定平台控制系统工作原理框图

Fig.1 Working schematic of stabilized platform control system for typical semi-strapdown seeker

速度,  $G_{cs}(s)$  为框架角传感器,  $G_s(s)$  为角速率陀螺。

半捷联导引头稳定回路对探测系统光轴进行稳定,隔离弹体的扰动对导引头光轴指向的影响。导弹飞行过程中,气压、震动等不确定因素引起的传感器刻度尺系数的不匹配会造成弹体姿态角运动的不完全解耦,引发隔离度问题。

导引头转动过程中导线的拉扯以及转动连接处

的动静摩擦等引起干扰力矩回路,干扰力矩的产生会使导引头光轴指向产生偏差,降低导引头的控制精度<sup>[6]</sup>,是引起半捷联导引头隔离度问题的又一重要因素。图 1 中  $G_D(s)$  为总的干扰力矩传递函数,干扰力矩来源主要有库仑摩擦力矩  $T_{fric}$ 、粘滞阻尼力矩  $T_{visc}$  和弹簧力矩  $T_{spr}$ <sup>[7]</sup>。库仑摩擦力矩是一种非线性干扰力矩,粘滞阻尼力矩和弹簧力矩可以简化为

线性模型,其数学模型为:

$$T_{\text{fric}}(t) = \begin{cases} T_{\text{coul}} & \dot{\varphi}_r > 0 \\ -T_{\text{coul}} & \dot{\varphi}_r < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{\text{visc}}(t) = K_{\omega} \dot{\varphi}_r(t)$$

$$T_{\text{spr}}(t) = K_n \varphi_r(t)$$

式中:  $\varphi_r$  为导引头框架角;  $K_{\omega}$  和  $K_n$  为比例系数。

## 2 半捷联导引头混合自抗扰控制

常用的自抗扰控制器有非线性<sup>[8]</sup>和线性<sup>[9]</sup>两种形式,线性自抗扰控制(LADRC)保持了自抗扰控制算法的优良控制性能,且算法更为简单,容易实现。因此文中采用 LADRC 算法,将耦合干扰及模型偏差等所有不确定因素当作总扰动,利用线性扩张状态观测器(LESO)进行估计并加以补偿,再采用 PD 控制器进行误差反馈控制,从而实现对指令的精确跟踪。以下给出稳定回路自抗扰控制器的设计过程。

图 1 中,由于框架角传感器和角速率陀螺频带远高于跟踪回路频带,可忽略两个传感器的动力学,取  $G_{cs}(s)=1$ 、 $G_s(s)=1$ ,则可得由电机控制电压  $u$  到合成视线角速度信号  $\lambda^*$  的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\lambda^*}{u} = \frac{K_T}{JLs^2 + JRs + K_E K_T} \quad (2)$$

系统可以表示成:

$$\ddot{\lambda}^* = \frac{R}{L} \dot{\lambda}^* - \frac{K_E K_T}{LJ} \lambda^* + \frac{K_T}{LJ} u + \omega \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为外部干扰。

令系统参数  $a_1=R/L$ 、 $a_0=K_E K_T/LJ$ , 控制增益  $b=K_T/LJ$ , 若取  $b_0 \approx b$ , 定义  $F=-a_1 \dot{\lambda}^* - a_0 \lambda^* + \omega + (b-b_0)u$  为系统广义扰动,包含系统内部不确定性和外部干

扰,则可以得到系统状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = h \\ \lambda^* = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_1 = \lambda^*$ 、 $x_2 = \dot{\lambda}^*$  为系统状态变量;  $x_3 = F$  为扩张状态变量,  $h = \dot{F}$ 。

则可建立三阶 LESO 如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - l_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - l_2 e_1 + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -l_3 e_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $e_1 = z_1 - \lambda^*$ ,  $L = [l_1, l_2, l_3]^T$  为观测器增益矩阵。通过选取合适的观测器增益,LESO 能够实现对系统状态变量的实时跟踪,即  $z_1 \rightarrow \lambda^*$ ,  $z_2 \rightarrow \dot{\lambda}^*$ ,  $z_3 \rightarrow F$

观测器增益选取为:

$$l_1 = 3\omega_o, l_2 = 3\omega_o^2, l_3 = 3\omega_o^3 \quad (6)$$

式中:  $\omega_o$  为观测器带宽。构造控制律:

$$u = \frac{-z_3 + u_0}{b_0} \quad (7)$$

忽略  $z_3$  对  $F$  的观测误差,设计 PD 控制器

$$u_0 = k_p (\lambda_c - z_1) - k_d z_2 \quad (8)$$

式中:  $\lambda_c$  为视线角速度输入指令;  $k_p$ 、 $k_d$  为控制器增益。且有:

$$k_p = \omega_c^2, k_d = 2\zeta\omega_c \quad (9)$$

式中:  $\omega_c$  为控制器带宽;  $\zeta$  为阻尼比,文中取  $\zeta=1$ 。

由此可以得到基于混合自抗扰控制的半捷联导引头稳定平台伺服系统工作原理框图如图 2 所示。

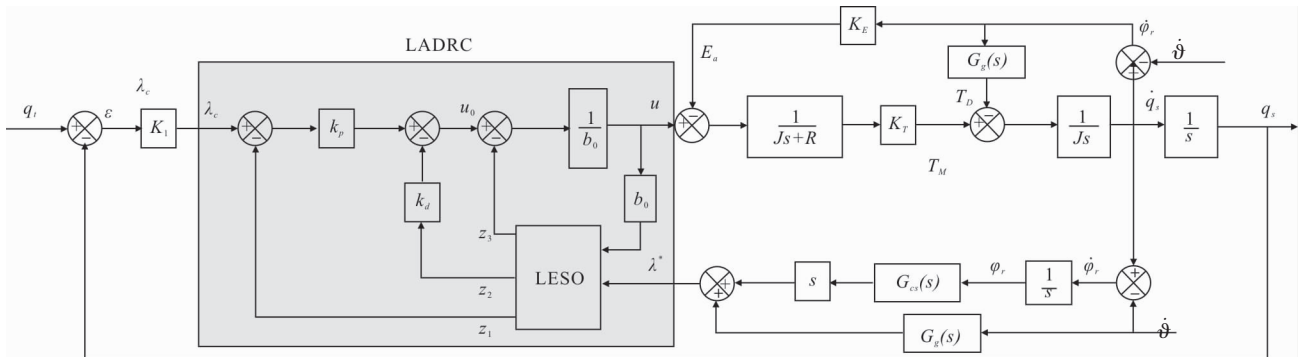


图 2 半捷联导引头混合自抗扰控制工作原理框图

Fig.2 Working schematic of hybrid ADRC for semi-strapdown seeker

相比于典型半捷联导引头控制系统,混合自抗扰控制系统用 LADRC 取代了原稳定回路的控制器,而保留了原跟踪回路的控制增益。

### 3 自抗扰稳定回路特性分析

由图 2 可知,半捷联导引头混合自抗扰控制系统控制参数的配置问题即为控制器带宽  $\omega_c$  和观测器带宽  $\omega_o$  的选取,文中从频率特性出发,研究  $\omega_c$  及  $\omega_o$  对控制性能的影响,并给出控制器参数的确定原则。

由公式(5)~(9)得,自抗扰稳定回路可以等效表示为:

$$u = G_c(s)\lambda_c - H(s)\lambda^* \quad (10)$$

其中

$$G_c(s) = \frac{\omega_c^2 (s + \omega_o)^2}{b_0 [(s + \omega_o)^2 + 2\omega_c s^2 + (\omega_c^2 + 6\omega_o\omega_c)s - \omega_o^3]} \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{(3\omega_c^2\omega_o + 6\omega_c\omega_o^2 + \omega_o^3)s^2 + (3\omega_c^2\omega_o^2 + 2\omega_c\omega_o^3)s + \omega_c^2\omega_o^3}{b_0 [(s + \omega_o)^3 + 2\omega_c s^2 + (\omega_c^2 + 6\omega_o\omega_c)s - \omega_o^3]} \quad (12)$$

则公式(10)可用图 3 所示的系统框图表示。

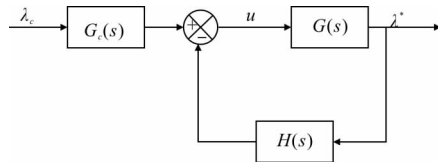


图 3 等效系统框图

Fig.3 Equivalent system block diagram

由图 3 可求得系统闭环传递函数为:

$$\frac{\lambda^*}{\lambda_c} = \frac{G(s)G_c(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (13)$$

根据公式(4),可将控制对象改写为:

$$\lambda^* = \frac{F + b_0 u}{s} \quad (14)$$

将公式(14)和  $G_c(s)$ 、 $H(s)$  代入公式(13),可得:

$$\lambda^* = G_i(s)\lambda_c + G_d(s)F \quad (15)$$

式中:  $G_i(s) = \frac{\omega_c^2}{(s + \omega_o)^2}$  为对视线角速度指令  $\lambda_c$  的跟踪项;

$G_d(s) = \frac{(s + \omega_c)^2 + 3\omega_o(s + 2\omega_c + \omega_o)}{(s + \omega_c)^2 (s + \omega_o)}$  为 LESO 的动态观测误差引起的扰动项。

由公式(15)可知,系统输出  $\lambda^*$  由跟踪项和扰动项组成。跟踪项为临界阻尼二阶环节,其性能只与控制器带宽  $\omega_c$  有关,  $\omega_c$  越大,跟踪越快,且跟踪无静差。而扰动项的性能与  $\omega_c$  和  $\omega_o$  均相关。

#### 3.1 稳定回路抗扰特性

由上述分析可知,外部扰动对 LADRC 抗扰性能的影响决定于  $\omega_c$  和  $\omega_o$ 。令  $k = \omega_o / \omega_c$ , 分别取  $\omega_c = 30$ ,  $k = 1, 3, 5$  与  $\omega_o = 30$ ,  $k = 1, 1/3, 1/5$  时,扰动项的频率特性如图 4 所示。

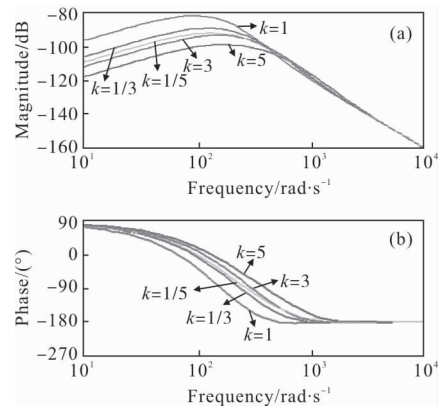


图 4 扰动项频率特性

Fig.4 Frequency characteristic of disturbance term

由图 4 可知,当  $\omega_c$  不变,  $k$  增大时,扰动增益减小;当  $\omega_o$  不变,  $k$  减小时,扰动增益减小。因此增大  $\omega_o$ 、 $\omega_c$ ,可以减小扰动增益,增强系统的抗扰能力。

#### 3.2 稳定回路稳定特性

取  $\omega_c = 30$ 、 $k = 1, 2, 3, 4$  时,系统的开环频率特性如图 5 所示。

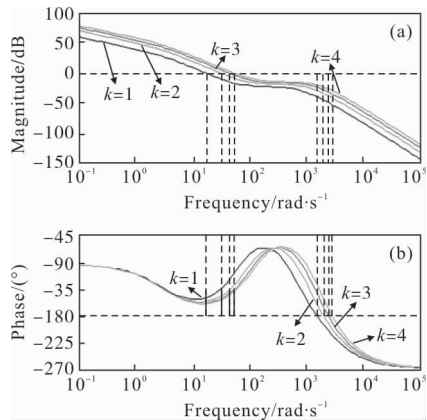


图 5 系统开环频率特性

Fig.5 System open-loop frequency characteristics

由图 5 可知,当  $\omega_c$  不变, $\omega_o$  增大时,系统的相位裕度也增大,系统稳定性增强。

根据式(1),当视线角速度指令  $\lambda_c$  发生突变时,较大的跟踪误差会使得控制量  $u$  剧增, $\omega_c$  过大容易造成控制器饱和。当  $\omega_o$  过大时,引入的观测噪声会降低观测器的估计能力,从而降低系统的鲁棒性。因此,应折衷考虑控制品质与噪声抑制性能,合理选择控制器与观测器带宽。

### 3.3 自抗扰控制器参数确定原则

由上述分析可知, $\omega_c$  和  $\omega_o$  对导引头稳定回路的抗扰性能、稳定性等具有重要影响。文中依据上述分析,并结合工程实际,提出如下半捷联导引头稳定回路自抗扰控制器参数的确定原则。

在确定控制器和观测器带宽时,应同时考虑低频干扰和高频噪声的影响,系统带宽越大,响应速度越快,扰动抑制能力越强,但高频噪声干扰越大。据此,可确定一组  $\omega_c$  和  $\omega_o$  初值,使得稳定回路既能抑制导引头平台的低频干扰,又能对高频噪声有足够的动态衰减。接着利用频率域综合设计方法对控制参数进行设计,同时增大  $\omega_c$  和  $\omega_o$ ,直到控制信号噪声或者系统输出振动难以满足系统要求,再分别对  $\omega_c$  和  $\omega_o$  进行适当调整,确保系统达到控制要求。

## 4 仿真分析

为了验证半捷联导引头混合自抗扰控制系统的控制性能,在表 1 所示的典型导引头参数下,通过数值仿真分析系统的跟踪性能、稳定性能及抗干扰性能,并与传统控制算法进行对比。

表 1 典型导引头参数

Tab.1 Typical seeker parameters

Parameter	Value
$L/H$	0.003 5
$R/\Omega$	8
$J/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.002
$K_T/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$	0.215
$K_E/\text{V}\cdot\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	0.234

基于上述设计原则,经过调试选取自抗扰控制器参数为: $\omega_c=40$ , $\omega_o=135$ 。为比较公平,设计传统控制系统与自抗扰控制系统闭环带宽相同,传统 PI 控

制器参数为: $G_2(s)=\frac{0.01 s+1}{s}$ 。

### 4.1 跟踪性能分析

为了评价系统的跟踪能力,给定期望视线角为  $1^\circ$ ,图 6 给出了系统阶跃响应曲线。由于两种算法的带宽相同,它们的瞬态响应特性相差不大,混合自抗扰控制上升时间 42 ms,调节时间 82 ms,传统控制上升时间 48 ms,调节时间 92 ms,且二者均无超调,跟踪无静差。

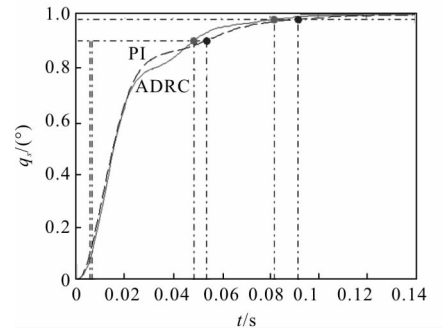


图 6 单位阶跃响应

Fig.6 Unit step response

### 4.2 稳定性能分析

图 7 给出了系统的开环伯德图。表 2 给出了两种控制算法的稳定裕度对比结果。

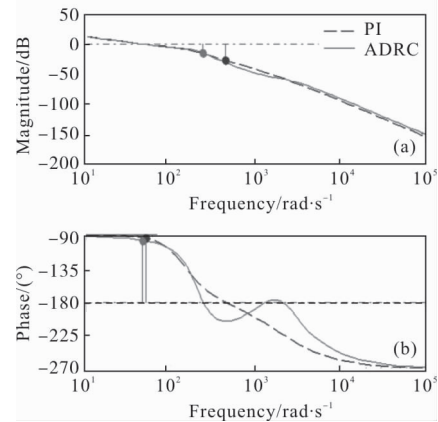


图 7 系统开环伯德图

Fig.7 Bode figure of open-loop system

表 2 稳定裕度对比

Tab.2 Comparison of stability margin

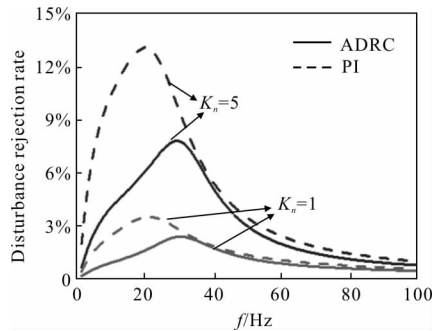
Controller	Magnitude margin/dB	Phase margin/( $^\circ$ )	Shear frequency/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
PI	27	86.2	50.8
ADRC	14.7	82.9	46.6

图 7 和表 2 显示,相比于传统控制,采用混合自抗扰控制时导引头系统的稳定裕度略有降低,但可以满足系统的稳定性要求。

### 4.3 抗干扰性能分析

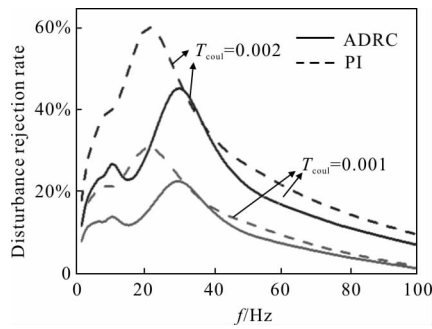
干扰力矩和刻度尺误差会使导引头光轴的指向受到弹体运动的影响。定义隔离度为弹体运动引起的平台相对于惯性空间的转动角速度与弹体相对于惯性空间的转动角速度的比值,表征导引头稳定平台对弹体运动的去耦能力。

给定弹体姿态扰动信号  $\dot{\theta}$  幅值为  $A=1(^{\circ})/s$ 、频率  $f$  从 1~100 Hz 变化的正弦信号,图 8 给出了分别在线性弹簧干扰力矩和非线性库仑摩擦干扰力矩作用下导引头隔离度水平。



(a) 弹簧力矩

(a) Spring torque



(b) 库仑摩擦力矩

(b) Coulomb friction torque

图 8 干扰力矩引起的隔离度

Fig.8 DRR caused by disturbance torque

设角速率陀螺和框架角传感器的刻度尺系数分别为  $K_g$  和  $K_{cs}$ 。弹载惯导系统的精度较高,  $K_g$  波动范围很小,因此可认为  $K_g$  近似等于 1。半捷联导引头刻度尺误差  $\Delta K=K_g-K_{cs}$  主要由框架角传感器刻度尺  $K_{cs}$  与其名义值之间的波动引起。图 9 给出了由  $\Delta K$  引起的导引头隔离度。

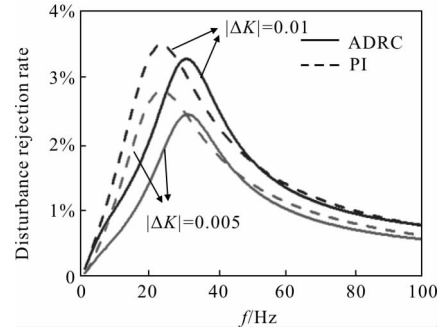


图 9 刻度尺误差引起的隔离度

Fig.9 DRR caused by scale error

由图 8、9 可知,导引头隔离度随着扰动频率的增加先增大后减小,当干扰频率小于一定值时(约为 30 Hz),无论是干扰力矩还是刻度尺误差作用下,采用混合自抗扰控制时导引头隔离度均小于传统控制。而随着干扰频率的增大,由于受到自抗扰控制器带宽的限制,采用两种控制算法隔离度水平相当。

表 3 给出了采用混合自抗扰控制算法时在典型弹体自振频率 2 Hz 处导引头隔离度幅值相对于传统控制算法的变化率。

表 3 隔离度变化率

Tab.3 Rate of DRR change

Disturbance	$K_n$		$K_\omega$		$ \Delta K $	
	1	5	0.001	0.002	0.005	0.01
Rate of change	-67.9%	-67.7%	-34.2%	-33.3%	-9.2%	-3.2%

由表 3 可知,在典型弹体姿态干扰下,混合自抗扰控制对于干扰力矩引起的隔离度控制效果要优于刻度尺误差引起的隔离度,且相比于传统控制算法最好时能降低隔离度幅值约 67.9%。

## 5 工程应用分析

混合自抗扰控制设计过程简单、易实现,相比于传统控制方案,能有效克服干扰力矩和弹体扰动对平台的影响,获得更好的控制精度,可望在半捷联导引头稳定平台伺服控制中获得应用。文中所提出的混合自抗扰控制方案在工程实际应用时,需关注以下关键问题:

(1) 控制器参数整定过程中,增加  $\omega_c$  或  $\omega_o$  均会导致高频带增益变大,系统抗噪能力变差。在导引头

控制系统实际应用中,由于控制性能要求必须增  $\omega_c$  或  $\omega_o$  而导致系统噪声过大时,可在观测器前端增加前置滤波器抑制其影响;

(2) 控制输入增益  $b_0$  是与被控对象有关的参数,允许其值在实际的参数值附近一定范围内波动。工程实践中需要采用合适的方法辨识估计  $b_0$ , 提高控制器的控制性能;

(3) 混合自抗扰控制器对低频干扰有良好的扰动抑制能力,而对于高频干扰的抗扰能力与传统控制器相当。因此在工程应用时,如果能减小量测噪声对扩张状态观测器的影响,可以在满足鲁棒稳定性约束的条件下提高观测器带宽,从而进一步提高控制器的扰动抑制能力。

## 6 结 论

文中设计了半捷联导引头稳定平台混合自抗扰控制系统,并对控制性能进行仿真分析,得到结论如下:

(1) 半捷联导引头混合自抗扰控制系统在稳定回路采用自抗扰控制器,而跟踪回路采用传统控制方案,可同时满足系统稳定精度与快速性的要求。

(2) 通过控制器和观测器带宽对稳定回路特性的影响分析,得出自抗扰控制参数的确定原则: $\omega$  和  $\omega_o$  的取值应使得稳定回路既能抑制导引头平台的低频干扰,又能对高频噪声有足够的动态衰减;增大  $\omega_c$ 、 $\omega_o$ ,可以增强系统抗扰能力,但  $\omega_c$  过大易造成控制器饱和, $\omega_o$  过大会引入观测噪声,设计时应噪声抑制与控制品质之间折衷考虑。

(3) 仿真结果表明,混合自抗扰控制能够获得与传统控制算法相当的跟踪性能和稳定性能,且能有效降低导引头刻度尺误差和干扰力矩引起的隔离度幅值,相比于传统控制算法,在典型弹体干扰下最多

能降低隔离度幅值约 67.9%。

## 参 考 文 献:

- [1] Rudin R T. Strapdown stabilization for imaging seekers [R]. AIAA-93-2660, 1993: 1-10.
- [2] Zhang Yue, Chu Hairong. Line of sight angular rate estimation of semi-strapdown seeker electromechanical platform observer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3794-3800. (in Chinese)
- [3] Liu Wei, Ke Fang, Zhu Bin, et al. Double-loop sliding variable structure controller for semi-strapdown stability platform [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(12): 1669-1673. (in Chinese)
- [4] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
- [5] Han Jingqing. The Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties: Active Disturbance Rejection Control Technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [6] Mondal S, Sadhu S, Talukdar S. Platform motion disturbances attenuation in a Missile Seeker subsystem using disturbance observer techniques [C]//Proceedings of the Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016: 1-6.
- [7] Wang Zhiwei, Xia Qunli, Qi Zaikang. The effect of seeker disturbance torque on RF guided missile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 28-34. (in Chinese)
- [8] Han Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [9] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2006(6): 4989-4996.