

基于模糊滑模的激光导引头伺服控制系统仿真分析

杜亚雯^{1,2},董全林^{1,2},蒲小琴^{1,2},李黎明³,张春熹^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191;
2. 国家“惯性技术”重点实验室,北京 100191; 3. 西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

摘要: 激光导引头为激光制导武器提供目标的位置信息,是导弹实现对目标可靠打击的主要依赖对象。导弹在飞行过程中,弹体扰动会通过多种方式耦合到导引头的伺服稳定系统中,从而影响视轴的稳定,降低对目标跟踪的准确性。文中简单分析了导引头伺服系统的基本结构及其实现视轴稳定的基本原理,针对导引头的扰动问题,提出了一种模糊滑模控制方法,利用滑模变结构控制具有对扰动“完全自适应”的优点,结合模糊控制以降低滑模变结构控制的抖振作用,从而提高导引头伺服稳定系统的鲁棒性和导引头的隔离度。仿真结果表明:与 PID 控制相比,模糊滑模控制能够提高系统的控制品质,达到较好的控制精度和响应速度。

关键词: 激光导引头; 模糊滑模; 隔离度; 伺服系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S213003

Simulation and analysis of laser seeker servo control system based on fuzzy sliding model control

Du Yawen^{1,2}, Dong Quanlin^{1,2}, Pu Xiaoqin^{1,2}, Li Liming³, Zhang Chunxi^{1,2}

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Science and Technology on Inertial Laboratory, Beijing 100191, China;
3. Southwest Institute of Technology and Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The laser seeker, which is the main dependent object of the missile to achieve reliable target attack, provides the position information of the target for the laser-guided weapon. During the missile flight, the missile's disturbance was coupled to the servo stabilization system of the seeker in various ways. This will affect the stability of the visual axis as well as reducing the accuracy of the seeker in locating the target. The basic structure of the seeker servo system and the basic principle of achieving the stability of the visual axis were analyzed in this paper. In order to solve the disturbance problem of the seeker, a Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC) method was proposed. The Sliding Mode Control (SMC) has the advantage of "fully adaptive" to the disturbances. Besides, it was combined with fuzzy control, which can reduce chattering of SMC. In this way, the robustness of the seeker servo system was improved by FSMC, so did the isolation of the seeker. The simulation results show that compared with PID control, fuzzy sliding mode control can improve the control quality of the system and achieve better control accuracy and response speed.

Key words: laser seeker; FSMC; isolation; servo system

收稿日期:2019-04-01; 修订日期:2019-05-14

作者简介:杜亚雯(1994-),女,硕士生,主要从事智能控制与测试、惯性导航与制导方面的研究。Email:duyawen@buaa.edu.cn

导师简介:董全林(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事超显微仪器技术、惯性导航与制导方面的研究。

Email:dongquanlin@buaa.edu.cn

0 引言

随着现代制导技术的发展,激光制导技术以其成本低、命中率高等优点,在末制导武器中扮演着越来越重要的角色。导引头是激光制导武器的“眼睛”,其主要功能是搜索目标反射的激光,并通过控制稳定平台实现其所负载的探测器对目标的准确定位和跟踪^[1]。然而,导弹在飞行过程中,由于发动机及气流等干扰的存在而处于振动状态,这种弹体的扰动会耦合到导引头内部的稳定平台上,从而影响导引头视轴的稳定,降低其对目标定位及跟踪的精度。因此实现视轴的稳定,隔离弹体扰动对提高导引头跟踪目标的精度有着重要的意义。

隔离度是评价导引头隔离弹体扰动性的一个重要指标,它表征了导引头隔离弹体扰动的能力。其定义是:当末制导炮弹弹体姿态以一定的角速度 $\dot{\theta}_b$ 绕某一轴摆动时,引起的导引头在同一轴向输出的相对惯性空间摆动的角速度 $\Delta\dot{\theta}$ 与 $\dot{\theta}_b$ 的比值^[2]。隔离度的值越小则表明了该导引头对外界扰动的隔离性能越好。

导引头工作过程中,弹体扰动主要通过摩擦力矩、框架间力矩耦合、质量不平衡力矩等方式作用到稳定平台上,因此针对提高导引头隔离度的问题,学者们主要从以下两个方面着手:一方面是改善导引头的机械结构或采用更高精度的元器,例如,对稳定平台进行校准以降低质量不平衡力矩的影响、设计更合理的机械结构、选择精度更高、稳定性更好的元器件;另一方面是采用智能算法,改善控制器来提高系统的抗干扰能力。例如,刘新宇采用了自抗扰控制算法,利用扰动观测器对外界扰动进行观测补偿,将伺服系统对扰动的隔离度控制在 3% 以内^[3],张明月

则是采用了基于扩张状态观测器的滑模控制算法,在 $3^\circ/2.5\text{Hz}$ 的弹体扰动下,系统的隔离度为 1.27%^[4];由于在导引头工作过程中,摩擦力矩的扰动作用是最为严重的,因此也有学者通过摩擦补偿的方式来提高伺服稳定系统的稳定性,例如,朱华征采用了库仑摩擦补偿和经典 PID 控制,则是将隔离度控制在 5.5% 以内^[5]。考虑到导引头工作环境扰动的复杂性以及非线性的特点,文中利用滑模控制具有对系统的不确定性以及干扰能够“完全自适应”的优点,针对滑模控制存在的抖振问题,结合模糊控制,提高控制精度^[6]。仿真过程中,建立了合适的摩擦模型以引入摩擦力矩扰动,以求仿真过程更符合实际工况。仿真结果表明,和常规 PID 控制相比,模糊滑模控制(Fuzzy Sliding Mode Control, FSMC)能够有效提高系统的鲁棒性及跟踪精度,有效降低导引头的隔离度。

1 导引头伺服系统构成及模型

1.1 导引头伺服系统的构成及工作原理

该课题研究的导引头的伺服稳定系统主要由两轴双框架稳定平台、直流力矩电机、陀螺仪、电位器等组成,稳定方式为直接陀螺稳定。两个轴的控制系統均为双闭环系统,由于导引头在工作过程中,对俯仰轴和方位轴的控制方式及工作原理是相似的,因此本课题以方位轴为对象研究导引头伺服稳定控制系统。典型的单轴控制系统框图如图 1 所示。导引头工作过程中,陀螺仪通过直接稳定的方式安装在探测器的后方,因此通过陀螺仪可以直接获取探测器视轴在惯性空间内的角速度分量。将陀螺仪信号进行滤波、A/D 转换等处理后,将该信号反馈到速度环的控制器,从而构成稳定的闭环回路。通过该闭环回

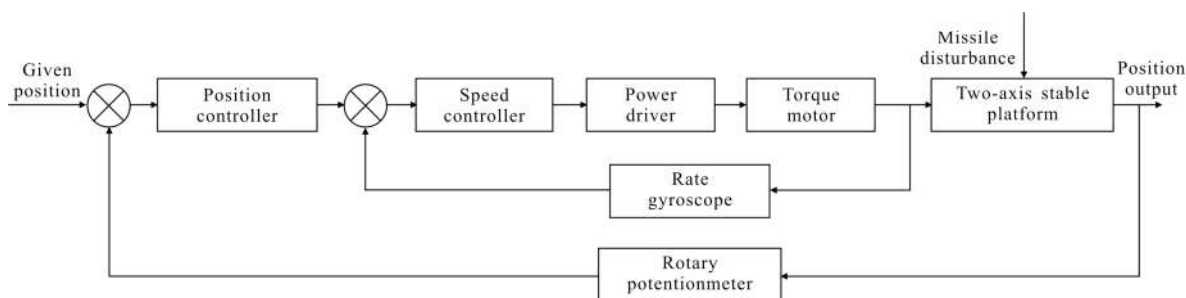


图 1 单轴控制系统原理框图

Fig.1 Block diagram of single-axis control system

路控制力矩电机,进而带动框架转动,实现导引头视轴在俯仰和方位上的稳定;位置环的闭环控制则保证了对伺服电机位置的精准控制^[7]。可以看出,导引头伺服系统对外界扰动的隔离主要是通过转速闭环回路实现的。根据该原理框图可知,对单轴控制系统的分析和设计,主要工作有:作为执行机构力矩电机的数学模型的分析、弹体扰动对伺服系统的扰动分析以及控制器的设计。

1.2 直流力矩电机的数学模型

考虑到直流力矩电机具有输出力矩大且反应速度快的优点,该激光半主动导引头的伺服系统采用直流力矩电机作为执行机构。直流力矩电机本质上是一种采用 PWM 方式驱动的特殊直流伺服电机。忽略电枢电流的波动性,则直流力矩电机可近似为线性元件。

定义 x_1 为电机输出角度, x_2 为电机输出转速。根据直流力矩电机的相关公式,推导出导引头伺服系统的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{K_m K_e}{J R_a} x_2 + \frac{K_m K_p}{J R_a} u + \frac{M_f}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_a 、 L_a 分别为电枢回路的电阻、电感; K_e 、 K_m 分别为电机的反电动势系数及电机转速电磁转矩系数; M_f 为等效干扰力矩; J 为负载等效转动惯量。

定义 $A = -\frac{K_m K_e}{J R_a}$, $B = \frac{K_m K_p}{J R_a}$, $C = \frac{1}{J}$, 则该模型可简化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Ax_2 + Bu + CM_f \end{cases} \quad (2)$$

2 摩擦力矩建模

激光半主动导引头在工作过程中,其伺服电机多处于低速工作环境中。在摩擦力矩的作用下,很容易会引起电机的低速爬行、抖动。此外,弹体的扰动主要是通过摩擦力矩的方式耦合到伺服系统中的,因此对摩擦力矩的建模在仿真过程中就显得尤为重要。为了更好的在仿真过程中描述摩擦力矩的扰动,在此引入 Stribeck 摩擦力矩模型。Stribeck 模型是非线性的,且能够比较准确的描述摩擦力矩的主要表现形式,即最大静摩擦力矩、库仑摩擦力矩以及粘滞

摩擦力矩。

由于在仿真及控制过程中,对零速状态下的 Stribeck 模型输出的摩擦力矩难以描述。因此,对 Stribeck 效应模型进行简化^[8-9]。近似后的 Stribeck 效应模型表达式如公式(3)所示:

$$M(\omega) = \begin{cases} [M_c + (M_s - M_c)e^{-|\omega/\omega_s|^\delta}] \operatorname{sgn}(\omega) + b\omega, & |\omega| \geq \omega_{th} \\ \omega \frac{M_c + (M_s - M_c)e^{-|\omega/\omega_s|^\delta} + b\omega_{th}}{\omega_{th}}, & |\omega| < \omega_{th} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{th} 为线性摩擦向 Stribeck 摩擦转化的极限速度; M_f 为系统的摩擦力矩; M_s 为最大静摩擦力矩; M_0 为系统受到的输出力矩; ω 为系统角速度; $M(\omega)$ 为 Stribeck 效应下的摩擦力矩; M_c 为库仑摩擦力矩; ω_s 为 Stribeck 速度; b 为粘性摩擦系数; δ 为 Stribeck 衰减系数。

3 控制器的设计

定义转速误差为 $e_\omega = \omega_d - \omega$, 其中 ω_d 为给定转速信号, ω 为转速反馈信号。

设计积分型滑模面

$$s_\omega = \omega_d - \int (\dot{\omega} - k_{\omega 1} e_\omega - k_{\omega 2} \dot{e}_\omega) dt \quad (4)$$

考虑到当误差较大时,积分项的存在可能会引起积分饱和效应,降低系统的控制性能。因此,对滑模面的积分项进行改善,改善后的滑模面表达式为:

$$s_\omega = \omega_d - \int (\dot{\omega} - k_{\omega 1} g(e_\omega) - k_{\omega 2} \dot{e}_\omega) dt \quad (5)$$

式中: $g(e_\omega)$ 为光滑的非线性饱和函数,当转速误差较大时,它可以限制 e_ω 。其表达式为:

$$g(e_\omega) = \begin{cases} \beta_\omega \sin \frac{\pi e_\omega}{2\beta_\omega}, & |e_\omega| < \beta_\omega \\ \beta_\omega, & e_\omega \geq \beta_\omega \\ -\beta_\omega, & e_\omega \leq -\beta_\omega \end{cases} \quad (6)$$

根据导引头伺服系统的状态空间表达式,考虑到系统参数变化及外界扰动,则实际的速度环动力学方程为:

$$\dot{\omega} = (A + \Delta A)\omega + (B + \Delta B)u_\omega + (D + \Delta D) = A\omega + Bu_\omega + E(t) \quad (7)$$

式中: $E(t) = \Delta A\omega + \Delta B u_\omega + (D + \Delta D)$, 为不确定因素,扰动的上界为 D_{max} 。

等效滑模控制律的一般形式为 $u_\omega = u_{eq} + u_{sw}$, 其中,等效控制 u_{eq} 保证系统的状态在滑模面上,切换控制 u_{sw} 则保证系统状态不远离滑模面。根据公式(2)

不考虑不确定因素时, 导引头伺服系统速度环的状态方程可描述为 $\dot{\omega} = A\omega + Bu_{\omega}$ 。

根据滑模等效控制的条件 $s_{\omega} = \dot{s}_{\omega} = 0$ 及伺服系统的基本模型, 可得系统的等效控制表达式:

$$u_{eq} = \frac{1}{B} [\dot{\omega}_d - A\omega + k_{o1}g(e_{\omega}) + k_{o2}\dot{e}_{\omega}] \quad (8)$$

取切换控制,

$$U_{sw} = \frac{1}{B} (K\text{sgn}(s_{\omega}) - \hat{E}(t)) \quad (9)$$

式中: K 为切换增益; $\hat{E}(t)$ 为采用自适应方法对系统不确定因素做出的估计, 其自适应律为:

$$\dot{\hat{E}}(t) = -\gamma_{\omega} s_{\omega} \quad (10)$$

稳定性证明:

定义 $E(t)$ 的估计误差, $\tilde{E} = E(t) - \hat{E}(t)$ 且其上界为 $|\tilde{E}(t)| \leq d_{\omega}$ 。

根据滑模面的表达式, 可得:

$$\dot{s}_{\omega} = \dot{\omega}_d - \dot{\omega} + k_{o1}g(e_{\omega}) + k_{o2}\dot{e}_{\omega} \quad (11)$$

取李雅普诺夫函数为:

$$V_{\omega} = \frac{1}{2} s_{\omega}^2 + \frac{1}{2\gamma_{\omega}} \tilde{E}^2 \quad (12)$$

对其求导, 并代入相关表达式, 得:

$$\dot{V}_{\omega} = s_{\omega}\dot{s}_{\omega} - \frac{1}{\gamma_{\omega}} \tilde{E}\dot{\tilde{E}} = s_{\omega}[\dot{\omega}_d - \dot{\omega} + k_{o1}g(e_{\omega}) + k_{o2}\dot{e}_{\omega}] - \frac{1}{\gamma_{\omega}} \tilde{E}\dot{\tilde{E}} =$$

$$s_{\omega}[\dot{\omega}_d - A\omega - Bu_{\omega} - E(t) + k_{o1}g(e_{\omega}) + k_{o2}\dot{e}_{\omega}] - \frac{1}{\gamma_{\omega}} \tilde{E}\dot{\tilde{E}} =$$

$$s_{\omega}(-K\text{sgn}(s_{\omega})) - s_{\omega}\tilde{E} - \frac{1}{\gamma_{\omega}} \tilde{E}\dot{\tilde{E}} =$$

$$s_{\omega}(-K\text{sgn}(s_{\omega})) - \frac{1}{\gamma_{\omega}} \tilde{E}(\dot{\tilde{E}} + \gamma_{\omega}s_{\omega}) \leq 0$$

因此, 控制器是稳定的。

为了改善系统的抖振现象, 一方面可以用饱和函数 $\text{sat}(s_{\omega})$ 来替代符号函数 $\text{sgn}(s_{\omega})$, 饱和函数表达式为:

$$\text{sat}(s_{\omega}) = \begin{cases} 1, & s_{\omega}/\varphi_{\omega} > 1 \\ \frac{s_{\omega}}{\varphi_{\omega}}, & |s_{\omega}/\varphi_{\omega}| \leq 1, \text{ 式中 } \varphi_{\omega} > 0 \\ -1, & s_{\omega}/\varphi_{\omega} < -1 \end{cases}$$

另一方面, 切换增益 K 表述了运动点趋近滑模面的速度, 该参数也是引起系统抖振的主要因素。因此, 可以利用模糊控制, 根据经验通过 $s_{\omega}\dot{s}_{\omega}$ 的变化来

调节 ΔK 。

设计模糊滑模控制器, 其结构示意图如图 2 所示。

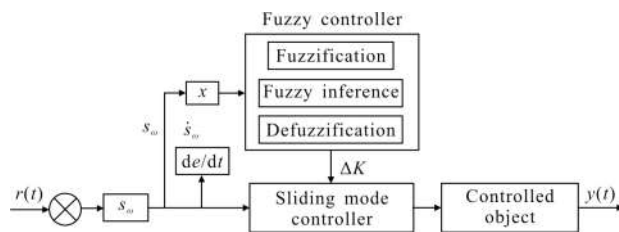


图 2 模糊滑模控制器结构图

Fig.2 Structure of fuzzy-sliding mode controller

根据模糊控制器设计的一般规则以及输入输出变量的基本关系, 建立模糊规则及输入输出的隶属度函数^[10]。对输入输出变量进行模糊化, 定义其语言变量分别如下: PB-正大、PS-正小、Z-零、NS-负小、NB-负大。设计输入变量的模糊子集为 $s_{\omega}\dot{s}_{\omega} = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。同理, 输出变量的模糊子集为 $\Delta K = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。考虑到三角形隶属度函数具有控制性能好、易于实现的优点, 因此在设计输入输出变量的隶属度函数时, 以三角形隶属度函数为主。输入变量隶属度函数如图 3 所示, 输出变量隶属度函数如图 4 所示。根据滑模控制特点可知模糊控制器

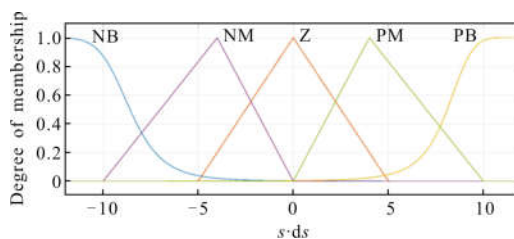


图 3 模糊控制器输入量的隶属度函数

Fig.3 Membership function of input quantity of fuzzy controller

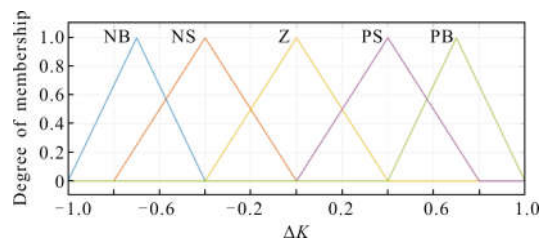


图 4 模糊控制器输出量的隶属度函数

Fig.4 Membership function of output quantity of fuzzy controller

输入输入变量之间的关系, 从而得到模糊规则设定的基本原则有以下两点:

(1) $s_\omega \dot{s}_\omega$ 值较大时, 状态点距离滑模面较远, 此时 ΔK 应取较大值, 以加快状态点向切换面的运动速度;

(2) 当 $s_\omega \dot{s}_\omega$ 取值较小时, 此时状态点已经靠近滑模面, ΔK 应取较小值, 保证状态点平稳接近滑模面, 从而抑制抖振。

根据以上原则, 设计模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则
Tab.1 Fuzzy rule

$s_\omega \dot{s}_\omega$	NB	NS	Z	PS	PB
ΔK	NB	NS	Z	PS	PB

在完成模糊化、模糊推理之后, 通过重心法进行对模糊推理的结果进行反模糊化处理, 得到输出量的精确值 ΔK , 从而调整变量 K 的取值。

4 系统仿真

文中所研究的导引头伺服系统部分参数如下: 直流力矩电机额定工作电压 $U_a=26\text{ V}$, 电枢回路电感 $L_a=2\text{ mH}$ 、电枢回路电阻 $R_a=20\ \Omega$ 、转动惯量 $J=1.66 \times 10^{-4}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、电机转动系数 $C_m=0.025$ 、电动势系数 $C_e=0.0385$ 、速率陀螺传递函数 $G_V(s)=$

$$\frac{1}{1/350^2 s^2 + 1.4/350 s + 1} \circ$$

利用 MATLAB/Simulink 搭建系统模型如图 5

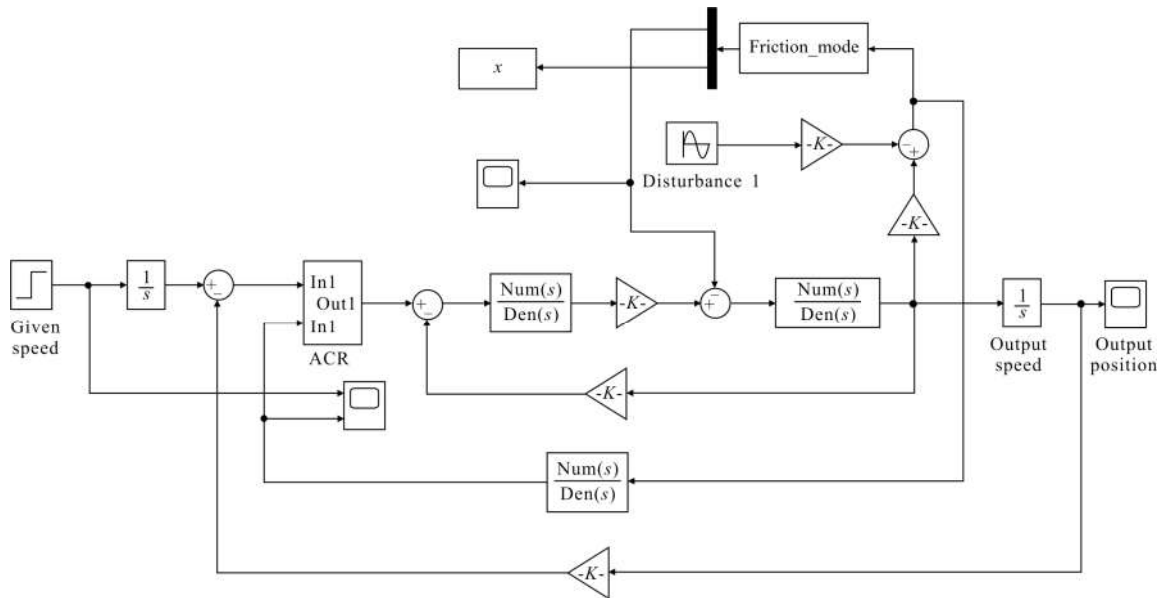


图 5 Simulink 系统仿真模型

Fig.5 System simulation model of Simulink

所示。

控制器部分参数和系统性能指标的关系如下:

(1) 等效控制函数中变量 k_{ol} 、 k_{o2} , 主要影响系统的响应时间。较大的 k_{ol} 、 k_{o2} 会加快系统响应, 但当两者取值过大时, 会引起系统的不稳定;

(2) 非线性饱和和函数 $g(e_\omega)$ 中变量 β_ω , 决定控制器输入的误差上限。误差上限过小, 会增加系统的稳定时间, 但可有效避免出现积分饱和现象; 误差上限过大, 有可能引起控制器的积分饱和现象, 从而导致

系统失控;

(3) 切换控制函数变量 K , 决定了系统抖振的大小, 通过模糊控制调节 K , 达到抑制系统抖振, 提高系统性能的目的;

(4) 饱和函数变量 φ_ω , 决定了饱和函数的上下界; 适当的 φ_ω 取值可以抑制系统抖振, 提高滑模控制性能。

根据以上关系, 进行相关参数的调整、设计, 最终完成系统仿真^[11]。部分参数设计如表 2、3 所示。

表 2 Stribeck 模型相关参数

Tab.2 Parameters of stribeck model

$M_1/N \cdot m$	$M_2/N \cdot m$	$\omega_b/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$\omega_s/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	δ_s
0.01	0.015	0.000 1	100	2

表 3 模糊滑模控制器相关参数

Tab.3 Parameters of SMC controller

K_{col}	$K_{\omega 2}$	K	β_{ω}	s_{ω}	φ_{ω}
723	13.118	10.257	0.3	0.45	0.5

给定转速为 $6(^{\circ})/\text{s}$, 模拟弹体扰动为 $3(^{\circ})/2\text{Hz}$ 和 $5(^{\circ})/1\text{Hz}$, 在模糊滑模控制以及 PID 控制两种不同的控制方式下分别进行仿真, 结果分别如图 6~9 所示。

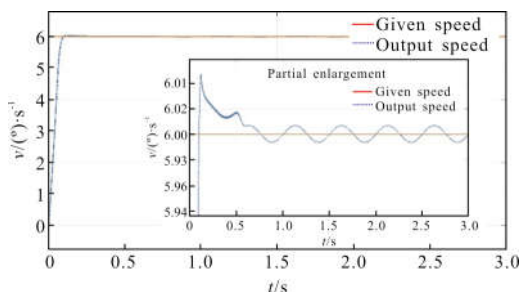


图 6 $3(^{\circ})/2\text{Hz}$ 扰动下系统仿真结果(FSMC 控制器)

Fig.6 System simulation results under disturbance of $3(^{\circ})/2\text{Hz}$ (FSMC controller)

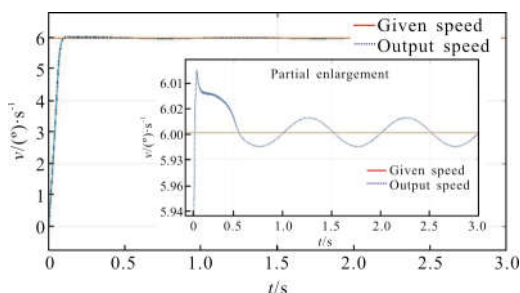


图 7 $5(^{\circ})/1\text{Hz}$ 扰动下系统仿真结果(FSMC 控制器)

Fig.7 System simulation results under disturbance of $5(^{\circ})/1\text{Hz}$ (FSMC controller)

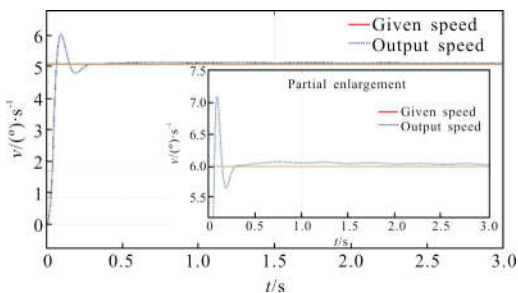


图 8 $3(^{\circ})/2\text{Hz}$ 扰动下系统仿真结果(PID 控制器)

Fig.8 System simulation results under disturbance of $3(^{\circ})/2\text{Hz}$ (PID controller)

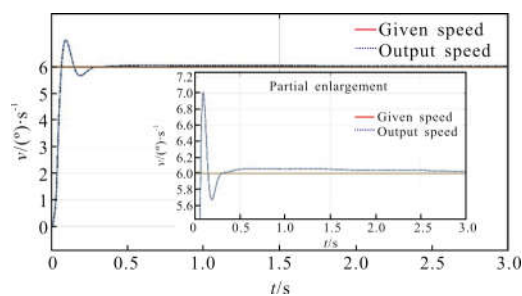


图 9 $5(^{\circ})/1\text{Hz}$ 扰动下系统仿真结果(PID 控制器)

Fig.9 System simulation results under disturbance of $5(^{\circ})/1\text{Hz}$ (PID controller)

根据隔离度的定义可知隔离度可表示为:

$$I = \frac{\Delta \dot{p}}{\dot{\theta}_b} \times 100\% \quad (13)$$

式中: \dot{p} 为平台输出的相对惯性空间摆动的角速度幅值; $\dot{\theta}_b$ 为弹体摆动的角速度幅值。

根据仿真结果数据, 对模糊滑模控制及 PID 控制下的系统的性能指标——调整时间 t_s 、超调 $\sigma\%$ 以及系统隔离度 I 进行计算, 结果如表 4 所示。

表 4 PID 和 FSMC 控制系统性能对比

Tab.4 Performance comparison of PID and FSMC controller system

	$3(^{\circ})/2\text{Hz}$	$5(^{\circ})/1\text{Hz}$
PID	$t_s=0.310\text{ s}$ $\sigma\%=18.317\%$ $I=2.27\%$	$t_s=0.246\text{ s}$ $\sigma\%=16.883\%$ $I=1.16\%$
FSMC	$t_s=0.0834\text{ s}$ $\sigma\%=0.82\%$ $I=0.243\%$	$t_s=0.086\text{ s}$ $\sigma\%=0.807\%$ $I=0.24\%$

根据该表格及仿真结果可以看出, 基于 PID 控制器的系统, 其稳定时间较长, 对扰动的隔离性能一般, 稳态误差相对较大。而基于模糊滑模控制器的系统, 其响应速度较快, 系统超调也控制在 1% 以内, 表现出较好的控制性能。此外, 系统的隔离度控制在 0.3% 以内, 达到了较好的振动隔离效果。

5 结论

文中通过建立导引头伺服系统的基本模型, 以摩擦力矩作为弹体扰动影响伺服稳定系统性能主要方式进行系统仿真。采用了模糊滑模控制器, 较好地

利用模糊控制对扰动“完全自适应”的优点,结合模糊控制以抑制滑模控制的抖振现象,仿真结果表明,与传统 PID 控制相比,模糊滑模控制器提高了导引头伺服稳定系统的调节时间,降低了系统的超调,使得系统的隔离度及跟踪精度都得到改善,系统的鲁棒性也显著增强。

参考文献:

- [1] Tang Yongtao, Lin Hongsheng, Chen Chun, et al. The development and summary of modern missile seeker [J]. *Guidance & Fuze*, 2014, 35(1): 12–17. (in Chinese)
- [2] Xu Ping, Wang Wei, Lin Defu. Effect of seeker isolation on guidance and control of terminal guided projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(1): 17–21. (in Chinese)
- [3] Liu Xinyu, Song Jinlai, Jin Yue, et al. Application of active disturbance rejection control in frame seeker [J]. *Aerospace Control*, 2017(3): 9–13. (in Chinese)
- [4] Zhang Mingyue, Liu Hui, Chu Hairong, et al. Double integral sliding mode control based on ESO for stabilized platform of seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0817009. (in Chinese)
- [5] Zhu Huazheng. Research on several essential problems of imaging seeker servo mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] Mi Yang, Han Yunhao. Fuzzy Variable Structure Control of Complex System and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [7] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Zhen, et al. Analysis and simulation of stabilization and tracking principle for rate gyroscope laser seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1337–1341. (in Chinese)
- [8] Zhao Yuanzheng, Chen Yanwei, Cheng Shouhu. Friction compensation in naval gun servo systems based on stribeck model [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(5): 59–62. (in Chinese)
- [9] Tian Fuqing, Li Keyu. Shipborne Weapon Tracking and Aiming Control [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [10] Zeng Guangqi. Fuzzy Control Theory and Engineering Application [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [11] Liu Jinkun. Simulation of Sliding Mode Variable Structure Control by MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)