

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.04.038

基于扰动观测器的弹药提升装置模糊滑模控制

王震维

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对某新型弹药提升装置位置控制过程中负载变化和外界扰动等带来的不确定性问题,提出一种基于扰动观测器的模糊滑模控制策略。引入扰动观测器对复合干扰进行在线估计和前馈补偿;由于系统参数的不确定性,很难对系统进行精确建模,利用模糊逻辑逼近数学模型,从而建立等效控制律,大大减轻了控制器的设计难度。仿真结果表明,所设计的控制策略在外界干扰存在的情况下,能够对弹药提升装置位置进行精确控制,具有良好的鲁棒性。

关键词:弹药提升装置;扰动观测器;模糊滑模控制

中图分类号:TJ302 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0197-04

Fuzzy Sliding Mode Control of Ammunition Lifting Device Based on Disturbance Observer

WANG Zhenwei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A fuzzy sliding mode control strategy based on a disturbance observer is proposed to address the uncertainty caused by load changes and external disturbances in the position control process of a new ammunition lifting device. A disturbance observer is introduced for online estimation and feedforward compensation of the composite disturbance. As the uncertainty of the system parameters makes it difficult to model the system accurately, fuzzy logic is used to approximate the mathematical model so as to establish an equivalent control law, which greatly reduces the difficulty of controller design. Simulation results show that the designed control strategy is able to control the position of the ammunition lifting device accurately in the presence of external disturbances, and has good robustness.

Keywords: ammunition lifting device; disturbance observer; fuzzy sliding mode control

0 引言

新的战争条件下,火炮武器的发展方向趋于信息化和自动化。在弹药自动装填系统中,弹药提升装置负责将弹药仓中的弹药取出并输送到炮尾后端,从而将弹药轴线调整到与炮膛轴线一致的位置。提高弹药提升协调动作的速度进而提高弹药装填速度是提升火炮发射速度的有效手段之一^[1]。

弹药提升装置由于其特殊的工作环境,具有参数时变、运动过程有剧烈的冲击振动、不同工况下惯性参数大范围变化等特点。由于协调动作的完成精度对后续的弹药输送入膛有着很大的影响,提升动作的响应速度对发射速度也有着很大的影响,因此要求其有较高的跟踪协调精度和良好的鲁棒性^[2]。

滑模控制对外部扰动和系统参数变化具有良好的鲁棒性,因此被广泛用于机电控制系统中。

本文受文献[3]的启发,针对弹药提升装置参数时变、运动过程存在强烈的冲击振动、不同工况下惯性参数大范围变化等特点,提出了一种基于扰动观测器的模糊滑模控制策略,通过模糊逻辑逼近理想控制律,不需要精确的数学模型参数,极大地降低了控制器设计的难度。通过引入扰动观测器,将扰动的估计值进行前馈补偿,从而削弱外部扰动和系统参数变化对控制性能的影响。所设计的控制器有良好的跟踪定位精度,且具有良好的鲁棒性。

1 弹药提升装置数学模型

某新型弹药提升装置原理样机主要由简化炮尾、托弹盘、提升协调装置、轨道、刚性链和导引链盒等组成,简化后的模型如图1所示。该新型弹药提升装置采用刚性链机构作为执行部件进行举升动作,通过类比于曲柄滑块机构的运动特性将举升动作转化为弹药的提升和协调动作,由此可

作者简介:王震维(1998—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,研究方向为自动装弹机,295059414@qq.com。

见弹药提升装置有着复杂的动力学特性,因而可作为一个典型的多体动力学系统进行分析。

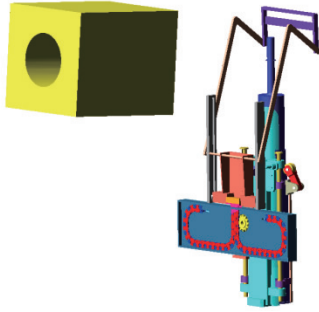


图1 弹药提升装置的简化虚拟样机模型

为了更简单地进行数学建模,针对系统进行合理简化,将系统的各基本物理量,如转动惯量、黏性阻尼、扰动力矩等,通过计算转换到系统中同一个部件上,选用刚性链机构的链轮为等效构件,将各种基本物理量等效到链轮的假想转轴上,建立轨道链式弹药提升装置的等效动力学方程:

$$T_e = J_e \ddot{\theta} + B_e \dot{\theta} + T_D + S \quad (1)$$

式中: T_e 为作用到链轮上的驱动力矩; $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 分别为链轮的角速度和角加速度; J_e 为系统的等效转动惯量; B_e 为系统的等效黏性阻尼系数; T_D 为负载力矩; S 为系统的集总扰动。

弹药提升过程中, J_e 和 B_e 都是不确定值,将其变化量计入集总扰动中,则系统的集总扰动可写为

$$S = \Delta J_e \ddot{\theta} + \Delta B_e \dot{\theta} + T_L \quad (2)$$

式中: 变化值记作 ΔJ_e 和 ΔB_e 分别为系统参数变化时, J_e 和 B_e 的变化量; T_L 为未知扰动, 设未知扰动是有界的。记集总扰动和重力矩的复合项 $W = T_D + S$, 则弹药提升装置动力学方程为

$$T_e = J_e \ddot{\theta} + B_e \dot{\theta} + W \quad (3)$$

2 控制器设计

2.1 滑模控制器设计

位置跟踪误差定义如下:

$$\begin{cases} e(t) = \theta(t) - \theta_d(t) \\ \dot{e}(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\theta}_d(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\theta_d(t)$ 、 $\dot{\theta}_d(t)$ 分别为给定链轮转动角度位置和速度指令, 取如下的积分型滑模函数:

$$s(t) = \left(\frac{de}{dt} + \lambda \right)^2 \int e dt = \dot{e}(t) + 2\lambda e(t) + \lambda^2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中 λ 为滑模面参数。系统输入 $u = T_e$ 为输入到链轮的转矩。

由式(1)、式(4)、式(5)联立并对时间求导, 可得

$$J_e \dot{s} = J_e (\ddot{e} + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e) = u - B_e \dot{\theta} - W - J_e (\ddot{\theta}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) \quad (6)$$

忽略系统参数变化和外部扰动的影响, 即 $W=0$, 令式(6)右侧为0, 可得等效控制律 u_e 为

$$u_e = J_e (\ddot{\theta}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) + B_e \dot{\theta} \quad (7)$$

取基于指数趋近律的切换函数为

$$u_{sw} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (8)$$

式中: k 为指数项增益, 且 $k > 0$, ε 为等速项增益, 且 $\varepsilon > 0$; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

当 J_e 和 B_e 不能够精确给出时, 无法建立等效控制律。由此引入模糊万能逼近理论, 利用模糊系统可以对任意的连续函数进行逼近的特性^[4], 故存在:

$$u_e = u_f + \Delta u \quad (9)$$

式中: Δu 为逼近误差, 通常, 逼近误差有界, 故存在常数 $\Delta u_0 > 0$ 使得 $|\Delta u| < \Delta u_0$; u_f 为模糊系统的输出; $\alpha_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 为待定的模糊系统参数。取滑模函数 s 为模糊输入变量, $s_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 为待定的模糊系统参数。

定义输入、输出变量模糊语言值:

$$\alpha_i = \{ \text{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB} \}$$

$$s_i = \{ \text{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB} \}$$

模糊推理规则如表1所示。

表1 模糊推理规则

α_i	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
s_i	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

模糊系统输出 u_f 可以表示为

$$u_f = \sum_{i=1}^7 w_i \alpha_i / \sum_{i=1}^7 w_i \quad (10)$$

式中 $0 \leq w_i \leq 1 (i=1, 2, \dots, 7)$ 为第 i 条模糊规则中模糊输入 $s(t)$ 的隶属度。

2.2 扰动观测器设计

设计扰动观测器如下^[5]:

$$\begin{cases} \dot{z} = -L \cdot \widehat{W} + L(u - B_e \dot{\theta}) \\ \widehat{W} = z - L \cdot J_e \cdot \dot{\theta} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L 为观测器增益, $L > 0$; z 为扰动观测器的内部状态量; \widehat{W} 为扰动观测器输出, 即 $u_{DOB} = \widehat{W}$ 。估计

误差定义为

$$\tilde{W} = \hat{W} - W \quad (12)$$

对式(12)进行时间求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{W}} &= \dot{z} - L \cdot J_e \cdot \ddot{\theta} - \dot{\tilde{W}} = -L\tilde{W} + \\ L[u - B_e \cdot \dot{\theta} - J_e \cdot \ddot{\theta}] - \dot{W} &= -L\tilde{W} - \dot{W} \end{aligned} \quad (13)$$

通过 Laplace 变换,可得

$$\tilde{W} = -\frac{1}{p+L} \dot{W} \quad (14)$$

式中 p 为拉普拉斯算子。

由式(14)可知,扰动观测器的估计误差 \tilde{W} 和复合扰动的导数 \dot{W} 的值有关。在实际工作中,复合扰动 W 会不断地变化,通过扰动观测器的估计,将估计值作为前馈补偿,从而可以削弱扰动变化的影响来改善系统的控制性能,并且无需集总扰动的精确估计使得对被控对象的要求降低。

本文设计的控制器由等效控制律 u_e 、增益切换控制律 u_{sw} 、扰动观测器 u_{DOB} 3 部分组成,即

$$u = u_e + u_{sw} + u_{DOB} \quad (15)$$

2.3 稳定性证明

考虑如下的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} J_e s^2 \quad (16)$$

对式(16)求导并把控制律式(5)和式(7)代入,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s J_e \dot{s} = s(\Delta u + \hat{W} - W - \varepsilon \text{sgn}(s) - ks) \leq -|s| \times \\ [\varepsilon - (\Delta u + |\tilde{W}|)] - ks^2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $k > 0$, 所以当 $\varepsilon \geq \Delta u + |\tilde{W}|$ 时, $\dot{V} \leq 0$, 此时系统是稳定的。

3 仿真分析

对弹药提升装置链轮的期望轨迹为点到点 (point-to-point, PTP) 的位置控制, 期望轨迹如图 2 所示。

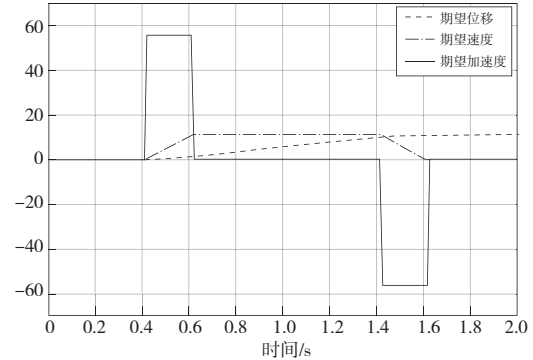


图 2 期望的运动轨迹

控制器的参数设置如表 2 所示。

表 2 模糊滑模控制器的仿真参数

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	λ	60	10	α_2	-30
2	s_1	150	11	α_3	-15
3	s_2	100	12	α_4	0
4	s_3	50	13	α_5	15
5	s_4	0	14	α_6	30
6	s_5	-50	15	α_7	45
7	s_6	-100	16	ε	4
8	s_7	-150	17	k	30
9	α_1	-45	18	L	10

根据上文设计的滑模控制律, 在 MATLAB/Simulink 中搭建轨道链式弹药提升装置的滑模控制仿真平台, 如图 3 所示。

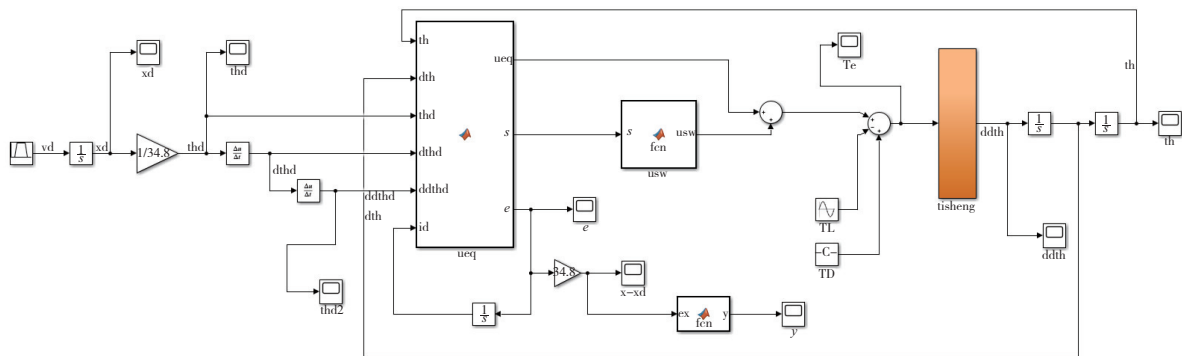


图 3 弹药提升装置控制器仿真模型

仿真实验结果如图 4—图 8 所示。

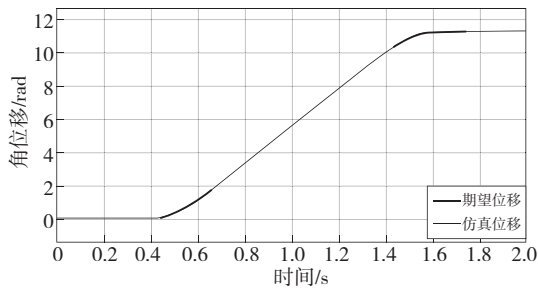


图 4 链轮角位移

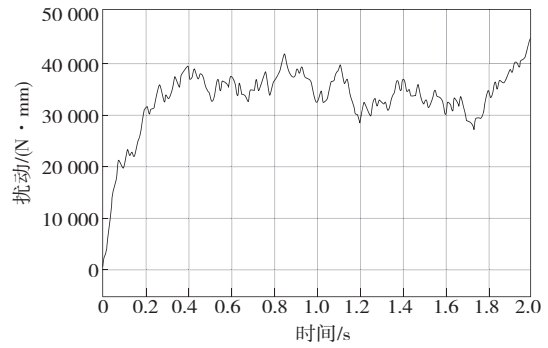


图 8 集总扰动

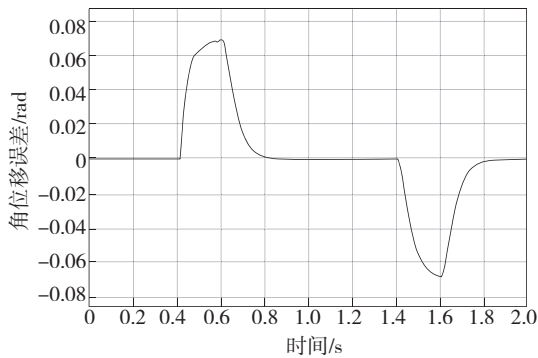


图 5 链轮角位移跟踪误差

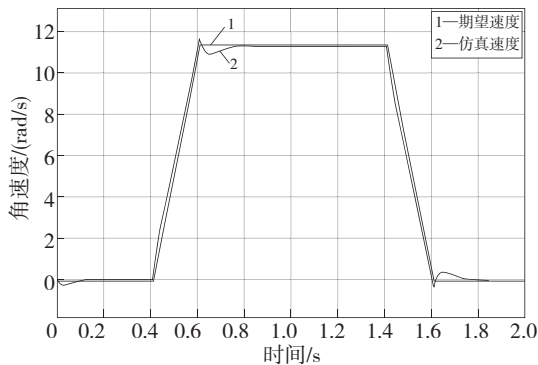


图 6 链轮角速度

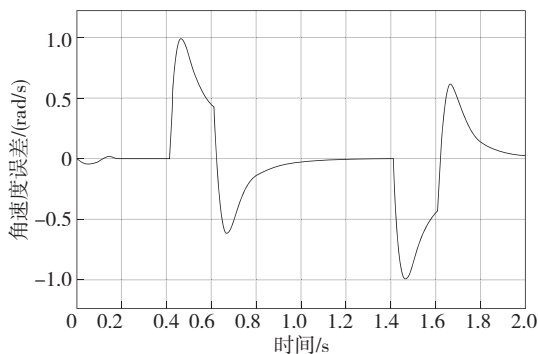


图 7 链轮角速度跟踪误差

由实验结果可以看出,链轮角位移的最大跟踪误差为 0.064 rad,根据链轮转角和弹药的运动关系可得弹药轴线与炮膛轴线的误差为 0.709° ,满足精度要求。带有扰动观测器的模糊滑模控制的跟踪效果较好,对参数和外部扰动的变化反应不明显,具有良好的鲁棒性。

4 结语

本文针对某新型弹药提升装置的提升协调动作位置控制问题,提出了一种基于扰动观测器的模糊滑模控制策略。通过 Adams-MATLAB 联合仿真平台进行实验验证,结果表明该控制策略对轨道链式弹药提升装置的参数变化和外部扰动不敏感,具有较高的跟踪定位精度和良好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 侯保林,樵军谋,刘琮敏. 火炮自动装填[M]. 北京:兵器工业出版社,2010.
- [2] 邹权. 某大口径火炮弹药自动装填控制系统关键问题研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [3] SUN J W, ZHAO K. Adaptive neural network sliding mode control for active suspension systems with electrohydraulic actuator dynamics [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17 (4): 172988142094198.
- [4] 李超,谢振宇,吴传响,等. 基于模糊控制的磁轴承 PID 控制算法研究[J]. 机械制造与自动化,2022, 51(2):38-41.
- [5] LI A, LIU M, SHI Y. Adaptive sliding mode attitude tracking control for flexible spacecraft systems based on the Takagi-Sugeno fuzzy modelling method [J]. Acta Astronautica,2020,175:570-581.

收稿日期:2023-02-15