

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.021

舰炮随动系统的模糊滑模控制

魏军辉, 冯昌林, 张俊
(海军研究院, 北京 100161)

摘要: 为提升末端反导舰炮的射击精度, 提出一种舰炮随动系统的模糊滑模控制方法。采用 LuGre 模型对末端反导舰炮随动系统中的非线性摩擦进行建模, 应用滑模控制算法对摩擦力矩进行补偿, 通过模糊规则对滑模控制增益进行调节以降低抖振。仿真结果表明: 该模糊滑模控制器减小了控制输入的抖振, 提高了随动系统跟踪稳定性和跟踪精度。

关键词: 滑模控制; 模糊控制; 随动系统; LuGre 模型

中图分类号: TP29; TJ391 **文献标志码:** A

Fuzzy Sliding Mode Control for Naval-gun Servo System

Wei Junhui, Feng Changlin, Zhang Jun
(Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: In order to improve the firing accuracy of the terminal anti-missile naval gun, a fuzzy sliding mode control method for servo system is proposed. Using LuGre model, the nonlinear friction in naval gun servo system model is established. The sliding mode control algorithm is used to compensate the friction torque, and the fuzzy rules are used to adjust the sliding mode control gain to reduce chattering. The simulation results show that the fuzzy sliding mode controller reduces the chattering of the control input and improves the tracking stability and accuracy of the naval gun servo system.

Keywords: sliding mode control; fuzzy control; servo system; LuGre model

0 引言

随着反舰导弹技术的不断发展, 末端反导舰炮随动系统除需要克服由系统内的静、动摩擦力矩带来的影响外, 还需要克服由舰艇倾斜、摇摆和射击带来的冲击力矩以及由于射弹消耗带来的不平衡力矩的影响。这些非线性摩擦环节的存在, 使舰炮随动系统的动态性能受到很大的影响, 甚至会造成系统低速运行不平稳^[1], 从而降低射击精度; 因此, 建立末端反导舰炮随动系统摩擦模型, 并设计补偿摩擦力矩的控制方法, 对提高随动系统的低速平稳性和跟踪精度, 进而提升末端反导舰炮的射击精度十分必要。

摩擦模型的补偿控制算法因结构相对简单, 且具有较强的实时性, 已成为目前摩擦研究的重点发展方向。其中, LuGre 动态摩擦模型涵盖库伦摩擦、粘性摩擦、预滑动、可变静摩擦力、Stribeck 摩擦和摩擦滞后等现象, 与真实的摩擦现象更为接近^[2], 应用最广泛。用于伺服系统摩擦补偿的控制算法包括: 自适应控制、鲁棒控制、滑模控制、神经网络控制、模糊控制等。由于滑模控制特有的不连续开关特性会引起系统抖振, 促使众多学者针对消除或

降低滑模控制的抖振问题进行大量研究。其中, 采用模糊逻辑实现滑模参数的自调整是一个重要的研究方向^[3-10]。

笔者采用 LuGre 模型对末端反导舰炮随动系统中的非线性摩擦进行建模, 应用滑模控制算法对摩擦力矩进行补偿, 通过模糊规则对滑模控制增益进行调节以降低抖振, 并进行仿真验证。

1 小口径舰炮随动系统数学模型

以某型小口径舰炮随动系统为研究对象, 该系统主要由位置控制器、功率放大器及电源、执行电机和位置传感器组成。将执行电机及其变频器等环节一并考虑, 得到其随动系统简化框图如图 1 所示。

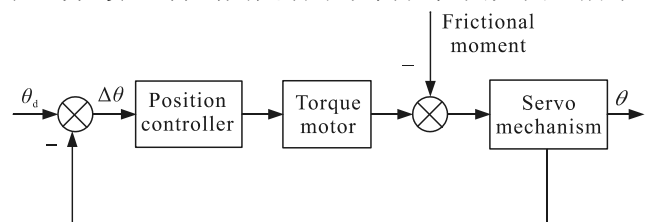


图 1 某小口径舰炮随动系统简化框图

1.1 执行电机的数学模型

某型小口径舰炮执行电机为永磁同步电机, 为

收稿日期: 2019-08-04; 修回日期: 2019-09-09

作者简介: 魏军辉(1974—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事舰炮武器装备论证研究。E-mail: 79005107@qq.com。

便于分析计算，做如下假设：

- 1) 不考虑磁路饱和及铁损的影响，且三相绕组的自感和互感均为线性；
- 2) 各绕组对称磁势符合沿气隙圆周的正弦分布；
- 3) 忽略温度和频率变化对电阻的影响；
- 4) 采用转子磁极位置定向的矢量控制时的定子电流励磁分量 $i_d = 0$ 。

从而得到基于执行电机转子坐标系的数学模型：

$$\left. \begin{aligned} u_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_r \psi_f \\ u_d &= -\omega_r Li_q \\ T_e &= 1.5 p_n \psi_f i_q = K_t i_q \\ T_e &= T_L + T_f(\omega_r) + \frac{J}{p_n} \frac{d\omega_r}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： u_d, u_q 为电枢电压分量； i_d, i_q 为电枢电流分量； L 为等效电枢电感 ($L=L_d=L_q$)； R 为电枢绕组电阻； ω_r 为转子角速度； p_n, ψ_f 为转子磁链和电极对数； K_t 为电磁转矩系数； $T_e, T_L, T_f(\omega_r)$ 分别为电磁转矩、负载转矩和摩擦转矩； J 为转动惯量。

令 $x_1 = \theta, x_2 = \omega_r = \dot{\theta}$ ，得到随动系统位置控制环的状态方程：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= AT_f(\omega_r) + Bu + CT_L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $A = -\frac{1}{J}, B = \frac{p_n^2 \psi_f}{J}, C = -\frac{p_n}{J}$ 。

1.2 随动系统 LuGre 摩擦模型

LuGre 动态摩擦模型用 2 个接触面间弹性刚毛的平均偏移来表征摩擦力的动态行为^[11]，可以较精确地描述摩擦的各种动态和静态特性。刚毛的平均形变 Z 满足：

$$\frac{dz}{dt} = \omega - \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} z \quad (3)$$

其中： $\dot{\theta}$ 为刚毛的相对角速度； σ_0 为刚毛刚度系数； $g(\dot{\theta})$ 具有非对称性，恒大于 0，且随 $\dot{\theta}$ 的增大而增大，用于表征 Stribeck 效应^[12]，可定义为

$$g(\dot{\theta}) = \frac{1}{\sigma_0} [M_c + (M_s - M_c) e^{-(\dot{\theta}/\theta_s)^2}] \quad (4)$$

式中： M_c 为库伦摩擦力矩； M_s 为最大静摩擦力矩； θ_s 为 Stribeck 角速度。

从而总摩擦力矩 M_f 可表示为

$$M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (5)$$

式中： σ_1 为微观阻尼系数； σ_2 为粘滞摩擦系数。

式(3)–(5)描述的模型即为某舰炮随动系统的 LuGre 动态摩擦模型。

2 模糊滑模控制器

滑动模态对内部参数扰动和外界干涉具有不变性，且在非线性系统控制方面获得较广泛应用；因此，笔者采用滑膜控制方法，来解决某型小口径舰炮随动系统摩擦补偿问题。

分 2 步设计该舰炮随动系统的模糊滑膜控制器：1) 设计滑膜控制率，在确保滑动模态运动稳定且具有良好的动态特性的同时，可快速收敛至滑动模态面；2) 为滑膜控制的调节增益设计控制算法或控制规则。笔者采用模糊规则。

如图 2 所示，该舰炮随动系统的模糊滑膜控制器包括 1 个常规滑模控制器和 1 个模糊控制器。其中， $\dot{V} = s\dot{s}$ 为模糊控制器的输入，控制增益增量 $\Delta\lambda$ 为模糊控制器的输出，同时也是滑膜控制器的输入，则有

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + \Delta\lambda \quad (6)$$

笔者所设计的模糊滑膜控制器采用模糊规则，对控制增益增量 $\Delta\lambda$ 进行在线修正，使控制增益 λ 得以自动调节，使滑膜控制器在初始阶段尽快收敛至滑膜面，而在接近滑膜面时削弱抖振，从而使得随动系统具有良好的动态和静态性能。

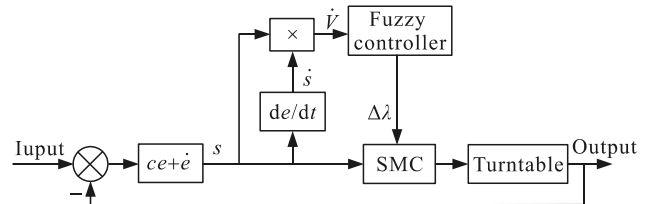


图 2 某舰炮随动系统模糊滑模控制器

2.1 滑模控制律设计

某舰炮随动系统动态结构如图 3 所示。

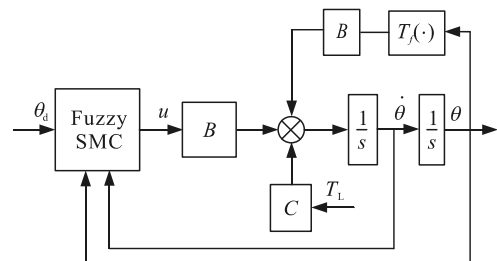


图 3 某舰炮随动系统动态结构

滑膜控制器的设计分为 2 步：1) 设计合适的滑膜面；2) 求取合适的滑膜控制律。

1) 滑膜面设计。

定义滑膜面为：

$$s = \dot{e} + ce, \quad c > 0. \quad (7)$$

式中 e 为系统位置误差，满足：

$$e = \theta_d - \theta. \quad (8)$$

其中 θ_d 为所期望的位置角度。

2) 控制率设计。

联合利用指数趋近率和等速趋近率的方法设计控制率，则趋近率为：

$$\dot{s} = -\lambda \text{sat}(s), \quad \lambda > 0 \quad \text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \delta \\ s/\delta, & |s| \leq \delta \\ -1, & s < -\delta \end{cases}. \quad (9)$$

其中： $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数， δ 为理想边界层厚度。

从而得到该随动系统滑模控制器的控制律为：

$$u = \frac{1}{B} \left[c\dot{\theta}_d - c\dot{\theta} + \ddot{\theta}_d - CT_L + \frac{\lambda}{J} \text{sat}(s) \right]. \quad (10)$$

其中 $\lambda = \max|T_f| + \eta$ ，且有 $\eta > 0$ 。

3) 滑膜稳定性分析。

取 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2}s^2$ ，则有

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left\{ \ddot{\theta}_d - [AT_f(\omega_r) + Bu + CT_L] + c\dot{e} \right\}. \quad (11)$$

将控制律式(11)代入，得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \left[-\frac{\lambda}{J} \text{sat}(s) - AT_f(\omega_r) \right] = \\ & s \left[-\frac{\lambda}{J} \text{sat}(s) + \frac{T_f(\omega_r)}{J} \right] \leq -\frac{\eta}{J} |s| \leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 基于模糊规则的滑膜控制算法设计

在滑膜控制律中，控制增益 λ 决定了系统趋近滑膜面的速率。若 λ 偏小，则趋近速度较慢；若 λ 偏大，则趋近速度较快，但同时引起较大的抖振。笔者采用模糊规则，通过调整控制增益增量 $\Delta\lambda$ 实现 λ 的变化，达到控制系统抖振的目的。

由式(12)可知，滑膜存在的条件为 $\dot{V} < 0$ ，从而得到以下模糊规则^[13]：

若 $\dot{V} > 0$ ，则 λ 应增大；若 $\dot{V} < 0$ ，则 λ 应减小。

设定输入变量 \dot{V} 的模糊子集为：

$U_k = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，并规定其论域为 $[-20, 20]$ 。

设定输出量 $\Delta\lambda$ 的模糊子集为：

$U_k = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，并规定其论域为 $[-3, 3]$ 。

以 \dot{V} 为输入， $\Delta\lambda$ 为输出，模糊系统输出输入模糊集分别定义如表 1 所示，并选用中位数法作为模糊判决依据。输入量和输出量隶属函数如图 4、图 5 所示。

表 1 模糊规则

\dot{V}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$\Delta\lambda$	NB	NM	NS	ZO	PM	PM	PB

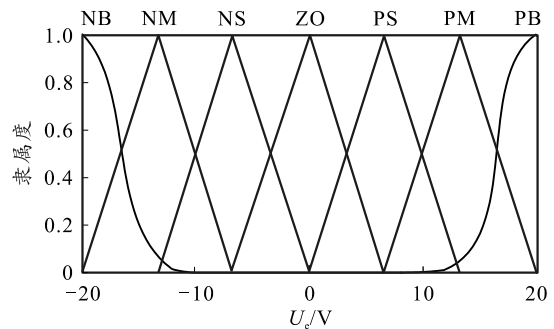


图 4 输入量隶属度函数

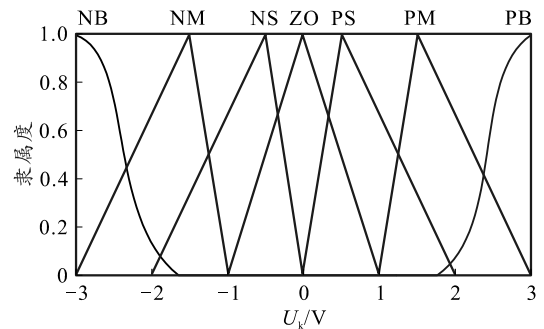


图 5 输出量隶属度函数

3 仿真实验及分析

设定该舰炮随动系统仿真参数为：

$L = 0.05 \text{ H}$ ， $K_t = 1.11 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ， $R_a = 2.65 \Omega$ ， $I_c = 6.4 \text{ A}$ ， $P_n = 4$ ， $J = 0.009 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $M_c = 0.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ ， $M_s = 0.01 \text{ N}\cdot\text{m}$ ， $\theta_s = 0.013 \text{ rad}/\text{s}$ ， $\sigma_0 = 1 \text{ 000 N}\cdot\text{m}/\text{ard}$ ， $\sigma_1 = 0.42 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{ard}/\text{s})$ ， $\sigma_2 = 0.207 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{ard}/\text{s})$ ； $\tau = 0.9$ ， $\varepsilon = 0.001$ 。

以 $\theta_i = \sin(\pi t) \text{ rad}$ 为输入，分别采用模糊滑模控制器和常规滑模控制器对该型舰炮的随动系统进行仿真。仿真结果如图 6 所示。

对比图 6(a)和(b)可以看出：较常规滑模控制器，应用模糊滑膜控制器随动系统的跟踪误差明显减小，即随动系统控制精度得到明显提高。对比图 6(c)和(d)可以看出：较常规滑模控制器，应用模糊滑膜控制器大幅削弱了控制输入的抖振，即提高了随动

系统跟踪的稳定性。

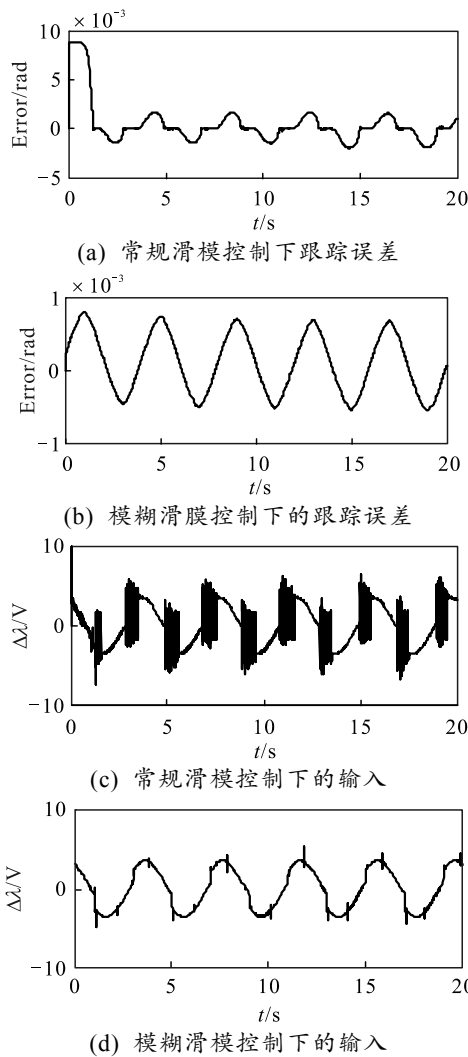


图 6 仿真实验结果

4 结论

经仿真计算验证了控制算法的正确性，以及滑膜控制器对提高随动系统跟踪精度的有效性。仿真结果证明：应用模糊规则对滑模控制器进行自适应调节，可有效克服非线性摩擦环节对舰炮随动系统控制性能的影响，削弱抖振，提升随动系统的跟踪

稳定性和跟踪精度。

参考文献：

- [1] 吴宇航, 崔敏. 摩擦力矩对舰炮随动系统低速平稳性的影响[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(7): 85-87.
- [2] CANUDAS C D W, OLSSON H, LISCHINSKY P. A New Model for Control of Systems with Friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(3): 419-425.
- [3] 彭继慎, 苏庆宇, 宋绍楼. 基于 Stribeck 摩擦模型的模糊 PID 控制在伺服系统中的应用[J]. 电气技术, 2007, (1): 15-17.
- [4] 赵远征, 陈延伟, 程守虎. 基于 Stribeck 模型的舰炮伺服系统摩擦力矩补偿[J]. 兵工自动化, 2016, 35(5): 59-62.
- [5] 于伟, 马佳光, 李锦英, 等. 基于 LuGre 模型实现精密伺服转台摩擦参数辨识及补偿[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2736-2743.
- [6] 于林科, 郑建明. 开关磁阻电机直驱电液位置伺服系统模糊滑模控制仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(5): 76-80.
- [7] 訾斌, 朱真才, 魏明生. 交流伺服驱动系统动态建模及控制[J]. 中国机械工程, 2009, 20(8): 920-923.
- [8] 胡盛斌, 陆敏恂. 空间三关节机器人自适应双模糊滑模控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 622-628.
- [9] 葛红豆, 赫雷, 曹维清, 等. 基于模糊 PID 控制的 AGV 控制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 76-79.
- [10] ARMSTRONG B. Friction Modeling and Compensation[M]. The Control Handbook, CRC Press, 1995: 32-56.
- [11] 克晶, 苏宝库, 曾鸣. 一种直流力矩电机系统的自适应摩擦补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(5): 536-540.
- [12] 王喜明, 刘红, 高伟. 基于 LuGre 模型的摩擦力补偿的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 731-734.
- [13] 刘金琨. 滑模变结构控制[M]. 北京: 北京清华大学出版社, 2012: 34-35.