

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.020

火炮随动系统连续滑模控制算法

张高生, 韩崇伟, 张志鹏, 代 普, 王天石, 顾双豪
(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 针对防空火炮对伺服系统高精度和强鲁棒性的要求及传统滑模控制中抖振的缺点, 设计一种连续滑模控制算法。建模时忽略电流环路的动力学特性, 将其视为比例环节; 分析火炮随动系统的动力学和跟踪目标, 对火炮随动系统的滑模控制算法及连续滑模跟踪算法进行研究; 运用数值仿真进行验证。结果表明: 该算法能消除系统抖动, 使系统具有较小的误差, 证明理论结果的有效性。

关键词: 连续滑模控制; 防空火炮; 伺服系统

中图分类号: TJ303⁺.8 **文献标志码:** A

Continuous Sliding Mode Control Algorithm for Gun Servo System

Zhang Gaosheng, Han Chongwei, Zhang Zhipeng, Dai Pu, Wang Tianshi, Gu Shuanghao
(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 712099, China)

Abstract: A continuous sliding mode control algorithm is designed to meet the requirements of high precision and strong robustness for the servo system of air defense gun and the disadvantage of chattering in the traditional sliding mode control. The dynamics of the current loop is ignored in the modeling, and it is regarded as a proportional link. The dynamics and target tracking of the gun servo system are analyzed, and the sliding mode control algorithm and the continuous sliding mode tracking algorithm of the gun servo system are studied. The numerical simulation is used to verify. The results show that the algorithm eliminates the system jitter and makes the system have a smaller error, which proves the effectiveness of the theoretical results.

Keywords: continuous sliding mode control; air defense gun; servo system

0 引言

现代战争方式的转变和军事技术的发展对火炮系统的性能提出了更高的要求。火炮的射击精度和响应速度主要取决于火炮随动系统的跟踪性能。火炮伺服系统的参考信号通常包含位置的一阶、二阶甚至高阶导数, 难以控制。在工程实践中, 可将控制对象简化为由惯性环节和积分环节组成的二阶数学模型, 采用带前馈的 PID 控制策略, 使系统满足跟踪精度要求^[1]。实际控制对象具有非线性和不确定性, 如负载惯量变化、摩擦转矩、温度变化引起的元件参数漂移、电机转矩波动、测量延迟和噪声等^[2-3]。当系统参数变化较大时, 常规 PID 控制的跟踪性能难以满足高精度跟踪要求; 因此, 有必要设计具有更高鲁棒性和抗干扰能力的控制算法。

为解决复杂的外部干扰和参数扰动等问题给控制算法设计带来的困难, 已有文献中采用了多种方法来解决火炮随动系统的控制问题, 如自适应控制、神经网络控制、自抗扰控制等^[4-7]。这些控制方法尽管获得了良好的控制性能, 但也存在一些不足。

如自适应控制方法可有效地估计不确定参数和不确定非线性中可参数化部分, 通过估计的参数对模型进行补偿; 但是, 对于非参数不确定非线性项, 自适应控制效果并不理想, 在出现干扰的情况下, 自适应控制甚至会面临发散的危险。神经网络控制由于神经网络复杂计算量很大, 影响了系统实时性能。

滑模控制具有结构简单, 对系统参数不确定性和系统干扰具有良好的鲁棒性的优点^[8-10]; 但在经典的滑模控制算法中, 存在不连续的符号函数, 会导致系统抖动及控制性能下降。为解决经典滑模控制算法中抖振的缺点, 设计一种连续滑模控制算法, 消除了系统抖振, 同时使系统具有较小的跟踪误差。

1 系统模型

火炮伺服系统由方位伺服系统和高低伺服系统组成。按传动方式可分为全电动炮控系统和电液炮控系统。电液炮控系统是传统的炮控系统, 而全电动炮控系统是当今的主要发展方向。笔者考虑的是全电动炮控系统, 受控系统主要包括永磁同步电机、减速器和火炮身管。方位(或高低)伺服系统结构如

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 张高生(1986—), 男, 河南人, 博士, 高级工程师, 从事火炮伺服系统理论与应用研究。E-mail: zhgsh@ustc.edu.cn.

图 1 所示。

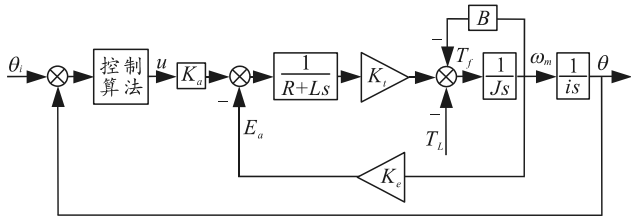


图 1 火炮伺服系统结构

上图中： θ_i 为期望的位置角度输入； θ 为火炮身管的位置角； u 为控制电压； K_a 为放大器增益； E_a 为电机的电枢反电动势； R 为电机电枢电路的电阻； L 为电机电枢电路的电感； K_t 为电机的电转矩系数； K_e 为电机的反电动势系数； T_f 为摩擦力矩； T_L 为负载转矩扰动； J 为转换到电机轴上的总转动惯量； B 为粘性摩擦系数； ω_m 为电机的角速度； i 为减速机构的减速比。

根据上图，执行电机的电磁转矩可表示为：

$$T_e = -(K_e K_t / (R + Ls)) \omega_m + (K_a K_t / (R + Ls)) u \quad (1)$$

根据电磁转矩平衡方程有：

$$T_e - T_L = Ji\ddot{\theta} + Bi\dot{\theta} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得：

$$-\frac{K_e K_t}{R + Ls} \omega_m + \frac{K_a K_t}{R + Ls} u - T_L = Ji\ddot{\theta} + Bi\dot{\theta} \quad (3)$$

式(3)两边同时乘以 $1/i$ 并整理可得：

$$\ddot{\theta} = -\left(\frac{B}{J} + \frac{K_e K_t}{J(R + Ls)}\right) \dot{\theta} + \frac{K_a K_t}{iJ(R + Ls)} u - \frac{T_L}{iJ} \quad (4)$$

在工程上，执行电机的机械时间常数远大于电气时间常数，电流环响应的延迟时间可忽略；因此，电流环可视为比例部分：

$$1/(R + Ls) = 1/(R(1 + Ls/R)) \approx 1/R \quad (5)$$

式(4)可简化为：

$$\ddot{\theta} = -\left(\frac{B}{J} + \frac{K_e K_t}{JR}\right) \dot{\theta} + \frac{K_a K_t}{iJR} u - \frac{T_L}{iJ} \quad (6)$$

定义系统跟踪误差 $e_1 = \theta_i - \theta$ ， $e_2 = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}$ ，火炮伺服系统跟踪误差动力学方程可表示为：

$$\dot{e}_1 = e_2, \quad \dot{e}_2 = k_u u - k_b e_2 + d(t) \quad (7)$$

式中： $k_u = -(K_a K_t / iJR)$ ； $k_b = B/J + K_e K_t / JR$ ； $d(t) = T_L / iJ + (B/J + K_e K_t / JR) \dot{\theta}_i + \ddot{\theta}_i$ 。

火炮随动系统的控制目标是使位置跟踪误差 e_1 尽可能小。

2 系统动态分析与滑模控制算法设计

滑模控制算法的设计过程可概括为以下 2 步：

1) 设计一个滑模面 s ，使系统的跟踪误差在滑动表面 $s=0$ 上趋近于 0。

2) 设计一种滑模控制算法，驱动火炮随动系统的运动轨迹到达并保持在滑动面上。

滑模面的设计为：

$$s = \mu e_1 + e_2 \quad (8)$$

式中 $\dot{e}_1 = e_2 = -\mu e_1$ ，系统跟踪误差有限时间趋于稳定。对式(8)求导可得：

$$\dot{s} = \mu e_2 + k_u u - k_b x_2 + d(t) \quad (9)$$

经典的滑模控制算法可表示为：

$$u = (k_b x_2 - \mu e_2 - \beta \text{sgn}(s)) / k_u \quad (10)$$

式中：

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} \frac{s}{|s|}, & \text{若 } |s| \neq 0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

在工程中，式(11)将导致系统抖动，并使系统控制性能下降。为解决该缺点，将不连续符号函数平滑为：

$$\psi_c(s) = \begin{cases} \beta \frac{s}{|s|}, & \text{if } \beta|s| \geq \xi \\ \beta^2 \frac{s}{\xi}, & \text{if } \beta|s| < \xi \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\xi > 0$ 。

然后可以获得如下连续滑模控制算法：

$$u = (k_b x_2 - \mu e_2 - \psi_c(s)) / k_u \quad (13)$$

式中 $\psi_c(s)$ 表示为式(12)。如果式(7)的系统扰动是有界的， $|d(t)| \leq \bar{d}$ ，那么式(13)可以使火炮随动系统实现最终有界误差跟踪，其中 $\beta \geq \bar{d} + \beta_0$ ， $\beta_0 > 0$ 。角位置跟踪误差的上限为 $|e_1| \leq \xi \bar{d} / \mu \beta^2$ 。

证明包括 2 步。首先，证明式(8)在有限时间内到达一个包含 $s=0$ 的边界层。

考虑以下 Lyapunov 函数：

$$V = s^T s / 2 \quad (14)$$

沿式(8)的轨迹对 V 求导可得：

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[\mu e_2 + k_u u - k_b x_2 + d(t)] = s[d(t) - \psi_c(s)] \leq \bar{d}|s| - s\psi_c(s) \quad (15)$$

1) 如果 $\beta|s| \geq \xi$ ， $s\psi_c(s) = \beta|s|$ 。由式(15)可得：

$$\dot{V} \leq \bar{d}|s| - \beta|s| \leq -\beta_0|s| < 0 \quad (16)$$

2) 如果 $\beta|s| < \xi$ ， $s\psi_c(s) = (\beta^2/\xi)s^2$ 。 V 对时间求导可得：

$$\dot{V} \leq \bar{d}|s| - (\beta^2/\xi)s^2 \quad (17)$$

可验证，只要 $|s| > (\xi\bar{d})/\beta^2$ 就有 $\dot{V} < 0$ 。

结合以上 2 种情形可得：

$$\dot{V} < 0, \quad \forall |s| > \xi\bar{d}/\beta^2 \quad (18)$$

根据 Lyapunov 理论，滑模变量 s 将在有限时间内到达以下边界层：

$$\Omega_1 = \{|s| \leq \xi\bar{d}/\beta^2\} \quad (19)$$

其次，求出随动系统的最终跟踪误差边界。在式(19)中有：

$$\dot{e}_1 = -\mu e_1 + s \quad (20)$$

式中 $|s| \leq \xi\bar{d}/\beta^2$ 。 $V' = e_1^2/2$ 对时间的导数满足：

$$\dot{V}' \leq -\mu e_1^2 + e_1 s \leq -\mu e_1^2 + |e_1| \frac{\xi\bar{d}}{\beta^2} < 0, \quad \forall |e_1| > \frac{\xi\bar{d}}{\mu\beta^2} \quad (21)$$

因此，可得火炮随动系统的运行轨迹将在有限时间内达到闭集 $\Omega_2 = \{|e_1| \leq \xi\bar{d}/\mu\beta^2, |s| \leq \xi\bar{d}/\beta^2\}$ 。由于 $s = \mu e_1 + e_2$ ， e_1 和 s 的最终有界性意味着 e_2 也是最终有界的；因此，可得火炮随动系统的位置跟踪是最终有界的。

3 仿真分析

笔者通过数值模拟仿真来验证理论结果的有效性。系统模型参数如下： $J = 0.076 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $i = 328$ ， $B = 1.43 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ ， $k_t = 0.652 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ， $R = 0.4 \Omega$ ， $L = 16 \text{ mH}$ ， $K_e = 0.197 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$ ， $K_a = 2$ 。

系统仿真时长和仿真步长分别设置为 10 s 和 1 ms，从第 6 s 开始系统受到干扰，干扰信号为 $T_L = (1.8 \times 10^4) \sin(3\pi(t-6))/328 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，($t \geq 6 \text{ s}$)，控制器的参数设置为 $\mu = 5$ ， $\beta = 20$ ， $\xi = 0.5$ 。对于幅度为 100 mil 的阶跃输入参考信号，系统的输出响应和控制量如图 2 和图 3 所示。

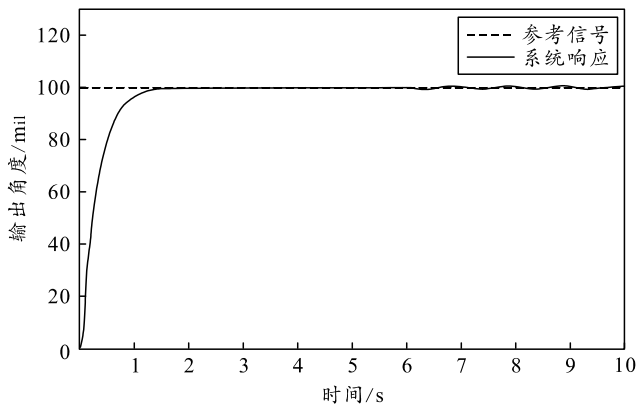


图 2 参考信号为 100 mil 时的阶跃响应

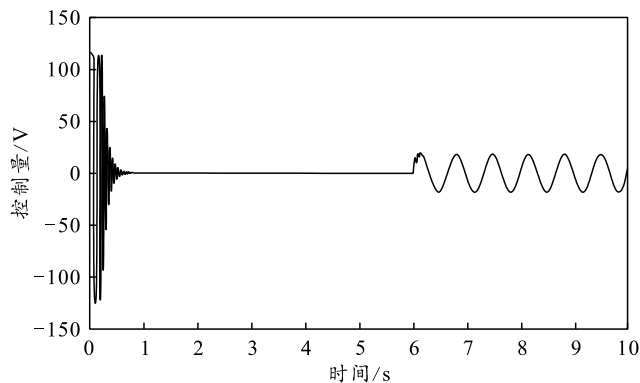


图 3 参考信号为 100 mil 时的控制量输入

当系统受到扰动时，跟踪误差小于 0.5 mil。当参考信号为幅值为 100 mil、频率为 1 Hz 的正弦信号时，系统的输出响应和控制如图 4 和 5 所示。从图 4 中可以看出跟踪误差小于 1.5 mil。仿真结果表明，本文中的连续滑模控制方法具有良好的控制性能和扰动抑制效果。

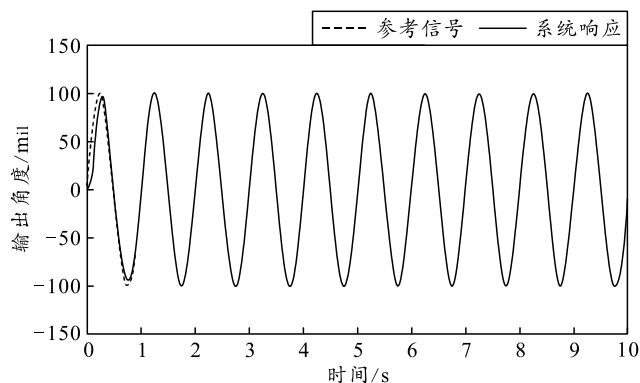


图 4 参考信号幅值为 100 mil、频率为 1 Hz 时的频率响应

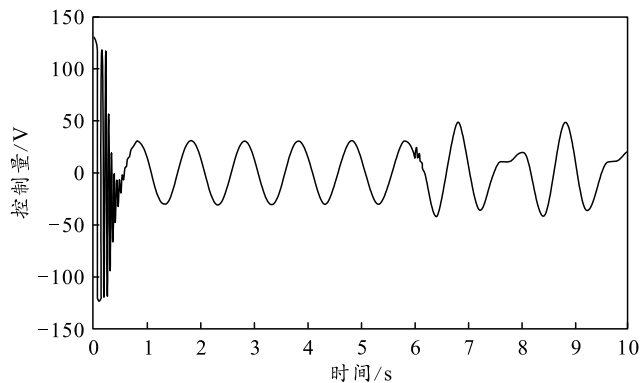


图 5 参考信号幅值为 100 mil、频率为 1 Hz 时的控制输入

4 结束语

笔者针对火炮伺服控制系统设计了一种连续滑模控制算法。该算法结构比较简单，对不确定的系统参数和扰动具有良好的鲁棒性，同时避免了经典滑模控制的抖动。仿真结果验证了算法的有效性，为火炮随动系统的设计提供了有价值的参考。

参考文献:

[1] YANG G, HAN C, CHEN T, et al. Fractional PI λ control of anti-aircraft artillery servo system[C]// Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, F, 2014. IEEE, 2015.

[2] 李伟, 韩崇伟, 赵宇和. 基于状态滤波器的变结构伺服控制器研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 54-57.

[3] 韩崇伟, 杨刚, 陈腾飞, 等. 基于分数阶控制的火炮伺服系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(10): 4-8.

[4] 庄文许, 马大为, 张龙, 等. 舰载火箭炮自适应内模输出调节问题研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(4): 471-476.

[5] 胡健, 马大为, 郭亚军, 等. 火箭炮交流伺服系统模型参考模糊神经网络位置自适应控制[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(4): 79-83.

[6] 张纓, 夏学文, 李法忠, 等. 舰炮交流伺服系统自适应模糊滑模位置控制[J]. 兵工学报, 2015, 36(S2): 67-72.

[7] 郑颖, 马大为, 姚建勇, 等. 基于自抗扰技术的火箭炮伺服系统解耦控制[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(4): 6-10.

[8] KHALIL H K. Nonlinear Systems: 3rd ed[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002: 18-22.

[9] UTKIN V I, POZNYAK A S. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method[J]. Automatica, 2013, 49(1): 39-47.

[10] 魏军辉, 冯昌林, 张俊. 舰炮随动系统的模糊滑模控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 93-96.

(上接第 82 页)

[4] WANG L M, SHI J B, SONG G, et al. "Object detection combining recognition and segmentation[C]// Asian conference on computer vision (2007). 2007.

[5] BRAUN M, KREBS S, FLOHR F, et al. EuroCity Persons: A Novel Benchmark for Person Detection in Traffic Scenes[C]// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. IEEE, 2019.

[6] LUKAS T, ELEZI I, SCHMIDHUBER J, et al. Deepscores-a dataset for segmentation, detection and classification of tinyobjects[C]// Proceedings of 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). New York: IEEE, 2018: 3704-3709.

[7] CHEN C, LIU M Y, TUZEL O, et al. R-CNN for small object detection[C]// Proceeding of Asian Conference on ComputerVision. Cham: Springer, 2016: 214-230.

[8] XIA G S, BAI X, DING J, et al. DOTA: A large-scale dataset for object detection in aerial images[C]// Proceedings of theIEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2018: 3974-3983.

[9] BOCHKOVSKIYA A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection[C]// Computer Vision and Pattern Recognition.

ArXiv, 2020.

[10] YUN S, HAN D, CHUN S, et al. CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features[C]// International conference on computer vision. IEEE, 2019.

[11] JIANG B R, LUO R X, MAO J Y, et al. Acquisition of Localization Confidence for Accurate Object Detection[C]// European conference on computer vision. IEEE, 2018.

[12] CHEN X, XIE M, TAN M, et al. Robust and Accurate Object Detection via Adversarial Learning[C]// Omputer vision and pattern recognition. IEEE, 2021.

[13] JOSEP H R, SANTOSH K D, ROSS G, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection[C]// Computer vision and pattern recognition. IEEE, 2016.

[14] LI X, WANG W H, HU X L, et al. Generalized Focal Loss V2: Learning Reliable Localization Quality Estimation for Dense Object Detection[C]// Computer vision and pattern recognition. IEEE, 2020.

[15] ZHANG H Y, WANG Y, DAYOUB F, et al. VarifocalNet: An IoU-aware Dense Object Detector[C]// Computer vision and pattern recognition. IEEE, 2021.

[16] CHEN K, WANG J Q, PANG J M, et al. MMDetection: Open MMLab Detection Toolbox and Benchmark[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. ArXiv, 2019.