

doi: 10.7690/bgzd.2025.05.020

基于 ADRC 的电动负载模拟器控制方法

符伟鹏¹, 陈机林¹, 桂林², 肖顺志¹, 季强¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 中国兵器工业集团江山重工研究院军品公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 为解决针对某火炮负载模拟器平台在加载过程中产生的扰动力矩严重干扰系统稳定性和加载精度问题, 提出一种基于自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)的电动负载模拟器控制方法。通过“扩张观测器”估计“总和扰动”并进行反馈补偿, 从而实现系统良好的抗干扰能力, 降低系统对于精确系统模型的依赖; 设计 ADRC 控制器, 建立控制系统和仿真模型, 并进行 Matlab/Simulink 仿真。仿真结果表明, 该控制系统对电动负载模拟器的控制具有可行性。

关键词: 自抗扰控制; 扩张观测器; 负载模拟器; 电机控制

中图分类号: TJ30 **文献标志码:** A

Control Method of Electric Load Simulator Based on ADRC

Fu Weipeng¹, Chen Jilin¹, Gui Lin², Xiao Shunzhi¹, Ji Qiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jiangshan Heavy Industry Research Institute, China North Industries Group Corporation Limited, Xiangyang 441000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the disturbance torque generated in the loading process of a gun load simulator platform seriously disturbs the stability and loading accuracy of the system, a control method based on active disturbance rejection control (ADRC) is proposed. The “total disturbance” is estimated by the “extended observer” and the feedback compensation is carried out, so as to realize the good anti-interference ability of the system and reduce the dependence of the system on the accurate system model; the ADRC controller is designed, the control system and simulation model are established, and the Matlab/Simulink simulation is carried out. The simulation results show that the control system is feasible for the electric load simulator.

Keywords: active disturbance rejection control; extended observer; load simulator; motor control

0 引言

火炮随动系统的控制精度和动态响应性能直接影响其打击能力, 电动负载模拟器作为随动系统力矩加载的半实物仿真平台, 是用来动态实时模拟火炮在调转射击过程中所受载荷变化而引起系统性能的改变。由于负载模拟器的特殊工况, 其工作时会遇到摩擦、弹性形变、转动惯量、重力矩和阻力矩等, 带来的扰动力矩会对加载力矩造成很大的干扰; 因此, 对扰动力矩产生的机理进行研究、辨识和抑制, 对提高随动系统负载模拟器力矩的加载精度和系统性能, 具有很高的研究价值和实践意义。

自抗扰控制(ADRC)^[1]的控制思想是将作用于系统输出的扰动, 主动地从系统输入输出提取出来并进行实时的估计补偿, 在保证系统快速性和稳定性的同时, 减小系统的输出误差。自抗扰控制主要由跟踪微分器(tracking differentiator, TD), 扩张状态观测器(extended state observer, ESO)以及非线性

状态误差反馈控制律(nonlinear state error feedback law, NLSEF)3部分构成, ESO作为ADRC的核心, 其参数的整定直接影响着系统的性能和鲁棒性^[2]。

将自抗扰控制运用在电动负载模拟器^[3]上, 通过ESO扩张出来的状态来估计总和扰动, 对系统各环节产生的干扰力矩总和起来分析, 具有更好的适应性和抗干扰性, 简化了对于力矩产生机理的分析, 提高了力矩加载精度。

1 电动负载模拟器模型

1.1 交流永磁同步电机模型

交流永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)是一个非线性、多变量和强耦合的多变量系统, 在对其动态特性分析时多进行简化, 假设^[4]: 1) 忽略铁心饱和效应; 2) 忽略涡流和磁滞损耗; 3) 气隙磁场呈正弦分布; 4) 转子和永磁体没有阻尼; 5) 电机参数不受温度、频率等因素的

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2024-09-25

第一作者: 符伟鹏(1998—), 男, 江苏人, 硕士。

影响。

为便于分析及控制，在永磁同步电机各种电流控制方法中，通常采用忽略铁损的 d、q 轴数学模型，该模型称为永磁同步电机的 d-q 轴基本数学模型。

通过坐标变换得到 PMSM 在 dq 旋转坐标系上的理想动态数学模型为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d}(u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q}(u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \varphi_f) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} n_p (\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - T_L - B\omega \right] \\ T_e &= 3n_p [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： u_d, u_q 为 dq 坐标系上的定子电压； i_d, i_q 为 dq 旋转坐标系下的定子电流； L_d, L_q 为坐标系上的定子等效电感； R_s 为定子电阻； n_p 为永磁同步电机的极对数； ω 为电机转子机械角速度； φ_f 为转子磁链； L_L 为负载转矩； B 为粘滞摩擦系数； J 为电机与负载转动惯量之和。

对 PMSM 的控制实际就是对 d、q 轴电流的控制。常用的 PMSM 的矢量控制策略有： $i_d=0$ 控制、 $\cos\phi=1$ 控制、弱磁控制和最大转矩控制。为使转速和电流解耦，采用 $i_d=0$ 控制的控制方法。电机转子采用表贴式，故 $L_d=L_q=L$ ，简化式(1)后的数学模型为：

$$\left. \begin{aligned} di_q/dt &= (u_q - R_s i_q - \varphi_f \omega) / L \\ d\omega/dt &= (T_e - T_L - B\omega) / J \\ T_e &= 3n_p \varphi_f i_q / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

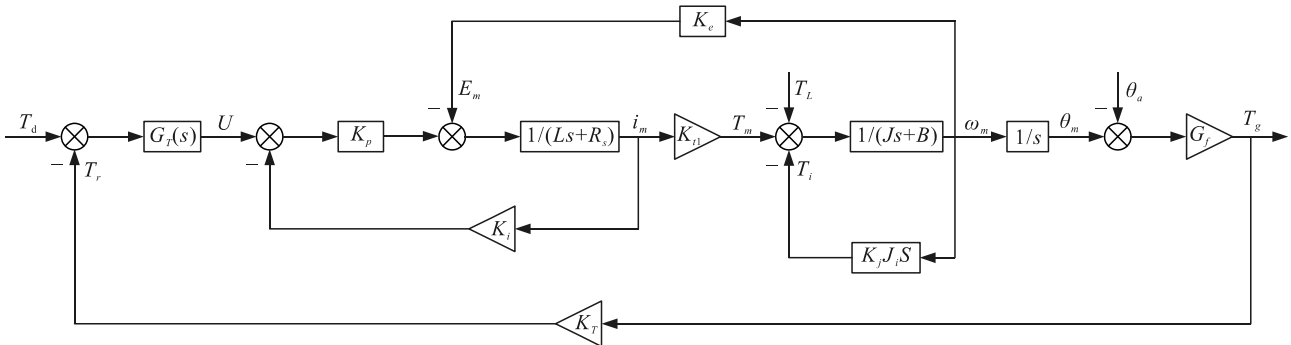


图 2 火炮随动系统电动负载模拟器模型

图中 T_d 为系统的输入力矩； $G_T(s)$ 为力矩控制器； T_r 为经主控计算机处理的力矩值； T_g 为力矩传感器的采集值； K_p 为放大器增益； K_e 为反电动势系数； L 为电枢回路总电感； R 为电枢回路等效电阻； S 为拉普拉斯算子； E_m 为电枢电动势； i_m 为电枢电

式中， $K_{t1}=3n_p\varphi_f/2N\cdot m/A$ 为电磁转矩系数； $K_e=n_p\varphi_f$ Vs/rad 为反电动势系数。

根据以上公式建立 PMSM 模型如图 1 所示。

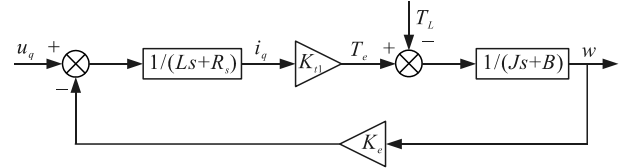


图 1 PMSM 模型

1.2 负载模拟器模型设计

扭矩传感器是火炮随动系统电动负载模拟器主要的力矩测量元件，为实现力矩传感器对力矩电机的闭环控制，根据力矩传感器的工作原理，建立如下扭矩模型：

$$T_g = G_f(\theta_m - \theta_a) \quad (3)$$

式中： T_g 为力矩传感器的采集值； G_f 为力矩传感器的弹性系数； θ_m 为电动负载模拟器的输出转角； θ_a 为位置电机转子的角位置。

惯性力矩是火炮在振动，颠簸及带弹量变化的时候产生加速度所导致的。通过在力矩电机的输出轴加装不同数量的惯量盘，可以模拟火炮在真实情况下的多产生的惯性力矩，从而提高控制精度，其公式表示为：

$$T_i = K_j J_i d\omega_m / dt \quad (4)$$

式中： T_i 为惯性力矩； J_i 为折算到力矩电机轴的转动惯量； K_j 为转动惯量系数。

联合 PSMS 模型及扭矩传感器模型和惯性力矩模型，得到如图 2 所示的火炮随动系统负载模拟器模型。

流； K_{t1} 为电磁转矩系数； T_m 为电磁转矩； T_L 为干扰力矩； ω_m 为电机转子的角速度； θ_m 为角位置； θ_a 为位置电机转子的角位置； E_m 为弹性系数； K_j 为惯性力矩转动惯量系数； J_i 为折算后的转动惯量； T_i 是惯性力矩； i 为传动比； K_i 为电机驱动电流反馈

系数： K_T 为力矩闭环反馈系数； U 为控制电压。

建立力矩电机力矩环的数学传递函数如下：

$$T_g = K_{t1}K_pG_fG_t(s)T_d / (s(JS + B + K_jJ_i s)(Ls + R_s + K_iK_p) + K_eK_{t1}s + K_{t1}K_TK_pG_fG_t(s)) - G_f s(JS + B + K_jJ_i s)(Ls + R_s + K_iK_p)\theta_a / (s(JS + B + K_jJ_i s)(Ls + R_s + K_iK_p) + K_eK_{t1}s + K_{t1}K_TK_pG_fG_t(s)) - G_f(Ls + R_s + K_iK_p)T_L / (s(JS + B + K_jJ_i s)(Ls + R_s + K_iK_p) + K_eK_{t1}s + K_{t1}K_TK_pG_fG_t(s))。 \quad (5)$$

分析以上公式可以发现，负载模拟器力矩电机的跟踪精度与主动加载力矩 T_d 、位置电机转角 θ_a 和干扰力矩 T_L ^[5]有关；因此，需要采用一定的控制策略，提高负载模拟器的控制性能。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, w(t), t) + bu \\ y &= x \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

式中： $f(x_1, x_2, w(t), t)$ 为系统函数，综合了内扰和外扰的总和扰动； b 为控制矩阵； u 为控制输入。

2 ADRC 自抗扰控制器设计

二阶 ADRC 的控制器算法如下：

ADRC 将外部扰动和内部扰动视作统一的扰动来加以估计并消除。因此，负载模拟器中的外扰，即干扰力矩 T_L ；内扰，即主动加载力矩 T_d 、位置电机转角 θ_a 可以通过 ADRC，视作扰动的总和，统一地剔除或者加以抑制。自抗扰控制的核心是“抗扰”，通过对统一的扰动进行辨识，从而提高系统控制的精度，提高控制品质。

TD 用于安排过度过程，其表达式为：

$$\left. \begin{aligned} fh &= fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r_0, h_0) \\ x_1(k+1) &= x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + hfh \end{aligned} \right\}。 \quad (7)$$

式中： h 为采样函数； $fhan$ 为最速控制综合函数。其表达式：

在 ADRC 中，扩张观测器的构造采用了基于函数 fal 的非线性结构，控制器的设计也是采用函数 fal 或者最速控制综合函数 $fhan$ 的非线性组合。这种非线性组合能够有效地补偿未知模型和外扰作用，并且在大误差时采用小增益以减小超调，在小误差时采用大增益以增加快速性^[6]，用一组控制参数调和了超调与快速性的矛盾，具有很强的跟踪能力。ADRC 基本框架如图 3 所示。

$$\left. \begin{aligned} d &= r_0 h_0^2 \\ a_0 &= h_0 x_2 \\ y &= x_1 + a_0 \\ a_1 &= \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 &= a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d) / 2 \\ s_y &= [\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)] / 2 \\ a &= (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \\ s_a &= [\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)] / 2 \\ fhan &= -r[a / d - \text{sign}(a)]s_a - r_0 \text{sign}(a) \end{aligned} \right\}。 \quad (8)$$

式中： x_1, x_2 为系统状态； r_0, h_0 为函数控制参量。

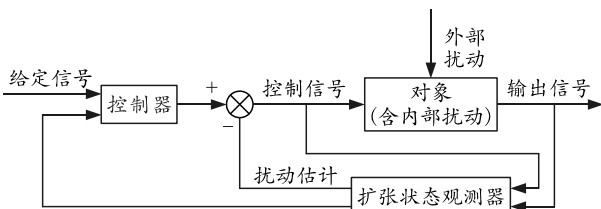


图 3 自抗扰控制器基本框架

ESO 用于解决主动抗扰技术中的扰动观测这一问题，将总扰动扩张成一个新状态变量，然后重构出系统原有状态变量和扰动的所有状态。其表达式为：

随动系统负载模拟器^[4]中存在着众多的不确定性，还有力矩电机运动时产生的扰动力矩等，使得负载模拟器的模型具有非线性的特征，这些特征因素导致输出力矩达不到理想的稳定状态，降低了力矩加载的精度。

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= z_1 - y \\ \dot{z}_1 &= z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 &= -\beta_2 \text{fal}(e_1, 1/2, \delta) + bu \\ \text{fal}(x, a, \delta) &= \begin{cases} x/\delta^{1-a}, & |x| \leq \delta \\ \text{sign}(x)|x|^a, & |x| > \delta \end{cases} \end{aligned} \right\}。 \quad (9)$$

目前对 ADRC 参数整定和稳定性分析的研究基本是围绕二阶系统展开的，在工业系统中如果对象是三阶系统，则会设计降阶自抗扰控制器^[7]，将模型的误差作为扰动计入 f 并对其进行观测。对与负载模拟器系统，设计为二阶 ADRC。

式中： y 为输出值； z_1, z_2, z_3 为观测值； β_1, β_2 是由系统采用的步长所选用的控制器参数； $\text{fal}(e_1, a, \delta)$ 为非线性函数。

2.1 二阶 ADRC 控制器

这样，既可以在 b 已知或者接近的情况下，使扩张观测器 d 额状态变量 $z_i(t)$ 跟踪系统的状态变量 $x_i(t)$ ，又有较大的适应范围。

设含有未知总和扰动的二阶对象：

NLESF 控制律利用误差信号 e_1 和误差微分信

号 e_2 , 生成误差积分信号 e_0 , 主要有如下 2 种形式:

$$u_0 = \beta_3 \text{fal}(e_1, a_1, \delta). \quad (10)$$

式中 β_3 为控制器参数, 且 $0 < a_1 < 1 < a_2$ 。

$$u_0 = \text{fhan}(e_1, ce_2, r, h_1). \quad (11)$$

式中: c 为阻尼因子; h_1 为精度因子。

控制系统的输出控制量为:

$$u = (u_0 - z_3) / b_0. \quad (12)$$

自抗扰控制器的参数多, 可选择范围宽。其中, 步长 h 决定滤波精度; 控制量增益 r_0 是根据过渡过程快慢的需要和系统的承受能力来决定; β_1 可以调节响应速度的快慢; β_2 可以抑制过渡过程产生的超调量; β_3 可以抑制模型建立产生的内部扰动以及外部扰动产生的误差^[8-9]。

2.2 仿真实验及结论

基于上述的模型及相应的控制算法分析, 在 Matlab/Simulink 中对基于 ADRC 的 PMSM 控制系统进行了仿真验证^[10]。ADRC 的参数整定数量较多, 设定参数调节值为 $h=0.001$, $h_0=100$, $\beta_1=10$, $\beta_2=300$, $\beta_3=200$, $\varepsilon_1=0.5$, $\varepsilon_2=0.5$ 仿真结果如图 4 所示。

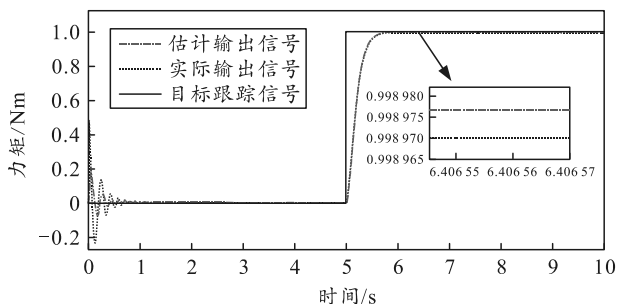


图 4 ADRC 阶跃力矩响应

图 4 可以看出: 基于 ADRC 的估计输出信号与实际输出信号十分接近, 有着很好的信号跟踪性能。

通过加入干扰力矩, 验证 ADRC 的抗扰能力和跟踪性能, 如图 5 所示。

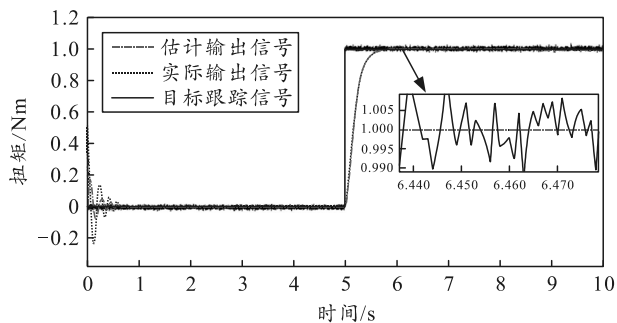


图 5 加入干扰力矩的 ADRC 阶跃力矩响应

比较加入干扰力矩前后的阶跃力矩响应, 得出自抗扰控制器在面对 PMSM 力矩加载复杂工况下, 仍然保持着较高的控制稳定性和跟踪精度。

传统的 PID 控制即使在遇到小型扰动时, 其控制也波动剧烈, 输出扭矩变得十分不稳定, 如图 6 所示。

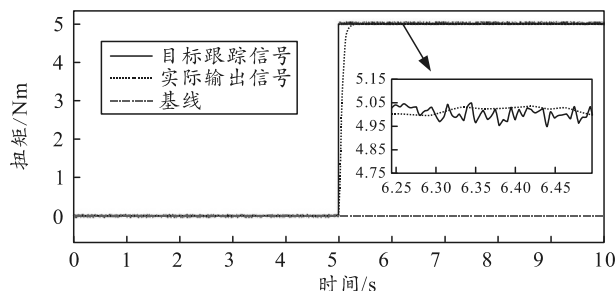


图 6 加入干扰力矩的 PID 阶跃力矩响应

3 结束语

笔者将自抗扰控制运用在电动负载模拟器上, 通过将系统的内外扰总和一起来观测, 使得控制器有着很好的适应性和抗干扰性, 提高了系统的加载精度, 简化了力矩产生机理的分析。且与普通控制方法相比, 有着优异抗扰性能; 自抗扰控制器可以很好地补偿由于模型缺失、负载变化及机械传动单元引入的扰动误差, 建立的系统控制模型有很强的稳定性。

参考文献:

- [1] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24-31.
- [2] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [3] 姚晓艳. 电动负载模拟器自抗扰控制器设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [4] 张守娟. 随动系统的多电机同步控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 王超. 炮控系统电动负载模拟器辨识与智能控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [6] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [7] 傅彩芬, 谭文. 基于高阶控制器设计的线性自抗扰控制参数调整[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(2): 265-272.
- [8] 张彬文. 线性自抗扰控制分析、设计及整定[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [9] 倪刚, 金辉宇, 兰维瑶. 基于 Ziegler-Nichols 规则的一阶线性自抗扰控制参数整定[C]//第三十九届中国控制会议论文集. 中国控制学会, 2020: 1097-1101.
- [10] MADONSKI R, RAMIREZ NERIA M, STANKOVI M, et al. On vibration suppression and trajectory tracking in largely uncertain torsional system: An error-based ADRC approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 134: 1-22.