

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.015

## 基于粒子群优化的某车载火箭炮自抗扰控制

羊书毅, 高 强, 吴 斌, 瞿万里  
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对车载火箭炮行进间的 PID 控制方法存在动态性能的限制, 提出一种自抗控制器的设计。针对自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)模块中存在众多且不便确定的参数这一问题, 利用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)较强的寻优能力, 对扩张状态观测器的参数进行优化, 并优化控制系统。仿真结果表明: 基于该控制方法的伺服系统稳定性显著提升, 提高行进间火炮的控制精度与动态性能。

**关键词:** 火箭炮; 交流伺服系统; 自抗扰控制; PID; 参数整定; 粒子群算法

**中图分类号:** TJ393 **文献标志码:** A

## Active Disturbance Rejection Control of Certain Type Vehicular Rocket Launcher Based on Particle Swarm Optimization

Yang Shuyi, Gao Qiang, Wu Bin, Qu Wanli

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

**Abstract:** Aiming at the dynamic performance limitation of the PID control method for the vehicle rocket launcher, a design of active disturbance rejection controller is proposed. To solve the problem that there are many uncertain parameters in the active disturbance rejection control (ADRC) module, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the parameters of ADRC. PSO has strong optimization ability to optimize the parameters of the extended state observer and optimize the control system. The simulation results show that the stability of the servo system based on the control method is significantly improved, and the control accuracy and dynamic performance of the moving gun are improved.

**Keywords:** rocket launcher; AC servo system; active disturbance rejection control; PID; parameter tuning; particle swarm algorithm

### 0 引言

火箭炮作为战术武器, 可短时间内实施较大规模的火力压制。它具备弹药发射迅速、打击范围广、压制力强、密度高、战场灵活且效率高、操作简单、便于维护、成本较低等特点。几十年来, 该武器一直受到各国军队的青睐<sup>[1]</sup>。火箭炮在行进时, 因为道路崎岖引起的路面激励作用使得车体振动, 进而形成的多管身管振动是降低火箭炮精度的主要原因<sup>[2-3]</sup>。随着战场需求的不断提高, 驱动电机功率的提升, 以及随之而来行进速度的提升和更复杂的炮身振动, 负载因非平衡特征引发的效果被放大, 因此新形势下火箭炮伺服系统面临更严苛的挑战。

由于系统中固有的非线性部分, 用于获得良好控制性能的线性 PID 控制策略<sup>[4]</sup>, 极大程度地限制了火控系统的动态性能。自抗扰控制(ADRC)继承了 PID 控制对被控对象数学模型依靠程度不高的特点, 化解了经典 PID 控制法下系统响应与伴生超调

之间的冲突<sup>[5-6]</sup>; ADRC 将内部的不确定部分与外界的未知扰动一并作为总扰动考虑, 并通过扩张状态观测器对上述内外部扰动进行观测、估计并补偿。

文献[7]为解决无人机俯仰姿态控制系统在模型参数和不定外界条件等未知干扰作用下鲁棒性差、系统反馈迟缓的问题, 通过 ADRC 理论技术来提高无人机的稳定性; 文献[8]把 ADRC 技术使用在永磁同步电动机系统上, 改进了 ADRC 控制器, 精简了控制模块的结构; 文献[9]为解决火箭炮发射过程中出现的气流冲击负面影响武器射向稳定的问题, 利用 ADRC 控制法构造了非线性状态扩张观测器和对应的非线性反馈控制律, 降低了气流冲击等强作用对火箭炮发射精度的负面作用。

ADRC 控制器具有非线性特征, 需要整定复数参数, 而待确定参数之间又存在着内部作用。确定这些参数的问题向来是制约该控制器在现实项目中使用的难点。粒子群优化算法(PSO)生成粒子用以

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 羊书毅(1997—), 男, 安徽人, 硕士, 从事智能检测与控制技术研究。E-mail: SYoung0820@outlook.com。

模拟真实自然界中鸟群中的鸟，每一个粒子视作群体中每一个独立个体，通过迭代计算，在可行解空间中得出每个粒子的位置和速度进而寻找最优解<sup>[10]</sup>。笔者将二者结合起来，通过 PSO 算法对 ADRC 中的待定参数在线整定，达到对信号的准确跟踪效果。仿真结果表明，此设计方法改善了火箭炮交流伺服控制系统性能。

## 1 系统建模

### 1.1 伺服系统结构

图 1 为火箭炮交流伺服系统结构。系统构成分为：控制计算机模块、D/A 转换模块、伺服放大器模块、交流调速模块、减速器模块、旋转变压器模块、RDC 转换模块。

其中，伺服系统工作原理：控制计算机依照串口传输的方向和角计算，得到控制信号，进行数模转换处理后，输入伺服放大器模块处理转换后

信号；之后将其传递给交流调速系统，视调整后信号强弱，由速度反馈部分对电机的转速进行合理调整；调整完毕后动力经由减速器输出至外加负载。负载的最终位置通过电磁式传感器测量，经由 RDC 模块最终返回起始计算机，形成完整闭环结构，达成对负载的位置跟踪控制目的<sup>[11]</sup>。

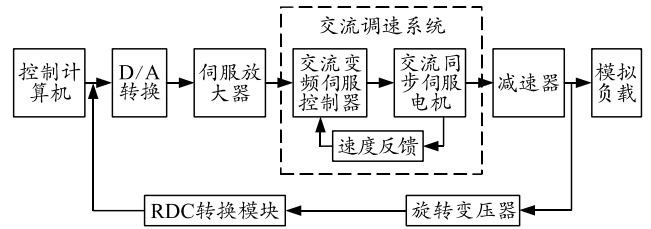


图 1 伺服系统结构

### 1.2 伺服系统数学模型

火箭炮伺服系统模型如图 2 所示。火箭炮位置伺服系统包括电流环、速度环和位置环。角速度  $\omega_r$  作为系统的输入，减速器的角位置  $\theta_a$  作为输出。

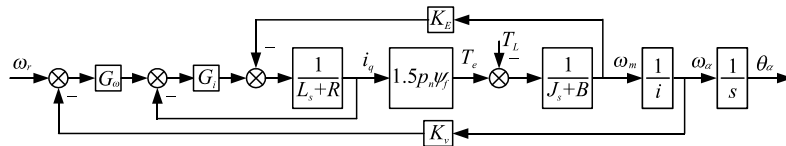


图 2 伺服系统和数学模型

图中： $G_\omega$  为速度控制器； $G_i$  为电流环控制器影响因子； $K_E(=K_i/1.5)$  为电势因素； $K_v$  为系统速度反馈控制参数； $i$  为速度比例系数； $\omega_a$  为减速器的角速度； $\theta_a$  为减速器的角位置； $T_L$  为外界影响引起的力矩波动与电机轴上的负载转矩。

由于机械时间常数远大于电磁时间常数，且电流环的响应远比位置环和速度环的响应迅速，所以在本文中电流环简化为比例环节，系数为 1。同样，速度环简化为  $p$  控制，比例系数为  $K_\omega$ 。经上述处理，模型如图 3 所示。

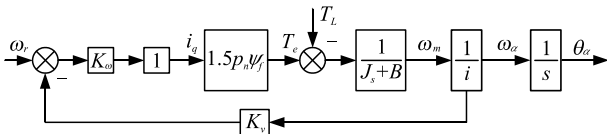


图 3 伺服系统简化模型

可得出在速度环、电流环简化后的经典二阶模型为：

$$\ddot{\theta}_a = \frac{-(Bi + K_\omega K_i K_v)}{Ji} \dot{\theta}_a + \frac{K_\omega K_i}{Ji} \omega_r - \frac{1}{Ji} T_L \quad (1)$$

## 2 自抗扰控制器设计

自抗扰控制器结构如图 4 所示。ADRC 理论的思想<sup>[12]</sup>是将系统模型的不确定干扰和外界扰动一

并视为“总扰动”。构造扩张状态观测器，并由此实时对“总扰动”观测、估计与补偿。ADRC 控制不依赖对象模型，结构简单，算法易于实现且鲁棒性好。ADRC 控制器分为 3 部分：跟踪微分器、扩张状态观测器和状态误差反馈控制律。

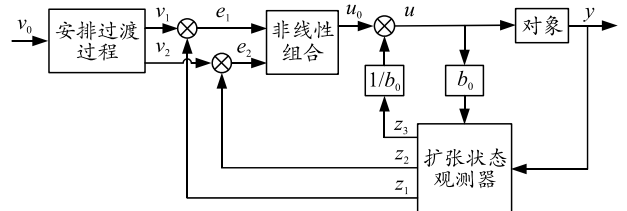


图 4 ADRC 结构

### 2.1 跟踪微分器 (tracking differentiator, TD)

TD 的核心功能：给出输入信号的过渡过程并从中提取其微分信号，降低系统的初始误差，处理信号快速响应与随之而来超调的矛盾。笔者选择文献[13]所给出的非线性 TD，该非线性 TD 具有结构简单，易于调参等特点。表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_1 &= v_2 \\ \dot{v}_2 &= -R^2 [\text{sig}(v_1 - v) + \text{sig}(v_2/R)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $v$  为输入信号，即预设的位置信号  $\theta_r$ ； $v_1$  为跟踪信号； $v_2$  为跟踪信号的微分信号； $R$  为速度参

数, 跟踪速度会随  $R$  值变化而变化; sigmoid 函数为激励函数:

$$\text{sig}(x; a, b) = a \left[ (1 + e^{-bx})^{-1} - 0.5 \right]. \quad (3)$$

式中:  $a$  为放大系数, 用来调整激励函数的幅值;  $b$  为指数参数, 可对函数的近线性工作区间的范围加以调整。

## 2.2 扩张状态观测器 (extended state observer, ESO)

令参考输入的位置信号为  $\theta_r$ , 令  $x_1 = \theta_a$ , 即输出端负载的角位置;  $x_2 = \dot{\theta}_a = \omega_a$ , 即输出端的负载角速度。由式(1)可得系统状态空间方程为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, w(t), t) + bu \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

式中:

$$f(x_1, x_2, w(t), t) = \frac{-(Bi + K_\omega K_i K_v)}{J_i} \dot{\theta}_a + \frac{K_\omega K_l}{J_i} \omega_r - \frac{1}{J_i} T_L$$

指系统不确定部分 (即系统未知状态和外界未知条件扰动);  $u = \omega_r$ , 即系统控制量;  $b$  为放大系数;  $y$  为最终输出。

将式(4)扩张如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, w(t), t) + bu \\ \dot{x}_3 &= h(x_1, x_2, w(t), t) \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

式中  $h(x_1, x_2, w(t), t)$  为系统不确定部分的微分。

由式(5)设计得到伺服系统三阶扩张状态观测方程如下:

$$\left. \begin{aligned} e &= z_1 - y \\ \dot{z}_1 &= z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 &= z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_3 &= -\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

式中:  $z_1$  为角位置  $\theta_a$  估计值;  $z_2$  为输出端角速度  $\dot{\theta}_a$  估计值;  $z_3$  为系统不确定状态和外界未知条件扰动估计, 即扩张状态估计值;  $e$  为负载端位置的观测与实际误差;  $\beta_1 - \beta_3$  为观测校正系数;  $\alpha_1, \alpha_2$  为非线性 fal 函数的因子;  $\delta$  为非线性函数线性段的区间长度;  $b_0$  为放大系数的估计。fal 函数的构造如下:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \\ \text{sign}(e)|e|^\alpha, & |e| > \delta \end{cases}. \quad (7)$$

式中 sign 函数为符号函数。

## 2.3 状态误差反馈律

定义  $e_1 = v_1 - z_1$ , 即输出端角位置预设与估计的误差。定义  $e_2 = v_2 - z_2$ , 即跟踪角速度值与估计的误差。构造非线性 PID 方程:

$$u_0 = k_1 \text{fal}(e_1, \alpha_3, \delta) + k_2 \text{fal}(e_2, \alpha_4, \delta). \quad (8)$$

式中  $0 < \alpha_3 < 1 < \alpha_4$ 。用干扰估算值  $z_3$  补偿误差反馈控制量  $u_0$ :

$$u = u_0 - z_3/b_0. \quad (9)$$

结合式(8)可得最终控制量:

$$u = k_1 \text{fal}(e_1, \alpha_3, \delta) + k_2 \text{fal}(e_2, \alpha_4, \delta) - z_3/b_0. \quad (10)$$

式中  $\alpha_i, \delta$  能够提前设置, 因此需要整定的参数就剩下 2 个误差的反馈系数  $k_1, k_2$ 。

## 3 基于粒子群优化算法的 ADRC 参数整定

非线性 ADRC 理论中, 各模块之间相互影响, 并且之间有较难分析的非线性因素, 所以相关参数的选取较为困难, 所得参数在相当程度上依仗设计人员的主观判断<sup>[14]</sup>。笔者基于 PSO 算法, 对参数进行整定并逼近最优结果。粒子群算法如图 5 所示。

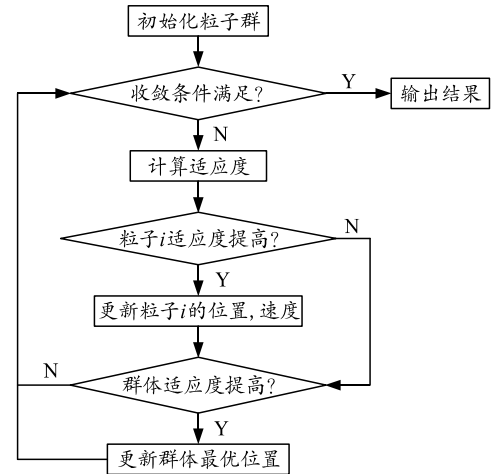


图 5 粒子群优化算法流程

### 3.1 粒子群优化算法与参数设置

在速度迭代公式中新增惯性权重变量  $\omega$  得到标准粒子群算法公式。增大初始阶段  $\omega$  的设置, 有助于增强算法的全局搜索效率, 削减后期阶段  $\omega$  的设置, 有助于提高算法的局部搜索效率。公式如下:

$$\left. \begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} &= x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

$\omega$  的设定值, 目前的普遍方案是线性递减权重 (linearly decreasing weight, LDW) 策略, 即:

$$\omega = \omega_{\min} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{N} (N - k). \quad (12)$$

式中： $\omega_{\min}$ ， $\omega_{\max}$  分别为最小权重和最大权重； $N$  为最大进化代数。由此可知，惯性因素对算法的收敛速度和精度具有很大作用。在参数寻优的最初阶段，设置较大的惯性系数，可以防止收敛速度过快，导致早熟收敛。进入后期，选择较小的惯性系数，可以改善算法的收敛精度。通常选择设  $\omega_{\max}=0.9$ ， $\omega_{\min}=0.4$ 。

粒子群优化算法的基本参数模型包括种群规模  $M$ 、最大速度  $v_{\max}$ 、权重参数(参数又可以分为惯性权重  $\omega$ ，加速度常量  $c_1, c_2$ )、最大迭代次数  $G_{\max}$ 。由于还没有定论公式来计算  $M$  的值，依照已有研究在 20~60 范围内选择； $v_{\max}$  确定目前位置与最优位置之间的区域分辨率； $\omega$  的值在 PSO 算法搜索过程中线性变化， $c_1, c_2$  为常数，取值在 [0, 4]。

### 3.2 适应度函数的选择

从多种控制器性能的评价方法中，笔者选择时间乘绝对误差积分准则 (integrated time and absolute error, ITAE)<sup>[15-16]</sup>，表达式为：

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (13)$$

在适应度函数中添加输入的平方项避免输入过大，添加控制量惩罚函数避免小范围控制绝对值过大，记控制量的最大值为  $u_{\max}$ ，以防止工作过程中的控制信号过大，此时评价函数为：

$$J = \int_0^{\infty} (w_1|e(t)|t + w_2u^2(t))dt + w_3u_{\max} \quad (14)$$

为防止超调对于系统的负面作用，把超调量加入最优指标中：

若  $ey(t) < 0$ ,

$$J = \int_0^{\infty} (w_1|e(t)|t + w_2u^2(t) + w_4|ey(t)|)dt + w_3u_{\max} \quad (15)$$

式中： $w_1, w_2, w_3, w_4$  为权值， $w_4 \gg w_1$ ； $ey(t)=(t)-y(t-1)$ 。

### 3.3 粒子群算法优化自抗扰控制参数

利用 PSO 算法整定并优化 ADRC 的参数，其操作步骤如下：

Step1: 对预期执行优化的 ADRC 控制参数初始化： $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k_1, k_2$  和 PSO 算法中参数。

Step2: 利用性能评价指标函数，初始化群体最优解与个体最优解  $p_g, p_i$ 。

Step3: 根据公式更新粒子状态与当前适应度，并更新全局最优解以及个体最优解。

Step4: 检查循环次数当未达最大迭代次数  $G_{\max}$  时，或未找到预设相应的全局最优解时，回到 Step3。

Step5: 流程终止并输出结果。

## 4 仿真实验与分析

控制器中的参数初始设置如下：TD 中的参数  $R=30, a_1=5, a_2=0.5, b_1=2, b_2=0.5$ ；ESO 的参数  $\beta_1=100, \beta_2=300, \beta_3=1\ 000, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.25, \delta=0.025$ ；PID 中的参数  $k_1=20, k_2=11.9, \alpha_3=3/4, \alpha_4=2.45/2$ 。

笔者随机选取调炮目标位置  $20^\circ$  观察阶跃响应，此外在给定正弦信号下，比较传统 PID 控制、ADRC 控制方法与粒子群算法优化 ADRC 控制 (particle swarm optimization-ADRC, PSO-ADRC) 的控制效果，验证控制器的跟踪精度。

图 6 为含有负载扰动的 3 种控制方法阶跃响应曲线，图中给出的方法都很好地抑制了超调现象。各控制方法进入稳态时间近似，PID 控制达到稳态时间为 2.24 s，ADRC 控制方法达到稳态时间为 2.11 s，PSO-ADRC 控制方法达到稳态时间为 2.06 s。在图 6 中  $t=5$  s 时刻添加 280 N·m 干扰信号，而 ADRC 与 PSO-ADRC 较传统 PID 控制也有更好的抗干扰能力，而 PSO-ADRC 的效果更好。

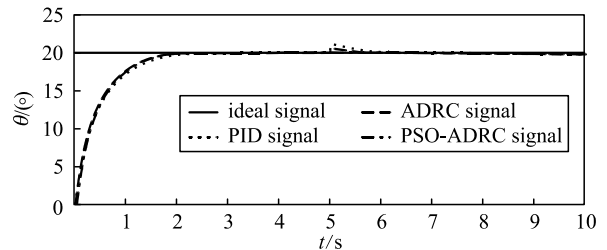


图 6 3 种控制方法含负载扰动的阶跃响应

正弦输入下的仿真和观测误差如图 7—8 所示。信号输入为  $\theta_r = \sin\pi t$ ，外界扰动设为  $d(t) = 5\sin 2t$ ，仿真时间 10 s。正弦跟踪仿真试验拟定为 3 种控制方法的对比，比较其位置跟踪性能。

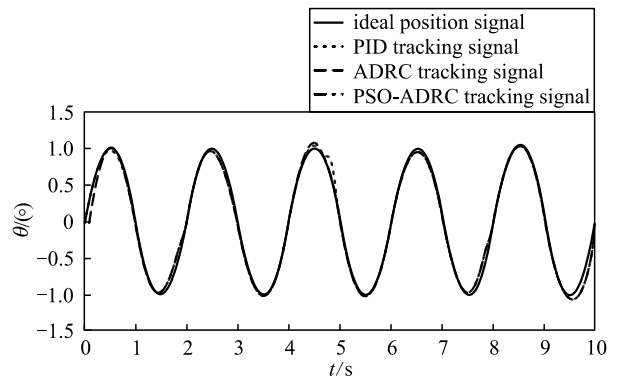


图 7 3 种控制方法的正弦跟踪

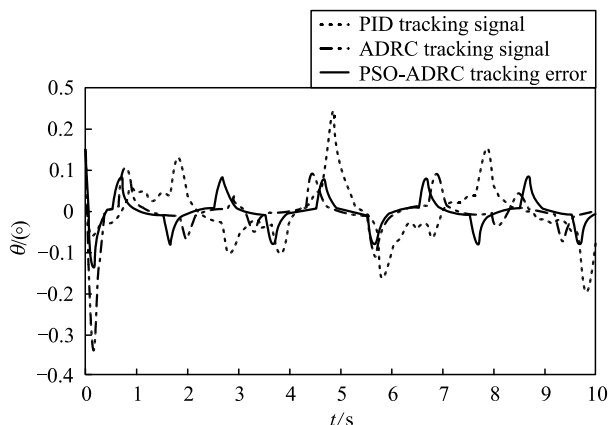


图 8 3 种控制方法正弦跟踪误差

由图 7 中可得出, 信号抵达稳态跟踪的阶段之后, PID 控制策略的信号跟踪误差最大, 在仿真的完整阶段中出现  $0.24^\circ$  的最大位置跟踪动态误差, 控制效果不够理想。ADRC 与 PSO-ADRC 跟踪效果优于传统 PID, 而采用 PSO-ADRC 跟踪效果最好, 最大动态跟踪误差为  $0.07^\circ$ , 控制效果良好。其中二者扩张状态观测器对未知部分估计比较如图 9 所示。仿真结果表明, PSO-ADRC 有更良好的跟踪精度与动态特性。

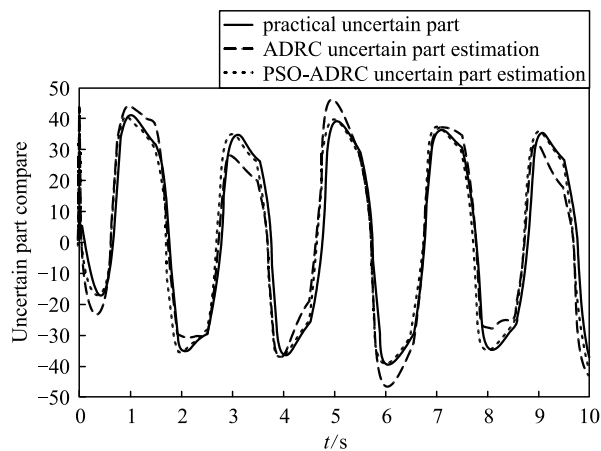


图 9 扩张状态观测器扰动估计比较

## 5 结论

笔者以 PMSM 驱动火箭炮交流伺服系统中的非线性问题为对象, 设计粒子群优化算法 PSO-ADRC 控制器, 基于 PSO 算法的寻优能力给出对 ADRC 控制器中 ESO 内参数整定的策略, 减少了控制计算量, 并将其与传统 PID 控制与 ADRC 控制进行比较。仿真结果表明, PSO-ADRC 具有较

强的抗干扰能力, 能够克服机理建模中参数未知和时变的问题, 具有良好的控制效果。

## 参考文献:

- [1] 杨军宁, 王惠方. 火箭炮在现代各军兵种的应用及发展趋势[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(1): 92-96.
- [2] 冯长根, 温波, 李才葆. 自行火炮行进间射击动力学研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(4): 457-461.
- [3] 李伟, 姜俊峰, 任海波, 等. 行进间火炮指向稳定跟踪系统建模与控制[J]. 兵工学报, 2018, 39(8): 26-37.
- [4] AHN K K, DIEP T U. Nonlinear PID Control to Improve The Control Performance of The Pneumatic Artificial Muscle Manipulator Using Neural Network[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2005, 19(1): 106-115.
- [5] 蒋梦琴. 基于射向保持的某火箭炮随动系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [6] 侯利民, 王巍. 永磁同步电机调速系统控制技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
- [7] 蒋玉新, 王平, 刘贝, 等. 基于自抗扰的无人机俯仰姿态控制[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 98-102.
- [8] 崔东明, 任俊杰, 黄济文, 等. 永磁同步电机调速系统自抗扰控制策略的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 14-20.
- [9] 蒋梦琴, 高强, 侯远龙, 等. 基于复瞄的某火箭炮位置伺服系统研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(1): 17-22.
- [10] 杨明轩. 粒子群算法的改进及应用研究[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2020.
- [11] 赵荣, 侯远龙, 侯润民. 基于 STM32 的交流伺服系统冗余控制研究[J]. 微电机, 2017, 50(2): 5.
- [12] HANJQ. From PID to Active Disturbance Rejection Control[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009, 56(3): 900-906.
- [13] 邵星灵, 王宏伦. 基于改进 sigmoid 函数的非线性跟踪微分器[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1116-1122.
- [14] 董晓飞. 基于免疫粒子群优化算法的超声速飞行器自抗扰控制器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [15] 姜昭钰, 高强, 周生龙, 等. 某交流伺服系统的免疫克隆粒子群优化自抗扰控制[J]. 兵工自动化, 2021, 40(11): 72-77.
- [16] 于明星, 杨丽, 舒丹丹, 等. PSO 在 PID 参数整定控制系统中的影响因素分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2020, 39(2): 18-23.