

# 面向高动态伺服系统的模糊自抗扰控制设计及仿真研究

王瑞琛

航天控制技术有限公司 贵州 贵阳 550000

**【摘要】**：针对高动态伺服系统中传统PI控制抗扰性差、标准自抗扰控制(ADRC)参数固定、自适应能力有限的问题，提出一种基于模糊逻辑的改进型自抗扰控制(Fuzzy-ADRC)策略。通过模糊推理系统依据误差及其变化率实时调节非线性状态误差反馈(NLSEF)增益，增强自适应能力；结合扩张状态观测器(ESO)实时估计并补偿扰动，提升鲁棒性。建立永磁直流电机伺服系统仿真模型，设置阶跃响应、正弦跟踪及多重负载扰动等工况进行验证。仿真结果表明，所提方法在超调量、抗扰动恢复时间及跟踪精度等方面均优于传统PI与标准ADRC。

**【关键词】**：伺服系统；自抗扰控制；模糊逻辑；扰动抑制；仿真分析

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.022

## 1 引言

高性能伺服系统广泛用于数控机床、机器人等领域，要求高精度、快响应与强抗扰。传统PID控制参数整定复杂，抗扰能力有限，而智能控制方法如模糊<sup>[1]</sup>、神经网络等虽具适应性，但实现复杂、实时性不足。自抗扰控制(ADRC)通过扩张状态观测器(ESO)统一估计并补偿扰动，降低对模型依赖，鲁棒性突出。然而，标准ADRC中非线性状态误差反馈参数固定，难以在全工况下兼顾快速性与稳定性。为此，本文提出Fuzzy-ADRC，将模糊逻辑融入ADRC框架，实现参数在线自适应调整，提升系统动态性能与适应性。

## 2 理论基础与系统建模

永磁同步电机的基本数学模型可由电枢电路方程和机械运动方程组成。电气方程如公式1所示：

$$u_a(t) = R i_a(t) + L \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1)$$

其中， $u_a(t)$ 为电枢电压， $R$ 为电枢电阻， $L$ 为电枢电感， $i_a(t)$ 为电枢电流， $e_b(t)$ 为反电动势。反电动势与转速呈线性关系，如下公式所示：

$$e_b(t) = K_e \omega(t) \quad (2)$$

其中 $K_e$ 为反电动势系数， $\omega(t)$ 为电机角速度。机械方程如公式3所示：

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T_c(t) - T_L(t) \quad (3)$$

其中， $J$ 为转动惯量， $B$ 为粘性阻尼系数， $T_c(t)$ 为电磁转矩， $K_t$ 为电磁转矩常数， $T_L(t)$ 为负载扰动转矩，由此可得系统的状态方程为。

$$\begin{cases} \dot{i}_a = -\frac{R}{L} i_a - \frac{K_e}{L} \omega + \frac{1}{L} u_a \\ \dot{\omega} = \frac{K_t}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L \end{cases} \quad (4)$$

该模型清晰揭示了伺服系统受电气与机械双重动态的影

响，并为控制器设计提供了理论依据。

自抗扰控制<sup>[2]</sup>的思想是将系统不确定性与外部扰动统一建模为“总和扰动”，并通过扩张状态观测器实时估计，从而补偿其影响。ADRC主要包含三部分，一是跟踪微分器(TD)，作用是对参考输入信号进行平滑处理，避免直接突变引起系统过冲。二是扩张状态观测器，ESO的任务是估计系统状态和扰动。三是非线性状态误差反馈(NLSEF)，在估计到扰动后，控制律可写为：

$$u_0 = k_p \cdot \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta) + k_d \cdot \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta) \quad (5)$$

其中 $e_1, e_2$ 分别为跟踪误差与误差微分， $k_p, k_d$ 为固定增益参数。ADRC的优点是对模型依赖弱，可用于非线性、时变系统；ESO能实时估计扰动并补偿，鲁棒性强；对于突发扰动，恢复速度快。但其不足在于NLSEF参数固定，难以应对全工况。模糊逻辑控制通过基于专家经验的“规则表”将误差 $e$ 与误差变化率 $ec$ 映射到参数调节上。例如，当 $|e|$ 与较大时，增大 $k_p$ 加快收敛；当 $|e|$ 较小而 $|ec|$ 较大时，减小 $k_p$ 、增大 $k_d$ 抑制超调。模糊规则使得ADRC控制律由“固定”转变为“自适应”，能够动态匹配不同运行工况。这为本文提出的Fuzzy-ADRC策略奠定了基础。

## 3 改进型Fuzzy-ADRC控制设计

本文提出的改进思路是：在ADRC框架中嵌入模糊逻辑推理系统，实时根据误差状态动态调整反馈参数，从而增强系统的自适应能力。

输入信号首先经跟踪微分器生成平滑过渡参考；ESO实时估计扰动及未建模动态；在NLSEF环节，模糊推理机根据误差 $e$ 与误差变化率 $ec$ 输出参数修正量，对原有 $k_p, k_d$ 进行调整，形成自适应控制律。最终控制器输出经补偿环节作用于电机系统，实现高动态伺服控制。模糊控制器的核心在于“模糊化—推理—解模糊化”三个环节。输入：误差 $e = r - y$ ，误差变化率 $ec = \dot{e}_0$ 。输出：比例增益修正量 $\Delta k_p$ ，微分增益修正量 $\Delta k_d$ 。

引入修正后的控制律为：

$$u_0 = (k_p + \Delta k_p(e, ec)) \cdot \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + (k_d + \Delta k_d(e, ec)) \cdot \text{fal}(ec, \alpha_2, \delta) \quad (6)$$

隶属度函数设计为一是误差与误差变化率均划分为五个模糊集：NB（负大）、NS（负小）、ZO（零）、PS（正小）、PB（正大）。二是隶属度函数采用三角型与梯形函数相结合，保证分布对称性和覆盖性。例如，误差  $e$  在  $[-1,1]$  区间内的模糊划分为：NB：中心值-1，范围  $[-1,-0.5]$ ；NS：中心值-0.5，范围  $[-1,0]$ ；ZO：中心值 0，范围  $[-0.5,0.5]$ ；PS：中心值 0.5，范围  $[0,1]$ ；PB：中心值 1，范围  $[0.5,1]$ 。

模糊规则库的设计依据专家经验和动态响应需求，例如，若  $e$  较大（正/负），则应提高  $k_p$ ，以快速收敛；若  $ec$  较大但  $e$  较小，则应降低  $k_p$ ，提高  $k_d$ ，以抑制超调；若  $e, ec$  均接近零，则保持适中参数，避免频繁调节。模糊推理结果需通过解模糊化得到清晰的控制参数调整值。本文采用重心法（Centroid Method），计算公式为：

$$\Delta k = \frac{\sum_i \mu_i \cdot k_i}{\sum_i \mu_i} \quad (7)$$

其中  $\mu_i$  为第  $i$  条规则的隶属度， $k_i$  为对应输出值。该方法计算结果平滑、稳定，适合实时控制。结合模糊推理结果，改进的控制律为：

$$u_0 = k'_p(e, ec) \cdot \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + k'_d(e, ec) \cdot \text{fal}(ec, \alpha_2, \delta) \quad (8)$$

其中：

$$k'_p(e, ec) = k_p + \Delta k_p(e, ec), k'_d(e, ec) = k_d + \Delta k_d(e, ec) \quad (9)$$

该设计使控制器具备以下特性，大误差时快速响应，提高收敛速度；小误差且误差变化率大时，自动减小增益，抑制超调；稳态误差小且平滑性好，减少执行机构抖动。

为了验证控制系统的稳定性，可采用李雅普诺夫方法进行简单分析。设定误差动态方程为：

$$\dot{e} = -k'_p(e, ec)e - k'_d(e, ec)ec + d(t) \quad (10)$$

其中  $d(t)$  为扰动项，选取李雅普诺夫函数：

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}ec^2 \quad (11)$$

对其求导：

$$\dot{V} = e\dot{e} + ec\dot{e}c \quad (12)$$

代入控制律后可得：

$$\dot{V} \leq -k'_p e^2 - k'_d ec^2 + e \cdot d(t) \quad (13)$$

由于  $\Delta k_p(e, ec)$ 、 $\Delta k_d(e, ec)$  始终非负，且当扰动受限时， $\dot{V}$  总体上为负半定，说明系统误差状态渐近稳定。

#### 4 仿真实验与结果分析

为全面验证所提 Fuzzy-ADRC 控制器的性能，本节在 MATLAB<sup>[3]</sup> 环境中搭建了永磁直流电机伺服控制系统的仿真

模型，并设计了包含动态跟踪与抗扰能力的复合测试工况。将所提算法与经典 PI 控制器及标准 ADRC 进行对比，从时域、频域及综合性能指标多个维度进行定量与定性分析。

仿真模型基于永磁直流电机的数学模型构建，仿真总时长为 2.0 秒，采样周期为 1 ms，以确保结果的精确性。对比的控制器参数设置如下：PI 控制器采用工程整定法，取  $k_p = 15, k_i = 8$ ；标准 ADRC 基于带宽参数化法，设置 ESO 带宽  $\omega_o = 50 \text{ rad/s}$ ，控制器带宽  $\omega_c = 50 \text{ rad/s}$ ；Fuzzy-ADRC 在标准 ADRC 框架上，嵌入第 3 节所设计的模糊参数自整定机制。

图 1 展示了三种控制器在复合参考信号（斜坡+阶跃）下的位置跟踪曲线。可以观察到 PI 控制器响应迟缓，在阶跃信号输入后产生了显著的超调，且进入稳态存在振荡，动态调节过程较长。标准 ADRC 得益于过渡过程安排，超调量 (22.08%) 明显减小，响应速度更快。所提 Fuzzy-ADRC 的控制效果最为理想。其响应曲线平滑且无超调，紧密跟随参考信号。这得益于模糊推理机制在动态过程中自适应地调整了 NLSEF 的增益，在大误差阶段增强控制作用以快速跟踪，在接近目标时减弱控制作用以有效抑制超调，实现了速度与稳定性的最优平衡。

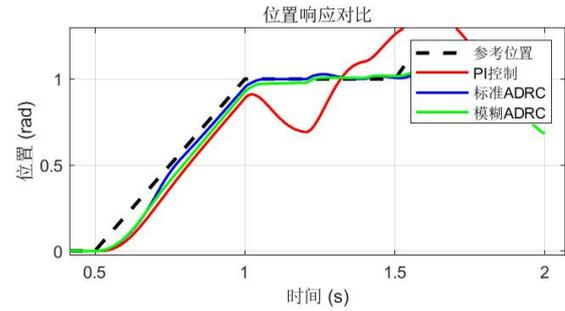


图 1 位置响应对比

跟踪误差对比曲线和负载扰动响应细节图更清晰地揭示了各控制器的性能差异。稳态精度：在  $t=0.5\text{s}$  至  $t=1.0\text{s}$  的斜坡跟踪阶段，Fuzzy-ADRC 的跟踪误差始终维持在最低水平，表明其具有更高的稳态跟踪精度。抗扰能力：在  $t=1.0\text{s}$  突加  $2.0\text{N}\cdot\text{m}$  负载转矩时，三种控制器的表现差异悬殊：PI 控制器的误差急剧增大至  $0.3086 \text{ rad}$ ，且恢复缓慢，恢复时间长达  $0.316 \text{ s}$ ，表明其抗扰能力严重不足。标准 ADRC 表现出强大的抗扰特性，最大误差仅为  $0.0478 \text{ rad}$ ，并在  $0.038 \text{ s}$  内迅速恢复，这完全得益于 ESO 对扰动的精准估计和实时补偿。Fuzzy-ADRC 的最大扰动误差 ( $0.0739 \text{ rad}$ ) 和恢复时间 ( $0.219 \text{ s}$ ) 虽略逊于标准 ADRC，但远优于 PI 控制器。更重要的是，其误差曲线变化更为平滑，没有出现标准 ADRC 在扰动瞬间的尖锐峰值，说明模糊逻辑的引入柔化了控制动作，减少了对执行机构的冲击。

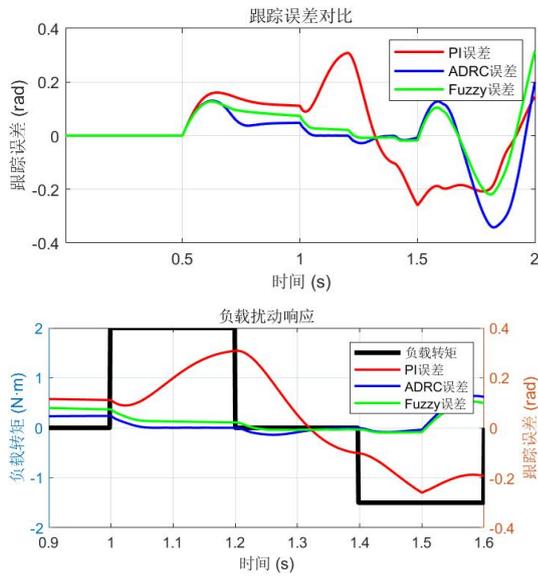


图 2 跟踪误差对比曲线和负载扰动响应

结果表明，所提出的 Fuzzy-ADRC 控制器综合性能最佳。它不仅在动态响应上超越了 PI 控制器，更通过引入智能自适应机制，弥补了标准 ADRC 在参数固定方面的不足，在控制精度、响应平滑性和鲁棒性之间取得了卓越的平衡。

## 5 结论

本文设计了一种用于高动态伺服系统的模糊自抗扰控制器。该控制器通过模糊逻辑实时优化 ADRC 的非线性反馈参数，有效增强了系统的自适应能力和动态性能。仿真研究结果表明，所提出的 Fuzzy-ADRC 策略综合了模糊控制的自适应优势和 ADRC 的强抗扰动能力。在保证系统稳定性的前提下，该策略在动态响应超调、抗扰动能力以及综合跟踪精度方面均优于传统 PI 控制器和标准 ADRC。

未来的研究工作将集中于将该算法应用于实际伺服控制平台，并探索更先进的智能优化算法用于 ADRC 参数的自动化整定。

## 参考文献:

- [1] 李士勇.模糊控制·神经控制和智能控制论[M].哈尔滨工业大学出版社,1996.
- [2] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前沿科学,2007(1):24-31.
- [3] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].电子工业出版社,2004.