

# 基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法研究

韩明秀, 王海红

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 针对一类非线性系统在持续扰动下的控制问题, 设计基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法; 首先, 引入 U 模型方法进行被控对象建模, 提高处理非线性系统的能力, 结合自抗扰控制方法, 设计基于 U 模型的改进自抗扰控制器; 在非线反馈环节引入模糊免疫方法实现非线性智能反馈, 设计基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统; 最后仿真实验表明: 基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法在保持了基于 U 模型的自抗扰控制的简洁性和良好抗扰性能的基础上, 简化了控制器参数调节过程, 在持续未知扰动下的跟踪速度、精度都更优。

**关键词:** U 模型; 模糊控制; 免疫算法; 自抗扰控制; 非线性系统

## Study on Fuzzy Immune Active Disturbance Rejection Control Method Based on U model

HAN Mingxiu, WANG Haihong

(Academy of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Aiming at a class of nonlinear system with unknown continuous disturbances control problems, the fuzzy immune active disturbance rejection control (ADRC) strategy based on U model is designed. Firstly, the U model method is introduced to model the plant to improve and deal with the ability of nonlinear systems. Combined with ADRC method, an improved ADRC based on the U model is designed. Then fuzzy immune method is introduced in the nonlinear feedback to realize the nonlinear intelligent feedback, the fuzzy immune ADRC strategy based on the U model is designed. The final simulation experiment shows that, the fuzzy immune ADRC strategy based on the U model simplifies the process of controller parameter adjustment, which maintains the simplicity and good anti-disturbance performance of the ADRC strategy based on the U model, and the tracking speed and accuracy of the continuous unknown disturbance are better than that of the ADRC based on the U model.

**Keywords:** U model; fuzzy control; immune algorithm; ADRC; nonlinear system

## 0 引言

非线性系统控制是自然界和工程领域中最一般的控制问题, 非线性系统往往具有复杂的特性, 很难建立精确数学模型。为获得良好的控制效果, 提出了分段线性化法、点线性化法和反推法等方法, 虽然这些方法可以解决部分非线性问题, 但在对非线性对象进行线性化的过程中, 会出现缺失项等问题。根据非线性模型的结构特点, NAR-MAX<sup>[1]</sup>、Hammerstein<sup>[2]</sup>等近似模型被应用在非线性系统控制中, 这些模型可以很好地描述非线性系统的结构, 但随着阶数增加, 参数变多, 从而模型结构辨识困难, 控制系统计算复杂<sup>[3]</sup>。

U 模型是朱全民教授提出的一种非线性系统近似模型设计方法<sup>[4]</sup>。该方法通过设计控制器所得的系统伪输入来构造非线性方程, 用牛顿迭代法求解方程得到非线性系统

的真实输入<sup>[5]</sup>, 从而完成控制系统设计。U 模型在非线控制系统设计中的如下特点使其得以广泛应用:

1) 在方法上, 通过 U 模型方法, 应用在线性系统的方法可以直接应用于非线性控制系统设计, 这显著降低了设计复杂度并有效地提供了直接的计算算法。

2) 在设计中, 它首先获得期望的受控对象输出, 然后在方程根求解中从 U 模型中计算出控制器输出。

3) 对于非线性控制系统设计, 它在更通用和更有效的框架内提供了新的见解和解决方案。

自 U 模型提出以来, 基于 U 模型的控制系统设计方法被广泛研究, 包括基于 U 模型的极点配置方法<sup>[6]</sup>, 将线性极点配置方法通过 U 模型设计方法应用到非线性控制系统设计中, 使得非线性模型的动态行为可以通过零极点位置进行确定; U 模型神经网络方法<sup>[7-8]</sup>, 利用 U 模型时变参数辨识的信息构建神经网络控制器, 对数据易得的非线性系

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-06-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104004, 61170258, 61103196)。

作者简介: 韩明秀(1997-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事控制技术方向的研究。

通讯作者: 王海红(1974-), 女, 山东青岛人, 博士, 副教授, 主要从事数据探测与处理、控制技术方向的研究。

引用格式: 韩明秀, 王海红. 基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 103-109.

统进行控制；U 模型自适应控制方法<sup>[9-11]</sup>，用于控制一类未知参数的随机非线性离散时间对象，将未知系统基于 U 模型框架对 U 模型表达式中的时变系数进行辨识，并按极点配置的方法设计极点配置控制器，实时更新参数进行控制器参数的适应性修正实现自适应控制。U 模型方法将非线性对象转化为关于控制输入的多项式形式，从而将线性系统的控制方法应用在解决非线性系统控制问题中，可以有效提高处理非线性系统的能力并简化非线性控制系统设计过程<sup>[12]</sup>。

实际控制过程中，扰动、噪声等不确定性因素不可避免，这些不确定性影响实际工程系统设计过程，因此，这也成为控制设计需要考虑的关键问题。针对这一问题，众多学者提出了许多相关的解决方案<sup>[13-14]</sup>，其中，自抗扰控制 (ADRC, active disturbance rejection control) 方法将系统所有未知因素归结为总扰动，设计有两个独立的控制回路：满足所需跟踪性能的非线性状态反馈 (NLSEF, nonlinear state error feedback) 控制器和估计系统干扰和不确定性的扩张状态观测器 (ESO, extended state observer)，能够解决系统在未知扰动存在下的跟踪控制问题<sup>[15]</sup>，便于控制设计。

U 模型作为非线性控制系统设计中一种有效近似模型设计方法，被应用在 ADRC 中，用 U 模型描述 ADRC 方法的受控对象，设计基于 U 模型的自抗扰 (UADRC, U model based active disturbance rejection control) 控制系统，通过设计包含被控对象逆模型的控制律，将受控对象转换为一个单元，最小化系统输入输出之间的滞后，简化了非线性系统 ADRC 方法的设计过程。在 UADRC 方法中如果 ESO 运行良好，受控对象也可以动态转换为一个单元，并且可以减少稳定高阶积分器的难度。相反，如果 ESO 性能不完美，则需要更强大的控制器来减少不准确的总干扰估计和不完美的变换或近似的影响，那么也可以获得更好的性能。除此之外，在基于 U 模型的 ADRC 设计过程中，控制器通常不能兼顾跟踪误差和系统响应速度<sup>[16]</sup>，因此，为解决上述问题，在 ESO 设计环节，基于 U 模型方法所描述系统进行扰动观测设计。在 NLSEF 环节，引入模糊免疫 (FI, fuzzy immune) 控制机制，将免疫机理与模糊算法相结合，设计基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制 (FI-UADRC, fuzzy immune active disturbance rejection control based on U model) 系统，通过抑制机理和反馈机理实现非线性智能反馈，解决稳定性和快速性之间的矛盾<sup>[17]</sup>。

综上所述，本文基于 UADRC 的抗扰性能和 FI 的自适应性，给出一种 FI-UADRC 控制系统设计方法，将实现过程安排如下：

- 1) 将非线性多项式模型转换为 U 模型表达式 (不是线性近似)，以降低计算难度。
- 2) 利用系统控制输入与受控对象 U 模型输出来构建扩张状态观测器估计扰动，进行补偿控制。
- 3) 在非线性反馈环节设计中引入模糊免疫机制，在跟踪控制过程中对扰动进行抑制的同时实现参数自整定。

4) 最后通过仿真实验验证 FI-UADRC 方法的有效性和优越性。

本文的其余部分分为以下几节。

在第 1 节中，给出了 U 模型定义并对 U 模型方法进行非线性模型转换的过程进行详细描述。在第 2 节中，逐步实现了基于 U 模型的模糊免疫控制系统设计过程，包括扩张状态观测器设计和模糊免疫控制器设计，在第 3 节中，对第 2 节相关参数设置进行分析，并对基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统设计方法实现步骤进行概括，为应用提供保障。在第 4 节中，引入相关引理进行一系列证明，证明所提出方法的理论可行性。在第 5 节中，选择已知系统的 Hammerstein 模型、CSTR 动态过程进行仿真实验，以展示 U 模型框架内模糊免疫自抗扰控制方法的可行性。在第 6 节中，分析实验结果对研究方法进行总结。

### 1 非线性系统模型转换

FI-UADRC 控制系统包括非线性系统 U 模型和基于 U 模型的控制器。本章介绍 U 模型的实现。

对于 SISO (单输入-单输出) 非线性系统，基于 U 模型的控制原理如图 1 所示。

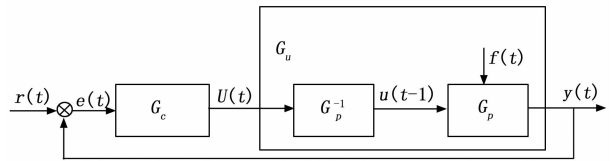


图 1 U 模型控制原理图

其中： $r(t)$  是期望输出， $y(t)$  是系统输出， $e(t)$  为系统跟踪误差， $f(t)$  表示系统测量噪声、模型误差、外部扰动等不确定因素， $G_p$  是 U 模型表达的非线性系统， $G_p^{-1}$  为非线性系统的逆， $G_u = G_p G_p^{-1}$ ， $G_c$  为由线性设计方法所得的控制器， $U(t)$  是控制器输出。

$f(t) (R^{M+1} \rightarrow R)$  为系统扰动项，满足 Lipschitz 条件且  $|f(t)| \leq \xi, \xi \in N$ ，基于 U 模型的非线性系统描述为：

$$y(t) = \sum_{j=0}^M a_j(t) u^j(t-1) + f(t) \quad (1)$$

其中： $y(t) \in R$  和  $u(t-1) \in R$  为在离散时刻  $t \in (1, 2, \dots)$  系统的输出、输入信号； $j$  代表系统阶数， $M$  代表  $u(t-1)$  的最高阶，参数  $a_j(t) \in R^{M+1}$  为过去时刻输入和输出的函数 ( $u(t-2), \dots, u(t-n), y(t-1), \dots, y(t-n)$ )。

$U(t)$  为通过设计  $G_c$  所得的系统的伪输入，是包含了非线性系统真实输入的非线性方程，可以通过求解  $U(t) = y(t)$  获得，通常采用牛顿迭代算法，算法描述如下：

$$u_{k+1}(t-1) = u_k(t-1) - \frac{\sum_{j=0}^M a_j(t) u_k^j(t-1) - U(t)}{\frac{\partial \left[ \sum_{j=0}^M a_j(t) u^j(t-1) \right]}{\partial u(t-1)}} \Bigg|_{u^{(t-1)} = u_k^{(t-1)}} \quad (2)$$

其中： $k$  是迭代的次数， $k > 0$ ， $u_{k+1}(t)$  是从  $u_k(t)$  迭代获

得的。可以看出, 在非线性系统 U 模型的转换过程中, 系统控制输入取自牛顿迭代公式的解, 基于 U 模型的控制系统设计不要求在设计中对非线性对象模型进行线性化, 只是使用线性设计方法直接设计基于非线性对象 U 模型的控制系统<sup>[18]</sup>, 因此, 非线性系统 U 模型的变换不会丢失原被控对象的任何信息, 保证了模型的高精度。

理论上, 牛顿迭代公式和 U 模型是互反函数, U 模型和非线性对象的度数都是相同的。如果 U 模型度和牛顿迭代都相同, 则称为完美匹配; 如果 U 模型度和牛顿迭代不同, 则称为不完全匹配。假设牛顿迭代算法和 U 模型的参数为  $\varphi$ , 当牛顿迭代度和 U 模型度结构相同时,  $\varphi = 1$ ; 当牛顿迭代度和 U 模型度结构不同时,  $\varphi \neq 1$ ; 当牛顿迭代为一阶时, 输出误差最大, 这种情况下, 范围值  $\varphi$  为  $1 \leq \varphi \leq \frac{U'}{U}$ ,  $U'$  为一阶表示,  $U$  表示实际的非线性模型, 因为一级形式存在干扰和误差,  $U'$  输出大于  $U$  输出。

综上所述, U 模型与牛顿迭代公式越匹配, 控制效果越好, 当转换后的系统模型完美匹配时,  $G_u = 1$ , 系统输出可以赶上系统输入。在实际控制系统设计过程中, 完美匹配是很难做到的, 主要原因是: 迭代算法的度数是有限的, 模型不能完全匹配。因此需要设计控制器进行控制。

设计控制器时, 可以先用线性控制方法设计  $U(t)$ , 然后用牛顿迭代算法求解, 最后输入到实际对象中得到实际输出, 下面将基于 U 模型设计方法展开  $G_c$  的实现过程。

## 2 FI-UADRC 控制系统设计

基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制器的设计过程主要分为两部分: ESO 环节和 NLSEF 环节。

本章将基于系统, 在 ESO 环节观测扰动  $f(t)$ , 实现扰动抑制补偿控制; 用 FI 控制方法设计 NLSEF 环节得到  $U(t)$ , 经反馈补偿获得  $U_1(t)$ , 通过式求解  $U_1(t) = y(t)$  获得控制率跟踪期望输出  $r(t)$ , 实现如下控制目标:

$$e(t) \rightarrow 0 \tag{3}$$

且  $|e(\infty)| \leq \zeta, \zeta \in N$ 。详细实现如下所述。

### 2.1 ESO (扩张状态观测器) 设计

扰动因素在非线性系统控制过程中不可避免, 为实现控制目标, 针对抵抗扰动这一控制需求, 设计有 ESO 环节对总扰动进行估计补偿, 从而保证控制系统对未知干扰具有足够的鲁棒性<sup>[19]</sup>。

针对系统中扰动项  $f(t)$ , 设计系统伪输入  $U_1(t)$ , 使得:

$$U_1(t) = y(t) = \sum_{j=0}^M a_j(t) u^j(t-1) \tag{4}$$

基于 U 模型的自抗扰控制思想中, 受扰动影响的系统输出  $y$  可以描述为:

$$\dot{y} = f + U_1 \tag{5}$$

采用如下所示的 ESO 环节对扰动进行观测<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = y - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 \epsilon_1 + U \\ \dot{z}_2 = \beta_2 \epsilon_1 \end{cases} \tag{6}$$

其中:  $z_1, z_2$  为 ESO 观测输出, 分别描述系统输出  $y$  和总扰动  $f$  的观测量,  $\epsilon_1$  为系统输出的观测误差,  $\beta_1, \beta_2$  为 ESO 的可调参数, 和仿真步长  $h$  有关<sup>[20]</sup>。为消除影响, 将  $U_1$  设计为:

$$U_1 = U - z_2 \tag{7}$$

将式 (7) 代入式 (3) 则有:

$$\dot{y} = f + U - z_2 \approx U \tag{8}$$

扰动补偿过程如图 2 所示。

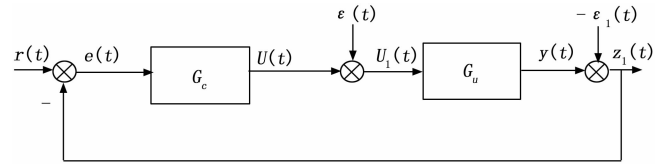


图 2 扰动补偿过程示意图

综上所述, 理想情况下当  $\epsilon = 0$  时,  $f$  对系统的影响能够通过式 (6) 进行完全补偿。 $\epsilon = f - z_2$  为扰动观测误差, 同样, 当  $\epsilon_1 = 0$  时系统误差通过期望输出  $r(t)$  和系统输出的观测值  $z_1$  描述如下所示:

$$e(t) = r(t) - z_1 \tag{9}$$

在自抗扰方法的实际应用过程中法发现,  $\epsilon_1, \epsilon$  可以通过选择合适的观测器带宽  $\omega_0$  来尽可能减小, 规避因 ESO 设计不当对控制效果产生的不良影响<sup>[21]</sup>。

### 2.2 FI 控制器设计

在基于 U 模型的自抗扰方法中, 非线性反馈控制环节参数整定过程自适应性较差, 不能兼顾动态性能和静态性能、期望值跟踪和扰动抑制之间的协调关系<sup>[16]</sup>, 为此引入模糊免疫机制<sup>[17]</sup>。免疫控制是利用免疫系统对抗原的适应性调节功能, 达到良好的控制效果。因此, 控制系统具有很强的鲁棒性。

免疫系统对于入侵抗原的响应迅速而稳定。一方面抗体要快速消除外来入侵, 另一方面抗体浓度不能太高, 所以必须控制抗体浓度。免疫系统可以产生抗体来抵抗入侵的抗原, 抗体是问题的关键。生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成, 淋巴细胞主要由 T 细胞和 B 细胞组成, T 细胞分为 TH (辅助细胞) 和 TS (抑制细胞)。当抗原进入体内并被周围细胞消化后, T 细胞会收到信息然后刺激 B 细胞产生抗体来消除抗原。抗原增多, TH 细胞增多, TS 细胞减少, 从而产生较多的 B 细胞。相反, TH 细胞变少, TS 细胞增多, B 细胞减少。很快, 免疫反馈系统在抑制机理和反馈机理的共同作用下会趋于平衡<sup>[22]</sup>。第  $j$  代的抗原数量可以等效于控制系统第  $t$  个采样时刻的给定值与输出值的偏差  $e(t)$ , 第  $j$  代抗原刺激产生的 TH 细胞数量为  $TH(j)$ , TS 细胞对 B 细胞的抑制作用为  $TS(j)$ , 则第  $j$  代 B 细胞所受刺激为:

$$S(j) = TH(j) - TS(j) \tag{10}$$

其中:  $TH(j) = k_1 e(t), TS(j) = k_2 g(\Delta s(j)) e(t)$ , 第  $j$  代 B 细胞浓度  $S(j)$  相当于第  $t$  个采样时刻的模糊免疫控制器输出  $U(t)$ , 则有:

$$U(t) = (k_1 - k_2 g(U(t), \Delta U(t)))e(t) = K(1 - \rho g(U(t), \Delta U(t)))e(t) \quad (11)$$

式中,  $k_1$  为促进因子,  $k_2$  为抑制因子,  $K = k_1, \rho = \frac{k_2}{k_1}$  表示 TS 与 TH 作用的比例系数,  $\Delta U(t) = U(t) - U(t-1)$  为模糊免疫控制器输出的增量,  $g(*)$  ( $*$  表示  $U(t), \Delta U(t)$ ) 为利用模糊规则根据  $U(t), \Delta U(t)$  逼近的非线性函数。

设参数  $K(1 - \rho g(U(t), \Delta U(t))) = K^*$ , 通过一般系统阶跃响应特性对参数变化进行分析: 在系统响应上升到达稳态值之前, 为了加快系统的响应速度, 参数  $K^*$  的初始值应该比较大。同时, 为尽量避免超调, 当误差值  $e(t)$  逐渐减小时, 参数  $K^*$  也应随之减小。在响应从稳态值上升到达峰值之前的阶段, 为了增加控制器的抑制作用, 减小系统的超调量, 应逐渐减小参数  $K^*$ 。从峰值回落到稳态值的阶段, 为了使系统的实际输出快速回到期望点, 避免大惯量, 应逐渐减小参数  $K^*$ 。在从峰值回落到期望值的惯性调节阶段, 为了减小误差  $e(t)$ , 参数  $K^*$  应该增加, 这与响应从稳态值上升到达峰值之前的阶段相同。综上所述,  $K^*$  随误差  $e(t)$  的变化规律为: 当  $e(t) \rightarrow \pm\infty$  时,  $K^*$  取最大值。  $e(t) = 0$  时,  $K^*$  取最小值;  $K$  影响  $K^*$  的变化区间,  $K^*$  的变化率可以通过改变  $\rho$  来调整。

由以上分析可以看出, 免疫机制将控制目标转化为参数  $K, \rho$  的调节,  $K$  影响系统响应速度, 间接影响稳态误差,  $\rho$  影响系统的稳定度。由此可以看出, 模糊免疫控制的优势是可以通过调整参数  $K, \rho$  来解决响应速度和超调之间的冲突, 牺牲了系统复杂度, 但提升了控制器自适应能力<sup>[23]</sup>。

### 3 FI-UADRC 参数设置

基于上述分析, 为实现扰动抑制和跟踪控制两个控制目标, 将模糊免疫与基于 U 模型的自抗扰控制方法相结合, 采用 U 模型的控制方法对非线性系统进行处理所得的 FI-UADRC 控制系统框架如图 3 所示。

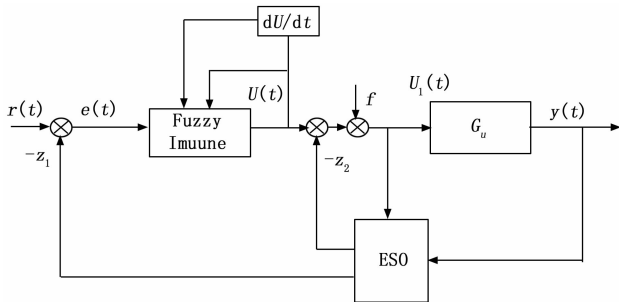


图 3 FI-UADRC 控制系统框架图

基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统控制方程有:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = y - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 \epsilon_1 + U(t) \\ \dot{z}_2 = \beta_2 \epsilon_1 \\ U(t) = K(1 - \rho g(U_1(t), \Delta U_1(t)))e(t) \\ U_1(t) = U(t) - z_2 = y(t) - \sum_{j=0}^M a_j(t)u^j(t-1) + f_j(t) \end{cases}$$

$$(j = 1, 2, \dots, n-1) \quad (12)$$

系统可调节参数有模糊免疫控制环节的  $K, \rho, g(*)$  和 ESO 环节的  $\beta_1, \beta_2$ 。有仿真研究表明  $\beta_1, \beta_2$  分别和仿真步长  $h$  以及  $1/5h^2$  成反比<sup>[24]</sup>。利用模糊规则可以逼近任意非线性函数, 本文设计一个二维的模糊调节器来逼近非线性函数  $g(*)$ ,  $U(t), \Delta U(t)$  的取值范围<sup>[25]</sup>可得:

$$\begin{cases} U = [-5\%U, 5\%U] \\ \Delta U = [-20\%U, 20\%U] \end{cases} \quad (13)$$

设计  $U(t), \Delta U(t) = \{1, -1\}$ , 模糊子集为“正”(P)和“负”(N), 则模糊比例因子<sup>[25]</sup>为:

$$k_U = \frac{1}{U(t) \times 5\%}, k_{\Delta U} = \frac{1}{\Delta U(t) \times 20\%}$$

设计  $g(*)$  的模糊集域为  $\{1, 0, -1\}$ , 模糊集为“正”(P), “零”(Z)和“负”(N)。模糊推理采用 Zadeh 的模糊逻辑 AND 操作, 并采用常用的 mom 反模糊化方法得到  $g(*)$ <sup>[26]</sup>, 则有:

$$-1 \leq g(*) \leq 1, K > 0, \rho > 0 \quad (14)$$

根据模糊语言规则, 当  $U(t)$  和  $\Delta U(t)$  正向增加时, 为了减小超调, 应使  $g(*)$  减小从而增大  $K^*$ 。当  $U(t)$  和  $\Delta U(t)$  都处在中间值时, 为了防止偏差  $\Delta U(t)$  急剧变化, 加快系统响应, 应使  $g(*)$  增大从而减小  $K^*$ 。当偏差  $\Delta U(t)$  减小时, 应适当增大  $g(*)$ , 保持系统稳定。综上, 模糊规则设置如下:

表 1  $g(*)$  模糊规则表

$U(t)$	$\Delta U(t)$	$g(*)$
P	P	N
P	N	Z
N	P	Z
N	N	P

采用三角形隶属度函数且所有隶属度函数都定义在整个  $(-\infty, +\infty)$  区间, 如图 4~5 所示。

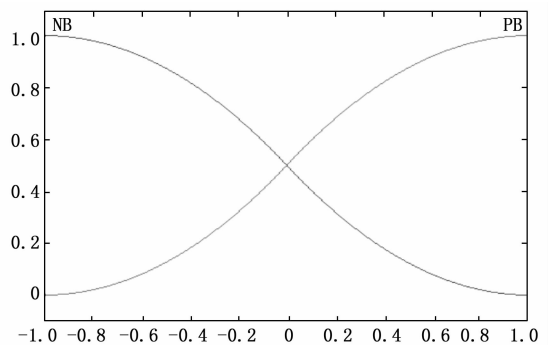


图 4  $U(t), \Delta U(t)$  隶属度函数

综上所述, FI-UADRC 控制系统实现过程为:

Step1: 根据第 4 节中所给方法选择  $g(*)$  模糊集, 定义图 4、5 输入输出隶属度函数, 建立表 1 所示的模糊控制表, 根据模糊规则进行模糊推理得出  $g(*)$ ;

Step2: 将 Step1 所得  $g(*)$  代入式 (11) 求得控制器

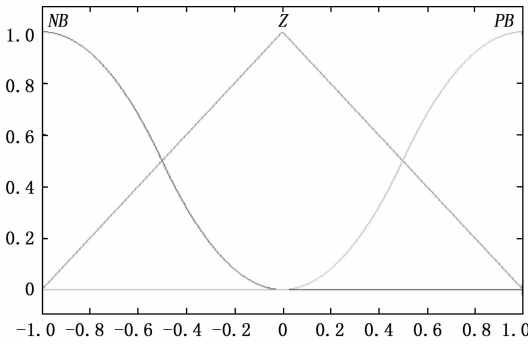


图 5  $g(*)$  隶属度函数

输出  $U(t)$ , 同式 (6) 代入式 (7), 求得扰动补偿后的控制器输出  $U_1(t)$ ;

Step3: 由式 (6) 所得  $z_1, z_2$  作为扩张观测反馈量, 对扰动  $f$  进行补偿, 实现式 (4);

Step4: 根据  $U(t), \Delta U(t)$  按表 3 规则, 修正式 (2) 参数  $g(*)$ , 更新  $U_1(t)$ ;

Step5: 将所得  $U_1(t)$  代入式 (4);

Step6: 由牛顿迭代法求解式 (4) 得  $u(t-1)$ 。

下面将基于以上设计思路, 选用非线性系统模型做 U 模型转换, 进行系统分析和仿真实验。

#### 4 系统分析

从图 2 可以看出, 当  $G_n = 1$  时系统为线性, 闭环系统输出取决于  $r(t), \varepsilon(t), \varepsilon_1(t)$ 。对于观测的系统输出误差  $\varepsilon_1$  和总干扰误差  $\varepsilon$  有以下引理:

引理 1: 存在观测带宽  $\omega_0$ , 使得当  $f$  变化率有界时,  $\varepsilon_1, \varepsilon$  在有限时间内是有界的<sup>[27]</sup>。估计误差的界限与观测带宽成反比。

引理 2: 对于一个工程系统来说, 它的力量总是有限的, 因此, 可以合理地假设总扰动的变化率是有界的。

基于引理 1、2 及文献 [16],  $|\varepsilon(t)| \leq \sigma, |\varepsilon_1(t)| \leq \sigma, \sigma > 0$ , 从而  $\varepsilon(t), \varepsilon_1(t)$  是图 2 所示闭环系统的有界输入信号。设  $\varepsilon(t) = \sigma \sin \omega t, \varepsilon_1(t) = \sigma \sin \omega_1 t, r(t) = A \cdot 1(t)$  ( $A$  和  $1(t)$  分别表示信号幅度和单位阶跃信号), 则有:

$$\begin{cases} y(t) = y_r(t) + y_\varepsilon(t) + y_{\varepsilon_1}(t) \\ y_r(t) = \frac{K(1 - \rho g(*) )}{1 + K(1 - \rho g(*) )} \\ y_\varepsilon(t) = -\frac{\sigma(\cos(\omega t) - 1)}{\omega(1 + K(1 - \rho g(*) ) )} \\ y_{\varepsilon_1}(t) = -\frac{K(1 - \rho g(*) ) \sin(\omega_1 t)}{1 + K(1 - \rho g(*) )} \end{cases} \quad (15)$$

稳态跟踪误差为:

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} (r(t) - y_r(t) - y_\varepsilon(t) - y_{\varepsilon_1}(t)) = A - \frac{A}{1 + K(1 - \rho g(*) )} + \frac{\sigma * K(1 - \rho g(*) ) * \sin(\omega_1 t)}{1 + K(1 - \rho g(*) )} + \frac{\sigma * (\cos \omega t - 1)}{\omega(1 + K(1 - \rho g(*) ) )} \quad (16)$$

从而有:

$$|e(\infty)| \leq \frac{A + \sigma K(1 - \rho g(*) )}{1 + K(1 - \rho g(*) )} \leq \frac{A - \sigma}{1 + K(1 - \rho g(*) )} + \sigma \quad (17)$$

由式 (17) 可以看出, 稳态误差同观测误差成正比, 同时, 分别与  $\rho, K$  成正比和反比。为实现式控制目标, 适当增大  $\rho$  可以减小系统超调量, 通过提高 ESO 估计能力也可以减小误差, 本文取  $\omega_0 = 1/2h$ <sup>[28]</sup> 来减小观测误差的影响。

#### 5 仿真实验

为了验证 FI-UADRC 控制系统的有效性和优越性, 做如下仿真实验进行说明。

仿真 1: 为验证 U 模型方法可以简化控制器设计中的计算过程, 采用文献 [6] 中 4.1 所示 Hammerstein 模型进行仿真。

$$\begin{cases} x(t) = 1 + u(t) - u^2(t) + 0.2u^3(t) \\ y(t) = 0.5y(t-1) + x(t-1) + 0.1x(t-2) \end{cases} \quad (18)$$

首先将式转换为 U 模型形式:

$$y(t) = \alpha_0(t) + \alpha_1(t)u(t-1) + \alpha_2(t)u^2(t-1) + \alpha_3(t)u^3(t-1) \quad (19)$$

$$\alpha_0(t) = 0.5y(t-1) + 1 + 0.3x(t-2), \alpha_1(t) = 1, \alpha_3(t) = 0.2。$$

将式 (12) 与 (19) 联立, 通过式 (2) 进行迭代可得非线性系统真实控制输入  $u(t-1)$ 。

仿真步长为 1,  $K = 0.3, \rho = 0.3$ 。假设扰动项  $g(t) = 0.1 \sin(0.03\pi t)$ , 仿真结果如图 6、7 所示。

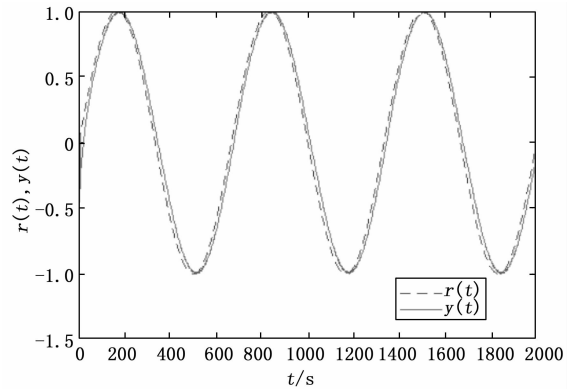


图 6 系统输出  $y(t)$  与期望输出  $r(t)$

由仿真 1 过程可以看出, U 模型表达形式可以从已知模型转换而来, 充分利用了基于模型的控制系统设计方法的已有研究成果。U 模型方法所描述的系统是包含系统真实控制输入的多项式结构, 基于这种多项式结构, 采用牛顿迭代方法求解非线性数学方程就能求取系统控制输入, 求解过程简单。且所得的控制输入平滑, 系统输出能较好跟踪期望输出, 保证了良好跟踪控制效果。

仿真 2: 为体现 FI-UADRC 控制方法的优越性, 采用 FI-UADRC, UADRC 两种方法对 CSTR 动态过程进行仿真实验。其中  $y$  描述反应釜输出,  $u$  表示反应物流量, 描述为

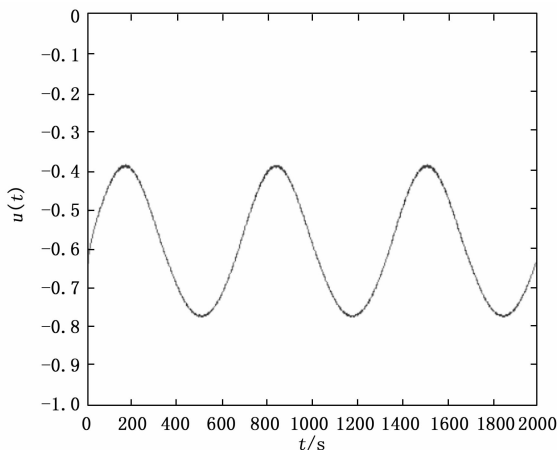


图 7 系统控制输入  $u(t-1)$

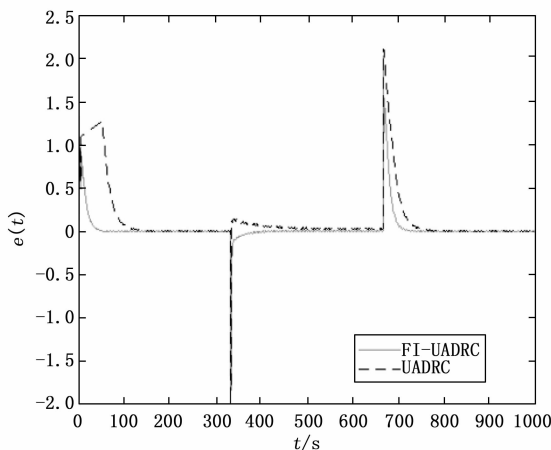


图 9 FI-ADRC 控制 CSTR 过程系统误差  $e(t)$

反应釜控制输入。在控制器和被控系统之间加入零阶保持器，CSTR 动态过程取采样周期  $T_s = 0.05$ ，采用 U 模型方法可以描述为<sup>[29]</sup>：

$$y(t) = 0.8606y(t-1) - 0.0401y^2(t-1) + 0.0020y^3(t-1) + [0.0464 - 0.045y(t-1) + 0.0034y^2(t-1)]u(t-1) + [-0.0012 + 0.0013y(t-1)]u^2(t-1) \quad (20)$$

$K = 0.2, \rho = 0.3, h = 0.1$ ，设扰动具有  $g(t) = 5\sin(0.5t)$  形式，UADRC 参数设置同文献 [16]，控制效果对比如图 8~9 所示。

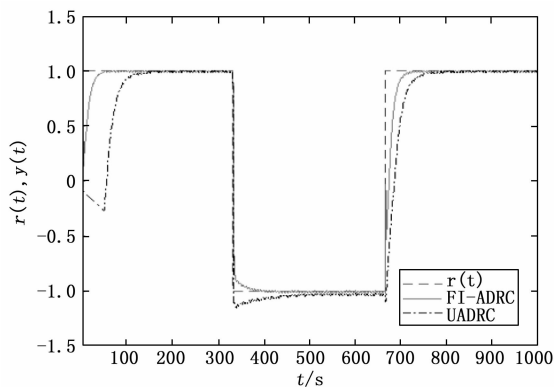


图 8 CSTR 系统输出  $y(t)$  和期望输出  $r(t)$

从图 8 可以看出，FI-UADRC 控制系统在持续扰动下仍能较好地跟踪期望输出轨迹，相较于 UADRC，调节时间短，跟踪误差小，具体数据如表 2 所示。

表 2 FI-UADRC 与 UADRC 动态性能对比数据

控制方法	调节时间/s	最大跟踪误差
FI-UADRC	57	1.527
UADRC	142	2.099

如图 9 所示，两种方法的系统误差均收敛到 0，但在期望值发生大的跳变时，两种方法的系统误差均出现一定波动，而基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统相对于改进前的 U 模型自抗扰方法对于系统本身的剧烈变化反应迅速，

在较短时间内回复稳态值。由仿真 2 实验结果可以看出，基于免疫控制的自适应调节功能，基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统具有更强的鲁棒性。

综合上述仿真实验分析，基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法求取系统控制输入过程简单，并且能够较为准确的跟踪理想输出，且在扰动存在的情况下，能够有效抵抗扰动对非线性系统的不良影响，使控制输入较为平滑。

## 6 结束语

本文针对一类非线性系统扰动抑制问题，引入 U 模型方法进行被控对象建模，有效降低了非线性系统控制律求解的计算难度。结合模糊免疫控制算法和 U 模型自抗扰控制方法提出基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制系统设计方法，设计扩张状态观测器，对系统不确定性以及外部扰动进行观测补偿，实现扰动抑制，改进 U 模型自抗扰控制方法的非线性反馈环节，实现系统扰动下的精确跟踪控制。通过仿真对比验证，可以看出基于 U 模型的模糊免疫自抗扰控制方法抗扰性能优于 U 模型自抗扰控制方法，跟踪误差更小，反应速度更快，有效抑制扰动影响的同时实现了跟踪控制。

## 参考文献：

- [1] GU Y, YANG Y, DEWALD J, et al. Nonlinear modeling of cortical responses to mechanical wrist perturbations using the NARMAX method [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020 (99): 1.
- [2] GREBLICKI W, PAWLAK M. Hammerstein system identification with the nearest neighbor algorithm [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2017 (8): 4746 - 4757.
- [3] 朱 峰, 于佐军, 胡云朕. 基于 U 模型的非线性系统的比例积分型广义预测控制 [C] //第 25 届中国过程控制会议论文集, 2014: 958 - 965.
- [4] ZHU Q M, ZHAO D Y, ZHANG J. A general U-block model-based design procedure for nonlinear polynomial control systems [J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47 (14):

3465 - 3475.

- [5] ZHU Q M, WARWICK K, DOUCE J L. Adaptive general predictive controller for nonlinear systems [J]. IEE Proceedings of Control Theory Application, 1991, 138 (1): 33 - 40.
- [6] ZHU Q M, GUO L Z. A pole placement controller for nonlinear dynamic plant [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2002, 216 (16): 467 - 476.
- [7] XU F, CHENG Y, REN H, et al. Research on adaptive neural network control system based on nonlinear U-model with time-varying delay [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014: 1 - 7.
- [8] ZHU Q M, ZHANG W, ZHANG J, et al. U-neural network enhanced control of nonlinear dynamic systems [J]. Neuro computing, 2019, 352: 12 - 21.
- [9] BUTT N, SHAFIQ M. Adaptive tracking of non-linear dynamic plants, using the U-model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2006, 220 (6): 473 - 487.
- [10] SHAFIQ M, BUTT N R. Real-time adaptive tracking of DC motor speed using U-model based IMC [J]. Automatic Control & Computer Sciences, 2007, 41 (1): 31 - 38.
- [11] SHAFIQ M, BUTT N R. U-model based adaptive IMC for nonlinear dynamic plants [C] // IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, IEEE, 2006.
- [12] GENG X, ZHU Q, LIU T, et al. U-model based predictive control for nonlinear processes with input delay [J]. Journal of Process Control, 2019, 75: 156 - 170.
- [13] WEI W, DUAN B, ZUO M, et al. Active disturbance rejection control for a piezoelectric nano-positioning system: A U-model approach [J]. Measurement and Control, 2021, 54 (3/4): 506 - 518.
- [14] WEI W, DUAN B, ZUO M, et al. Active disturbance rejection control for a piezoelectric nano-positioning system: a U-model approach [J]. Measurement and Control - London - Institute of Measurement and Control, 2021 (1): 002029 402110000.
- [15] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [16] NAN W W, CHEN Z Y, ZHANG Z W, et al. U-model-based active disturbance rejection control for the dissolved oxygen in 节点拓扑相关度的配电网多目标重构 [J]. 南方电网技术, 2021, 15 (9): 16 - 23.
- (上接第 56 页)
- [16] 张海利, 王普, 高学金, 等. 基于批次图像化的卷积自编码故障监测方法 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (6): 1361 - 1367.
- [17] 张磊, 杨宸, 叶婧, 等. 计及风电场异步协同的调频指令最优动态分配方法研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (12): 18 - 26.
- [18] 李嘉文, 余涛, 张孝顺, 等. 基于改进深度确定性梯度算法的 AGC 发电功率指令分配方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (21): 7198 - 7212.
- [19] 齐先军, 周沐聪, 张晶晶, 等. 高分辨率 DG 预测数据下基于 a wastewater treatment process [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020. doi: 10.1155/2020/3507910.
- [17] PENG Y, LUO X, WEI W. A new control method based on artificial immune adaptive strategy [J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2013, 19 (4): 3 - 8.
- [18] 徐凤霞, 朱全民, 赵东亚, 等. 基于 U 模型的非线性控制系统设计方法十年发展综述 [J]. 控制与决策, 2013, 28 (7): 961 - 971, 977.
- [19] 魏伟, 夏鹏飞, 左敏. 压电驱动纳米定位台的线性自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (11): 1577 - 1590.
- [20] 徐亦卿, 陆海澎. 基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 123 - 128.
- [21] 赵栋, 王京, 肖雄. 电励磁同步电机的 U 模型自抗扰无速度传感器控制 [J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39 (4): 295 - 301.
- [22] LIU X, LIN T, LI Z. Fuzzy active disturbance rejection control of three-motor synchronous system [J]. Control Engineering & Applied Informatics, 2011, 13 (4): 51 - 57.
- [23] DING Y, REN L. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia [C] // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, IEEE, 2000.
- [24] LI H, CHEN L. Fuzzy immune PSD control of non-linear systems [J]. Control Engineering of China, 2008, 15: 168 - 170.
- [25] XU F X, WANG Z L, SONG X H, et al. The fuzzy PID controller design base on nonlinear U-model [C] // Proceedings of the 30th China Conference on Control and Decision Making, 2018: 1226 - 1231.
- [26] WANG M, FENG S, HE C, et al. An artificial immune system algorithm with social learning and its application in industrial PID controller design [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017: 1 - 13.
- [27] ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17 (9): 1016 - 1025.
- [28] WEI W, XUE W, LI D. On disturbance rejection in magnetic levitation [J]. Control Engineering Practice, 2019, 82: 24 - 35.
- [29] KAZANTZIS N, KRAVARIS C. Time-discretisation of nonlinear control systems via Taylor method [J]. Computers and Chem. Engineering, 1999, 23: 769 - 784.
- [20] 神显豪, 李驰, 桂琼, 等. 基于卷积神经网络的网络节点异常数据检测方法 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (22): 18 - 23.
- [21] 孙瑾铃, 张伟涛, 楼顺天. 基于等变化自适应源分离算法的滚动轴承故障信号自适应盲提取 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (10): 2471 - 2477.
- [22] 王继军, 李国祥, 夏国恩, 等. 图像插值空间完全可逆可分离密文域信息隐藏算法 [J]. 电子学报, 2020, 48 (1): 92 - 100.