

一类非线性离散系统的无模型控制技术 研究



陈世龙, 王宇轩, 廖斌, 杨善文, 王源*

扬州大学机械工程学院, 江苏扬州 225000

摘要: 本文提出一种改进型无模型自适应控制 (model-free adaptive control, MFAC) 方法, 以解决原始 MFAC 方法易出现的输出振荡与超调问题。针对一类离散时间非线性单输入单输出系统, 利用系统运行过程中采集得到的历史输入/输出信息实时在线构建与原系统等价的显式数据模型, 基于此模型设计控制方案, 实现控制过程的无模型特性。利用数据模型提出新型最优化指标函数, 在原始 MFAC 方法最小化跟踪误差基础之上引入输入补偿项, 用以约束输出响应速率, 软化控制输入。当输出变化率过大时, 输入补偿项降低系统输入幅值以抑制振荡与超调现象, 实现输出响应与输入之间的自适应匹配。数值仿真结果表明: 与原始 MFAC 方法相比, 在响应时间相同的条件下, 改进型 MFAC 可显著抑制系统的输出振荡与超调, 闭环系统的输出波动明显减小, 正向超调量降低约 10%, 反向超调得到有效抑制, 闭环系统的动态响应更为平滑, 运行更加平稳。

关键词: 无模型; 补偿输入; 振荡与超调抑制; 数据模型

DOI: [10.57237/j.mse.2026.01.002](https://doi.org/10.57237/j.mse.2026.01.002)

Study on Model-Free Control of a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems

Chen Shilong, Wang Yuxuan, Liao Bin, Yang Shanwen, Wang Yuan*

School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China

Abstract: A modified model-free adaptive control (MFAC) approach is proposed to address output fluctuation and overshoot problems existing in the prototype MFAC. Targeting a class of discrete-time nonlinear single-input single-output systems, historical input/output information is applied to construct explicit data model which is equivalent to the plant model in a real-time online manner. Control scheme is designed based on the data model such that model-free characteristic in control process is realized. A novel optimization index function is proposed by using the data model. An input compensation term is introduced on the basis of minimizing the tracking error in the prototype MFAC for restraining output response speed and softening control input. The input amplitude is reduced by the input compensation term for restraining output fluctuation and overshoot when the output change rate is too large. Adaptive matching between the output response and the control input is also realized. Numerical simulation results show that, compared with the prototype MFAC, the modified MFAC can significantly suppress the system output oscillation and overshoot under the same response time conditions. The output fluctuation of the closed-loop system is significantly reduced. The positive overshoot

基金项目: 国家自然科学基金 (52405428).

*通信作者: 王源, bx1501038@163.com

收稿日期: 2025-12-08; 接受日期: 2026-03-18; 在线出版日期: 2026-03-24

<http://www.mechscieng.com>

is reduced by about 10%, and the negative overshoot is effectively suppressed. The dynamic response of the closed-loop system is smoother and the operation is more stable.

Keywords: Model-Free; Compensatory Input; Oscillation and Overshoot Suppression; Data Model

1 引言

近年来, 基于数学模型的控制方法被广泛应用于各类工程系统中。然而, 基于模型控制方法的闭环系统响应性能通常高度依赖于系统模型的准确性。由于实际系统中普遍存在时变、耦合、非线性及不确定性等特性, 因此, 精确的数学模型的建立不仅需要大量时间和资源投入, 而且难度也较大。随着信息技术的发展, 系统的动态特性可以直接从输入/输出传感器数据中挖掘得到。因此, 基于输入/输出传感器数据、无需依赖数学模型的无模型控制 (Model-Free Control, MFC) 方法逐渐成为一种有效且实际可行的控制策略。

总体而言, 现有无模型控制方法主要可分为两类。第一类方法假设控制器的结构形式已知, 例如, 比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 和多项式结构。其控制器参数 (如比例增益 (K_p)、积分增益 (K_i)、微分增益 (K_d) 等) 通过特定数学算法求得。常见方法包括: 虚拟参考反馈整定[1]、迭代反馈整定[2]、同时扰动随机逼近[3]、极值寻优控制[4]、智能算法参数自整定[5-7]、频域调节[8]、证伪控制[9]以及基于相关性的调节方法[10]等。然而, 当被控对象的动态特性未知或建模难度较大时, 由预设结构控制器产生的输入信号的最优性难以得到保证。第二类方法通过最小化自定义代价函数直接计算控制输入, 无需预先给定控制器结构形式。此类方法利用输入/输出数据来估计代价函数相对于控制输入的梯度, 从而实现输入信号的最优性能。在该领域中, 惰性学习控制[11]、迭代学习控制[12]、动态规划[13]以及无模型自适应控制[14-16] (Model-Free Adaptive Control, MFAC) 均具备代表性。

在众多 MFC 方法中, MFAC 以其简洁性与适应性受到广泛关注。在原始 MFAC 控制框架结构中, 未知系统模型被等价作为一种基于数据的模型。该数据模型通过输入增量与时变参数的乘积来表征系统动态, 控制过程仅依赖历史输入/输出数据[14]。时变参数的估计值可通过最小二乘法、投影算法及其改进版本[14]在

线获得。基于此数据模型, 控制器在每个采样时刻通过最小化当前时刻的跟踪误差来求取对应的最优控制量。由于系统所具有的非线性、耦合性及时变性等动态特征均被压缩至时变参数中, 闭环系统对内部动态变化和外部不确定性均具有较强的自适应能力。已有研究表明, 原始 MFAC 相较于传统比例-积分-微分[17]、虚拟参考反馈整定[18]及迭代反馈整定方法[18]具有显著优势。鉴于上述优点, 原始 MFAC 已广泛应用于液位控制[19]、伞降系统[20]、高阶非线性系统[7, 21]、风电并网系统[22]、多区域电力系统[23]、交通流控制[24]、焊接过程控制[25]及飞行控制[26]等多个领域。

尽管原始 MFAC 在理论与应用上均取得了显著成果, 但仍存在系统输出振荡与超调问题, 当系统跟踪误差较大时此现象更为明显。为此, 侯忠生和金尚泰[14]将广义预测控制机制引入原始 MFAC 控制框架, 提出了无模型自适应预测控制方法, 平滑和软化系统输入的同时可抑制振荡和超调 (system output fluctuation and overshoot, SOFO) 现象。仿真和实验验证表明, 抑制 SOFO 需要较大的预测时域长度, 导致闭环系统的响应延迟。此外, 较大的预测时域长度引发高维矩阵运算, 显著增加系统的实时计算负担。后续研究如 Corradini [27]及刘冬和杨光红[28]通过将预设性能控制理论与原始 MFAC 方法相结合, 使得系统能够满足 SOFO 的边界约束要求。但是, 由于系统动态特性未知, 边界曲线所需的梯度、初始值及终止值等特征参数难以确定。因此, 在控制初始阶段, 系统输出仍有可能出现越界现象。卜旭辉[29]对系统的输出直接进行限幅, 并将限幅后的输出值用于时变参数估计与控制系统设计, 但是仿真结果表明该方法的控制效果不能令人满意, 系统的输出上界值为 150, 实际输出值却达到 160。

综上所述, 目前针对原始 MFAC 中 SOFO 问题的研究仍然有限, 且现有改进方法均存在一定局限性。为进一步提升系统控制性能, 本文针对一类非线性离散时间单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 系统, 在原始 MFAC 框架基础上提出一种改进型无模型

自适应控制方法 (modified model-free adaptive control, MMFAC)。在原始 MFAC 方案的基础之上对最优化指标函数进行改进, 引入新的加权项, 对输出速率进行约束, 从而实现控制过程中快速性与平稳性的相互平衡。具体而言, 输出速率惩罚项所对应的输出变化项可视为一种“输出变化惩罚机制”, 用于抑制相邻采样时刻输出信号之间的剧烈波动。当输出变化较大时, 该惩罚项在指标函数中所占的比重随之增加, 从而促使控制器自动调整输入信号, 减小输出增量, 避免过快响应带来的系统振荡与超调。

2 预备知识

令 $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 分别表示相邻两个时刻的输出变化与相邻两个时刻的输入变化。

考虑一类离散时间非线性 SISO 系统:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)) \quad (1)$$

其中, 系统在 k 时刻的输出与输入分别为 $y(k) \in R, u(k) \in R$; n_y, n_u 为两个正整数, 其取值未知; 非线性函数 $f(\dots): R^{n_u+n_y+2} \mapsto R$ 的具体形式未知。

系统(1)满足以下假设条件。

假设 1 除少量离散时刻外, 函数 $f(\dots)$ 在其第 (n_y+2) 个变量的偏导数为连续函数。

假设 2 系统满足广义 Lipschitz 条件, 即存在常数 $b > 0$, 对任意 $k_1 \neq k_2$, $k_1, k_2 \geq 0$, $u(k_1) \neq u(k_2)$ 和 $i = 1, 2$ 的条件下有

$$|y(k_1+1) - y(k_2+1)| \leq b |u(k_1+1) - u(k_2+1)| \quad (2)$$

引理 1 [14]:

系统(1)满足假设 1 与假设 2。当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时, 一定存在一个时变参数 $\varphi_c(k) \in R$, 能够将系统(1)等效地表示为下列数据模型:

$$\Delta y(k+1) = \varphi_c(k) \Delta u(k) \quad (3)$$

并且对于任意时刻 k , $\varphi_c(k)$ 都有界, 即, $|\varphi_c(k)| \leq \bar{b}$ 。

引理 2 [14]:

时变参数 $\varphi_c(k)$ 可由如下算法实时在线估计

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_c(k) &= \hat{\varphi}_c(k-1) \\ &+ \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} (\Delta y(k) - \hat{\varphi}_c(k-1) \Delta u(k-1)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\eta \in (0, 1]$ 是加入的步长因子, $\hat{\varphi}_c(k)$ 为时变参数 $\varphi_c(k)$ 的估计值。当 $|\hat{\varphi}_c(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\varphi}_c(k)) \neq \text{sign}(\hat{\varphi}_c(1))$ 时, $\hat{\varphi}_c(k) = \hat{\varphi}_c(1)$, ε 是一个充分小的正数; $\mu > 0$ 是权重因子; $\hat{\varphi}_c(1)$ 是 $\hat{\varphi}_c(k)$ 的初值。

3 控制器设计

3.1 控制方案设计

考虑如下控制输入准则函数:

$$\begin{aligned} J(u(k)) &= |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 \\ &+ \lambda_1 |u(k) - u(k-1)|^2 \\ &+ \lambda_2 |y(k+1) - y(k)|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 控制输入的波动幅度受约束于 λ_1, λ_2 两个权重因子, 且 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$; $y^*(k+1)$ 表示期望输出信号。

将(3)带入(5)中, 得到:

$$\begin{aligned} J(\Delta u(k)) &= |y^*(k+1) - y(k) + \varphi_c(k) \Delta u(k)|^2 \\ &+ \lambda_1 |\Delta u(k)|^2 + \lambda_2 |\varphi_c(k) \Delta u(k)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

对 $\Delta u(k)$ 求导, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d\Delta u(k)} &= -2\varphi_c(k)[e(k) - \varphi_c(k)\Delta u(k)] \\ &+ 2[\lambda_1 + \lambda_2 \varphi_c^2(k)]\Delta u(k) \end{aligned} \quad (7)$$

进一步令 $\Delta u(k) \equiv 0$, 即可推导出对应的控制算法:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k)}{(1 + \lambda_2) \hat{\varphi}_c^2(k) + \lambda_1} (y^*(k+1) - y(k)) \quad (8)$$

其中, $\rho \in (0, 1)$ 是步长因子, 该参数的引入能够增强控制算法的适用性与鲁棒性。

在式(8)实际应用过程中, 以在线估计值 $\hat{\varphi}_c(k)$ 代替其实际值 $\varphi_c(k)$, 依旧采用式(4)对时变参数进行实时在线估计。

3.2 稳定性分析

为严格论证闭环系统的稳定性, 对于系统(1)还需

引入如下假设。

假设 3 对于给定的有界期望输出信号 $y^*(k+1)$ ，存在一个有界的 $u^*(k)$ ，使得系统输出能够精确跟踪该期望信号，即其输出收敛于期望信号 $y^*(k+1)$ 。

假设 4 对任意时刻 k 且 $\Delta u(k) \neq 0$ ，系统时变参数的符号不发生变化，即满足 $\varphi_c(k) > \varepsilon > 0$ 或 $\varphi_c(k) < -\varepsilon$ ， ε 是一个小正数。

定理 1 针对非线性系统(1)，在假设 1、假设 2、假设 3 及假设 4 均成立的条件下，当 $y^*(k+1) = y^* = \text{const}$ 时，采用 MMFAC 方案，则对于任意的 $\lambda_2 > 0$ 必然存在实数 $\lambda_{1\min} > 0$ ，使得当 $\lambda_1 > \lambda_{1\min}$ 时有

(1) 系统输出跟踪误差单调收敛，且 $\lim_{k \rightarrow \infty} |y^* - y(k+1)| = 0$ 。

(2) 闭环系统满足有界输入有界输出稳定，即输出序列 $\{y(k)\}$ 与输入序列 $\{u(k)\}$ 均有界的。

证明：

当出现 $|\hat{\varphi}_c(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\varphi}_c(k)) \neq \text{sign}(\hat{\varphi}_c(1))$ 等特例时，显然 $\varphi_c(k)$ 为有界量。

在一般情况下，引入时变参数的估计误差 $\tilde{\varphi}_c(k) = \hat{\varphi}_c(k) - \varphi_c(k)$ ，将其带入参数更新公式，并在参数估计算法(4)两边同时减去 $\varphi_c(k)$ ，可得：

$$\tilde{\varphi}_c(k) = \left[1 - \frac{\eta |\Delta u(k-1)|^2}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \right] \tilde{\varphi}_c(k-1) + \varphi_c(k-1) - \varphi_c(k) \quad (9)$$

对式(9)等号两边同时取绝对值，得：

$$|\tilde{\varphi}_c(k)| = \left[1 - \frac{\eta |\Delta u(k-1)|^2}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \right] |\tilde{\varphi}_c(k-1)| + |\varphi_c(k-1) - \varphi_c(k)| \quad (10)$$

其中，函数 $\frac{\eta |\Delta u(k-1)|^2}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2}$ 关于变量 $|\Delta u(k-1)|^2$ 是单调递增的，其最小值为 $\frac{\eta \varepsilon^2}{\mu + \varepsilon^2}$ 。那么当 $0 < \eta \leq 1$ 和 $\mu > 0$ 时，一定存在常数 d_1 满足

$$0 \leq \left[1 - \frac{\eta |\Delta u(k-1)|^2}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \right] \leq 1 - \frac{\eta \varepsilon^2}{\mu + \varepsilon^2} = d_1 < 1 \quad (11)$$

根据引理 1 中的结论 $|\varphi_c(k)| \leq \bar{b}$ 可知， $|\varphi_c(k-1) - \varphi_c(k)| \leq 2\bar{b}$ 。所以可得出如下不等式

$$\begin{aligned} |\tilde{\varphi}_c(k)| &\leq d_1 |\tilde{\varphi}_c(k-1)| + 2\bar{b} \\ &\leq d_1^2 |\tilde{\varphi}_c(k-2)| + 2d_1\bar{b} + 2\bar{b} \\ &\leq \dots \leq d_1^{k-1} |\tilde{\varphi}_c(1)| + \frac{2\bar{b}(1-d_1^{k-1})}{1-d_1} \end{aligned} \quad (12)$$

因此 $\tilde{\varphi}_c(k)$ 为有界量，又因为 $\varphi_c(k)$ 有界，故 $\varphi_c(k)$ 有界。

定义系统跟踪误差为：

$$e(k+1) = y^* - y(k+1) \quad (13)$$

将 MMFAC 数据模型(3)带入(13)并对两边取绝对值，得到：

$$\begin{aligned} |e(k+1)| &= |y^* - y(k+1)| \\ &= |y^* - y(k) - \varphi_c(k)\Delta u(k)| \\ &\leq e(k) \left| 1 - \frac{\rho \varphi_c(k) \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + (1+\lambda_2) |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \right| \end{aligned} \quad (14)$$

由假设 4 和 $\text{sign}(\hat{\varphi}_c(k)) \neq \text{sign}(\hat{\varphi}_c(1))$ 可知， $\varphi_c(k) \hat{\varphi}_c(k) \geq 0$ 。

令 $\lambda_{1\min} = \frac{\bar{b}^2}{4}$ ，结合不等式 $\alpha^2 + \beta^2 \geq 2\alpha\beta$ 、假设 4 的条件 $\varphi_c(k) > \varepsilon$ 、 $\hat{\varphi}_c(k) > \varepsilon$ 以及第一步中已证明的 $\hat{\varphi}_c(k)$ 有界性可推得，当选取 $\lambda_1 > \lambda_{1\min}$ 时，必然存在一个常数 $0 < M_1 < 1$ ，使得下式成立

$$\begin{aligned} 0 < M_1 &\leq \frac{\varphi_c(k) \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + (1+\lambda_2) |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \leq \frac{\varphi_c(k) \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \\ &\leq \frac{\bar{b} \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \leq \frac{\bar{b} \hat{\varphi}_c(k)}{2\sqrt{\lambda_1} \hat{\varphi}_c(k)} < \frac{\bar{b}}{2\sqrt{\lambda_{1\min}}} = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

其中， $\bar{b}$ 是满足引理 1 结论 $|\varphi_c(k)| \leq \bar{b}$ 的常数。

又根据式(15)，以及 $0 < \rho \leq 1$ 、 $\lambda_1 > \lambda_{1\min}$ 和 $\lambda_2 > 0$ ，则一定存在一个常数 $d_2 < 1$ ，使得

$$\left| 1 - \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k) \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + (1 + \lambda_2) |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \right| = 1 - \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k) \hat{\varphi}_c(k)}{\lambda_1 + (1 + \lambda_2) |\hat{\varphi}_c(k)|^2} \quad (16)$$

$$\leq 1 - \rho M_1 = d_2 < 1$$

综合式(14)和式(16), 有:

$$|e(k+1)| \leq d_2 |e(k)| \leq d_2^2 |e(k-1)| \leq \dots \leq d_2^k |e(1)| \quad (17)$$

由上述分析可知, 定理 1 的第一个结论成立。

由于 $y^*(k)$ 为常数且定理 1 的结论(1), 则输出跟踪误差 $e(k)$ 收敛至零时, 系统输出 $y(k)$ 必然趋于常数。

利用不等式 $(\sqrt{\lambda_1})^2 + |\hat{\varphi}_c(k)|^2 \geq 2\sqrt{\lambda_1} \hat{\varphi}_c(k)$ 及 $\lambda_1 > \lambda_{1\min}$, 由式(8)可得如下方程:

$$\begin{aligned} |\Delta u(k)| &= \left| \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k)(y^*(k+1) - y(k))}{(1 + \lambda_2) \hat{\varphi}_c^2(k) + \lambda_1} \right| \\ &\leq \left| \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k)}{(1 + \lambda_2) \hat{\varphi}_c^2(k) + \lambda_1} \right| |e(k)| \\ &\leq \left| \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k)}{\hat{\varphi}_c^2(k) + \lambda_1} \right| |e(k)| \\ &\leq \left| \frac{\rho \hat{\varphi}_c(k)}{2\sqrt{\lambda_1} \hat{\varphi}_c(k)} \right| |e(k)| \\ &\leq \left| \frac{\rho}{2\sqrt{\lambda_{1\min}}} \right| |e(k)| \\ &= M_2 |e(k)| \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $M_2 = \rho / (2\sqrt{\lambda_{1\min}})$ 是一个有界常数。

利用式(17)和式(18), 有

$$\begin{aligned} |u(k)| &\leq |u(k) - u(k-1)| + |u(k-1)| \\ &\leq |u(k) - u(k-1)| + |u(k-1) - u(k-2)| + |u(k-2)| \\ &\leq |\Delta u(k)| + |\Delta u(k-1)| + \dots + |\Delta u(2)| + |u(1)| \\ &\leq M_2 (|e(k)| + |e(k-1)| + \dots + |e(2)|) + |u(1)| \\ &\leq M_2 (d_2^{k-1} |e(1)| + d_2^{k-2} |e(1)| + \dots + d_2 |e(1)|) + |u(1)| \\ &\leq M_2 \frac{d_2}{1 - d_2} |e(1)| + |u(1)| \end{aligned} \quad (19)$$

所以, 定理 1 的第二个结论成立。定理 1 即证。

4 数值验证

选取如下非线性系统以验证所提 MMFAC 算法的

有效性[14]:

$$y(k+1) = \frac{y(k)}{1 + y^2(k)} + u^3(k) \quad (20)$$

其中, $y(k)$ 与 $u(k)$ 分别为系统输出与输入信号。系统期望输出信号设定为分段变化的方波信号 $y^*(k+1) = 0.5 \times (-1)^{\text{round}(\frac{k}{100})}$ 。

MMFAC 控制器的初始条件设为: $u(1) = u(2) = u(3) = 0$, $y(1) = y(2) = y(3) = 0$, $\hat{\varphi}_c(1) = \hat{\varphi}_c(2) = 2$ 。公式(8)中的参数取值为: $\rho = 0.6$, $\eta = 1$, $\varepsilon = 10^{-5}$, $\lambda_1 = 0.01$, $\lambda_2 = 0.1$, $\mu = 1$ 。原始 MFAC 控制器的参数见文献[14]。

在仿真过程中, 采样周期设为 $T_s = 1$, 总仿真时间为 300s, 输出跟踪性能与控制输入如下图所示。

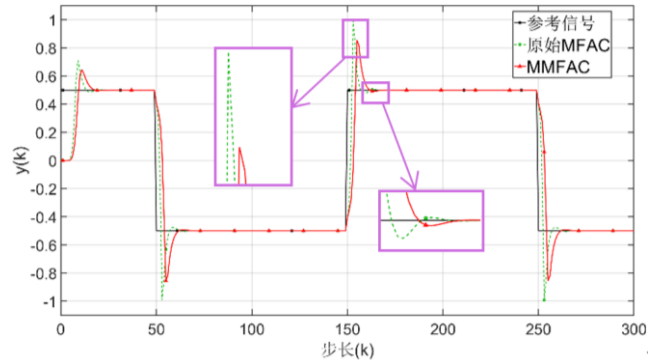


图 1 跟踪性能

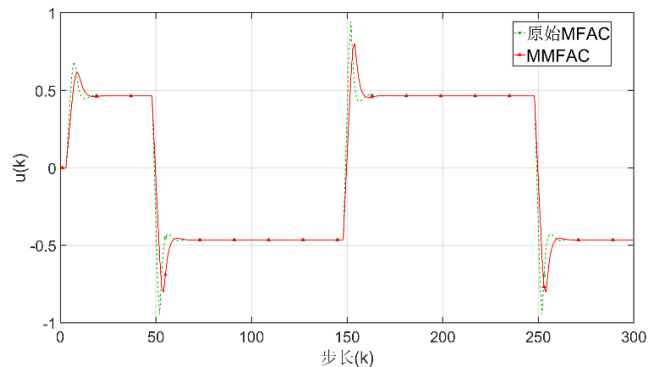


图 2 控制输入

图 1 与图 2 表明, 基于 MMFAC 算法的闭环系统在整个运行过程中均表现出优异的跟踪性能。与原始 MFAC 方法相比, 该改进型方法的输出曲线在过渡阶段波动显著减小, 正向超调量降低约 10%, 并在稳态时间相等的条件下显著抑制了反向超调现象, 使得系统

响应时间缩短,动态稳定性得到提高。当参考信号突变时,改进型算法能够在较短时间内恢复稳态输出,表现出更强的抗扰性与鲁棒性。

5 结论

本文提出了一种改进型 MFAC 方法以解决原始 MFAC 方法所存在的输出振荡和超调量大的问题,该方法引入了输出速率惩罚项作为改进依据。数值仿真结果表明,所提出的改进算法在面对跟踪误差突变时,仍然能保持优良的动态跟踪性能和稳态精度。与原始 MFAC 方法相比,改进型 MFAC 方法能够有效提升闭环系统的综合动态性能,输出响应更平滑,振荡现象得到抑制,超调量更小,并且系统响应速度显著提高,表现出更好的稳态性能。

参考文献

- [1] Aal O F A, Viola J, Chen Y Q. Bode's ideal cut-off based virtual reference feedback tuning controller design [C]//2023 International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications (ICFDA). IEEE, 2023: 1-5.
<https://doi.org/10.1109/ICFDA58234.2023.10153227>
- [2] 史乐珍, 王华. 基于非线性最小二乘迭代的分数阶 PD μ 控制器整定 [J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(4): 103-107.
<https://doi.org/10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2018.04.021>
- [3] 吴国华. 一种实用航班座控自适应随机逼近算法 [J]. 环球科学与工程, 2025: 21-32.
<https://doi.org/10.62836/gse.v2i5.547>
- [4] D'áda T C, Wolf W R. Extremum seeking control applied to airfoil trailing-edge noise suppression [J]. AIAA Journal, 2022, 60(2): 823-843. <https://doi.org/10.2514/1.J060634>
- [5] Maraoui S, Bouzrara K, Ragot J. Synthesis of a Proportional Integral Derivative control law based on the Meixner-like model [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(3): 780-792.
<https://doi.org/10.1177/0142331218770484>
- [6] Bejarbaneh E Y, Ahangarnejad A H, Bagheri A, et al. Optimal design of adaptive and proportional integral derivative controllers using a novel hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(8): 1492-1510.
<https://doi.org/10.1177/0142331219891571>
- [7] 严家政, 专祥涛. 基于强化学习的参数自整定及优化算法 [J]. 智能系统学报, 2021, 17(2): 341-347.
<https://doi.org/10.11992/tis.202012038>
- [8] 刘雷伟, 何婷, 王佑. 多变量系统的分散式补偿自抗扰控制方法与频域分析 [J]. 信息与控制, 2024, 53(4): 540-549.
<https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2024.3098>
- [9] Izci D. Design and application of an optimally tuned PID controller for DC motor speed regulation via a novel hybrid Lévy flight distribution and Nelder-Mead algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(14): 3195-3211. <https://doi.org/10.1177/01423312211019633>
- [10] van Eijk L F, Beer S, van Es R M J, et al. Frequency-domain properties of the hybrid integrator-gain system and its application as a nonlinear lag filter [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(2): 905-912.
<https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3196878>
- [11] Zhu Y, Hou Z. Enhanced model free adaptive control by integrating with lazy learning [C]//2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2012: 2019-2024.
<https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244325>
- [12] Fu Q. Iterative learning control for nonlinear heterogeneous multi-agent systems with multiple leaders [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(4): 854-861. <https://doi.org/10.1177/0142331220941636>
- [13] 李瑞敏, 唐瑾. 过饱和和交叉口交通信号控制动态规划优化模型 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(6): 101-109.
<https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2015.06.013>
- [14] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用 [M]. 科学出版社, 2013.
- [15] Weng Y, Nan D, Wang N, et al. Compound robust tracking control of disturbed quadrotor unmanned aerial vehicles: A data-driven cascade control approach [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(4): 941-951.
<https://doi.org/10.1177/01423312211043675>
- [16] Jiang G, Hou Z. A data-driven approach for trajectory-based aircraft operation with controlled time of arrival and along-track wind effects [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(12): 2166-2177.
<https://doi.org/10.1177/0142331220909004>
- [17] Liu S, Hou Z, Zhang X, et al. Model-free adaptive control method for a class of unknown MIMO systems with measurement noise and application to quadrotor aircraft [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(15): 2084-2096.
<https://doi.org/10.1049/iet-cta.2020.0073>
- [18] Hou Z, Jin S. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 19(6): 1549-1558.
<https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2093136>

- [19] Hou Z, Liu S, Tian T. Lazy-learning-based data-driven model-free adaptive predictive control for a class of discrete-time nonlinear systems [J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2016, 28(8): 1914-1928. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2561702>
- [20] Zhao L, He W, Lv F. Model-free adaptive control for parafoil systems based on the iterative feedback tuning method [J]. IEEE Access, 2021, 9: 35900-35914. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050275>
- [21] Xu Y, Wang X, Zhai Y, et al. Precise variable spraying system based on improved genetic proportional-integral-derivative control algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(14): 3255-3266. <https://doi.org/10.1177/01423312211022446>
- [22] Wu X, Wang M, Shahidehpour M, et al. Model-free adaptive control of STATCOM for SSO mitigation in DFIG-based wind farm [J]. IEEE Transactions on power systems, 2021, 36(6): 5282-5293. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3082951>
- [23] Qiu X, Wang Y, Zhang H, et al. Resilient model free adaptive distributed LFC for multi-area power systems against jamming attacks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 34(8): 4120-4129. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3123235>
- [24] Yin H, Ren Y, Wang L, et al. Model free adaptive traffic signal control for four-phase intersections [C]//2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE, 2022: 752-756. <https://doi.org/10.1109/DDCLS55054.2022.9858479>
- [25] Lu F L, Wang J F, Fan C J, et al. A model-free adaptive control of welding pool dynamics during arc welding [C]//2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE, 2008: 591-595. <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2008.4670923>
- [26] 任凯, 高传强, 张伟伟. 翼型激波抖振的无模型自适应控制 [J]. 空气动力学学报, 2021, 39(6): 149-155. <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0297>
- [27] Corradini M L, Ippoliti G, Orlando G. Data-driven model-free adaptive control with prescribed performance: a rigorous sliding-mode based approach [J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 4001-4006. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2266>
- [28] Liu D, Yang G H. Performance-based data-driven model-free adaptive sliding mode control for a class of discrete-time nonlinear processes [J]. Journal of Process Control, 2018, 68: 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.06.006>
- [29] Bu X, Wang Q, Hou Z, et al. Data driven control for a class of nonlinear systems with output saturation [J]. ISA transactions, 2018, 81: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.07.009>