

基于线性 - 非线性自抗扰控制的肌力康复训练设备研究

常永杰, 罗沛权

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年10月24日

摘 要

针对现有肌力康复训练设备普遍存在体型庞大、操作复杂、控制效果不尽如人意等问题, 本文首先提出一种便携式肌力康复训练设备的机电一体化设计方案。其次基于该方案, 针对线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)在强非线性、强耦合或大范围工作点跳变场景下鲁棒性不足、系统偏离线性假设时性能下降和ESO增益过高导致噪声敏感性等问题, 以及针对非线性自抗扰控制(Nonlinear Active Disturbance Rejection Control, NLADRC)在参数整定、稳定性分析与控制性能评估方面的挑战, 提出将线性自抗扰控制与非线性自抗扰控制相结合的两种策略: 线性 - 非线性切换自抗扰控制(Linear-Nonlinear Switched Active Disturbance Rejection Control, SADRC)和线性 - 非线性加权自抗扰控制(Linear-Nonlinear Weighted Active Disturbance Rejection Control, WADRC)。最后, 在五种控制策略下(PID、LADRC、NLADRC、SADRC、WADRC)对该设备进行仿真与实验对比, 验证所提方法的优越性。

关键词

机电一体化, 线性 - 非线性切换自抗扰控制(SADRC), 线性 - 非线性加权自抗扰控制(WADRC), 仿真对比分析

Research on Muscle Strength Rehabilitation Training Equipment Based on Linear-Nonlinear Active Disturbance Rejection Control

Yongjie Chang, Peiquan Luo

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 15, 2025; accepted: September 22, 2025; published: October 24, 2025

文章引用: 常永杰, 罗沛权. 基于线性-非线性自抗扰控制的肌力康复训练设备研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(10): 304-319. DOI: 10.12677/mos.2025.1410625

Abstract

Aiming at the problems of large size, complex operation, and unsatisfactory control effect of existing muscle strength rehabilitation training equipment, this paper first proposes a mechatronic design scheme of portable muscle strength rehabilitation training equipment. Secondly, based on this scheme, addressing the issues of Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC), such as insufficient robustness in strong nonlinear, strong coupling or large-scale working point jump scenarios, performance degradation when the system deviates from the linear assumption, and noise sensitivity caused by excessive ESO gain, as well as the challenges in parameter tuning, stability analysis and control performance evaluation of Nonlinear Active Disturbance Rejection Control (NLADRC), two strategies combining linear active disturbance rejection control and nonlinear active disturbance rejection control are proposed: Linear-Nonlinear Switched Active Disturbance Rejection Control (SADRC) and Linear-Nonlinear Weighted Active Disturbance Rejection Control (WADRC). Finally, the simulation and experimental comparison of the device are carried out using five control strategies (PID, LADRC, NLADRC, SADRC, WADRC) to verify the superiority of the proposed method.

Keywords

Electro-Mechanical Integrating, Linear-Nonlinear Switched Active Disturbance Rejection Control (SADRC), Linear-Nonlinear Weighted Active Disturbance Rejection Control (WADRC), Comparative Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会的发展,居民健康素养提升,追求健康已成为现代生活的一部分。人口老龄化加剧、亚健康状态日趋明显,健康正从“被动”走向“主动”[1]。在此背景下,便携式肌力康复训练设备的研究能够满足人们随时随地进行康复训练的需求,为居家缺乏医疗条件的患者创造条件,为忙碌人群提供便携训练,帮助改善亚健康,并缓解医护与家庭的护理压力[2]。自20世纪中叶以来,肌力康复训练逐渐受到重视并取得不断发展。

1998年韩京清教授创建了自抗扰控制(ADRC)技术[3],提出控制系统设计应依靠时间尺度等物理意义明显的信息,而非精确模型。他建立了总扰动概念,利用扩张状态观测器观测并补偿,将系统转化为积分器串联型模式,降低了对模型精度的要求。至此以后,自抗扰控制技术在各行各业都得到了应用和发展,市场上也出现了许多应用该技术的肌力康复训练设备。随着自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)技术的不断发展,通常将其分为线性ADRC(LADRC)和非线性ADRC(NLADRC)两大类[4]。相比之下,NLADRC在跟踪精度和抗干扰能力方面具有明显优势,但在参数整定、稳定性分析与控制性能评估等方面存在一定难度,制约了其实际应用。因此,线性ADRC因其实现简单、稳定性和工程性更易保证,成为当前工程中的首选方案。

自抗扰控制的核心在于通过扩张状态观测器对总扰动进行估计与补偿,而引入非线性机制的初衷是进一步提升控制性能。因此,线性自抗扰控制在大多数场景中已经能满足实际需求;但如果追求更高的控制精度与更强的抗扰能力,非线性自抗扰控制仍是一个行之有效的选择[5]。为充分发挥线性自抗扰控

制和非线性自抗扰控制二者各自的优势, 本文首先基于线性自抗扰控制和非线性自抗扰控制二者的特点, 在该方案中进行算法部署, 然后将二者结合考虑, 设计了线性 - 非线性切换自抗扰控制和线性 - 非线性加权自抗扰控制两种控制策略。最后通过仿真对比分析验证了该方法的优越性。

2. 机电一体化设计

本文秉持轻量化、模块化、工业化的设计理念, 将所设计的肌力康复训练设备划分为四个模块化单元: 吸盘底座模块负责稳定性与定位; 电子元器件模块集中管理传感、控制、供电及通信等核心电气功能; 绕绳模块承担力路传递与动作范围的实现; 弹性绳驱动模块则通过可调节的弹性元件实现力学特性的精准控制与舒适性调节。整机结构如图 1 所示。

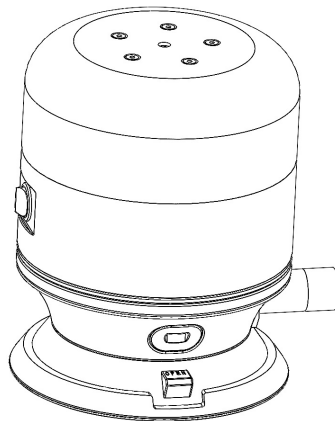


Figure 1. Mechanical structure appearance diagram
图 1. 机械结构外观图

吸盘底座模块(如图 2 所示)采用便于拆卸的手泵驱动吸盘, 通过手动泵机构实现吸附与释放的快速操作; 底座设有标准化接口, 与电子元器件模块实现模块化、快速连接与断开, 辅以快速锁紧/解锁机构, 能够适应长时间工作及频繁拆装的工况。

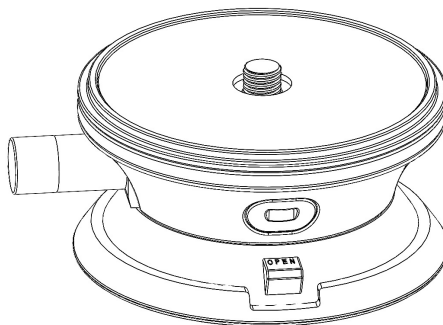


Figure 2. Suction cup base module structure diagram
图 2. 吸盘底座模块结构图

电子元器件模块(如图 3 所示)在设计时充分考虑人体差异与使用场景的多样性, 结合国家标准与实际人体尺寸分布进行参数选型。尺寸与负载方面, 参考《国民体质测定标准》及 GB 中的成年人体型数据, 选用额定扭矩为 3 Nm 的大然电机 PDA-03 作为核心执行元件。控制与处理单元方面, 控制器选用

STM32F103C8T6, 具备充足的处理能力与丰富的外设接口, 便于实现实时控制、传感数据处理与通信协作。通信与互操作方面, 蓝牙模块板选用汇承 HC-09, 支持蓝牙串口通信; 通信板采用 SN65HVD230 芯片板, 实现高效稳定的总线或差分信号驱动。电源与能量管理方面, 调压模块板为 DC-DC 可调降压模块, 将电池电压稳定转换为系统所需工作电压, 确保在不同工作负载下的供电稳定; 锂电池选用 16340 型。传感与反馈方面, 传感器选型为直线位移传感器 KS8-10 mm, 用于实现力/位移或触觉等精准测量与反馈, 支持闭环控制与个性化康复方案的实现。整机系统布线如图 4 所示。

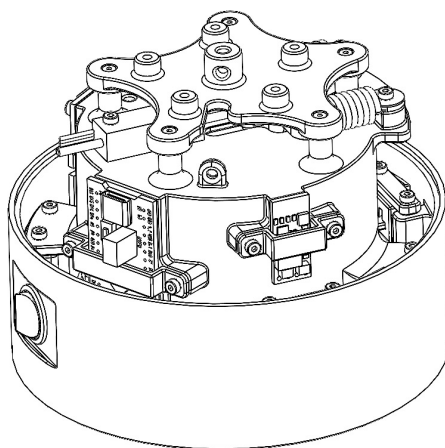


Figure 3. Electronic components module

图 3. 电子元器件模块

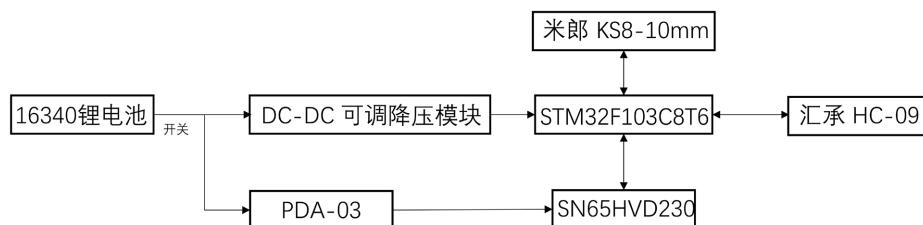


Figure 4. Engineering prototype system wiring diagram

图 4. 工程样机系统布线图

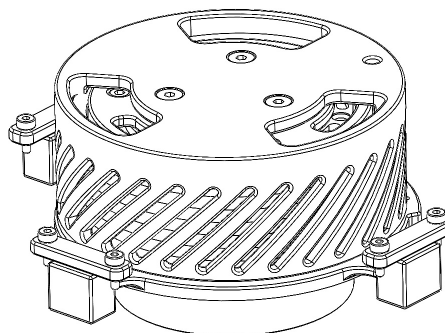


Figure 5. Rope winding module

图 5. 绕绳模块

绕绳模块(如图 5 所示)由两部分组成: 绕绳系统与驱动电机。绳索通过弹性绳驱动模块中的拉簧固定

件孔进入, 并沿导向槽向前传导, 最终经绳索输出孔抵达机身外部, 确保张力分布均匀, 减少局部应力与摩擦损耗; 拉簧固定件与绳索的组合使输出力矩随工作变化更平滑, 能有效缓冲瞬态负载与冲击, 提升对关节和软组织的友好性, 实现更柔顺的输出体验。驱动电机提供牵引力与转速, 控制系统通过闭环控制精确调节输出力矩、拉伸长度与速度, 以实现康复动作的可重复性与个性化调节。为确保路径可靠, 机身内设滑动导向与限位机构, 极端工况下仍能保持正确路径, 保障使用安全。绳索采用耐磨、低弹性衰减的高强度纤维, 拉簧固定件与导向部件使用低摩擦材料并配合润滑, 降低能耗与噪音, 提升寿命与稳定性。

弹性绳驱动模块(如图 6 所示)采用由拉簧与微型轴承组成的直线运动机构, 通过简洁高效的线性传动实现平滑的力输出与高可靠性。其线性机构一端固定于驱动壳体的直线导轨上, 配合微型滚珠轴承, 确保拉簧固定件在通道内的低摩擦、低背隙运动, 另一端连接可滑动的拉簧固定件, 能在张力变化时实现对输出力矩的细腻控制与快速响应; 与弹性绳驱动模块协同, 拉簧固定件的滑动机构在拉力增加时能自动补偿微小位移, 减小冲击力并实现更平滑的力输出, 有利于提升用户体验; 模块内部设有位移传感器, 实时监测拉簧固定件的位置变化与绳索张力的间接量度, 传感信号实时反馈给控制器, 使系统能够基于偏差动态调节驱动电机的电流、转速, 形成闭环控制; 在结构材料方面, 直线机构采用低摩擦高强度航空铝, 装配紧固件则采用预紧与防松设计, 确保长期使用中的定位精度与重复性。

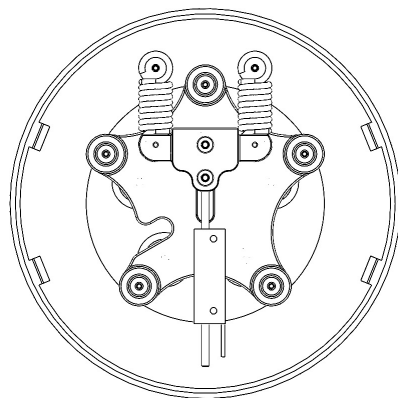


Figure 6. Elastic rope drive module
图 6. 弹性绳驱动模块

相较于现有技术, 该设备在设计与实现层面具有显著优势: 模块化集成便于安装与维护, 架构明确划分为机械、驱动、传感、控制与通信等独立单元, 通过标准接口实现“即插即用”, 预留统一的安装螺栓间距、接口孔位与电气标准, 支持快速拆装与替换, 提升维护效率与备件周转; 智能控制通过闭环策略与高分辨率传感数据进行实时校准与限幅保护, 显著提升输出力、位移与速度等关键指标的跟踪精度, 同时支持自适应参数调节以实现个性化需求; 减震与提升传动效率方面, 采用低共振设计、缓冲元件与柔顺驱动策略, 显著降低冲击与振动传递, 并通过高效传动机构与可控减振材料减少能量损耗、降低噪音、优化工作环境; 结构轻量化方面, 选用高强度低密度材料并优化结构拓扑, 在确保刚度与安全性前提下降低总重量, 外壳模块化、标准化且可拆卸, 另外提供便携式能源方案与高效电源管理, 延长工作时间并降低对额外设备的依赖。

3. ADRC 算法设计

多年来, 控制理论的发展往往聚焦于优化与稳定性问题, 但也有不少学者坚持研究抗扰方法, 提出

了多种实现途径, 例如等时控制器(Isochronous Governor) [6]、不变性原理(Invariance Principle) [7]、内模原理(Internal Model Principle) [8]、未知输入观测器(UIO) [9]、内模控制(Internal Model Control, IMC) [10]、扰动观测器(Disturbance Observer, DOB) [11], 以及双自由度控制器(2DOF) [12]等。但是这些做法都受限于扰动存在于系统外部的思想。针对于这种狭义的扰动, 韩京清教授提出了一个广义的扰动: 即总扰动。基于此想法, 韩京清教授提出了 NLADRC, 但是由于该算法的三个组成部分均采用非线性函数, 实际调节过于复杂。鉴于此, 高志强教授对 NLADRC 进行了简化, 提出了 LADRC 的概念。

3.1. 弹簧数学模型搭建

建立数学建模是揭示系统特性、预测动态行为并为工程应用提供指导的基础。通常, 机械系统可用微分方程来描述, 而这类方程的解即为在输入作用下的输出响应。作为最常见的机械振动子系统, 质量 - 弹簧 - 阻尼系统可以借助力学定律中的牛顿第二定律来推导出相应的微分方程。通常的做法是在系统各元件处进行受力分析: 质量块受到外力产生加速度, 其所受惯性力可表示为质量与加速度的乘积, 即 $F = ma$; 弹簧受到外力作用, 在线性范围内, 其受力大小与弹簧的形变成正比, 受力方向与形变方向相反, 即 $F = kx$; 阻尼器所产生的阻尼力的大小与相对移动速度成正比, 即 $F = cv$ 。

对于一个质量 - 弹簧 - 阻尼系统而言, 其满足: $F = ma + kx + cv$ 。在此基础上, 我们可以分析所有涉及质量、弹簧和阻尼器的机械系统的受力情况。因此接下来, 我们将根据本文所研究的弹簧的受力情况, 来建立相关模型。质量块 m 的受力情况如图 7 所示。

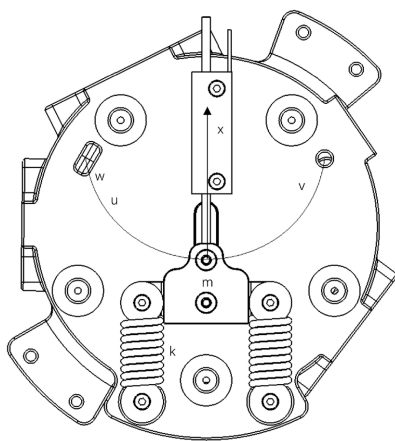


Figure 7. Spring system
图 7. 弹簧系统

对质量块应用牛顿第二定律可得:

$$m\ddot{x} + k(x_1 - x_2) = w + u \quad (1)$$

3.2. LADRC 设计

本文基于高志强教授提出的简化 NLADRC 算法模型[13], 搭建了 LADRC, 因为 ESO 能够实时估计并对总扰动进行补偿, 因此已经不需要传统 PID 在常值扰动下为消除静差而采用的积分器, 所以本文搭建的二阶 LADRC 框架如图 8 所示, 系统输入直接进入 PD 控制器, 用来替代自抗扰控制中的误差反控制率, 并针对被控系统(PDA-03 电机驱动系统), 搭建适配的 LESO 模块, 对实时的外部以及内部扰动进行估计和补偿, 最终进行算法输出。

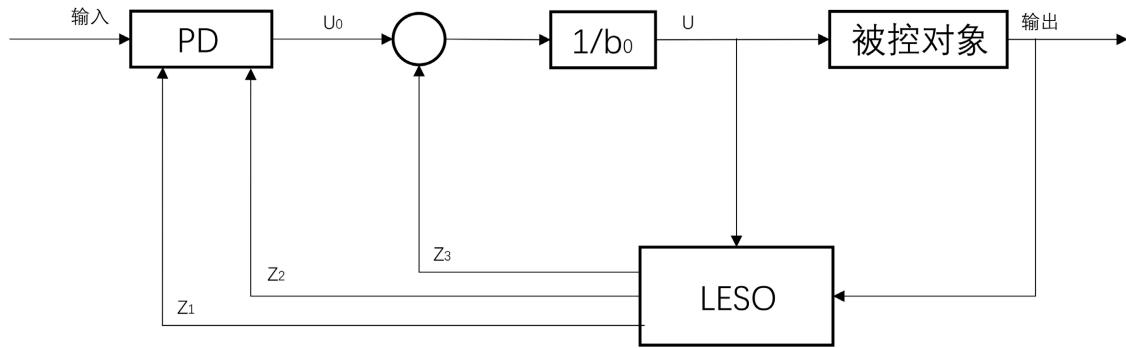


Figure 8. LADRC frame diagram

图 8. LADRC 框架图

针对二阶控制系统, 其中 PD 控制器形式为:

$$U_0 = k_p * (x - z_1) + k_d * (\dot{x} - z_2) \quad (2)$$

其中, x 为输入给定值, $\dot{x}$ 为给定输入值的微分, z_1 和 z_2 为来自 LESO 的观测状态值, k_p 和 k_d 是比例(P)和微分(D)的系数。但为了简化式(1), 避免对给定输入值进行微分, 以及抑制由于给定输入值变化较快带来的系统振荡, 用 $-k_d * z_2$ 替代 $k_d * (\dot{x} - z_2)$ 。

$$U_0 = k_p * (x - z_1) - k_d * z_2 \quad (3)$$

为降低调参难度, 简化控制器设计, 采用降阶 LESO, 这样就使闭环传递函数成为一个没有零点的纯二阶系统, 则 k_p 和 k_d 是设计的控制器增益矩阵 $K = [k_p \ k_d]^T$ 的参数, 对其参数化选择。

$$k_p = w_c^2, k_d = 2w_c \quad (4)$$

其中, w_c 为控制器带宽。

针对二阶控制系统, 其中 LESO 控制器是用来输出误差的反馈, 从而改造原系统构造出新系统, 其形式为:

$$\ddot{y} = f(\dot{y}, y, w) + b_0 u \quad (5)$$

其中, y 为输出, u 为输入, w 为扰动, f 为总扰动, b_0 为补偿系数, 定义 z_1 、 z_2 为状态变量, z_3 为扩张状态。

$$z_1 = y, z_2 = \dot{y}, z_3 = f(\dot{y}, y, w) \quad (6)$$

则式(5)即为

$$\dot{z}_1 = \dot{y} = z_2, \dot{z}_2 = \ddot{y} = z_3, \dot{z}_3 = \dot{f} \quad (7)$$

令此状态下系统的输出误差为 e , 则

$$e = z_1 - y, \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 * e, \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 * e + b_0 * u, \dot{z}_3 = -\beta_3 * e \quad (8)$$

其中, β_1 、 β_2 和 β_3 为增益系数。

3.3. NLADRC 设计

NLADRC 是由经典 PID 与现代控制理论相结合所产生的[14], 其中 PID 控制是在船舶自动操作系统中逐渐发展起来的, 尽管在过去一个世纪里, PID 控制在工程实践中一直占据主导地位, 但其固有缺陷

也较为突出[15]。基于此, NLADRC (框架图如图 9 所示)从以下四个方面对 PID 进行改进与扩展: 首先, 引入扩张状态观测器, 以估计并补偿系统所遭遇的总干扰; 其次, 通过跟踪微分器实现对输入微分信号的获取, 从而获得更平滑的输入导数信息; 再次, 利用跟踪微分器优化过渡过程的控制安排, 抑制输入信号突变所引发的超调现象; 最后, 采用非线性误差反馈控制, 以提升整体控制性能与鲁棒性。

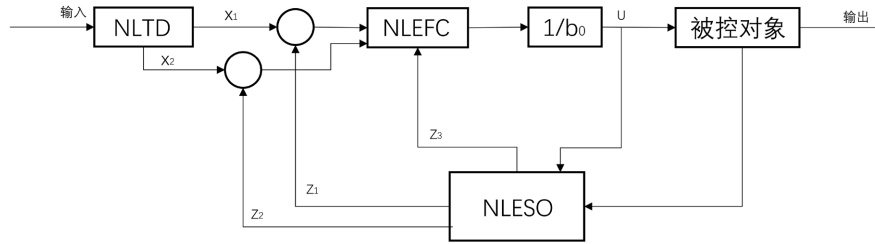


Figure 9. NLADRC framework diagram

图 9. NLADRC 框架图

其中 TD 跟踪微分器引入中间过渡边变量 s_1 和 s_2 , 令 x_1 为给定输入值 v_u 的观测跟踪值, 其中 $\dot{x}_1 = x_2$, $x_2 = fhan$, $s_1 = x_1 - v_u$, 引入变量 r (速度因子)、 h (积分步长), 其中 r 是根据过渡过程快慢的需要和系统的承受能力来决定的, h 可以取采样周期 h 的整数倍, 结合最优快速综合控制函数, NLTD 形式如下:

$$\begin{aligned}
 d &= r * h^2 \\
 a_0 &= h * s_2 \\
 y &= s_1 + a_0 \\
 a_1 &= \sqrt{d * (8|y| + d)} \\
 a_2 &= a_0 + \text{sign}(y) * \frac{a_1 - d}{2} \\
 s_y &= \frac{\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)}{2} \\
 a &= s_y * (a_0 + y - a_2) + a_2 \\
 s_a &= \frac{\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)}{2} \\
 fhan &= -r * \left\{ \frac{a}{d} - \text{sign}(a) \right\} * s_a - r * \text{sign}(a)
 \end{aligned} \tag{9}$$

基于跟踪微分器安排过渡过程的方法, 可以跟踪产生过渡过程的误差信号。其中误差信号 $e_1 = x_1 - z_1$ 和误差积分信号 $e_2 = x_2 - z_2$, 并将其非线性组合, 得出 NLEFC 形式如下:

$$u_0 = fhan(e_1, ce_2, r, h_1) \tag{10}$$

其中, c 为阻尼因子, h_1 为精度因子。

3.4. SADRC 设计

基于上述搭建的 LADRC 与 NLADRC 模型, 线性 - 非线性切换自抗扰控制(SADRC 框架图如图 10 所示)的核心思想是: 在控制信号变化剧烈、易受到干扰或输入信号突变等因素影响的场景中, 优先采用 NLADRC, 以实现快速且鲁棒的跟踪响应; 而在控制信号波动较小、系统干扰较弱的场景中, 切换回 LADRC, 以进一步降低稳态误差、提升长期稳定性与能耗效率。

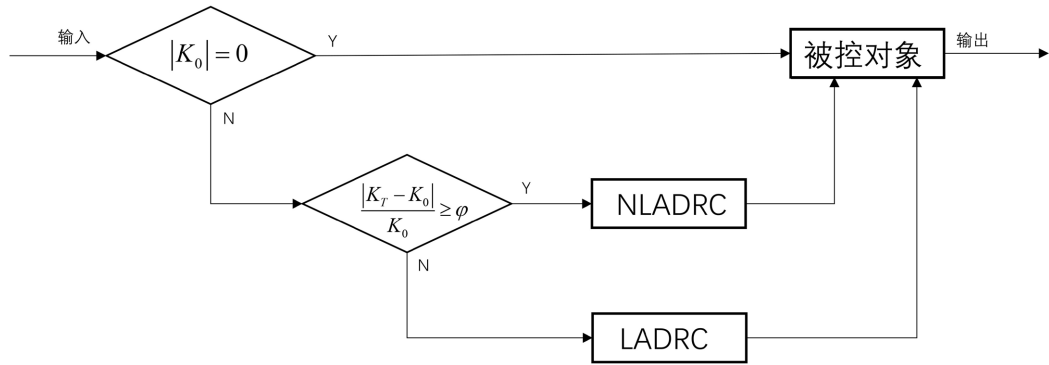


Figure 10. SADRC frame diagram

图 10. SADRC 框架图

图中 T 为采样周期, φ 为误差幅值, K_0 为 0 时的输入信号, K_T 为 $0+t$ 时的输入信号。通过在不同工况下的自适应切换, SADRC 兼具“快速跟踪”与“高精度稳态”的双重优势, 从而提升整体控制性能与鲁棒性。

3.5. WADRC 设计

本文在前述基础上提出第二种方案: 线性-非线性加权自抗扰控制(WADRC 框架图如图 11 所示)。其核心思想是实现 LADRC 与 NLADRC 的实时并行计算, 并将两者的输出与一个预设目标值进行对比, 进而赋予 LADRC 与 NLADRC 不同的权重系数。将带权输出进行叠加后再输出, 形成综合控制信号。

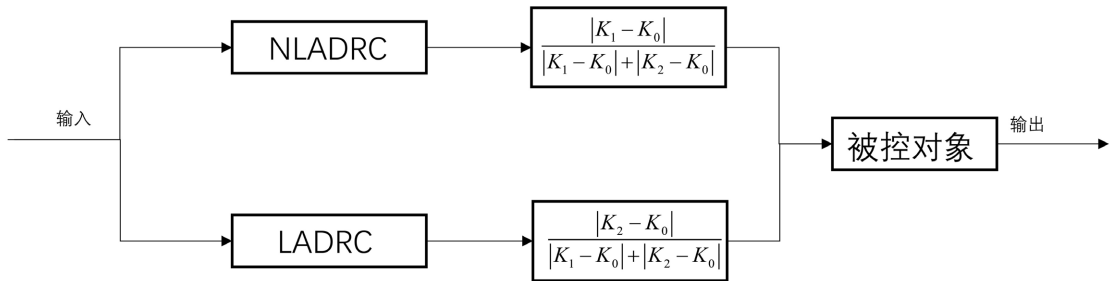


Figure 11. SADRC frame diagram

图 11. SADRC 框架图

图中 K_0 为输入设定值, K_1 为 LADRC 的输出信号, K_2 为 NLADRC 的输出信号。其形式如下:

$$y = d_1 * K_2 + d_2 * K_1, \quad d_1 = \frac{|K_1 - K_0|}{|K_1 - K_0| + |K_2 - K_0|}, \quad d_2 = \frac{|K_2 - K_0|}{|K_1 - K_0| + |K_2 - K_0|} \quad (11)$$

其中, y 为最终输出。通过动态调整权重, WADRC 可在不同工况下实现对快速跟踪与低稳态误差的平衡, 从而提升系统的鲁棒性与自适应性。

4. 仿真对比分析

本文基于后续算法设计验证的需要, 搭建了实验工装样机(如图 12 所示)。电机选型与前述工程样机保持一致, 实验平台采用 Links-RT 半实物仿真平台, 并选用 OidEncoder 绝对编码器对设备运行速度进行实时监测, 其数据通讯如图 13 所示。



Figure12. Experimental tooling prototype

图 12. 实验工装样机

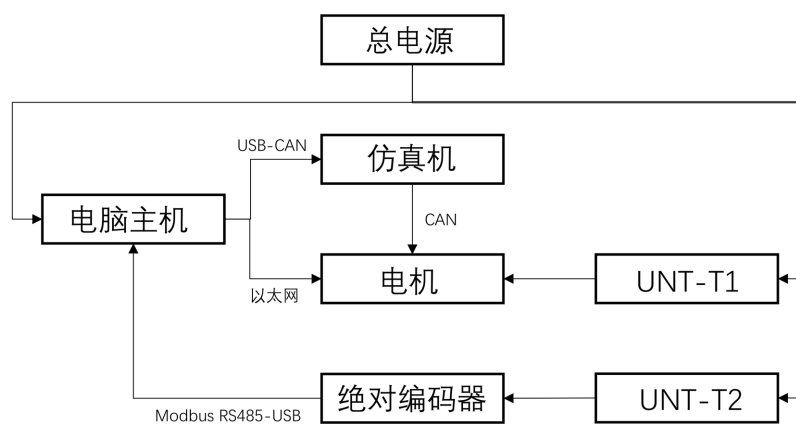


Figure13. Simulation prototype data communication flow chart

图 13. 仿真样机数据通信流程图

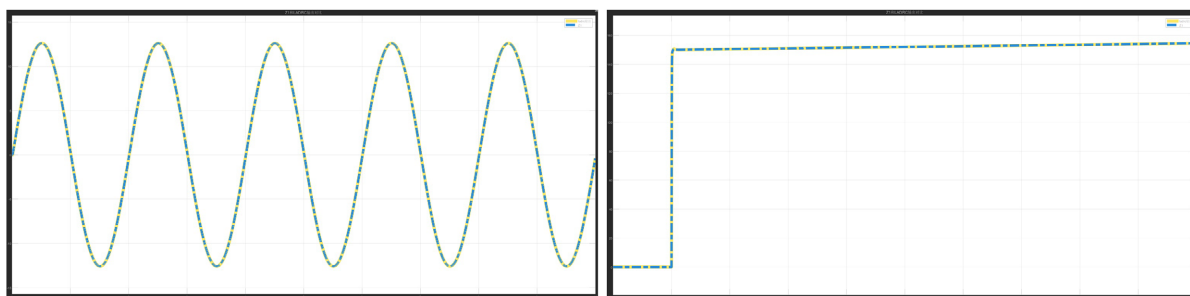


Figure14. Comparison of Z1 and LADRC output

图 14. Z1 和 LADRC 输出对比图

首先, 在 LADRC 模块中, 进行仿真分析, 可看出扩张状态观测器对 LADRC 输出状态估计 z_1 与实际输出状态观测值基本吻合(如图 14 所示), 扩张状态观测器对 LADRC 输出状态二阶部分估计 z_2 与实际

输出状态第二状态观测值基本吻合(如图 15 所示)。

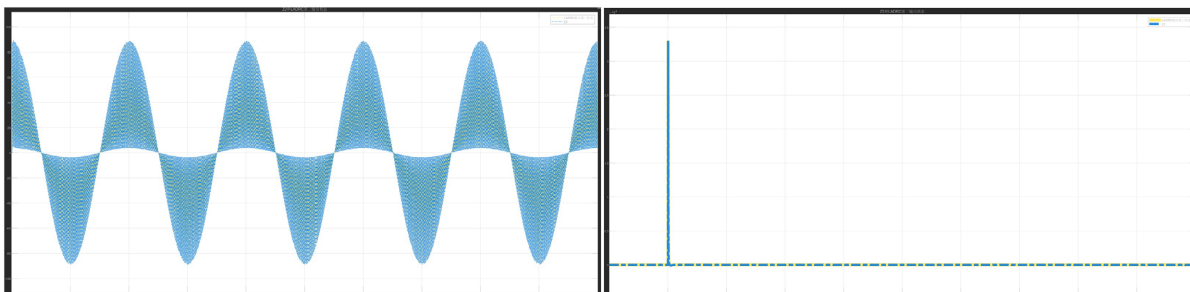


Figure15. Z2 and LADRC second state output contrast diagram

图 15. Z2 和 LADRC 第二状态输出对比图

其次, 在 NLADRC 模块中, 进行仿真分析, 可看出扩张状态观测器效果通过调参也可达到对于输出效果的近似估计效果(如图 16 和图 17 所示)。

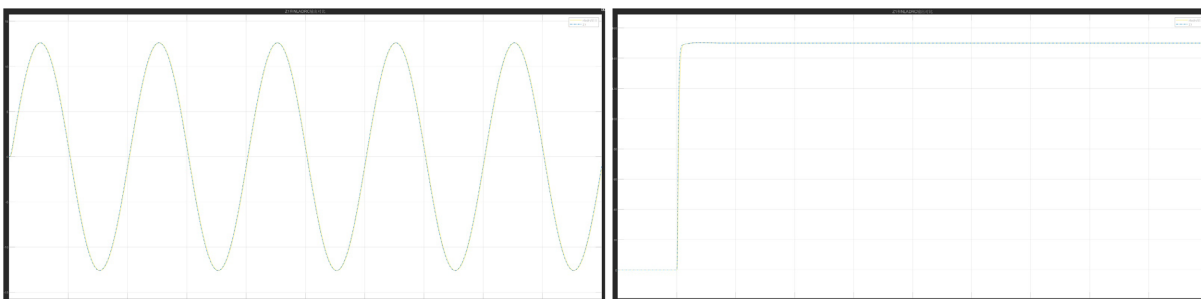


Figure16. Comparison of Z1 and NLADRC output

图 16. Z1 和 NLADRC 输出对比图

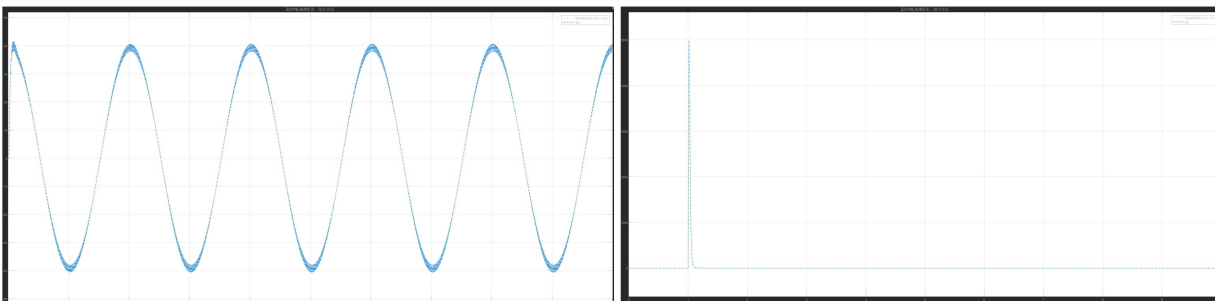


Figure17. Z2 and NLADRC second state output contrast diagram

图 17. Z2 和 NLADRC 第二状态输出对比图

其次, 针对 WADRC 权重分配对于系统性能的影响, 进行了分析实验(如图 18 所示), 相较于实时计算所得出的权重, 调参所得权重均在跟踪性能、稳态误差方面劣于图 11 所示的计算方式。但相较于增加两个比例系数而言, 式(11)的计算方式更加复杂。

然后, 对 PID、LADRC、NLADRC 在阶跃及正弦信号输入下进行仿真分析对比(如图 19 和图 20 所示), 可明显看出, 相比传统的 PID 控制, LADRC 和 NLADRC 均具有更好的抗干扰能力和控制性能[16]。

而针对 LADRC 和 NLADRC, 在输入信号突变情况下, LADRC 由于采用了 PID 控制器进行跟踪, 跟踪速度更快, 但出现轻微超调, 而在输入信号不变情况下, NLADRC 采用的非线性扩张状态观测器估计效果更好, 稳态误差更小[17]。

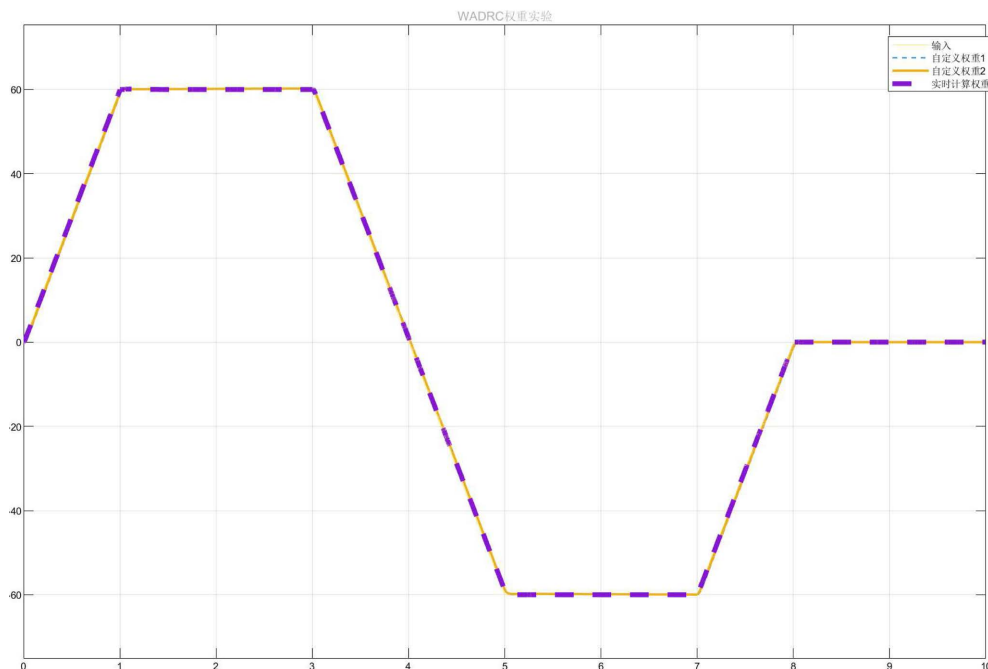


Figure18. WADRC weight distribution comparison chart

图 18. WADRC 权重分配对比图

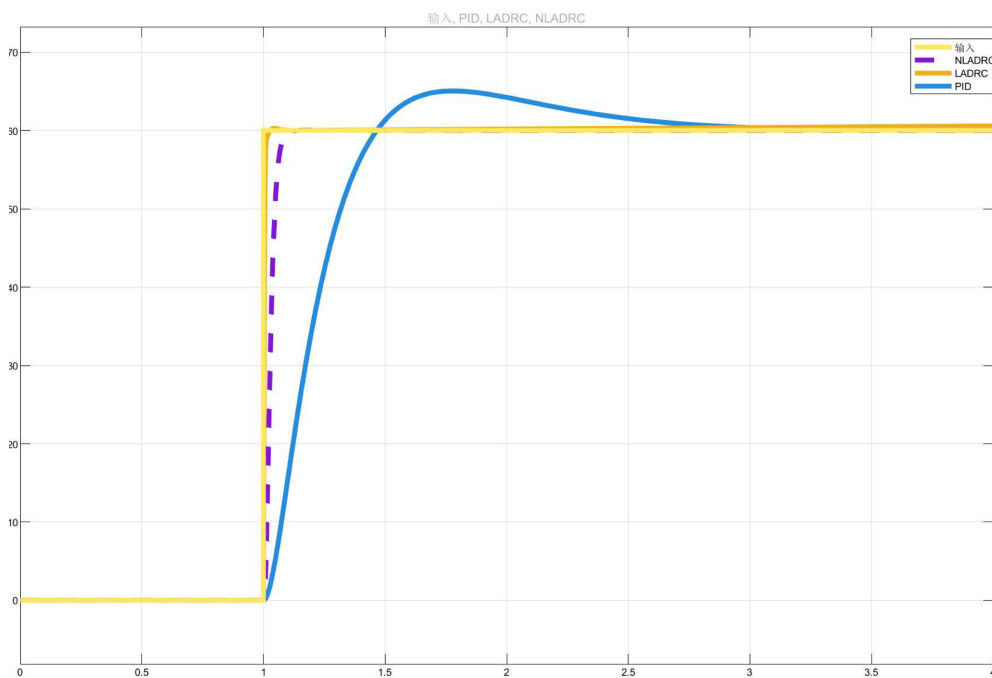


Figure19. Comparison of PID, LADRC, and NLADRC under step signal

图 19. 阶跃信号下 PID、LADRC 和 NLADRC 的对比图

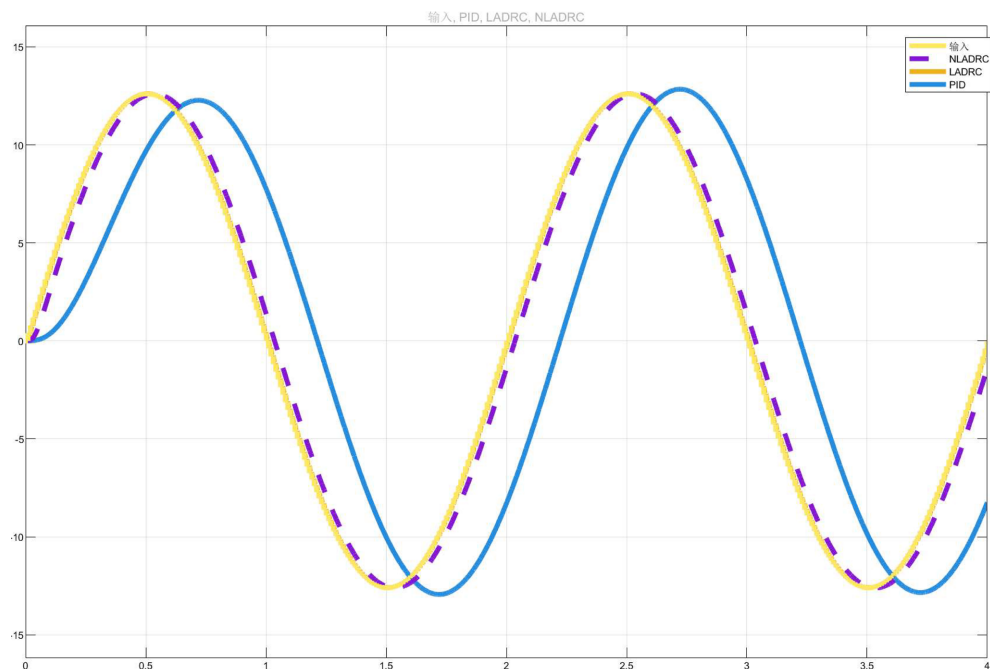


Figure 20. Comparison of PID, LADRC, and NLADRC under sinusoidal signal

图 20. 正弦信号下 PID、LADRC 和 NLADRC 的对比图

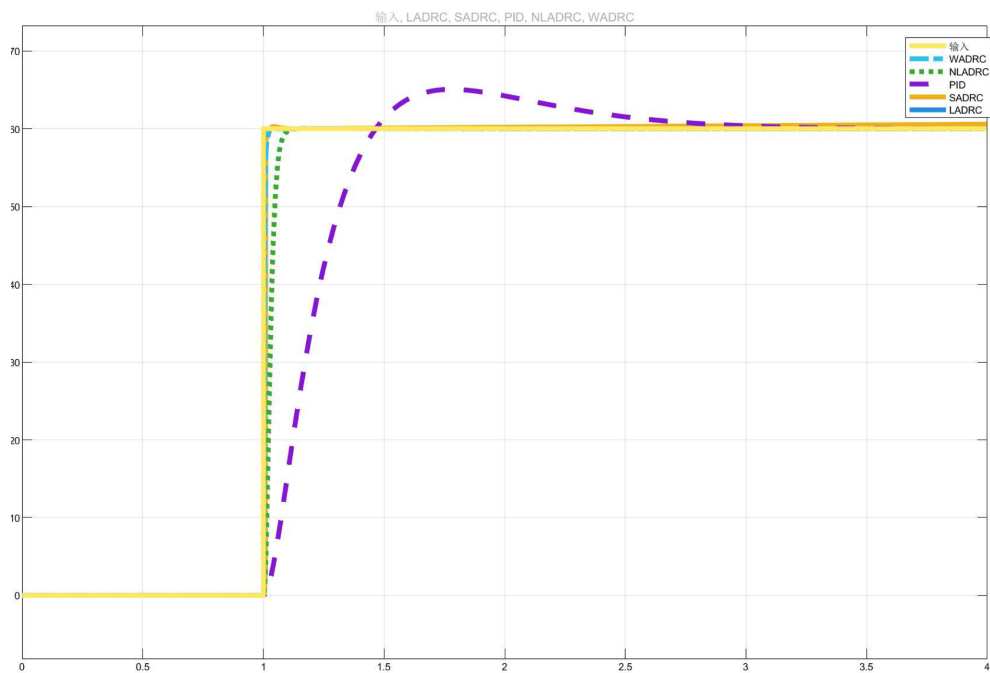


Figure 21. Comparison of PID, LADRC, NLADRC, SADRC, and WADRC under step signal

图 21. 阶跃信号下 PID、LADRC、NLADRC、SADRC 和 WADRC 的对比图

由图分析, LADRC 对模型线性假设的依赖较为突出, 在系统存在显著非线性、时变或强耦合时, 其线性近似容易产生较大估计误差, 进而影响对总扰动的有效补偿。当遇到快速且剧烈的扰动或未知干扰的瞬时跃变时, 线性结构的观测与控制器对扰动的实时跟踪能力受限, 容易引发明显的超调或稳态误差

[18]。此外, LADRC 通过线性观测器来估计总扰动; 若观测器带宽受限或存在较大传感噪声, 估计结果会被放大, 造成控制信号的波动增大和响应迟滞[19]。

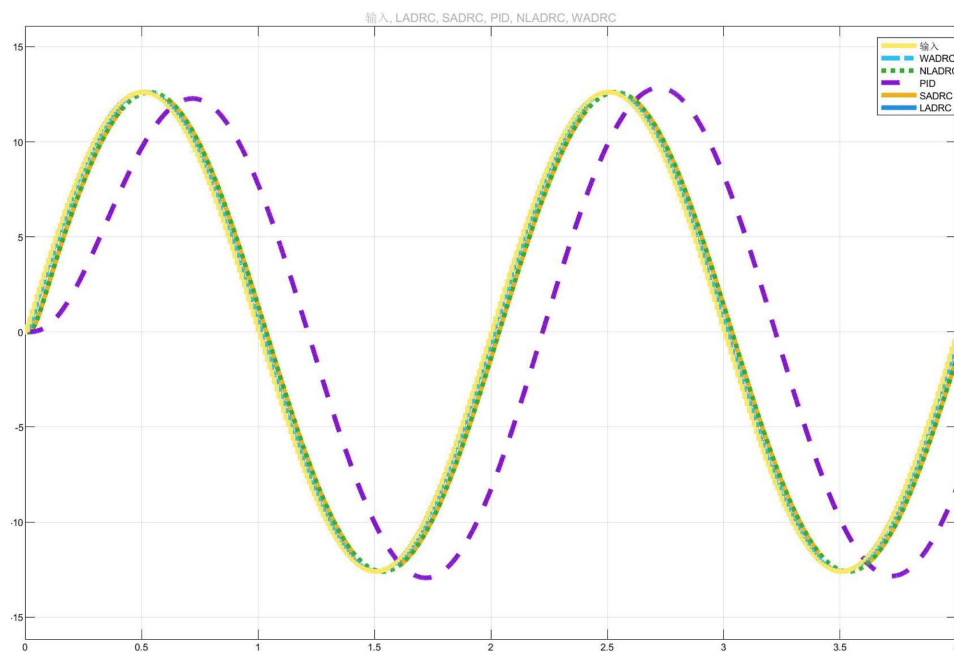


Figure22. Comparison of PID, LADRC, NLADRC, SADRC, and WADRC under sinusoidal signal
图 22. 正弦信号下 PID、LADRC、NLADRC、SADRC 和 WADRC 的对比图

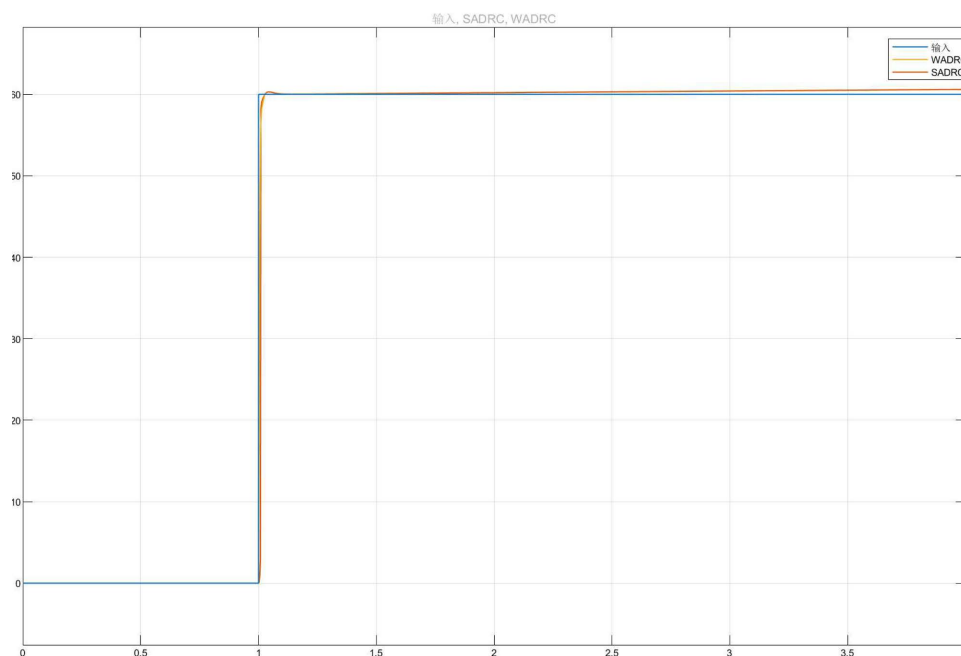


Figure23. Comparison of SADRC and WADRC under step signal
图 23. 阶跃信号下 SADRC 和 WADRC 的对比图

相比之下, NLADRC 虽然在理论上更擅长处理非线性和不确定性, 但若非线性模型的近似不足或参

数设定不准确, 系统稳定性边界可能收窄, 某些工况下的鲁棒性也可能下降[20]。并且在传感噪声较大或测量误差显著的场景, 非线性组件可能放大误差, 导致控制性能波动, 尤其在弱信号区域尤为明显。

最后, 进行 SADRC 和 WADRC 仿真分析, 可看出 SADRC 和 WADRC 均比单一的 LADRC 或 NLADRC 性能更好(如图 21 和图 22 所示)。但将 SADRC 和 WADRC 进行对比(如图 23 和图 24 所示), 发现 SADRC 由于采用切换策略, 在 LADRC 和 NLADRC 之间切换时会出现信号突变, 在实物表现中存在轻微卡顿, 而 WADRC 则不会出现这种情况, 整体表现更加平滑, 结合了 LADRC 和 NLADRC 的各自优势。

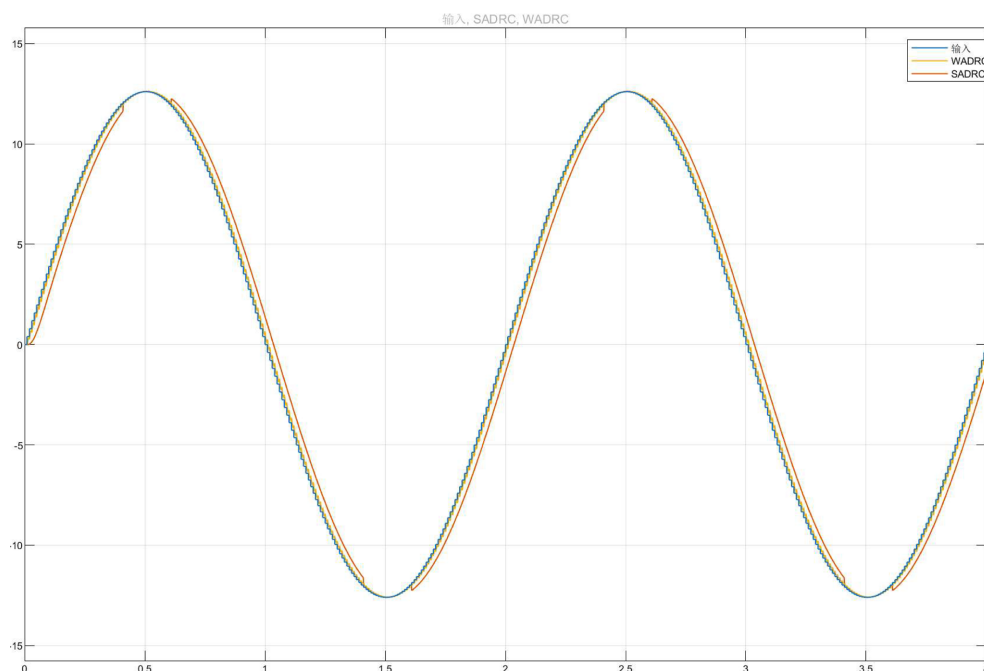


Figure 24. Comparison of SADRC and WADRC under sinusoidal signal

图 24. 正弦信号下 SADRC 和 WADRC 的对比图

5. 结论

通过对 PID、LADRC、NLADRC、SADRC、WADRC 的性能进行对比分析, 发现 LADRC 的干扰跟踪几乎不受干扰强度的影响。在强干扰场景下, LADRC 展现出显著的抗干扰能力、快速的稳态恢复能力以及良好的跟踪性能。与此相比, NLADRC 的跟踪效果受干扰幅度影响较大: 在较大干扰时抗干扰能力相对不足, 但在较小干扰下表现出较强的抗干扰特性与更高的跟踪精度。结合两者的优点, 本研究提出的 SADRC 和 WADRC 对比单一 LADRC 和 NLADRC 以及 PID 均更有优势, 其显著提升系统的抗干扰能力、缩短稳态恢复时间, 并提高了控制精度。

参考文献

- [1] Yang, Z.M., Yang, X.B. and Huang, L. (2010) [A Literature Review on the Conceptual Framework of Sub-Health]. *Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine*, **30**, 757-763.
- [2] Amorese, A.J. and Ryan, A.S. (2022) Home-Based Tele-Exercise in Musculoskeletal Conditions and Chronic Disease: A Literature Review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, **3**, Article 811465. <https://doi.org/10.3389/fresc.2022.811465>
- [3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [4] Gao, Z.Q. (2003) Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, 4-6 June 2003, 4989-4996.

-
- [5] 李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 202-212.
- [6] Poncelet, J. (1870) Introduction a la Mecanique Industrielle, Physique ou Experimentale. 3rd Edition, Gauthier Villars.
- [7] Preminger, J. and Rootenberg, J. (1964) Some Considerations Relating to Control Systems Employing the Invariance Principle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **9**, 209-215. <https://doi.org/10.1109/tac.1964.1105722>
- [8] Francis, B.A. and Wonham, W.M. (1975) The Internal Model Principle for Linear Multivariable Regulators. *Applied Mathematics & Optimization*, **2**, 170-194. <https://doi.org/10.1007/bf01447855>
- [9] Hostetter, G.H. and Meditch, J.S. (1973) On the Generalization of Observers to Systems with Unmeasurable, Unknown Inputs. *Automatica*, **9**, 721-724. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(73\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0005-1098(73)90031-9)
- [10] Garcia, C.E. and Morari, M. (1982) Internal Model Control. A Unifying Review and Some New Results. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, **21**, 308-323. <https://doi.org/10.1021/i200017a016>
- [11] Ohishi, K., Nakao, M., Ohnishi, K. and Miyachi, K. (1987) Microprocessor-Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **34**, 44-49. <https://doi.org/10.1109/tie.1987.350923>
- [12] Umeno, T. and Hori, Y. (1991) Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degrees-of-Freedom Controller Design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **38**, 363-368. <https://doi.org/10.1109/41.97556>
- [13] 高志强. 浅谈工程控制的信息问题[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(7): 908-923.
- [14] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002(3): 13-18.
- [15] Gao, Z. (2003) Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, 4-6 June 2003, 4989-4996.
- [16] Han, J. (2009) From PID to Active Disturbance Rejection Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 900-906. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2011621>
- [17] Guo, B. and Zhao, Z. (2011) On the Convergence of an Extended State Observer for Nonlinear Systems with Uncertainty. *Systems & Control Letters*, **60**, 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2011.03.008>
- [18] Tian, G. and Gao, Z. (2007) Frequency Response Analysis of Active Disturbance Rejection Based Control System. 2007 *IEEE International Conference on Control Applications*, Singapore, 1-3 October 2007, 1595-1599. <https://doi.org/10.1109/cca.2007.4389465>
- [19] Goforth, F.J. and Gao, Z.Q. (2008) An Active Disturbance Rejection Control Solution for Hysteresis Compensation. 2008 *American Control Conference*, Seattle, 11-13 June 2008, 2202-2208. <https://doi.org/10.1109/acc.2008.4586819>
- [20] Huang, Y. and Xue, W.C. (2014) Active Disturbance Rejection Control: Methodology and Theoretical Analysis. *ISA Transactions*, **53**, 963-976.