DOI: 10.19666/j.rlfd.202506102

机组功率线性自抗扰控制的 PID 实现

王 海[1,2]，王崇如[1]，华 山[3]，孙 城[1]，吴天杰[1]，范常浩[3]
（1. 国能（浙江北仑）发电有限公司，浙江 宁波 315000；
2. 国家能源集团浙江电力有限公司，浙江 宁波 315000；
3. 国能南京电力试验研究有限公司，江苏 南京 210023）

［摘 要］新型电力系统中，由于新能源发电占比不断攀升且其具有强烈的不确定性，抗扰动成了火电机组功率控制的核心任务。目前火电厂功率控制系统仍然采用 PID 控制，难以满足火电机组深度、连续、频繁调峰调频的需求。为了使先进控制理论更好地应用于火电机组功率控制，借力 PID 控制的工程基础实现了线性自抗扰控制（LADRC）的平滑应用。通过分析 LADRC 的结构以及反馈环的传递函数，得出了 LADRC 的 PID 实现形式，并通过 Simulink 仿真进行验证。仿真及工程应用测试表明，LADRC 的 PID 实现继承了自抗扰控制突出的扰动抑制能力。在相同的 PID 及相关参数下，LADRC 的 PID 实现对各类扰动都具有突出的抑制能力，其中三阶 LADRC 的扰动抑制能力最强、调节速度最快。LADRC 的 PID 实现能够满足火电机组功率控制系统的需求，控制品质优于常规 PID 控制。LADRC 的 PID 实现扩展了 LADRC 的工程应用空间。

［关 键 词］LADRC；PID；抗扰性；机组功率；新型电力系统

［引用本文格式］王海，王崇如，华山，等. 机组功率线性自抗扰控制的 PID 实现[J]. 热力发电，2026, 55(1): 152-159.
WANG Hai1, WANG Chongrun, HUA Shan, et al. PID realization of linear active disturbance rejection control for unit power[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 152-159.

PID realization of linear active disturbance rejection control for unit power

WANG Hai[1,2], WANG Chongru[1], HUA Shan[3], SUN Cheng[1], WU Tianjie[1], FAN Changhao[3]
(1. Guoneng (Zhejiang Beilun) Power Generation Co., Ltd., Ningbo 315000, China;
2. CHN Energy Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China;
3. Guoneng Nanjing Electric Power Test & Research Limited, Nanjing 210023, China)

Abstract: In the new power system, due to the constantly rising proportion of new energy generation and its own uncertainty, anti-disturbance has become the core task of power control of thermal power units. At present, the power control system of thermal power plants continues to use PID controllers, making it challenging to accommodate the needs for deep, continuous, and frequent peak shaving and frequency regulation in thermal power units. The advanced control theory has an outstanding contradiction between theoretical rigor and industrial practicability, in order to make it better applied in power control of thermal power units, the smooth application of linear active disturbance rejection control (LADRC) is realized by using the engineering basis of PID control. By analyzing the structure of LADRC and the transfer function of the feedback loop, the PID realization form of LADRC is defined and verified by Simulink simulation. The simulation and engineering application tests show that the PID implementation of LADRC inherits the outstanding disturbance rejection ability of ADRC. Under the same PID and related parameters, the PID implementation of LADRC shows outstanding suppression ability to all kinds of disturbance signals, and the third-order LADRC has the strongest disturbance rejection ability and the fastest adjustment speed. The PID implementation of LADRC can meet the requirements of power control system of thermal power units, and the control quality is better than that of conventional PID control. The PID implementation of LADRC expands the engineering application space of LADRC.

收 稿 日 期：2025-06-19 修 回 日 期：2025-07-08 接 受 日 期：2025-07-10 网络首发日期：2025-11-04
基 金 项 目：国家能源集团科技项目（GJNY-23-159/E62C000001）
Supported by: Science and Technology Projects of CHN Energy (GJNY-23-159/E62C000001)
第一作者简介：王海（1970），男，正高级工程师，主要研究方向为热工自动化，12061703@ceic.com。
通信作者简介：范常浩（1991），男，硕士，工程师，主要研究方向为灵活智能发电系统运行优化与控制，20034308@chnenergy.com.cn。

Key words: LADRC; PID; disturbance rejection; unit power; new power system

高比例消纳风电、光伏等可再生能源是新型电力系统的主要特征。由于可再生能源的间歇性和不确定性，在可再生能源消纳比不断攀升的同时，电力系统的稳定运行也面临着愈加严峻的挑战。火电机组在新型电力系统中仍然扮演“压舱石”的角色，承担深度、连续、频繁调峰调频的重任，起到基础保障和系统调节的作用[1]。可再生能源发电的大规模接入，意味着火电的占比下降，极大压缩了电力系统调频容量及资源。火电机组的功率控制对电力系统的稳定运行意义重大，在深度、频繁调频调峰状况下，抗扰动成了火电机组功率控制的核心任务。

先进控制理论主要用于解决复杂系统的控制问题，尽管目前是学者研究的热点，但是在工程应用中还面临诸多挑战，如模型依赖性强与实际系统不确定之间的矛盾、计算复杂度高与实时性要求的冲突、工程实现成本高、调试困难、维护门槛高、环境适应性不足、长期可靠性有待提高、跨专业跨学科协同困难等等。因此，先进控制理论存在突出的理论严谨性与工业实用性之间的矛盾，也成了限制先进控制理论工程应用的主要瓶颈。而 PID 控制结构简单易于实现、鲁棒性强、适应性广、可靠性高，尤其具有成熟的组态技术，时至今日在工业控制中仍然占有绝对的统治地位[2]。

先进控制理论与 PID 结合，借力 PID 的工程基础实现其平滑推广也是学者研究主要方向之一。主要包括：1）以 PID 为基础构建复合控制结构[3-4]；2）基于 PID 参数优化的渐进式升级[5-6]；3）先进控制的 PID 转化与简化[2]；4）工业场景中的分层控制架构，即顶层优化与底层 PID 控制协同[7-8]。

自抗扰控制（active disturbance rejection control，ADRC）是由韩京清研究员提出的一种非线性控制理论[9]，其核心思想是将系统内外扰动统一视为“总扰动”，通过扩张状态观测器（ESO）实时估计并补偿扰动，从而实现高精度控制。自抗扰控制以“扰动估计−补偿”为核心，突破了一般控制对模型的依赖，在扰动抑制方面具有一定的优势。自抗扰控制结构复杂，而且整定参数过多，在实际应用中受到了限制。尽管高志强教授提出了线性自抗扰控制（linear active disturbance rejection control，LADRC），并提出了带宽整定法[10-11]，但是 LADRC 和 PID 控制相比，计算与参数整定复杂程度高，高频噪声与观测器带宽的矛盾突出，工程适应性受限，工业成熟度低，特别是 PID 有成熟的商业化控制器和标准化调试流程，而 LADRC 在主流的工业控制软件中尚未推广。因此，寻求 LADRC 的 PID 实现，完成机组功率的控制，达到抑制强干扰的目的，是亟待深入探讨的关键路径。

借助 PID 的工程基础实现 LADRC 的平滑推广，许多学者也做了一些研究。崔文庆等阐明了二阶 LADRC 和 PID 之间的关系，由二阶 LADRC 得到了 PID 控制参数[12]；韩文杰等基于一阶惯性加时延模型，得到了基于现有 PID 参数整定二阶 LADRC 参数的方法[13]；周蓉等提出将 PID 参数转化为二阶自抗扰控制参数的方法，该方法转化的线性自抗扰参数以带宽形式表示[14]；谭文等证明了 LADRC 实际上是一种基于观测器的 PID 结构的对偶[15]；王永提出了一种基于改进自抗扰控制的串级控制结构，内环采用常规 PI 控制器，外环采用改进自抗扰控制器[16]；马良玉等给出一种基于现有 PI 控制参数直接获取二阶线性自抗扰控制初始参数的方法[17]；张志豪等在 PID 串级控制系统的基础上，提出了内模控制与改进自抗扰控制相结合的串级控制策略[18]。

本文在分析 LADRC 结构及反馈环传递函数的基础上，导出了 LADRC 的 PID 实现形式，并在火电机组功率控制系统中进行了应用仿真。

1 线性自抗扰控制

1.1 控制原理

LADRC[13,19-20]是利用扩张状态观测器估计系统内、外部的不确定扰动，并设计反馈控制律进行补偿。LADRC 结构如图 1 所示，其中 P 为控制对象，ESO 为扩张状态观测器，K_0 为反馈增益。

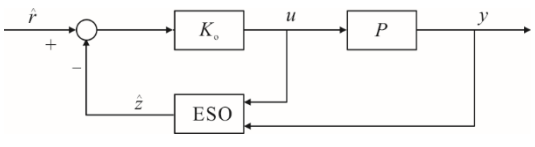


图 1 线性自抗扰控制结构
Fig.1 Structure of the LADRC

1.2 一阶线性自抗扰控制

对于一阶线性自抗扰控制采用图 2 所示的误差

自抗扰控制（E-LADRC）结构[20-22]。图 1 中状态观测器的输入信号是系统输出，而图 2 中扩张状态观测器的输入是系统误差信号，因此，图 2 基于误差的 LADRC 设定值跟踪能力更强，这与 PID 的思想相同。图 2 中，$e(t)$为系统误差，P 为控制对象，LESO 为线性扩张状态观测器，f^*为系统总扰动。

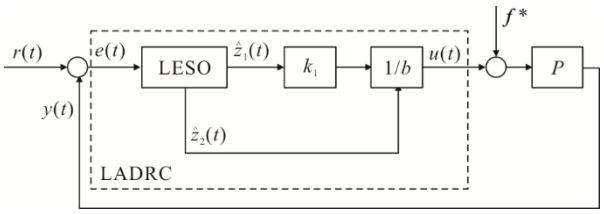


图 2 误差线性自抗扰控制

Fig.2 Structure of the error-based LADRC

一阶线性自抗扰控制的跟踪误差为[21]：

$$\begin{cases} e(t)=r(t)-y(t) \\ e'(t)=r'(t)-y'(t)=r'(t)-f-b_0u(t) \end{cases} \tag{1}$$

基于误差的一阶 LADRC 的状态为：

$$x_1(t)=e(t),\ x_2(t)=r'(t)-f=:f^* \tag{2}$$

可设计线性扩张状态观测器为[23]：

$$\begin{cases} \hat{x}_1'(t)=\hat{x}_2(t)+\beta_1[e(t)-\hat{x}_1(t)]-b_0u(t) \\ \hat{x}_2'(t)=\beta_2[e(t)-\hat{x}_1(t)] \end{cases} \tag{3}$$

$$u(t)=\frac{k_1\hat{x}_1(t)+\hat{x}_2(t)}{b_0} \tag{4}$$

基于误差一阶 LADRC 的状态空间表达式为：

$$\begin{cases} \hat{x}'(t)=\boldsymbol{A}\hat{x}(t)+\boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}e(t) \\ u(t)=\dfrac{k_1\hat{x}_1(t)+\hat{x}_2(t)}{b_0}=:\boldsymbol{K}_o\hat{x}(t) \end{cases} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} -\beta_1-k_1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}=\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{K}_{\mathrm{o}}=\frac{\begin{bmatrix} k_1 & 1 \end{bmatrix}}{b_0}$$

式中：$\boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}$为观测器增益矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{o}}$为控制器增益矩阵。

由一阶 E-LADRC 的状态空间表达式(5)可求得控制器传递函数，即控制输出 $u(t)$与误差 $e(t)$的拉氏变换之比为：

$$\frac{u(s)}{e(s)}=\frac{(\beta_2+\beta_1k_1)s+\beta_2k_1}{b_0[s^2+(\beta_1+k_1)s]} \tag{6}$$

可以整定得到[22,24]：

$$\beta_1=2\omega_o,\quad \beta_2=\omega_o^2,\quad k_1=\omega_c \tag{7}$$

式中：ω_{o}为观测器带宽；ω_{c}为控制器带宽。

容易证明，式(6)可以写成如下形式：

$$C_1(s)=\frac{u(t)}{e(t)}=(K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s})\frac{k_{f_1}}{Ts+1}=C_{\mathrm{PI}}(s)F_1(s) \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{PI}}(s)=K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s} \tag{9}$$

$$F_1(s)=\frac{k_{f_1}}{Ts+1} \tag{10}$$

其中：$C_{\mathrm{PI}}(s)$为 PI 控制器；K_{p}为比例增益；K_{i}为积分增益；$F_1(s)$为一阶滤波器；T 为滤波器时间常数；k_{f_1}为增益系数。

1.3 二阶线性自抗扰控制

对于二阶对象设计如下扩张状态观测器[11]：

$$\hat{x}'(t)=\boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}\hat{x}(t)+\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}u(t)+\boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}[y(t)-\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}\hat{x}(t)] \tag{11}$$

其中：

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} 0 & b_0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \tag{12}$$

观测器增益 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}$为：

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{o}}=[\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

反馈控制增益 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{o}}$为：

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{o}}=\frac{[k_1 \quad k_2 \quad 1]^{\mathrm{T}}}{b_0} \tag{14}$$

图 1 反馈环 $y(t)$到 $u(t)$的传递函数为[12]：

$$\frac{u(s)}{y(s)}=-\frac{(\beta_1k_1+\beta_2k_2+\beta_3)s^2+(\beta_2k_1+\beta_3k_2)s+\beta_3k_1}{b_0s[s^2+(\beta_1+k_2)s+k_1+\beta_2+\beta_1k_2]} \tag{15}$$

可以证明，式(15)可以写成如下形式：

$$\begin{aligned} C_2(s)&=\frac{u(s)}{y(s)}=(K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s}+K_{\mathrm{d}}s)\cdot \\ &\frac{k_f}{(T_1s+1)(T_2s+1)}=C_{\mathrm{PID}}^*(s)F_2(s) \end{aligned} \tag{16}$$

$$C_{\mathrm{PID}}^*(s)=K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s}+K_{\mathrm{d}}s \tag{17}$$

$$F_2(s)=\frac{k_{f_2}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \tag{18}$$

式(17)为理想 PID，K_{d}为微分增益，式(18)为二阶滤波器，T_1、T_2为滤波器时间常数，k_{f_2}为增益系数，工程中常用的实际 PID 如式(19)，容易证明式(16)也是实际 PID 与二阶滤波器的串联。K_{d}/N 定义为微分滤波时间常数，N为正整数。

$$C_{\mathrm{PID}}(s)=K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s}+\frac{K_{\mathrm{d}}s}{(K_{\mathrm{d}}/N)s+1} \tag{19}$$

$$C_2(s)=\frac{u(s)}{y(s)}=C_{\mathrm{PID}}(s)F_2(s) \tag{20}$$

1.4 三阶线性自抗扰控制

同理，可以得出三阶 LADRC 反馈环的传递函

数为[12]：

$$\frac{u(s)}{y(s)}=\frac{c_3s^3+c_2s^2+c_1s+c_0}{s(a_3s^3+a_2s^2+a_1s+a_0)} \tag{21}$$

式中：$a_0,\dots,a_3$、$c_0,\dots,c_3$为四阶正则控制器各项系数。

式(21)可以写成如下形式：

$$\frac{u(s)}{y(s)}=\left[K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s}+\frac{K_{\mathrm{d}}s}{(K_{\mathrm{d}}/N)s+1}\right]\cdot k_{\mathrm{D}}\frac{T_{\mathrm{D}}s+1}{\alpha T_{\mathrm{D}}s+1}\cdot\frac{k_{f_{\mathrm{i}}}}{Ts+1} \tag{22}$$

则式(21)为：

$$C_3(s)=\frac{u(s)}{y(s)}=C_{\mathrm{PID}}(s)D(s)F_1(s) \tag{23}$$

$$D(s)=k_{\mathrm{D}}\frac{T_{\mathrm{D}}s+1}{\alpha T_{\mathrm{D}}s+1} \tag{24}$$

式中：$D(s)$为一阶超前环节；k_{D}为比例系数；T_{D}为时间常数；α为分度系数，$0<\alpha<1$。

至此，式(8)、式(20)、式(23)分别为一阶 LADRC、二阶 LADRC、三阶 LADRC 的 PID 实现形式，对于控制系统而言，闭环控制性能是由反馈环传递函数决定的，因此通过反馈环传递函数的等效来完成 LADRC 的 PID 实现是可行的。其中，一阶 LADRC 是 PI 控制器与一阶滤波器的串联；二阶 LADRC 是实际 PID 与二阶滤波器的串联；三阶 LADRC 可看作是 PID 与一阶超前环节和一阶滤波器串联的结构。

2 火电机组功率控制

火电机组功率控制模型如图 3[25]所示。图 3 中：T_{g}为锅炉动态响应时间常数；T_{r}为汽轮机功率输出动态响应时间常数；F 为汽轮机响应增益系数；P_{g}和 T_{t} 分别为火电机组调速器功率输出及响应时间常数；R 为下垂系数；Vf/R 为一次调频功率；M 和 D 分别为电力系统等效惯性常数和阻尼常数；ΔP_{L}为负荷扰动。

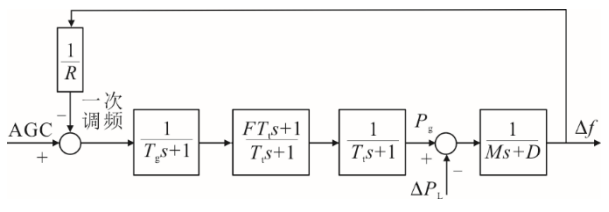


图 3 火电机组功率控制模型

Fig.3 Power control model of thermal power unit

3 控制系统整定

选取时间乘误差平方积分（ITSE）为系统的性能指标，以缩短系统的过渡过程时间，计算公式为：

$$I_{\mathrm{TSE}}=\int_0^{\infty}te^2(t)\mathrm{d}t \tag{25}$$

混合灵敏度属于 H_∞鲁棒控制的范畴，通过灵敏度函数的设计将系统鲁棒稳定性、跟踪性能和抗扰性转化为 H_∞范数约束问题。定义：

$$S=\frac{1}{1+P(s)C(s)} \tag{26}$$

$$T=\frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)} \tag{27}$$

$$S=1-T \tag{28}$$

式中：$P(s)$为被控对象传递函数；$C(s)$为控制器传递函数；S 为灵敏度函数，表征系统对低、中频不确定性的度量；T 为补灵敏度函数，表征系统对中、高频不确定性的度量[20-21]。

依据最小 μ 理论，单回路控制系统鲁棒性指标测度与灵敏度函数 S 和补灵敏度函数 T 相关，控制系统的鲁棒性指标通常通过 $\|S\|_\infty$和 $\|T\|_\infty$的线性组合来衡量[26]，即：

$$\|S\|_\infty+\|T\|_\infty\leqslant\gamma,\ 2\leqslant\gamma\leqslant3 \tag{29}$$

式中：$\|S\|_\infty$为灵敏度函数的∞范数，是表征系统抗扰性的重要指标，$\|S\|_\infty$越小系统抗扰性越强，但是系统的动态响应速度会慢，因此通常选取 $1\leqslant\|S\|_\infty<2$；$\|T\|_\infty$为补灵敏度函数的∞范数，是表征系统鲁棒性的重要指标，$\|T\|_\infty$越小，系统的鲁棒性越好，通常 $1\leqslant\|T\|_\infty<2$。γ值越小说明控制系统在鲁棒性和抗扰性以及响应速度之间的平衡性越好，即控制系统兼具鲁棒性、抗扰性和快速性。本文选取γ=2，采用基于遗传算法改进的粒子群优化算法设计控制系统参数。

4 仿真测试

基于图 3 的机组功率控制模型，采用式(8)、式(20)、式(23)的控制器构成闭环回路，在 Simulink 中搭建系统进行仿真测试，仿真环境采用 ode45 四阶和五阶龙格−库塔方法的变步长解法器，最大步长 0.20 s，最小步长 0.02 s，相对误差 0.000 1%，绝对时间容差 2.84×10^{-13} s。机组功率模型参数见表 1，利用粒子群算法整定控制器参数见表 2。

表 1 机组功率模型参数
Tab.1 Parameters of the unit power model

项目		数值
火电机组	T_g	7
	T_r	0.3
	T_t	0.02
	F	0.3
	R	3
电网侧	M	5
	D	1

表 2 控制器参数
Tab.2 Parameters of the controllers

控制器	参数
PID	K_P=1.2, K_i=0.15, K_d=4, N=4
一阶 LADRC	K_P=1.2, K_i=0.15, T=0.5, k_{f1}=1
二阶 LADRC	K_P=1.2, K_i=0.15, K_d=4, N=4 T_1=0.2, T_2=0.2, k_{f2}=1.98
三阶 LADRC	K_P=1.2, K_i=0.15, K_d=4, N=4 T=0.5, k_{f1}=1, k_D=3.2，T_D=1.2，α=0.667

4.1 设定值跟踪测试

为了增强对比效果，不同控制策略下 PID 参数均保持不变。一阶 LADRC 和三阶 LADRC 所涉及的一阶滤波器参数也保持不变。不同控制策略下，系统设定值跟踪能力的测试结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，在同样的 PID 参数下，一阶 LADRC 的 PI+一阶滤波器形式调节速度明显增快，但是开始阶段有微小波动；二阶 LADRC 的 PID+二阶滤波器形式基本无波动、无超调，而且调节速度较一阶 LADRC 更快；三阶 LADRC 的 PID+一阶超前环节+一阶滤波器形式响应速度最快，只是在初始阶段有微小波动，但并未影响系统的调节时间，系统的调节时间较其他几种方法更快。

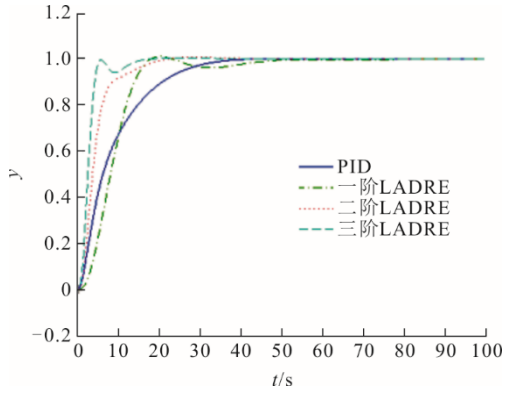


图 4 设定值跟踪测试
Fig.4 The set value tracking test result

4.2 扰动测试

过程控制的核心任务就是抗扰动。在新型电力系统中，由于新能源的波动性、间歇性，抗扰性应当是评价火电机组功率控制系统的主要性能指标。

4.2.1 阶跃扰动测试

图 5 为系统扰动测试结果，在仿真时间 100 s 时加入幅值为 1 的阶跃扰动，三阶 LADRC 的扰动抑制能力最强，其次是二阶 LADRC。一阶 LADRC 由于采用 PI+一阶滤波器的结构，没有微分作用，在 PI 参数不变的情况下，扰动抑制能力不如其他几种方案。

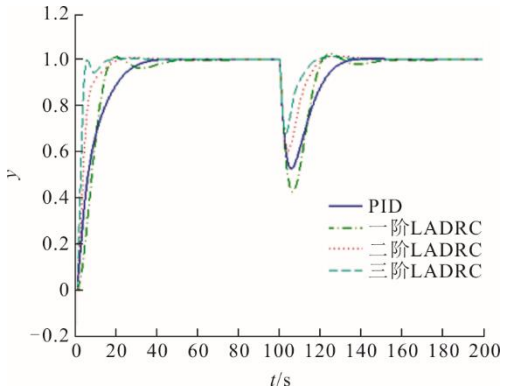


图 5 系统扰动测试结果
Fig.5 The system disturbance test result

4.2.2 高频干扰测试

高频扰动测试和低频扰动测试是评估控制系统鲁棒性与动态性能的关键手段。其中，高频干扰多源于工业场景中电力电子设备噪声、机械振动、传感器与通信噪声、过程参数的快速波动等，其对系统动态响应的冲击更显著。为验证不同高频干扰下的控制效果，在仿真时间 100 s 时加入幅值 0.2、频率 1、2 kHz 高频正弦扰动，结果如图 6、图 7 所示。由图 6、图 7 可见，随着干扰频率升高至 2 kHz，系统对高频信号的滤波能力增强，因此干扰对系统的影响逐渐减弱。

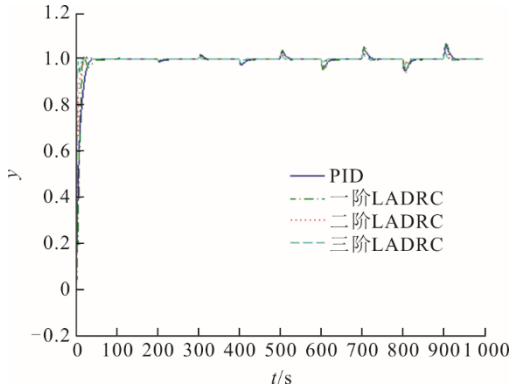


图 6 高频 1 kHz 干扰测试
Fig.6 High frequency 1 kHz disturbance test results

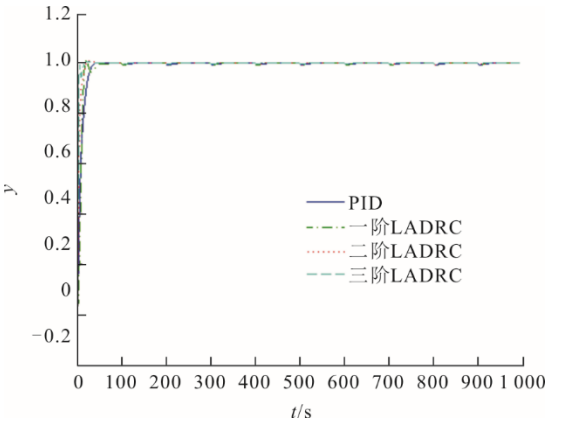


图 7　高频 2 kHz 干扰测试

Fig.7 High frequency 2 kHz disturbance test results

4.2.3 低频干扰测试

低频干扰主要包括系统负荷的缓慢变化、环境参数的缓慢变化导致元件特性漂移、控制器积分环节的累计误差、机械系统低频振动、参考输入信号的缓慢变化、过程的周期性波动等。图 8 为在仿真时间 100 s 时，加入幅值 0.2，频率 1 Hz 的低频正弦扰动。从测试结果可以看出，三阶 LADRC 对低频干扰的抑制能力最强。

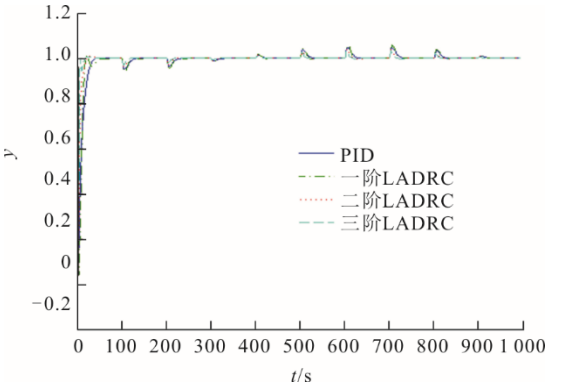


图 8　低频干扰测试

Fig.8 The low-frequency disturbance test results

4.2.4 噪声干扰测试

为进一步验证系统抗扰性，对功率反馈信号叠加均值 0、方差 0.01、采样时间 0.1 s 的随机白噪声信号，测试结果如图 9 所示，由图 9 可见，带有白噪声的功率反馈信号未对系统产生明显影响。

4.3 鲁棒性测试

图 10 为基于蒙特卡洛实验原理，在均值为 0、方差为 0.1、采样时间为 0.1 s 的持续随机干扰信号作用下，系统输出结果。由图 10 可见，在持续随机干扰作用下系统仍能保持稳定。

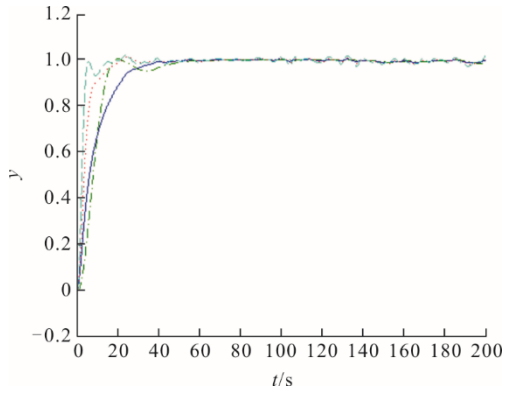


图 9　噪声干扰测试

Fig.9 The noise interference test results

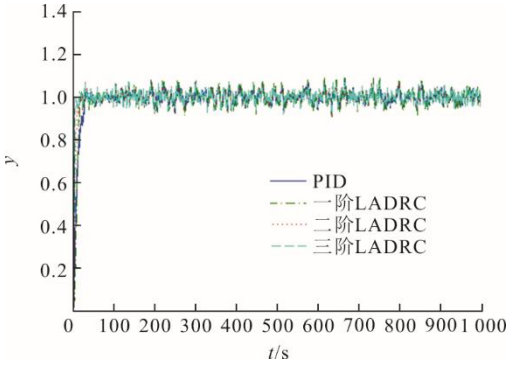


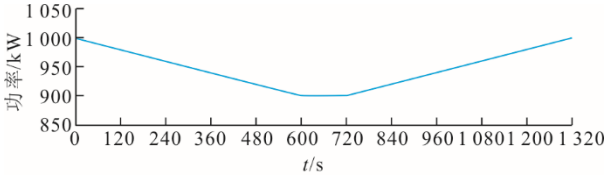
图 10　鲁棒测试

Fig.10 The robustness test results

4.4 工程应用仿真测试

以某 1 000 MW 超超临界二次再热直流锅炉机组为研究对象，额定工况下机组基本设计参数为功率 1 000 MW，过热蒸汽流量 2 710 t/h，主蒸汽压力 33.03 MPa，主蒸汽温度 605 ℃，二次再热器进口温度 432 ℃，二次再热器出口温度 613 ℃。机组调差系数为 5%，当机组负荷变化 10%时，机组频率的最大波动量为 0.25 Hz，机组一次调频死区±2 r/min，即±0.033 Hz，一次调频限幅±6%额定功率，对应频差减少 0.15 Hz。

机组以 1%P_N/min 的速率降负荷至 90%，稳定 2 min 后再以同样的速率升负荷至 100%，机组的频差及不同控制方式下的频率响应如图 11 所示。由图 11 可见，三阶 LADRC 的控制性能较常规 PID 控制有大幅的提升，机组频率波动明显减小，可以控制在±0.15 Hz 的范围内。



a) 机组负荷变化

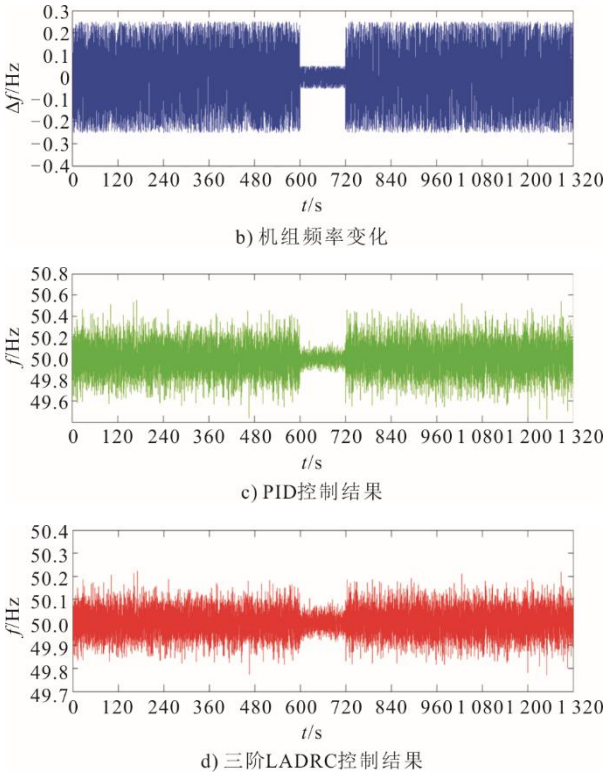


图 11 工程应用测试

Fig.11 The engineering application test results

5 结 论

1）借力 PID 的工程基础实现线性自抗扰控制的平滑推广是一种有效的途径。从反馈环传递函数的分析来看，一阶 LADRC 可以等效成 PI+一阶滤波器的形式，二阶 LADRC 可以等效成 PID+二阶滤波器的形式，三阶 LADRC 可以等效成 PID+一阶超前环节+一阶滤波器的形式。在 PID 及相关参数保持不变的情形下，仿真实验证明，线性自抗扰的 PID 实现继承了自抗扰控制突出的扰动抑制能力，其控制品质优于常规 PID 控制，其中三阶 LADRC 的扰动抑制能力最强、调节速度最快。

2）工程应用测试证明，线性自抗扰控制的 PID 实现能够满足机组功率控制系统的要求，在各种干扰信号的作用下均表现出良好的控制品质，其中三阶 LADRC 的扰动抑制能力最强，调节速度最快，极大地扩展了线性自抗扰控制的工程应用空间。

[参 考 文 献]

[1] 王珠, 刘明, 赵永亮, 等. 耦合相变储能的火电机组集成系统控制策略优化及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7235-7247.
WANG Zhu, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Control optimization and effect analysis of the integrated system for thermal power units coupled with phase-change energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7235-7247.

[2] 狄依容, 甄永赞, 胡永强. 基于扩展 PID 控制的次同步振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 2865-2876.
DI Yirong, ZHEN Yongzan, HU Yongqiang. Additional sub-synchronous damping control method based on generalized PID control[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2865-2876.

[3] 聂卓赟, 徐浩棋, 高志强, 等. 面向扰动抑制的参数调节机制与模糊抗扰 PID 控制方法[J/OL]. 控制理论与应用, 1-10[2025-06-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20250312.1022.012.html.
NIE Zhuoyun, XU Haoqi, GAO Zhiqiang, et al. Parameter tuning mechanism for disturbance suppression and a fuzzy disturbance rejection PID control method[J/OL]. Control Theory & Applications, 1-10[2025-06-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20250312.1022.012.html.

[4] 范方远, 侯忠生. 多智能体系统分布式直接型无模型自适应 PID 控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1107-1115.
FAN Fangyuan, HOU Zhongsheng. Distributed direct model free adaptive PID control for multi-agent systems[J]. Control and Decision, 2025, 40(4): 1107-1115.

[5] 冯浩, 姜金叶, 宋倩玉, 等. 电液伺服系统多 PID 控制器参数整定优化[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(4): 763-767.
FENG Hao, JIANG Jinye, SONG Qianyu, et al. Multi-PID controller parameters optimization of electro hydraulic servo system[J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(4): 763-767.

[6] 李翔, 侯忠生. 基于 PID 参数整定的无模型自适应控制器参数整定方法[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1737-1745.
LI Xiang, HOU Zhongsheng. Parameter tuning of the PG initial values for direct model-free adaptive control based on PID tuning methods[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(10): 1737-1745.

[7] 周宇阳, 郭俊鑫, 李伟, 等. 水电单元机组折线调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3553-3563.
ZHOU Yuyang, GUO Junxin, LI Wei, et al. Optimal polylinear positioning law applied for hydropower turbine control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3553-3563.

[8] 姚文龙, 亓冠华, 池荣虎, 等. 不确定受扰电液伺服系统智能自学习 PID 控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 654-660.
YAO Wenlong, QI Guanhua, CHI Ronghu, et al. Intelligent self-learning PID control of electro-hydraulic servo system with uncertain disturbances[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 654-660.

[9] HAN J Q. Active disturbance rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.

[10] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of American Control Conference. Denver, Colorado: IEEE, 2003: 4989-4996.

[11] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design[C]// Proceedings of American Control Conference. Minneapolis, MN: IEEE, 2006: 2399-2405.

[12] 崔文庆, 王雨桐, 谭文. 用 PID 控制近似线性自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(8): 1781-1789.
CUI Wenqing, WANG Yutong, TAN Wen. Approximation of linear active disturbance rejection control with PID

control[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(8): 1781-1789.
[13] 韩文杰, 谭文. 基于 PID 参数整定的线性自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1592-1600.
HAN Wenjie, TAN Wen. Parameter tuning of linear ADRC based on PID parameter tuning[J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1592-1600.
[14] ZHOU R, FU C, TAN W. Implementation of linear controllers via active disturbance rejection control structure[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2021, 68(7): 6217-6226.
[15] 谭文, 韩文杰, 户杏启. 线性自抗扰控制的对偶性分析[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1005-1013.
TAN Wen, HAN Wenjie, HU Xingqi. Duality analysis of linear active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(6): 1005-1013.
[16] 王永, 史耕金, 吴振龙. 过热汽温系统改进自抗扰控制及其工程应用研究[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 150-157.
WANG Yong, SHI Gengjin, WU Zhenlong. Research on modified active disturbance rejection control and its engineering application for superheated steam temperature system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 150-157.
[17] 马良玉, 王月, 马进. 基于 PI 参数的二阶线性自抗扰控制参数整定[J]. 控制工程, 2024, 31(10): 1761-1767.
MA Liangyu, WANG Yue, MA Jin. Parameter tuning of second-order linear active disturbance rejection control based on PI parameters[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(10): 1761-1767.
[18] 张志豪, 李军, 王林, 等. 基于内模控制和改进自抗扰控制的主汽温串级控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9331-9341.
ZHANG Zhihao, LI Jun, WANG Lin, et al. Cascade control system of main steam temperature based on internal model control and improved active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9331-9341.
[19] ZHOU R, TAN W. Analysis and tuning of general linear active disturbance rejection controllers[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5497-5501.
[20] 陈羽飞, 何永君, 田晓鹏, 等. 熔盐储能火电机组自抗扰频率控制[J]. 热能动力工程, 2025, 40(1): 94-102.
CHEN Yufei, HE Yongjun, TIAN Xiaopeng, et al. Frequency control of molten salt energy storage thermal power units based on active disturbance rejection[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(1): 94-102.
[21] 户杏启, 韩文杰, 谭文. 一阶线性自抗扰控制的整定[J]. 信息与控制, 2022, 51(4): 423-432.
HU Xingqi, HAN Wenjie, TAN Wen. Tuning of first-order linear active disturbance rejection control[J]. Information and Control, 2022, 51(4): 423-432.
[22] MADONSKI R. SHAO S, ZHANG H, et al. General error-based active disturbance rejection control for swift industrial implementations[J]. Control Engineering Practice, 2019, 84(5): 218-229.
[23] MADONSKI Ｒ, SHAO S, ZHANG H, et al. General error-based active disturbance rejection control for swift industrial implementations[J]. Control Engineering Practice, 2019, 84(5): 218-229.
[24] ZHUANG B, TAN W, LI J. Tuning of linear active disturbance rejection controller with robustness specification[J]. ISA Transactions, 2019, 85(2): 237-246.
[25] 陈旭, 綦晓, 杜鸣, 等. 基于新型自抗扰控制方法的风火协同调频策略研究[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 29-38.
CHEN Xu, QI Xiao, DU Ming, et al. Coordination frequency regulation strategy of wind-thermal power based on novel active disturbance rejection control method[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 29-38.
[26] TAN W, LIU J, CHEN T, et al. Comparison of some well-known PID tuning formulas[J]. Computers & Chemical Engineering, 2006, 30(9): 1416-1423.

（责任编辑　杜亚勤）