



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于奈奎斯特曲线的振荡对象自抗扰控制参数整定

吕涛, 黄焕袍, 汪朝晖, 朱民, 田彬, 嵇玉群

引用本文:

吕涛, 黄焕袍, 汪朝晖, 朱民, 田彬, 嵇玉群. 基于奈奎斯特曲线的振荡对象自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3859–3865.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1124>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于PID参数整定的线性自抗扰控制参数整定

Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules
控制与决策. 2021, 36(7): 1592–1600 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1408>

一种基于改进指令整形的四旋翼吊装负载摆动抑制

Load swing suppression of quadrotor slung system based on improved command shaping
控制与决策. 2021, 36(8): 1947–1954 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1733>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于奈奎斯特曲线的振荡对象自抗扰控制参数整定

吕涛¹, 黄焕袍², 汪朝晖¹, 朱民¹, 田彬², 糕玉群^{1†}

(1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084;

2. 国能智深控制技术有限公司 北京市电站自动化工程技术研究中心, 北京 100085)

摘要: 针对电力系统中存在的振荡、波动以及控制器参数难以整定的问题, 提出一种基于奈奎斯特曲线的振荡对象自抗扰控制参数整定方法. 首先将自抗扰控制器等价于二自由度控制结构, 绘制奈奎斯特曲线, 即可根据期望左渐近线或交点计算出对象最快响应情况下对应的控制器参数; 在此基础上调整相应参数大小以获得预期的响应速度, 具有直观性和简洁性, 方便工业现场运行人员调参, 并可拓展至任意阶对象和控制器; 在脱硝系统的仿真实验表明, 所提出的参数整定方法与相关文献中二阶振荡模型的 PID 参数整定方法相比, 调节时间、跟踪 IAE 指标、抗扰 IAE 指标为 PID 方案的 34.58%、62.60%、2.24%, 具有较优越的控制性能和抗干扰性能.

关键词: 奈奎斯特曲线; 振荡对象; 自抗扰控制; 二自由度控制结构; 参数整定; 稳定性分析

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2023.1124

引用格式: 吕涛, 黄焕袍, 汪朝晖, 等. 基于奈奎斯特曲线的振荡对象自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3859-3865.

Parameter tuning of active disturbance rejection control for oscillating system based on Nyquist curve

LYU Tao¹, HUANG Huan-pao², WANG Zhao-hui¹, ZHU Min¹, TIAN Bin², ZHUO Yu-qun^{1†}

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation, Beijing GuoDian ZhiShen Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In order to solve the problems of oscillation, fluctuation and controller parameter tuning in power systems, this paper presents a parameter tuning method of active disturbance rejection control based on Nyquist curve. Firstly, the active disturbance rejection controller is equivalent to a two degree of freedom control structure, and then Nyquist curve is drawn. The corresponding controller parameters can be calculated according to the expected left asymptote or intersection point, and the corresponding parameters can be adjusted to obtain the expected response speed. This method is intuitive and concise, convenient for industrial field operators to tune parameters, and can be extended to any order of objects and controllers. The simulation experiment on a denitrification system shows that compared with the PID parameter tuning method for second-order oscillation models in relevant literature, the adjusting time, the tracking IAE index and the disturbance rejection IAE index of the proposed method is 34.58%, 62.60% and 2.24% of the PID scheme respectively, which has superior control performance and anti-interference performance.

Keywords: Nyquist curve; oscillating system; active disturbance rejection control; two degree of freedom control structure; parameter tuning; stability analysis

0 引言

目前, 电力行业是国家产业结构中的支柱产业. 从国民经济与国家经济的角度看, 这也是支持其发展的重要基础工业. 不难发现, 当代的过程控制已经逐步走向大型化与复杂化, 实现发电机组运行高度自动化是未来电力行业的发展方向. 与此同时, 对控

制品质的要求不断提高: 首先要求在正常工况下, 能够获得良好的动态响应性能, 快速稳定达到预期值; 另一方面, 在运行时因各种原因出现内外扰动或负荷变动导致机组内部特性变动的情况下, 控制器仍要表现出良好的控制能力, 保证各参数波动在合理范围之内^[1], 即体现优秀的抗干扰能力.

收稿日期: 2023-08-07; 录用日期: 2024-03-05.

基金项目: 华能集团总部科技项目“基础能源科技研究专项”项目(HNKJ20-H50); 国家重大科技专项项目(J2019-III-0020-0064).

责任编辑: 周彬.

[†]通讯作者. E-mail: zhuoyq@tsinghua.edu.cn.

通常情况下,工业现场所涉及到的被控对象可分为两类,一类是惯性系统^[2],另一类是振荡系统^[3],以传统PID控制器结构或者其改进型为主的反馈控制系统被广泛应用至这些系统的控制中,其占比可达到90%^[4].对于电力系统,机组正常运行时往往会出现负荷变化或波动的情况,引发各类振荡问题^[5-6],给控制器的设计及参数整定带来了很大挑战.

从工业应用的角度出发,韩京清研究员提出了自抗扰控制^[7].在非线性的基础上进行改进,具有抗扰动、结构简单、不依赖对象精确模型等优点.通过构造扩张状态观测器^[8],可以有效估计系统的实时状态和扰动,再运用反馈控制律对扰动进行补偿,以达到良好的抗扰效果.实践证明,自抗扰控制已在火电、航天、化工等多个领域得到了广泛应用^[9-11].然而ADRC的工业应用也面临着参数多且参数整定复杂的问题.目前线性自抗扰控制技术的主要整定方法有经验法^[12]、带宽法^[13]、智能算法整定^[14]等,但也存在直观性不足、针对电力系统振荡和波动的特性难以进行参数整定等问题.奈奎斯特曲线作为基于频率响应的稳定性分析手段,由于其采用图形化的方法,具有直观性和简洁性,已经广泛应用于控制系统的设计中^[15-16].因此,本文针对振荡对象,提出一种基于奈奎斯特曲线的自抗扰控制参数整定方法,具有直观性和简洁性,方便工业现场运行人员调参,并可拓展至任意阶对象和控制器.

1 问题描述

1.1 对象介绍

在电力系统实际工业过程中,振荡的被控对象十分常见.当输入量发生变化时,其输出量常会呈现周期性变化,频率仅与系统本身有关,与信号的幅值和变化速度无关.一般情况下,振荡系统可以用2阶常微分方程表示,其标准形式为

$$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy}{dt} + y = Ku. \quad (1)$$

其中: y 为系统输出量, u 为输入量, T 为2阶系统的时间常数, K 为比例系数, ξ 为阻尼系数.

式(1)所对应的传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}. \quad (2)$$

此系统具有振荡特征的充分必要条件是 $0 \leq \xi < 1$,当 $\xi < 0$ 时,输出呈发散振荡的正弦曲线.

1.2 线性自抗扰控制

一般地,考虑 n 阶单输入单输出(SISO)系统

$$x^{(n)}(t) = p(t, x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) + w(t) + bu(t),$$

$$y(t) = x(t). \quad (3)$$

其中: t 为时间, $w(t)$ 为外部扰动, $p(\cdot)$ 为系统的非线性和不确定性, b 为系统的输入增益, $u(t)$ 为控制输入, $y(t)$ 为系统输出.考虑实际系统的输入增益往往不可得,故常采用 b_0 作为 b 的估计值.

根据自抗扰控制理论,设 $f(t)$ 为系统内外部扰动和不确定性的总和 p ,可将式(5)的系统状态定义为

$$\begin{cases} x_1 = x(t), \\ x_2 = \dot{x}(t), \\ \vdots \\ x_n = x^{(n)}(t), \\ x_{n+1} = f(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中 x_{n+1} 为扩张状态,代表系统的总扰动.则式(5)可使用状态空间表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Eh, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1},$$

$$E^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]_{1 \times (n+1)},$$

$$C = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{1 \times (n+1)},$$

$$h = \frac{df(t, x(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) + w(t)}{dt}.$$

对应的扩张状态观测器(ESO)为

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu + L(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = Cz. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $z \in R^{(n+1)}$ 为 x 的估计状态;

$$L = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_{n+1}]$$

为观测器增益矩阵,需要满足 $s^{n+1} + l_1 s^n + \dots + l_n s + l_{(n+1)} = 0$ 的所有根在左半复平面中.

根据ESO观测得到的状态变量,可设计状态反

馈控制律如下:

$$\begin{cases} u_0 = k_1 r - \sum_{i=1}^n k_i z_i, \\ u = \frac{u_0 - z_{n+1}}{b_0}. \end{cases} \quad (7)$$

其中: r 为参考输入, k_i 为状态反馈增益, u 为控制器输出.

当 ESO 对原系统状态和总扰动估计准确时, 有 $z_{n+1} \approx f(t)$, 则由式(5)和(7)可得

$$y^n(t) = f(t) + u_0(t) - z_{n+1}(t) \approx u_0(t). \quad (8)$$

即经过状态反馈控制律补偿后的系统, 可以近为一种理想的积分串联型系统.

2 调参计算方法及稳定性

首先将自抗扰控制转换成二自由度(two-degree of freedom, 2-DOF)的控制结构, 如图 1 所示. 图中: r 为设定值输入, y 为系统输出, G_c 为等效控制器, F 为等效反馈环节, G_p 为被控对象, u 为等效控制器输出, d 为对象输入扰动, w 为对象输出扰动. 则可以获得系统的开环传递函数为

$$G_{op}(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot F(s). \quad (9)$$

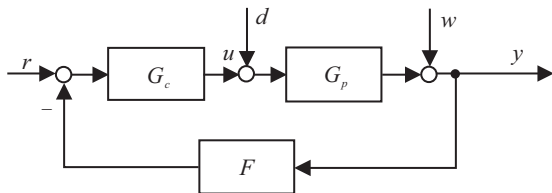


图 1 线性 ADRC 的二自由度控制结构

对于 n 阶系统 $G_p(s)$, 推导可得 $G_c(s)$ 与 $F(s)$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} G_c = \frac{R}{b_0 \cdot P}, \\ F = \frac{Q}{R}. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$R = k_1(s^{n+1} + \beta_1 s^n + \beta_2 s^{n-1} + \dots + \beta_n s + \beta_{n+1}),$$

$$P =$$

$$s^{n+1} + s^n(k_n + \beta_1) + s^{n-1}(k_{n-1} + k_n \beta_1 + \beta_2) +$$

$$s^{n-2}(k_{n-2} + k_{n-1} \beta_1 + k_n \beta_2 + \beta_3) + \dots +$$

$$s^2(k_2 + k_3 \beta_1 + k_4 \beta_2 + \dots + k_n \beta_{n-2} + \beta_{n-1}) +$$

$$s(k_1 + k_2 \beta_1 + k_3 \beta_2 + \dots + k_n \beta_{n-1} + \beta_n),$$

$$Q =$$

$$s^n(\beta_{n+1} + \beta_n k_n + \beta_{n-1} k_{n-1} + \dots + \beta_1 k_1) +$$

$$s^{n-1}(\beta_{n+1} k_n + \beta_n k_{n-1} + \dots + \beta_2 k_1) +$$

$$s^{n-2}(\beta_{n+1} k_{n-1} + \beta_n k_{n-2} + \dots + \beta_3 k_1) +$$

$$\dots + \beta_{n+1} k_1.$$

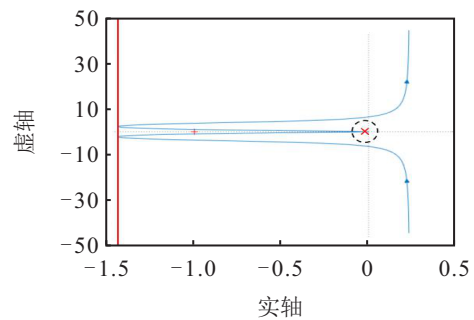
对于二阶振荡环节

$$G_p(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad 0 < \xi < 1,$$

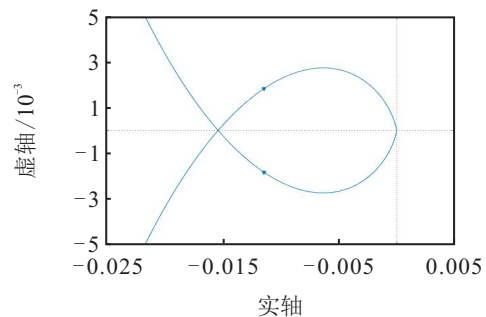
根据带宽法^[13]设计线性二阶 ADRC 进行控制, 对应参数为

$$\begin{cases} T = 5, \\ \xi = 0.5, \\ \omega_c = 0.4, \\ \omega_o = 4, \\ b_0 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

则此系统对应的 Nyquist 图如图 2 所示.



(a) 系统整体 Nyquist 图



(b) 交点处局部放大图

图 2 开环频率特性曲线

根据定义可知, 系统开环传递函数没有极点在右半平面, 则由奈奎斯特稳定判据可知, 若使系统闭环稳定, 则充要条件为开环频率特性曲线对 $(-1, 0j)$ 点的包围次数为 0. 观察图 2 可知, 一般情况下, 系统开环频率特性曲线存在一条左渐近线(图 2(a) 中红实线), 同时与实轴存在交点(图 2(a) 中红 \times). 后续将依据这两个特性, 分别研究使系统闭环稳定的参数计算方法.

2.1 左渐近线法

定义 $\text{Re}(\omega)$ 为开环频率特性曲线的实部值, 则左渐近线可表示为

$$\frac{d\text{Re}(\omega)}{d\omega} = 0. \quad (12)$$

在式(11)的情况下,可得

$$\text{Re} = \sum_{i=0}^5 A_i \omega^i / \sum_{i=0}^4 B_i \omega^{2i}. \quad (13)$$

此时,式(12)中 ω 的阶次必将高于五次方,由Abel-Ruffini定理^[17]可知,五次及更高次的代数方程没有一般的代数解法,因此式(12)无法求得解析解,需要使用数值解法.

图3为式(11)所代表振荡对象的频率特征曲线.可以发现,同样存在一条左渐近线,与加上控制器作用下得到的图2渐近线类似.

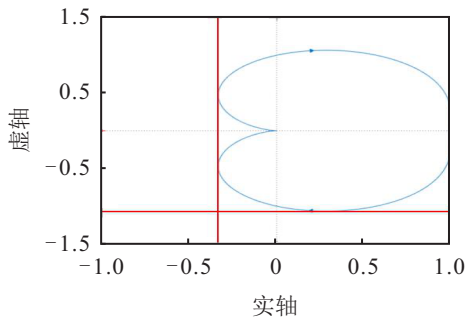


图3 振荡对象频率特征曲线

根据推测及大量实验可知,加上控制作用后,系统开环频率特征曲线的左渐近线 $L(\omega)$ 可在对象频率特征曲线左渐近线对应的 $L(\omega_{\text{left}})$ 附近取得.在已知对象传递函数的情况下,左渐近线是可以通过数值求解得出的.同时为了方便调整控制作用,计算出下渐近线对应的 $L(\omega_{\text{down}})$,此时可取系统的开环曲线期望左渐近线为

$$\omega = \omega_{\text{down}} + (\omega_{\text{left}} - \omega_{\text{down}}) \cdot K_1, \quad (14)$$

其中 K_1 为根据期望选取的实数.

此时,将已知的对象参数 T 、 ξ 、 ω 代入式(12),并暂时取 $b_0 = 1$,得到仅与控制器带宽 ω_c 有关的一元高次方程,即可得其数值解.再将上述数据代入系统开环频率特征曲线,可得到左渐近线对应的实部值 Re_0 .

由式(9)和(10)可知,系统的开环传递函数分母存在公因子 b_0 ,故可用来成比例缩放实虚部值大小,取 $b_0 = -\frac{1}{\text{Re}_0}$ 即可使系统开环频率特征曲线的左渐近线穿过 $(-1, 0j)$,实现预期目标.

依据上述思路,选取 $K_1 = 0.5$,对式(11)所示的振荡对象进行计算,可得

$$\begin{cases} \omega_{\text{left}} = 0.2828, \\ \omega_{\text{down}} = 0.1752, \\ \omega = 0.2290, \\ \omega_c = 0.3323, \\ b_0 = 0.2701. \end{cases} \quad (15)$$

此时的开环频率特征曲线如图4所示.由图4可见,实验结果与理论分析一致,实现了左渐近线对应频率的配置,并使其穿越 $(-1, 0j)$,此时的阶跃测试效果如图5所示.

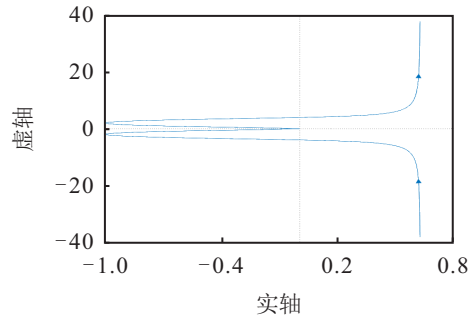


图4 渐近线法计算的开环频率特征曲线

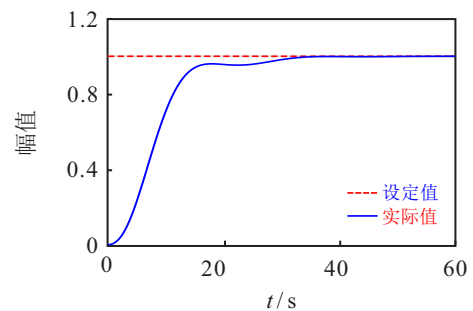


图5 渐近线法计算的阶跃测试

为调整响应速度,可设置期望响应速度因子 K_2 为

$$b_0 = -\frac{1}{\text{Re}_0} \cdot K_2. \quad (16)$$

当取 $K_2 = 1$ 时,左渐近线穿过 $(-1, 0j)$,为加快响应速度,令渐近线左移,即减小 K_2 .

2.2 交点法

同左渐近法思路,首先将曲线与实轴的交点配置到 $(-1, 0j)$,再计算 $\text{Im}(\omega) = 0$,即可得到系统开环频率特性曲线与实轴交点对应的实部值 Re_1 .此时令

$$b_0 = -\frac{1}{\text{Re}_1} \times K_2. \quad (17)$$

当取 $K_2 = 1$ 时,系统开环频率特性曲线与实轴交点为 $(-1, 0j)$,系统处于临界稳定状态.为保证系统渐近稳定,需使交点右移,即增大 K_2 .

依据上述计算思路,取 $K_1 = 5$, $K_2 = 1$,对式(11)所示的振荡对象进行计算,可得

$$\begin{cases} \omega_{\text{left}} = 0.2828, \\ \omega_{\text{down}} = 0.1752, \\ \omega = 0.2290, \\ \omega_c = 0.3323, \\ b_0 = 0.0061. \end{cases} \quad (18)$$

此时的开环频率特征曲线如图6所示. 由图6可见, 实验结果与理论分析一致, 实现了左渐近线对应频率的配置, 并使曲线与实轴交点为 $(-1, 0j)$, 此时的阶跃测试效果如图7中蓝色实线所示. 由图7中蓝色实线可见, 系统处于临界稳定状态, 且与图5相比, 响应速度有了一定提升. 为保证系统渐进稳定, 需取 $K_2 > 1$, 例如取 $K_2 = 2$ 时, 阶跃测试效果如图7中粉色点线所示.

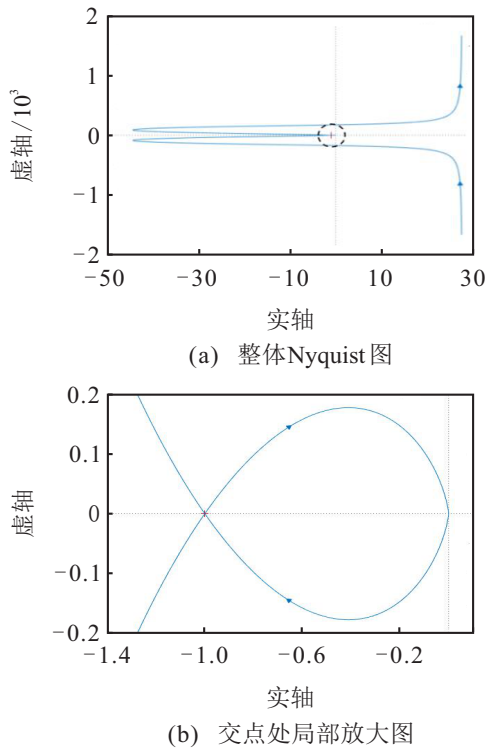


图6 交点法计算后的开环频率特性曲线

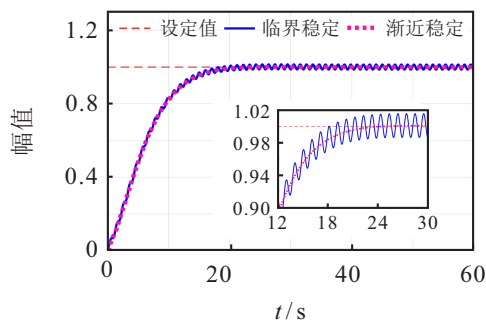


图7 通过交点法计算后的阶跃测试

2.3 高阶振荡环节应用

考虑高阶振荡环节对象

$$G_p(s) = \frac{K}{(T^2s^2 + 2\xi Ts + 1)^n}, \quad 0 < \xi < 1,$$

参数如下:

$$T = \frac{1}{3}, \xi = \frac{1}{3}, n = 2. \quad (19)$$

设计4阶ADRC, 依照前文交点法进行计算, 取 $K_1 = 0.25$, 可得开环频率特性曲线如图8所示.

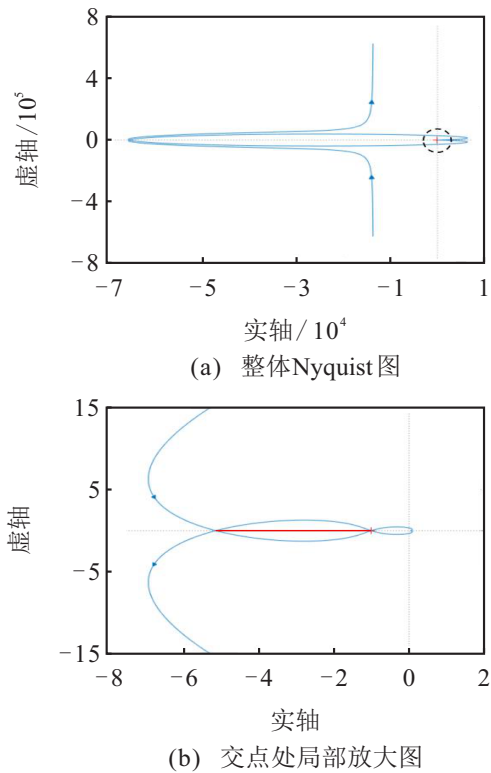


图8 高阶振荡对象的开环频率特征曲线

由奈奎斯特稳定判据可知, 若图8(b)中 $(-1, 0j)$ 位于红线部分, 则系统为闭环稳定. 此时 $K_2 = 2$, 阶跃测试如图9所示. 由图9可见, 对于高阶振荡对象, 本文所述的参数整定方法可以实现渐进稳定控制, 并可拓展至任意阶对象及控制器.

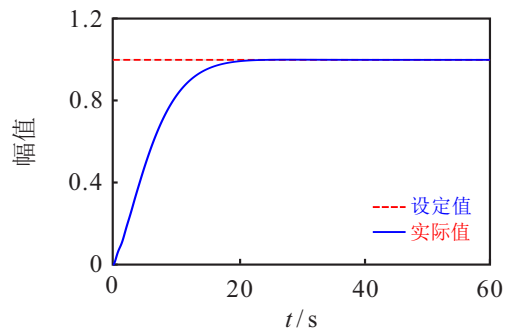


图9 交点法计算振荡对象的阶跃测试(4阶ADRC)

3 工程应用仿真实验

以某电厂脱硝控制系统为例, 其控制回路中被控量为SCR反应器出口的 NO_x 浓度, 控制量为喷氨阀门开度. 首先进行开环阶跃测试, 由DCS得到电厂运行数据, 其响应特性类似于二阶振荡环节 $G_p(s) = \frac{K}{(T^2s^2 + 2\xi Ts + 1)^n}$, 模型参数如下:

$$K = -0.690,$$

$$\xi = 0.288,$$

$$T = 170.907. \tag{20}$$

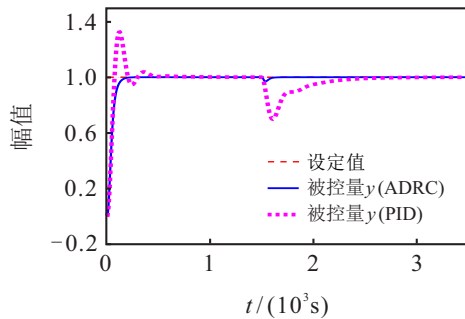
对式(20)所示系统按交点法进行计算,取 $K_1 = 1, K_2 = 10$, 可得控制参数如下:

$$\begin{cases} \omega = 0.006, \\ b_0 = -4.178 \times 10^{-5}. \end{cases} \tag{21}$$

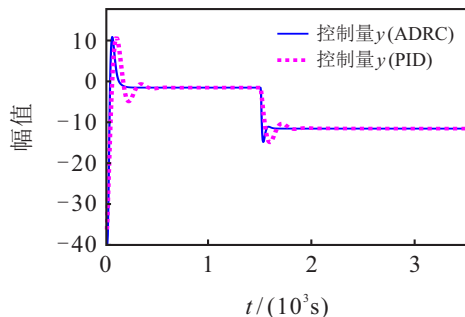
为体现所述参数整定方法具有良好的控制效果,在文献[18]针对欠阻尼二阶系统设计的PID参数整定方法的基础上,为保证控制量的量级一致,进一步整定PID参数如下:

$$\begin{cases} k_p = -35.8126, \\ k_i = -1217, \\ k_d = -924.1363. \end{cases} \tag{22}$$

分别对两种控制器进行阶跃和对象输入侧扰动,对比结果如图10所示.其中设定值为幅值为1的阶跃信号,用来比较控制器的跟踪性能,当输出跟踪上设定值并且稳定后,于1500s时在对象输入侧添加幅值为10的阶跃扰动信号,用于比较控制器的抗扰性能.两种控制器的动态性能指标如表1所示,包括超调量 σ 、调节时间 T_s (2%准则)、输出跟踪响应与设定值之间的IAE指标 IAE_{sp} 以及输出抗扰响应与设定值之间的IAE指标 IAE_d .



(a) 阶跃与扰动测试



(b) 控制器输出

图10 高阶振荡对象的控制效果对比

表1 班组重构前后成本对比

| 控制器 | σ % | T_s /s | IAE_{sp} | IAE_d |
|------|------------|----------|------------|---------|
| ADRC | 0 | 142.6 | 478.476 | 18.289 |
| PID | 32.69 | 412.4 | 764.331 | 817.453 |

由表1可见,两种控制方案在无超调的情况下,本文所述方法的其余3个指标均大幅优于PID方案的结果,其中调节时间为PID方案的34.58%,跟踪IAE指标为PID方案的62.60%,抗扰IAE指标为PID方案的2.24%,表明了所提出的参数整定方案具有良好的控制性能和抗扰性能.

4 结论

本文基于奈奎斯特稳定判据提出了一套振荡对象的自抗扰控制参数整定方法.依据系统频域响应特性和Nyquist曲线的方式,通过图像确定系统的临界稳定状态,为ADRC的最优参数整定提供可靠的范围.同时,Nyquist曲线调参更为直观,为工业现场控制仿真工作人员的参数整定提供了更为直观简便的方法.首先根据对象及自抗扰控制的特征,分别针对开环频率特性曲线的左渐近线及与实轴交点研究了参数计算方法,可以调整相应参数大小以获得预期的响应速度;同时,用此方法得到高阶振荡对象的渐近稳定控制,并且可以拓展至任意高阶对象及控制器中;最后,通过系统辨识得到脱硝系统的振荡环节特性,并应用所述方法进行参数整定,与相关文献中二阶振荡模型的PID整定方法相比较而言,本文方法在保证无超调量的情况下,在调节时间、跟踪IAE以及抗扰IAE指标上均有大幅度提升,表明所提出参数整定方法能够保证良好的跟踪和抗扰性能.

参考文献(References)

- [1] 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 W J, Tan W. Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules[J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1592-1600.)
- [2] Das S, Saha S, Das S, et al. On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes[J]. ISA Transaction, 2011, 50(3): 376-388.
- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 2-12. (Ni Y X, Chen S S, Zhang B L. Theory and analysis of dynamic power systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 2-12.)
- [4] Åström K J, Hägglund T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1163-1175.
- [5] 薛安成, 王嘉伟, 刘晓博, 等. 简化单机水电系统负阻尼时频率振荡的类Hopf非光滑分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5103-5113. (Xue A C, Wang J W, Liu X B, et al. Hopf-like non-smooth bifurcation analysis of frequency oscillation

- in simplified single hydropower generator system with negative damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5103-5113.)
- [6] 李青兰, 吴琛, 陈磊, 等. 抑制频率振荡的电力系统稳定器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 93-99.
(Li Q L, Wu C, Chen L, et al. Parameter optimization of power system stabilizer for suppressing frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 93-99.)
- [7] 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: 255-262.
(Han J Q. Active disturbance rejection control technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 255-262.)
- [8] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
(Han J Q. An expansive state observer for a class of uncertain objects[J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.)
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
(Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)
- [10] Li D Z, Li C, Gao Z Q, et al. On active disturbance rejection in temperature regulation of the proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2015, 283: 452-463.
- [11] 艾海平, 陈力. 空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 355-362.
(Ai H P, Chen L. Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft[J]. Control and Decision, 2021, 36(2): 355-362.)
- [12] 葛立明, 李宗刚, 王世伟, 等. 基于调节/观测时间的自抗扰控制器参数整定[J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1333-1337.
(Ge L M, Li Z G, Wang S W, et al. Parameter-tuning of active disturbance rejection control based on settling/observing time[J]. Control and Decision, 2017, 32(7): 1333-1337.)
- [13] Gao Z Q. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning[C]. Proceedings of the American Control Conference. New York, 2003: 4989-4996.
- [14] Gao B W, Zheng L T, Shen W, et al. A summary of parameter tuning of active disturbance RejectionController[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2023, 16(3): 180-196.
- [15] He T, Wu Z L, Shi R Q, et al. Maximum sensitivity-constrained data-driven active disturbance rejection control with application to airflow control in power plant[J]. Energies, 2019, 12(2): 231.
- [16] Huang H P, Wu L Q, Han J Q, et al. A new synthesis method for unit coordinated control system in thermal power plant-ADRC control scheme[C]. International Conference on Power System Technology. Singapore, 2004: 133-138.
- [17] Esterov A, Gusev G. Multivariate Abel-Fuffini[J]. Mathematische Annalen, 2015, 365(3/4): 1091-1100.
- [18] Wang Q G, Lee T H, Fung H W, et al. PID tuning for improved performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(4): 457-465.

作者简介

吕涛(1997-), 女, 博士生, 从事大数据预测、电厂脱硝环节控制优化等研究, E-mail: lvt19@tsinghua.edu.cn;

黄焕袍(1964-), 男, 教授级高级工程师, 从事工业自动化、控制理论研究及应用等研究, E-mail: 12025053@chnenergy.com.cn;

汪朝晖(1997-), 男, 博士生, 从事燃气轮机热声振荡的监测与控制的研究, E-mail: wangzhaohui19@mails.tsinghua.edu.cn;

朱民(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事动力推进系统中的燃烧动力学问题等研究, E-mail: zhumin@mail.tsinghua.edu.cn;

田彬(1981-), 男, 高级工程师, 从事工业过程数据分析、系统辨识、优化控制等研究, E-mail: 12011309@chnenergy.com.cn;

嵇玉群(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 从事煤燃烧过程中SO_x、NO_x及重金属污染物等多种污染物联合脱除、排放和控制等研究, E-mail: zhuoyq@tsinghua.edu.cn.