

线性自抗扰控制参数整定鲁棒性的根轨迹分析

金辉宇^{1†}, 张瑞青², 王雷³, 高志强⁴

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005; 2. 河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071001;

3. 天津理工大学 数学系, 天津 300384; 4. 克利夫兰州立大学 先进控制中心, 俄亥俄州 克利夫兰市 44115, 美国)

摘要: 从极点配置和根轨迹的角度研究了二阶线性定常对象的线性自抗扰控制. 提出一个新传递函数框图. 基于该框图, 将线性自抗扰控制的参数整定解释为闭环极点配置问题, 控制器带宽、观测器带宽等参数的整定被看作开环极、零点位置的选择. 建议用根轨迹法研究线性自抗扰控制的鲁棒性. 通过分析根轨迹定性说明了观测器带宽可以等于控制器带宽, 以及线性自抗扰控制对被控对象参数变化的鲁棒性.

关键词: 自抗扰控制; 参数整定; 极点配置; 根轨迹; 鲁棒性

引用格式: 金辉宇, 张瑞青, 王雷, 等. 线性自抗扰控制参数整定鲁棒性的根轨迹分析. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1648 – 1653

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Root locus analysis on parameter tuning robustness of linear active disturbance rejection control

JIN Hui-yu^{1†}, ZHANG Rui-qing², WANG Lei³, GAO Zhi-qiang⁴

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;

2. College of Mechanical Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei 071001, China;

3. Department of Mathematics, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

4. Center for Advanced Control Technologies, Cleveland State University, Cleveland, Ohio 44115, USA)

Abstract: The linear active disturbance rejection control for the second order linear time invariant plant is investigated from the viewpoint of pole placement and root locus. A new transfer function block diagram is proposed. Based on the diagram, the parameter tuning of linear active disturbance rejection control is interpreted as a closed-loop pole placement problem, while tuning of controller bandwidth and observer bandwidth is viewed as open-loop poles and zeros assignment. It is proposed to investigate linear active disturbance rejection control with root locus. With analyzing root loci, it qualitatively illustrates the reason why the observer bandwidth can equal to the controller bandwidth and the the robustness of linear active disturbance rejection control subjects to the plant's parametric uncertainty.

Key words: linear active disturbance rejection control; parameter tuning; pole placement; robustness; root locus

Citation: JIN Huiyu, ZHANG Ruiqing, WANG Lei, et al. Root locus analysis on parameter tuning robustness of linear active disturbance rejection control. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1648 – 1653

1 引言(Introduction)

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[1-3]是韩京清研究员提出的一种通用控制器. 它继承PID控制的思想精髓, 面向工程实际, 通过调节参数保证系统稳定, 性能常可优于PID控制. 20年来, 它在实践中不断赢得控制工程师的欢迎, 被成功应用于机电系统、飞行控制、化工过程等领域, 并受到控制理论界越来越多的关注^[4-5].

参数整定是ADRC的一个基本问题^[6]. 最初ADRC

采用非线性结构, 待整定参数有10个左右. 高志强将其改为线性结构, 提出了线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC), 待整定参数降至5个^[7]. 文[7]还提出了“带宽法”, 引入了“控制器带宽”、“观测器带宽”等概念, 将待整定参数进一步降至2-3个. 此后带宽法逐步发展成LADRC参数整定的主流方法, 得到较多理论研究^[8-10], 指导了大量工程实践, 并发展出若干新的参数整定方法^[11-12]. 最近, 文[13]发现可让控制器带宽和观测器带宽相等, 将待

收稿日期: 2017-10-25; 录用日期: 2018-03-19.

[†]通信作者. E-mail: jinhy@xmu.edu.cn.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(61733017), 福建省自然科学基金项目(2016J01317), 国家留学基金项目(201606315084)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61733017), the Nature Science Foundation of Fujian Province (2016J01317) and the State Scholarship Fund of China (201606315084).

整定参数降至1个,且所获得的LADRC控制器对被控对象的参数变化不敏感.如何解释上述发现,成为LADRC理论研究的一个重要问题.

本文尝试从极点配置和根轨迹的角度解释上述发现.针对二阶线性定常(linear time invariant, LTI)对象,给出了LADRC的一个新传递函数框图,基于该框图将LADRC的参数整定看作一个存在不确定性的闭环极点配置问题,其中不确定性来自根轨迹增益和一个开环零点,而将控制器带宽、观测器带宽等参数的整定看作开环极、零点位置的选择.在此基础上,建议用根轨迹研究LADRC的参数整定.用根轨迹法解释了文[13]发现的现象,通过比较根轨迹简图说明可以让观测器带宽等于控制器带宽,并通过对象参数变化时闭环极点位置的变化定性说明了LADRC的鲁棒性.

本文其余部分安排如下:第2节简要介绍LADRC;第3节给出LADRC的新框图和参数整定的极点配置解释,建议用根轨迹研究LADRC的参数整定;第4节针对文[13]中的对象,通过比较根轨迹简图说明可以让观测器带宽等于控制器带宽;第5节说明了LADRC对被控对象参数变化的鲁棒性.

2 问题描述和 LADRC (Problem formulation and LADRC)

考虑线性定常二阶对象

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_2x_1 - a_1x_2 + bu, \end{cases} \quad (1)$$

$$y = x_1, \quad (2)$$

其中: x_1, x_2 是系统状态,而 u 和 y 分别是输入和输出.系数 $b > 0$ 且数值已知, a_1, a_2 不全为0且数值未知.要求设计输出反馈控制器,使输出 y 跟踪参考输入 r , 典型的 r 是一个阶跃信号.

为保证暂态性能, LADRC 通过跟踪微分器(tracking differentiator, TD)由参考信号 r 生成信号 v_1, v_2 . 本文不讨论 TD, 仅假设 v_1, v_2 满足

$$\dot{v}_1 = v_2, \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (r - v_1) = 0. \quad (4)$$

由于系数 a_1, a_2 未知, LADRC 引入扩张状态

$$x_3 = -a_2x_1 - a_1x_2,$$

并将式(1)–(2)改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu, \\ \dot{x}_3 = \dot{x}_3, \end{cases} \quad (5)$$

$$y = x_1, \quad (6)$$

然后为式(5)–(6)建立线性扩张状态观测器(linear expansion state observer, LESO)

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \beta_1(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_2, \\ \dot{\hat{x}}_2 = \beta_2(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_3 + bu, \\ \dot{\hat{x}}_3 = \beta_3(y - \hat{x}_1), \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 是待定参数.再以观测器输出构成控制器

$$u = \frac{1}{b}[l_2(v_1 - \hat{x}_1) + l_1(v_2 - \hat{x}_2) - \hat{x}_3], \quad (8)$$

其中系数 l_1, l_2 待定.系统(1)–(2)、LESO(7)和控制器(8)就组成了LADRC.

3 LADRC 参数整定的极点配置解释 (Pole placement interpretation of parameters tuning of LADRC)

3.1 LADRC 的新框图 (New block diagrams of LADRC)

记LESO的误差为 $\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i, i = 1, 2, 3$, 有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -\beta_1\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\beta_2\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3, \\ \dot{\tilde{x}}_3 = -\beta_3\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3. \end{cases} \quad (9)$$

令

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= l_2v_1 + l_1v_2, \\ \nu &= l_2\tilde{x}_1 + l_1\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3, \\ e &= \tilde{r} + \nu. \end{aligned} \quad (10)$$

将控制器(8)代入式(5),并将 e 和 $[y, \dot{x}_3]^T$ 分别看作输入和输出,就得到一个单输入双输出的子系统,称为反馈控制子系统,记作

$$H_c : \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -l_2x_1 - l_1x_2 + e, \end{cases} \quad \begin{bmatrix} y \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ a_1l_2x_1 + (a_1l_1 - a_2)x_2 - a_1e \end{bmatrix}.$$

另一方面,将式(9)和(10)看做以 \dot{x}_3 为输入、以 ν 为输出的另一个子系统,称为ESO误差子系统,记作

$$H_o : \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -\beta_1\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\beta_2\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3, \\ \dot{\tilde{x}}_3 = -\beta_3\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3, \end{cases} \quad \nu = l_2\tilde{x}_1 + l_1\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3.$$

这两个子系统有如图1所示的反馈互联结构.

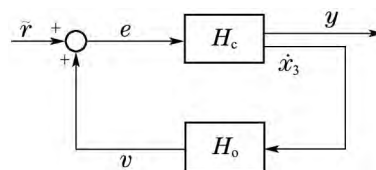


图 1 LADRC 中的反馈互联结构

Fig. 1 A feedback structure in LADRC

考虑到 H_c 中从 e 到 \dot{x}_3 , H_o 中从 \dot{x}_3 到 v , 以及 H_c 中从 \dot{x}_3 到 y 分别有传递函数

$$H_c(s) = -\frac{s(a_1s + a_2)}{s^2 + l_1s + l_2},$$

$$H_o(s) = \frac{s^2 + (\beta_1 + l_1)s + \beta_1l_1 + \beta_2 + l_2}{s^3 + \beta_1s^2 + \beta_2s + \beta_3},$$

$$H_1(s) = -\frac{1}{s(a_1s + a_2)},$$

图1又可以画成图2的传递函数框图.

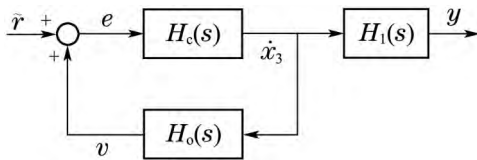


图2 LADRC的新传递函数框图

Fig. 2 A new transfer function diagram of LADRC

注1 与现有传递函数框图(文[14]之图1)相比, 图2有三点不同: 第一, 图2没有出现被控对象和控制器的传递函数, 而代之以反馈控制子系统 $H_c(s)$ 和ESO误差子系统 $H_o(s)$; 第二, 子系统 $H_c(s)$ 的极点由 l_1, l_2 决定, 而子系统 $H_o(s)$ 的极点由 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 决定, 可以分别设计; 第三, 对象(1)的参数不确定性仅表现在反馈控制子系统 $H_c(s)$ 的分子上.

3.2 LADRC 参数整定的极点配置解释 (Pole placement interpretation of LADRC tuning)

众所周知, 闭环极点的位置决定控制系统的稳定性, 并主导其暂态性能. 容易验证, 由对象(1)-(2)、LESO(7)、控制器(8)和TD组成的LADRC, 其闭环极点是就图2的闭环极点. 考虑到待调参数 l_1, l_2 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别对应 $H_c(s)$ 和 $H_o(s)$ 的极点并决定 $H_o(s)$ 的零点, 可以得到LADRC参数整定的极点配置解释:

二阶对象LADRC的参数整定, 可以看作当参数 a_1, a_2 不确定时, 通过调节 l_1, l_2 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 来调整开环零、极点的位置, 从而配置闭环极点, 保证系统稳定并具有满意暂态性能的过程.

上述解释将LADRC的参数和性能通过闭环极点位置联系起来. 基于该解释, 本文建议用根轨迹法分析LADRC的参数整定. 根轨迹法的详细介绍请参阅文[15-16]. 用根轨迹法研究LADRC可见文[17].

轨迹法的优点在于, 只要具有对象的一些定性知识, 例如 a_1, a_2 是否为零, 符号怎样, 数值是“大”还是“小”等, 就可以画出根轨迹草图, 先定性、再定量地分析LADRC的闭环性能. 实际工作中上述定性知识通常不难获得, 因而有助于克服参数不确定带来的分析困难.

下面就以根轨迹为工具, 解释文[13]所发现的现象. 与文[17]不同, 本文根轨迹分析基于图2的传递函

数框图. 先将图2中 $H_c(s)$ 和 $H_o(s)$ 组成的反馈回路改画成图3的单位负反馈形式, 其中

$$L_0(s) = \begin{cases} -\frac{1}{a_1} H_c(s) H_o(s), & a_1 \neq 0, \\ -\frac{1}{a_2} H_c(s) H_o(s), & a_1 = 0, \end{cases}$$

而

$$k = \begin{cases} a_1, & a_1 \neq 0, \\ a_2, & a_1 = 0 \end{cases}$$

是根轨迹增益. 由图3可以看出, 从根轨迹的角度, 不确定性来自两个方面: 一是根轨迹增益 k ; 二是由 $H_c(s)$ 引入的一个零点, 如果 $a_1 = 0$, 则这个零点不存在; 否则该零点位于 $-\frac{a_2}{a_1}$.

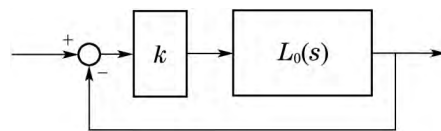


图3 将图2改画成单位负反馈形式

Fig. 3 To re-draw Fig. 2 to unit negative feedback form

4 观测器带宽可以等于控制器带宽的原因 (The reason why observer bandwidth can equal to controller bandwidth)

自文[7]提出带宽法以来, 控制器带宽 ω_c 和观测器带宽 ω_o 就在LADRC的参数整定中发挥重要作用. 以往一般让 $\omega_c < \omega_o$, 然后以

$$l_1 = 2\omega_c, l_2 = \omega_c^2, \tag{11}$$

$$\beta_1 = 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = \omega_o^3 \tag{12}$$

生成参数 l_1, l_2 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. 文[13]中, 令

$$\omega_c = \omega_o,$$

取得了良好的效果. 本节对此予以定性解释.

假定对象(1)中有 $a_1 > 0$ 且 $a_2 \geq 0$, 比较下面3种情况的根轨迹图:

A) 选择

$$\omega_o > \omega_c > 2\frac{a_2}{a_1};$$

B) 选择

$$\omega_c > \omega_o > 2\frac{a_2}{a_1};$$

C) 选择

$$\omega_c = \omega_o > 2\frac{a_2}{a_1}.$$

3种情况均以式(11)和式(12)生成参数 l_1, l_2 和 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$.

4.1 开环极、零点的位置(Locations of open-loop poles and zeros)

上述3种情况中, 图3中的 $L_0(s)$ 都由 $H_c(s)$ 代入两个零点

$$z_1 = 0, \tag{13}$$

$$z_2 = -\frac{a_2}{a_1}. \tag{14}$$

如果 $a_2 = 0$, 则 $z_2 = z_1$, 两个零点重合, $L_0(s)$ 在原点有一个二重零点.

对于情况A)和B), $L_0(s)$ 有二重极点

$$p_1 = p_2 = -\omega_c \tag{15}$$

和三重极点

$$p_3 = p_4 = p_5 = -\omega_o, \tag{16}$$

以及一对复零点

$$z_{3,4} = \frac{-3\omega_o - 2\omega_c \pm j\sqrt{3\omega_o^2 + 12\omega_o\omega_c}}{2}. \tag{17}$$

差别在于: 情况A)中二重极点 $-\omega_c$ 更靠近虚轴, 而B)中三重极点 $-\omega_o$ 更靠近虚轴.

对于情况C), $L_0(s)$ 有五重极点

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = -\omega_o,$$

以及一对复零点

$$z_{3,4} = \frac{-5 \pm j\sqrt{15}}{2}\omega_o. \tag{18}$$

4.2 根轨迹图的比较(Comparison of root loci)

针对 $a_2 > 0$ 的情况, 用MATLAB画3种情况的根轨迹图, 如图4-6所示, 并在图上用黑色星点标出 $k = a_1$ 时的闭环极点. 从图中可以看出, 3种整定方法的根轨迹很相似: 首先, 全部根轨迹都在开左半平面, 所以LADRC稳定; 其次, 都有一对根轨迹从 $-\omega_c$ 或者 $-\omega_o$ 分离, 向右上和右下前进, 然后在零点 z_1 和 z_2 之间的负实轴上相遇, 再分别向右、向左, 沿负实轴进入零点 z_1 和 z_2 . 闭环主导极点也都在这一对根轨迹上, 且位置相差不大; 第三, 3种整定方法还各有一条根轨迹沿负实轴趋于 $-\infty$, 一对根轨迹分别进入零点 z_3 和 z_4 . 差别仅在于, 情况A)和C)中, 这一对进入 z_3 和 z_4 的根轨迹直接从 $-\omega_o$ 分离, 而情况B)中, 这一对根轨迹先分别从 $-\omega_o$ 和 $-\omega_c$ 出发, 沿负实轴相向而行, 相遇后才分离. 同时可以看出, 3种情况下, $k = a_1$ 时的闭环极点位置也差别不大.

如果 $a_2 = 0$, 则零点 z_1 和 z_2 重合, 3张图中右边一对根轨迹将分别从上、下方向沿虚轴进入原点, 另外3条根轨迹基本不变, 读者可自行作图验证.

因为3种情况的根轨迹和闭环极点位置差别不大, 可以得出结论:

对于 $a_1 > 0, a_2 \geq 0$, 且 $\frac{a_2}{a_1}$ 不大的情况, 参数整定

时可以令 $\omega_c = \omega_o$, 从而将待调参数降为1个.

这就定性解释了文[13]可以让 $\omega_o = \omega_c$ 的原因.

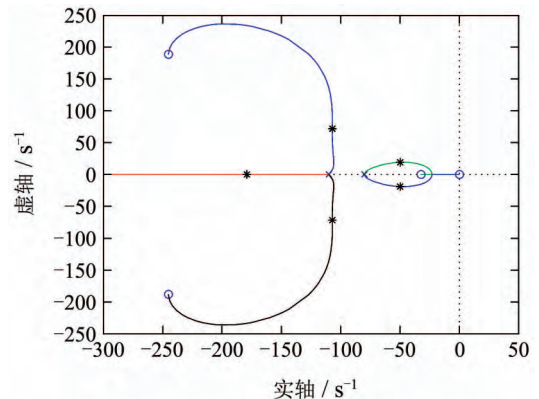


图 4 情况A)的根轨迹图, 其中: $\omega_c = 80, \omega_o = 110, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

Fig. 4 The root locus of Case A), in which $\omega_c = 80, \omega_o = 110, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

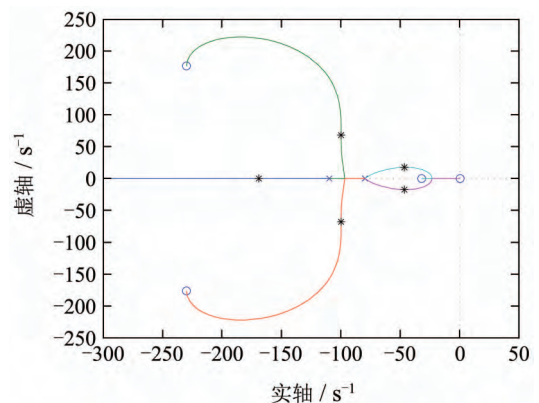


图 5 情况B)的根轨迹图, 其中: $\omega_c = 110, \omega_o = 80, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

Fig. 5 The root locus of Case B), in which $\omega_c = 110, \omega_o = 80, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

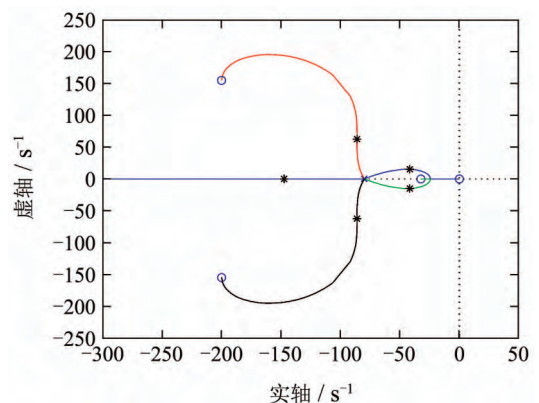


图 6 情况C)的根轨迹图, 其中: $\omega_c = \omega_o = 80, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

Fig. 6 The root locus of Case C), in which $\omega_c = \omega_o = 80, a_1 = 3.085, a_2 = 100$

注2 “ $\frac{a_2}{a_1}$ 不大”意味着没有必要将 $-\omega_c$ 或 $-\omega_o$ 置于区间 $(-\frac{a_2}{a_1}, 0)$ 之内. 如果 $\frac{a_2}{a_1}$ 大且将 $-\omega_c$ 或 $-\omega_o$ 置于该区间内, 则3种情况的根轨迹图将有较大差异, 有待进一步研究. 同时, 3种情况中让 ω_c 或 ω_o 大于 $2\frac{a_2}{a_1}$ 是为了避免 $-\omega_c$ 或 $-\omega_o$ 接近点 $-\frac{a_2}{a_1}$, 系数2只是个粗略的估计.

注3 图4和图5的相似性还可以解释在二阶LTI对象的参数整定时, 将 ω_c 和 ω_o 互换对LADRC的性能影响不大. 这也是一个有趣的现象.

5 用根轨迹解释LADRC的鲁棒性(Interpreting the robustness of LADRC with root locus)

文[13]还发现, 用 $\omega_c = \omega_o$ 得到的LADRC控制器, 对参数 a_1 和 a_2 的变化具有良好的鲁棒性. 本节用根轨迹解释这一现象.

5.1 对参数 a_1 的鲁棒性(Robustness for the parameter a_1)

在 $a_1 > 0$ 时, a_1 就是图3中的根轨迹增益 k . 按文[13]中参数, 取 $a_2 = 0, \omega_o = \omega_c = 100$, 用MATLAB作图3的根轨迹图, 并将

$$a_1 = 0.1, 1, 3.085, 10, 100$$

时的闭环极点用不同颜色的星点标注, 如图7所示. 从图中可以看出, 由于整个根轨迹都在开左半平面, 对于各个 a_1 的取值, 系统都是稳定的. 但随着 a_1 的增大, 闭环极点的位置发生变化, 因而系统性能也会随之改变, 这和文[13]的结果一致.

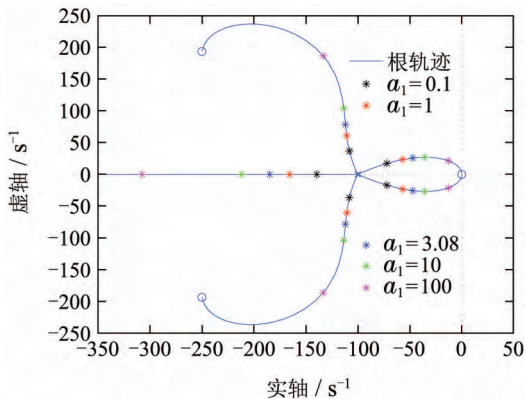


图7 a_1 对闭环极点位置的影响, 其中: $\omega_c = \omega_o = 100, a_2 = 0$
Fig. 7 The influence of a_1 to the locations of closed-loop poles, in which $\omega_c = \omega_o = 100, a_2 = 0$

5.2 对参数 a_2 的鲁棒性 (Robustness for the parameter a_2)

当 $a_1 > 0$ 且给定时, a_2 的变化只能通过影响零点 $z_2 = -\frac{a_2}{a_1}$ 的位置来影响闭环极点位置. 按文[13]中参

数, 取 $a_1 = 3.085, \omega_o = \omega_c = 100$, 令 $a_2 = 0, 100$

分别作根轨迹图, 并将 $a_1 = 3.085$ 时的闭环极点以星点标注, 如图8所示. 从中可以看出, a_2 从0增加到100, 闭环极点位置的改变很小. 可以想见,

$$a_2 = 0.1, 1, 3.085, 10$$

时, 闭环极点的位置也很接近改变将更小. 因此, a_2 从0增加到100, 系统的性能差别也很小, 这也和文[13]的结果一致.

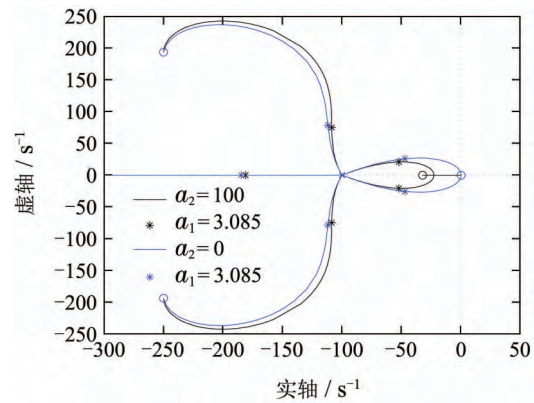


图8 a_2 对根轨迹和闭环极点位置的影响, 其中:
 $\omega_c = \omega_o = 100, a_1 = 3.085, a_2 = 0, 100$
Fig. 8 The influence of a_2 to root loci and locations of closed-loop poles, in which $\omega_c = \omega_o = 100, a_1 = 3.085, a_2 = 0, 100$

5.3 参数 a_1 和 a_2 同时改变时的鲁棒性(Robustness when a_1 and a_2 varying simultaneously)

根轨迹还能分析参数 a_1, a_2 同时改变时LADRC的鲁棒性. 例如, 假定对象参数从

$$a_1 = 3.085, a_2 = 100,$$

变化至

$$a_1 = 10, a_2 = 0.$$

由图8可知, 保持 $a_1 = 3.085$ 而让 a_2 从100减小至0, 闭环极点位置变化不大. 再由图7, 保持 $a_2 = 0$ 而让 a_1 从3.085增大至10, 闭环极点位置变化也不大. 于是, a_1 从3.085增至10同时 a_2 从100减至0, LADRC闭环极点位置变化不大, 其性能也不会有大的改变.

6 结论(Conclusions)

本文以二阶LTI对象为例, 研究了LADRC的参数整定问题. 将参数整定看做一个存在不确定性的闭环极点配置问题, 建议用根轨迹研究该问题, 并用根轨迹解释了文[13]发现的若干现象, 定性说明了控制器带宽可以等于观测器带宽的原因, 以及LADRC对被控对象参数变化鲁棒的原因. 这些结果表明, 根轨迹是分析LADRC的有力工具, 可望在对高阶和更复杂对象的分析中发挥重要作用.

参考文献(References):

- [1] HAN Jingqing. Auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [2] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique—the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
(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.)
- [3] HAN J. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [4] XIA Yuanqing, FU Mengyin, DENG Zhihong, et al. Recent developments in sliding mode control and active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 137 – 147.
(夏元清, 付梦印, 邓志红, 等. 滑模控制和自抗扰控制的研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 137 – 147.)
- [5] HUNG Y, XUE W. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 963 – 976.
- [6] LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 281 – 295.
(李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281 – 295.)
- [7] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2003. 4989 – 4996.
- [8] YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control of second-order systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1630 – 1640.
(袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630 – 1640.)
- [9] ZHANG Chao, ZHU Jihong, GAO Yakui. Order and parameter selections for active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1480 – 1485.
(张超, 朱继洪, 高亚奎. 自抗扰控制器的阶次与参数的选取 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1480 – 1485.)
- [10] TAN W, FU C. Linear active disturbance-rejection control: analysis and tuning via IMC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2350 – 2359.
- [11] XUE W, BAI W, YANG S, et al. ADRC with adaptive extended state observer and its application to airfuel ratio control in gasoline engines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5847 – 5857.
- [12] FU Caifen, TAN Wen. Parameters tuning of linear active disturbance rejection control based on high order controller design [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(2): 255 – 272.
(傅彩芬, 谭文. 基于高阶控制器设计的线性自抗扰控制参数调整 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(2): 255 – 272.)
- [13] ZHENG Q, GAO Z. Active disturbance rejection control: between the formulation in time and the understanding in frequency [J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(3): 250 – 259.
- [14] TIAN G, GAO Z. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C] // *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications*. Singapore: IEEE, 2007: 1595 – 1599.
- [15] FRANKLIN G F, POWELL J D, EMAMI-NAEINI A. *Feedback Control of Dynamic Systems* [M]. 4th Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.
- [16] WU Qi, WANG Shifu. *Principles of Automatic Control* [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
(吴麒, 王诗必. 自动控制原理(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2006.)
- [17] TATSUMI J, GAO Z. On the enhanced ADRC design with a low observer bandwidth [C] // *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*. Xi'an: IEEE, 2013: 297 – 302.

作者简介:

金辉宇 (1975–), 男, 助理教授, 目前研究方向为数据驱动控制、非线性控制、自抗扰控制, E-mail: jinhy@xmu.edu.cn;

张瑞青 (1972–), 女, 副教授, 目前研究方向为自抗扰控制、热工过程建模仿真与控制、生态环境监测与控制等, E-mail: zhrqingcn@163.com;

王雷 (1982–), 男, 讲师, 目前研究方向为分布参数系统控制、自抗扰控制的稳定性, E-mail: thunder@tju.edu.cn;

高志强 (1960–), 男, 副教授, 主要从事控制论和自抗扰控制方面的研究, E-mail: z.gao@ieee.org.