

二阶系统线性自抗扰控制的稳定性条件

金辉宇¹ 刘丽丽¹ 兰维瑶¹

摘要 研究了线性自抗扰控制 (Linear active disturbance rejection control, LADRC) 抑制内扰的机理. 针对无外扰的二阶线性系统, 给出了线性自抗扰控制的一个稳定性充要条件. 使用该条件证明了实践中广泛应用的带宽法可以克服对象的参数不确定性, 找到合适的观测器带宽保证自抗扰控制稳定.

关键词 线性自抗扰控制, 二阶系统, 稳定性, 内扰, 观测器带宽

引用格式 金辉宇, 刘丽丽, 兰维瑶. 二阶系统线性自抗扰控制的稳定性条件. 自动化学报, 2018, 44(9): 1725–1728

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160817

On Stability Condition of Linear Active Disturbance Rejection Control for Second-order Systems

JIN Hui-Yu¹ LIU Li-Li¹ LAN Wei-Yao¹

Abstract The mechanism for linear active disturbance rejection control (LADRC) to reject internal disturbance is investigated. For the linear second-order systems without external disturbance, a sufficient and necessary stability condition of LADRC is given. With the condition, it is proved that the bandwidth method widely used in practice can overcome plant parametric uncertainty and find a suitable observer bandwidth to guarantee the stability of LADRC.

Key words Linear active disturbance rejection control (LADRC), second-order system, stability, internal disturbance, observer bandwidth

Citation Jin Hui-Yu, Liu Li-Li, Lan Wei-Yao. On stability condition of linear active disturbance rejection control for second-order systems. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1725–1728

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, 具有结构简单、参数调节方便、无需精确建模等优点. 线性自抗扰控制 (Linear active disturbance rejection control, LADRC)^[4] 是 ADRC 的改进版本, 它将 ADRC 中的扩张状态观测器 (Extended state observer, ESO) 和反馈控制改为线性, 为理论研究带来便利, 同时减少了待调参数数目. 目前, LADRC 已在机电系统、飞行控制、化工过程等领域得到广泛应用, 并受到控制理论界的高度关注^[5–8].

与其他方法相比, ADRC 更重视低阶系统的研究, 原因有二. 1) ADRC 强调面向控制工程实践, 因而重视工程中大量存在的低阶系统. 2) ADRC 具有方法上的优越性, 能有效

处理各种未建模动态. 在 ADRC 理论中, 系统未建模动态被看作“内扰”, 和外扰对应, 并与外扰共同构成总扰动. 通过使用 ESO, ADRC 能实时、准确地估计总扰动, 并通过反馈加以抑制. 在 ADRC 看来, 与其费时费力地建立复杂系统的高阶模型, 不如将其简化为低阶系统. 控制好该低阶系统, 也就控制好原系统.

秉承 ADRC 的上述观点, LADRC 也同样重视低阶系统, 尤其是二阶系统的研究. 在文献 [4] 中针对二阶系统提出了“控制器带宽”和“观测器带宽”的概念, 并提出了确定 LADRC 参数的带宽法. 在文献 [9–10] 中, 发现增加观测器带宽能改善 LADRC 的鲁棒性, 并给出了参数取值的建议范围. 文献 [11] 从频域探讨了三阶线性扩张状态观测器 (Linear extended state observer, LESO) 对总扰动的估计能力和 LADRC 镇定二阶系统的能力. 文献 [12] 则在分析二阶系统的基础上建议通过线性/非线性 ADRC 的切换来进一步改善控制效果. 这些二阶系统的研究发展出 LADRC 的主流研究方法, 并指导了成百上千的工程实践. 美中不足的是, 至今尚未找到 LADRC 镇定二阶系统的充要条件.

本文研究二阶系统的 LADRC. 针对无外扰和线性内扰的情况, 发现 LADRC 可以分解成状态反馈和 LESO 误差两个子系统的反馈互联. 扩张状态的导数既是状态反馈子系统的输出又是 LESO 误差子系统的输入, 而 LESO 误差的某个线性组合则既是 LESO 误差子系统的输出又是状态反馈子系统的输入. 在此分解的基础上导出了 LADRC 镇定二阶系统的充要条件, 并用该条件证明了, 仅使用“内扰为线性”这一信息, 文献 [4] 的带宽法就能克服对象的参数不确定性, 找到一个合适的观测器带宽保证 LADRC 系统稳定.

1 理论结果

1.1 问题描述和 LADRC

考虑以下线性定常二阶系统

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

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

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 $b > 0$ 且已知, a_1, a_2 未知但不全为 0. 要求设计输出反馈控制器, 将状态镇定到原点.

由于系数 a_1, a_2 未知, LADRC 将不确定项 $(-a_2x_1 - a_1x_2)$ 看做“内扰”, 并引入扩张状态

$$x_3 = -a_2x_1 - a_1x_2$$

再将式 (1) 和式 (2) 改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \hat{x}_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$y = x_1 \quad (4)$$

然后为式 (3) 和式 (4) 建立 LESO

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = k_1(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = k_2(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_3 + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 = k_3(y - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (5)$$

其中, k_1, k_2, k_3 是待定系数. 最后再以 LESO 的输出构成控

收稿日期 2016-12-10 录用日期 2017-05-31

Manuscript received December 10, 2016; accepted May 31, 2017

国家自然科学基金 (61374035), 福建省自然科学基金 (2016J01317), 国家留学基金 (201606315084) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374035), Natural Science Foundation of Fujian Province (2016J01317), and State Scholarship Fund of China (201606315084)

本文责任编辑 李海波

Recommended by Associate Editor JI Hai-Bo

1. 厦门大学航空航天学院 厦门 361005

1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005

制器

$$u = -\frac{1}{b}(l_2\hat{x}_1 + l_1\hat{x}_2 + \hat{x}_3) \quad (6)$$

其中, 系数 l_1, l_2 待定. 被控对象式 (1) 和式 (2)、LESO (5) 和控制器 (6) 就组成了 LADRC 系统.

1.2 LADRC 稳定的充要条件

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

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -k_1\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -k_2\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3 \\ \dot{\tilde{x}}_3 = -k_3\tilde{x}_1 + \tilde{x}_3 \end{cases} \quad (7)$$

令

$$\nu = l_2\tilde{x}_1 + l_1\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3 \quad (8)$$

将控制器 (6) 代入 (3), 有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -l_2x_1 - l_1x_2 + \nu \\ \dot{x}_3 = a_1l_2x_1 + (a_1l_1 - a_2)x_2 - a_1\nu \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

将式 (9) 和式 (10) 看做以 ν 为输入、以 $\dot{x}_3$ 为输出的一个子系统, 记该子系统为 H_1 . 同时将式 (7) 和式 (8) 看做以 $\dot{x}_3$ 为输入、以 ν 为输出的另一个子系统, 记为 H_2 . 这两个系统存在如图 1 所示的反馈互联结构.

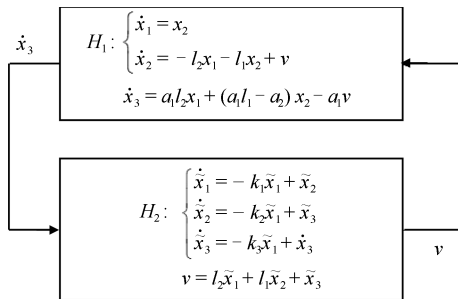


图 1 LADRC 的反馈互联结构, 其中子系统用状态空间形式
Fig.1 Feedback interconnection structure of LADRC, in which subsystems are described in state space

再考虑到 H_1, H_2 分别有传递函数

$$H_1(s) = -\frac{s(a_1s + a_2)}{s^2 + l_1s + l_2}$$

$$H_2(s) = \frac{s^2 + (k_1 + l_1)s + k_1l_1 + k_2 + l_2}{s^3 + k_1s^2 + k_2s + k_3} \quad (11)$$

于是图 1 又可以画成图 2 的负反馈形式.

现在考虑整个 LADRC 系统的稳定性. 约定当且仅当对象状态 x_1, x_2 和 LESO 误差 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ 都稳定时称原 LADRC 系统稳定. 于是有以下定理.

定理 1. 由被控对象 (1) 和 (2)、LESO (5) 和控制器 (6) 组成的 LADRC 系统稳定, 当且仅当图 2 中的负反馈系统稳定, 即方程

$$s(a_1s + a_2)(s^2 + (k_1 + l_1)s + k_1l_1 + k_2 + l_2) + (s^2 + l_1s + l_2)(s^3 + k_1s^2 + k_2s + k_3) = 0 \quad (11)$$

的根都在左开半平面.

证明. 图 1 是以 $x_1, x_2, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ 为状态变量描述原 LADRC 系统的反馈机理, 而图 2 又是图 1 的传递函数描述, 三者的稳定性等价. 因此, 当且仅当图 2 系统特征方程

$$1 - H_1(s)H_2(s) = 0 \quad (12)$$

的根都在左开半平面时, 原 LADRC 系统稳定. 而特征方程 (12) 的根就是方程 (11) 的根. $\square$

定理 1 为 LADRC 镇定二阶系统这一问题提供了一个古典控制的研究框架. 在这一框架下, 各种古典控制方法, 包括罗斯判据、奈奎斯特图、波特图等, 都可以用来分析和设计 LADRC. 既能在系数 a_1, a_2 已知或范围已知时, 分析给定 LADRC 控制器的稳定性和稳定裕量, 又能用来设计 LADRC 控制器的参数 l_1, l_2, k_1, k_2, k_3 . 在下一节, 我们就用定理 1 的充分性和奈奎斯特图证明, 即使 a_1, a_2 完全未知, 文献 [4] 的带宽法也能找到一组合适的参数, 保证 LADRC 镇定二阶系统.

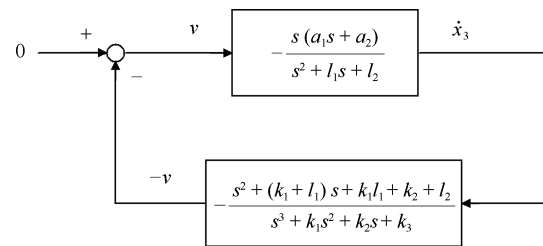


图 2 LADRC 的反馈互联结构, 其中子系统用传递函数形式
Fig.2 Feedback interconnection structure of LADRC, in which subsystems are described with transfer functions

注 1. 由于被控对象 (1) 和 (2) 和整个 LADRC 系统都为线性, 定理 1 中的稳定其实是指数稳定.

注 2. 定理 1 对被控对象状态和 LESO 误差的初值均未作要求. 这是自然的, 因为本文中的 LADRC 是一个线性系统, 其稳定性与初值无关. 考虑到对象 (1) 的内扰就是其总扰动, 这意味着对象的总扰动及其导数都不必有界. 与文献 [13] 假定总扰动的导数全局有界相比, 这是一个改进.

1.3 带宽法有效性的新证明

文献 [4] 提出的带宽法建议通过调整三个正参数来镇定二阶系统. 这三个参数分别是控制器带宽 ω_c , 控制器阻尼比 ξ_c 和观测器带宽 ω_o . 先根据对控制系统性能的要求选定 ω_c 和 ξ_c , 然后令

$$l_1 = 2\xi_c\omega_c, \quad l_2 = \omega_c^2 \quad (13)$$

再由 ω_o 的当前取值, 按照

$$k_1 = 3\omega_o, \quad k_2 = 3\omega_o^2, \quad k_3 = \omega_o^3 \quad (14)$$

产生余下的参数. 如果得到的 LADRC 性能不够好, 就调整 ω_o , 直至找到一个合适的值. 下面的定理表明, 仅使用“内扰为线性”这一定性信息, 带宽法就能找到 ω_o 保证 LADRC 系统稳定.

定理 2. 考虑由被控对象 (1) 和 (2)、LESO (5) 和反馈控制 (6) 组成的 LADRC 系统, 假定 l_1, l_2 已按照 (13) 选定. 那么, 存在一个 ω_o^* , 当 $\omega_o > \omega_o^*$ 时, 按照 (14) 生成的参数 k_1, k_2, k_3 可以保证由 (1)、(2)、(5) 和 (6) 组成的 LADRC 系统稳定.

证明. 因为

$$H_1(j0)H_2(j0) = H_1(j+\infty)H_2(j+\infty) = 0$$

所以 $-H_1(s)H_2(s)$ 的奈奎斯特曲线始于原点又终于原点. j 表示虚数单位. 下面我们证明存在 $\omega_o^* > 0$, 当 $\omega_o > \omega_o^*$ 时, 对任意 $\omega \in [0, +\infty)$, 有 $|H_1(j\omega)H_2(j\omega)| < 1$.

先考虑 $|H_1(j\omega)|$. 因为连续性以及 $|H_1(j0)| = 0$, $|H_1(j+\infty)| = |a_2|$, 可以断言 $|H_1(j\omega)|$ 在 $\omega \in [0, +\infty)$ 上有界, 即存在 $\gamma > 0$ 满足:

$$|H_1(j\omega)| < \gamma, \quad \forall \omega \in [0, +\infty)$$

再考虑传递函数

$$H_2(s) = \frac{s^2 + (3\omega_o + l_1)s + 3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}{(s + \omega_o)^3}$$

将其中的 ω_o 看作参数. 令 $\omega_1 = \sqrt{3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}$, 于是有 $\omega_1 > \sqrt{3}\omega_o$. 再令

$$\xi_1 = \frac{3\omega_o + l_1}{2\sqrt{3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}}$$

$$\omega_o^{1*} = \frac{1}{3}l_1 - \frac{l_2}{l_1}$$

当 $\omega_o > \max\{0, \omega_o^{1*}\}$ 时, 有

$$\xi_1 = \frac{3(\omega_o + \frac{1}{3}l_1)}{2\sqrt{3(\omega_o + \frac{1}{3}l_1)^2 + \omega_o l_1 - \frac{1}{3}l_1^2 + l_2}} < \frac{\sqrt{3}}{2}$$

此时由于

$$|H_2(s)| = \left| \frac{s^2 + 2\xi_1\omega_1 s + \omega_1^2}{(s + \omega_o)^3} \right| = \frac{\omega_1^2}{\omega_o^3} \left| \frac{\frac{1}{\omega_1^2}s^2 + \frac{2\xi_1}{\omega_1}s + 1}{(\frac{1}{\omega_o}s + 1)^3} \right|$$

和

$$\left| \frac{1}{\omega_1^2}(j\omega)^2 + 2\xi_1 \frac{1}{\omega_1}j\omega + 1 \right|^2 =$$

$$\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^2 + 4\xi_1^2 \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \leq$$

$$1 + 4 \cdot \frac{3}{4} \frac{\omega^2}{3\omega_o^2} = 1 + \frac{\omega^2}{\omega_o^2} =$$

$$\left| 1 + \frac{j\omega}{\omega_o} \right|^2 \leq \left| 1 + \frac{j\omega}{\omega_o} \right|^3$$

有

$$|H_2(j\omega)| \leq \frac{3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}{\omega_o^3}, \quad \forall \omega \in [0, +\infty) \quad (15)$$

又因为

$$\lim_{\omega_o \rightarrow +\infty} \frac{3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}{\omega_o^3} = 0$$

所以存在常数 $\omega_o^{2*} > 0$, 当 $\omega_o > \omega_o^{2*}$ 时, 有

$$\frac{3\omega_o l_1 + 3\omega_o^2 + l_2}{\omega_o^3} < \frac{1}{\gamma} \quad (16)$$

令 $\omega_o^* = \max\{\omega_o^{1*}, \omega_o^{2*}\}$. 当 $\omega_o > \omega_o^*$ 时, 因为 (16), 对任意 $\omega \in [0, +\infty)$, 都有

$$|H_1(j\omega)H_2(j\omega)| \leq |H_1(j\omega)||H_2(j\omega)| < 1 \quad (17)$$

也就是说, $-H_1(s)H_2(s)$ 的奈奎斯特曲线的幅值始终小于 1, 该曲线不包围 -1 点. 再考虑到 $-H_1(s)H_2(s)$ 在右半平面无

极点, 于是图 2 中的反馈系统稳定. 由定理 1, 整个 LADRC 系统稳定. $\square$

注 3. 定理 2 的证明过程从频域角度提出了带宽法工作原理的一种新解释. 它将增大 ω_o 看作以不等式 (15) 减小子系统 H_2 的增益. 当增益小到不等式 (17) 成立时, 无论 a_1, a_2 的符号、取值如何, 都能保证 LADRC 系统稳定, 这就是带宽法和 LADRC 鲁棒于内扰参数不确定性的原因. 这一解释为 LADRC 研究提供了一条处理对象不确定性的新思路, 并可以推广到更复杂的情况^[14]. 需要说明的是, 不等式 (17) 不是稳定的必要条件, 在 ω_o 大到使它成立以前 LADRC 系统可能已经稳定了.

注 4. 定理 2 表明增大 ω_o 有助于 LADRC 系统的稳定性和鲁棒性. 但大的 ω_o 可能导致 LESO 系数 k_2, k_3 和控制器输出过大, 不利工程应用, 实际调参时需要折中.

2 仿真算例

考虑二阶系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 3x_1 - x_2 + u \\ y = x_1 \end{cases}$$

用带宽法设计 LADRC, 取 $l_1 = 2, l_2 = 1$, 即

$$u = -\hat{x}_1 - 2\hat{x}_2 - \hat{x}_3$$

而 LESO 是

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = 3\omega_o(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = 3\omega_o^2(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_3 + u \\ \dot{\hat{x}}_3 = \omega_o^3(y - \hat{x}_1) \end{cases}$$

分析上述 LADRC, 可知子系统 H_1 有传递函数

$$H_1(s) = -\frac{s(s-3)}{s^2 + 2s + 1}$$

而 LESO 误差子系统 H_2 有传递函数

$$H_2(s) = \frac{s^2 + (3\omega_o + 2)s + 3\omega_o^2 + 6\omega_o + 1}{s^3 + 3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3}$$

让 ω_o 分别等于 5.0 和 7.0. 当 $\omega_o = 5.0$ 时, 特征方程 (11) 的根为

$$0.0516 \pm 0.5944j, -4.6204 \pm 4.2742j, -8.8624$$

而当 $\omega_o = 7.0$ 时, 特征方程 (11) 的根为

$$-0.1151 \pm 0.6802j, -6.1649 \pm 4.9994j, -11.4401$$

由定理 1, LADRC 系统在 $\omega_o = 5.0$ 时不稳定, 而在 $\omega_o = 7.0$ 时稳定.

选对象状态初值 $[x_1, x_2] = [1, -2]$, 观测器初值 $[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3] = [0.8, -1, -5]$, 用 MATLAB 2013 进行仿真, 结果如图 3 和图 4. 由图可知, LADRC 系统在 $\omega_o = 5.0$ 时确实不稳定, 而在 $\omega_o = 7.0$ 时稳定, 与定理 1 的结论一致.

3 结论

通过将 LADRC 控制系统分解为状态反馈和 LESO 误差两个子系统, 得到了 LADRC 镇定二阶线性系统的一个充要条件和一个充分条件. 充要条件可以在系统参数已知或范

围已知时, 检验给定控制器能否镇定系统, 还可以用来指导控制器设计. 而充分条件保证了即使内扰参数完全未知, 文献 [4] 的带宽法也能够找到合适的观测器带宽, 保证 LADRC 镇定二阶系统. 上述结果和方法有望为 LADRC 的稳定性和鲁棒性研究提供新的途径.

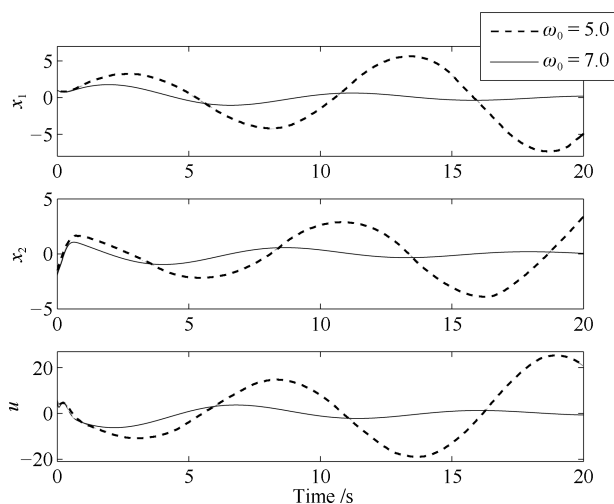


图3 系统状态和控制量

Fig. 3 States of the plant and the control signal

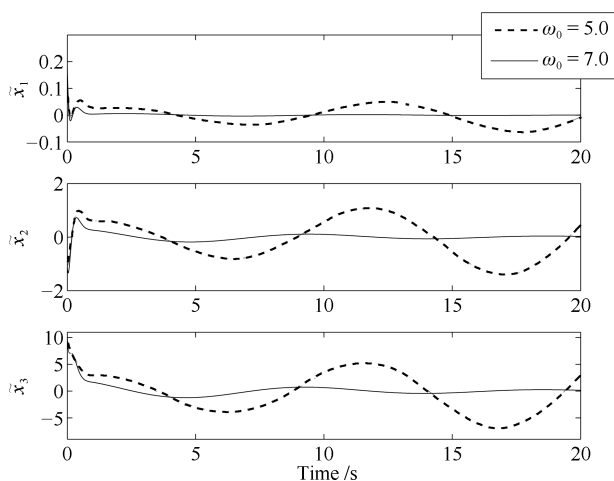


图4 LESO 的误差

Fig. 4 Errors of LESO

References

- Han Jing-Qing. Auto-disturbance-rejection controller and its applications. *Control and Decision*, 1998, **13**(1): 19–23 (韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, **13**(1): 19–23)
- Han Jing-Qing. *Active Disturbance Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*. 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. 北京: 国防工业出版社, 2008.)
- Han J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(3): 900–906
- Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. In: Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2003. 4989–4996
- Huang Y, Xue W C. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis. *ISA Transactions*, 2014, **53**(4): 963–976
- Madoński R, Herman P. Survey on methods of increasing the efficiency of extended state disturbance observers. *ISA Transactions*, 2015, **56**: 18–27
- Chen W H, Yang J, Guo L, Li S H. Disturbance-observer-based control and related methods — an overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(2): 1083–1095
- Li Jie, Qi Xiao-Hui, Wan Hui, Xia Yuan-Qing. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches. *Control Theory & Applications*, 2017, **34**(3): 281–295 (李杰, 齐晓慧, 万慧, 夏元清. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望. 控制理论与应用, 2017, **34**(3): 281–295)
- Tian G, Gao Z Q. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system. In: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications. Singapore: IEEE, 2007. 1595–1599
- Csank J, Gao Z Q. Uncertainty reduction through active disturbance rejection. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, Washington, USA: IEEE, 2008. 3689–3694
- Yuan Dong, Ma Xiao-Jun, Zeng Qing-Han, Qiu Xiao-Bo. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems. *Control Theory & Applications*, 2013, **30**(12): 1630–1640 (袁东, 马晓军, 曾庆含, 邱晓波. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究. 控制理论与应用, 2013, **30**(12): 1630–1640)
- Li Jie, Qi Xiao-Hui, Xia Yuan-Qing, Gao Zhi-Qiang. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(2): 202–212 (李杰, 齐晓慧, 夏元清, 高志强. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究. 自动化学报, 2016, **42**(2): 202–212)
- Chen Zeng-Qiang, Sun Ming-Wei, Yang Rui-Guang. On the stability of linear active disturbance rejection control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 574–580 (陈增强, 孙明伟, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究. 自动化学报, 2013, **39**(5): 574–580)
- Jin H, Liu L, Lan W, Zeng J. On stability and robustness of linear active disturbance rejection control: a small gain theorem approach. In: Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Dalian, China: IEEE, 2017. 3242–3247

金辉宇 厦门大学航空航天学院助理教授. 主要研究方向为数据驱动控制, 采样控制, 非线性系统. 本文通信作者.

E-mail: jinhy@xmu.edu.cn

(JIN Hui-Yu Assistant professor at the School of Aerospace Engineering, Xiamen University. His research interest covers data-driven control, sampled-data control, and nonlinear systems. Corresponding author of this paper.)

刘丽丽 厦门大学航空航天学院硕士研究生. 主要研究方向为线性自抗扰控制.

E-mail: liulili0409@foxmail.com

(LIU Li-Li Master student at the School of Aerospace Engineering, Xiamen University. Her main research interest is linear active disturbance rejection control.)

兰维瑶 厦门大学航空航天学院教授. 主要研究方向为非线性控制理论与应用, 鲁棒与自适应控制, 智能控制技术.

E-mail: wylan@xmu.edu.cn

(LAN Wei-Yao Professor at the School of Aerospace Engineering, Xiamen University. His research interest covers nonlinear control theory and applications, robust and adaptive control, and intelligent control technology.)