

奈奎斯特判据在时滞对象自抗扰控制中的应用

金辉宇^{1*}, 倪刚², 兰维瑶¹, 李智斌^{3*}

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 新华三技术有限公司, 浙江 杭州 310051;

3. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 奈奎斯特判据是研究控制系统稳定性的传统工具,但目前在教学中受重视不够. 本文用奈奎斯特判据研究了一阶时滞对象线性自抗扰控制的稳定性,其中对象不稳定或临界稳定,同时采用降阶扩张状态观测器. 先通过框图把问题简化为时滞对象反馈控制的标准形式,再分情况绘制奈奎斯特图,分析稳定性. 得到了和近期结果一致的稳定性充要条件. 表明奈奎斯特判据并未过时,仍可在控制理论的研究和教学中发挥重要作用.

关键词: 奈奎斯特判据; 时滞对象; 自抗扰控制; 框图; 稳定性

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2022)06-0986-06

2022 年是厦门大学控制科学与工程学科成立 50 周年,也是奈奎斯特发表文献[1]90 周年. 该文提出了基于频率响应分析反馈系统稳定性的图形化判据,该判据为控制系统的分析和设计提供了新方法,标志着频域方法的成熟和古典控制时期的到来. 此后,这一判据被称作奈奎斯特判据,成为古典控制的核心内容,在自动控制的理论研究、工程实践和教学中发挥着重要作用. 而文献[1]也入选控制理论历史上最重要的 25 篇文献,并因为发表时间而位居第一[2].

然而,20 世纪 60 年代现代控制理论兴起后,整个古典控制不再时髦,甚至被误解为简单、过时. 奈奎斯特判据也就随之被冷落,在教学和科研中的地位不断降低. 目前,国内通常仅在本科阶段学习奈奎斯特判据,研究生阶段不再系统讲述,转而强调状态空间方法. 这就导致作为科研主力的研究生们总体上不熟悉奈奎斯特判据,难以用它解决面对的科研问题. 而这又进一步加剧了“简单、过时”的误解,甚至还要加上“无用”. 奈奎斯特判据陷入了“被误解—不被重视—难以应用—误解加深”的正反馈,其研究日渐衰微.

与状态空间方法相比,奈奎斯特判据有其独特的优势. 它巧妙地平衡了数学严谨和工程直观. 它以复变函数理论为基石,充分严谨,常常能得到稳定性的

充要条件;它以图形为主要分析手段,足够直观,便于工程技术人员接受. 它一般不需要繁杂的数学运算,过程简洁明了,特别适合研究低阶单输入单输出对象.

为体现奈奎斯特判据的优势,本文用它研究时滞对象的自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC). ADRC 是韩京清研究员[3-5]提出的一种通用控制技术. 它汲取了 PID 控制的思想精华,具有结构简单、调参方便、鲁棒性好、适用面广等优点. 它以“内扰”来描述对象的不确定性,并将内扰和外扰归结为总扰动,再构造扩张状态观测器(extended state observer, ESO)实时估计总扰动,最后用反馈予以补偿,从而实现“自抗扰”. 由于统一处理内、外扰,ADRC 不依赖对象的数学模型,在克服对象不确定性和抑制外扰方面具有独特的优势. 21 世纪以来,ADRC 蓬勃发展,在工业过程、伺服系统、汽车工业和航空航天等领域不断取得成功应用[6-7]. 受应用研究的激励,ADRC 的理论研究也日趋活跃,成为当时一个热点[8-10].

在工业过程领域,由于存在传输时滞、容积时滞、测量时滞等因素,被控对象常常是时滞对象. ADRC 高度重视时滞对象,发展出无视时滞法、阶次提高法、

收稿日期:2022-06-13 录用日期:2022-09-07

基金项目:国家自然科学基金(61733017);山东省引进顶尖人才“一事一议”专项经费

* 通信作者: jinhy@xmu.edu.cn(金辉宇), zhibin.li@sudst.edu.cn(李智斌)

引文格式: 金辉宇, 倪刚, 兰维瑶, 等. 奈奎斯特判据在时滞对象自抗扰控制中的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(6): 986-991.

Citation: JIN H Y, NI G, LAN W Y, et al. Nyquist criterion used in active disturbance rejection control for time-delay plants[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2022, 61(6): 986-991. (in Chinese)



时滞预估法等若干种控制时滞对象的方法,在工程实际中取得了良好的效果^[11-12].但时滞对象 ADRC 的理论研究相对滞后,直到近年才找到若干稳定性条件^[13-14].目前,时滞对象 ADRC 稳定性研究的主要工具是时滞常微分方程稳定性理论,这一时域方法可以得到严格、精巧的理论结果,但存在理论艰深、学习困难的缺点.

本文用奈奎斯特判据重新研究了一阶时滞对象在 ADRC 下的稳定性.所研究问题的特点是,对象不稳定或临界稳定,ADRC 中采用降阶 ESO.这两点增加了问题的难度,一度被认为难以用传递函数方法研究^[14].本文先进行框图化简,将原问题分母中的超越函数项分离出来,成为时滞对象反馈控制的标准形式.再分情况绘制奈奎斯特图分析稳定性,得到了与文献^[14]一致的充要条件.这表明,奈奎斯特判据是研究 ADRC 的有力工具.

1 奈奎斯特判据简介

考虑图 1(a)所示的反馈控制系统,其中 r 与 y 分别参考信号与输出, $G(s)$ 与 $F(s)$ 分别是前向通道和反馈通道的传递函数.该系统的稳定性取决于特征方程

$$1 + G(s)F(s) = 0 \quad (1)$$

根的位置.当且仅当所有的根都在开左半平面(left-half-plane, LHP)时,系统是稳定的.

奈奎斯特判据用作图法判断方程(1)根的位置.它让 s 在复平面上沿图 1(b)的 D 形围道运动,即先令 $s = i\omega$, 其中 i 是虚数单位,让 ω 从 $-\infty$ 增加到 $+\infty$, 此时 s 从 $-\infty i$ 出发沿虚轴运动到 $+i\infty$;再令 $s = +\infty e^{i\theta}$, 让 θ 从 $+\frac{\pi}{2}$ 减小到 $-\frac{\pi}{2}$, 此时 s 从 $+i\infty$ 沿半径无穷大的顺时针半圆回到 $-i\infty$.如果虚轴上有 $G(s)F(s)$ 的极点,则要以半径无穷小的逆时针半圆避开,图 1(b)就避开了在原点的极点.这一过程中, $G(s)F(s)$ 在复平面上的轨迹称为奈奎斯特曲线,整张图称为奈奎斯特图.绘制奈奎斯特曲线时,通常先绘制 s 从原点出发沿正虚轴到 $+i\infty$ 的曲线,再利用对称性绘制 s 从 $-i\infty$ 到原点的曲线,最后补齐其他部分.也可用 MATLAB 等软件绘制.

假定奈奎斯特曲线顺时针 N 次包围点 $-1 + i0$, 而 $G(s)F(s)$ 在右半平面有 P 个极点.奈奎斯特判据断言,方程(1)的全部根中,不在 LHP 的根有 $Z = N + P$ 个.显然,当且仅当 $Z = 0$ 时,反馈系统稳定.

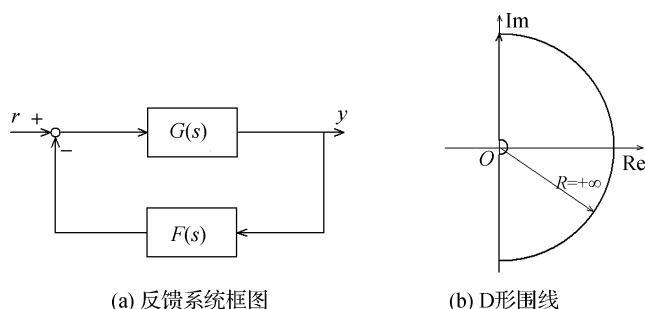


图 1 反馈系统和 D 形围线

Fig. 1 Feedback system and D contour

奈奎斯特判据适用于时滞对象^[15].其详细介绍和绘图细节可见文献^[16-17].

2 理论结果

2.1 问题描述

设有一阶时滞对象

$$\dot{x}(t) = Lx(t) + d(t) + bu(t - \tau), \quad (2)$$

其中, u 和 x 分别是对象的输入与输出, d 是外部扰动, 常数 L, b, τ 的数值已知, 且满足 $L \geq 0, b, \tau > 0$. 控制器设计的目标是跟踪参考信号 r . 典型的 r 是一个阶跃信号.

为实现这一目标,文献^[14]设计了降阶 ESO

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = -\beta\eta(t) - \beta^2x(t) - \beta bu(t - \tau), \\ \hat{\delta}(t) = \eta(t) + \beta x(t), \end{cases} \quad (3)$$

和控制器

$$u(t) = \frac{1}{b} [k(r(t) - x(t)) - \hat{\delta}(t)]. \quad (4)$$

问题是分析由式(2)~(4)组成的一阶 LADRC 系统的稳定性.

注 1 式(3)被称作降阶 ESO 的原因是它的微分方程只有一阶,而一般针对式(2)设计的 ESO 为两阶.

2.2 框图及其简化

线性自抗扰控制(LADRC)系统(2)~(4)有框图如图 2^[14]所示,其中

$$H(s) = \frac{ks + k\beta}{(\beta + k)s + k\beta}, \quad (5)$$

$$C(s) = \frac{s(\beta + k) + k\beta}{b(s + \beta - \beta e^{-s\tau})}, \quad (6)$$

$$P(s) = \frac{1}{s - L}. \quad (7)$$

由于控制器 $C(s)$ 的分母是超越函数,其稳定性分析被认为是一个难题.

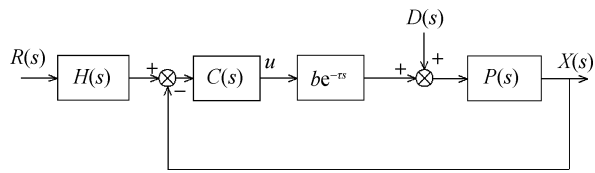


图 2 LADRC 系统(2)~(4)的框图^[14]

Fig. 2 Block diagram of LADRC system (2)~(4)^[14]

现在化简图 2. 由于外扰不影响线性时不变 (linear time-invariant, LTI) 系统的稳定性, 将 $D(s)$ 删去. 考虑到图 3 所示模块有传递函数

$$\frac{e^{-\tau s}}{s + \beta - \beta e^{-\tau s}}, \tag{8}$$

则图 2 可以化简为图 4(e), 中间过程见图 4(a)~(d).

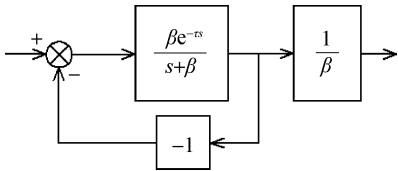


图 3 一个具有传递函数(8)的模块

Fig. 3 A block with transfer function (8)

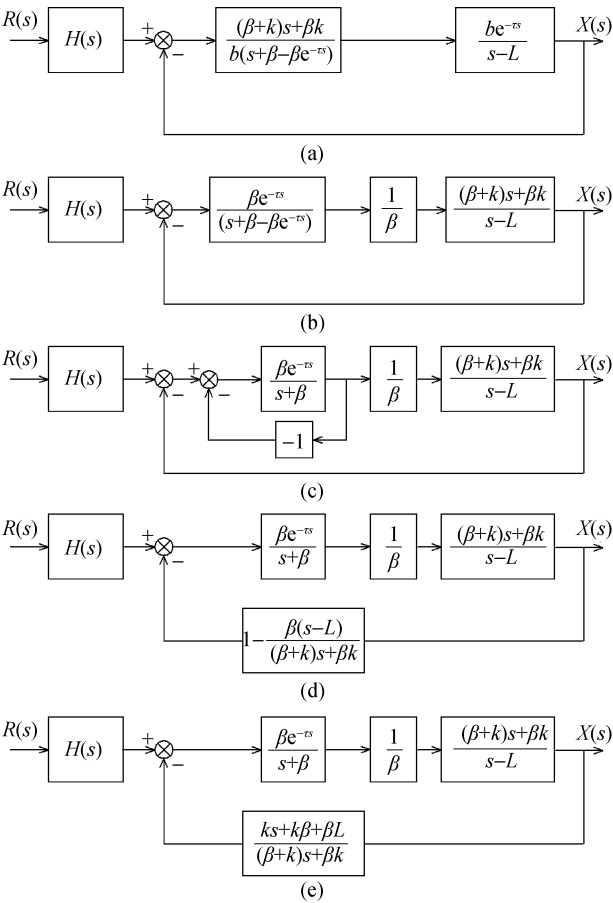


图 4 化简图 2 结果

Fig. 4 Simplification of Figure 2

2.3 增益穿越频率

图 4(e)中的反馈回路有传递函数

$$W(s) = \frac{\beta}{s + \beta} e^{-\tau s} \frac{1}{\beta} \frac{(\beta + k)s + \beta k}{s - L} \frac{ks + k\beta + \beta L}{(\beta + k)s + \beta k} = \frac{ks + k\beta + \beta L}{(s + \beta)(s - L)} e^{-\tau s}, \tag{9}$$

其特征方程为

$$(s + \beta)(s - L) + (ks + k\beta + \beta L)e^{-\tau s} = 0. \tag{10}$$

注意到式(10)也是图 2 的特征方程, 这再次表明图 2 和图 4(e)的稳定性相同.

引理 1 假设 $k, \beta > 0$, 考虑式(9)和方程

$$|W(i\omega)| = 1. \tag{11}$$

方程(11)有 4 个根, 其中有且仅有一个正实根

$$\omega_c = \sqrt{\frac{\sqrt{(\beta^2 + L^2 - k^2)^2 + 4\beta^2 k(k + 2L)} - (\beta^2 + L^2 - k^2)}{2}}. \tag{12}$$

证明 方程(11)可以改写为

$$\sqrt{\omega^2 + \beta^2} \sqrt{\omega^2 + L^2} = \sqrt{k^2 \omega^2 + (k\beta + \beta L)^2},$$

两边平方后得

$$\omega^4 + (\beta^2 + L^2 - k^2)\omega^2 - (k^2\beta^2 + 2k\beta^2 L) = 0.$$

它有两个实根 $\omega_{1,2} = \pm \omega_c$ 和两个虚根, 其中有且仅有 ω_c 是正实根.

引理 1 表明, 当 s 从原点出发运动到 $+i\infty$ 的过程中, 仅在 ω_c 处穿越单位圆一次. 在古典控制中, ω_c 被称作增益穿越频率, 它是用奈奎斯特图分析稳定性时的一个关键参数.

引理 2 对于任意 $\omega > 0$, 有 $W(i\omega) < -\frac{\pi}{2}$.

证明 由式(9), 有

$$\angle W(i\omega) = \angle \frac{i\omega k + k\beta + \beta L}{i\omega + \beta} + \angle \frac{1}{i\omega - L} - \tau\omega.$$

因为 $L \geq 0$, 所以 $\angle \frac{i\omega k + k\beta + \beta L}{i\omega + \beta} \leq 0, \angle \frac{1}{i\omega - L} \leq -\frac{\pi}{2}$, 于是 $W(i\omega) < -\frac{\pi}{2}$.

2.4 稳定性条件

现在建立稳定性条件.

定理 1 考虑由式(2)~(4)组成的一阶 LADRC 系统, 假定 $k + \beta > L$. 记时滞上界

$$\tau^* = \frac{1}{\omega_c} \arctan\left(\frac{k\omega_c(\omega_c^2 + \beta L) - \beta\omega_c(k + L)(L - \beta)}{\beta(\beta L + \omega_c^2)(k + L) + \omega_c^2 k(L - \beta)}\right). \tag{13}$$

该 LADRC 系统稳定的充要条件是时滞 $\tau < \tau^*$.

证明 分别考虑 $L = 0$ 和 $L > 0$ 两种情况. $L = 0$ 时,式(9)简化为

$$W(s) = \frac{k}{s} e^{-\tau s},$$

而式(12)和(13)也分别简化成 $\omega_c = k$ 和 $\tau^* = \frac{\pi}{2k}$. 此时

$W(s)$ 在原点有一个极点,其 D 形围道需要绕开,如图 1(b)所示. 在绕开后, $W(s)$ 在右半平面无极点,由奈奎斯特判据,系统稳定当且仅当奈奎斯特曲线不包围点 -1 .

下面证明不包围点 -1 的充要条件就是 $\tau < \tau^*$. 分析 $W(s)$ 的奈奎斯特曲线,当 $\omega = 0^+$ 时, $W(i\omega)$ 在 $-i\infty$ 附近;随着 ω 的增加,在 $\omega = \omega_c$ 处穿越单位圆;此后保持在单位圆内. 当且仅当 $\tau < \tau^*$ 时,有

$$\angle W(i\omega_c) = -\frac{\pi}{2} - \tau\omega_c < -\pi, \quad (14)$$

由引理 2, $W(s)$ 的奈奎斯特曲线在第二象限穿入单位圆. 此时整个奈奎斯特图不包围 -1 点,如图 5(a)所示,其中蓝色实线是 s 从 $i0^+$ 出发运动到 $+i\infty$ 的曲线,黑色实线是 s 从 $-i\infty$ 沿负虚轴运动到 $i0^-$ 的曲线,而点划线大半圆是图 1(b)中 D 形围道绕开原点的那一段小半圆生成的.

而当 $\tau \geq \tau^*$ 时,式(14)不成立,系统不是稳定的. 图 5(b)是一个不稳定的例子, $W(s)$ 的奈奎斯特曲线顺时针包围点 -1 一次.

当 $L > 0$ 时, $W(s)$ 在原点无极点, D 形围道不需要绕开原点. 同时 $W(s)$ 在右半平面有一个极点,由奈奎斯特判据,系统稳定当且仅当奈奎斯特曲线逆时针包围点 -1 一次.

由式(9), $W(0) = -1 - \frac{k}{L}$, 位于点 -1 的左边和单位圆外. 而 $W(+i\infty) = W(-i\infty) = 0$, 位于点 -1 的右边和单位圆内. 而由引理 1, 当 s 从原点出发运动

到 $+i\infty$ 时,奈奎斯特曲线仅于 ω_c 处穿越单位圆一次.

而由引理 2, $W(i\omega_c) < -\frac{\pi}{2}$. 因此,当且仅当

$$W(i\omega_c) > -\pi \quad (15)$$

时,奈奎斯特曲线在第二象限穿入单位圆,逆时针包围 -1 点一次,如图 6(a)所示. 其中蓝线是从外向内穿入单位圆,而黑线是从内向外穿出单位圆. 如果不等式(15)不成立,ADRC 系统不是稳定的. 图 6(b)是一个不稳定的例子,奈奎斯特曲线顺时针包围点 -1 一次.

而不等式(15)成立的充要条件就是 $\tau < \tau^*$. 因为 $-\angle(i\omega_c - L) = -\pi + \angle(i\omega_c + L)$,

而

$$\begin{aligned} \angle W(i\omega_c) &= \angle(ik\omega_c + k\beta + \beta L) - \angle(i\omega_c + \beta) - \\ &\quad \angle(i\omega_c - L) - \tau\omega_c, \end{aligned}$$

于是不等式(15)等价于

$$\tau\omega_c < \angle(ik\omega_c + k\beta + \beta L) - \angle(i\omega_c + \beta) + \angle(i\omega_c + L).$$

而由于

$$\begin{aligned} &\angle(ik\omega_c + k\beta + \beta L) - \angle(i\omega_c + \beta) + \angle(i\omega_c + L) = \\ &\angle \frac{(ik\omega_c + k\beta + \beta L)(i\omega_c + L)}{(i\omega_c + \beta)} = \\ &\angle(ik\omega_c + k\beta + \beta L)(i\omega_c + L)(-i\omega_c + \beta) = \\ &\arctan\left(\frac{k\omega_c(\omega_c^2 + \beta L) - \beta\omega_c(k + L)(L - \beta)}{\beta(\beta L + \omega_c^2)(k + L) + \omega_c^2 k(L - \beta)}\right) = \\ &\omega_c \tau^*, \end{aligned}$$

当且仅当 $\tau < \tau^*$ 时,不等式(15)成立.

综合 $L = 0$ 和 $L > 0$ 两种情况,定理 1 得证.

3 讨论与算例

3.1 与文献[14]的比较

定理 1 得到的时滞上界和文献[14]一致,这表明

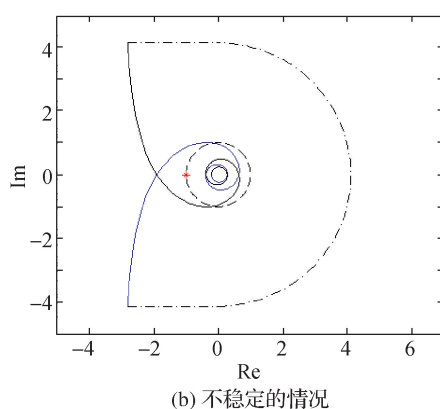
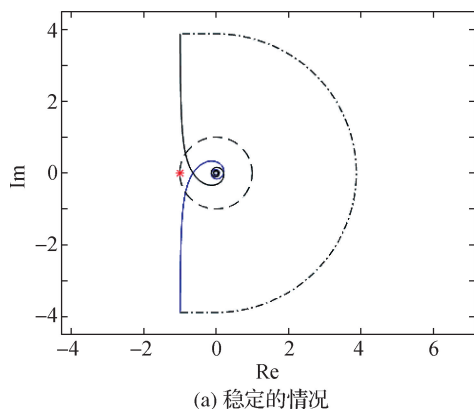


图 5 $L=0$ 时 $W(s)$ 的奈奎斯特图

Fig. 5 Nyquist diagram of $W(s)$ when $L=0$

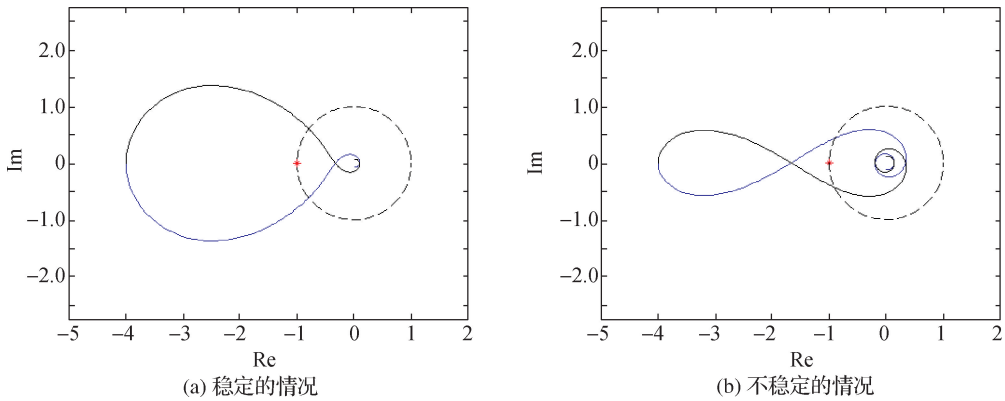


图 6 $L>0$ 时 $W(s)$ 的奈奎斯特图
Fig. 6 Nyquist diagram of $W(s)$ when $L>0$

了奈奎斯特判据的有效性. 但定理 1 和文献[14]存在若干差别, 在此进行比较.

从方法看, 本文的主要方法是奈奎斯特判据, 文献[14]的主要方法是时滞微分方程的稳定性理论. 两种方法都能得到正确的结果, 但奈奎斯特判据为自动化背景的研究人员所熟悉, 数学专业的未必熟悉; 时滞微分方程理论则相反, 为数学背景的研究人员所熟悉, 但自动化专业的常不熟悉.

从证明过程看, 本文需要分别讨论 $L=0$ 和 $L>0$ 两种情况, 不如文献[14]数学上简洁. 但从工程的角度, $L=0$ 意味着对象临界稳定且包含一个积分器, 而 $L>0$ 意味着对象不稳定且不包含积分器, 两者的差别明显而重要. 因此, 分情况讨论在工程上是合理的.

从结果来看, 本文没有对外扰 d 作假设, 而文献[14]假设 d 的极限存在且为一个有界常数. 这一假设对于稳定性无必要, 因为对象和 ADRC 都是 LTI 的, 整个 LADRC 系统也是 LTI 的, 而 LTI 系统的稳定性与外扰无关. 这个假设是为了保证 d 能被完全抵消.

3.2 算例

本节通过两个算例说明定理 1.

例 1 在对象(2)中取 $L=1, b=4$, 外扰 $d(t)=0.1 \cdot 1(t)$, 其中 $1(t)$ 是单位阶跃信号. 在式(3)中取 $\beta=2$, 而在式(4)中取 $k=3$. 由引理 1, $\omega_c=\sqrt{10}$; 由定理 1, $\tau^*=0.3567$. 在(2)~(4)分别取 $\tau=0.35$ 和 $\tau=0.36$, 用 MATLAB 数值求解方程(2)~(4), 结果如图 7 所示. 从图中可以看出, $\tau=0.35$ 时, x 和 u 减幅振荡, 表明系统稳定; $\tau=0.36$ 时, x 和 u 增幅振荡, 表明系统不稳定, 完全符合定理 1 的结论.

例 2 仍取 $L=1, b=4, \beta=2, k=3$. 令 $\tau=0.15$, 外扰取 $d_1(t)=0.1 \cdot 1(t)$ 和 $d_2(t)=0.1\sin(2t) \cdot 1(t)$. 用 MATLAB 数值求解方程(2)~

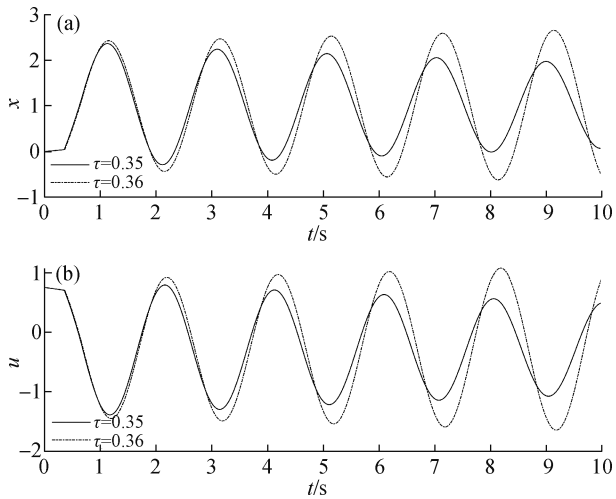


图 7 例 1 的输出 $x(a)$ 和控制 $u(b)$
Fig. 7 The output $x(a)$ and control $u(b)$ of example 1

(4), 结果如图 8. 从图 8 中可以看到, 两种情况系统都是稳定的, 差别在于, $d_1(t)$ 完全被抵消, 而 $d_2(t)$ 没有被完全抵消, 导致 x 和 u 在暂态结束以后仍存在振荡分量.

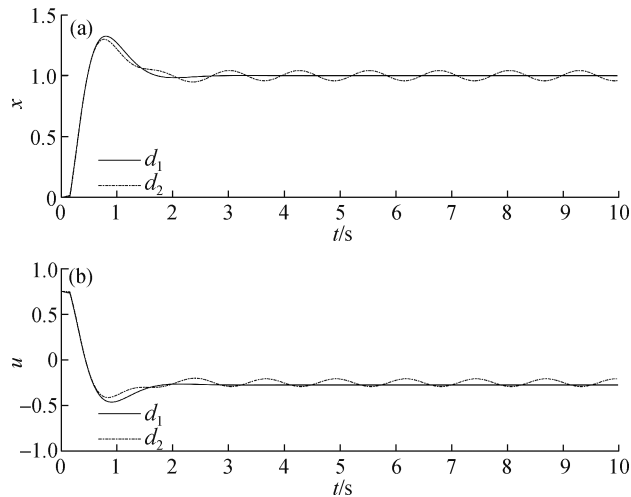


图 8 例 2 的输出 $x(a)$ 和控制 $u(b)$
Fig. 8 The output $x(a)$ and control $u(b)$ of example 2

4 结 论

本文以奈奎斯特判据研究时滞对象自抗扰控制的稳定性,得到了和文献[14]定理1一致的充要条件,并且放松了对外扰的要求.这表明,奈奎斯特判据并未过时,仍可以在控制理论的前沿研究发挥作用.为更好地发挥其作用,有必要加强奈奎斯特判据和整个古典控制理论的教学,尤其是研究生阶段的教学.

参考文献:

- [1] NYQUIST H. Regeneration theory[J]. The Bell System Technical Journal, 1932, 11(1): 126-147
- [2] BASAR T. Control theory: twenty-five seminal papers (1932-1981)[M]. New York: Wiley-IEEE, 2001.
- [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] 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.
- [5] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [6] 陈增强, 程贻, 孙明玮, 等. 线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展[J]. 信息与控制, 2017, 46(3): 257-266.
- [7] ZHENG Q, GAO Z. Active disturbance rejection control: some recent experimental and industrial case studies[J]. Control Theory and Technology, 2018, 16(4): 301-313.
- [8] HUNG Y, XUE W. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis [J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 963-976.
- [9] 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.
- [10] WU Z, ZHOU H, GUO B, et al. Review and new theoretical perspectives on active disturbance rejection control for uncertain finitedimensional and infinite-dimensional systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 101: 935-959
- [11] 韩京清. 时滞对象的自抗扰控制[J]. 控制工程, 2008(增2): 7-10, 18.
- [12] 王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1521-1533.
- [13] CHEN S, XUE W, ZHONG S, et al. On comparison of modified ADRCs for nonlinear uncertain systems with time delay[J]. Science China (Information Sciences), 2018, 61(7): 212-226.
- [14] CHEN S, XUE W, HUANG Y. Analytical design of active disturbance rejection control for nonlinear uncertain systems with delay[J]. Control Engineering Practice, 2019, 84: 323-336
- [15] TSYPKIN Y Z. Stability of systems with delayed feedback[J]. Avtomatika i Telemekh, 1946, 7: 107-129.
- [16] 吴麒, 王诗宓. 自动控制原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [17] FRANKLIN G F, POWELL J D, EMAMI-NAEINI A. 动态系统的反馈控制[M]. 7版. 刘建昌, 于霞, 马丹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.

Nyquist criterion used in active disturbance rejection control for time-delay plants

JIN Huiyu^{1*}, NI Gang², LAN Weiyao¹, LI Zhibin^{3*}

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. New H3C Technologies Co., Ltd, Hangzhou 310051, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Nyquist criterion is a traditional approach to investigate the stability of control systems, but now it is not paid enough attention in education. In this paper, the stability of linear active disturbance rejection controls for first-order plus time-delay plants is studied with Nyquist criterion. The plants are either critically stable or unstable, while the extended-state observer is reduced order. The problem is simplified into the standard block diagram of feedback control for a time-delay plant, then the Nyquist diagram is drawn to analyze the stability respectively for the critically stable and unstable plants. Sufficient and necessary conditions of stability are obtained, and are found consistent with recent results. It shows that Nyquist criterion is not outdated and can continuously play an important role in current research and education of control theory.

Keywords: Nyquist criterion; time-delay plant; active disturbance rejection control; block diagram; stability

(责任编辑: 汪 军)