

双质量弹簧基准问题自抗扰控制研究

李 健[†], 张彬文, 谭 文

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 本文研究了自抗扰控制(ADRC)方法在双质量弹簧基准问题的应用. 传统的自抗扰控制方法倾向于使用高增益控制来抑制扰动和模型不确定性, 但是对于双质量弹簧基准问题, 高增益在评分中受到较大惩罚, 而且对于模型参数变化没有足够的鲁棒性. 为解决这一问题, 本文对ADRC设计提出了两种改进方案. 首先, 为了减小控制信号的幅度, 将扩张状态观测器(ESO)的一个极点配置在原点. 其次, 采用阻尼比来调整带宽. 结果表明, 所提出的ADRC设计可以很好地解决双质量弹簧基准系统的控制问题.

关键词: 自抗扰控制; 双质量弹簧基准问题; 鲁棒控制; 带宽

引用格式: 李健, 张彬文, 谭文. 双质量弹簧基准问题自抗扰控制研究. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 933 – 940

DOI: 10.7641/CTA.2019.90045

Re-visit the active disturbance rejection control approach for the two-mass-spring benchmark problem

LI Jian[†], ZHANG Bin-wen, TAN Wen

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Active disturbance rejection control (ADRC) method is applied to solve the two-mass-spring benchmark problem. Conventional ADRC method tends to use a high gain to reject the disturbances and model uncertainties, however, high gain is heavily penalized in the scoring system, and it is unable to maintain sufficient robustness against parameter variations for the benchmark problem. To solve the problem, two modifications are proposed for ADRC design. First, to decrease the magnitude of the control signal, one of the poles of the extended state observer (ESO) is placed at the origin. Second, the bandwidths are tuned with additional damping ratios. With the proposed ADRC design, it is shown that ADRC can indeed solve the benchmark problem with a very good score.

Key words: active disturbance rejection control (ADRC); two-mass-spring benchmark problem; robust control; bandwidths

Citation: LI Jian, ZHANG Binwen, TAN Wen. Re-visit the active disturbance rejection control approach for the two-mass-spring benchmark problem. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 933 – 940

1 引言

双质量弹簧基准问题^[1-2]自1990年提出以来得到了广泛的应用研究. 双质量弹簧系统通过一个弹簧将两个质量块连接在一起, 控制的基本要求是在有扰动存在时, 通过向一个质量块施加作用力来保持另一个质量块的位置. 实际应用中, 质量和弹簧常数是确定的, 因此在设计控制器时必须要考虑鲁棒性. 也就是说, 所设计的控制器要求在存在不确定性、变运行条件和外部干扰的情况下依然保持所要求的系统性能.

早期的一些控制方法包括 H_∞ 控制、 μ -综合控制

以及线性二次高斯法(linear quadratic Gaussian, LGQ)等. 文献[3]提出利用回路整形、极点配置和 H_2 相结合的方法, 并且为了评估控制器的性能定义了一个评分系统.

鲁棒控制的一种解决方案是将不确定性视为扰动, 通过在控制设计中将其进行估计和补偿, 因此将这类方法称为基于扰动观测器的控制方法(disturbance observer based control, DOBC)^[4-5]. 其中, 自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)就是其中一种应用广泛的控制方法^[6-15]. 自抗扰控制由我国学

收稿日期: 2019-01-18; 录用日期: 2019-09-05.

[†]通信作者. E-mail: xlij8802@ncepu.edu.cn; Tel.: +86 10-61773040.

本文责任编辑: 夏元清.

国家自然科学基金项目(61573138), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019QN050)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573138) and the Fundamental Research Funds for Central University (2019QN050).

者韩京清提出,其主要思想是将系统不确定性和外部扰动当作系统“总扰动”,通过扩张状态观测器(extended state observer, ESO)进行估计,并在反馈控制律中进行抵消^[16-17]. 由于早期的研究采用非线性控制,给理论分析带来较大困难,并且增加了工程实现的难度. 高志强^[18]通过将ESO和控制律进行线性化得到线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC),并提出了带宽整定方法,极大地方便了工程应用和频域分析^[19-20].

双质量弹簧基准问题是动态系统振动控制(如电机驱动的机械臂)的一种简化模型,包含一个刚性模态和一个柔性模态,其中柔性模态频率随质量和弹簧系数的变化而改变,具有不确定性,并且与控制器带宽很接近,因此很难处理. 现有的ADRC控制方案^[21-22]将柔性模态当成低频扰动,采用高增益方法将其抑制,控制效果很好,但是需要较大的控制输入,不满足基准问题的设计要求,并且鲁棒性能也不满足. 因此考虑改进ADRC,重新选择ADRC参数,将振动模态视为高频扰动,从而减小控制输入,以满足基准问题的设计要求和鲁棒性能要求.

为了解决双质量弹簧系统鲁棒控制问题,本文对ADRC设计提出了两种改进方案. 首先,将ESO的一个极点配置在原点,使得最终ADRC控制器不再包含积分作用;其次,在带宽参数基础上增加阻尼比,然后通过频域特性要求对阻尼比参数进行调整. 第1个改进适用于不要求控制器具有积分的设计情形,第2个改进适用于需要在快速响应和阻尼之间折中的设计情形. 仿真结果表明,改进后的ADRC很好地解决了双质量弹簧基准问题.

2 双质量弹簧基准问题

2.1 被控系统描述

双质量弹簧系统如图1所示,其中控制量 u 作用于质量 m_1 ,用来控制质量 m_2 的位置,质量间通过弹性常数为 k 的弹簧连接, w_1 和 w_2 分别为作用在 m_1 和 m_2 上的外扰.

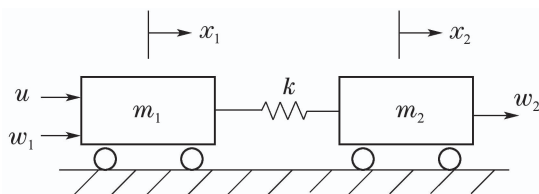


图1 双质量弹簧系统

Fig. 1 Two-mass-spring system with uncertain parameters

定义状态变量 x_1 和 x_2 分别为 m_1 和 m_2 的位置,被控对象动态方程可描述为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k(x_1 - x_2) + w_1 + u, \\ m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) + w_2. \end{cases} \quad (1)$$

定义状态变量 x_3 和 x_4 分别为 m_1 和 m_2 的速度,则系统状态空间方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k}{m_1} & \frac{k}{m_1} & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_2} & -\frac{k}{m_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} (u + w_1) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} w_2. \quad (2)$$

给定系统标称参数 $m_1 = 1, m_2 = 1, k = 1$. 当 m_1, m_2 固定, k 变化时,系统的Bode响应如图2所示. 可以看到,在频率1~3 rad/s附近系统存在无衰减或弱衰减振荡,因此对于双质量弹簧基准系统来说,模型参数不确定不仅体现在低频,而且也影响系统中高频特性,因此双质量弹簧基准系统是个较难控制的问题.

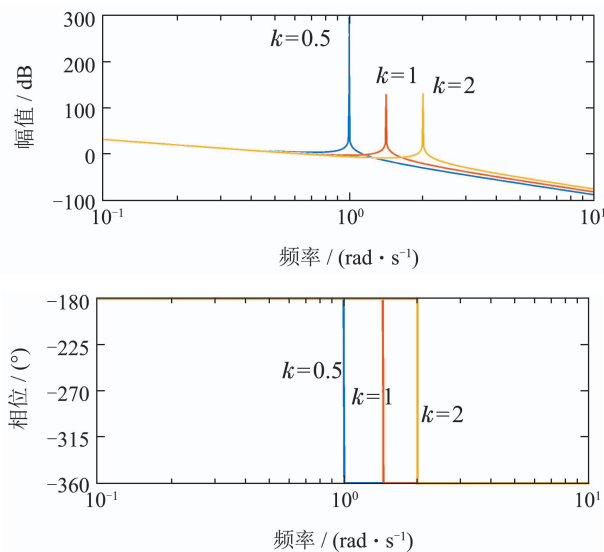


图2 系统Bode响应

Fig. 2 Bode plots of the two-mass-spring system

2.2 性能要求

针对这个双质量弹簧系统的鲁棒控制设计有4类基准问题,其中第2类问题引发的关注最多. 该问题可描述为:设计固定增益的线性反馈控制器,满足以下性能要求:

- 1) 对于施加在质量块1或2上的单位脉冲扰动,在标称参数 $m_1 = m_2 = k = 1$ 下被控输出的调节时间约为15 s;
- 2) 控制量大小要适中,在标称参数下控制量最大值不能超过1;
- 3) 保证合理的控制性能和鲁棒性能. 通常要求满足幅值裕量(gain margin, GM)为6 dB,相角裕量(pha-

se margin, PM)为30°;

4) 当 $m_1 = m_2 = 1$, 闭环系统在 $0.5 \leq k \leq 2.0$ 范围内稳定;

5) 针对3个系统参数的鲁棒性能实现最大化, 一般要求在 $0.7 \leq k, m_1, m_2 \leq 1.3$ 范围内闭环系统稳定;

6) 抑制高频噪声.

文献[3]基于这些性能要求, 提出了一个评分系统, 其计算方式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{score}_1 = -\lim\left[\frac{t_s - 15}{3}\right], \\ \text{score}_2 = \text{upperlim}\left[-\frac{20 \log_{10} u_{\max}}{3}\right], \\ \text{score}_3 = \lim\left[\frac{\text{PM} - 30}{5}\right], \\ \text{score}_4 = \lim\left[\frac{\text{GM} - 6}{2}\right], \\ \text{score}_5 = \lim\left[\frac{20 \log_{10}\left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}}\right) - 12}{3}\right], \\ \text{score}_6 = \lim\left[\frac{p_m - 0.3}{0.05}\right], \\ \text{score} = \sum_{i=1}^6 \text{score}_i + \text{bonus}, \end{array} \right. \quad (3)$$

其中所用变量如表1所定义.

表1 性能指标

Table 1 Numerical requirements

变量	定义	要求	偏差
t_s	当 $t > t_s$ 时, $ x_2(t) < 0.1$	15 s	3 s
$u_{\max}$	$\max u(t) $	1 dB	-3 dB
PM	相角裕量	30°	5°
GM	幅值裕量	6 dB	2 dB
$k_{\max}$ $k_{\min}$	当 $m_1 = m_2 = 1$, $k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$ 范围内稳定	$0.5 \leq k \leq 2.0$	3 dB
p_m	$1 - p_m \leq k$, $m_1, m_2 \leq 1 + p_m$ 范围内稳定	0.3	0.05

根据这种计算方式, 如果所有要求刚好被满足, 则总分为零. 不过当所有的要求都能满足时, 可以得到2分奖励分. 另外, 除了控制量得分 score_2 不设下限以外, 每项得分都限制在 ± 2 以内. 如果最后得分超过4分, 则可以认为设计比较好, 如果最后得分低于-4分, 则该设计不能被采纳.

3 ADRC设计

文献[21]中, 将两种4阶ADRC设计应用于双质量弹簧基准问题: 第1种为黑箱法, 即只利用系统阶次, 不考虑系统其它任何已知信息; 第2种为灰箱法, 即除了系统阶次以外, 将模型扰动信息加入到ESO设计中,

从而减小ESO的负载并且减小带宽值. 由于带宽较大, 会引起控制量过大, 导致评分较低, 因此本文考虑灰箱法.

3.1 灰箱法ADRC

根据文献[21], 可以得到系统动态方程

$$y^{(4)} = -k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \ddot{y} + \frac{k}{m_1 m_2} w_2 + \frac{1}{m_2} \ddot{w}_2 + d + \frac{k}{m_1 m_2} u, \quad (4)$$

其中 d 表示系统不确定性和其他扰动.

因此, 系统总扰动可以表示为

$$f = -k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \ddot{y} + \frac{k}{m_1 m_2} w_2 + \frac{1}{m_2} \ddot{w}_2 + d. \quad (5)$$

假设其中已知部分为

$$f_1 = -k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \ddot{y}. \quad (6)$$

未知部分为

$$f_2 = -\frac{k}{m_1 m_2} w_2 + \frac{1}{m_2} \ddot{w}_2. \quad (7)$$

令

$$h = \dot{f} = \dot{f}_1 + \dot{f}_2 + \dot{d} = -k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \ddot{y} + h', \quad (8)$$

其中 $h' = \dot{f}_2 + \dot{d}$. 此时定义扩展状态变量 $x_5 = f$, 则系统状态空间方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Eh', \\ y = Cx, \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k \\ \frac{k}{m_1 m_2} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

设计全维状态观测器

$$\dot{z} = Az + Bu + LC(x - z), \quad (10)$$

当观测器增益 $L = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5]^T$ 选择合理时, 可以实现 z 跟踪 x . 此时设计控制律

$$u = \frac{-z_5 + u_0}{b_0}, \quad (11)$$

其中 $b_0 = \frac{k}{m_1 m_2}$, 则闭环系统可近似为积分串联结构

$$y^{(4)} = u_0, \quad (12)$$

此时,控制量 u_0 可设计为

$$u_0 = k_1 r - \sum_{i=1}^4 k_i z_i. \quad (13)$$

方便起见,一般通过选取观测器带宽 ω_o 来得到ESO增益

$$sI - (A - LC) = (s + \omega_o)^5. \quad (14)$$

类似地,控制增益可通过选取控制带宽 ω_c 来得到

$$sI - (A + BK) = s(s + \omega_c)^4, \quad (15)$$

其中 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ 1]$.

3.2 控制器分析与评价

将ESO和控制律的状态空间表达式进行拉氏变换,得到

$$u(s) = C_1(s)r(s) - C_2(s)y(s). \quad (16)$$

双质量弹簧系统是个抗扰问题,设定值为零,因此上式可以简化为

$$u(s) = -C_2(s)y(s), \quad (17)$$

其中

$$C_2(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}L.$$

根据系统结构,可以得到等效的控制器传递函数表达式

$$C_2(s) = \frac{c_4 s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{e_5 s^5 + e_4 s^4 + e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s}, \quad (18)$$

其中 c_i 和 e_i 为控制器系数.

文献[21]中采用灰箱法设计ADRC,选取控制器参数为 $b_0 = 1$, $\omega_c = 1$, $\omega_o = 5$,由此可以得到等效控制器(记为ADRC)的传递函数为

$$\text{ADRC} = \frac{19458(s^2 + 0.38s + 1.33)(s^2 + 0.57s + 0.12)}{s(s^2 + 22.46s + 144.8)(s^2 + 6.54s + 62.28)}. \quad (19)$$

如图3所示,在该控制器作用下,系统截止频率和穿越频率均大于系统振荡频率(标称参数 $k = m_1 = m_2 = 1$ 下为1.414 rad/s),因此控制器将振荡频率引起的不确定性视为低频不确定性,并通过采用高增益来抑制低频干扰.

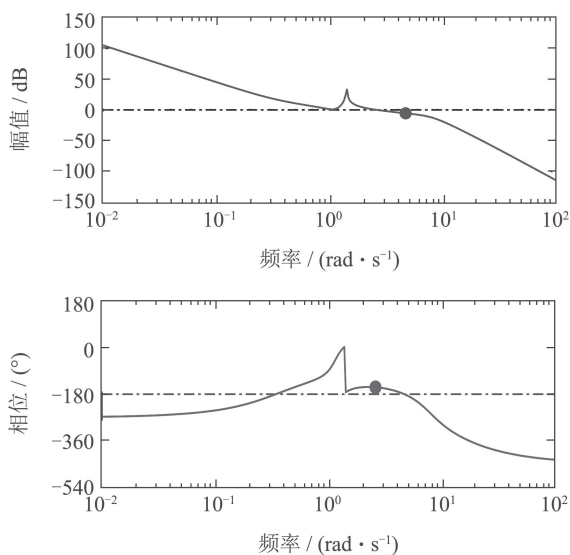


图3 ADRC控制下系统开环Bode响应

Fig. 3 Bode plots of the open-loop system under gray-box ADRC

在 $t = 0$ 时对 m_2 施加一个脉冲信号,在标称参数下,系统响应时间约为7.5 s.为评价控制器,采用评分系统计算得到各项指标如表2所示,其中加粗部分表示不满足性能要求.从表中可以看出,由于控制量很大,因此该控制器得分很低(-12.6).系统时域响应如图4所示,可以看到,尽管采用了高增益控制器,鲁棒性依然比较差.

仿真表明,对控制量加入抗饱和措施后,其他性能要求依然无法满足.

表2 控制器评价

Table 2 Assessment of the controllers

方法	t_s	$u_{\max}$	PM	GM	$\frac{k_{\max}}{k_{\min}}$	p_m	是否满足所有要求?	得分
要求	15	1	30	6	$\frac{2.0}{0.5}$	0.30	—	—
Gray-box ADRC	7.5	45	27.1	5.59	$\frac{1.76}{0.58}$	0.19	否	-12.6
ADRC1 ($\omega_o = 5$)	8.3	12	45	9.37	$\frac{2.3}{0.45}$	0.29	否	-1.0
ADRC2 ($\omega_o = 2$)	12.5	0.78	26.1	3.0	$\frac{3.1}{0.5}$	0.39	否	2.4
ADRC3	12.9	0.50	33	6.0	$\frac{4.8}{0.44}$	0.40	是	9.2
文献[3]	14.5	0.75	35	6.1	$\frac{2.8}{0.44}$	0.44	是	7.4

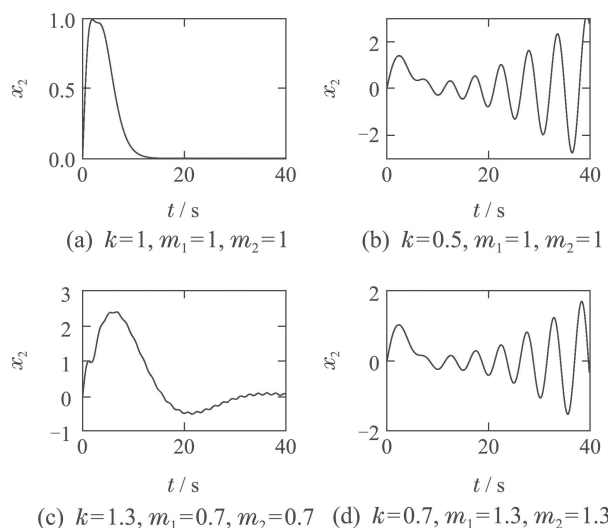


图4 ADRC控制下系统输出响应

Fig. 4 Responses of the system under gray-box ADRC

4 改进ADRC设计

高增益控制一般对于系统参数变化不敏感,但是由于双质量弹簧系统参数变化会带来明显的模型不确定性,因此高增益控制并不适用于双质量弹簧系统.如图5所示,在频率为1~10 rad/s范围内,之前设计的ADRC控制器增益比较高,因此对于参数不确定性控制效果不理想.虽然可以通过减小带宽的方式降低增益,但是调节时间又将增大.综合来看,只通过调节带宽参数很难使得ADRC控制器满足所有的性能要求.

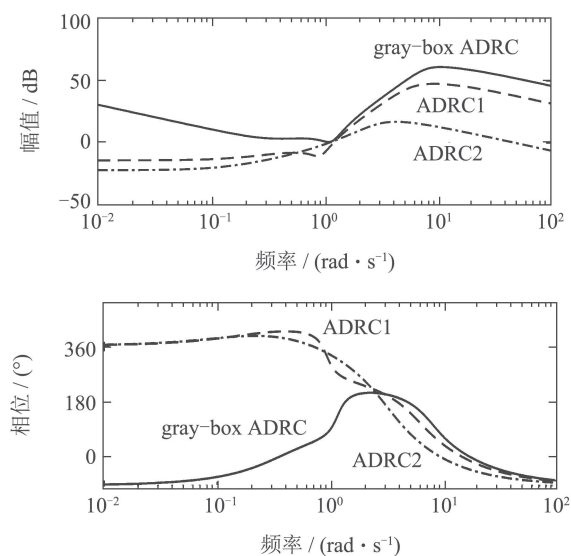


图5 ADRC控制器bode响应

Fig. 5 Bode plots of the ADRC controllers

4.1 降低控制增益

研究发现被控系统自身包含两个积分环节,因此控制器可以不需要积分环节.而ADRC控制器恰

好自带一个积分环节,导致系统开环与闭环存在90°的相角滞后.因此,首先考虑将ADRC的一个观测器的极点配置在原点来消除积分作用.控制带宽依然选择 $\omega_c = 1$,观测器带宽依然选择 $\omega_o = 5$,此时增益 K 不变,而观测器增益变为

$$L = [20 \ 148 \ 460 \ 329 \ -920]^T, \quad (20)$$

此时等效控制器(记为ADRC1)的传递函数为

$$\text{ADRC1} = \frac{3768(s+0.19)(s^2 - 0.29s + 0.85)}{(s^2 + 6.14s + 35.2)(s^2 + 17.86s + 89.15)}, \quad (21)$$

其bode响应如图5所示,可见控制器在1~10 rad/s频率范围内增益有所下降.

尽管此时控制量最大值由45减小为12,但是仍然不满足性能要求,得分详情如表2所示.

为进一步降低控制量,将观测器带宽减小为 $\omega_o = 2$,得到

$$L = [8 \ 22 \ 16 \ -28 \ -32]^T, \quad (22)$$

此时等效控制器(记为ADRC2)传递函数为

$$\text{ADRC2} = \frac{48(s+0.14)(s-2.26)(s-1.09)}{(s^2 + 3.55s + 10.1)(s^2 + 8.45s + 19.9)}. \quad (23)$$

如图6所示,在ADRC1作用下系统穿越频率已经减小到振荡频率以下,但是截止频率依然比较大.因此尽管标称系统幅值裕度和相角裕度较大,但是系统鲁棒性依然比较差.

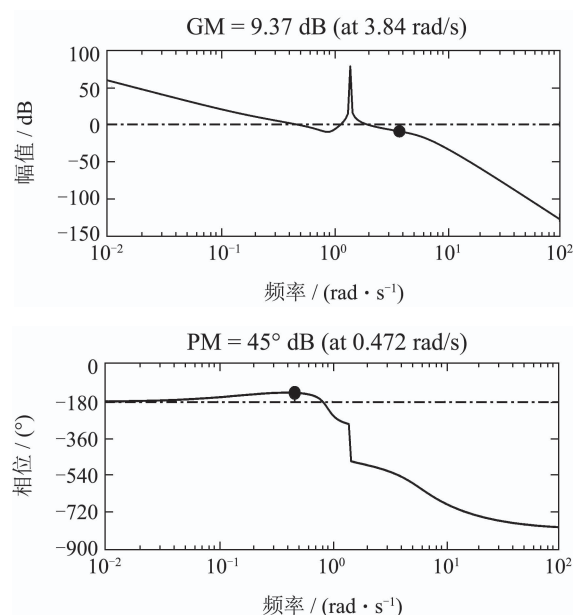


图6 ADRC1控制器下系统开环bode响应

Fig. 6 Bode plots of the open-loop system under ADRC1

如图7所示,尽管ADRC2作用下系统幅值裕度和相角裕度减小,但是穿越频率和截止频率均小于

振荡频率,这意味着该控制器将振荡频率引起的不确定性视为高频扰动,并通过高频段骤降进行抑制.此时控制量大小和参数变化满足性能要求,但幅值裕度和相角裕度不满足性能要求,如表2所示.

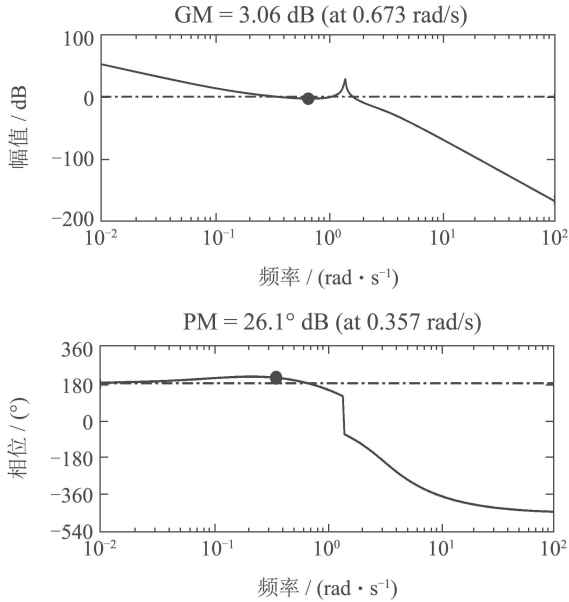


图7 ADRC2控制器下系统开环bode响应

Fig. 7 Bode plots of the open-loop system under ADRC2

图8为ADRC2控制下系统对于参数变化的部分输出响应,可以发现,系统此时已经能够满足基准系统的鲁棒性能(尽管幅值和相角裕度不满足要求).

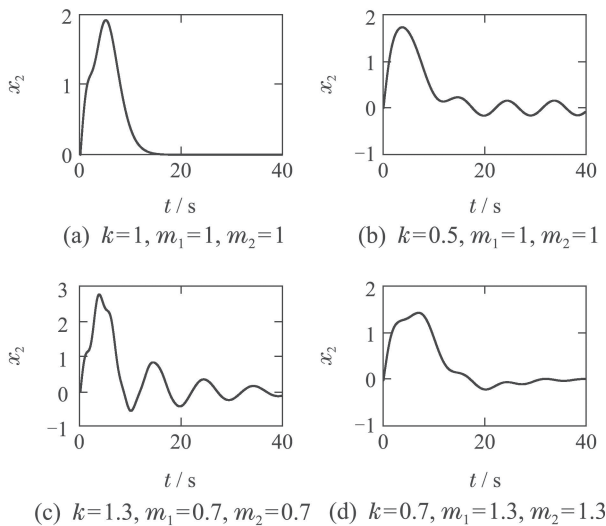


图8 ADRC2控制器下系统输出响应

Fig. 8 Responses of the benchmark system under ADRC2

因此可以说明,幅值裕度和相角裕度并不能完全反映系统鲁棒性能.

4.2 改善综合性能

从以上改进可以看到,通过将观测器一个极点配置在原点,并减小观测器带宽,可以满足双质量

弹簧基准系统的鲁棒要求,但是幅值裕度和相角裕度的要求达不到要求.尽管裕度指标并不能很好体现系统的鲁棒性,但是既然得分系统对于此有要求,那么为了公平比较该基准系统的各种设计方案,ADRC设计也应当能够满足该要求.

仿真发现,无论增加或减小带宽参数均无法再提高系统综合性能.为此,尝试将带宽配置为复数,如 $-\zeta_o\omega_o \pm j\omega_o\sqrt{1-\zeta_o^2}$ 和 $-\zeta_c\omega_c \pm j\omega_c\sqrt{1-\zeta_c^2}$,其中 ζ_o 和 ζ_c 为相应阻尼比.此时,ADRC设计完全看成极点配置问题.

仍然将一个观测器极点配置在原点,调整其他参数为 $\omega_c=0.4$, $\zeta_c=0.8$, $\omega_o=1.4$, $\zeta_o=0.2$,得到

$$\begin{cases} K=[0.026 & 0.205 & 0.73 & 1.28 & 1], \\ L=[1.12 & 2.23 & -0.045 & -0.626 & 0.09]^T. \end{cases} \quad (24)$$

此时,等效控制器(记为ADRC3)的传递函数为

$$\text{ADRC3} = \frac{-0.26(s+0.44)(s+0.61)(s-4.47)}{(s^2+1.07s+2.49)(s^2+1.33s+0.48)}. \quad (25)$$

从图9可以看出,ADRC3增益明显减小.

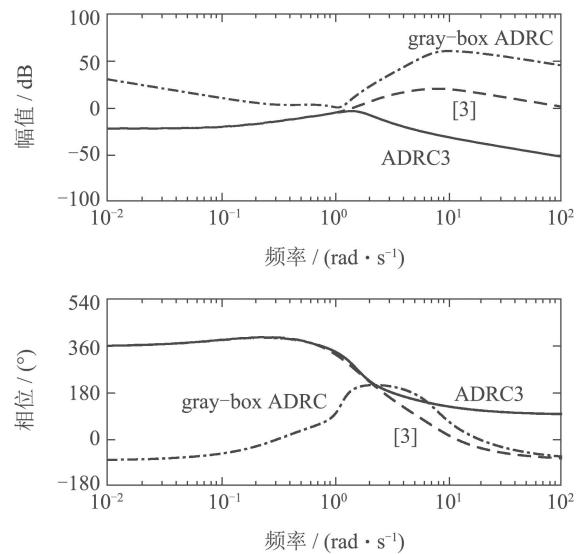


图9 ADRC3控制器bode响应

Fig. 9 Bode plot of ADRC3

系统在ADRC3作用下开环bode响应如图10所示,此时幅值裕度和相角裕度满足要求,穿越频率和截止频率也都小于振荡频率,控制器综合得分9.2.

4.3 综合比较

系统输出响应如图11所示.可以看到,ADRC3与文献[3]设计的控制器闭环系统时域响应很接近,但是由于ADRC3的控制量最大值更小,调节时间更短,并且稳定的范围 $k_{\max}$ 更大,因此评分更高.

两个控制器下系统开环bode响应如图12所示.

低频段两个控制器都采用了超前补偿,保证了足够的相角裕度. 高频段系统开环增益 $|G_c G_p|$ 很小,噪声到控制端的传递函数:

$$G_{nu} = \frac{G_c}{1 + G_c G_p} \approx G_c. \quad (26)$$

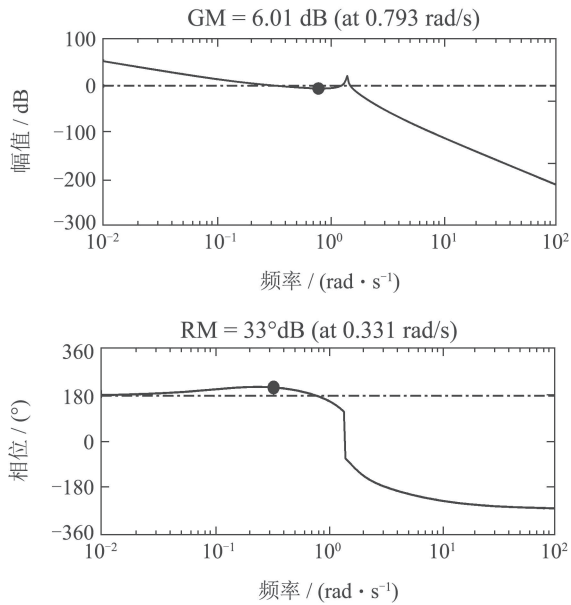


图 10 ADRC3控制器下系统开环bode响应

Fig. 10 Bode plots of the open-loop system under ADRC3

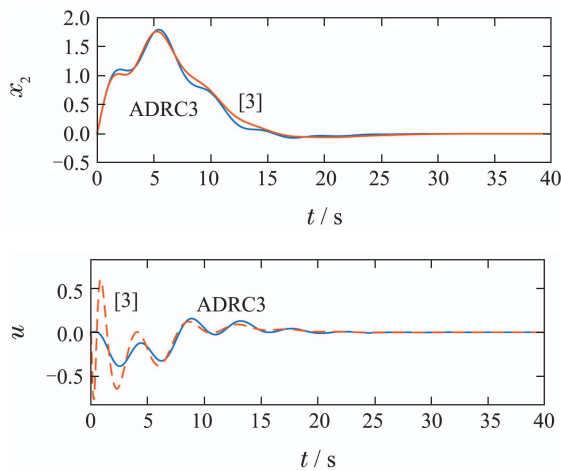


图 11 ADRC3和文献[3]控制器下系统输出响应

Fig. 11 Responses of the benchmark system under ADRC3 and the controller in [3]: Nominal parameters

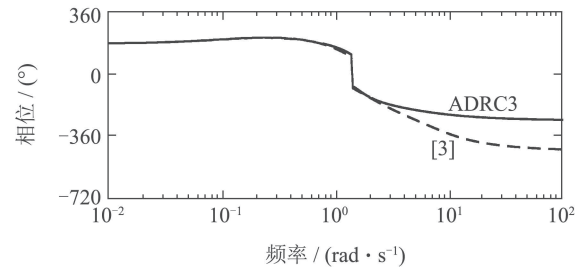
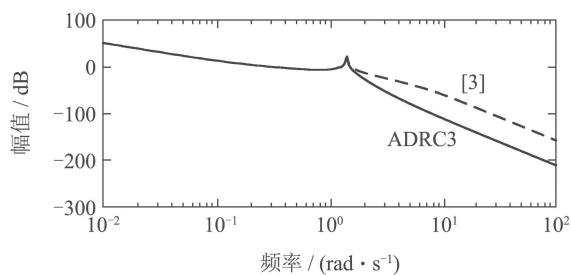


图 12 ADRC3和文献[3]控制器下系统开环bode响应

Fig. 12 Bode plots of the open-loop system under ADRC3 and the controller in [3]

由图9可知, 高频段ADRC3控制器幅值骤降趋势更大, 因此自抗扰控制器抑制高频噪声的能力也将更强. 考虑测量端包含噪声, ADRC3和文献[3]控制器的输出响应如图13所示, 此时ADRC3输出响应明显优于文献[3]设计的控制器, 并且ADRC3控制量较小、变化比较平滑.

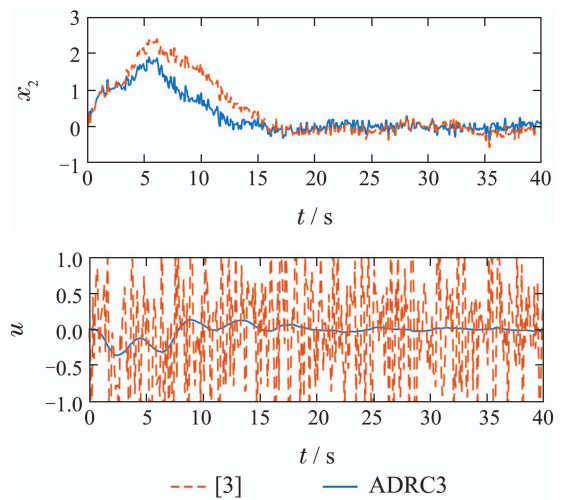


图 13 测量端包含噪声的系统输出响应

Fig. 13 Responses of the system with measurement noise

5 结论

ADRC的高增益特性能保证闭环系统对模型参数的鲁棒性, 但是对于双质量弹簧基准系统来说, 模型参数不确定不仅体现在低频, 而且也影响系统中高频特性, 因此很难采用常规ADRC设计达到鲁棒设计要求. 为了提高双质量弹簧系统ADRC设计的性能, 本文利用系统的已知扰动信息进行自抗扰控制设计, 并且提出两种改进方法. 首先为了降低ADRC的控制量输出, 考虑将自身包含积分作用消除, 为此将观测器其中一个极点配置在原点. 同时, 结合鲁棒性能要求对控制器进行频域特性分析, 并将其带宽参数配置为复数. 与其他控制方法相比, ADRC控制器具有固定结构, 并且只需要通过调节参数就能获得比其他控制方法控制量更小、调节时

间更短、参数变化范围更大的控制性能,因此在评价系统中获得很高的得分,也为一些较难控制的系统应用ADRC控制提供了一种设计思路。

参考文献:

- [1] WIE B, BERNSTEIN D S. A benchmark problem for robust control design. *Proceedings of American Control Conference*. San Diego, CA, USA: IEEE, 1990: 961 – 962.
- [2] WIE B. Benchmark problems for robust control design. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1992, 15(5): 1057 – 1059.
- [3] THOMPSON P M. Classical/H₂ solution for a robust control design benchmark problem. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1995, 18(1): 160 – 169.
- [4] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance observer-based control and related methods: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1083 – 1095.
- [5] RADKE A, GAO Z. A survey of state and disturbance observers for practitioners. *Proceedings of the American Control Conference*, Minneapolis. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2006: 5183 – 5188.
- [6] ZHENG Q, DONG L, LEE D H, et al. Active disturbance rejection control and implementation for MEMS gyroscopes. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2009, 17(6): 1432 – 1438.
- [7] ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z. A practical approach to disturbance decoupling control. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1016 – 1025.
- [8] SUN M, WANG Z, WANG Y, et al. On low-velocity compensation of brushless DC servo in the absence of friction model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3897 – 3905.
- [9] XIE H, SONG K, HE Y. A hybrid disturbance rejection control solution for variable valve timing system of gasoline engines. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 889 – 898.
- [10] GUO B, ZHAO Z. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 420 – 430.
- [11] GUO B, ZHAO Z. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, 51(2): 1727 – 1757.
- [12] XUE W, HUANG Y. Comparison of the DOB based control, a special kind of PID control and ADRC. *Proceedings of the American Control Conference*. San Francisco: IEEE, 2013: 4373 – 4379.
- [13] ZHOU Hon, TAN Wen. Anti-windup schemes for linear active disturbance rejection control. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1457 – 1463.
(周宏, 谭文. 线性自抗扰控制的抗饱和和补偿措施. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1457 – 1463.)
- [14] ZHANG B, TAN W, LI J, et al. Decentralized active disturbance rejection control for the benchmark refrigeration system. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(4): 503 – 508.
- [15] TALOLE S E. Active disturbance rejection control: Applications in aerospace. *Control Theory & Technology*, 2018, 16(4): 314 – 323.
- [16] HAN Jingqing. Active 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.)
- [17] HAN J. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [18] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of the American Control Conference*. Denver: IEEE, 2003: 4989 – 4996.
- [19] TIAN G, GAO Z. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Singapore: IEEE, 2007: 1595 – 1599.
- [20] XUE W, HUANG Y. On frequency-domain analysis of ADRC for uncertain system. *Proceedings of the 2013 American Control Conference*. Washington, DC: IEEE, 2013: 6652 – 6657.
- [21] ZHANG H, ZHAO S, GAO Z. An active disturbance rejection control solution for the two-mass-spring benchmark problem. *Proceedings of the American Control Conference*. Boston: IEEE, 2016: 1566 – 1571.
- [22] ZHENG Q, GAO Z. Active disturbance rejection control: Some recent experimental and industrial case studies. *Control Theory and Technology*, 2018, 16(4): 301 – 313.

作者简介:

李健 博士研究生, 目前研究方向为线性自抗扰控制参数整定与应用, E-mail: xlij8802@ncepu.edu.cn;

张彬文 博士研究生, 目前研究方向为自抗扰控制参数整定与应用, E-mail: zbw@ncepu.edu.cn;

谭文 教授, 目前研究方向为鲁棒控制及其在电力系统中的应用, E-mail: wtan@ncepu.edu.cn.