

控制与决策

Control and Decision

基于NOB的线性自抗扰控制在惯性参考单元中的应用

李醒飞, 王凡, 拓卫晓, 周政

引用本文:

李醒飞,王凡,拓卫晓,周政. 基于NOB的线性自抗扰控制在惯性参考单元中的应用[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 483–489.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0659>

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>

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law
控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

[基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design
控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

[基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测](#)

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems
控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

[含有分数阶有色关联噪声的分数阶系统的卡尔曼滤波器设计](#)

Design of Kalman filter for fractional-order systems with correlated fractional-order colored noises
控制与决策. 2021, 36(7): 1672–1678 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1418>

基于NOB的线性自抗扰控制在惯性参考单元中的应用

李醒飞^{1,2†}, 王凡¹, 拓卫晓^{1,2}, 周政¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214000)

摘要: 高增益的线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC), 应用于系统输出被噪声污染的场合时, 性能会受到较大的影响和限制. 针对经典滤波算法噪声抑制效果差, 带宽损失严重的问题, 提出利用噪声观测器 (noise observer, NOB) 降低 LADRC 噪声敏感, 从而提高系统带宽的控制策略. 首先, 分析 LADRC 的频域特性和离散化效果, 明确传感噪声对系统带宽的影响; 然后, 介绍基于 NOB 的 LADRC 实现, 并进行系统内稳定性的分析; 最后, 针对惯性参考单元的位置环, 将所提出方案与低通滤波器、预报式跟踪微分器进行对比分析. 仿真结果表明, NOB 能够在抑制噪声的同时, 减小相位损失; 硬件实验表明, 引入 NOB 滤波的 LADRC, 驱动信号的 RMSE 降低至 LADRC 的 20.47%, 系统阶跃响应的上升时间减少 56.67%, 表明 NOB 对于降低 LADRC 的噪声敏感, 提高系统带宽具有显著效果, 具备相当的工程实践意义.

关键词: 线性自抗扰控制; 扩张状态观测器离散化; 带宽扩展; 噪声观测器; 惯性参考单元

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0659

引用格式: 李醒飞, 王凡, 拓卫晓, 等. 基于 NOB 的线性自抗扰控制在惯性参考单元中的应用 [J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 483-489.

Application of linear active disturbance rejection control based on NOB in inertial reference unit

LI Xing-fei^{1,2†}, WANG Fan¹, TUO Wei-xiao^{1,2}, ZHOU Zheng¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214000, China)

Abstract: The performance of high-gain linear active disturbance rejection control (LADRC) will be greatly affected and limited when the system output is polluted by noise. In terms of the problems of poor noise suppression and serious bandwidth loss in classical filtering algorithms, a control strategy is proposed to reduce the noise sensitivity of the LADRC by using the noise observer (NOB), and further increase the control bandwidth. Firstly, the frequency-domain characteristics and discretization effect of the LADRC are analyzed. The influence of sensing noise on the system bandwidth is analyzed as well. Then, the implementation of the LADRC based on the NOB is introduced, and the stability analysis of the system is carried out. Finally, the proposed method is verified in the position loop of the inertial reference unit, and compared with the low-pass filter and the predictive tracking differentiator. The simulation results indicate that the NOB can suppress the noise and simultaneously reduce the phase loss. Experimental results show that the LADRC based on NOB can reduce the RMSE of the driving signal to 20.47% and reduce the rise time of the system step response by 56.67% compared to the LADRC. The NOB is proved to be practical and efficient on reducing the noise sensitivity of the LADRC and improving the system bandwidth.

Keywords: linear active disturbance rejection control; discrete extended state observer; bandwidth expansion; noise observer; inertial reference unit

0 引言

自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 是由韩京清^[1] 提出的非线性控制算法, 以克

服传统 PID 在误差处理和积分反馈方面存在的缺陷, 并保留了 PID 对系统模型不确定性容忍度高这一优点. ADRC 将包括系统建模在内的未知扰动作

收稿日期: 2022-04-20; 录用日期: 2022-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61733012, 62203322); 博士后科学基金项目 (2022M712372); 深海技术科学太湖实验室“揭榜挂帅”项目 (2022JBGS03001).

†通讯作者. E-mail: lixfju@hotmail.com.

为总扰动,通过建立 $n + 1$ 阶的 ESO (extended state observer) 实现 n 阶模型下扩张状态 z_{n+1} 的观测,并以此将被控对象校正为近似的级联积分系统. 近年来,ADRC 因不需要较多的模型信息,具备良好的扰动抑制能力,在空间机器人^[2]、燃料电池^[3]、姿态控制^[4]等诸多实践上得到广泛的关注和研究.

为了方便工程实现和参数调节,Gao^[5]在继承 ADRC 优点的基础上,将其中的非线性处理调整为线性,从而完成 LADRC (linear ADRC) 的设计. 通过精心地参数整定,LADRC 在扰动抑制上足堪媲美模型依赖的 DOB (disturbance observer) 等算法. 但是,实际系统中的传感器输出,不可避免地叠加一定强度的噪声. 噪声会经 LADRC 结构中的高增益 LESO (linear ESO) 进一步地放大^[6],并传递至系统执行器. 尤其在微行程、高带宽的系统中,这类包含高频、大幅值的驱动信号,会超出执行器的工作区间,导致使用者不得不重新审视、调整参数,需要牺牲系统带宽.

为降低噪声对 LADRC 的影响,Cheng 等^[7]提出将 ESO 的增益由常值转为开关式增益切换,观测器增益随误差的减小而减小,但是增益切换会减弱系统对低频、微小扰动观测的效果. 张敏捷等^[8]提出利用预报式的跟踪微分器 (predictor linear tracking differentiator, PLTD) 来弥补相位损失,相较于 LPF (low-pass filter),减小了相位损失,但是其补偿效果是以牺牲幅值增益为代价,反致中频区的噪声额外放大. 秦华阳等^[9]提出滑动窗实时小波降噪,并仿真其对高频非平稳噪声的滤波,但是缺乏对正弦信号的验证.

含上述研究在内,LADRC 中抑制噪声的策略主要包括:直接滤波和优化控制结构. 第1类直接在反馈回路串联滤波器,但是易造成信号相位损失,鲁棒性变差,甚至不稳定振荡^[10]. 第2类则是在建立模型不确定性低的基础上,包括卡尔曼滤波^[11]和 NOB 等^[10,12],前者需要噪声模型,计算包含矩阵求逆,而 n 阶稠密矩阵的求逆复杂度 $O(n^3)$,致使控制周期变长. NOB 源自 Zhou 等^[13]提出的广义内模控制,Xie^[12]将其分割为 DOB 和 NOB. 为简化原有的 H_∞ 设计方案,Jo^[10]采用滤波器进行代替. 相较于直接滤波和卡尔曼滤波,NOB 参数调节方便,避免相位损失,占用硬件资源少,适合高频控制场景.

基于上述分析,本文提出利用 NOB 滤波来降低传感噪声对驱动信号的影响,扩展 LADRC 带宽的控制策略. 首先,对 LADRC 的噪声敏感进行分析,以表明噪声敏感难以通过调参来规避;然后,详细介绍基

于 NOB 的 LADRC 实现,并分析新结构的内稳定性;最后,通过惯性参考单元 (inertial reference unit, IRU) 进行仿真和实验验证.

1 线性自抗扰控制器

LADRC 包括扰动观测的 LESO 和前端控制器 K 两部分,如图1所示. 当 LESO 能够较好地观测系统总扰动时,经扩张状态补偿,能够实现系统的级联积分校正和扰动抑制^[14-15]. 除扩张状态外,其余状态变量反馈至 K ,与参考输入 r 进行运算,完成随动跟踪,控制量 u 计算如下式所示:

$$u = \frac{1}{b_0} \left(k_1 r - \sum_{i=1}^n k_i z_i - z_{n+1} \right). \quad (1)$$

其中: z_i 为 LESO 观测的状态输出, b_0 为与被控对象增益密切相关的 LESO 待调参数, k_i 为控制器参数.

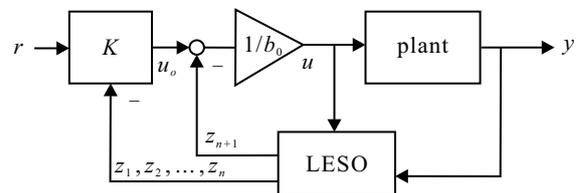


图1 LADRC控制结构

前端控制器仅是简单状态反馈,可采用带宽法、线性二次最优控制或非线性控制等. LADRC 的性能优劣取决于核心 LESO^[16],因此,其噪声敏感分析仅需针对 LESO 进行. 考虑如下式所示的稳定系统 P :

$$P = \frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (2)$$

其中: b 为输入增益, a_0 、 a_1 为未知的模型参数.

针对 P 可建立三阶 LESO,即

$$\dot{z} = Az + Bu + L(y_M - Cz). \quad (3)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], \quad L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T,$$

$$z = [z_1; z_2; z_3]. \quad (4)$$

式中: z_1 、 z_2 和 z_3 分别为对系统输出、输出微分以及总扰动的观测值; b_0 为待调系统增益,且 $b_0 \approx b$; L 为观测器增益; y_M 为传感器测量值. 由 LESO 的特征方程,有

$$|sI - (A - LC)| = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = 0. \quad (5)$$

配置极点在 $-\omega_o$, 表征观测器带宽,则 L ^[17] 调整为

$$L = [3\omega_o \ 3\omega_o^2 \ \omega_o^3]^T. \quad (6)$$

结合式(3)和(6),由 y_M 至 z 的传递函数为

$$z = \frac{1}{(s + \omega_o)^3} \begin{bmatrix} \omega_o(3s^2 + 3s\omega_o + \omega_o^2) \\ s\omega_o^2(3s + \omega_o) \\ s^2\omega_o^3 \end{bmatrix} y_M. \quad (7)$$

2 量测噪声对LESO观测效果的影响

受传感器性能限制,测量值 y_M 通常叠加一定强度的高斯分布白噪声 $n(t)$,如下式所示:

$$y_M = y + n(t). \quad (8)$$

图2为不同 ω_o 下的由 y_M 至 z_1 的传递函数 $T_{z_1 y_M}$ 的频率特性.

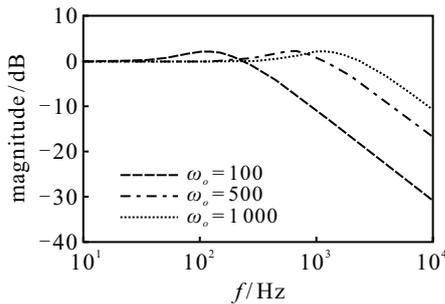


图2 $T_{z_1 y_M}$ 频域响应

随着 ω_o 的增大,LESO观测的频带明显变宽,此效果同样反映到 z_3 ,即意味着系统对扰动的估计能力提高^[18].有限带宽的LESO,本身对高频噪声有一定的抑制作用.因此,当系统设计所需带宽较低(ω_o 较小时),且 $n(t)$ 的能量集中在高频,无需额外滤波, $n(t)$ 可被作为广义的“总扰动”得到抑制, z_1 相比 y_M 在频谱上更干净,故多采用 z_1 代替 y_M 进行反馈.

然而,受高带宽控制目标和宽频扰动抑制的约束,降低 ω_o 并非有效策略.若 $n(t)$ 能量分布频带宽,则LESO对一段频域的 $n(t)$,反呈放大的效果.由式(7),有

$$\begin{cases} T_{z_1 y_M}(j\omega) = \frac{1}{(\omega^2 + \omega_o^2)^3} (p_1 + p_2 j), \\ p_1 = 6\omega^4 \omega_o^2 + 3\omega^2 \omega_o^4 + \omega_o^6, \\ p_2 = -3\omega^5 \omega_o + \omega^3 \omega_o^3. \end{cases} \quad (9)$$

令

$$\frac{d|T_{z_1 y_M}(j\omega)|}{d\omega} = 0. \quad (10)$$

峰值处的频率和峰值增益满足

$$f_p \approx \frac{1.1547}{2\pi} \omega_o, \quad M_p \approx 2.17 \text{ dB}. \quad (11)$$

峰值频率附近的噪声会经近似微分环节后,对 z_2 和 z_3 造成更严重的影响,尽管部分学者在极点配置时增加虚部,但是难以规避高增益特性,对频域影响有限.

同时,当选用不同离散化方案如四阶龙格库塔

(the 4th order Runge-Kutta, RK 4),量测噪声进一步影响LESO的估计效果,尤其是在 ω_o 较大时,因 $\beta_3 = \omega_o^3, \beta_3$ 甚至超出计算机的存储范围.不同离散化的ESO对同一 y_M 的时域估计如图3所示,估计值相对 y_M 在不同频率下的增益如图4所示.

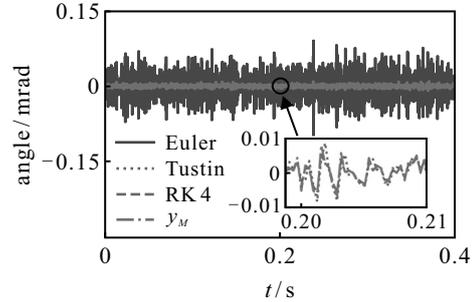


图3 LESO离散化时域估计

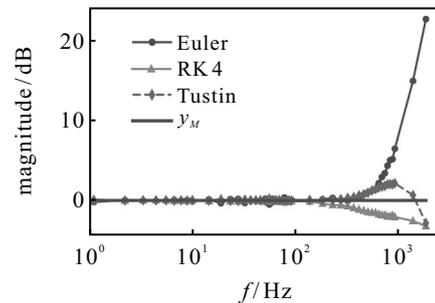


图4 LESO离散化频域相对增益

Euler法完全无法估计原信号,RK 4因运算中“预测”和“校正”,导致离散后频域特性和连续域相去甚远,LESO几乎变为另一种估计器. Robert等^[19]在评价离散ESO时,并未考虑噪声,且忽略频域特性.

综上所述,LESO对噪声的敏感源于其自身的高增益特性,噪声敏感会因不当的离散化进一步放大,即使在ESO中加入模型信息,量测噪声影响仍然不可忽略^[10,12].在微行程高带宽的控制中,观测扰动甚至会被放大的噪声淹没.因此,为进一步提高LADRC在工程应用中的可行性,采用额外结构降低噪声的影响十分必要.

3 基于NOB滤波的改进LADRC

为便于分析,由式(1)和(4),将LADRC转为传递函数的形式.基于NOB滤波的LADRC控制结构如图5所示.特别地,当 P 为二阶系统,建立三阶的LADRC,此时 C 和 F 按下式确定:

$$C = \frac{k_1(s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)}{b_0(s^3 + (\beta_1 + k_2)s^2 + (\beta_2 + k_2\beta_1 + k_1)s)},$$

$$F = \frac{(k_1\beta_1 + k_2\beta_2 + \beta_3)s^2 + (k_1\beta_2 + k_2\beta_3)s + k_1\beta_3}{k_1(s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)}. \quad (12)$$

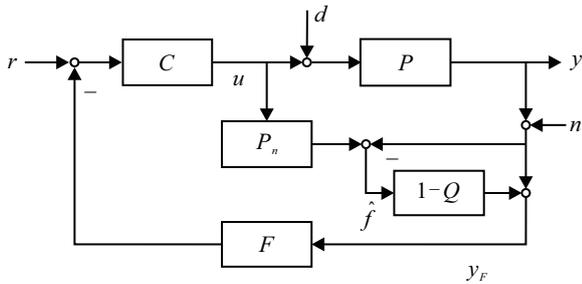


图5 基于NOB滤波的LADRC

NOB的原理与DOB类似,可看作是扰动抑制的对偶结构.以输入 u 通过名义模型 P_n 后的理想输出,与测量值作差,之后提取差值中的主要噪声频段,并作为噪声估计值补偿到输出,以实现系统输出的滤波^[10,20].由 n 到 y, u 的传递函数为

$$T_{un} = \frac{-CFQ}{1 + F(1-Q)(P_n - P)C + FPC} \approx \frac{-CFQ}{1 + FPC} \Big|_{P_n \approx P}$$

$$T_{yn} = PT_{un}. \tag{13}$$

图5中的 Q 可按下式设计为 n 阶LPF:

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n}, \tag{14}$$

则 $1 - Q(s)$ 为高通特性.

Q 的截止频率越低,NOB对 n 的抑制效果越明显,当 $Q \approx 0$ 时, n 几乎对系统的驱动信号无影响,但是同样滤除输出中 dP 低频的成分,系统为开环控制.考察上述控制结构的内部稳定性,即包括所有外部输入(r, d, n)到所有内部信号(y, u, \hat{f}, y_F)的传递函数是稳定的.

假设1 系统 P ,名义模型 P_n 和滤波器 Q 均适应.

由式(12), $F \in (RH)_\infty$,由图5可见,确保系统内稳定的充要条件^[13,21]为

$$\delta(s)^{-1}C \in (RH)_\infty,$$

其中

$$\delta(s) = 1 + FPC + F(1-Q)(P_n - P)C. \tag{15}$$

由式(15),当 $P_n \approx P$ 时,新系统的内稳定仅取决于LADRC、LADRC与NOB解耦,两者可分别设计.

4 仿真与实验验证

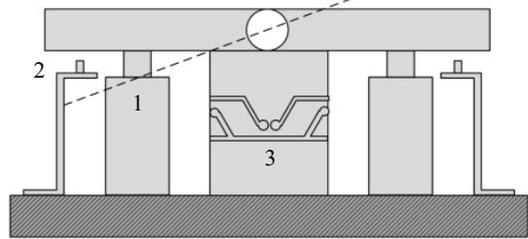
基于上述分析,本文针对IRU的位置环,分析实际应用中NOB对LADRC噪声抑制的效果.

4.1 系统辨识与校正

IRU采用柔性铰链支撑,依靠弹性形变传递运动,4个音圈电机正交安装作为执行器,基座与平台间

安装有电涡流位移传感器,测量台面的偏转角度^[22],结构如图6所示.扫频法辨识得到输入电压(mV)与平台角度(μrad)间的传递函数为

$$P_n = \frac{3.8684 \times 10^9}{(s + 1.82 \times 10^4)(s^2 + 10.96s + 5.1 \times 10^4)}. \tag{16}$$



1: 音圈电机 2: 传感器 3: 柔性铰链

图6 IRU示意图

受机械谐振影响,系统在35.9 Hz存在谐振以及540 Hz的高阶谐振,采用下式陷波器进行低频谐振校正:

$$NF = \frac{s^2 + 10.85s + 5.088 \times 10^4}{s^2 + 552.6s + 5.088 \times 10^4}. \tag{17}$$

图7为串入陷波器前后的系统频域特性,陷波器能够有效地补偿谐振处增益.

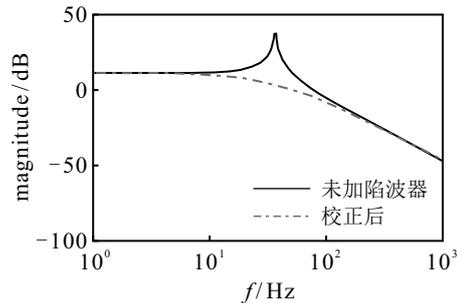


图7 系统开环辨识频域特性

4.2 仿真实验

基于Simulink平台搭建仿真模型,如图8所示.在 n 处引入幅值为 $7 \mu\text{rad}$ 的白噪声,限幅范围 $\pm 2\text{V}$,防止系统输出发散至无穷,Filter模块用于实现不同滤波算法.

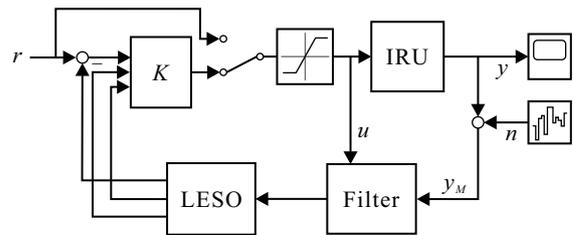


图8 IRU仿真模型

为评估基于NOB滤波的LESO,在测量信号被噪声污染时的状态估计效果.以LPF、PLTD作为比较对象,LPF和NOB的 $Q(s)$ 均为二阶($\tau = 0.0016$),

PLTD按文献[1]确定,如下式所示:

$$\begin{cases} fh = fhan(v_1(t) - v_0(t), v_2(t), r, h_0), \\ v_1(t+h) = v_1(t) + hv_2(t), \\ v_2(t+h) = v_2(t) + fh, \\ v(t) = v_1(t) + h_1v_2(t). \end{cases} \quad (18)$$

其中: h 为采样步长, $h = 0.0002$; h_0 为 $fhan$ 的滤波因子, $h_0 = 2h$; h_1 为预报步长, $h_1 = 20h$; $r = 3.0 \times 10^5$.

切换图8中的开关,调整为开环并施加 $100 \mu\text{rad}$, 初始相位为0, 频率 80 Hz 正弦信号, 不同滤波下 LESO 估计的 z_1 如图9所示. LPF 相比原输出 y 产生 0.16 周期滞后, 而 PLTD 牺牲中频增益, 换取低频相位补偿和高频抑制, 在宽频噪声下反而不利.

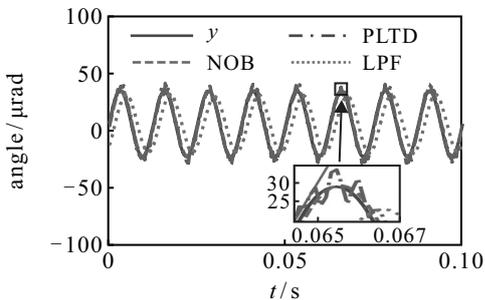


图9 滤波下LESO输出 z_1

切换为闭环,调整输入为0,比较系统实际输出 y , 产生大相差的LPF直接振荡,PLTD反而放大噪声,而NOB则表现出良好的滤波特性,如图10所示.

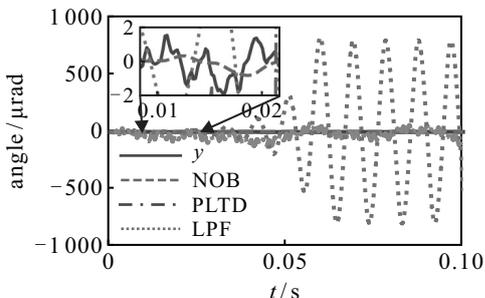


图10 0输入时系统输出 y

4.3 对比实验与分析

为验证LARC+NOB对传感信号的滤波效果以

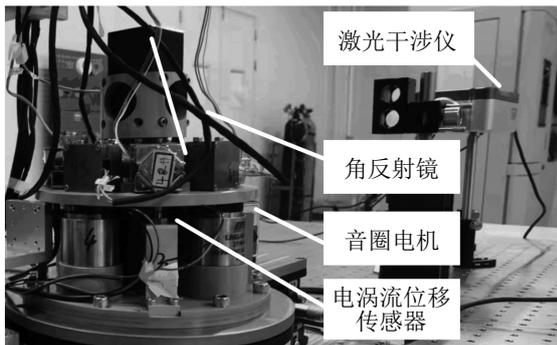


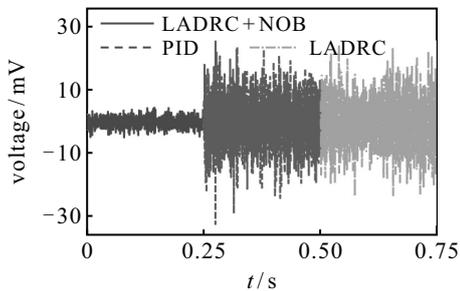
图11 惯性参考单元系统

及在带宽提升上的优势,将所提出方案、LADRC以及不完全微分的PID,分别在惯性参考单元中进行实现,如图11所示. 激光干涉仪用于测量实际转角 y , 评估系统的控制效果,表1为控制器参数.

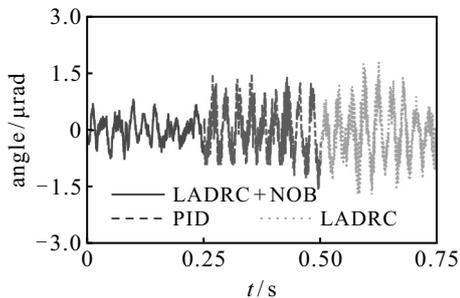
表1 控制器参数

控制器	参数
PID	$K_p = 2.2, K_i = 195.447, K_d = 0.0024, K_N = 3472.93$
LADRC	$\omega_c = 314, \omega_o = 10\omega_c, b_0 = 1.39 \times 10^5$
LADRC+NOB	$\omega_c = 628, \omega_o = 10\omega_c, b_0 = 1.39 \times 10^5$

受宽频噪声的限制,LADRC相较于PID在带宽上并无优势,其噪声放大作用凸显,且此类噪声同样传递至系统输出,影响系统控制精度,如图12所示.



(a) 系统驱动信号



(b) 系统输出值

图12 0输入下系统驱动以及输出信号

补充NOB后,驱动信号的高频成分大幅衰减,尤其是 540 Hz 附近的 IRU 高阶谐振. 如图13所示, RMSE 仅是 LADRC 下的 20.47% , 实现带宽有效扩展. 相较于 PID, 更适应高带宽场景,表2为驱动信号的相关结果. 相较于 PID 与 LADRC, 所提出方案对系统输出中的高频噪声具有明显的滤波效果.

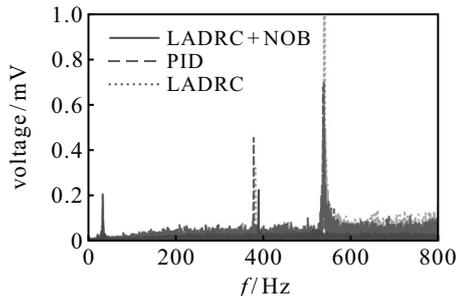


图13 驱动信号频域特性

表2 0输入下驱动信号相关结果

方案	RMSE/mV	Max/mV
LADRC + NOB	8.7	4.7
PID	43.8	31.7
LADRC	42.5	24.1

图14为不同方案下的系统阶跃响应. ADRC的带宽在噪声的限制下难以提高, 尽管其超调仅有2.0%, 但其上升时间长达12 ms. PID与补充NOB的LADRC, 调整的带宽相近, 故上升时间差别较小, PID为4.0 ms, LADRC + NOB为5.2 ms. 但是PID无法兼顾上升时间和超调, 其最大超调为16.12%, 而后者仅有3.48%, 以时间绝对误差积分 (ITAE) 来评价系统的响应速度和超调量这两性能的均衡效果, 3者的ITAE分别为239、247和430, 如下式所示:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt. \quad (19)$$

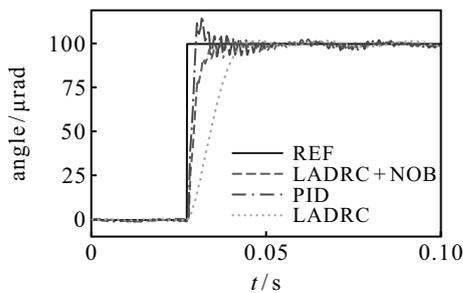


图14 阶跃响应

由此可见, 采用基于NOB滤波的LADRC, 既能够保证系统的高带宽特性, 同时避免了PID的超调.

5 结论

当LADRC应用于惯性参考单元, 实现高带宽的控制目标时, 因LESO对噪声敏感, 存在带宽受限, 影响系统稳定精度的问题, 传统滤波通常导致一定程度的相位滞后. 因此, 本文提出了基于NOB滤波的LADRC, 进行系统内稳定性的分析. 实验表明, NOB在滤波方面优于LPF与PLTD, 弥补了高增益LESO对噪声放大的缺陷. 在惯性参考单元的实验验证表明, NOB的补充, 使得系统的带宽由33 Hz可提升至100 Hz, 且驱动信号RMSE仅为低带宽下的20.47%, 通过NOB大幅地降低传感噪声对驱动信号的影响, 为高带宽的参数整定提供了基础, 具有一定的工程实践意义.

参考文献 (References)

- [1] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
(Han J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.)
- [2] 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.)
- [3] Zhao D D, Zheng Q, Gao F, et al. Disturbance decoupling control of an ultra-high speed centrifugal compressor for the air management of fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(4): 1788-1798.
- [4] 陈志旺, 张子振, 曹玉洁. 自抗扰fal函数改进及在四旋翼姿态控制中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1901-1907.
(Chen Z W, Zhang Z Z, Cao Y J. Fal function improvement of ADRC and its application in quadrotor aircraft attitude control[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1901-1907.)
- [5] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. Proceedings of the American Control Conference. Denver, 2003: 4989-4996.
- [6] 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.
(Li J, Qi X H, Wan H, et al. Active disturbance rejection control: Theoretical results summary and future researches[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(3): 281-295.)
- [7] Cheng Y, Chen Z Q, Sun M W, et al. Cascade active disturbance rejection control of a high-purity distillation column with measurement noise[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(13): 4623-4631.
- [8] 张敏捷, 杨雷, 侯砚泽, 等. 线性自抗扰控制器的噪声抑制改进研究[J]. 宇航学报, 2019, 40(7): 803-810.
(Zhang M J, Yang L, Hou Y Z, et al. Improved linear active disturbance rejection controller with denoising performance[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(7): 803-810.)
- [9] 秦华阳, 陈增强, 孙明玮, 等. 基于滑动窗实时小波降噪的扩张状态观测器及自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 23-30.
(Qin H Y, Chen Z Q, Sun M W, et al. Extended state observer based on sliding window real-time wavelet denoising and active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(1): 23-30.)
- [10] Jo N H, Jeon C, Shim H. Noise reduction disturbance observer for disturbance attenuation and noise suppression[J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2017, 64(2): 1381-1391.
- [11] Peng Q M, Qiu L, Wang Y. An active disturbance rejection controller based on Kalman observer for PMSM[C]. The 36th Chinese Control Conference. Dalian, 2017: 6478-6482.
- [12] Xie W. High frequency measurement noise rejection based on disturbance observer[J]. Journal of the Franklin Institute, 2010, 347(10): 1825-1836.
- [13] Zhou K M, Ren Z. A new controller architecture for high performance, robust, and fault-tolerant control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(10): 1613-1618.
- [14] Tatsumi J, Gao Z Q. On the enhanced ADRC design with a low observer bandwidth[C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, 2013: 297-302.
- [15] 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.)
- [16] 王海强, 黄海. 扩张状态观测器的性能与应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1078-1082.
(Wang H Q, Huang H. Property and applications of extended state observer[J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1078-1082.)
- [17] Fu C F, Tan W. Tuning of linear ADRC with known plant information[J]. ISA Transactions, 2016, 65: 384-393.
- [18] Herbst G. Transfer function analysis and implementation of active disturbance rejection control[J]. Control Theory and Technology, 2021, 19(1): 19-34.
- [19] Robert M, Aaron R, Gao Z Q. Discrete implementation and generalization of the extended state observer[C]. Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, 2016: 2209-2214.
- [20] Ning Z Q, Mao Y, Huang Y M, et al. A measurement noise rejection method in the feedback control system based on noise observer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 1686-1693.
- [21] 周克敏. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防与工业出版社, 2002: 250-254.
(Zhou K M. Robust and optimal control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 250-254.)
- [22] Zhou Z, Li X, Tuo W, et al. A resonance suppression method in platform style inertial reference unit via particle swarm optimization notch filter[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2021, 2(332): 113-194.

作者简介

李醒飞(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间传感与智能控制技术、海洋观测与深海探测技术及智能检测与自动化装备等研究, E-mail: lixfju@hotmail.com;

王凡(1997—), 男, 硕士生, 从事自抗扰控制算法、扰动观测及其在惯性参考单元中的实践等研究, E-mail: bc17843120796@tju.edu.cn;

拓卫晓(1993—), 女, 助理研究员, 博士, 从事基于磁流体动力学的微角振动测量与抑制技术等研究, E-mail: tuoweixiao@tju.edu.cn;

周政(1992—), 男, 博士生, 从事惯性参考单元的系统辨识、谐振抑制以及自抗扰控制等研究, E-mail: creedzhou@tju.edu.cn.