

文章编号: 1000-8152(2010)06-0695-06

采用改进型扰动观测器的控制方法

谢 巍, 何忠亮

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出一种适用于非最小相位对象的改进型扰动观测(DOB)结构. 通过新增两个控制器, 该结构不但对标称性能控制器输出进行动态补偿, 而且还补偿了系统输出反馈信号. 因此, 基于新DOB的控制结构不但能在低频段很好的抑制外部干扰, 消除实际被控模型摄动对闭环系统的输出性能的影响, 更重要的是提高了抑制高频测量噪声的能力. 最后, 讨论了该控制结构的内部稳定性和鲁棒稳定性.

关键词: 扰动观测器(DOB); 鲁棒控制; 非最小相位; 测量噪声

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control method with improved disturbance observer

XIE Wei, HE Zhong-liang

(College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: An improved disturbance observer(DOB) is proposed for non-minimum phase systems. In this structure, both the nominal performance controller output and the feedback signal from the system output are dynamically compensated by two additional controllers. Hence, the effect of the external disturbances in low frequency and the model uncertainties in system output are eliminated. Furthermore, the capability in suppressing the high frequency measurement noise is highly improved. Finally, the internal stability and the robust stability of the whole control system are discussed.

Key words: disturbance observer(DOB); robust control; non-minimum phase; measurement noise

1 引言(Introduction)

目前, 扰动观测方法作为一种抑制扰动的工具, 在直流伺服电机控制, 磁盘驱动, 机器人, 数控等领域得到广泛的应用^[1~3]. 同时, 扰动观测器由于其计算量小, 不需要安装额外的传感器等特点, 非常适用于提高运动控制系统的抗干扰能力^[2]. 扰动观测器(DOB)方法首先观测出由外部扰动及模型摄动造成的实际对象与标称模型(名义模型)输出的差异, 然后通过控制在控制中引入等效补偿, 将观测到的差异等效到控制输入端, 从而实现对于扰动的完全抑制^[4~8].

最初提出的经典扰动观测器(DOB)结构作为控制系统内环控制器起到了抑制扰动的作用, 它能保持实际对象的输入输出特性与对象标称模型的输入输出特性相匹配. 但它限制了受控对象为最小相位系统或没有零动态的系统. 文献[9]证明了受控对象为最小相位是经典DOB结构内部稳定的一个必要条件. 到目前为止, 已经有些研究工作^[1,10~12]提出把DOB方法推广到非最小相位系统. 但对被控对象的限制条件太多. 例如: 文献[10]提出的DOB考虑了

消除扰动, 却只是限制受控对象能被PID控制器稳定控制. 没有针对一般的非最小相位系统, 讨论控制系统的稳定性. 文献[11]提出的DOB限制对象模型不存在不确定性. 文献[1]提出的DOB虽然能适宜一般的非最小相位对象, 但实现条件较严格, 且只在低频段考虑实际模型与标称模型相匹配, 忽略测量噪声对系统的影响. 文献[12]的DOB限制干扰来自已知的外部系统, 更重要的是, 基于现有的DOB控制系统结构对测量噪声的抑制效果很不理想, 甚至多数研究工作没有考虑测量噪声对系统跟踪性能的影响. 其实, 在一些高精度跟踪定位, 精密仪器控制等高精度控制场合下, 测量噪声对系统的影响往往不能被忽略.

对比以前的研究工作, 笔者提出一种基于改进型DOB的控制结构, 它能适用一般化的非最小相位对象. 该结构将由模型摄动及外部扰动造成的实际被控对象与标称模型的误差看成系统的补偿信号源. 它的突出特征是不但对标称性能控制器输出进行动态补偿, 还新增了补偿系统输出反馈的控制结

收稿日期: 2009-01-13; 收修改稿日期: 2009-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60704022); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90816028); 广东省自然科学基金资助项目(07006470); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0206).

构,从而保证了标称性能控制器的输出信号始终与其在标称控制系统下的输出一致,完全不受外部扰动,对象模型摄动及测量噪声的影响.因此,该控制结构不但在低频段保证了标称跟踪性能和较好的抗外部干扰的能力,更重要的是提高了对高频测量噪声的抑制能力.最后,本文讨论了基于新DOB的闭环控制系统的稳定性,及新DOB结构参数设计思路.

2 基于改进型的扰动观测的控制结构(Structure of improved disturbance observer based control)

为方便讨论,又不失一般性,假定被控对象标称模型传递函数为线性时不变稳定的SISO非最小相位系统. P 和 P_0 分别表示被控对象的实际模型传递函数及标称模型传递函数,图1为标称控制系统结构, r 为参考输入, K_0 为标称性能控制器,控制器 $K_0(s)$ 的设计只考虑了控制系统输出 y 对参考输入 r 的跟踪性能.

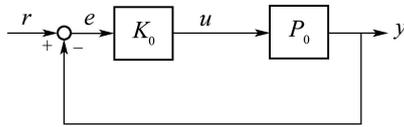


图1 标称控制系统结构

Fig. 1 Structure of nominal control system

本文将图1表示的标称控制系统作为参照,在外部扰动及对象模型摄动的情况下,期望下文提出的基于改进型DOB控制系统的对参考输入 r 的跟踪性能,能够非常近似标称控制系统对 r 的跟踪性能.

图2所示为基于现有的DOB的控制结构, d, n 分别为外部干扰信号和测量噪声, Q 为低通滤波器.

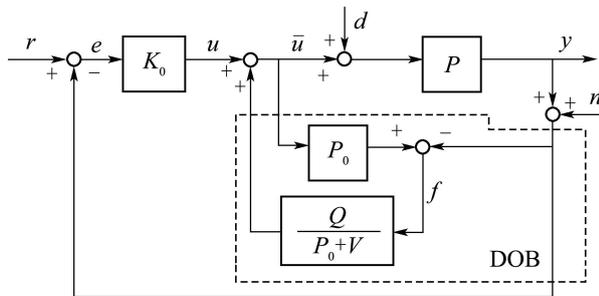


图2 基于目前DOB的控制系统结构

Fig. 2 Structure of present DOB-based control system

控制参数 V 和低通滤波器 Q 使得 $\frac{Q}{P_0+V}$ 为稳定的真有理分式传递函数.因此,该DOB可适用于非最小相位.这种让 P_0 并联一个控制参数,以使其能

应用于非最小相位的DOB结构可见文献[10].图2中,系统输出 y 可表示为

$$y(s) = \frac{PK_0(P_0+V)}{(1+PK_0)(P_0+V)+(P-P_0)Q}r(s) + \frac{P(P_0+V-QP_0)}{(1+PK_0)(P_0+V)+(P-P_0)Q}d(s) - \frac{P(Q+K_0P_0+K_0V)}{(1+PK_0)(P_0+V)+(P-P_0)Q}n(s). \quad (1)$$

通常情况,外部干扰 d 和测量噪声 n 处于不同的频率范围^[1,10].可作如下假设:

假设1 假设存在两截止频率 ω_1, ω_2 ,并且 $\omega_1 \leq \omega_2$,参考输入 $r(j\omega)$ 和外部干扰 $d(j\omega)$ 处于低频段 $(0, \omega_1)$,测量噪声 $n(j\omega)$ 处于高频段 (ω_2, ∞) .

假设2 假设滤波器 Q 与参数 V 满足:在低频段 $(0, \omega_1)$,有 $Q(j\omega) \approx 1, V(j\omega) \approx 0$;而在高频段 (ω_2, ∞) ,有 $Q(j\omega) \approx 0$.

所以,根据上面两条假设,式(1)所表示的系统输出 y 可近似为

$$y(s) \approx \frac{P_0K_0}{1+P_0K_0}r(s) - \frac{PK_0}{1+PK_0}n(s). \quad (2)$$

由此看出,基于该DOB的控制结构能消除外部干扰 d 对系统输出的影响.但是它对高频测量噪声 n 及对象模型摄动的抑制效果不理想.为了提高测量噪声的抑制能力,作如下改进.

图3为基于目前DOB(图2)的改进型DOB控制结构,2种DOB控制结构的参数 $Q(s), V(s)$ 选取原则完全相同.图3新增补偿信号 g 来补偿系统输出反馈信号.而且,图3示的控制结构始终保持标称性能控制器 $K_0(s)$ 的输出与图1中的标称系统的标称性能控制器 $K_0(s)$ 的输出完全一致.即存在如下结论:

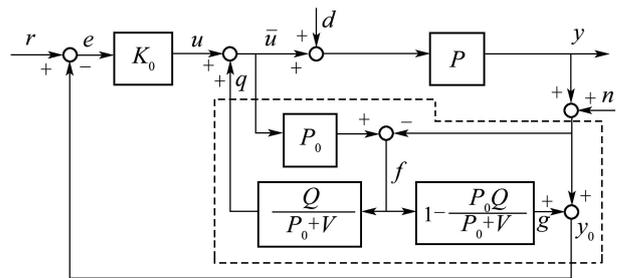


图3 基于改进型DOB的控制系统结构

Fig. 3 Structure of the improved DOB-based control system

定理1 图3所示的基于改进型的DOB控制结构中,若有 $P_0 \in H_\infty, K_0$ 能使图1所示的控制标称系统稳定;并且存在参数 Q, V 保证 $\frac{Q}{P_0+V} \in H_\infty$.那么有如下结论成立:

无论对象实际模型 P 如何摄动, 被控系统是否存在外部干扰 d 及测量噪声 n , 以及它们如何变化, 该结构始终保证从参考输入 r 到标称性能控制器 K_0 输出 u 传递函数不变, 即

$$T_{ur}(s) = \frac{K_0}{1 + P_0 K_0} r(s). \quad (3)$$

证 图3中, 在外部干扰输入 d 及测量噪声 n 均存在的情况下, 有如下关系式:

$$\bar{u} = u + Q \frac{P_0 \bar{u} - P \bar{u} - P d - n}{P_0 + V}, \quad (4)$$

$$y_0 = P \bar{u} + P d + n + (1 - \frac{P_0 Q}{P_0 + V})(P_0 \bar{u} - P \bar{u} - P d - n). \quad (5)$$

将式(4)(5)等价变换后得

$$P \bar{u} + P d + n = P_0 \bar{u} + \frac{P_0 + V}{Q}(u - \bar{u}), \quad (6)$$

$$y_0 = (P \bar{u} + P d + n - P_0 \bar{u}) \frac{P_0 Q}{P_0 + V} + P_0 \bar{u}. \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得

$$y_0(s) = P_0(u - \bar{u}) + P_0 \bar{u} = P_0 u(s). \quad (8)$$

显然, 可求得标称性能控制器输出 u 的表达式:

$$u(s) = \frac{K_0}{1 + K_0 P_0} r(s). \quad (9)$$

即, 上述命题得证.

由式(9)可知, 图3的控制结构可等效成图4所示的结构. 也就是说, 图3中外环反馈回路相当于开环控制, 无论被控系统是否存在模型摄动及有外部扰动输入, 标称性能控制器输出始终保持与其在标称系统下完全一致. 图3的外环反馈回路相当于开环控制其作用就是保持了控制器 K_0 的输出信号 u 与其在标称系统下输出一致, 不受模型摄动, 外部扰动输入及测量噪声的影响.

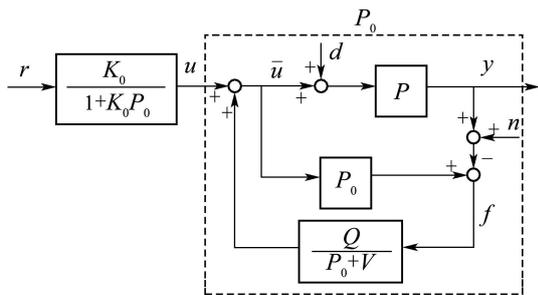


图4 基于改进型DOB的控制系统的等效结构
Fig. 4 Equivalent structure of improved DOB-based control

当被控对象存在模型摄动, 外部扰动 d 及测量噪声 n 时, 图3表示的控制结构系统输出 y 的关系式:

$$y(s) = \frac{P K_0 (P_0 + V) r(s)}{[P_0 + V + Q(P - P_0)](1 + K_0 P_0)} +$$

$$\frac{P(P_0 - P_0 Q + V)}{P_0 + V + Q(P - P_0)} d(s) - \frac{P Q}{P_0 + V + Q(P - P_0)} n(s). \quad (10)$$

那么, 在假设1的前提下, 根据假设2, 式(10)可近似等价成

$$y(s) \approx P_0 u(s) = \frac{P_0 K_0}{1 + P_0 K_0} r(s). \quad (11)$$

推论 1 在假设1和假设2条件下, 基于现有的DOB控制结构(图2)和图3所表示的改进型DOB控制系统的输出 y 表达式分别近似为式(2)和式(11). 将式(11)与式(2)相比较可看出, 与基于现有的DOB控制系统比较, 基于改进型DOB的控制结构提高了抗高频测量噪声的鲁棒性能. 该控制结构增加补偿信号 g 大大地提高了抑制高频测量噪声的能力. 同时还保持了标称性能控制器 $K_0(s)$ 的输出不受对象模型摄动, 外部干扰及测量噪声的影响, 始终与其在标称控制系统(图1)下的输出完全一致.

下面讨论该控制结构的稳定性能:

1) 讨论内部稳定性: 仅考虑标称模型情况下, 即 $P(s) = P_0(s)$, 求图3中从输入 $[r \ d \ n]^T$ 到输出 $[y \ e \ \bar{u}]^T$ 的传递函数矩阵:

$$\begin{bmatrix} y \\ e \\ \bar{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_0 P_0}{1 + K_0 P_0} & \frac{P_0(P_0 + V - P_0 Q)}{P_0 + V} & \frac{-P_0 Q}{P_0 + V} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_0}{1 + K_0 P_0} & \frac{-P_0 Q}{P_0 + V} & \frac{-Q}{P_0 + V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ d \\ n \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由于 $P_0(s) \in H_\infty$, $K_0(s)$ 能稳定的控制 $P_0(s)$, 从上述式可知只需 $\frac{Q}{P_0 + V}$ 是稳定的就能保证系统内部稳定.

2) 鲁棒稳定分析: 如图5所示, 假定实际被控对象传递函数 $P(s)$ 属于单输入单输出系统集合

$$P = \{P | P = P_0 + W_1 \Delta, \|\Delta(s)\|_\infty < 1\},$$

$\Delta(s)$, P_0 为严格有理稳定的函数, W_1 有界稳定的加权函数, 在低频段 $|W_1(j\omega)| < 1$.

根据小增益定理及等式(9), 在无外部输入信号($r = d = n = 0$)下求在图5中从 w 到 z 传递函数:

$$\begin{aligned} z &= W_1 \bar{u}, \\ \bar{u} &= \frac{Q(P_0 \bar{u} - P_0 \bar{u} - w)}{P_0 + V}. \end{aligned} \quad (13)$$

即 w 到 z 传的递函数的范数:

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \frac{-QW_1}{P_0 + V} \right\|_{\infty}. \quad (14)$$

那么,图3所示控制系统能够鲁棒稳定的充要条件为

$$\left\| \frac{-QW_1}{P_0 + V} \right\|_{\infty} < 1. \quad (15)$$

若存在 $Q(s)$, $V(s)$ 满足式(15)成立,则图3所示控制系统就能鲁棒稳定.

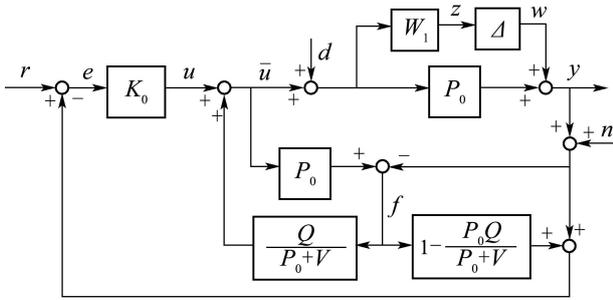


图5 具有加法摄动结构的控制系统的等效结构

Fig. 5 Additive perturbation structure of the improved DOB-based control

从式(10)(11)可以知,控制器 $K_0(s)$ 的设计决定了标称跟踪性能,而参数 $Q(s)$ 和 $V(s)$ 的选取影响系统的抗各种扰动鲁棒性能.所以,该控制系统的设计过程为:a)设计 $K_0(s)$ 保证标称控制系统满足期望的跟踪性能. $K_0(s)$ 的设计可以不考虑外部干扰,对象模型摄动及测量噪声的情况. b) 选择合理的参数 $Q(s)$ 和 $V(s)$.总而言之,就是寻找一个 $Q(s)$ 和 $V(s)$ 保证假设2和假设3成立.为了获得更好的鲁棒性能, $Q(s)$ 和 $V(s)$ 还要考虑外部干扰和测量噪声各自所处的频段和控制系统性能要求.参数 $Q(s)$ 的一个实现表达式为

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n}. \quad (16)$$

其中时间常数 τ 取决于低频段 $(0, \omega_1)$ 的范围.

$$K_0(s) = \frac{0.004s^3 + 1.93511399136s^2 + 34.264533s + 153.72841992}{-0.00638928s^4 - 3.1112876214s^3 - 65.013573s^2 - 476.0994732s - 175.5918398}. \quad (19)$$

对于直流电机调速系统模型,参考输入信号 $r = 20 \text{ V}$ 为无频率变化的定值电压信号,负载转矩 T 相当于系统外部扰动,假设负载转矩 T 大小时刻变化但频率变化很慢.设计低频截止频率 $\omega_1 = 0.5 \text{ rad/s}$,参数 $Q(s)$, $V(s)$ 表示如下:

3 仿真举例(Simulation example)

为验证基于改进型DOB控制结构的有效性,以直流电机调速系统模型为对象,利用MATLAB对其进行仿真分析.电机调速系统由他励直流电机^[13]和PWM装置两部分组成.他励直流电机的定子励磁绕组电压保持不变,因此,励磁通保持恒定.通过改变电枢绕组电压 U_a 控制电机转速 ω .电机模型表达式:

$$\omega(s) = \frac{K_b U_a(s)}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + BR_a + K_b^2} - \frac{(L_a s + R_a)T(s)}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + BR_a + K_b^2}. \quad (17)$$

电枢电压 U_a 受PWM装置控制(开关频率50 KHz).不考虑PWM装置输入 U 饱和和对电机转速 ω 的影响.

PWM传递函数:

$$G(s) = \frac{U_a(s)}{U(s)} = \frac{8.284(s - 13.2)}{s + 8.43}. \quad (18)$$

电机调速系统参数:额定电压 $V_r = 90 \text{ V}$,额定电流 $I_{\max} = 10 \text{ A}$,电枢回路电阻 $R_a = 3.72 \Omega$,电枢电感 $L_a = 7.83 \text{ mH}$,转动惯量 $J = 2.72 \times 10^{-3} \text{ kgm}$,电磁系数 $K_b = 0.31 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$,粘滞摩擦系数 $B = 2.59 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$,测速反馈系数 $\alpha = 0.1 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$,额定转速 $\omega_0 = 1500 \text{ r/min}$.

因此,被控对象为存在不稳定零点($s = 13.2$)的非最小相位.在标称被控对象 $P_0(s)$ 下,仅考虑系统输出 y 对参考输入 r 的跟踪性能下设计标称性能控制器 $K_0(s)$:为实现标称系统输出 y 能在经历不到2 s的动态响应后很好的跟踪输入 r 并且无超调及大大减小系统负调输出.对电机调速标称控制系统的传递函数进行极点配置,从而计算标称控制器 $K_0(s)$ 表达式为

$$\begin{cases} Q(s) = \frac{1}{(0.05s + 1)^3}, \\ V(s) = 0.14 \frac{(-2s - 1)^3}{(0.3s + 1)^3}. \end{cases} \quad (20)$$

为了验证基于改进型DOB控制结构增加补偿信号 g 的作用.仿真实验中本文专门比较了目前

的DOB和改进型DOB控制结构抗模型摄动, 外部扰动及测量噪声的鲁棒性。

假定负载扰动 $T = 2 + 0.5 \sin(0.1\pi t)$ N·m, 图6反映在负载扰动下的电机转速 ω 的动态响应过程。点划线表示的基于控制器 $K_0(s)$ 的控制系统受负载扰动影响明显, 系统输出电机转速 ω 下降幅度较大。而目前的DOB控制结构(虚线)和改进型DOB控制结构(实线)均能很好的抑制负载扰动, 基本保证电机转速 ω 在额定值1500 r/min。图7表示实际对象发生模型摄动 $P(s) = P_0(s) + \Delta(s)$, $\Delta(s) = -0.1P_0(s)$ 时, 电机转速的响应曲线。从图上可看出, 改进型DOB控制系统能很好的保持电机在额定转速运行。减少甚至基本消除模型摄动的影响。

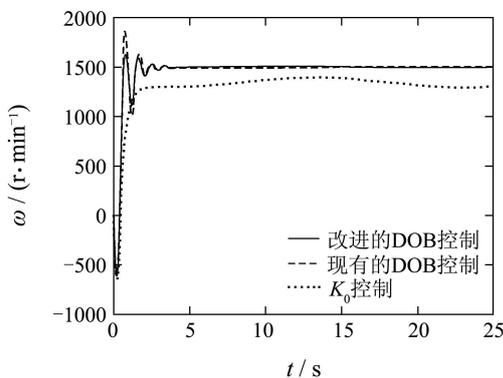


图6 负载扰动下的转速动态响应过程

Fig. 6 The dynamic response process of angular velocity under load disturbance

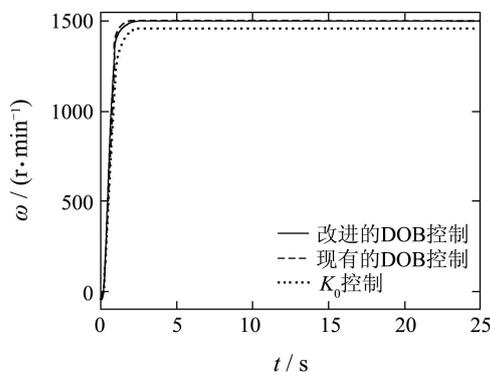


图7 模型摄动下的转速动态响应过程

Fig. 7 The dynamic response process of angular velocity with plant perturbation

图8为只有测量噪声 $n=20 \times 9.55 \sin(52\pi t)$ r/min输入时的转速输出响应。改进型DOB控制结构能更大程度的消除测量噪声对系统输出的影响(实

线), 与现有的DOB比较, 其抑制测量噪声能力约提高了10倍。所以, 实验验证了本文提出的改进型DOB控制结构增加了对系统输出反馈进行补偿的结构, 一个重要作用就是在保持良好的对低频的外部扰动和模型摄动的抑制效果基础上, 提高了抗测量噪声的鲁棒性能。

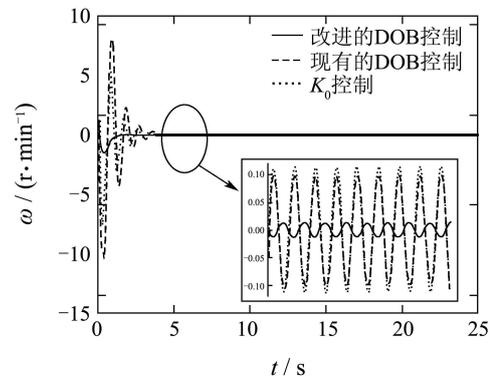


图8 测量噪声下的转速动态响应过程

Fig. 8 The dynamic response process of angular velocity under measurement noise

4 总结(conclusions)

本文提出的新扰动观测控制结构对标称性能控制器输出和系统输出反馈信号进行了动态补偿。该控制结构不但能在低频段很好的消除外部干扰及被控对象模型摄动对闭环系统的输出性能的影响, 更重要的是提高了对高频测量噪声的抑制能。

参考文献(References):

- [1] SHIM H, JO N H, SON Y. A new disturbance observer for non-minimum phase linear systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Washington: IEEE, 2008, 3385 – 3389.
- [2] 贾松涛, 朱煜, 杨开明. 精密工作台扰动观测器的设计[J]. *微细加工技术*, 2007, 25(4): 39 – 42.
(JIA Songtao, ZHU Yu, YANG Kaiming. Design of precision workstations disturbance observer[J]. *Microfabrication Technology*, 2007, 25(4): 39 – 42.)
- [3] WHITE M T, TOMIZUKA M, SMITH C. Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(1): 3 – 11.
- [4] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1999, 7(5): 513 – 526.
- [5] 钟宜生. 基于信号补偿的鲁棒控制方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(4): 536 – 542.
(ZHONG Yisheng. Robust control based on signal compensation[J]. *Journal of Tsinghua University(Science & Technology)*, 2003, 43(4): 536 – 542.)
- [6] 廖武, 钟宜生, 石宗英. 基于信号补偿的机械臂鲁棒控制器设计与实现[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(4): 473 – 476.
(LIAO Wu, ZHONG Yisheng, SHI Zongying. Design and realization of robust manipulator controllers based on signal compensation[J].

- Journal of Tsinghua University(Science & Technology)*, 2006, 46(4): 473 – 476.)
- [7] XIE W, EISAKA T. Two-degree-of-freedom controller design for linear parameter-varying systems[J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(1): 115 – 120.
- [8] EISAKA T, XIE W. Design of add-on robust compensators for any existing controllers[C] // *Proceedings of Annual Conference of the Society of Instrume and Control Engineers of Japan*. Sapporo, Japan: Hokkaido Institute of Technology, 2004, 3: 2291 – 2297.
- [9] SHIM H, JOO Y. State space analysis of disturbance observer and a robust stability condition[C] // *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA, USA: CDC, 2007: 2193 – 2198.
- [10] SON Y, SHIM H, JO N H, et al. Design of disturbance observer for non-minimum phase systems using PID controllers[C] // *Proceedings of Annual Conference of the Society of Instrume and Control Engineers of Japan*. Sapporo, Japan: Hokkaido Institute of Technology, 2007: 196 – 201.
- [11] CHANG J. Applying discrete-time proportional integral observers for state and disturbance estimations[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(5): 814 – 818.
- [12] YANG W C, TOMIZUKA M. Disturbance rejection through an external model for nonminimum phase systems[J]. *ASME Transactions on Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1994, 116(1): 39 – 44.
- [13] CAMPOS D, MARTINEZ S, ZHOU K. Integrated fault-tolerant scheme for a DC speed drive[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(4): 419 – 427.

作者简介:

- 谢 巍 (1974—), 男, 副教授, 主要从事鲁棒自适应控制研究, E-mail: weixie@scut.edu.cn;
- 何忠亮 (1983—), 男, 硕士研究生, 从事鲁棒控制、智能控制研究, E-mail: zhongliang328@163.com.

下 期 要 目

- 基于多目标动态规划的多跑道进港排序 应圣钢, 孙富春, 胡来红, 刘华平, 张学军
- 多层前向小世界神经网络及其函数逼近 李小虎, 杜海峰, 张进华, 王孙安
- 保留精英遗传算法收敛性和收敛速度的鞅方法分析 喻寿益, 邝溯琼
- 交通网络弹复度与易碎度的测算与分析 汪定伟, 叶伟雄
- 基于NN的不确定随机非线性时滞系统自适应有界镇定 余昭旭, 杜红彬
- 带有非线性不确定奇异系统的积分滑模控制 郭壁垒, 苏宏业, 柳向斌, 刘之涛
- 带技术投资的保险公司最优策略 陈树敏, 李仲飞
- 面向TCP友好性的IP网络实时流媒体流预测控制 邹 勇, 赵 海, 魏立峰
- 面向网络诱导时延和数据包丢失补偿的网络化广义预测控制 唐 斌, 章 云, 刘国平, 桂卫华
- 双馈风力发电系统MPPT滑模变结构控制 郑雪梅, 李 琳, 徐殿国
- 输出重定义下的非线性非最小相位系统迭代学习控制 陈冰玉, 孙明轩, 朱 胜
- 不完全量测下随机有偏离散系统的Cramér-Rao下界 刘 锐, 戚国庆, 陈 黎, 盛安冬
- 一类厚尾随机信号平稳性的在线bootstrap监测 陈占寿, 田 铮
- X射线脉冲星导航系统的闭环校正滤波器设计 乔 黎, 刘建业, 郑广楼, 熊 智
- 压电自适应桁架结构智能振动控制 郑 凯, 陈 杰, 杨义勇
- 基于稀疏A*搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划 姚 远, 周兴社, 张凯龙, 董 冬