

同时含有未知输入和测量干扰系统全维和降维观测器设计

吴阳¹ 张建成²

摘要 针对同时含有未知输入和测量干扰的不确定系统研究了全维和降维观测器设计问题. 首先, 利用待定系数法给出了全维观测器的结构和存在条件. 该条件完全由原系统的系统矩阵给出, 易于检验. 对于降维观测器, 为了消除测量干扰的影响, 提出了一种新的测量输出构造方法, 使得新构造的测量输出不再包含干扰信号. 此外, 证明了全维和降维观测器存在条件的内在统一性, 即全维观测器所需要满足的观测器匹配条件和强可检测条件在研究降维观测器所要讨论的新的系统中都可以得到保持. 因而, 在全维观测器存在条件下, 也可以设计一个相应的降维观测器. 最后, 给出了一个数值例子验证所提方法的有效性.

关键词 未知输入观测器, 测量干扰, 全维观测器, 降维观测器

引用格式 吴阳, 张建成. 同时含有未知输入和测量干扰系统全维和降维观测器设计. 自动化学报, 2022, 48(8): 2108–2118

DOI 10.16383/j.aas.c190505

Full- and Reduced-order Observer Design for Systems With Both the Unknown Inputs and Measurement Disturbances

WU Yang¹ ZHANG Jian-Cheng²

Abstract The present paper is concerned with the full-order and reduced-order observer designs for uncertain systems with unknown inputs and measurement disturbances. Firstly, the structure and existence conditions of the full-order observer are given by the undetermined coefficient method. This condition is completely given by the system matrices of the original system and is easy to test. For the reduced-order observer, in order to eliminate the influence of measurement disturbances, a new measurement output construction method is proposed in which the newly constructed measurement output no longer contains disturbance signals. In addition, the consistency of the existence conditions between the full-order and the reduced-order observers is proved. That is, the observer matching condition and strong detectable condition that the full-order observer needs to satisfy can be maintained in the new system to be discussed in the reduced-order observer design. Therefore, under the existence condition of the full-order observer, we can also design a corresponding reduced-order observer. Finally, a numerical example is given to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words Unknown input observer, measurement disturbance, full-order observer, reduced-order observer

Citation Wu Yang, Zhang Jian-Cheng. Full- and reduced-order observer design for systems with both the unknown inputs and measurement disturbances. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(8): 2108–2118

在原控制系统存在未知输入信号条件下, 基于原系统的结构并利用其已知输入和可测输出构造出一个新的系统, 以此达到对原系统状态和未知输入估计的目的, 这样的新系统就称为原系统的一个

未知输入观测器 (Unknown input observer, UIO)^[1-4]. 未知输入观测器在工程中有着广泛的应用背景. 例如, 在机械工具的应用中, 工具施加的切割力作为系统的输入很难测量, 或者是即便可测但是测量的代价太高. 如果把切割力作为机械工具系统的未知输入, 就可以构建 UIO 将系统状态和该未知输入同时估计出来^[5]. 事实上, 控制系统的执行器故障, 外部干扰以及在基于混沌同步的保密通信的信号接收端所需要还原的未知信号等都可以看作系统的未知输入^[6-10]. 因此, UIO 技术在故障检测和重构, 基于观测器的鲁棒控制以及保密通信等方面发挥着重要作用^[11-12]. 几十年来, 一直是控制理论和工程学者研究的热点问题^[12-18].

需要指出的是, 经典的 UIO 技术主要针对不含

收稿日期 2019-07-02 录用日期 2019-10-21

Manuscript received July 2, 2019; accepted October 21, 2019

国家自然科学基金 (61803181), 中国博士后科学基金 (2019M651695), 江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目基金 (苏教师函 [2021] 11) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61803181), China Postdoctoral Science Foundation (2019M651695), and Outstanding Young Backbone Teacher Project of Jiangsu University “Qinglan Project” (Su Teacher [2021] No. 11)

本文责任编辑 张卫东

Recommended by Associate Editor ZHANG Wei-Dong

1. 无锡太湖学院智能装备工程学院 无锡 214064 2. 江南大学理学院 无锡 214122

1. School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi 214064 2. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122

测量干扰的系统. 诚然, 一旦测量输出受到不确定干扰的影响, 其观测器设计会变得异常困难. 然而, 对于许多实际系统来说, 输出通道中又往往不可避免地受到传感器故障, 测量噪声等不确定干扰信号的影响. 因此, 对同时含有未知输入和测量干扰系统研究如何消除输出通道中的不确定干扰并进而设计观测器具有重要意义, 并已经受到众多学者们的关注^[19-23]. 例如, Dimassi 等^[19] 针对同时含有未知输入和测量噪声的系统研究了自适应滑模观测器的设计问题. Yang 等^[20] 利用滑模微分器技术解决了观测器匹配条件不满足时的观测器设计问题. Li 等^[23] 基于 H_∞ 理论讨论了未知输入和测量噪声同时重构问题. 注意到, 上述针对同时含有未知输入和测量干扰系统观测器设计问题的研究中大部分文献都采用经典的描述系统方法来消除测量干扰^[21]. 该方法的思路是通过增维的思想将原系统状态和测量干扰写成一个新的状态向量. 这样以来, 原来的一般系统就可以写成一个描述系统, 而基于新的状态向量其输出方程在形式上已经不再包含干扰. 进而, 可针对该描述系统进行观测器设计. 该方法的优点是思路简单且在估计状态的同时可以将测量干扰也估计出来. 但是该方法在将一般系统写成描述系统的同时一方面会增加系统维数, 进而增加系统的复杂性, 另一方面还可能会改变系统的干扰解耦条件. 此外, 基于该方法, 系统干扰解耦条件只能基于描述系统的参数矩阵给出而不能基于原系统的参数矩阵给出, 这也会给观测器设计条件的验证带来一定的困难.

另一方面, 相比于全维观测器, 降维观测器由于只需要估计系统的部分状态, 因而可以具有较低的维数. 这意味着, 在工程中只需要使用较少的积分器就可以将全部的状态估计出来, 不但可以节约硬件成本, 还可以在很大程度上降低系统的复杂性. 然而, 对于同时含有未知输入和测量干扰的系统, 由于测量干扰的存在, 经典的降维观测器设计变得极其困难. 这是因为经典的降维观测器设计中一般包含两个步骤: 1) 利用状态变换将部分状态信息从测量输出中提前分离出来; 2) 利用测量输出构造动态观测器将剩余的状态估计出来. 因此, 如果测量输出中包含有未知的干扰信号, 经典的降维观测器设计方法中的步骤 1) 和步骤 2) 都将无法实施, 也就无法设计降维观测器. 因此, 找到一种在不增加系统状态维数和设计保守性的前提下同时能够消除测量干扰的降维观测器设计方法很有意义.

基于以上观察, 本文针对同时含有未知输入和

测量干扰的系统全维和降维观测器设计问题展开较为系统的研究. 本文的主要贡献和创新点体现在: 1) 利用待定系数法给出并证明了全维观测器结构和存在条件. 该条件完全由原系统的参数矩阵表示, 易于验证. 其中, 对存在条件的分析和证明是本文难点所在. 2) 为消除测量干扰对降维观测器设计的影响, 提出了构造新的测量输出的思路, 使得新的测量输出不再包含干扰信号. 与经典的描述系统方法相比, 该方法不需要增加系统状态的维数. 3) 证明了全维和降维观测器存在条件的内在统一性, 即全维观测器设计所需要满足的观测器匹配条件和强可检测条件在研究降维观测器设计时所讨论的新的系统中都可以得到保持. 因而, 只要全维观测器存在, 降维观测器也存在.

本文内容安排如下: 第 1 节是问题描述和主要结论. 第 2 节给出仿真算例来验证方法的有效性. 最后在第 3 节给出结论.

1 问题描述与主要结论

1.1 问题描述

考虑一类同时具有未知输入和测量干扰的不确定系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\omega(t) \\ y(t) = Cx(t) + F\eta(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$, $u \in \mathbf{R}^m$, $y \in \mathbf{R}^p$, $\omega \in \mathbf{R}^q$, $\eta \in \mathbf{R}^r$ 分别为系统的状态, 控制输入, 可测输出, 未知输入和测量干扰向量. A, B, D, C, F 分别为已知的常数矩阵. 不失一般性, 假设 $n > p \geq q + r$ 且矩阵 D, F 满秩.

本文将讨论系统 (1) 的全维和降维观测器存在条件和设计方法. 在第 1.2 节首先通过对全维观测器设计的分析得出其存在条件. 在第 1.3 节将证明在全维观测器的存在条件下, 也能设计一个相应的降维观测器.

1.2 全维观测器

本节来讨论全维观测器的设计. 构造具有如下形式的全维观测器

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + Gu(t) + Hy(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Ey(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $z(t)$ 为观测器状态, \hat{x} 为 x 的估计. N, G, H 和 E 为待定的常数矩阵. 令 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 为状态估计误差, 则有

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - z(t) - Ey(t) = \\ & (I_n - EC)x(t) - z(t) - EF\eta(t) \end{aligned}$$

其中, I_n 表示 n 维的单位矩阵. 计算 $e(t)$ 的动态方程可得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (I_n - EC)(Ax(t) + Bu(t) + D\omega(t)) - \\ & Nz(t) - Gu(t) - Hy(t) - EF\dot{\eta}(t) = \\ & (I_n - EC)Ax(t) + (I_n - EC)Bu(t) + \\ & (I_n - EC)D\omega(t) - N(\hat{x}(t) - Ey(t)) - \\ & Gu(t) - Hy(t) - EF\dot{\eta}(t) = \\ & Ne(t) + [(I_n - EC)B - G]u(t) + \\ & [(I_n - EC)A + (NE - H)C - N]x(t) + \\ & (I_n - EC)D\omega(t) + (NE - H)F\eta(t) - \\ & EF\dot{\eta}(t) \end{aligned} \tag{3}$$

因此, 若要 $e(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, 须有

$$N = (I_n - EC)A + (NE - H)C \tag{4}$$

$$G = (I_n - EC)B \tag{5}$$

$$KF = 0 \tag{6}$$

$$(I_n - EC)D = 0 \tag{7}$$

$$EF = 0 \tag{8}$$

$$K = NE - H \tag{9}$$

且矩阵 N 为 Hurwitz 稳定阵.

显然, 若先能确定 E, K , 那么根据矩阵方程 (4) ~ (9), 我们还能确定矩阵 H, G 和 N . 下面, 给出能保证式 (4) ~ (9) 成立和矩阵 N 可稳的条件以及相应的引理.

假设 1. 系统 (1) 的系数矩阵满足观测器匹配条件, 即

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix} = \text{rank}(D) + 2 \times \text{rank}(F) \tag{10}$$

引理 1. 假设 1 成立, 当且仅当存在矩阵 K 和 E 使得式 (6) ~ (8) 成立.

证明. 矩阵方程 (6) ~ (8) 可重写为

$$[K \ E] \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix} = [D \ 0 \ 0] \tag{11}$$

因此, 存在 K 和 E 使得式 (11) 成立的条件是

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \\ D & 0 & 0 \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix}. \tag{12}$$

而

$$\begin{aligned} \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \\ D & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_p & 0 & 0 \\ 0 & I_p & -C \\ 0 & 0 & I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \\ D & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ 0 & 0 & F \\ D & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank}(D) + 2\text{rank}(F) & \tag{13} \end{aligned}$$

根据式 (12) 和式 (13) 可直接得出引理的结论. \square
为了保证矩阵 N 可稳, 给出假设 2 和相应的结论引理 2.

假设 2. 系统 (1) 的系统矩阵满足强可检测条件, 即对于所有具有非负实部的复数 s 都有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ C & 0 & F \end{bmatrix} = n + \text{rank}(D) + \text{rank}(F)$$

引理 2. 系统 (1) 满足强可检测条件, 则存在矩阵 K 和 E 使得矩阵 N 为 Hurwitz 稳定.

证明. 注意到

$$N = (I_n - EC)A + KC = A - [K \ E] \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中, 矩阵 K 和 E 满足式 (11). 记

$$\begin{aligned} \Sigma &= \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix} \\ \Upsilon &= [D \ 0 \ 0] \end{aligned}$$

则由式 (11) 得矩阵 K 和 E 为

$$[K \ E] = \Upsilon \Sigma^\dagger - Z(I_{2p} - \Sigma \Sigma^\dagger) \tag{15}$$

其中, Σ^\dagger 为矩阵 Σ 的广义逆矩阵, 满足 $\Sigma \Sigma^\dagger \Sigma = \Sigma$, Z 为具有适当维数的任意矩阵. 将式 (15) 代入到式 (14), 得

$$\begin{aligned} N &= A - [\Upsilon \Sigma^\dagger - Z(I_{2p} - \Sigma \Sigma^\dagger)] \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} = \\ A - \Upsilon \Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} - Z(I_{2p} - \Sigma \Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} &= \\ \Pi_1 - Z\Pi_2 & \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= A - \Upsilon\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \\ \Pi_2 &= (I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix}\end{aligned}$$

为常数矩阵. 因此, 为了证明 N 可稳定, 只需要证明 (Π_1, Π_2) 可检测.

事实上, 对于任意具有非负实部的复数 s , 都有

$$\begin{aligned}\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & \Upsilon \\ \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & \Sigma \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 & 0 \\ C & 0 & F & 0 \\ -CA & CD & 0 & F \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 \\ 0 & I_p & 0 \\ -C & 0 & I_p \end{bmatrix} \times \right. & \\ \left. \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 & 0 \\ C & 0 & F & 0 \\ -CA & CD & 0 & F \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 & 0 \\ C & 0 & F & 0 \\ -sC & 0 & 0 & F \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 \\ 0 & I_p & 0 \\ 0 & sC & I_p \end{bmatrix} \times \right. & \\ \left. \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 & 0 \\ C & 0 & F & 0 \\ -sC & 0 & 0 & F \end{bmatrix} \times \right. & \\ \left. \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & -sI_r & I_r \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 & 0 \\ C & 0 & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F \end{bmatrix} &= \\ \text{rank}(F) + \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ C & 0 & F \end{bmatrix} & \quad (16)\end{aligned}$$

另一方面,

$$\begin{aligned}\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & \Upsilon \\ \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & \Sigma \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_n & -\Upsilon\Sigma^\dagger \\ 0 & I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger \\ 0 & \Sigma\Sigma^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} sI_n - A & \Upsilon \\ \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & \Sigma \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - \left(A - \Upsilon\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \right) & 0 \\ (I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & 0 \\ \Sigma\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & \Sigma \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - \left(A - \Upsilon\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \right) & 0 \\ (I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & 0 \\ \Sigma\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} & \Sigma \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - \left(A - \Upsilon\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \right) \\ (I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} \end{bmatrix} + & \\ \text{rank}(\Sigma) & \quad (17)\end{aligned}$$

由式 (16) 和式 (17) 并结合假设 1 知, 对于所有具有非负实部的复数 s 都有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - \left(A - \Upsilon\Sigma^\dagger \begin{bmatrix} -C \\ CA \end{bmatrix} \right) \\ (I_{2p} - \Sigma\Sigma^\dagger) \begin{bmatrix} C \\ -CA \end{bmatrix} \end{bmatrix} = n$$

即 (Π_1, Π_2) 可检测. \square

注 1. 系统 (1) 满足强可检测条件^[4], 即对于任意初值 $x(0)$ 和任意控制输入 $u(t)$ 都有 $y(t) \equiv 0 \Rightarrow x(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$. 该条件能够保证观测器误差系统的稳定性.

由引理 1 和引理 2 可知, 当系统 (1) 满足假设 1 和假设 2 时, 全维观测器 (2) 存在, 由此我们给出定理 1.

定理 1. 基于假设 1 和假设 2, 存在增益矩阵 K, E, G, H 和 Hurwitz 稳定矩阵 N 满足式 (4) ~ (9), 则系统 (2) 为系统 (1) 的一个全维观测器, 且 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t), t \rightarrow \infty$.

证明. 由引理 1 和引理 2 立即可得到本定理的

结论. □

我们将全维观测器的设计步骤总结为算法 1.

算法 1. 全维观测器的设计

步骤 1. 判断系统 (1) 是否同时满足假设 1 和假设 2, 若是, 进入下一步; 否则, 设计失败.

步骤 2. 计算矩阵 Σ, Υ 和 Υ^\dagger , 选取增益矩阵 Z 使得矩阵 N 为 Hurwitz 稳定阵.

步骤 3. 计算矩阵 G, H, E 和 N , 构造全维观测器 (2).

注 2. 在全维观测器设计中, 我们不光要将未知输入 $\omega(t)$ 和测量干扰 $\eta(t)$ 解耦 (即保证式 (5) ~ (8) 成立), 还要保证解耦完成以后误差系统极点的可配置性 (即矩阵 N 为 Hurwitz 稳定). 如何分析得到假设 1 和假设 2, 并证明假设 1 和假设 2 如何保证上述性质是全维观测器设计过程中的难点所在.

注 3. 本小节讨论了全维观测器的设计方法和存在条件. 在下一小节讨论降维观测器设计时将证明在全维观测器存在条件下我们也可以设计一个相应的降维观测器.

1.3 降维观测器

本节讨论系统 (1) 的降维观测器设计. 为了突破测量干扰信号对经典的降维观测器设计方法的限制, 本小节通过构造新的测量输出提出一种新的降维观测器设计方法.

根据矩阵的广义逆理论, 将系统 (1) 的输出方程左右两边同时左乘矩阵 $I_p - FF^-$, 得

$$\bar{y}(t) = \bar{C}x(t) \tag{18}$$

其中, $\bar{y}(t) = (I_p - FF^-)y(t)$ 和 $\bar{C} = (I_p - FF^-)C$, 矩阵 F^- 为矩阵 F 的任意一个满足 $FF^-F = F$ 的广义逆矩阵. 则系统 (1) 可写为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\omega(t) \\ \bar{y}(t) = \bar{C}x(t) \end{cases} \tag{19}$$

注 4. 在系统 (19) 中构造了一个新的输出 (18) 来代替原系统的输出, 以此消除了原系统输出通道中测量干扰的影响. 对于系统 (19), 已经证明只要其满足强可检测条件, 即对于任意具有非负实部的复数 s

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ \bar{C} & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(D) \tag{20}$$

和观测器匹配条件

$$\text{rank}(\bar{C}D) = \text{rank}(D) \tag{21}$$

则不难对其设计一个降维观测器^[1-2, 5]. 因此, 下面将证明在假设 1 和假设 2 成立的条件下, 新系统 (19) 也同时满足式 (20) 和式 (21).

引理 3. 假设 1 成立, 当且仅当 $\text{rank}(\bar{C}D) = \text{rank}(D)$.

证明. 根据假设 1 可知

$$\begin{aligned} \text{rank}(D) + 2\text{rank}(F) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & FF^- \\ 0 & I_p - FF^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ CD & 0 & F \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ FF^- \bar{C}D & 0 & F \\ \bar{C}D & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ FF^- \bar{C}D & 0 & F \\ \bar{C}D & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q & 0 & 0 \\ 0 & I_r & 0 \\ -F^- \bar{C}D & 0 & I_r \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & F & 0 \\ 0 & 0 & F \\ \bar{C}D & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank}(\bar{C}D) + 2\text{rank}(F) & \end{aligned}$$

因此, 有 $\text{rank}(\bar{C}D) = \text{rank}(D)$. □

引理 4. 假设 2 成立, 当且仅当系统 (19) 满足强可检测条件, 即对于任意具有非负实部的复数 s , 都有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ \bar{C} & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(D)$$

证明. 由假设 2 知, 对于任意具有非负实部的复数 s 有

$$\begin{aligned} n + \text{rank}(D) + \text{rank}(F) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ \bar{C} & 0 & F \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & FF^- \\ 0 & I_p - FF^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ \bar{C} & 0 & F \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ FF^- \bar{C} & 0 & F \\ \bar{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank} \left(\begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ FF^- \bar{C} & 0 & F \\ \bar{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 \\ 0 & I_q & 0 \\ -F^- \bar{C} & 0 & I_r \end{bmatrix} \right) &= \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D & 0 \\ 0 & 0 & F \\ \bar{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} &= \\ \text{rank}(F) + \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ \bar{C} & 0 \end{bmatrix} & \end{aligned}$$

这意味着对于任意具有非负实部的复数 s 都有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & D \\ \bar{C} & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(D)$$

□

基于引理 3 和引理 4 的结论可得到引理 5.

引理 5^[9]. 系统 (19) 同时满足强可检测条件和观测器匹配条件, 则存在可逆矩阵 T 和 S , 使得

$$\bar{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = TB = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{D} = TD = \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = S\bar{C}T^{-1} = \begin{bmatrix} I_q & 0 \\ 0 & \bar{C}_{22} \end{bmatrix}$$

其中, $\bar{A}_{11} \in \mathbf{R}^{q \times q}$, $\bar{B}_1 \in \mathbf{R}^{q \times m}$ 且 $(\bar{A}_{22}, \bar{C}_{22})$ 可检测.

证明. 由 $\text{rank}(D) = q$ 知

$$T_0^{-1} = \begin{bmatrix} (D^T D)^{-1} D^T \\ D^\perp \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times n}$$

存在且非奇异, 且 $\bar{C}T_0 = [\bar{C}_1 \quad \bar{C}_2]$, 其中 $\bar{C}_1 \in \mathbf{R}^{p \times q}$, $\bar{C}_2 \in \mathbf{R}^{p \times (n-q)}$, 有

$$\bar{C}D = \bar{C}T_0T_0^{-1}D = [\bar{C}_1 \quad \bar{C}_2] \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{C}_1$$

根据引理 3 可知 \bar{C}_1 为列满秩矩阵, 因此矩阵

$$S = \begin{bmatrix} (\bar{C}_1^T \bar{C}_1)^{-1} \bar{C}_1^T \\ (\bar{C}_1)^\perp \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{p \times p}$$

存在且非奇异, 且有 $S\bar{C}_1 = \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{p \times q}$. 另记

$S\bar{C}_2 = \begin{bmatrix} \bar{C}_{21} \\ \bar{C}_{22} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{p \times (n-q)}$, 其中, $\bar{C}_{21} \in \mathbf{R}^{q \times (n-q)}$, $\bar{C}_{22} \in \mathbf{R}^{(p-q) \times (n-q)}$, 有

$$S\bar{C}T_0 = S[\bar{C}_1 \quad \bar{C}_2] = [S\bar{C}_1 \quad S\bar{C}_2] = \begin{bmatrix} I_q & \bar{C}_{21} \\ 0 & \bar{C}_{22} \end{bmatrix}$$

定义矩阵 $T = \begin{bmatrix} I_q & \bar{C}_{21} \\ 0 & I_{n-q} \end{bmatrix} T_0^{-1}$, 有

$$\bar{C} = S\bar{C}T^{-1} = S\bar{C}T_0 \begin{bmatrix} I_q & -\bar{C}_{21} \\ 0 & I_{n-q} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_q & \bar{C}_{21} \\ 0 & \bar{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q & -\bar{C}_{21} \\ 0 & I_{n-q} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_q & 0 \\ 0 & \bar{C}_{22} \end{bmatrix}$$

且

$$\bar{D} = TD = \begin{bmatrix} I_q & \bar{C}_{21} \\ 0 & I_{n-q} \end{bmatrix} T_0^{-1}D =$$

$$\begin{bmatrix} I_q & \bar{C}_{21} \\ 0 & I_{n-q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

□

基于引理 5, 对系统 (19) 作状态变换 $\bar{x} = Tx$, 得

$$\dot{\bar{x}}_1(t) = \bar{A}_{11}\bar{x}_1(t) + \bar{A}_{12}\bar{x}_2(t) + \bar{B}_1u(t) + \omega(t) \quad (22)$$

$$\dot{\bar{x}}_2(t) = \bar{A}_{21}\bar{x}_1(t) + \bar{A}_{22}\bar{x}_2(t) + \bar{B}_2u(t) \quad (23)$$

$$\bar{y}(t) = S\bar{y}(t) = \begin{bmatrix} \bar{y}_1(t) \\ \bar{y}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1(t) \\ \bar{C}_{22}\bar{x}_2(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

下面给出定理 2.

定理 2. 基于引理 1 和引理 2, 取增益矩阵 L 使得矩阵 $\bar{A}_{22} - L\bar{C}_{22}$ 为 Hurwitz 稳定, 则系统

$$\dot{\hat{x}}_2(t) = \bar{A}_{22}\hat{x}_2(t) + \bar{A}_{21}\bar{y}_1(t) + \bar{B}_2u(t) + L(\bar{y}_2(t) - \bar{C}_{22}\hat{x}) \quad (25)$$

$$\hat{x}(t) = T^{-1} \begin{bmatrix} \bar{y}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

为系统 (1) 的一个降维观测器 (维数 $n-p$) 且 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$, $t \rightarrow \infty$.

证明. 根据状态变换可知状态向量 $x(t) = T^{-1}\bar{x}(t)$. 又 $\bar{x}_1(t) = \bar{y}_1(t)$. 因此, 为了证明 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$, $t \rightarrow \infty$, 只需证明 $\hat{x}_2(t) \rightarrow \bar{x}_2(t)$, $t \rightarrow \infty$.

令 $e_2(t) = \hat{x}_2(t) - \bar{x}_2(t)$ 为观测器误差. 用式 (25) 减去式 (23), 得

$$\dot{e}_2(t) = (\bar{A}_{22} - L\bar{C}_{22})e_2(t)$$

由于矩阵 $\bar{A}_{22} - L\bar{C}_{22}$ 为 Hurwitz 稳定矩阵, 可知 $e_2(t) \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$. □

我们将降维观测器的设计步骤总结为算法 2.

算法 2. 降维观测器的设计.

步骤 1. 判断系统 (1) 是否同时满足假设 1 和假设 2, 若是, 进入下一步; 否则, 设计失败.

步骤 2. 求矩阵 F^- , 并计算 y 和 \bar{C} .

步骤 3. 根据引理 5 求得 \bar{A}_{22} , \bar{A}_{21} , \bar{B}_2 , \bar{C}_{22} 和矩阵 T .

步骤 4. 选取矩阵 L 使得 $\bar{A}_{22} - L\bar{C}_{22}$ 为 Hurwitz 稳定阵, 并构造全维观测器 (25) 和 (26).

注 5. 本小节研究了系统 (1) 的降维观测器设计, 其创新点和难点体现在: 1) 构造了新的不含测量干扰的输出. 并基于该输出实现了观测器的实质性“降维”. 2) 证明了原系统 (1) 满足的观测器匹配条件和强可检测条件在由新的输出构成的新系统 (19) 中都可以得到保持.

注 6. 本文在全维和降维观测器设计中采用干扰解耦的方式来处理未知输入 $\omega(t)$ 和测量干扰 $\eta(t)$. 因此, 只要干扰解耦条件 (观测器匹配条件) (10) 成立, 无论 $\omega(t)$ 和 $\eta(t)$ 为何种类型的干扰, 其影响都可以在观测器中得到完全消除.

注 7. 注意到文献 [20] 和 [23] 也研究了同时含有未知输入和测量干扰系统的观测器设计问题. 文献 [23] 讨论了 H_∞ 观测器. 该观测器存在条件较弱, 但它仅能实现 H_∞ 意义下的状态估计, 并不能实现渐近估计. 文献 [20] 针对该系统提出了一种新的解决方案, 弱化了观测器匹配条件. 但是该方案必须使用测量输出的一阶甚至高阶微分信号, 因此容易受到测量噪声的影响. 而本文提出的方法只需要使用测量输出本身而不必使用其高阶微分信号. 在仿真部分将进一步说明这一点.

2 数值仿真

本节给出一个数值例子, 并用其验证方法的有效性. 考虑系统 (1) 且其系统参数为

$$A = \begin{bmatrix} -6.5140 & 0.9771 & 0.9771 \\ 8.000 & -2.4000 & 0 \\ 8.000 & 0 & -2.4000 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.6250 & 0 \\ 0 & 0.6250 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中, 未知输入 $\omega(t) = 5.2 \sin(3.8t)$, 测量干扰 $\eta(t) = 3.5 \cos(4.7t)$. 由于控制输入 $u(t)$ 为已知的, 它不影响系统的能观性. 因此不妨假设 $u(t) = 0$.

2.1 全维观测器设计

容易验证该系统满足观测器匹配条件 (假设 1) 和强可检测条件 (假设 2), 故根据定理 1 和定理 2, 我们一定可以设计全维和降维观测器实现对系统状态的重构.

首先, 求得矩阵

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Upsilon = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

进而求得矩阵 Π_1 和 Π_2 . 然后, 选取增益矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} -4.5441 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 3.8192 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

使得矩阵 N 的特征值为 $\{-1, -6.125, -2.4\}$. 此时可求得全维观测器的系数矩阵

$$N = \begin{bmatrix} -6.5140 & 5.5212 & 0.9771 \\ 0.0000 & -1.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -1.4192 & -2.4000 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 \\ -0.6250 & 0.6250 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1.9542 & -0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} -0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

为验证该观测器的有效性, 假设系统 (1) 的状态初值为 $x(0) = [-1 \ -2 \ 0]^T$, 观测器初值为 $z(0) = [1 \ 1 \ 2]^T$. 图 1 给出了原系统的状态曲线和观测器估计的状态曲线. 可以看出, 本文设计的全维观测器很好地实现了对原系统状态的渐近估计.

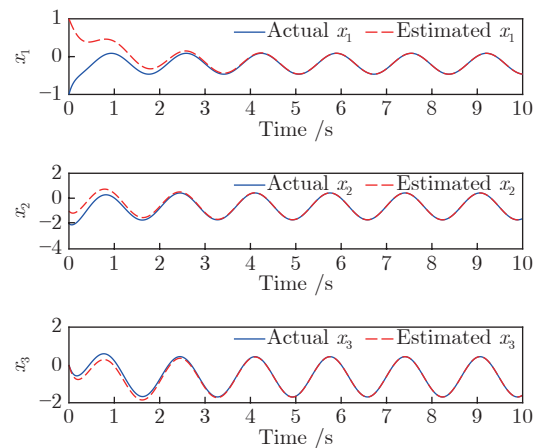


图 1 系统状态及其估计 (全维观测器)
Fig.1 Actual states and their estimations (full-order observer)

2.2 降维观测器设计

求得矩阵的一个广义逆矩阵 $F^- = [0 \ 1]$, 而后构造一个新的测量输出 $\bar{y}(t) = (I_p - FF^-)y(t)$ 及分布矩阵

$$\bar{C} = (I_p - FF^-)C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

容易验证, 在原系统满足观测器匹配条件和强可检测条件下, 新系统 (A, D, \bar{C}) 也满足观测器匹配条件和强可检测条件. 根据引理 5 的算法, 求得状态变换矩阵 $S = I_2$ 和

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 \\ -0.7071 & 0.5000 & -0.5000 \\ -0.7071 & 0.5000 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

并进而求得降维观测器 (24) 和 (25) 的参数矩阵

$$\bar{A} = \left[\begin{array}{c|c} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} -2.4000 & -5.6569 \quad -5.6569 \\ -1.3818 & -3.7661 \quad -2.7479 \\ -1.3818 & -1.3661 \quad -5.1479 \end{array} \right]$$

$$\bar{B} = \left[\begin{array}{c} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0.6250 \quad 0 \\ 0.3125 \quad -0.3125 \\ -0.3125 \quad 0.3125 \end{array} \right]$$

$$\bar{C} = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 0 & \bar{C}_{22} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0 \quad 0 \\ 0 & 0 \quad 0 \end{array} \right]$$

$$\bar{D} = \left[\begin{array}{c} \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0_{2 \times 1} \end{array} \right]$$

此时, 由于 \bar{A}_{22} 已经为 Hurwitz 稳定矩阵, 因此无需再设计增益矩阵 L 使得 $\bar{A}_{22} - L\bar{C}_{22}$ 稳定. 下面根据定理 2 建立降维观测器 (24) 和 (25). 设定该观测器初值为 $\hat{x}(0) = [1 \quad -2]^T$. 图 2 给出了系统 (1) 的状态曲线和由降维观测器 (24) 和 (25) 得到的状态估计曲线. 从图 2 中看到, 利用降维观测器 (24) 和 (25), 同样可以很好地实现对原系统状态的估计. 同时, 为了检验观测器对不同类型干扰的鲁棒性, 假设 $\omega(t)$ 为如图 3 的方波信号, $\eta(t)$ 为如图 4 的锯齿形信号. 图 5 展示了在该组干扰信号下观测器的估计效果. 由此也进一步佐证了本文所提方法对不同类型干扰的鲁棒性.

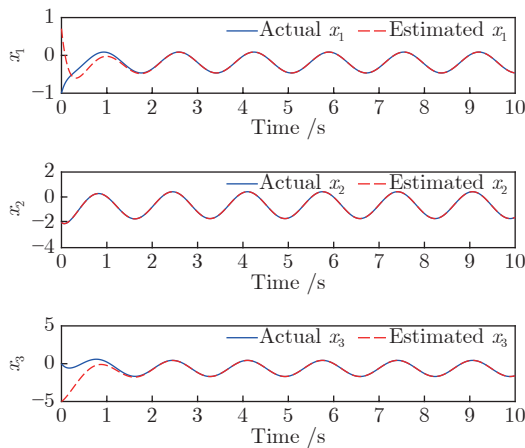


图 2 系统状态及其估计 (降维观测器)
Fig.2 Actual states and their estimations (reduced-order observer)

此外, 为了对比本文方法与文献 [20] 方法的估计效果, 假设测量输出受到如图 6(a), 图 7(a), 图 8(a) 所示的噪声信号的影响. 图 6(b), 图 7(b), 图 8(b) 分别展示了在 3 种不同幅值噪声信号下利用文献 [20] 得到的状态估计, 而图 6(c), 图 7(c), 图 8(c) 为 3 种噪声信号下对应的由本文降维观测器得到的状态估计. 可以发现, 随着随机噪声幅值的增大, 文献 [20]

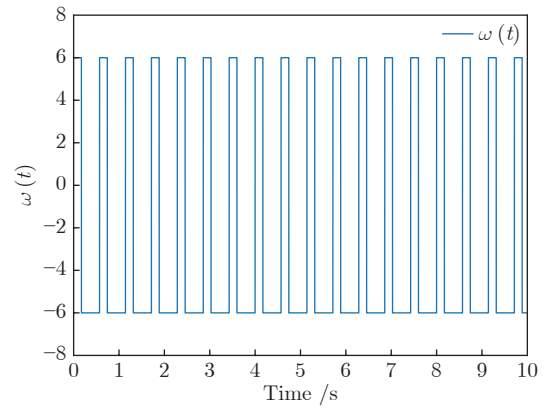


图 3 方波形未知输入信号
Fig.3 Square wave unknown input signal

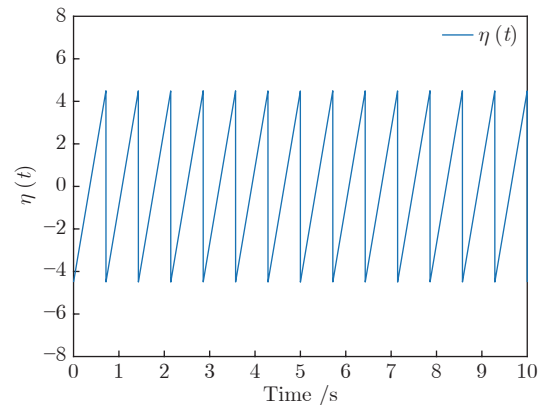


图 4 锯齿形测量干扰信号
Fig.4 Sawtooth measurement disturbance signal

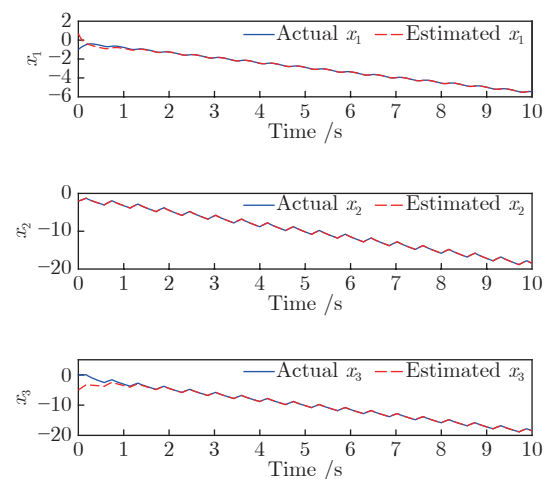


图 5 方波和锯齿干扰信号下的状态估计
Fig.5 State estimations under square wave and sawtooth disturbance signals

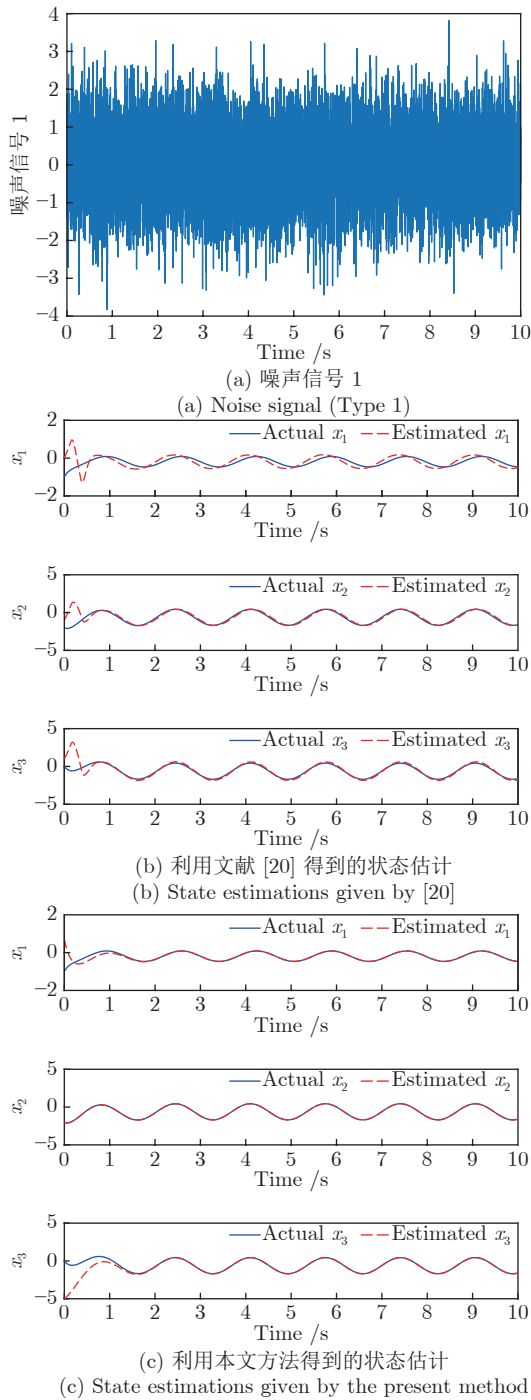


图 6 在受到噪声信号 1 影响下的状态估计
Fig.6 State estimations under the influence of noise signal (Type 1)

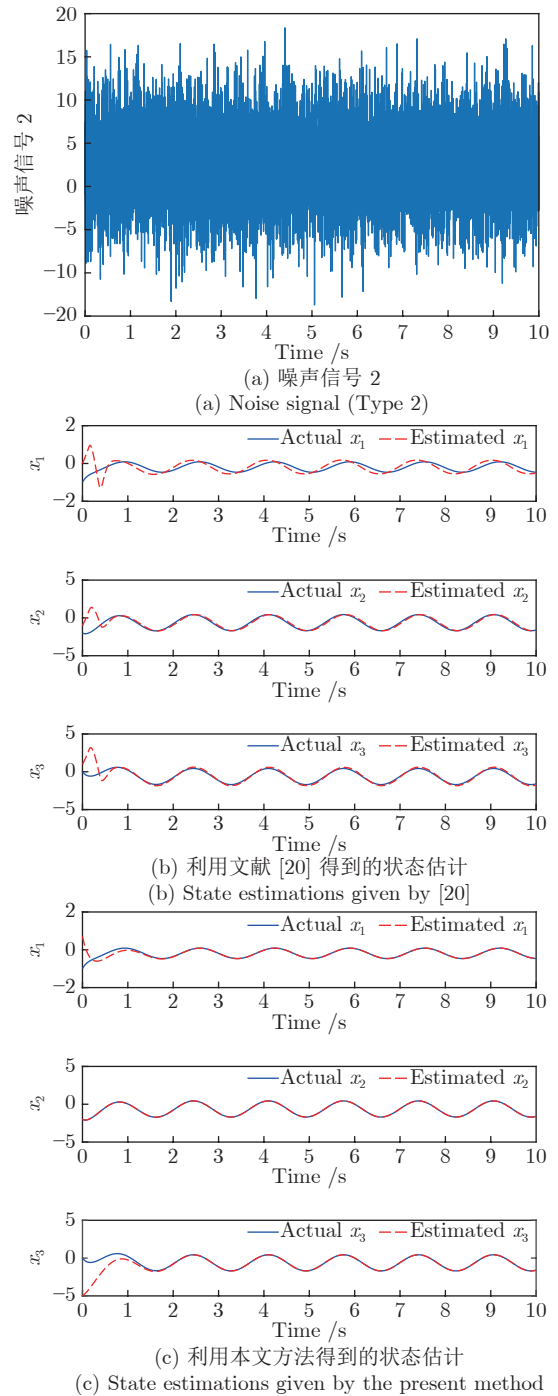


图 7 在受到噪声信号 2 影响下的状态估计
Fig.7 State estimations under the influence of noise signal (Type 2)

的估计效果逐渐下降, 而本文方法始终可以实现对原系统状态的渐近估计.

3 结束语

本文针对同时含有未知输入和测量干扰的系统研究了全维和降维观测器设计问题. 我们给出了全

维观测器的结构并利用待定系数法分析得到了全维观测器的存在条件. 为了消除输出通道中的不确定干扰对降维观测器设计的影响, 本文构造了新的不包含干扰的测量输出. 并且证明了全维观测器的存在条件和降维观测器存在条件内在的统一性. 但该方法要求强可检测条件和观测器匹配条件同时满

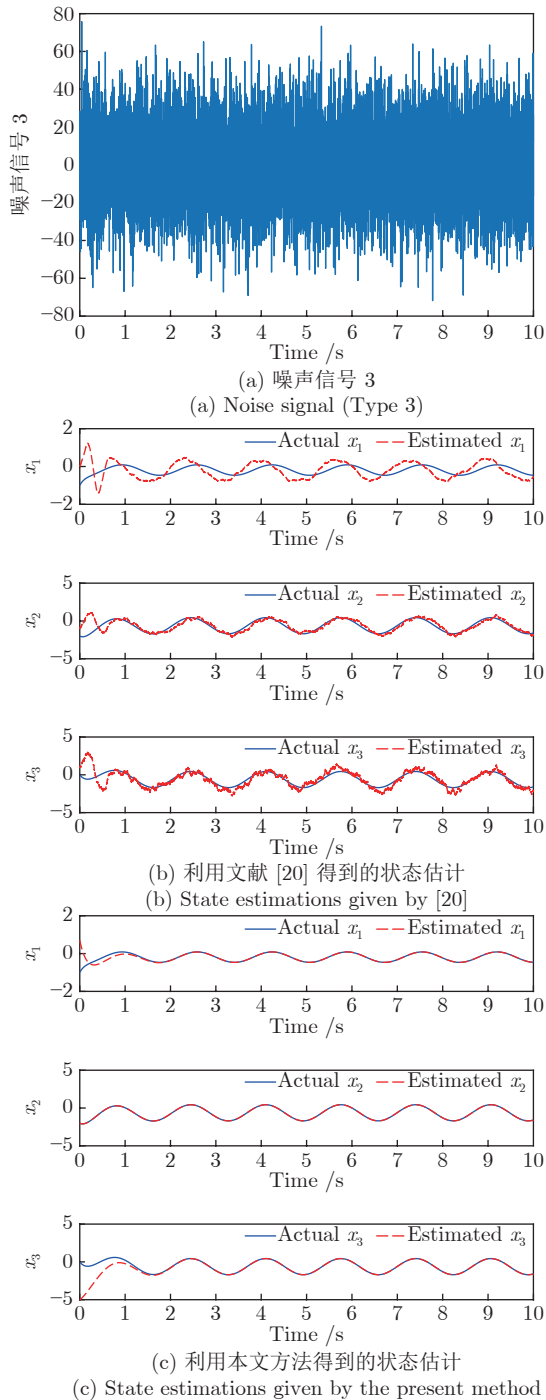


图 8 在受到噪声信号 3 影响下的状态估计

Fig.8 State estimations under the influence of noise signal (Type 3)

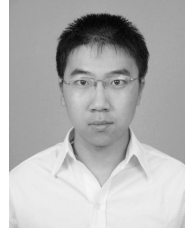
足, 相对苛刻. 如何弱化强可检测条件和观测器匹配条件来设计观测器是我们下一步要讨论的课题.

References

- Zhang J C, Zhu F L. On the observer matching condition and unknown input observer design based on the system left-invertibility concept. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, **40**(9): 2887-2900
- Zhang J C, Zhao X D, Zhu F L, Karimi H R. Reduced-order observer design for switched descriptor systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, **65**(1): 287-294
- Zhang J C, Chadli M, Wang Y. A fixed-time observer for discrete-time singular systems with unknown inputs. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, **363**: 124586
- Zhang J C, Chadli M, Zhu F L. Finite-time observer design for singular systems subject to unknown inputs. *IET Control Theory and Applications*, 2019, **13**(14): 2289-2299
- Corless M, Tu J. State and input estimation for a class of uncertain systems. *Automatica*, 1998, **34**(6): 757-764
- Tang Wen-Tao, Wang Zhen-Hua, Wang Ye, Shen Yi. Fault diagnosis for uncertain systems based on unknown input set-membership filters. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1717-1724 (汤文涛, 王振华, 王烨, 沈毅. 基于未知输入集员滤波器的不确定系统故障诊断. *自动化学报*, 2018, **44**(9): 1717-1724)
- Wen Chuan-Bo, Deng Lu, Wu Lan. Fault estimation approaches with sliding mode observer and descriptor observer. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1698-1705 (文传博, 邓露, 吴兰. 基于滑模观测器和广义观测器的故障估计方法. *自动化学报*, 2018, **44**(9): 1698-1705)
- Li X H, Zhu F L, Chakrabarty A, Zak S H. Nonfragile fault-tolerant fuzzy observer-based controller design for nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2016, **24**(6): 1679-1689
- Zhu F L, Xu J, Chen M Y. The combination of high-gain sliding mode observers used as receivers in secure communication. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2012, **59**(11): 2702-2712
- Hu Zhi-Kun, Sun Yan, Jiang Bin, He Jing, Zhang Chang-Fan. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1225-1230 (胡志坤, 孙岩, 姜斌, 何静, 张昌凡. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法. *自动化学报*, 2013, **39**(8): 1225-1230)
- Zhang J C, Zhu F L. Observer-based output consensus of a class of heterogeneous multi-agent systems with unmatched disturbances. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2018, **56**: 240-251
- Zhang J C, Zhu F L, Karimi H R, Wang F N. Observer-based sliding mode control for T-S fuzzy descriptor systems with time-delay. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, **27**(10): 2009-2023
- Luenberger D G. Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 1964, **8**(2): 74-80
- Kudva P, Viswanadham N, Ramakrishna A. Observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, **25**(1): 113-115
- Zhu F L. State estimation and unknown input reconstruction via both reduced-order and high-order sliding mode observers. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(1): 296-302
- Zhang J C, Zhu F L, Zhao X D, Wang F N. Robust impulsive reset observers of a class of switched nonlinear systems with unknown inputs. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, **354**(7): 2924-2943
- Zhu Fang-Lai, Cai Ming, Guo Sheng-Hui. Discussions on existences of observers and reduced-order observer design for discrete-time switched systems. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(12): 2091-2099

(朱芳来, 蔡明, 郭胜辉. 离散切换系统观测器存在性讨论及降维观测器设计. *自动化学报*, 2017, **43**(12): 2091–2099)

- 18 Han Dong, Zhu Fang-Lai. Simultaneous estimation of states and unknown inputs for linear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(6): 932–943
(韩冬, 朱芳来. 基于辅助输出的线性系统状态和未知输入同时估计方法. *自动化学报*, 2012, **38**(6): 932–943)
- 19 Dimassi H, Loria A, Belghith S. Continuously-implemented sliding-mode adaptive unknown-input observers under noisy measurements. *Systems and Control Letters*, 2012, **61**(12): 1194–1202
- 20 Yang J Q, Zhu F L, Sun X J. State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2013, **27**(10): 846–858
- 21 Gao Z W, Ding S X. State and disturbance estimator for time-delay systems with application to fault estimation and signal compensation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, **55**(12): 5541–5551
- 22 Mondal S, Chakraborty G, Bhattacharyy K. LMI approach to robust unknown input observer design for continuous systems with noise and uncertainties. *International Journal of Control, Automation and systems*, 2010, **8**(2): 210–219
- 23 Li X H, Zhu F L, Zhang J. State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on adaptive H_∞ observer. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2016, **14**(3): 647–654



吴 阳 无锡太湖学院智能装备工程学院副教授. 主要研究方向为故障检测与估计, 智能控制, 系统优化.

E-mail: wuy1@wxu.edu.cn

(WU Yang Associate professor at the School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu Uni-

versity. His research interest covers fault detection and estimation, intelligent control, and system optimization.)



张建成 江南大学理学院副教授. 2017 年获得同济大学控制科学与工程系博士学位. 主要研究方向为有限时间观测器设计, 故障检测与估计, 滑模控制. 本文通信作者.

E-mail: jcz@jiangnan.edu.cn

(ZHANG Jian-Cheng Associate professor at the School of Science, Jiangnan University. He received his Ph.D. degree in control theory and control engineering from Tongji University in 2017. His research interest covers finite-time observer design, fault detection and fault estimation, and sliding mode control. Corresponding author of this paper.)