

文章编号: 1001-0920(2016)10-1867-06

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.1116

基于PI观测器的奇异摄动系统故障诊断和最优容错控制

刘 蕾, 闫晓峰, 韩存武, 雷振伍

(北方工业大学 现场总线及自动化北京市重点实验室, 北京 100144)

摘要: 针对线性奇异摄动系统, 提出一种基于PI(proportional integral)观测器的故障诊断和最优容错控制方法. 基于奇异摄动系统相关理论和矩阵变换技术, 给出PI全维观测器存在的条件, 该观测器可以观测系统的快慢状态和故障系统的状态. 在估测到系统状态的基础上进一步考虑最优性, 应用最优控制理论, 设计状态反馈控制器, 提出基于PI观测器的故障诊断器和最优容错控制器的设计方法. 最后的数值算例验证了所提出方法的可行性和正确性.

关键词: 奇异摄动系统; PI观测器; 最优控制; 故障诊断; 容错控制; 状态反馈

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault diagnosis and optimal fault-tolerance control of singularly perturbed system based on PI observer

LIU Lei, YAN Xiao-feng, HAN Cun-wu, LEI Zhen-wu

(Beijing Key Laboratory of Fieldbus Technology and Automation, North China University of Technology, Beijing 100114, China. Correspondent: LIU Lei, E-mail: liulei_sophia@163.com)

Abstract: A fault diagnosis method and an optimal fault tolerant control method for singularly perturbed systems based on proportional integral(PI) observer are proposed. Firstly, a condition for the existence of the PI observer is given in light of the singularly perturbed system theory and the matrix transformation technique. This observer can detect the fast-slow state and the state of fault system as well. Moreover, a state feedback controller is designed by using the optimal control theory. And the fault diagnosis method and the optimal fault tolerant control method can be obtained based on the PI observer. Finally, two numerical examples are used to illustrate the effectiveness and correctness of the proposed approach.

Keywords: singularly perturbed systems; PI observer; optimal control; fault diagnosis; fault tolerant control; state feedback

0 引言

在实际的工程领域中常常遇到一类具有不同时间尺度的动力系统, 将这类具有多时标特性系统的控制问题归结到奇异摄动系统^[1]的框架下研究是控制理论的一项重要课题. 奇异摄动系统经过半个多世纪的发展, 其具有的本质特性已得到越来越深刻的揭示, 与正常系统、广义系统相互对应, 既存在内在联系又有着本质区别. 联系在于: 当小参数 $\varepsilon = 0$ 时, 系统称为广义系统, 因此有些文献也将 $\varepsilon = 0$ 时的系统称为奇异摄动系统的极限形式^[2]. 当小参数 $\varepsilon \geq 1$ 时, 经矩阵变换可转化为正常的线性系统. 如果从矩阵 E_ε 的广泛取值来考虑, 奇异摄动系统是正常系统与广义系统的推广. 由于正常系统、广义系统的研究基本成熟, 有一套较为完善的理论体系, 所以为了与之区别,

习惯上以矩阵 E_ε 含有小参数作为奇异摄动系统的明显标志, 以往一些结论推广到奇异摄动系统上来, 研究的难点主要在于小参数的处理上, 从而使奇异摄动系统理论成为一个独立的研究分支^[3]. 目前的研究主要是围绕稳定性^[4]、正实性^[5]、鲁棒性^[6]、最优性^[7]等, 而对于故障诊断的研究还不多见, 最新的有文献^[8]研究了带有未知扰动的奇异摄动系统故障诊断问题, 将故障诊断问题转化为标准的 H_∞ 控制问题.

考虑到实际系统一旦发生事故便有可能造成人员和财产的巨大损失, 故障诊断与容错控制的研究显得尤为重要^[9]. 文献^[10]介绍了具有单一开关的DC-DC变换器在开关故障下的容错控制, 可以检测切换故障类型, 并由现场可编程门阵列目标故障诊断和重构策略, 实现实时处理. 基于观测器的故障诊断方法

收稿日期: 2015-09-08; 修回日期: 2016-01-26.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61473002, 61573024); 北京市自然科学基金项目(4154068, 4142014).

作者简介: 刘蕾(1984—), 女, 讲师, 博士, 从事广义系统、最优控制的研究; 韩存武(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制、优化算法等研究.

在故障诊断的研究中具有不可替代的重要性. 对于奇异摄动系统的观测器设计已有一些结论. 文献[11]研究了奇异摄动系统非线性观测器的设计, 采用降阶理论分别对快-慢系统进行观测器的设计; 文献[12]研究了具有未知干扰的矩形广义系统 PI (proportional integral) 观测器的设计, 主要应用矩阵变换技术, 得到的观测器效果较好且设计参数较为容易求取. 故障诊断系统的设计采用了大量控制理论的经典方法, 特别是当故障诊断系统的设计指标转化为常见的 H_∞ 和 H_2 性能指标后, 故障诊断系统甚至可以和反馈控制器同时进行设计^[13], 这也是本文的设计思路: 结合观测器和状态反馈, 研究奇异摄动系统的故障诊断和最优容错控制.

本文针对一类线性奇异摄动系统, 提出一种基于 PI 观测器的故障诊断和最优容错控制方法. 首先将原系统和故障系统联立构成增广系统, 基于奇异摄动系统相关理论和矩阵变换技术, 给出 PI 全维观测器存在的条件, 该观测器可以观测系统的快慢状态和故障系统的状态. 在估测到系统状态的基础上进一步考虑最优性, 设计了状态反馈控制器, 使得整个闭环系统不仅是渐近稳定的, 并且使得给定线性二次指标达到最小值. 最后通过数值仿真算例验证了所提出方法的可行性和正确性.

1 问题描述

考虑如下受传感器和执行器故障影响的线性奇异摄动系统:

$$\begin{cases} E_\varepsilon \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_1 f(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_2 f(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\varepsilon > 0$ 为摄动参数, 且 $E_\varepsilon = \begin{bmatrix} I_{n_1} & 0 \\ 0 & \varepsilon I_{n_2} \end{bmatrix}$; $x(t) \in R^n$ 为状态变量, 包括 n_1 维的慢变量和 n_2 维的快变量, $n_1 + n_2 = n$; $u(t) \in R^m$ 为系统输入; $y(t) \in R^p$ 为系统输出; $f(t) \in R^q$ 为故障; A, B, C, D_1, D_2 为具有适当维数的系数矩阵.

故障信号 $f(t)$ 包含有传感器故障 $f_a(t)$ 和执行器故障 $f_s(t)$, 即

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix}.$$

假设故障信号可以通过动态系统描述, 具有如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}(t) = G\varphi(t), \\ f(t) = F\varphi(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\varphi(t) \in R^{(n_a+n_s)}$ 为故障系统的状态变量, 且

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_a(t) \\ \varphi_s(t) \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G_a & 0 \\ 0 & G_s \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & F_s \end{bmatrix}.$$

将系统 1 与故障系统 2 联立, 得到增广系统

$$\begin{cases} \bar{E}_\varepsilon \dot{\psi} = \bar{A}\psi + \bar{B}u, \\ y = \bar{C}\psi(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\bar{E}_\varepsilon = \begin{bmatrix} E_\varepsilon & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A & D_1 F \\ 0 & G \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = [C \quad D_2 F], \quad \psi = [x^T(t) \quad \varphi^T(t)]^T.$$

定义 1^[1] 如果系统 (1) 在 $0 < \varepsilon \ll 1$ 时, 快子系统和慢子系统都是能控能观的, 则称系统 (1) 是强能控、强能观的.

采用广义系统的相关引理^[4], 得到奇异摄动系统的结论.

引理 1 系统 (1) 是正则无脉冲的, 当且仅当

$$\text{rank} \begin{bmatrix} 0 & E_\varepsilon \\ E_\varepsilon & A \end{bmatrix} = n + \text{rank} E_\varepsilon.$$

引理 2 系统 (1) 的慢子系统是能观的, 当且仅当

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sE_\varepsilon - A \\ C \end{bmatrix} = n, \quad \forall s \in \mathbf{C}. \quad (4)$$

引理 3 系统 (1) 的快子系统是能观的, 当且仅当

$$\text{rank} \begin{bmatrix} E_\varepsilon \\ C \end{bmatrix} = n. \quad (5)$$

注 1 文献 [14] 给出了广义系统 ($\varepsilon = 0$) 的快、慢系统能控能观的判据, 事实上容易证明, 引理 1~引理 3 对于 $0 < \varepsilon \ll 1$ 的奇异摄动系统仍然适用.

对于系统 (1), 线性二次最优指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [\psi^T(t) Q \psi(t) + u^T(t) R u(t)] dt. \quad (6)$$

其中: $Q \in \mathbf{R}^{(n+a+s \times n+a+s)}$, $R \in \mathbf{R}^{(m \times m)}$ 为权重矩阵, $Q = Q^T \geq 0$, $R = R^T > 0$.

能够使得性能指标 (6) 达到最小值的控制律, 即为最优容错控制律. 此外, 状态变量 $x(t)$ 在实际中可能是不可测的, 因此考虑设计如下状态反馈控制器:

$$u(t) = K \hat{\psi}(t). \quad (7)$$

其中: $\hat{\psi}(t)$ 为 PI 观测器估计值, $K \in \mathbf{R}^{(m \times n)}$ 为控制器增益.

本文的主要任务是针对系统 (1) 和故障系统 (2), 设计 PI 观测器和状态反馈控制器, 使得闭环系统:

- 1) 是渐近稳定的;
- 2) 通过 PI 观测器能够观测到包括故障信号在内的增广系统所有状态;
- 3) 性能指标 (6) 达到最小值.

2 主要结论

2.1 PI 全维状态观测器

针对增广系统 (3), 构造 PI 全维观测器, 通过系统的量测输出 $y(t)$ 估计状态 $\psi(t)$. 设计观测器具有如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + L_1y(t) + L_2\hat{y}(t) + \Gamma u(t), \\ \hat{\psi}(t) = z(t) + T_2y(t), \\ \hat{y}(t) = C\hat{\psi}(t). \end{cases} \quad (8)$$

定理 1 对于系统 (3), 存在 PI 观测器 (8), 使得 $\hat{\psi}$ 趋于 ψ .

证明 由文献 [12] 可知, 如果系统 (1) 是强能观的, 则形如式 (8) 的 PI 观测器存在. 事实上, 由引理 2、引理 3、式 (4) 和 (5) 可知, 系统 (1) 是脉冲能观、R 能检的.

假设 $\hat{\psi}(t)$ 趋于 $\psi(t)$, 矩阵 $N, L_1, L_2, \Gamma, T_1, T_2$ 是能够使得状态估计误差趋于 0 的矩阵. 定义 $e(t) = \psi(t) - \hat{\psi}(t)$. 因为

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \bar{E}_\varepsilon \\ \bar{C} \end{bmatrix} = n + n_a + n_s,$$

所以存在一个行满秩矩阵, 使得

$$[T_1 \ T_2] \begin{bmatrix} \bar{E}_\varepsilon \\ \bar{C} \end{bmatrix} = I_{n+n_a+n_s}.$$

比较原系统 (1) 和观测器 (8) 的状态, 有

$$\begin{aligned} e(t) &= \psi(t) - \hat{\psi}(t) = \\ &= \psi(t) - z - T_2\bar{C}\psi(t) = \\ &= (I - T_2\bar{C})\psi(t) - z(t) = T_1\bar{E}_\varepsilon\psi(t) - z(t). \end{aligned}$$

得到状态估计误差的导数为

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{\psi}(t) - \dot{\hat{\psi}}(t) = \\ &= Ne(t) + X_{11}\psi(t) + (T_1\bar{B} - \Gamma)u(t). \end{aligned}$$

其中

$$X_{11} = T_1\bar{A} - L_1\bar{C} - L_2\bar{C} - NT_1\bar{E}_\varepsilon.$$

令

$$T_1\bar{B} = \Gamma, L_1 = NT_2, N = T_1\bar{A} - L_2\bar{C}, \quad (9)$$

得到自治系统

$$\dot{e}(t) = (T_1\bar{A} - L_2\bar{C})e(t).$$

定义

$$A_{\text{obs}} = T_1\bar{A} - L_2\bar{C}.$$

如果 A_{obs} 是 Hurwitz 的, 则估计误差系统必须为渐

近稳定的. 它可通过增益矩阵 L_2 来镇定, 当且仅当 $(T_1\bar{A}, \bar{C})$ 是可检测的, 即对于任意 $s \in \mathbf{C}^+$, 有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_{n+n_a+n_s} - T_1\bar{A} \\ \bar{C} \end{bmatrix} = n$$

成立. 事实上, 有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} s\bar{E}_\varepsilon - \bar{A} \\ \bar{C} \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} s\bar{E}_\varepsilon - \bar{A} \\ s\bar{C} \\ \bar{C} \end{bmatrix} =$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & 0 \\ 0 & -I_p & sI_p \\ 0 & 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s\bar{E}_\varepsilon - \bar{A} \\ s\bar{C} \\ \bar{C} \end{bmatrix} =$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - T_1\bar{A} \\ 0 \\ \bar{C} \end{bmatrix} = n + n_a + n_s.$$

因此 A_{obs} 是 Hurwitz, 则 $\hat{\psi}(t)$ 趋于 $\psi(t)$. \square

2.2 最优控制律

求解奇异摄动系统 (3) 的最优控制问题. 首先考虑如下性质:

- 1) $(\bar{E}_\varepsilon, \bar{A})$ 是无脉冲的;
- 2) $(\bar{E}_\varepsilon, \bar{A}, \bar{B})$ 是可镇定的, $(\bar{E}_\varepsilon, \bar{A}, \bar{C})$ 是可检测的;
- 3) 系统 (3) 是脉冲能观的.

由前面的分析可知, 式 (1)~(3) 显然成立.

定理 2 对于奇异摄动系统 (3), 性能指标 (6) 达到最小值, 当且仅当最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}\bar{B}^T X\psi(t), \quad (10)$$

其中 X 为如下广义 Riccati 方程的解:

$$\bar{E}_\varepsilon^T X + X^T \bar{E}_\varepsilon \geq 0, \quad (11)$$

$$\bar{A}^T X + X^T \bar{A} + Q - X^T \bar{B} R^{-1} \bar{B}^T = 0. \quad (12)$$

最优性能指标为

$$J = \frac{1}{2}\psi_0 \bar{E}_\varepsilon^T X \psi_0 = \frac{1}{2}\psi_0 \bar{X}^T \bar{E}_\varepsilon \psi_0. \quad (13)$$

证明 必要性. 令

$$L = \frac{1}{2}[\psi^T Q \psi + u^T R u],$$

定义 Hamilton 函数为

$$H(x, u, \lambda) = -L + \lambda^T (\bar{A}\psi + \bar{B}u), \quad (14)$$

应用极大极小值原理, 状态方程为

$$\bar{E}_\varepsilon \dot{\psi} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \bar{A}\psi + \bar{B}u, \quad (15)$$

协状态方程为

$$\bar{E}_\varepsilon^T \dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} = Q\psi - \bar{A}^T \lambda, \quad (16)$$

极值条件为

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 = -Ru + \bar{B}^T \lambda, \quad (17)$$

因此最优控制律为

$$u^*(t) = R^{-1}\bar{B}^T\lambda. \tag{18}$$

因为 $(\bar{E}_\varepsilon, \bar{A}, \bar{C})$ 是可检测的, 所以 $\psi(\infty) \rightarrow 0$, $\lambda(t)$ 与 $\psi(t)$ 有如下关系:

$$\lambda = -X\psi, \tag{19}$$

其中 $X \in \mathbf{R}^n$ 满足式(11). 对式(19)求导, 并左乘 \bar{E}_ε^T , 应用式(18)得到

$$\bar{E}_\varepsilon^T\dot{\lambda} = (-X^T\bar{A} + X^T\bar{B}R^{-1}\bar{B}^TX)\psi. \tag{20}$$

将式(19)代入协状态方程(16), 并与式(20)比较可得

$$[\bar{A}^TX + X^T\bar{A} + Q - X^T\bar{B}R^{-1}\bar{B}^T]\psi = 0.$$

对于任意 $\psi(t)$, 式(12)成立. 由于 $(\bar{E}_\varepsilon, \bar{A} - R^{-1}\bar{B}^TX)$ 稳定无脉冲, 对于广义Riccati方程存在一个容许解 X , 最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}\bar{B}^TX\psi(t).$$

充分性. 根据方程(11)和(12), 定义

$$V(x, t) = \psi^T\bar{E}_\varepsilon^TX\psi,$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(\psi, t) &= (\bar{E}_\varepsilon\dot{\psi})^TX\psi + \psi(t)^TX^T\bar{E}_\varepsilon\dot{\psi} = \\ &= -\psi^T(t)Q\psi - u^TRu + M_1^TRM_1 < 0, \end{aligned}$$

其中 $M_1 = u + R^{-1}\bar{B}^TX\psi$. 由式(6)可知

$$J =$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \int_0^\infty \left[-\frac{d}{dt}[\psi^T\bar{E}_\varepsilon^TX\psi] + M_1^TRM_1 \right] dt = \\ &\frac{1}{2} x_0^T\bar{E}_\varepsilon^TXx_0 + \int_0^\infty M_1^TRM_1 dt, \end{aligned}$$

得到 $u^*(t) = -R^{-1}\bar{B}^TX\psi(t)$ 能够使得性能指标达到最小值, 且 $J^* = \frac{1}{2}\psi_0^T\bar{E}_\varepsilon^TX\psi_0$. \square

经观测器得到的最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}\bar{B}^TX\hat{\psi}(t). \tag{21}$$

3 数值算例

考虑形如式(1)的奇异摄动系统, 参数矩阵如下:

$$E_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.02 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -2 & -2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

故障信号 $f(t)$ 为2维变量, 且 $n_a = 2, n_s = 1$, 其特性可用形如式(2)的动态系统描述, 参数矩阵如下:

$$G = \begin{bmatrix} -0.4 & 0.5 & 0 \\ -0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

构造增广系统, 得到

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -0.4 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{E}_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

依据定理1和式(9), 通过Matlab依次求得

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.7311 & -0.0064 & 0.1612 & 0 & 0.2689 \\ -0.3224 & 0.0322 & -0.8059 & 0 & 0.3224 \\ 0.1612 & -0.0161 & 0.9030 & 0 & -0.1612 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.2689 & 0.0064 & -0.1612 & 0 & 0.7311 \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0.2689 & -0.1612 \\ 0.3224 & 0.8059 \\ -0.1612 & 0.0970 \\ 0 & 0 \\ -0.2689 & 0.1612 \end{bmatrix},$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} -1.6322 & -1.0818 \\ 0.3136 & -0.5434 \\ -0.2052 & -0.1992 \\ 0.0161 & -0.0097 \\ -0.1737 & -0.4330 \end{bmatrix},$$

$$N =$$

$$\begin{bmatrix} -2.4687 & -2.0623 & 0.6538 & 0.0806 & 0.7376 \\ 0.6770 & -0.3553 & -0.9355 & -0.4030 & -0.3546 \\ -0.3385 & -0.3224 & -0.2322 & 0.4515 & 0.1773 \\ 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 \\ -0.5313 & -0.5377 & 0.3462 & -0.0806 & -0.7376 \end{bmatrix}.$$

取初始条件为 $\psi_0 = [1 \ 1.5 \ 1 \ 0 \ 1]^T$.

情况1 选取 $L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.

由定理2, 得到系统的最优反馈控制律为

$$u^*(t) = -[0.0837 \ 0.8157 \ 0.6765 \ 0.0674 \ -0.3132]\hat{\psi}(t),$$

线性二次最优指标 $J = 4.3086$.

图 1 和图 2 为增广系统状态和观测器估计的状态比较.

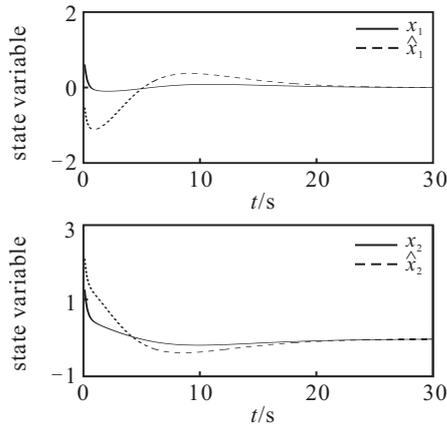


图 1 L_2 取值下原系统状态与估计值比较曲线 (情况 1)

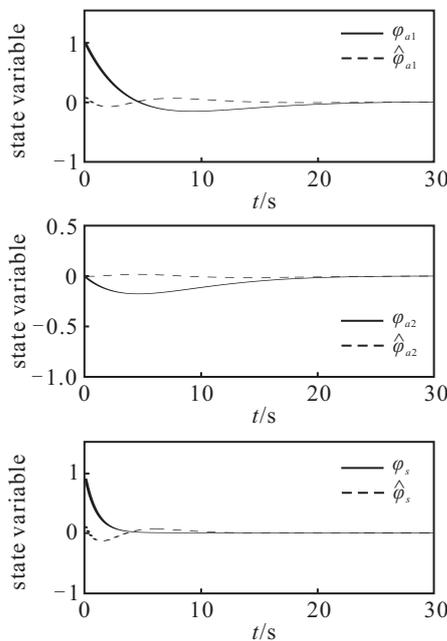


图 2 L_2 取值下故障系统状态与估计值比较曲线 (情况 1)

情况 2 选取 $L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ -0.1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.

增广系统状态与观测器估计状态见图 3 和图 4.

最优反馈增益由定理 2 给出, 选取不同的 L_2 并不影响增益 K 和最优指标 J^* , 仅改变了状态观测器中的系数矩阵, 即改变了 $\bar{\psi}(t)$. 由于最优反馈用到的状态变量是观测器的估计值, 最优控制曲线 $u^*(t)$ 略微会有变化, 两次最优反馈控制曲线比较如图 5 所示.

由图 1~图 5 可见, 选取不同的 L_2 对观测结果会有影响, 通过选取不同的 L_2 可以改变 A_{obs} 特征值在复平面的位置, 从而改变系统状态的实际值和估计值逼近的速度.

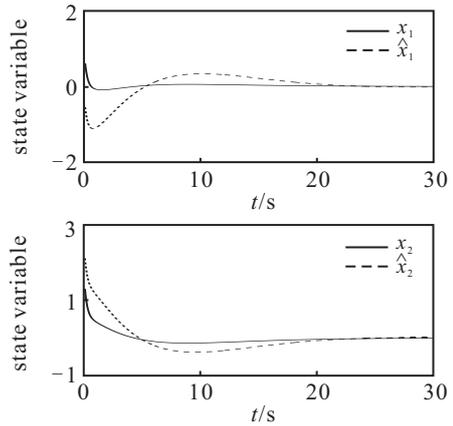


图 3 L_2 取值下原系统状态与估计值比较曲线 (情况 2)

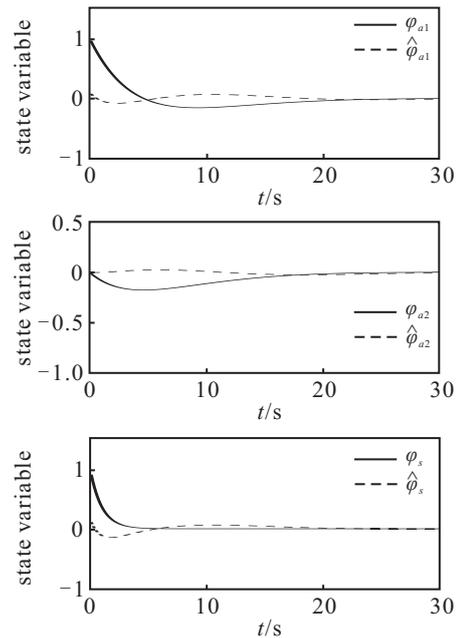


图 4 L_2 取值下故障系统状态与估计值比较曲线 (情况 2)

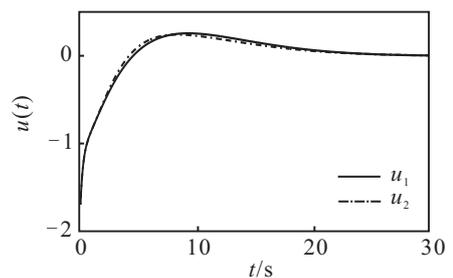


图 5 不同 L_2 对应的最优控制曲线 $u^*(t)$

注 2 式 (8) 中的所有未知参数在 A_{obs} 确定后都可通过式 (9) 相应确定, 而 A_{obs} 的选取仅要求保证稳定即可, 设计自由度增加同时也导致 PI 观测器不唯一. 在实际中, 可以根据系统的性能要求选取合适的 L_2 .

由以上结果和仿真曲线可知, 本文所设计的 PI 观测器能够很好地观测到系统的所有状态信息, 即能够检测到故障系统的状态. 同时, 利用观测器观测到的信号可以实现最优状态反馈, 使整个系统在发生故障时仍能达到稳定、最优.

4 结 论

本文针对实际中常见的已知动态特性的故障, 基于 PI 全维观测器, 对线性奇异摄动系统的故障诊断与容错控制进行了研究. 首先基于奇异摄动系统相关理论和矩阵变换技术, 给出了 PI 全维观测器存在的条件, 即系统发生此类故障时可诊断的条件. 进一步, 设计了状态反馈控制器, 使得整个闭环系统不仅是渐近稳定的, 而且使得给定线性二次指标达到最小值. 最后的数值算例表明, 应用所提出方法设计的 PI 全维观测器能够很好地观测到系统故障的状态, 同时能够保证闭环系统具有稳定性、最优性, 从而验证了所提出方法的可行性和正确性.

参考文献(References)

- [1] 许可康. 控制系统中的奇异摄动[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 13-23.
(Xu K K. Singular perturbation in control systems[M]. Beijing: Science Press, 1986: 13-23.)
- [2] 钟宁帆. 线性奇异摄动系统极限性能分析与综合——一种广义系统方法[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2007.
(Zhong N F. Limiting behavior of linear singularly perturbed systems analysis and design—A singular system based approach[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 2007.)
- [3] Saksena V R, O'Reilly J, Kokotovic P V. Singular perturbations and time-scale methods in control theory[J]. *Automatica*, 1984, 20(3): 273-293.
- [4] 王宪杰, 高存臣. 线性不确定奇异摄动系统的稳定控制鲁棒界[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 487-489.
(Wang X J, Gao C C. Robust bounds of stable controllers for linear uncertain singular perturbation systems[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 487-489.)
- [5] 梅平, 邹云. 基于广义 KYP 引理方法的奇异摄动系统有限频段正实性能分析[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 711-714.
(Mei P, Zou Y. Finite frequency positive realness analysis of singularly perturbed systems based on generalized KYP lemma approach[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 711-714.)
- [6] Xu S Y, Feng G. New results on H_∞ control of discrete singularly perturbed systems[J]. *Automatica*, 2009, 45(10): 2339-2343.
- [7] 张宝琳, 郑菲菲, 唐功友. 奇异摄动时滞系统次优控制的 Chebyshev 多项式级数方法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(5): 691-696.
(Zhang B L, Zheng F F, Tang G Y. Chebyshev polynomial series method of suboptimal control for singularly perturbed time-delay systems[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(5): 691-696.)
- [8] Xu J, Cai C X, Zou Y. A new method for fault detection in singularly perturbed systems via the finite frequency strategy[J]. *J of Franklin Institute*, 2015, 352(11): 5061-5084.
- [9] 周东华, Ding X. 容错控制理论及其应用[J]. *自动化学报*, 2000, 26(6): 788-797.
(Zhou D H, Ding X. Theory and applications of fault tolerant control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(6): 788-797.)
- [10] Jamshidpour E, Poure P, Gholipour E. Single-switch DC-DC converter with fault-tolerant capability under open- and short-circuit switch failures[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2015, 30(5): 2703-2712.
- [11] Huynh N, Wright R A. Nonlinear observer design for the slow states of a singularly perturbed system[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29(4): 797-806.
- [12] Koenig D, Mammari S. Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(12): 2057-2062.
- [13] Khosrowjerdi M J, Nikoukhah R, Safari-Shad H. A mixed H_2/H_∞ approach to simultaneously fault detection and control[J]. *Automatica*, 2004, 40(2): 261-267.
- [14] Dai L. Singular control systems-lecture notes in control and information science[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 38-50.

(责任编辑: 郑晓蕾)