

基于滑模观测器的车辆电子稳定性控制系统故障重构

于金泳¹, 刘志远¹, 陈虹²

(1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025)

摘要: 针对车辆电子稳定性控制系统的横摆角速度传感器和侧向加速度传感器故障检测和重构问题, 使用T-S模糊系统建立了车辆动力学系统的全局模型, 依据滑模控制理论, 给出了基于滑模观测器的传感器故障检测和重构方法, 且所设计观测器满足给定的从未知输入到故障重构误差的 L_2 增益性能要求. 最后通过实测数据, 验证了方法是可行的.

关键词: 电子稳定性控制; 故障检测; 故障重构; T-S模糊系统

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A

Fault reconstruction in the vehicle electronic stability control based on sliding mode observers

YU Jin-yong¹, LIU Zhi-yuan¹, CHEN Hong²

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang, 150001, China;

2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin, 130025, China)

Abstract: For the global dynamic model of a vehicle based on fuzzy Takagi-Sugeno(T-S) system, we discuss an on-line fault detection and reconstruction scheme for the yaw rate and lateral acceleration sensor in a vehicle electronic stability control system. The observer is designed based on the sliding mode control theory, the L_2 gain from the unknown input to the fault reconstruction error is guaranteed. Real data obtained from the vehicle verifies the effectiveness of the design technique.

Key words: electronic stability control; fault detection; fault reconstruction; T-S fuzzy systems

1 引言(Introduction)

随着车辆可靠性要求的不断提高, 对车辆电子稳定性控制(electronic stability control, ESC)系统的故障诊断受到了更多的关注^[1~4]. 侧向加速度传感器和横摆角速度传感器向ESC控制器提供主要的车辆运行状态信息, 因此对其检测和重构是非常必要的. 文献[1~3]利用解析冗余生成残差, 对传感器进行故障检测; 文献[4]使用高增益观测器对传感器故障进行估计. 这些方法都假设车速相对平稳. 然而在实际车辆行驶过程中, 故障应该尽可能实时进行检测, 并根据故障情况及时采取处理, 以防止发生交通事故. 因此, 研究在不同车速包括车辆进行加减速等条件下的ESC系统传感器故障诊断就更为重要.

本文首先对汽车动力学模型进行分析, 建立了基于模糊T-S模型的全局车辆动态模型. 在第3部分使用滑模观测器设计了故障重构观测器, 最后在实车

上对上述方法进行了验证, 给出了实验结果.

2 车辆动力学模型(Vehicle dynamics modelling)

仅考虑车辆侧向、纵向以及横摆运动, 忽略侧倾、悬架动态特性, 建立车辆动力学模型如图1所示.

车辆动力学方程可以描述为式(1)^[5]:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{\cos \beta}{m \cdot v} \sum_{i=1}^4 F_{yi} - \frac{\sin \beta}{m \cdot v} \sum_{i=1}^4 F_{xi} - \gamma, \\ I_z \dot{\gamma} = (F_{yFR} + F_{yFL}) \cdot l_F - \\ \quad (F_{yRR} + F_{yRL}) \cdot l_R + M_z, \\ \alpha_y = v(\dot{\beta} + \gamma), \\ M_z = (F_{xRR} - F_{xRL}) \cdot \frac{b_R}{2} + \\ \quad (F_{xFR} - F_{xFL}) \cdot \frac{b_F}{2}, \\ F_{si} = C_i \alpha_i, i = FL/FR/RL/RR. \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 为车辆质心侧偏角, γ 为横摆角速度, f_{si} ($i = \text{FL/FR/RL/RR}$, 左前/右前/左后/右后)为第 i 个轮胎的侧向力, F_{xi}, F_{yi} ($i = \text{FL/FR/RL/RR}$)为第 i 个轮胎的纵向和侧向力在 x 轴和 y 轴的分量, m 和 I_z 分别为车辆质量和横摆转动惯量, l_F 和 l_R 为前轴和后轴到质心的距离, b_F 和 b_R 分别为前轴和后轴的长度, v 为车速, M_z 为干扰力矩, α_y 为侧向加速度, C_i ($i = \text{F/R}$, 前/后)为轮胎侧偏刚度, α_i ($i = \text{F/R}$)为轮胎侧偏角, 可以表示为

$$\alpha_F = \delta - \frac{l_F \gamma + v \cdot \sin \beta}{v \cdot \cos \beta}, \quad (2)$$

$$\alpha_R = \frac{l_R \gamma - v \cdot \sin \beta}{v \cdot \cos \beta}. \quad (3)$$

其中 δ 为前轮转向角。

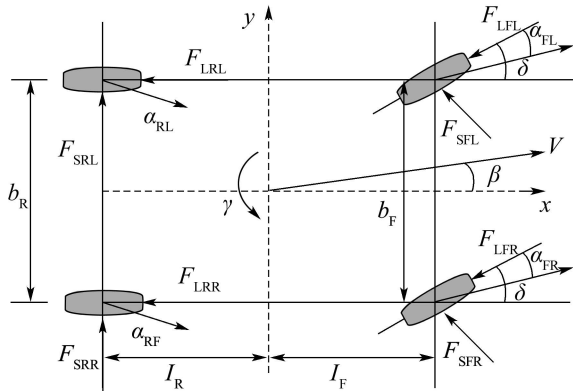


图1 车辆模型

Fig. 1 Model of vehicle

考虑到车辆质心侧偏角通常小于 5° ^[5], 模型(1)~(3)可以简化为

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_F + C_R}{vm} & 2 \frac{-l_F C_F + l_R C_R}{v^2 m} - 1 \\ -2 \frac{l_F C_F - l_R C_R}{I_z} & -2 \frac{l_F^2 C_F + l_R^2 C_R}{v I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_F}{vm} \\ \frac{2C_F l_F}{I_z} \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} M_z. \quad (4)$$

考虑到实际传感器存在如断路、短路或恒值偏差等故障, 其可以描述为加性故障, 这时传感器测量输出表示为

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_y &= \alpha_y + f_1, \\ \bar{\gamma} &= \gamma + f_2. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\bar{\alpha}_y$ 为加速度传感器测量输出, $\bar{\gamma}$ 为横摆角速度测量输出, f_i ($i = 1, 2$)分别为加速度传感器和横摆角速度传感器故障, 且满足如下假设:

假设1 传感器故障 f_i 有界, 即存在正数 β_{1i} 使 $\|f_i\| < \beta_{1i}$.

假设2 扰动力矩 M_z 有界, 即存在正数 β_2 使 $\|M_z\| < \beta_2$.

结合式(1)~(5)建立如下的测量输出方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{\alpha}_y \\ \bar{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_F + C_R}{m} & 2 \frac{-l_F C_F + l_R C_R}{mv} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_F}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对车速 v 进行模糊化处理^[6], 建立如下车辆动力学模糊T-S模型:

Rule i : 如果车速 v 在 $v_{\text{ref}}(i)$ 附近, 则车辆模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_i x + B_i u + B_{1i} w, \\ y = C_i x + D_{1i} u + D_2 f, \\ i = 1, 2, \dots, r. \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$A_i = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_F + C_R}{v_{\text{ref}}(i)m} & 2 \frac{-l_F C_F + l_R C_R}{v_{\text{ref}}^2(i)m} - 1 \\ -2 \frac{l_F C_F - l_R C_R}{I_z} & -2 \frac{l_F^2 C_F + l_R^2 C_R}{v_{\text{ref}}(i)I_z} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{2C_F}{v_{\text{ref}}(i)m} \\ \frac{2C_F l_F}{I_z} \end{bmatrix}, \quad B_{1i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$D_{1i} = \begin{bmatrix} \frac{2C_F}{m} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_i = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_F + C_R}{m} & 2 \frac{-l_F C_F + l_R C_R}{mv_{\text{ref}}(i)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$x = [\beta^T \quad \gamma^T]^T, \quad u = \delta, \quad w = M_z, \quad y = [\bar{\alpha}_y^T \quad \bar{\gamma}^T]^T,$$

v_{ref} 为参考车速, r 为模糊规则数; 并定义对应模糊集“about $v_{\text{ref}}(i)$ ”的隶属函数为 $\varphi_i(v) \geq 0$.

本文的主要任务是利用加速度和横摆角速度传感器测量信息, 应用滑模观测器技术, 对传感器故障信息进行重构。

3 基于滑模观测器的传感器故障重构 (Sensor fault reconstruction based on sliding mode observer)

首先对故障 f_2 进行重构, 为此将系统输出分为两

部分:

$$\begin{aligned} y_1 &= \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) \bar{C}_{1i} x + \bar{D}_{1i1} u + \bar{D}_{1i} f_1, \\ y_2 &= \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) \bar{C}_{2i} x + \bar{D}_{1i2} u + \bar{D}_{2i} f_2. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\bar{D}_2$ 可逆, $\lambda_i(v) = \varphi_i(v) / \sum_{j=1}^r \varphi_j(v)$.

为对故障 f_2 进行重构, 考虑构造一个新的状态 x_f [7,8], 定义如下:

$$\dot{x}_f = -A_f x_f + A_f y_2. \quad (9)$$

这里 $-A_f$ 为适当维数的稳定矩阵. 联立方程(7)~(9) 有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_f(t) \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) (A_{ai} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_f(t) \end{bmatrix} + B_{ai} u + \\ &\quad B_{a1i} w(t)) + \begin{bmatrix} 0 \\ A_f \bar{D}_2 \end{bmatrix} f_2(t), \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ x_f(t) \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) C_{ai} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_f(t) \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i1} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} f_1. \end{aligned} \quad (10b)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_{ai} &= \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ A_f \bar{C}_{2i} & -A_f \end{bmatrix}, \quad B_{ai} = \begin{bmatrix} B_i \\ A_f \bar{D}_{1i2} \end{bmatrix}, \\ B_{a1i} &= \begin{bmatrix} B_{1i} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{ai} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{1i} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

对于系统(10), 构造观测器

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{x}}_f \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) (A_{ai} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_f \end{bmatrix} + \\ \quad B_{ai} u + G_i \begin{bmatrix} e_{y1} \\ e_{xf} \end{bmatrix}) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} v, \\ \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{x}_f \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r \lambda_i(v) C_{ai} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i1} \\ 0 \end{bmatrix} u. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_{y1} = y_1 - \hat{y}_1$, $e_{xf} = x_f - \hat{x}_f$, 不连续向量 v 定义为

$$v = \begin{cases} \eta P_2^{-1} \frac{e_{xf}}{\|e_{xf}\|}, & \text{如果 } e_{xf} \neq 0, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (12)$$

则状态估计误差满足

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) ((A_{ai} + G_i C_{aj}) e + \\ &\quad B_{a1i} w(t) + G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} f_1) - \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} v + \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ A_f \bar{D}_2 \end{bmatrix} f_2(t). \quad (13)$$

式中: $e_x = x - \hat{x}$, $e = [e_x^T \ e_{xf}^T]^T$.

考虑 Lyapunov 函数 $V = e^T P e$, 其中 $P = \text{diag}\{P_1 \ P_2\} > 0$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(z) \lambda_j(z) e^T ((A_{ai} + G_i C_{aj})^T P + \\ &\quad P(A_{ai} + G_i C_{aj})) e - 2e^T P \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} v + \\ &\quad 2e^T P \begin{bmatrix} 0 \\ A_f \bar{D}_2 \end{bmatrix} f_2(t) + 2e^T P \begin{bmatrix} B_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} w(t) + \\ &\quad 2e^T P G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} f_1. \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中, 如果

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) ((A_{ai} + G_i C_{aj})^T P + \\ P(A_{ai} + G_i C_{aj})) < -\mu_0 I, \end{aligned} \quad (15)$$

那么

$$\begin{aligned} \dot{V} &< \|e\| (-\mu_0 \|e\| + 2\mu_1 \|w(t)\| + 2\mu_2 \|f_1\|) - \\ &\quad 2\|e_{xf}\| (\eta - \|P_2 A_f \bar{D}_2\| \|f_2(t)\|). \end{aligned}$$

显然, 如果 $\eta > \|P_2 A_f \bar{D}_2\| \beta_{12}$ 且

$$e \notin \Omega_\varepsilon = \{e : \|e\| < 2 \frac{\mu_1 \beta_2 + \mu_2 \beta_{11}}{\mu_0} + \varepsilon\},$$

有 $\dot{V} < 0$, 因此系统状态收敛于 Ω_ε . 其中:

$$\mu_1 = \max_i \|P_1 B_{1i}\|, \quad \mu_2 = \max_i \|P G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i} \\ 0 \end{bmatrix}\|,$$

$\varepsilon > 0$ 为任意小正数.

为能通过增益 η 的适当选取, 使系统状态达到滑模面 $S = \{e : e_{xf} = 0\}$, 再考虑 Lyapunov 函数 $V(e_{xf}) = e_{xf}^T P_2 e_{xf}$, 并有

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_{xf}) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(z) \lambda_j(z) (e_{xf}^T (A_{22ij}^T P_2 + \\ &\quad P_2 A_{22ij}) e_{xf} + 2e_{xf}^T P_2 A_{21ij} e_x) - \\ &\quad 2e_{xf}^T P_2 v + 2e_{xf}^T P_2 A_f \bar{D}_2 f_2 + \\ &\quad 2e_{xf}^T P_2 [0 \ I] G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} f_1 < \\ &\quad -2\|e_{xf}\| (\eta - \|P_2 A_f \bar{D}_2\| \|f_2\| - \\ &\quad \sigma \|e_x\| - \mu_3 \|f_1\|). \end{aligned} \quad (16)$$

式中:

$$\sigma = \max_{i,j} \|P_2 A_{21ij}\|,$$

$$\mu_3 = \max_i \|P_2 [0 \ I] G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix}\|,$$

$$\begin{bmatrix} A_{11ij} & A_{12ij} \\ A_{21ij} & A_{22ij} \end{bmatrix} = A_{ai} + G_i C_{aj}.$$

式(16)中, 如果

$$\eta > \|P_2 A_f \bar{D}_2\| \beta_{12} + 2\sigma \frac{\mu_1 \beta_2 + \mu_2 \beta_{11}}{\mu_0} + \mu_3 \beta_{11} + \varepsilon \sigma + \varepsilon_1, \quad (17)$$

其中: $\varepsilon_1 > 0$, 并考虑到系统状态收敛于 Ω_ε , 则有 $\dot{V}(e_{xf}) < -2\varepsilon_1 \|e_{xf}\|$, 因此在有限时间内, 状态估计误差达到理想滑模面 $S = \{e : e_{xf} = 0\}$.

下面使用滑模观测器来对传感器故障进行重构. 假设滑模观测器已经设计, 并且滑模运动已经产生, 有 $e_{xf} = \dot{e}_{xf} = 0$, 则误差方程(13)可以表示为

$$\dot{e}_x = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) (A_{11ij} e_x + B_{a1i} w + [I \ 0] G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix} f_1), \quad (18a)$$

$$f_2 = (A_f \bar{D}_2)^{-1} (v_{eq} - \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) (A_{21ij} e_x + [0 \ I] G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix} f_1)). \quad (18b)$$

这里 v_{eq} 为等效控制, 且可以使用式(19)任意近似^[7],

$$v_{eq} = \eta P_2^{-1} \frac{e_{xf}}{\|e_{xf}\| + \Delta}, \quad (19)$$

式中 Δ 正数.

通过式(18)(19), 故障 f_2 可以通过式(20)构造

$$\hat{f}_2 = (A_f \bar{D}_2)^{-1} v_{eq}. \quad (20)$$

为了减小扰动对故障重构误差的影响, 提出如下的指标:

$$\sup_{w \in L_2 - \{0\}} \frac{\|f_2 - \hat{f}_2\|_{L_2}}{\|\hat{w}\|_{L_2}} < \gamma_0, \quad (21)$$

式中 $\hat{w} = [w^T f_1^T]^T$.

通过相同的方法, 可以实现对故障 f_1 的重构.

4 滑模故障重构观测器求解方法(Designing the sliding mode fault reconstruction observer)

通过上面的讨论, 滑模观测器的设计需要满足条件(15)和(17)并满足指标(21), 下面给出T-S模糊系统

滑模观测器增益的求解方法, 为此首先给出引理1.

引理 1 如果存在矩阵 $A_{ij} = A_{ji}^T (i, j = 1, 2, \dots, r)$, 使得矩阵不等式族 $Q_{ij} (1 \leq i, j \leq r)$ 满足

$$Q_{ij} + Q_{ij}^T \leq A_{ij} + A_{ji}, \quad (22)$$

$$\text{s.t. } i, j = 1, 2, \dots, r \text{ and } \lambda_i(v) \lambda_j(v) \neq 0,$$

$$[A_{ij}]_{r \times r} < -\alpha I, \quad (23)$$

则参变量矩阵不等式

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) Q_{ij} < -\alpha I$$

成立, 其中:

$$\sum_{i=1}^r \lambda_i(v) = 1, \lambda_k(v) \geq 0, k = 1, 2, \dots, r,$$

$$[A_{ij}]_{r \times r} = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{r1} & \dots & A_{rr} \end{pmatrix}.$$

应用文献[9]引理2和文献[10]定理2, 并考虑模糊集合之间的关系, 引理1即可证明. 通过引理1, 可以得到T-S模糊系统滑模观测器增益的求解方法.

定理 1 如果存在矩阵 $A_{ij} = A_{ji}^T (i, j = 1, 2, \dots, r)$, 使得矩阵不等式族 $Q_{ij} (1 \leq i, j \leq r)$ 满足

$$Q_{ij} + Q_{ij}^T \leq A_{ij} + A_{ji}, \quad (24)$$

$$\text{s.t. } i, j = 1, 2, \dots, r \text{ and } \lambda_i(v) \lambda_j(v) \neq 0,$$

$$[A_{ij}]_{r \times r} < -\mu_0 I. \quad (25)$$

式中:

$$Q_{ij} = \begin{pmatrix} Q_{ij11} & Q_{ij12} & P_1 B_{1i} & K_{i11} \bar{D}_1 & Q_{ij15} \\ * & Q_{ij22} & 0 & P_2 G_{i21} \bar{D}_1 & Q_{ij25} \\ * & * & -\gamma_0 I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\gamma_0 I & \bar{D}_1^T G_{i21}^T \\ * & * & * & * & -\gamma_0 I \end{pmatrix},$$

$$Q_{ij11} = A_i^T P_1 + P_1 A_i + K_{i11} \bar{C}_{1j} + \bar{C}_{1j}^T K_{i11}^T,$$

$$Q_{ij12} = K_{i12} + \bar{C}_{2i}^T A_f P_2 + \bar{C}_{1j}^T G_{i21}^T P_2,$$

$$Q_{ij22} = -P_2 A_f - A_f^T P_2 + P_2 G_{i22} + G_{i22}^T P_2,$$

$$Q_{ij15} = (A_f \bar{C}_{2i} + G_{i21} \bar{C}_{1j})^T, K_{i12} = P_1 G_{i12},$$

$$Q_{ij25} = (-A_f + G_{i22})^T, K_{i11} = P_1 G_{i11},$$

$$G_i = \begin{bmatrix} G_{i11} & G_{i12} \\ G_{i21} & G_{i22} \end{bmatrix},$$

则条件(15)和(21)成立.

证 考虑如下系统:

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_{xf} \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) \left(\begin{bmatrix} A_i & 0 \\ A_f \bar{C}_{2i} - A_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_x \\ e_{xf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{i11} & G_{i12} \\ G_{i21} & G_{i22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{C}_{1j} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_{xf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1i} \\ 0 \end{bmatrix} G_i \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{w} \right), \\ z &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \lambda_i(v) \lambda_j(v) \left([A_f \bar{C}_{2i} - A_f] \cdot \begin{bmatrix} e_x \\ e_{xf} \end{bmatrix} + [G_{i21} \ G_{i22}] \begin{bmatrix} \bar{C}_{1j} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_{xf} \end{bmatrix} + [0 \ 0 \ I \ G_i] \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{w} \right). \end{aligned} \right. \quad (26)$$

很明显, 如果在零初始状态下, 使系统(26)是渐近稳定的, 并满足如下的性能指标:

$$\sup_{w \in L_2 - \{0\}} \frac{\|z\|_{L_2}}{\|\hat{w}\|_{L_2}} < \gamma_0 \quad (27)$$

成立, 则条件(15)和(21)成立. 通过有界实引理并根据引理1, 可以得到式(24)(25). 证毕.

给定 γ_0 , 定理1提供了滑模观测器解存在的条件, 尽管该条件不能满足对参数 G_{i21} , G_{i22} 和 P_2 的线性关系, 但可以使用迭代LMI方法求解, 具体求解方法参见文献[11,12].

5 仿真结果(Simulation)

试验车辆使用一汽轿车股份有限公司生产的Mazda-M6, 使用dSPACE AutoBox对车载轮速传感器、方向盘传感器、侧向加速度传感器和横摆角速度传感器进行数据采集, 并使用最大轮速作为车速的估计. 实验在干燥的柏油路面上进行.

根据实验数据, 取参考车速 $v_{\text{ref}} = \{3, 5, 10, 20, 50\}$ m/s, 对应模糊隶属度函数使用三角函数, 如图2所示.

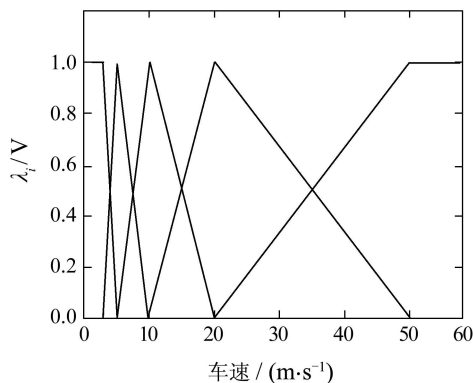


图2 车速模糊划分的隶属度函数

Fig. 2 Membership functions of vehicle velocity

分别对侧向加速度传感器和横摆率传感器模拟对地短路故障和恒值偏差故障. 引入的故障分别为

$$f_1 = \begin{cases} -\alpha_y, & 7 \leq t \leq 10, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} 3, & 14 \leq t \leq 17, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

通过本文方法设计的滑模观测器实现传感器故障重构, 达到故障检测与估计的目的.

图3~图6给出了车速估计、方向盘转角(与车轮转角比例为20: 1)输入、无故障时的纵向加速度和横摆角速度信号.

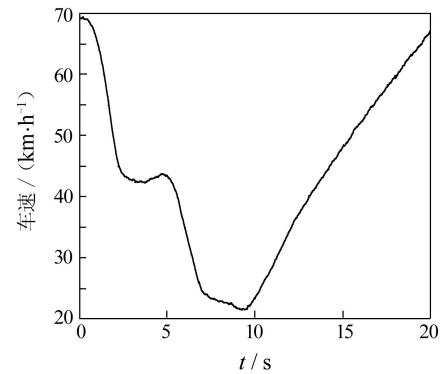


图3 车速估计曲线

Fig. 3 The estimation of vehicle velocity

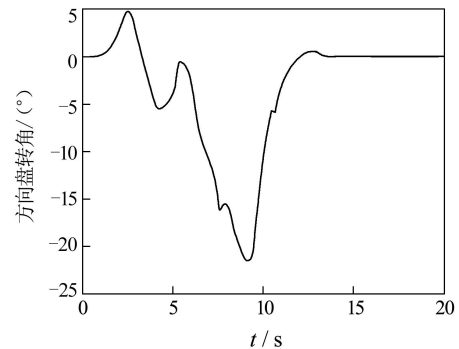


图4 方向盘转角输入

Fig. 4 The steering wheel angle

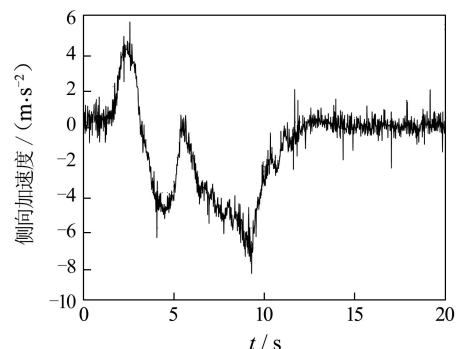


图5 无故障侧向加速度信号

Fig. 5 The lateral acceleration sensor signal without fault

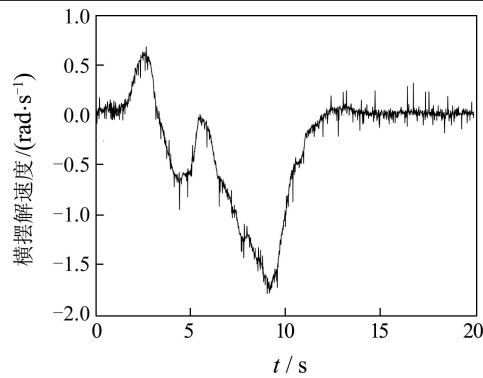
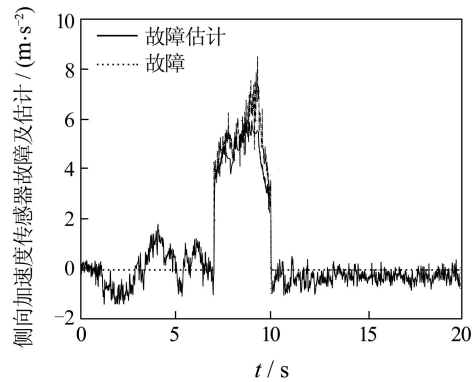
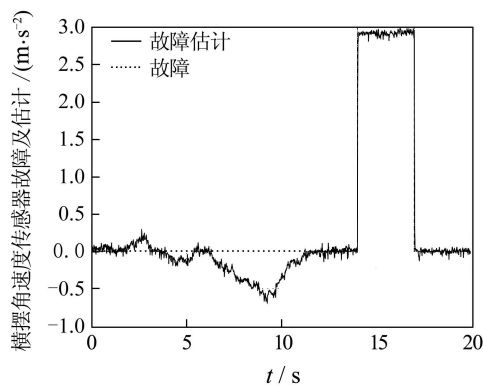


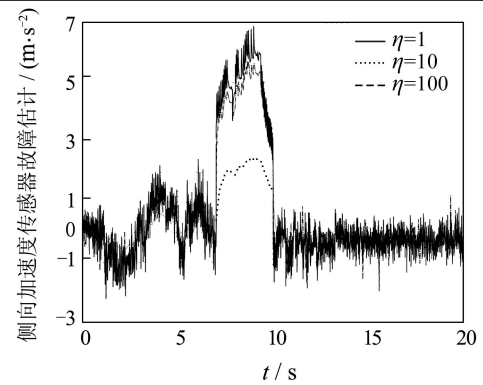
图6 无故障横摆角速度信号

Fig. 6 The yaw rate sensor signal without fault

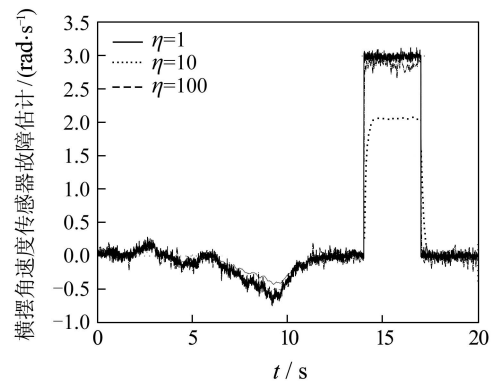
当增益 $\eta = 15$ 时,图7给出了侧向加速度传感器故障及其估计,图8给出了横摆角速度传感器故障及其估计。从图中可以看出,所设计的故障检测滤波器能够在较大的车速范围内有效的跟踪故障信号,对方向盘转角输入有较好的抑制作用。

图7 $\eta = 15$ 时侧向加速度传感器故障估计Fig. 7 The lateral acceleration sensor fault and its estimate with $\eta = 15$ 图8 $\eta = 15$ 时横摆角速度传感器故障估计Fig. 8 The yaw rate sensor fault and its estimate with $\eta = 15$

此外,在滑模观测器设计中,系统的扰动通常是假设已知的,然而,在实际应用中,扰动界较难精确获得。图9和图10给出了不同增益 $\eta = 1, 10, 100$ 对故障估计的影响。

图9 不同 η 侧向加速度传感器故障估计Fig. 9 The estimate of lateral acceleration sensor fault with different η

从图中可以看出,随着增益 η 的增加,故障估计的误差越小,但当增益 η 增加到一定程度,对估计误差影响不大。此外,随着增益 η 的增加,也导致噪声的增加,这是因为增益 η 的增大导致颤振产生的。

图10 不同 η 横摆角速度传感器故障估计Fig. 10 The estimate of yaw rate sensor fault estimate with different η

6 结论(Conclusion)

本文通过建立车辆动态系统的模糊T-S模型,研究了车辆电子稳定性控制系统横摆角速度传感器和加速度传感器的故障检测和重构问题,给出了模糊T-S系统滑模观测器的设计方法,并应用等价输出控制来获取故障信息,实现传感器故障的检测与重构。该方法应用于实测数据仿真实验中,取得了满意的故障重构结果,并可以在较大的车速范围内实现了对传感器故障的重构和检测。应该指出的是,由于滑模观测器增益使用迭代LMI方法求解,具有一定的保守性。

参考文献(References):

- [1] DING E L, FENNEL H, DING S X. Model-based diagnosis of sensor faults for ESP systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(7): 847 - 856.

- [2] SCHNEIDER S, WEINHOLD N, DING S X, et al. Parity space based FDI-scheme for vehicle lateral dynamics[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada*. USA: IEEE, 2005: 1409 – 1414.
- [3] FISCHER D M, SCHMITT J, ISERMANN R. Fault detection for lateral and vertical vehicle dynamics[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(3): 315 – 324.
- [4] GAO Z, DING S X, MA Y. Robust fault estimation approach and its application in vehicle lateral dynamic systems[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2007, 28(3): 143 – 156.
- [5] KIENCHKE U, NIELSEN L. *Automotive Control Systems for Engine, Driveline and Vehicle*[M]. Berlin, Germany: Verlag, 2000: 265 – 272.
- [6] KAZUO T, WANG H O. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*[M]. New York, American: John Wiley & Sons, 2001: 5 – 83.
- [7] CHEE P, CHRISTOPHER E. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults[J]. *Automatica*, 2002, 38(10): 1815 – 1821.
- [8] CHEE P, CHRISTOPHER E. A robust sensor fault reconstruction scheme using sliding mode observers applied to a nonlinear aero-engine model[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2002, 6: 5086 – 5091.
- [9] 刘晓东, 张庆灵. 模糊系统 H_∞ 控制器设计的 LMI 方法[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(1): 120 – 124.
- (LIU Xiaodong, ZHANG Qingling. LMI-based H_∞ control design for T-S fuzzy systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 120 – 124.)
- [10] LIU X D, ZHANG Q L. New approaches to H_∞ controller designs based on fuzzy observers for T-S fuzzy systems via LMI[J]. *Automatica*, 2003, 39(9): 1571 – 1582.
- [11] 巩长忠, 刘全利, 王伟. 模糊不确定时滞系统的静态输出的反馈镇定: 迭代线性矩阵不等式方法[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(4): 627 – 630.
- (GONG Changzhong, LIU Quanli, WANG Wei. Static output feedback stabilization of uncertain fuzzy systems with time-delay: an iterative linear matrix inequality approach[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 627 – 630.)
- [12] ZHONG M Y, YE H, CHEN G Y, et al. ILMI approach to RFDF for uncertain linear systems with nonlinear perturbations[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(2): 297 – 300.

作者简介:

于金泳 (1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事汽车电子控制、故障诊断和容错控制的研究, E-mail: yujinyong@hit.edu.cn;

刘志远 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车电子控制、约束系统鲁棒控制以及机器人控制方面的研究, E-mail: li-uzhi_hit@hit.edu.cn;

陈虹 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、预测控制、非线性系统控制等, E-mail: chenh@jlu.edu.cn.