

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.07.001

基于变参数模型的智能车辆转向执行器故障诊断

王宏伟, 李磊, 刘晨宇, 汪洵
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为解决传统车辆研究将纵向车速设为定值的问题,设计一种基于观测器的鲁棒增益调度故障诊断算法. 首先,以纵向车速为调度变量,同时考虑执行器故障、模型不确定性以及外部干扰,在传统车辆模型基础上建立四轮转向线性变参数(linear parameter varying, LPV)数学模型. 然后,对执行器故障进行状态重构,设计具有可变权重因子的鲁棒增益调度观测器,实现对车辆状态信息及执行器故障信号的双重估计. 最后,选取双移线和蛇形工况,通过MATLAB/Simulink和Carsim联合仿真,结果表明,所设计的执行器故障诊断算法能有效处理车辆纵向车速的时变特性,在复杂工况下能及时快速地跟踪车辆的状态及故障信息,突破了原有传统车辆故障诊断算法的局限性.

关键词: 智能车辆;线性变参数;执行器故障;故障诊断;增益调度

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)07-0913-08

Steering Actuator Fault Diagnosis of Intelligent Vehicle Based on Variable Parameter Model

WANG Hong-wei, LI Lei, LIU Chen-yu, WANG Xun

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: WANG Hong-wei, E-mail: wanghw0819@163.com)

Abstract: In order to solve the problem that the longitudinal vehicle speed is set as a constant value in traditional vehicle research, a robust gain scheduling fault diagnosis algorithm is designed based on an observer. Firstly, by taking the longitudinal vehicle speed as the scheduling variable, while considering actuator fault, model uncertainty and external interference, a mathematical model using linear parameter varying (LPV) is established on the basis of the traditional vehicle model. Then, the state of the actuator fault is reconstructed, and a robust gain scheduling observer with variable weight factor is designed to achieve dual estimation of vehicle state information and actuator fault signals. Finally, joint simulations using MATLAB/Simulink and Carsim are carried out under double lane change and snake maneuvers. The results show that the designed actuator fault diagnosis algorithm can effectively deal with the time-varying characteristics of vehicle longitudinal speed, and track the vehicle state and fault information timely and accurately under complex working conditions, which breaks through the limitations of traditional vehicle fault diagnosis algorithms.

Key words: intelligent vehicle; linear parameter varying; actuator fault; fault diagnosis; gain scheduling

智能车辆集多种高新技术于一体,功能的复杂性增加了执行器故障的易发性^[1]. 执行器发生故障时,系统如果没有适当的调节策略,执行机构将接收错误的指令信息对车辆进行控制,导致

车辆失去稳定性. 因此,在执行器发生未知故障的情况下,实时估计智能车辆状态及故障信息,做出快速有效的诊断,具有重要的现实意义^[2].

在车辆执行器故障诊断方面,国内外学者

收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61903072); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2223029).

作者简介: 王宏伟(1983-),女,辽宁铁岭人,东北大学副教授.

进行了相关研究.文献[3]考虑轮胎模型不确定性以及外部干扰,设计鲁棒 H_∞ 控制器,对车辆横向稳定性进行了有效的控制,但此控制器未考虑执行器故障对系统的影响.文献[4]考虑执行器故障及模型的不确定性,构造了观测器来精确估计车辆的质心侧偏角和横摆角速度.上述文献假定车辆纵向车速为定值,研究具有一定的局限性.在实际行驶工况下,车辆的纵向速度是随着道路环境实时变化的,为了使理论研究更加贴近现实,部分学者对时变速度下的车辆系统展开研究.文献[5]考虑系统的外部干扰,设计了LPV/ H_∞ 观测器来估计车辆的横向速度和横摆角速度,有效地跟踪车辆期望的运行轨迹,但此模型中未考虑执行器故障.文献[6]建立执行器故障下的车辆模型,通过设计复合观测器同时估计系统的状态和扰动值,极大提高车辆的安全性能,但此控制器设计未考虑参数的不确定性.文献[7-8]考虑模型不确定性及执行器故障,建立车辆的变参数模型,针对该模型设计观测器对车辆状态进行观测,但未对故障信息进行实时估计.

本文考虑智能车辆纵向车速变化对系统性能的影响,针对轮胎模型不确定性,外部干扰及执行器故障等因素,建立四轮转向车辆LPV数学模型,设计一种基于观测器的鲁棒 H_∞ 控制器,并给出满足闭环系统鲁棒性能指标的线性矩阵不等式求解条件,实现车辆状态信息及故障信号的同时估计,选取双移线和蛇形工况,通过MATLAB/Simulink与Carsim联合仿真,验证本文故障诊断算法的有效性.

1 系统模型

1.1 车辆动力学模型

假设车辆行驶在水平路面,忽略悬架运动和

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_y &= -\frac{K_f+K_r}{mv_x}v_y + \left(\frac{K_rL_r-K_fL_f}{mv_x} - v_x\right)r + \frac{K_f}{m}\delta_f + \frac{K_r}{m}\delta_r, \\ \dot{r} &= \frac{K_rL_r-K_fL_f}{I_zv_x}v_y - \frac{K_fL_f^2+K_rL_r^2}{I_zv_x}r + \frac{K_fL_f}{I_z}\delta_f - \frac{K_rL_r}{I_z}\delta_r. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为了便于后续控制器的设计,选取状态向量 $\bar{x}(t)=[v_y, r]^T$,输入向量 $u(t)=[\delta_f, \delta_r]^T$, $\bar{y}(t)$ 为输出向量,将式(4)转换为标准状态空间方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}u(t), \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}\bar{x}(t). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

空气动力学的影响,将车辆模型进行简化,如图1所示.

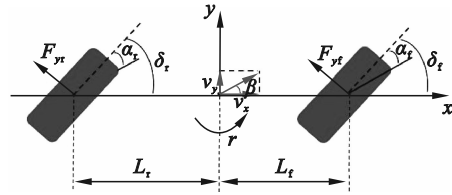


图1 车辆动力学模型

Fig. 1 Vehicle dynamic model

根据运动学和牛顿力学的基本原理,车辆的动力学方程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{v}_y + v_x r) &= F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} \cos \delta_r, \\ I_z \dot{r} &= L_f F_{yf} \cos \delta_f - L_r F_{yr} \cos \delta_r. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: v_x 和 v_y 分别为车辆的横向速度和纵向速度; r 代表车辆的横摆角速度; m 为整车的质量; I_z 代表整车绕 z 轴的转动惯量; F_{yf} 和 F_{yr} 分别为作用在前、后轮胎的侧向力; δ_f 和 δ_r 分别为车辆的前、后轮转角; L_f 和 L_r 分别为车辆质心到前、后轴的距离.

本文选取的轮胎模型工作在线性区域,前、后轮的侧向力表示为

$$\left. \begin{aligned} F_{yf} &= K_f \alpha_f, \\ F_{yr} &= K_r \alpha_r. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: K_f, K_r 分别代表前、后轮的侧偏刚度; α_f, α_r 分别代表前、后轮的侧偏角,对应的几何关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_f &= \delta_f - \frac{v_y + L_f r}{v_x}, \\ \alpha_r &= \delta_r - \frac{v_y - L_r r}{v_x}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

本文对车辆的前后轮转角 δ_f 和 δ_r 作小角度假设,即 $\cos \delta_f \approx 1, \cos \delta_r \approx 1$,将式(2)和式(3)代入式(1)中,可得车辆二自由度动力学数学模型:

$$\text{式中: } \bar{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_f+K_r}{mv_x} & \frac{K_rL_r-K_fL_f}{mv_x} - v_x \\ \frac{K_fL_f-K_rL_r}{I_zv_x} & -\frac{K_fL_f^2+K_rL_r^2}{I_zv_x} \end{bmatrix};$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_f}{m} & \frac{K_r}{m} \\ \frac{K_fL_f}{I_z} & -\frac{K_rL_r}{I_z} \end{bmatrix}; \bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

车辆在实际的行驶过程中,由于不同的路面条件、运行工况等因素影响,轮胎的侧偏刚度会发生一定的变化,导致车辆系统模型具有不确定性,此时前、后轮胎的侧偏特性可以描述为

$$\left. \begin{aligned} K_f &= K_{fd} + \zeta_f \Delta K_f, \\ K_r &= K_{rd} + \zeta_r \Delta K_r. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中: K_{fd} 和 K_{rd} 分别为前、后轮的理想侧偏刚度; ΔK_f 和 ΔK_r 分别代表前、后轮侧偏刚度的不确定值; ζ_f 和 ζ_r 为时变参数, 满足 $|\zeta_f| \leq 1, |\zeta_r| \leq 1$.

在车辆的驾驶过程中, 强侧向风的存在会给车辆施加侧向力及横摆力矩, 车辆的稳定性将变差. 因此, 在车辆二自由度动力学模型的基础上, 考虑模型的不确定性及侧风干扰的影响, 得到更符合实际的车辆状态空间方程模型:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= (\bar{A} + \Delta\bar{A})\bar{x}(t) + (\bar{B} + \Delta\bar{B})u(t) + \bar{E}_d w(t), \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}\bar{x}(t). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \bar{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{K_{fd} + K_{rd}}{mv_x} & \frac{K_{rd}L_r - K_{fd}L_f}{mv_x} - v_x \\ \frac{K_{rd}L_r - K_{fd}L_f}{I_z v_x} & -\frac{K_{fd}L_f^2 + K_{rd}L_r^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \\ \Delta\bar{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{\zeta_f \Delta K_f + \zeta_r \Delta K_r}{mv_x} & \frac{\zeta_r L_r \Delta K_r - \zeta_f L_f \Delta K_f}{mv_x} \\ \frac{\zeta_r L_r \Delta K_r - \zeta_f L_f \Delta K_f}{I_z v_x} & -\frac{\zeta_f L_f^2 \Delta K_f + \zeta_r L_r^2 \Delta K_r}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} \frac{K_{fd}}{m} & \frac{K_{rd}}{m} \\ \frac{K_{fd}L_f}{I_z} & -\frac{K_{rd}L_r}{I_z} \end{bmatrix}, \Delta\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{\zeta_f \Delta K_f}{m} & \frac{\zeta_r \Delta K_r}{m} \\ \frac{\zeta_f L_f \Delta K_f}{I_z} & -\frac{\zeta_r L_r \Delta K_r}{I_z} \end{bmatrix}, \\ \bar{E}_d &= \begin{bmatrix} 1 \\ m \\ l_w \\ I_z \end{bmatrix}, w(t) = F_w. \end{aligned}$$

其中: l_w 为侧风力作用点到车辆质心的水平距离; F_w 为侧风力; $\Delta\bar{A}$ 和 $\Delta\bar{B}$ 为系统的有界不确定项, 满足 $\Delta\bar{A} = \bar{D}_1 F \bar{H}_1, \Delta\bar{B} = \bar{D}_2 F \bar{H}_2, \bar{D}_1, \bar{H}_1, \bar{D}_2, \bar{H}_2$ 为已知适当维数的常数矩阵, F 为未知的时变有界矩阵, 满足 $\|F\| \leq I, \bar{D}_1, \bar{H}_1, \bar{D}_2, \bar{H}_2$ 和 F 可以表示为如下形式:

$$\begin{aligned} \bar{D}_1 = \bar{D}_2 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{L_f}{I_z} & -\frac{L_r}{I_z} \end{bmatrix}, \bar{H}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta K_f}{v_x} & -\frac{L_f \Delta K_f}{v_x} \\ \frac{\Delta K_r}{v_x} & \frac{L_r \Delta K_r}{v_x} \end{bmatrix}, \\ \bar{H}_2 &= \begin{bmatrix} \Delta K_f & 0 \\ 0 & \Delta K_r \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \zeta_f & 0 \\ 0 & \zeta_r \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

1.2 执行器故障下的车辆 LPV 数学模型

在长时间的运行环境下, 车辆执行机构易发生突变或缓慢故障, 本文考虑执行器的加性故

障, 得到执行器故障下的车辆数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= (\bar{A} + \Delta\bar{A})\bar{x}(t) + (\bar{B} + \Delta\bar{B})u(t) + \bar{G}_a f_a(t) + \bar{E}_d w(t); \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}\bar{x}(t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中: $\bar{G}_a = \bar{B} + \Delta\bar{B}$ 为执行器故障分布矩阵; $f_a(t) = [f_{af} \ f_{ar}]^T, f_{af}$ 为前轮故障值, f_{ar} 为后轮故障值.

本文所考虑的故障为常值故障或突变故障, 即 $\dot{f}_a(t) = 0$, 将执行器故障作为附加状态变量, 令 $x(t) = [\bar{x}(t) \ f_a(t)]^T$, 系统(8)可化为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \Delta Ax(t) + \Delta Bu(t) + E_d w(t); \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \bar{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \Delta\bar{A} & \Delta\bar{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = D_1 F H_1, \Delta B = \begin{bmatrix} \Delta\bar{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = D_2 F H_2,$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} \bar{D}_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, H_1 = [\bar{H}_1 \ \bar{H}_2], H_2 = \bar{H}_2,$$

$$E_d = \begin{bmatrix} \bar{E}_d \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \bar{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I \end{bmatrix}.$$

实际工况中, 车辆的速度是时变的, 且在一定范围内有界, 本文采用多面体来描述车辆速度的时变特性. 如果纵向速度 v_x 在 $[v_{x \min}, v_{x \max}]$ 范围内变化, 则 $1/v_x$ 在 $[1/v_{x \max}, 1/v_{x \min}]$ 范围内变化, 其中, $v_{x \min}$ 代表车辆速度的最小值, $v_{x \max}$ 代表车辆速度的最大值.

此多面体包含 4 个顶点, 这 4 个顶点可以描述 LPV 状态空间方程所有可能的组合选择, 时变参数 v_x 和 $1/v_x$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= g_1 v_{x \min} + g_2 v_{x \max}; \\ \frac{1}{v_x} &= h_1 \frac{1}{v_{x \max}} + h_2 \frac{1}{v_{x \min}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, g_1, g_2, h_1, h_2 分别为对应的权重因子:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{v_{x \max} - v_x}{v_{x \max} - v_{x \min}}, g_2 = \frac{v_x - v_{x \min}}{v_{x \max} - v_{x \min}}, \\ h_1 &= \frac{\frac{1}{v_{x \min}} - \frac{1}{v_x}}{\frac{1}{v_{x \min}} - \frac{1}{v_{x \max}}}, h_2 = \frac{\frac{1}{v_x} - \frac{1}{v_{x \max}}}{\frac{1}{v_{x \min}} - \frac{1}{v_{x \max}}}. \end{aligned}$$

联立式(9)和式(10), 考虑车辆纵向速度的时变特性, 执行器故障下的车辆 LPV 动力学数学模型表示为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^4 \alpha_i (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + E_d w(t); \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中: $\alpha_1 = g_1 h_1; \alpha_2 = g_1 h_2; \alpha_3 = g_2 h_1; \alpha_4 = g_2 h_2$.

从式(11)可知,描述系统矩阵集合 $\Gamma = (A, \Delta A, B, \Delta B, E_d)$,且

$$\Gamma = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \Gamma_i, \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0.$$

其中, $\Gamma_i = (A_i, \Delta A_i, B, \Delta B, E_d)$ 为多面体的顶点,通过调度参数 v_x 最小值和最大值来确定具体表达形式:

$$\begin{cases} \Gamma_1 = (A(v_{x \min}, 1/v_{x \max}), \Delta A(v_{x \min}, 1/v_{x \max}), B, \Delta B, E_d), \\ \Gamma_2 = (A(v_{x \min}, 1/v_{x \min}), \Delta A(v_{x \min}, 1/v_{x \min}), B, \Delta B, E_d), \\ \Gamma_3 = (A(v_{x \max}, 1/v_{x \max}), \Delta A(v_{x \max}, 1/v_{x \max}), B, \Delta B, E_d), \\ \Gamma_4 = (A(v_{x \max}, 1/v_{x \min}), \Delta A(v_{x \max}, 1/v_{x \min}), B, \Delta B, E_d). \end{cases}$$

2 基于车辆 LPV 模型的观测器设计

针对时变速度下的车辆 LPV 模型,本文设计的观测器形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i [A_i \hat{x}(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t))] + Bu(t) + E_d w(t); \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t). \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\hat{x}(t)$ 为系统状态的观测值; $\hat{y}(t)$ 为所设计观测器系统的输出值; L_i 为待设计的观测器增益.

观测器系统(12)中的参数 v_x 是时变的,因此控制输入需要根据纵向车速实时调度,基于观测器的反馈控制系统设计为如下形式:

$$u(t) = - \sum_{i=1}^4 \alpha_i K_i \hat{x}(t). \quad (13)$$

$$\Theta_i = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & BK_i & E_d & P^{-1} H_{li}^T & V_i^T H_2^T & 0 & 0 & 0 \\ K_i^T B^T & \Theta_{22} & 0 & 0 & 0 & QD_1 & QD_2 & K_i^T H_2^T \\ E_d^T & 0 & -\lambda^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{li} P^{-1} & 0 & 0 & -\frac{1}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_5)} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_2 V_i & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{(\varepsilon_2^{-1} + \varepsilon_6^{-1})} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_1^T Q & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\varepsilon_5^{-1}} I & 0 & 0 \\ 0 & D_2^T Q & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{(\varepsilon_4 + \varepsilon_6)} I & 0 \\ 0 & H_2 K_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{(\varepsilon_3^{-1} + \varepsilon_4^{-1})} I \end{bmatrix} < 0. \quad (18)$$

其中:

$$\Theta_{11} = A_i P^{-1} + P^{-1} A_i^T - B V_i - V_i^T B^T + \varepsilon_1^{-1} D_1 D_1^T + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) D_2 D_2^T,$$

$$\Theta_{22} = A_i^T Q + Q A_i - X_i C - C^T X_i^T, L_i = Q^{-1} X_i, K_i = V_i P^{-1}.$$

其中, K_i 为待设计的控制器增益.

定义系统状态误差:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t). \quad (14)$$

对式(14)求导,可得

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t). \quad (15)$$

将式(11)~式(13)代入式(15),可得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & \sum_{i=1}^4 \alpha_i (A_i - L_i C + \Delta B K_i) e(t) + \\ & \sum_{i=1}^4 \alpha_i (\Delta A_i - \Delta B K_i) x(t). \end{aligned} \quad (16)$$

联立式(11),式(13)和式(14),状态方程(11)可改写为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [(A_i + \Delta A_i) - (B K_i + \Delta B K_i)] x(t) + \\ & \sum_{i=1}^4 \alpha_i (B K_i + \Delta B K_i) e(t) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i E_d w(t). \end{aligned} \quad (17)$$

引理 1^[9] 若存在相同维数的实数向量 x, y , 则对于任意正数 ε , 有下面的不等式成立:

$$\pm(x^T y + y^T x) \leq \varepsilon x^T x + \varepsilon^{-1} y^T y.$$

引理 2^[9] 设对称矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$, $S_{12}^T = S_{21}$, 则以下 3 个条件等价:

$$\begin{cases} S < 0, \\ S_{11} < 0, S_{22} - S_{21} S_{11}^{-1} S_{12} < 0, \\ S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{21} < 0. \end{cases}$$

定理 1 存在正实数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$, 以及正定矩阵 P 和 Q , 使得线性矩阵不等式 $\Theta_i < 0$, 则式(12)所设计的观测器系统是稳定的.

证明 选取 Lyapunov 函数:

$$V(t) = x^T(t) P x(t) + e^T(t) Q e(t). \quad (19)$$

式中, P 和 Q 为适当维数的正定矩阵.

对式(19)求导,将式(16)和式(17)代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [x^T(t)(A_i^T P + PA_i + H_{li}^T F^T D_1^T P + PD_1 F H_{li} - \\ & K_i^T B^T P - PBK_i - K_i^T H_2^T F^T D_2^T P - \\ & PD_2 F H_2 K_i)x(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [e^T(t)K_i^T B^T Px(t) + \\ & x^T(t)PBK_i e(t) + e^T(t)K_i^T H_2^T F^T D_2^T Px(t) + \\ & x^T(t)PD_2 F H_2 K_i e(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [w^T(t)E_d^T Px(t) + \\ & x^T(t)PE_d w(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [e^T(t)(A_i^T Q + QA_i - QL_i C - \\ & C^T L_i^T Q + K_i^T H_2^T F^T D_2^T Q + QD_2 F H_2 K_i)e(t)] + \\ & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [x^T(t)H_{li}^T F^T D_1^T Q e(t) + e^T(t)QD_1 F H_{li} x(t) - \\ & x^T(t)K_i^T H_2^T F^T D_2^T Q e(t) - e^T(t)QD_2 F H_2 K_i x(t)]. \quad (20) \end{aligned}$$

根据引理 1, 式(20)可改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [x^T(t)(A_i^T P + PA_i - K_i^T B^T P - PBK_i + \\ & (\varepsilon_1 + \varepsilon_5)H_{li}^T H_{li} + \varepsilon_1^{-1} PD_1 D_1^T P + \varepsilon_2^{-1} K_i^T H_2^T H_2 K_i + \\ & (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)PD_2 D_2^T P + (\varepsilon_2^{-1} + \varepsilon_6^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i)x(t)] + \\ & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [e^T(t)(A_i^T Q + QA_i - QL_i C - C^T L_i^T Q + \\ & \varepsilon_5^{-1} QD_1 D_1^T Q + (\varepsilon_4 + \varepsilon_6)QD_2 D_2^T Q + \\ & (\varepsilon_3^{-1} + \varepsilon_4^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i)e(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i (e^T(t)K_i^T B^T Px(t) + \\ & x^T(t)PBK_i e(t)) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [w^T(t)E_d^T Px(t) + \\ & x^T(t)PE_d w(t)]. \quad (21) \end{aligned}$$

在零初始条件下, 对于任意外界干扰 $w(t) \in [0, \infty)$, 控制输出 $z(t)$ 满足 H_∞ 性能约束, 即 $\|z(t)\|_\infty \leq \lambda \|w(t)\|_\infty$, 考虑 H_∞ 性能指标, 定义:

$$H(t) = \dot{V}(t) + z^T(t)z(t) - \lambda^2 w^T(t)w(t). \quad (22)$$

将式(21)代入式(22), 得

$$\begin{aligned} H(t) = & \dot{V}(t) + z^T(t)z(t) - \lambda^2 w^T(t)w(t) \leq \\ & \sum_{i=1}^4 \alpha_i [x^T(t)(A_i^T P + PA_i - K_i^T B^T P - PBK_i + \\ & (\varepsilon_1 + \varepsilon_5)H_{li}^T H_{li} + \varepsilon_1^{-1} PD_1 D_1^T P + \\ & (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)PD_2 D_2^T P + (\varepsilon_2^{-1} + \varepsilon_6^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i + \\ & C^T C)x(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [e^T(t)(A_i^T Q + QA_i - QL_i C - \\ & C^T L_i^T Q + \varepsilon_5^{-1} QD_1 D_1^T Q + (\varepsilon_4 + \varepsilon_6)QD_2 D_2^T Q + \\ & (\varepsilon_3^{-1} + \varepsilon_4^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i)e(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i (e^T(t)K_i^T B^T Px(t) + \\ & x^T(t)PBK_i e(t)) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i [w^T(t)E_d^T Px(t) + \\ & x^T(t)PE_d w(t)] + \sum_{i=1}^4 \alpha_i (-\lambda^2)w^T(t)w(t). \quad (23) \end{aligned}$$

定义 $\eta(t) = [x^T(t) e^T(t) w^T(t)]^T$, 则式(23)可改

写为

$$H(t) \leq \eta^T(t) \Omega_i \eta(t). \quad (24)$$

其中:

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & PBK_i & PE_d \\ K_i^T B^T P & \Omega_{22} & 0 \\ E_d^T P & 0 & -\lambda^2 I \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Omega_{11} = & A_i^T P + PA_i - K_i^T B^T P - PBK_i + (\varepsilon_1 + \varepsilon_5)H_{li}^T H_{li} + \\ & \varepsilon_1^{-1} PD_1 D_1^T P + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)PD_2 D_2^T P + \\ & (\varepsilon_2^{-1} + \varepsilon_6^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i + C^T C, \\ \Omega_{22} = & A_i^T Q + QA_i - X_i C - C^T X_i^T + \varepsilon_5^{-1} QD_1 D_1^T Q + \\ & (\varepsilon_4 + \varepsilon_6)QD_2 D_2^T Q + (\varepsilon_3^{-1} + \varepsilon_4^{-1})K_i^T H_2^T H_2 K_i, X_i = QL_i. \end{aligned}$$

定义 $\Psi = \text{diag}\{P^{-1}, I, I\}$, 用 Ψ 对 Ω_i 进行合同变换, 即 Ω_i 左右两侧同乘以 Ψ 和 Ψ^T . 根据引理 2, 对合同变换后的式子进行等价变化, 可得式(18). 因此, 式(18)保证观测器系统(12)稳定且满足 H_∞ 性能指标.

3 仿真验证

本文使用 MATLAB/Simulink 与 Carsim 软件, 搭建联合仿真平台, 考虑驾驶道路的复杂性, 选取双移线和蛇形工况进行仿真研究, 以此来验证本文所设计故障诊断算法的有效性.

车辆模型选取 Carsim 中的 C 级车型, 具体参数如下: $m = 1\,274 \text{ kg}$, $I_z = 1\,523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L_f = 1.016 \text{ m}$, $L_r = 1.562 \text{ m}$, $K_{fd} = 84\,800 \text{ N/rad}$, $K_{rd} = 144\,000 \text{ N/rad}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 侧风干扰 F_w 在车辆行驶 1 s 后进入系统, F_w 值选取为 3 000 N. 本文研究的车辆纵向速度是时变的, 最小速度 $v_{x\text{min}} = 36 \text{ km/h}$, 最大速度 $v_{x\text{max}} = 108 \text{ km/h}$, 车辆前后轮胎的侧偏刚度不确定参数: $\zeta_f = 0.05$, $\zeta_r = 0.08$. 通过 MATLAB 的 YALMIP 工具箱求解线性矩阵不等式(18), 4 个凸多面体顶点处的观测器增益为

$$\begin{aligned} L_1 = & \begin{bmatrix} 34.254\,3 & -12.796\,5 & 4.002\,4 & 6.089\,5 \\ -13.524\,0 & 34.061\,1 & 4.631\,7 & -6.600\,8 \\ 1.938\,6 & 2.204\,0 & 0.852\,5 & -0.075\,2 \\ 2.885\,8 & -2.318\,6 & 0.075\,6 & 0.690\,3 \end{bmatrix}, \\ L_2 = & \begin{bmatrix} 25.672\,6 & -7.968\,9 & 3.867\,3 & 6.221\,8 \\ -8.894\,9 & 22.950\,9 & 4.327\,0 & -6.652\,7 \\ 1.770\,0 & 1.674\,0 & 0.882\,9 & -0.061\,4 \\ 2.290\,6 & -1.786\,3 & 0.048\,3 & 0.784\,6 \end{bmatrix}, \\ L_3 = & \begin{bmatrix} 40.766\,6 & -18.948\,0 & 3.381\,6 & 7.880\,9 \\ -19.443\,9 & 27.837\,6 & 5.645\,4 & -5.455\,0 \\ 0.668\,1 & 2.175\,1 & 0.991\,1 & -0.089\,9 \\ 3.850\,5 & -1.868\,7 & 0.295\,3 & 0.750\,6 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$L_4 = \begin{bmatrix} 29.8919 & -11.6442 & 2.7380 & 7.1904 \\ -12.4653 & 17.7978 & 4.8211 & -4.9993 \\ 0.9205 & 1.4978 & 0.9164 & -0.0579 \\ 3.0839 & -1.4740 & 0.1654 & 0.7794 \end{bmatrix}$$

3.1 双移线工况仿真

考虑车辆执行器发生突变故障,假设前轮在 4~6 s 发生故障,后轮在 7~9 s 发生故障,具体的故障形式如下:

$$f_{af} = \begin{cases} 0, t < 4; \\ 1.5, 4 \leq t < 6; \\ 0, t \geq 6. \end{cases} \quad (25)$$

$$f_{ar} = \begin{cases} 0, t < 7; \\ 0.8, 7 \leq t < 9; \\ 0, t \geq 9. \end{cases} \quad (26)$$

本文考虑纵向速度的时变特性,其变化曲线如图 2 所示.图 3 为双移线工况下车辆的前后轮转角输入曲线.横向速度和横摆角速度的响应曲线如图 4 和图 5 所示.

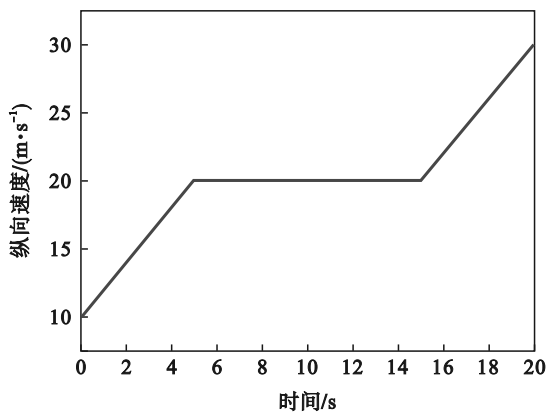


图 2 纵向速度变化曲线

Fig. 2 Change curve of longitudinal velocity

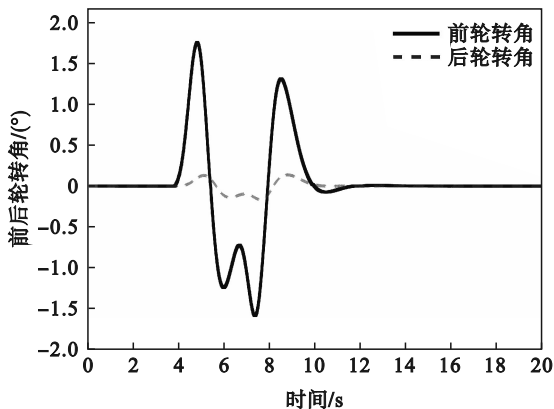


图 3 前后轮转角输入曲线(双移线工况)

Fig. 3 Input curves of front and rear wheel angles (double-lane change maneuver)

从图 4 和图 5 可以看出,当车辆的前轮和后轮执行器在 4~6 s 和 7~9 s 发生不同时间段的突变故障时,横向速度和横摆角速度虽然发生明显的

突变波动,但是观测器系统能很好地估计故障后的车辆状态信息.横向速度的估计值与实际值的误差百分比不超过 29.923%,横摆角速度的估计值与实际值的最大误差百分比为 45.654%.

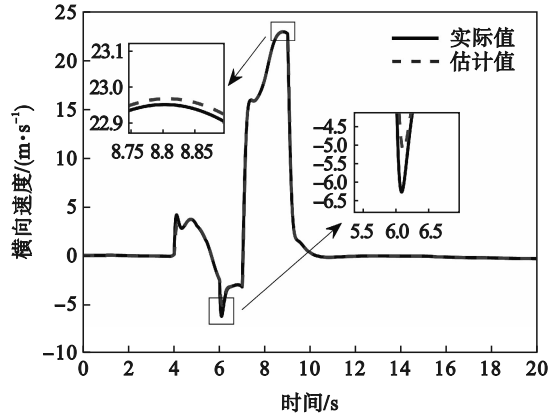


图 4 横向速度响应曲线(双移线工况)

Fig. 4 Response curves of lateral velocity (double-lane change maneuver)

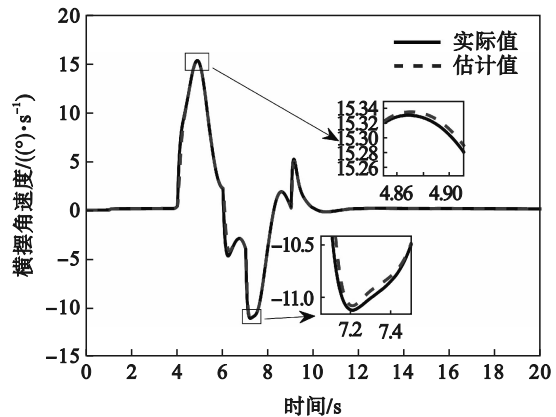


图 5 横摆角速度响应曲线(双移线工况)

Fig. 5 Response curves of yaw rate (double-lane change maneuver)

图 6 和图 7 分别为前后轮故障诊断对比图.由图可知,在车辆系统的整个控制过程中,本文所设计的观测器能有效诊断出系统发生的未知故障,很好地重现故障的变化趋势.从图中可以看出,当前轮故障后轮无故障时,观测器仍可以检测出后轮微弱的故障信号,这是因为车辆系统是一个整体,当车辆前轮发生故障时,势必会影响车辆状态的变化.当车辆状态值发生变化时,也一定会影响原本后轮的控制输入值.因此,当前轮故障后轮无故障时,后轮故障的估计值会有一个微弱的波动,这更加证明了本文所设计观测器的灵敏性,能实时有效地检测出不同时间段内故障的微弱变化.同理,如图 7 所示,当车辆后轮在 7~9 s 发生突变故障时,观测器也能检测出前轮出现的微弱故障信号.

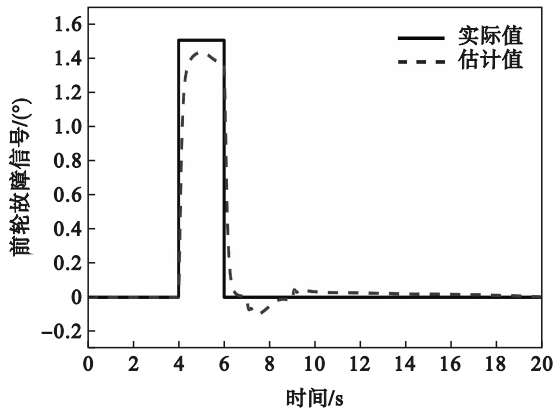


图 6 前轮故障变化曲线

Fig. 6 Change curves of front wheel fault

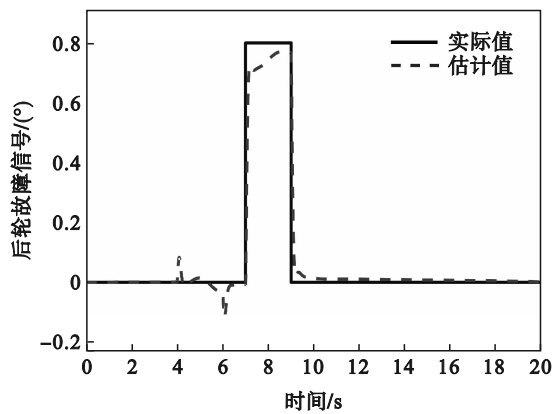


图 7 后轮故障变化曲线

Fig. 7 Change curves of rear wheel fault

3.2 蛇形工况仿真

假设前轮在 6~7 s 发生故障,后轮在 9~11 s 发生故障,具体的故障形式如下:

$$f_{af} = \begin{cases} 0, & t < 6; \\ 3.5, & 6 \leq t < 7; \\ 0, & t \geq 7. \end{cases} \quad (27)$$

$$f_{ar} = \begin{cases} 0, & t < 9; \\ 2.25, & 9 \leq t < 11; \\ 0, & t \geq 11. \end{cases} \quad (28)$$

蛇形工况下的前后轮转角输入如图 8 所示,纵向速度在 36~108 km/h 范围内变化,具体的形式如图 2 所示.图 9 和图 10 分别为蛇形工况下横向速度和横摆角速度实际值与估计值的对比图.由图 9 和图 10 可知,在前轮和后轮先后发生不同类型故障情况下,横向速度和横摆角速度出现了较大的跳变,偏离了原本的运行轨迹,尤其是在 9~11 s 车辆后轮发生 2.25° 的故障时,横向速度达到了 60.97 m/s,这将严重影响车辆的横向稳定性,如果不及时估计出此时的横向速度并做出驾驶操作调整,将造成极大的安全隐患.从图中可以看出,蛇形工况下,观测器几乎完美地跟踪整

个时间段内横向速度和横摆角速度的变化趋势,仿真曲线的对比效果验证了本文所设计的基于观测器的故障诊断算法的优越性.

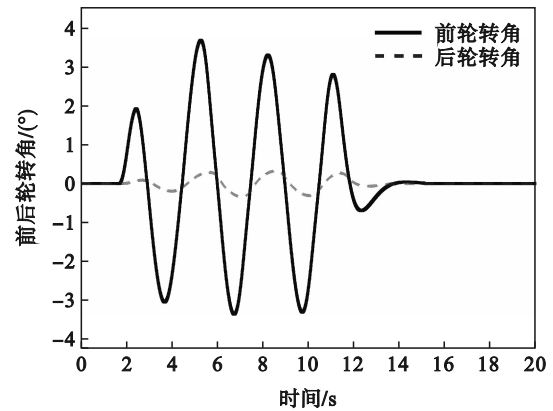


图 8 前后轮转角输入曲线(蛇形工况)

Fig. 8 Input curves of front and rear wheel angles (snake maneuver)

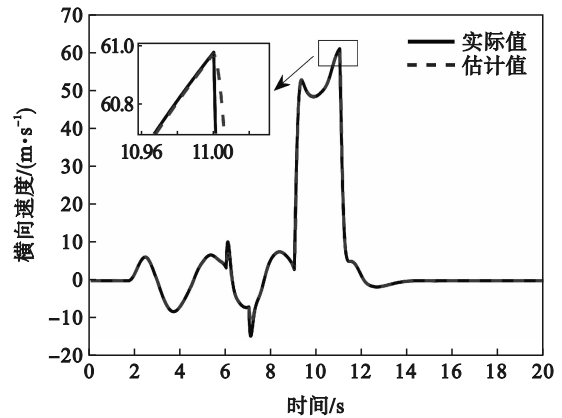


图 9 横向速度响应曲线(蛇形工况)

Fig. 9 Response curves of lateral velocity (snake maneuver)

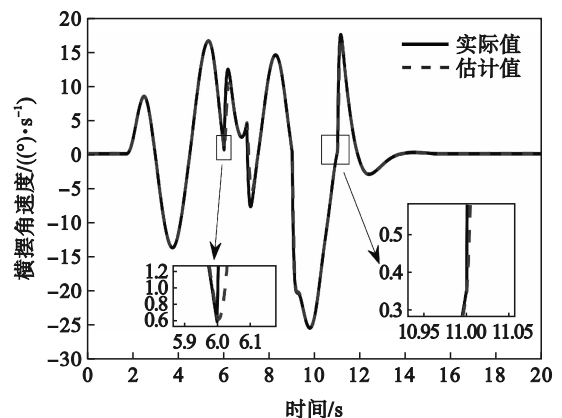


图 10 横摆角速度响应曲线(蛇形工况)

Fig. 10 Response curves of yaw rate (snake maneuver)

在复杂的行驶工况下,前后轮执行器发生故障后,将极大降低行驶中车辆的稳定性与安全

性,甚至造成人员伤亡,因此,设计可靠的故障诊断系统,及时发现未知故障是十分必要的.蛇形工况下的前后轮故障实际值与估计值对比效果如图 11 和图 12 所示.由图可知,当前轮和后轮在第 6 s 和第 9 s 发生突变故障时,估计值与实际值存在较大的偏差,此时所设计的故障诊断算法发挥作用,使估计值能很快跟踪上实际值,虽然存在一定的偏差,但在可接受的误差范围内.车辆在复杂的蛇形工况行驶时,当执行器发生故障,故障信息仍获得有效的估计.

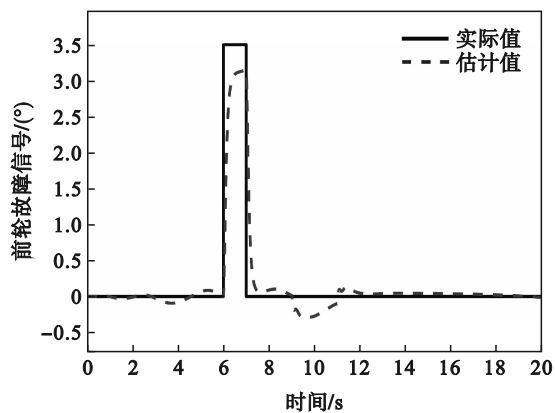


图 11 前轮故障变化曲线

Fig. 11 Change curves of front wheel fault

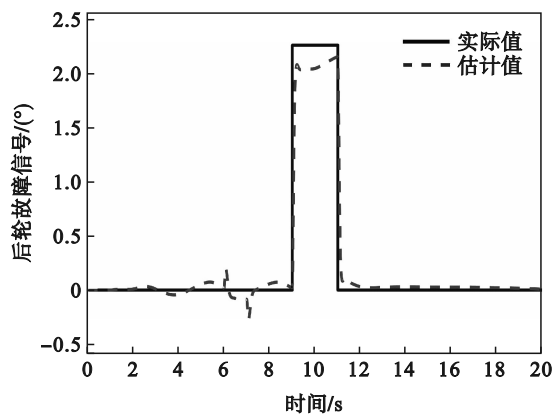


图 12 后轮故障变化曲线

Fig. 12 Change curves of rear wheel fault

4 结 语

本文针对执行器故障下的智能车辆 LPV 模

型,以纵向速度为调度变量,设计基于观测器的鲁棒增益调度故障诊断算法.结合车辆在实际驾驶环境中需要超车和避障的情形,选取双移线和蛇形工况,通过 MATLAB/Simulink 与 Carsim 联合仿真验证.结果表明,当车辆前后轮发生不同时间段的突变故障时,本文所设计的故障诊断算法能良好地发挥诊断作用,在车辆系统受到参数不确定性及强侧风干扰影响的情况下,仍可以精确地检测出车辆的状态信息及故障变化,为后续的容错控制奠定坚实的设计基础,具有重要的现实意义.

参考文献:

- [1] Wang J L, Yuan X F, Liu Z X, et al. Adaptive dynamic path planning method for autonomous vehicle under various road friction and speeds [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(10): 10977–10987.
- [2] Huang T L, Wang J, Pan H H, et al. Finite-time fault-tolerant integrated motion control for autonomous vehicles with prescribed performance [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 4255–4265.
- [3] Wang R R, Jing H, Hu C, et al. Robust H-infinity path following control for autonomous ground vehicles with delay and data Dropout [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(7): 2042–2050.
- [4] Sakhivel R, Mohanapriya S, Ahn C K, et al. State estimation and dissipative-based control design for vehicle lateral dynamics with probabilistic faults [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 65(9): 7193–7021.
- [5] Chu S Q, Xie Z C, Wong P K, et al. Observer-based gain scheduling path following control for autonomous electric vehicles subject to time delay [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2022, 60(5): 1602–1626.
- [6] Guo B, Chen Y. Robust adaptive fault-tolerant control of four-wheel independently actuated electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 2882–2894.
- [7] Guo J H, Wang J Y, Luo Y G, et al. Robust lateral control of autonomous four-wheel independent drive electric vehicles considering the roll effects and actuator faults [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 143: 1–17.
- [8] Zhang H, Wang J M. Active steering actuator fault detection for an automatically-steered electric ground vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 3685–3702.
- [9] Li X, Desouza C E. Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay [J]. *Automatica*, 1997, 33(9): 1657–1662.