

# 执行器故障下的分布式驱动电动车辆 非线性观测器设计

王宏伟, 吉新玉, 宋金烁  
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对具有执行器故障的分布式驱动电动车辆非线性动力学系统,设计一种基于观测器的鲁棒故障诊断算法. 首先,考虑执行器故障及系统干扰,建立7自由度车辆系统数学模型. 然后,利用线性矩阵不等式和李雅普诺夫函数设计一种基于非线性观测器的故障诊断策略,实现对系统状态、干扰信息及故障因子的多重估计,并给出理论性证明. 最后,参考车辆实际驾驶条件,通过MATLAB/Simulink和CarSim进行联合仿真. 结果表明,所设计的观测器可对执行器故障进行准确的诊断和估计,能快速跟踪系统实际运行状态,提高了系统的抗干扰能力.

**关键词:** 分布式驱动电动车辆; 执行器故障; 非线性观测器; 线性矩阵不等式; 故障诊断  
**中图分类号:** TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2026)01-0060-07

## Design of Nonlinear Observer for Distributed Drive Electric Vehicle with Actuator Faults

WANG Hong-wei, JI Xin-yu, SONG Jin-shuo

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

**Abstract:** A robust fault diagnosis algorithm based on an observer was designed for the nonlinear dynamic system of distributed drive electric vehicles with actuator faults. Firstly, by considering the actuator fault and system disturbance, a mathematical model of 7 degrees of freedom vehicle system was established. Then, a fault diagnosis strategy based on a nonlinear observer was designed by using linear matrix inequality and Lyapunov function to realize multiple estimations of system state, disturbance information, and fault factor, and the relevant theoretical proof was given. Finally, by referring to the actual driving conditions of the vehicle, the co-simulation was carried out by MATLAB/Simulink and CarSim. The results show that the designed observer can accurately diagnose and estimate the actuator faults, rapidly track the actual operating state of the system, and improve the anti-interference ability of the system.

**Key words:** distributed drive electric vehicle; actuator fault; nonlinear observer; linear matrix inequality; fault diagnosis

近年来,环保需求和能源危机问题日益突出.分布式驱动电动车辆作为一种绿色交通工具,采用独立电机驱动每个车轮,在提高能源效率和车辆安全性等方面展现了巨大潜力,受到了广泛的关注和研究<sup>[1-2]</sup>.然而,分布式驱动控制结构的复杂性使其执行器故障更加多样及突出.一

旦发生故障,系统状态会偏离正常值,这会严重影响车辆性能,甚至导致失稳从而引发严重的安全事故.因此,在执行器发生故障时,准确估计车辆状态并实时检测故障信息,作出快速有效的诊断,对保证车辆稳定性和安全性至关重要<sup>[3-4]</sup>.

车辆的故障检测和诊断算法已经取得了许

收稿日期: 2024-07-20

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.

通信作者: 王宏伟, E-mail: wanghw0819@163.com.

多研究成果.文献[5]考虑执行器故障和模型不确定性建立了车辆的变参数模型,并设计观测器对系统状态进行观测,但未对故障信息进行实时估计.文献[6]设计了一种自动地面车辆转向和力矩执行器故障观测器,考虑了执行器故障和车辆干扰的有限频率特性约束,具有良好的鲁棒性和灵敏性.上述文献均基于2自由度车辆模型进行分析研究,其模型简单,未考虑实际运行中车轮的独立运动,具有一定的局限性.因此,部分学者对更高自由度的车辆系统展开了相关研究.文献[7]针对执行器故障下的7自由度车辆模型,综合考虑系统状态和扰动设计复合观测器,提高了车辆的安全性能.文献[8]研究车辆系统在执行器故障情况下的速度跟踪控制和横向稳定性问题,设计了非线性状态观测器跟踪系统的实际状态,保证了车辆的稳定性.但以上文献中故障诊断方法的实现依赖于线性轮胎模型,未考虑因行驶条件、外界环境干扰等因素导致的轮胎特性的不确定性和变化,无法准确反映不同工况下车辆的复杂动力学行为.文献[9]考虑执行器故障和轮胎非线性动力学建立了车辆动力学系统模型,使得系统对更为复杂的驾驶条件具有鲁棒性,但其只对系统状态进行了估计.

针对上述问题,考虑轮胎的非线性动力学特性及系统内部干扰,建立执行器故障下的车辆模型,设计一种故障诊断算法对系统状态、干扰信息及故障因子进行多重估计.首先,建立执行器故障下的7自由度非线性车辆动力学模型;然后,利用线性矩阵不等式方法设计非线性观测器,并进行理论性证明;最后,选取双移线工况,通过MATLAB/Simulink与CarSim平台联合仿真,验证所提观测器的有效性.

## 1 系统模型

### 1.1 车辆动力学模型

假设只考虑车辆平行于地面的运动,忽略悬架系统、车身俯仰运动和空气阻力对车辆的影响.建立车辆的7自由度动力学模型,如图1所示.

根据牛顿力学定律,车辆动力学方程如下所示.

纵向运动:

$$\dot{v}_x = v_y \omega + \frac{1}{m} (F_{xrl} + F_{xrr}) + \frac{1}{m} (F_{xfl} + F_{xfr}) \cos \delta - \frac{1}{m} (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta; \quad (1)$$

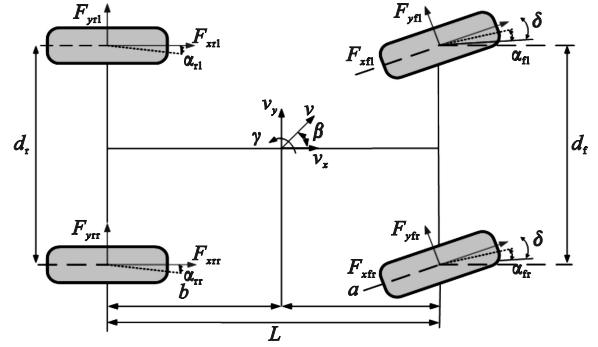


图1 车辆动力学模型

Fig. 1 Vehicle dynamics model

侧向运动:

$$\dot{v}_y = -v_x \omega + \frac{1}{m} (F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{1}{m} (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + \frac{1}{m} (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta; \quad (2)$$

横摆运动:

$$\dot{\omega} = \frac{a}{I_z} ((F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta) - \frac{b}{I_z} (F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{d_r}{2I_z} ((F_{xfr} - F_{xfl}) \cos \delta + (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta) + \frac{d_r}{2I_z} (F_{xrr} - F_{xrl}). \quad (3)$$

其中: $v_x$ 、 $v_y$ 、 $\omega$ 分别为车辆的纵向速度、侧向速度和横摆角速度; $F_{xij}$ 和 $F_{yij}$ 分别为轮胎纵向力和侧向力, $ij \in \{fl, fr, rl, rr\}$ (fl, fr, rl, rr分别表示左前、右前、左后、右后); $a$ 和 $b$ 为前后轴距; $d_f$ 和 $d_r$ 为前轮距和后轮距; $m$ 为整车质量; $I_z$ 为车辆的转动惯量; $\delta$ 为前轮转角.

轮胎的纵向力和侧向力由魔术轮胎公式表达为

$$F_{xij}(\lambda_{ij}) = D_1 \sin \{C_1 \arctan [B_1 (\lambda_{ij} + S_{h1}) (1 - E_1) + E_1 \arctan (B_1 (\lambda_{ij} + S_{h1}))]\} + S_{v1}, \quad (4)$$

$$F_{yij}(\alpha_{ij}) = D_2 \sin \{C_2 \arctan [B_2 (\alpha_{ij} + S_{h2}) (1 - E_2) + E_2 \arctan (B_2 (\alpha_{ij} + S_{h2}))]\} + S_{v2}. \quad (5)$$

其中: $\lambda_{ij}$ 为轮胎纵向滑移率; $\alpha_{ij}$ 为轮胎侧偏角; $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $S_{h1}$ 、 $S_{h2}$ 、 $S_{v1}$ 、 $S_{v2}$ 为魔术轮胎公式的特征参数; $E_1$ 、 $E_2$ 为曲率因子.

轮胎纵向力表达式中各特征参数如下:

$C_1 = a_0$ ,  $D_1 = a_1 F_z^2 + a_2 F_z$ ,  $B_1 = (a_3 F_z^2 + a_4 F_z) e^{-a_5 F_z} / (C_1 D_1)$ ,  $E_1 = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8$ ,  $S_{v1} = 0$ ,  $S_{h1} = a_9 F_z + a_{10}$ ,  $a_0 \sim a_{10}$ 为轮胎公式的相关系数.

轮胎纵向滑移率的表达式为

$$\lambda_{ij} = \frac{w_{ij} R - v_{ij}}{\max(w_{ij} R, v_{ij})}. \quad (6)$$

其中: $R$ 表示车轮有效滚动半径; $w_{ij}$ 表示轮胎的滚动速度; $v_{ij}$ 表示车轮速度.4个车轮的速度为

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{fl}} &= \left( v_x - \frac{d_f}{2} \omega \right) \cos \delta + (v_y + a\omega) \sin \delta, \\ v_{\text{fr}} &= \left( v_x + \frac{d_f}{2} \omega \right) \cos \delta + (v_y + a\omega) \sin \delta, \\ v_{\text{fl}} &= v_x - \frac{d_f}{2} \omega, \\ v_{\text{rr}} &= v_x + \frac{d_f}{2} \omega. \end{aligned} \right\} (7)$$

轮胎侧向力表达式中各特征参数如下:

$C_2 = b_0, D_2 = b_1 F_z^2 + b_2 F_z, B_2 = b_3 \sin(2\arctan(F_z/b_4)) / (C_2 D_2), E_2 = b_3 F_z^2 + b_6 F_z + b_7, S_{\text{h}2} = b_8 F_z + b_9, b_0 \sim b_9$  为侧向力公式的相关系数.

轮胎侧偏角的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\text{fl}} &= \arctan \left( \frac{v_y + a\omega}{v_x - \frac{d_f}{2} \omega} \right) - \delta, \alpha_{\text{fl}} = \arctan \left( \frac{v_y - b\omega}{v_x - \frac{d_f}{2} \omega} \right), \\ \alpha_{\text{fr}} &= \arctan \left( \frac{v_y + a\omega}{v_x + \frac{d_f}{2} \omega} \right) - \delta, \alpha_{\text{fr}} = \arctan \left( \frac{v_y - b\omega}{v_x + \frac{d_f}{2} \omega} \right). \end{aligned} \right\} (8)$$

$F_z$  为轮胎垂直载荷,会随着车辆在行驶中的运动状态而变化.假设在平坦路面运行,得到各个轮胎的垂直载荷:

$$\left. \begin{aligned} F_{z\text{fl}} &= \frac{mgb}{2L} - \frac{m a_x h_g}{2L} - \frac{m a_y h_g b}{d_f L}, \\ F_{z\text{fr}} &= \frac{mgb}{2L} - \frac{m a_x h_g}{2L} + \frac{m a_y h_g b}{d_f L}, \\ F_{z\text{rl}} &= \frac{mga}{2L} + \frac{m a_x h_g}{2L} - \frac{m a_y h_g a}{d_f L}, \\ F_{z\text{rr}} &= \frac{mga}{2L} + \frac{m a_x h_g}{2L} + \frac{m a_y h_g a}{d_f L}. \end{aligned} \right\} (9)$$

其中: $g$ 为重力加速度; $h_g$ 为车辆质心到地面的距离; $a_x, a_y$ 分别为车辆的纵向和横向加速度; $L = a + b$ 表示车辆前后轴的距离.

## 1.2 执行器故障下的车辆动力学模型

将1个轮内电机及其驱动器视为1个单元,则4轮独立驱动系统包括4个单元.4个单元的输入和输出之间的关系可以用控制增益 $k_{ij}$ 来描述<sup>[7]</sup>:

$$k_{ij} = \frac{T_{ij}}{u_{ij}}. \quad (10)$$

其中: $T_{ij}$ 为各车轮的驱动转矩,由轮内电机提供; $u_{ij}$ 为各轮内电机的控制输入转矩.

当执行器故障时,执行机构的性能将受到影响,实际控制输入 $u_{ij}$ 将与期望值不同.考虑增益故障对车辆系统进行分析,其具体表达式如下:

$$u_{ij} = \eta_{ij} u_{\text{dij}}. \quad (11)$$

其中: $\eta_{ij}$ 是故障因子, $0 \leq \eta_{ij} \leq 1$ ;  $u_{\text{dij}}$ 是理想状态下

执行器的命令控制转矩的期望值.

车轮动力学模型可改写为

$$F_{xij} = \frac{k_{ij} \eta_{ij} u_{\text{dij}} - I_w \dot{\omega}_{ij}}{R}. \quad (12)$$

其中: $I_w$ 为车轮转动惯量.

执行器发生故障时系统动力学表达式为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_y \omega \\ -v_x \omega \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{m} & \frac{\cos \delta}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{\sin \delta}{m} & \frac{\sin \delta}{m} & 0 & 0 \\ \frac{I_{z1}}{I_z} & \frac{I_{z2}}{I_z} & -\frac{d_f}{2} & \frac{d_f}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x\text{fl}} \\ F_{x\text{fr}} \\ F_{x\text{rl}} \\ F_{x\text{rr}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta}{m} & -\frac{\sin \delta}{m} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \delta}{m} & \frac{\cos \delta}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{I_{z3}}{I_z} & \frac{I_{z4}}{I_z} & -b & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{y\text{fl}} \\ F_{y\text{fr}} \\ F_{y\text{rl}} \\ F_{y\text{rr}} \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} v_y \omega \\ -v_x \omega \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta}{m} & -\frac{\sin \delta}{m} & 0 & 0 \\ \frac{\cos \delta}{m} & \frac{\cos \delta}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{I_{z3}}{I_z} & \frac{I_{z4}}{I_z} & -b & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{y\text{fl}} \\ F_{y\text{fr}} \\ F_{y\text{rl}} \\ F_{y\text{rr}} \end{bmatrix} - \\ \frac{\mathbf{B}_x}{R} \begin{bmatrix} I_w \dot{\omega}_{\text{fl}} \\ I_w \dot{\omega}_{\text{fr}} \\ I_w \dot{\omega}_{\text{rl}} \\ I_w \dot{\omega}_{\text{rr}} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{B}_x}{R} \lambda(k_{ij} \eta_{ij}) \begin{bmatrix} u_{\text{dfl}} \\ u_{\text{dfr}} \\ u_{\text{drl}} \\ u_{\text{drr}} \end{bmatrix}. \quad (13) \end{aligned}$$

其中: $I_{z1} = -\frac{d_f}{2} \cos \delta + a \sin \delta, I_{z2} = \frac{d_f}{2} \cos \delta + a \sin \delta, I_{z3} = \frac{d_f}{2} \sin \delta + a \cos \delta, I_{z4} = -\frac{d_f}{2} \sin \delta + a \cos \delta$ ;

$$\mathbf{B}_x = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{m} & \frac{\cos \delta}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{\sin \delta}{m} & \frac{\sin \delta}{m} & 0 & 0 \\ \frac{I_{z1}}{I_z} & \frac{I_{z2}}{I_z} & -\frac{d_f}{2} & \frac{d_f}{2} \end{bmatrix}; \lambda(\cdot) = \text{diag} \{ \cdot \}.$$

选取系统状态向量为 $\mathbf{x} = [v_x, v_y, \omega]^T$ ,控制输入向量为 $\mathbf{u} = [u_{\text{dfl}}, u_{\text{dfr}}, u_{\text{drl}}, u_{\text{drr}}]^T, \mathbf{k} = [k_{\text{fl}}, k_{\text{fr}}, k_{\text{rl}}, k_{\text{rr}}]^T$ ,

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta_{\text{fl}}, \eta_{\text{fr}}, \eta_{\text{rl}}, \eta_{\text{rr}}]^T, f_1(\mathbf{x}) = v_y \omega - \frac{1}{m} ((F_{y\text{fl}} + F_{y\text{fr}}) \sin \delta),$$

$$f_2(\mathbf{x}) = -v_x \omega + \frac{1}{m} ((F_{y\text{fl}} + F_{y\text{fr}}) \cos \delta + (F_{y\text{rl}} + F_{y\text{rr}})),$$

$$f_3(\mathbf{x}) = \frac{1}{I_z} \left( \left( \frac{d_f}{2} \cos \delta + a \sin \delta \right) F_{y\text{fl}} - b(F_{y\text{rl}} + F_{y\text{rr}}) \right) +$$

$$\frac{1}{I_z} \left( \left( -\frac{d_f}{2} \cos \delta + a \sin \delta \right) F_{y\text{fr}} \right),$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})]^T,$$

干扰信号  $\xi(t) = \frac{-B_x I_w}{R} [\dot{w}_n, \dot{w}_f, \dot{w}_n, \dot{w}_r]^T$ .

执行器故障时的车辆动力学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \frac{1}{R} B_x \lambda(k) \lambda(\eta) u + \xi(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中:  $C$  为已知的给定矩阵;  $y(t)$  为系统输出.

## 2 非线性观测器设计

为了对非线性车辆系统的执行器故障进行分析研究,作如下假设:

假设 1<sup>[7]</sup> 控制输入  $u(t)$  有界. 在实际驾驶情景中, 输入  $u(t)$  受到车辆电气系统本身的限制, 每个电机都有其最大转矩输出能力.

假设 2<sup>[8]</sup> 系统内部干扰主要包括传动系统的摩擦、电池容量、电压变化及温度变化等, 这些因素对电动车辆系统来说是有界的. 同时在系统中, 角速度、加速度均有界. 因此, 可假设系统干扰信号  $\xi(t)$  及其关于时间的一阶导数  $\dot{\xi}(t)$  都是有界的, 即存在常数  $\xi_1$  满足  $\|\dot{\xi}(t)\| \leq \xi_1$ .

假设 3 故障因子有界,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别是其上、下界, 即  $0 \leq \eta_2 < \eta_1 \leq 1$ , 其一阶导数  $\dot{\eta}$  有界,  $\|\dot{\eta}\| \leq \eta_3$ , 其中  $\eta_3 > 0$ .

假设 4  $f(x)$  满足 Lipschitz 条件:

$$f(x_1) - f(x_2) \leq K \|x_1 - x_2\|,$$

其中  $K$  为已知的 Lipschitz 常数.

针对执行器故障下的 7 自由度车辆模型, 设计非线性观测器如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}) + \frac{1}{R} B_x \lambda(k) \lambda(\hat{\eta}) u + H(y(t) - \hat{y}(t)) + \hat{\xi}(t), \\ \dot{g}(t) &= -LC(g(t) + Ly(t) + f(\hat{x}) + \\ &\quad \frac{1}{R} B_x \lambda(k) \lambda(\hat{\eta}) u) + \delta_n(t), \\ \dot{\hat{\xi}}(t) &= g(t) + Ly(t). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中:  $\hat{x}$ ,  $f(\hat{x})$ ,  $\hat{\eta}$ ,  $\hat{\xi}(t)$  分别为  $x$ ,  $f(x)$ ,  $\eta$ ,  $\xi(t)$  的估计值;  $g(t)$  作为中间变量, 表示观测器的内部变化参数;  $H$  和  $L$  为所设计的观测器增益;  $\delta_n(t)$  为系统误差补偿器.

定义系统状态误差、系统干扰误差、故障因子误差分别为

$$e_x = x(t) - \hat{x}(t), \quad (16)$$

$$e_d = \xi(t) - \hat{\xi}(t), \quad (17)$$

$$e_\eta = \eta(t) - \hat{\eta}(t). \quad (18)$$

故障因子估计值  $\hat{\eta}$  的变化规律设计如下:

$$\dot{\hat{\eta}} = \frac{1}{R} q^{-1} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x. \quad (19)$$

其中:  $q$  是合适的 4 维矩阵;  $P$  是正定矩阵.

令  $\eta_4 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}$ ,  $\eta_5 = \frac{\eta_1 - \eta_2}{2}$ , 由假设 3 可知, 存在  $0 < N_1 < 1$  及  $0 < N_2 < 1$ , 满足  $\eta = \eta_4 + N_1 \eta_5$ ,  $\hat{\eta} = \eta_4 + N_2 \eta_5$ , 则有  $e_\eta = (N_1 - N_2) \eta_5 < \eta_5$ .

$\delta_n(t)$  作为系统误差补偿器, 其表达式设计如下:

$$\delta_n(t) = \frac{Q e_d}{\|e_d^T Q\|} \zeta_1 + \frac{Q e_d}{\|e_d^T Q\|} \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 + \delta_1. \quad (20)$$

其中:  $Q$  是正定矩阵;  $\delta_1$  为一个 3 维列向量.

引理 1<sup>[10]</sup> 若存在相同维数的实数向量  $x, y$ , 则对于任意正数  $\varepsilon$ , 有以下不等式成立:

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

定理 1 若存在正数  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  及正定矩阵  $P$  和  $Q$  使得下列不等式成立, 则式 (15) 设计的观测器系统是渐近稳定的:

$$\begin{bmatrix} I - PHC - C^T H^T P & P & K \\ P & -\varepsilon_1 I & 0 \\ K & 0 & -\frac{1}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} I \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} -QLC - C^T L^T Q & P & QLC \\ P & -I & 0 \\ C^T L^T Q & 0 & -\frac{1}{(1 + \varepsilon_2^{-1})} I \end{bmatrix} < 0. \quad (22)$$

其中:  $I$  为单位矩阵.

证明 选取李雅普诺夫函数为

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) = e_x^T P e_x + e_d^T Q e_d + e_\eta^T q e_\eta. \quad (23)$$

对式 (23) 求导得

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) + \dot{V}_3(t) = \dot{e}_x^T P e_x + e_x^T P \dot{e}_x + \dot{e}_d^T Q e_d + e_d^T Q \dot{e}_d + \dot{e}_\eta^T q e_\eta + e_\eta^T q \dot{e}_\eta. \quad (24)$$

对式 (16) 求导:

$$\dot{e}_x = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) =$$

$$f(x) - f(\hat{x}) + e_d + \frac{1}{R} B_x \lambda(k) \lambda(e_\eta) u - H C e_x. \quad (25)$$

将式 (25) 代入  $\dot{V}_1(t)$  得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= (f(x) - f(\hat{x}))^T P e_x + e_x^T P (f(x) - f(\hat{x})) + \\ &\quad e_d^T P e_x + e_x^T P e_d - e_x^T (PHC + C^T H^T P) e_x + \frac{1}{R} \cdot \\ &\quad u^T \lambda(e_\eta)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x + \frac{1}{R} e_x^T P B_x \lambda(k) \lambda(e_\eta) u. \end{aligned} \quad (26)$$

根据引理 1, 式 (26) 可改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &\leq e_x^T \left( \frac{1}{\varepsilon_1} P P + \varepsilon_1 K^2 - PHC - C^T H^T P \right) e_x + \\ &\quad e_x^T P e_x + \frac{1}{R} u^T \lambda(e_\eta)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x + \\ &\quad \frac{1}{R} e_x^T P B_x \lambda(k) \lambda(e_\eta) u + e_d^T P P e_d. \end{aligned} \quad (27)$$

对式(17)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_d &= \dot{\xi}(t) - \dot{\hat{\xi}}(t) = \dot{\xi}(t) - \dot{g}(t) - L\dot{y}(t) = -LCe_d - \\ &\frac{1}{R}LCB_x\lambda(k)\lambda(e_\eta)u - LC[f(x) - f(\hat{x})] - \delta_n(t) + \dot{\xi}(t). \end{aligned} \quad (28)$$

将式(28)代入  $\dot{V}_2(t)$  得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= - (f(x) - f(\hat{x}))^T C^T L^T Q e_d - \delta_n(t)^T Q e_d - \\ &e_d^T Q L C (f(x) - f(\hat{x})) - e_d^T Q \delta_n(t) + e_d^T Q \dot{\xi}(t) + \\ &\dot{\xi}(t)^T Q e_d - \frac{1}{R} u^T \lambda(e_\eta)^T \lambda(k)^T B_x^T C^T L^T Q e_d - \\ &\frac{1}{R} e_d^T Q L C B_x \lambda(k) \lambda(e_\eta) u - e_d^T (Q L C + C^T L^T Q) e_d. \end{aligned} \quad (29)$$

根据引理1, 式(29)可改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &\leq e_d^T \left( \frac{1}{\varepsilon_2} + I \right) Q L C C^T L^T Q e_d + \varepsilon_2 e_x^T K^2 e_x - \\ &\delta_n(t)^T Q e_d - e_d^T Q \delta_n(t) + \dot{\xi}(t)^T Q e_d + e_d^T Q \dot{\xi}(t) - \\ &e_d^T (Q L C + C^T L^T Q) e_d + \frac{1}{R^2} \tilde{\eta}^T \lambda(u)^T \lambda(k)^T. \end{aligned} \quad (30)$$

其中:  $\tilde{\eta} = [\tilde{\eta}_n, \tilde{\eta}_{\dot{n}}, \tilde{\eta}_{\ddot{n}}, \tilde{\eta}_{\ddot{\ddot{n}}}]^T$ ;  $\tilde{\eta}_{ij} = \eta_{ij} - \hat{\eta}_{ij}$ .

对式(18)求导, 得

$$\dot{e}_\eta = \dot{\eta} - \frac{1}{R} q^{-1} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x. \quad (31)$$

将式(31)代入  $\dot{V}_3(t)$  得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) &= \left( \dot{\eta} - \frac{1}{R} q^{-1} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x \right)^T q e_\eta + \\ &e_\eta^T q \left( \dot{\eta} - \frac{1}{R} q^{-1} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x \right) = \\ &\dot{\eta}^T q e_\eta + e_\eta^T q \dot{\eta} - \frac{1}{R} e_x^T P B_x \lambda(k) \lambda(u) e_\eta - \\ &\frac{1}{R} e_\eta^T \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T P e_x. \end{aligned} \quad (32)$$

将式(28), 式(30)和式(32)代入式(24)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T \left( \frac{1}{\varepsilon_1} P P + \varepsilon_1 K^2 + \varepsilon_2 K^2 + I - P H C - C^T H^T P \right) e_x + \\ &e_d^T \left( P P - Q L C - C^T L^T Q + \left( I + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) Q L C C^T L^T Q \right) e_d + \\ &e_d^T Q \dot{\xi}(t) + \dot{\xi}(t)^T Q e_d - \delta_n(t)^T Q e_d - e_d^T Q \delta_n(t) + \\ &\frac{1}{R^2} \tilde{\eta}^T \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T B_x \lambda(k) \lambda(u) \tilde{\eta} + \dot{\eta}^T q e_\eta + e_\eta^T q \dot{\eta}. \end{aligned} \quad (33)$$

$$\text{令 } \Omega_x = \frac{1}{\varepsilon_1} P P + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) K^2 + I - P H C - C^T H^T P,$$

$$\Omega_d = P P + \left( I + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) Q L C C^T L^T Q - Q L C - C^T L^T Q,$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T \Omega_x e_x + e_d^T \Omega_d e_d + \\ &\tilde{\eta}^T \left( \frac{1}{R^2} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T B_x \lambda(k) \lambda(u) \right) \tilde{\eta} - \delta_n(t)^T Q e_d - \\ &e_d^T Q \delta_n(t) + e_d^T Q \dot{\xi}(t) + \dot{\xi}(t)^T Q e_d + \dot{\eta}^T q e_\eta + e_\eta^T q \dot{\eta}. \end{aligned} \quad (34)$$

式(34)中,

$$\begin{aligned} \dot{\eta}^T q e_\eta + e_\eta^T q \dot{\eta} &= -e_\eta^T q e_\eta + (\dot{\eta}^T + e_\eta^T) q e_\eta - e_\eta^T q e_\eta + \\ &e_\eta^T q (e_\eta + \dot{\eta}) = (\dot{\eta}^T + e_\eta^T) q e_\eta + e_\eta^T q (e_\eta + \dot{\eta}) - \\ &2e_\eta^T q e_\eta \leq -2\tilde{\eta}^T q \tilde{\eta} + 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5. \end{aligned} \quad (35)$$

其中:  $q_i$  是矩阵  $q$  的对角线元素.

由于控制输入  $u(t)$  假定有界, 可得下列不等式:

$$-2q + \frac{1}{R^2} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T B_x \lambda(k) \lambda(u) \leq 0. \quad (36)$$

令  $\Omega_\eta = -2q + \frac{1}{R^2} \lambda(u)^T \lambda(k)^T B_x^T B_x \lambda(k) \lambda(u)$ , 将

式(35)和式(36)代入式(34)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T \Omega_x e_x + e_d^T \Omega_d e_d + \tilde{\eta}^T \Omega_\eta \tilde{\eta} + 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 - \\ &\delta_n(t)^T Q e_d - e_d^T Q \delta_n(t) + \dot{\xi}(t)^T Q e_d + e_d^T Q \dot{\xi}(t) \leq e_x^T \Omega_x e_x + \\ &e_d^T \Omega_d e_d + 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 - \delta_n(t)^T Q e_d - e_d^T Q \delta_n(t) + \\ &\dot{\xi}(t)^T Q e_d + e_d^T Q \dot{\xi}(t). \end{aligned} \quad (37)$$

根据式(20), 可得

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 - \delta_n(t)^T Q e_d - e_d^T Q \delta_n(t) + \dot{\xi}(t)^T Q e_d + \\ e_d^T Q \dot{\xi}(t) &\leq 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 + \dot{\xi}(t)^T Q e_d + e_d^T Q \dot{\xi}(t) - \\ &2e_d^T Q \left( \frac{Q e_d}{\|e_d^T Q\|} \zeta_1 + \frac{Q e_d}{\|e_d^T Q\|} \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \cdot \eta_5 \right) - \\ &\delta_1^T Q e_d - e_d^T Q \delta_1 \leq 2 \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 + 2 \|e_d^T Q\| \zeta_1 - \\ &2 \left( \|e_d^T Q\| \zeta_1 + \sum_{i=1}^4 q_i (\eta_3 + \eta_5) \eta_5 \right) - \delta_1^T Q e_d - e_d^T Q \delta_1 \leq \\ &-\varepsilon_3 \delta_1^T \delta_1 - \frac{1}{\varepsilon_3} e_d^T Q Q e_d < 0. \end{aligned} \quad (38)$$

其中:  $\varepsilon_3 > 0$ .

则有

$$\dot{V}(t) \leq e_x^T \Omega_x e_x + e_d^T \Omega_d e_d. \quad (39)$$

因此, 当式(21)~(22)成立时, 根据舒尔补引理等价于  $\Omega_x < 0$ ,  $\Omega_d < 0$ , 此时满足  $\dot{V}(t) < 0$ , 可保证所设计的观测器系统是稳定的.

### 3 仿真实验

在本章中, 设定车辆行驶在平滑路面, 选取双移线工况在 MATLAB/Simulink 与 CarSim 软件平台上进行联合仿真实验, 验证所设计故障诊断算法的有效性. CarSim 模型中车辆具体参数设置如下:  $m = 1765 \text{ kg}$ ,  $R = 0.354 \text{ m}$ ,  $L_f = 1.2 \text{ m}$ ,  $L_r = 1.4 \text{ m}$ ,  $d_f = 1.6 \text{ m}$ ,  $d_r = 1.6 \text{ m}$ ,  $I_z = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $I_w = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $h_g = 0.5 \text{ m}$ .

通过 MATLAB 的 YALMIP 工具箱求解线性矩阵不等式(21)~(22), 得到非线性复合观测器的增益  $H, L$  以及正定矩阵  $P$  和  $Q$  分别为

$$H = \begin{bmatrix} 6.3934 & 1.9569 & -0.6687 \\ 1.9569 & 6.3934 & 0.1343 \\ -0.6687 & 0.1343 & 6.3934 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.3526 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3526 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3526 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.3656 & 0.0876 & -0.0093 \\ 0.0876 & 0.3656 & 0.0152 \\ -0.0093 & 0.0152 & 0.3656 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1.1951 & 0 & 0 \\ 0 & 1.1951 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1951 \end{bmatrix}$$

若车辆前轮执行器在某时间段内突发故障, 则

$$\eta = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 4.5 \text{ s}, \\ 0.65, & 4.5 \text{ s} \leq t < 8 \text{ s}, \\ 1, & 8 \text{ s} \leq t < 20 \text{ s}. \end{cases}$$

图 2~4 分别为纵向速度、侧向速度和横摆角速度的实际值与估计值. 从图中可看出, 所设计的观测器具有快速的瞬态响应和较小的跟踪误差, 使得估计值很好地跟踪实际状态, 观测误差渐近稳定. 此外, 随着纵向速度增加, 系统状态也能获得良好的估计.

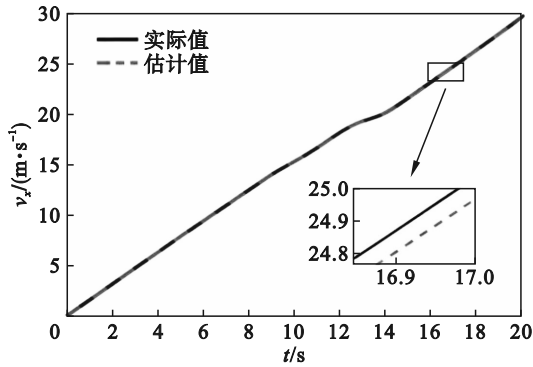


图 2 纵向速度  $v_x$  及其估计值

Fig. 2 Longitudinal velocity  $v_x$  and its estimation values

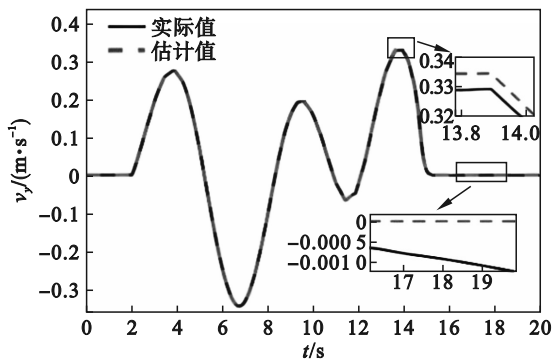


图 3 侧向速度  $v_y$  及其估计值

Fig. 3 Lateral velocity  $v_y$  and its estimation values

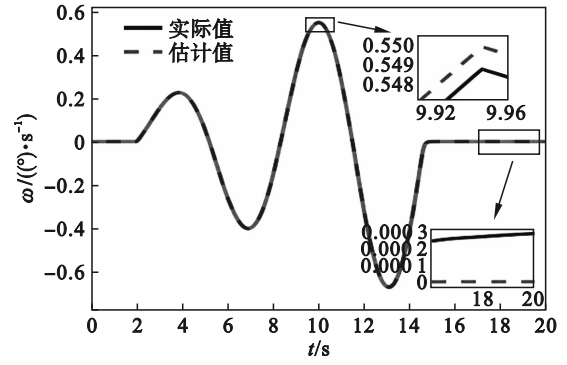


图 4 横摆角速度  $\omega$  及其估计值

Fig. 4 Yaw velocity  $\omega$  and its estimation values

图 5~8 给出了故障因子及干扰信号的估计情况. 由仿真结果可知, 在非线性的车辆系统存在执行器故障的情况下, 所设计的观测器能够较为准确地估计出故障值. 同时, 车辆前轮在第 4.5 s 及第 8 s 发生故障变化的瞬间, 由于轮胎滚动速度  $w_{ij}$  一阶导数的影响, 干扰信号会出现一定程度的突变, 但之后能立刻跟踪相应实际值, 保证系统可以快速达到渐近稳定状态, 验证所提出的非线性观测器的有效性.

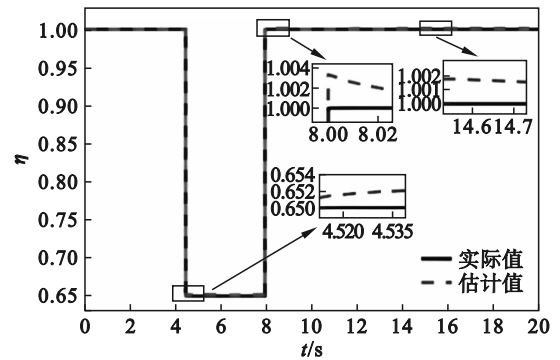


图 5 故障因子  $\eta$  及其估计值

Fig. 5 Fault factor  $\eta$  and its estimation values

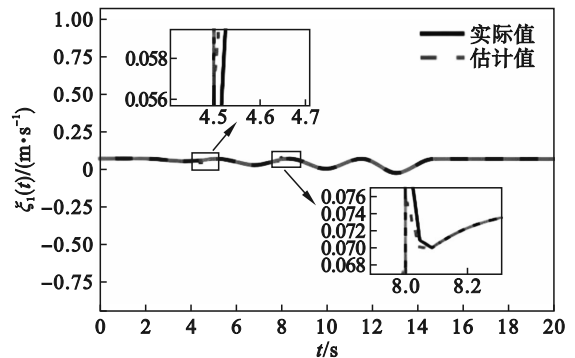
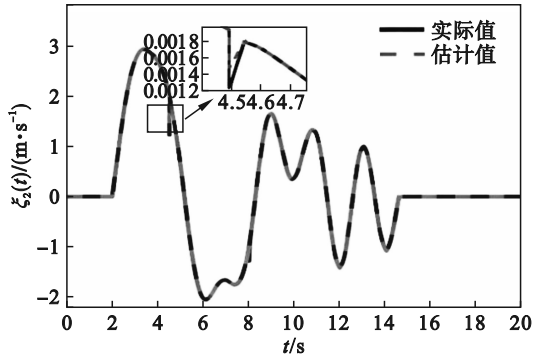
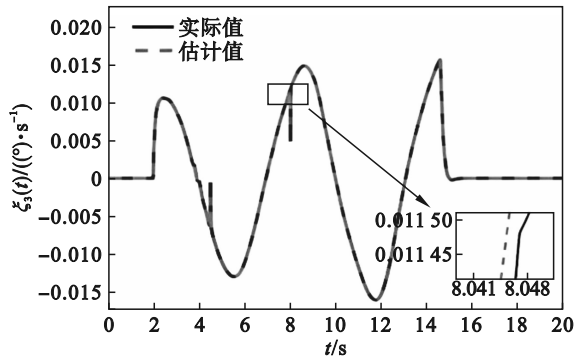


图 6  $\zeta_1(t)$  及其估计值

Fig. 6  $\zeta_1(t)$  and its estimation values

图 7  $\zeta_2(t)$  及其估计值Fig. 7  $\zeta_2(t)$  and its estimation values图 8  $\zeta_3(t)$  及其估计值Fig. 8  $\zeta_3(t)$  and its estimation values

## 4 结 语

本文针对执行器故障下的 7 自由度非线性车辆模型,考虑系统内部干扰,设计了基于非线性观测器的故障诊断算法,实现对系统的状态、干扰及故障的同时估计.通过构造李雅普诺夫函数将观测器设计重构为一个线性矩阵不等式约束求解问题,给出了相关理论证明.结合车辆的实际驾驶环境,选取双移线工况通过 MATLAB/Simulink 与 CarSim 联合仿真,结果表明,当车辆执行器发生突变故障时,本文所设计的非线性观测器具有良好的故障诊断及信息估计性能,能快速响应且可以较为准确地检测出车辆信息及故障变化,验证了该观测器的稳定性和可靠性,具

有重要的现实意义.在未来工作中,将根据观测器获得的估计信息对理想转矩进行优化的容错控制研究,使系统状态能更好地跟踪期望值.

### 参考文献:

- [ 1 ] Zhou H, Jia F, Jing H, et al. Coordinated longitudinal and lateral motion control for four wheel independent motor-drive electric vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 3782-3790.
- [ 2 ] Heydrich M, Ricciardi V, Ivanov V, et al. Integrated braking control for electric vehicles with in-wheel propulsion and fully decoupled brake-by-wire system [J]. *Vehicles*, 2021, 3(2): 145-161.
- [ 3 ] Xiong H Y, Wang Z J, Wu G H, et al. Steering actuator fault diagnosis for autonomous vehicle with an adaptive denoising residual network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71(1): 1-13.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Pan J T, Nguyen A T, Guerra T M, et al. Vehicle actuator fault detection with finite-frequency specifications via Takagi-Sugeno fuzzy observers: theory and experiments [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(1): 407-417.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Li F Y, Chen Y, Tang H. Event-triggered adaptive fault tolerant sliding mode control for FWID-EV [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(4): 9192-9208.
- [ 9 ] Zhao J, Wang X W, Liang Z C, et al. Adaptive event-based robust passive fault tolerant control for nonlinear lateral stability of autonomous electric vehicles with asynchronous constraints [J]. *ISA Transactions*, 2022, 127: 310-323.
- [ 10 ] 王宏伟, 张昊天, 韩杰, 等. 不确定车辆电子稳定控制系统传感器故障估计 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(1): 1-7, 62.  
(Wang Hong-wei, Zhang Hao-tian, Han Jie, et al. Sensor fault estimation of uncertain vehicle electronic stability control system [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(1): 1-7, 62.)