

# 汽车稳定性控制系统关键传感器故障诊断

余卓平<sup>1,2</sup>, 王竑博<sup>1,2</sup>, 熊璐<sup>1,2</sup>, 陈晨<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 设计了基于解析模型的故障诊断算法实现传感器信号的自诊断功能, 首先建立关键传感器的故障诊断算法基本框架, 然后利用不同的故障诊断模型分别设计了基于等价方程与基于观测器两种故障诊断算法. 等价方程算法利用车辆线性单轨模型及车辆运动学方程, 将车辆操纵稳定性控制需求的传感器联系起来, 并用于彼此的相互诊断. 观测器方法利用车辆非线性单轨模型, 通过建立龙贝格观测器提取传感器故障信息. 从灵敏度与误报率两方面出发, 提出了将两种算法有效融合的算法改进措施, 重新制定诊断规则. 实车试验的结果表明融合算法能够准确快速地诊断出微小故障, 并给出故障等级.

**关键词:** 解析模型; 等价方程; 观测器; 融合算法; 实车试验

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

## Fault Diagnosis of Vehicle Stability Control System Key Sensors

YU Zhuoping<sup>1,2</sup>, WANG Hongbo<sup>1,2</sup>, XIONG Lu<sup>1,2</sup>, CHEN Chen<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The article designed a fault diagnosis algorithm based on analytic model to achieve the self-diagnosis function of sensors signals. Firstly the article established the fundamental frame, Then two fault diagnosis algorithms were designed based on parity equations and observer. Parity equation algorithm was designed by linear vehicle model and kinematic equations which show the relations among the different key sensors signals of vehicle stability control system, and was used for them to diagnose each other. Observer algorithm was designed by nonlinear vehicle model to obtain fault information by Dragon Berger observer.

Considering sensitivity and false warning rate, the fusion of the two algorithms were proposed to improve diagnosis effect, and the diagnosis rules were also reset. Finally, the fault diagnosis algorithm was testified through several kinds of on-road tests with different working conditions. The results showed that the algorithm can provide accurate different types fault information of different sensors as well as the fault degree.

**Key words:** analytic model; parity equations; observer; fusion algorithm; on-road tests

随着人们对汽车行驶的安全性和稳定性要求不断提高, 世界各大汽车生产商都相继推出了很多辅助驾驶员操作的稳定性控制系统<sup>[1]</sup>. 横摆角速度, 侧向加速度, 方向盘转角, 轮速是车辆稳定性控制中最为关键的传感器信息. 其中横摆角速度、侧向加速度及轮速表征当前整车状态, 一般用于跟踪与控制. 而方向盘转角作为驾驶员输入, 反映了驾驶员的操作意图. 这4个传感器信息作为整个控制系统的原始输入, 其信号的准确性将直接影响到系统的控制效果, 传感器信息的偏差有可能导致操纵稳定性控制系统误触发或误操作, 甚至造成重大交通安全事故, 因此传感器的故障诊断非常重要. 本文将重点研究以上4种传感器的故障诊断方法, 使得当车辆运行时对传感器输出信号进行检测, 若信号出现故障时, 及时警告驾驶员采取相应措施, 避免危险的发生. 这四大传感器结构布置框图如图1所示, 其中控制系统为车辆稳定性控制系统(VSC).

故障诊断技术, 从诊断利用的冗余信息上划分, 可分为硬件冗余方法和软件冗余方法. 对于十分关键又难以通过软件层面分析诊断故障的部件, 通常通过硬件冗余保证其可靠, 如控制器, 线控系统(线

收稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711200), 国家自然科学基金(51475333)

第一作者: 余卓平(1960—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车辆工程. E-mail: yuzhuoping@tongji.edu.cn

通讯作者: 熊璐(1978—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车系统动力学与控制.

E-mail: xionglu.gm@gmail.com

控转向,线控制动).然而硬件冗余会增加结构成本,通过软件方法来实现故障诊断则具有很大的工程意义.软件冗余的故障诊断方法通常分为<sup>[2]</sup>:基于解析模型的方法,基于信号处理的方法,与基于知识的方法.

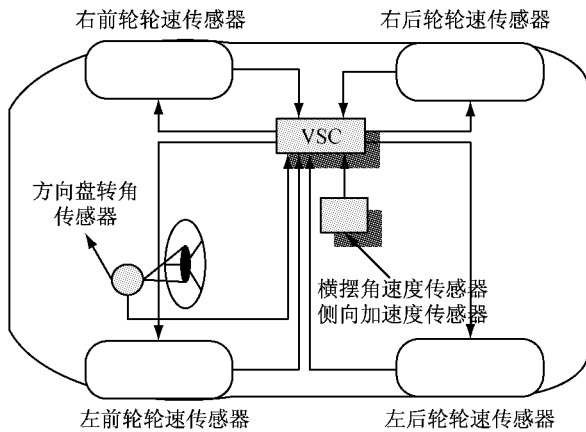


图1 稳定性控制系统传感器结构框图

Fig.1 Stability control system sensor structure diagram

文献[3-4]建立了转向执行模块与整车的联合估计模型,可以估计出小齿轮轴转角(可转换为前轮转角),车辆横摆角速度与质心侧偏角,并分别以横摆角速度与侧向加速度测量值对观测值进行修正,建立两个并行的自适应卡尔曼滤波观测器.通过设定自适应阈值建立诊断逻辑表.文献[5]提出了基于全维状态观测器的线控转向系统传感器故障诊断方法.文献[6]通过建立整车模型,悬架模型,以及俯仰和侧倾的车辆平面模型,实现对车辆垂向加速度,侧倾角,俯仰角的估计.并通过构造残差,根据工况设定自适应的阈值,判断传感器是否故障.文献[7-9]利用小波分析对方向盘转角信号及轮速信号进行去除噪声处理与信号重构.基于信号处理的故障诊断方法,不需要对象的准确数学模型,对噪声抑制能力强,有较高的灵敏度,运算量也不大,是一种很有前途的方法.文献[10]将反向传播(BP)神经网络技术应用到制动防抱死系统(ABS)故障诊断中.文献[11]将信息融合技术应用在汽车ABS系统的故障诊断中,此方法依赖于多传感器信息,成本比较高,而且需要大量的故障信息特征的积累.文献[12]介绍了基于故障树分析的故障诊断方法,实现了气动制动系统的故障诊断,该方法的缺陷是,诊断结果严重依赖故障树信息的正确性和完整性,不能诊断不可预知的故障.

目前针对车辆稳定性控制关键传感器故障诊断的相关研究,大部分研究仅从理论上分析诊断的原

理,并没有考虑实际应用中存在的问题,即使部分算法提出了实际应用的改善措施,但是并未结合实车试验对算法进行全面的分析和验证.因此,本文借鉴国内外的理论研究成果,从实际情况出发,设计了一套稳定性控制系统关键传感器的融合故障诊断算法,并通过多种工况、多种故障形式进行实车试验对算法进行分析和验证,形成一套适合应用的操纵稳定性控制系统传感器故障诊断算法.

## 1 试验平台介绍

试验平台采用与某公司合作开发的分布式驱动电动汽车(图2),平台车采用蓄电池为动力源,具有“零”排放、高效率、低噪音等优点.前悬架采用麦弗逊式悬架,后悬架采用扭转梁悬架,前轮采用轮边电机驱动(装备轮边减速器,减速比6.2),轮盘式制动器,后轮采用轮毂电机驱动,股式制动器.整车参数如表1示,电机参数见表2.



图2 分布式驱动电动汽车试验平台

Fig.2 Distributed drive electric vehicle test platform

表1 整车参数汇总

参数	值	参数	值
整车质量/kg	1 380	横摆转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1 833.8
轴距/m	2.305	前轮距/m	1.325
前轴到质心距离/m	1.116	后轮距/m	1.390
后轴到质心距离/m	1.187	前轴侧偏刚度/(kN·rad <sup>-1</sup> )	-71.219
整车质心高度/m	0.525	后轴侧偏刚度/(kN·rad <sup>-1</sup> )	-108.230
转向传动比	16.68	车轮滚动半径/m	0.29

表2 试验平台驱动电机参数列表

参数	轮边电机(前轴)	轮毂电机(后轴)
额定功率/kW	15	5
峰值功率/kW	25	7.5
额定转矩/(N·m)	35.8	100
峰值转矩/(N·m)	90	150
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	4 000	480
最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	9 500	1 350

## 2 测试系统故障诊断算法

本文故障诊断算法的设计目标为:针对横摆角速度信息、侧向加速度信息、方向盘转角信息、轮速信息,考虑突变故障,缓变故障,间隙性故障情况,在传感器发生故障后,及时给出传感器的故障位置信息,及故障程度信息.算法在设计时,仅考虑同一时刻只有一种传感器发生故障情况.故障类型如图3所示,故障程度分为三个等级,见表3.

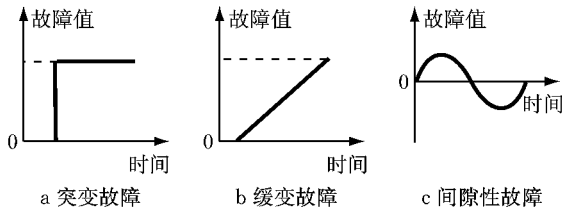


图3 传感器故障模拟

Fig.3 Sensor fault simulation

表3 故障等级划分

Tab.3 Fault grading

故障等级	横摆角速度/( $^{\circ}$ ·s $^{-1}$ )	侧向加速度/(m·s $^{-2}$ )	方向盘转角/ $^{\circ}$	轮速/(m·s $^{-1}$ )
1	2~10	0.5~2	5~40	0.5~3
2	10~20	2~4	40~60	3~6
3	>20	>4	>60	>6

### 2.1 故障诊断算法

文中设计了基于等价方程与观测器相融合的故障诊断算法.基于等价方程的故障诊断算法,冗余模型较多,限制条件较多,所以误报率低.但是当轮胎处于线性区域时可以较好地工作,进入非线性区域后则会存在漏报的现象,灵敏度较差.基于观测器算法对阈值设定的要求较高,阈值设定的不合理可能造成误报.但该算法对传感器信息的估计较为精确,可容许设定的阈值更小,不容易漏报,可以识别更小的故障,诊断灵敏度较高,且受工况影响更小.根据设计的两种故障诊断算法的特点,采取合适的故障诊断规则及故障统计方法将两种算法相融合,发挥两种算法的优势,以期得到更好的故障诊断结果.下面就对该融合算法做一个详细的介绍.

#### 2.1.1 基于等价方程故障诊断算法

基于等价方程的故障诊断算法通过不同传感器输出信号之间常规工况下的运动学关系相互校验,实现相互的故障诊断.算法可诊断的传感器包括:横摆角速度传感器,侧向加速度传感器,方向盘转角传感器,轮速传感器.

##### (1) 故障诊断模型推导

线性二自由度车辆模型的运动方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(C_f + C_r)}{m \cdot u} & -1 - \frac{(l_f C_f - l_r C_r)}{m \cdot u^2} \\ -\frac{(l_f C_f - l_r C_r)}{J_z} & -\frac{(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{J_z \cdot u} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f \\ l_f C_f \\ J_z \end{bmatrix} \delta_f \quad (1)$$

式中: $m$ 为整车质量; $J_z$ 为车辆横摆转动惯量; $\beta$ 为车辆质心处侧偏角; $\dot{\Psi}$ 为横摆角速度; $\ddot{\Psi}$ 为横摆角加速度; $C_f$ 为前轴等效侧偏刚度; $C_r$ 为后轴等效侧偏刚度; $l_f$ 为质心到前轴距离; $l_r$ 为质心到后轴距离; $u$ 为车辆质心处的纵向速度; $\delta_f$ 为前轮转角.

设 $i_{sw}$ 为转向传动比,则前轮转角与方向盘转角的关系表示为

$$\delta_f = \frac{\delta_{sw}}{i_{sw}} \quad (2)$$

式中, $\delta_{sw}$ 为方向盘转角.

由线性二自由度车辆模型可得横摆角速度稳态响应增益,表达式如下:

$$\frac{\dot{\Psi}}{\delta_{sw}} = \frac{u/l}{1 + Ku^2} \quad (3)$$

式中: $K = \frac{m}{l^2} \left( \frac{l_f}{C_r} - \frac{l_r}{C_f} \right)$ ;  $l$ 为轴距.

横摆角速度与方向盘转角可以由式(4)近似估计:

$$\dot{\Psi} = \frac{\delta_{sw} \cdot u}{l \cdot i_{sw} \left( 1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2} \right)} \quad (4a)$$

$$\delta_{sw} = \frac{l \cdot i_{sw}}{u} \left( 1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2} \right) \dot{\Psi} \quad (4b)$$

式中, $u_{ch} = \sqrt{1/K}$ 为特征车速.

##### ① 运动学模型

忽略轮胎打滑,横摆角速度与轮速的关系可以表示为

$$\dot{\Psi} = \frac{v_{fl} - v_{rl}}{b_f} = \frac{v_{rr} - v_{rl}}{b_r} \quad (5a)$$

$$v_i = \omega_i \cdot R, \quad i = fl, fr, rl, rr \quad (5b)$$

式中: $\omega_i$ 为各车轮转速; $R$ 为车辆滚动半径; $v_i$ 为各车轮轮心速度;fl,fr,rl,rr分别表示前左轮、前右轮、后左轮、后右轮; $b_f, b_r$ 分别为前、后轮距.

横摆角速度 $\dot{\Psi}$ 与侧向加速度的关系可表示为

$$a_y = u \cdot (\dot{\beta} + \dot{\Psi}) \quad (6)$$

式中,  $a_y$  为整车侧向加速度.

质心侧偏角变化较慢时式(6)可以近似为

$$a_y = u \cdot \dot{\Psi} \quad (7)$$

② 轮速差异模型

由于式(5)只能得到某一轴的轮速故障信息, 不能从中分离出左、右轮的轮速故障信息, 为能够诊断出某一车轮的轮速故障, 这里引入式(8)~(10)对轮速进行平均, 并构造轮速残差  $\Delta v_i (i=fl, fr, rl, rr)$  反映某一个轮速与其他轮速的差异. 由于等价方程中需要车速信息, 车速估计值用轮速平均值替代.

$$\hat{u} = \frac{1}{3} \sum_{j=1, j \neq i}^4 v_j \quad (8)$$

$$v_i = \max_{k=1, \dots, 4} \left\{ \left| v_k - \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j \right| \right\} \quad (9)$$

$$\Delta v_i = v_i - \hat{u} \quad (10)$$

式(8)~(10)中:  $\hat{u}$  为车速估计值;  $v_j$  为各个轮速换算得到的车速.

将式(1)~(10)结合可推出表 4 冗余模型.

根据表 4 中①~⑫模型构造 12 个残差, 加上 4 个轮速残差共构造 16 个残差信号:

$$r_i = y - \hat{y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (11)$$

式中,  $i=1, 2, 3, 4$  为横摆角速度残差,  $i=5, 6, 7, 8$  为侧向加速度残差,  $i=9, 10, 11, 12$  为方向盘转角残差,  $i=13, 14, 15, 16$  为轮速残差.

(2) 残差特征提取

利用故障诊断冗余模型得到的 16 个残差信号经过特征提取模块输出 16 个 0 或 1 的数值. 式(12)为残差特征函数. 当不同的传感器出现故障时, 残差序列会表现出不同的 0 或 1 的残差特征, 通过制定合适的诊断规则, 即可确定传感器的故障位置.

$$S_i = \begin{cases} 0 & |r_i| < \sigma_i, \\ 1 & |r_i| \geq \sigma_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (12)$$

阈值的设定要求在传感器不发生故障时, 残差在阈值范围之内. 而当传感器发生故障时, 残差要超过阈值. 将车辆行驶工况分为三种: 直线行驶工况, 常规工况(转向), 及非常规转向工况, 针对不同的工

况设定不同的阈值. 由于当轮胎进入非线性工作区后, 很难确定残差的范围, 本文通过故障诊断规则限制算法仅在常规工况下工作, 即侧向加速度小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的工况下. 直线工况的判断准则如下:

$$(|\delta_{sw}| < \sigma_\delta) + (|\dot{\Psi}| < \sigma_{\dot{\Psi}}) + (|a_y| < \sigma_{a_y}) \geq 2$$

式中: 方向盘转角残差阈值  $\sigma_\delta = 8^\circ$ , 横摆角速度残差阈值  $\sigma_{\dot{\Psi}} = 5^\circ$ , 侧向加速度残差阈值  $\sigma_{a_y} = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 实际应用中可适当调整阈值.

表 4 等价方程模型及其适用条件列表

Tab.4 Equivalent equation model and its applicable condition list

序号	冗余模型	模型适用条件
①	$\dot{\Psi} = \frac{v_{fr} - v_{fl}}{b_f}$	前轮无打滑
②	$\dot{\Psi} = \frac{v_{rr} - v_{rl}}{b_r}$	后轮无打滑
③	$\dot{\Psi} = \frac{a_y}{u}$	质心侧偏角变化较慢, 且车速不为 0
④	$\dot{\Psi} = \frac{\delta_{sw} \cdot u}{l \cdot i_{sw} (1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2})}$	轮胎处于线性工作区, 且方向盘转角不能过大
⑤	$a_y = u \frac{v_{fr} - v_{fl}}{b_f}$	同①
⑥	$a_y = u \frac{v_{rr} - v_{rl}}{b_r}$	同②
⑦	$a_y = u \cdot \dot{\Psi}$	同③
⑧	$a_y = \frac{\delta_{sw}}{l \cdot i_{sw}} \frac{u^2}{(1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2})}$	同④
⑨	$\delta_{sw} = \frac{l \cdot i_{sw}}{u} (1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2}) \frac{v_{fr} - v_{fl}}{b_f}$	同(①且④)
⑩	$\delta_{sw} = \frac{l \cdot i_{sw}}{u} (1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2}) \frac{v_{rr} - v_{rl}}{b_r}$	同(②且④)
⑪	$\delta_{sw} = \frac{l \cdot i_{sw}}{u^2} (1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2}) a_y$	④
⑫	$\delta_{sw} = \frac{l \cdot i_{sw}}{u} (1 + \frac{u^2}{u_{ch}^2}) \dot{\Psi}$	④

利用上述阈值设定方法, 将工况分为直线与转向两种工况设定阈值, 根据等价方程在各种工况下的残差幅值大小初步来确定阈值, 经过离线仿真实验最终确定的阈值如表 5 所示.

表 5 等价方程算法残差阈值

Tab.5 Equivalent equation algorithm residual threshold

	$th_1$	$th_2$	$th_3$	$th_4$	$th_5$	$th_6$	$th_7$	$th_8$	$th_9$	$th_{10}$	$th_{11}$	$th_{12}$	$th_{13}$	$th_{14}$	$th_{15}$	$th_{16}$
直线	2	6	2	2	0.3	1.2	0.3	0.3	8	12	8	8	0.5	0.5	0.5	0.5
转向	4	9	4	5	1	1.5	0.8	1.1	30	50	25	25	0.9	0.9	0.9	0.9

2.1.2 基于观测器的故障诊断算法

基于观测器的故障诊断算法: 基于车辆非线性单轨模型建立龙贝格观测器估计传感器信息, 利用

可以测量的横摆角速度, 侧向加速度信号作为反馈信息, 可以分别建立两个龙贝格观测器. 双观测器提供了信息的冗余, 可以从残差的特征中分离出不同

传感器的故障信息. 观测器采用非线性的轮胎模型, 在车辆处于极限工况时可以较好地估计传感器状态, 进而提高算法在极限工况时的诊断效果. 算法诊断目标: 横摆角速度传感器, 侧向加速度传感器, 方向盘转角传感器.

(1) 龙贝格观测器建立

采用反正切轮胎模型的二自由度车辆模型如式(14)所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2]^T = [\beta \quad \dot{\Psi}]^T \\ \mathbf{y} &= [y_1 \quad y_2]^T = [\dot{\Psi} \quad a_y]^T \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{cases} \frac{1}{m \cdot u} \left\{ c_{f1} \tan[c_{f2}(\delta_f - x_1 - \frac{l_f}{u}x_2)] \cos \delta_f + c_{r1} \tan[c_{r2}(-x_1 + \frac{l_r}{u}x_2)] \right\} - x_2 \\ \frac{1}{J_z} \left\{ l_f c_{f1} \operatorname{atan}[c_{f2}(\delta_f - x_1 - \frac{l_f}{u}x_2)] \cos \delta_f - l_r c_{r1} \tan[c_{r2}(-x_1 + \frac{l_r}{u}x_2)] \right\} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中:  $c_{f1}, c_{f2}, c_{r1}, c_{r2}$  为轮胎模型参数. 经拟合得:  $c_{f1} = 4270.7 \text{ N} \cdot \text{rad}^{-1}, c_{f2} = 19.8 \text{ N} \cdot \text{rad}^{-1}, c_{r1} = 4597.3 \text{ N} \cdot \text{rad}^{-1}, c_{r2} = 24.9 \text{ N} \cdot \text{rad}^{-1}$ .

分别以横摆角速度信息与侧向加速度信息做反馈可以建立两个龙贝格观测器, 如下所示:

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + L_1 \cdot (y_1 - \hat{y}_1) \quad (15a)$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}, u) \text{ (观测器 1)} \quad (15b)$$

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + L_2 \cdot (y_2 - \hat{y}_2) \quad (16a)$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}, u) \text{ (观测器 2)} \quad (16b)$$

(2) 反馈信息融合

融合函数将某一观测器对传感器信号的估计值与传感器信号的测量值进行融合, 并将融合后的信号作为另一个观测器的反馈信息, 融合后的信号值  $y_{fi}$  如式(17)所示.

$$y_{fi} = (1 - \lambda_i)y_i + \lambda_i \hat{y}_i^j, \quad i, j = 1, 2 \quad (17)$$

将两个观测器的残差值取平均(式(18))作为故障估计值, 并用于判断故障等级, 同时用残差平均值控制切换函数的权重系数的调整(式(19)).

$$R_i = \frac{1}{2} (|r_i^1| + |r_i^2|) = \frac{1}{2} \cdot (|y_i - \hat{y}_i^1| + |y_i - \hat{y}_i^2|); \quad (18)$$

式中,  $r_i^j = y_i - \hat{y}_i^j, i, j = 1, 2$ .

$$\lambda_i = g(R_i) \quad (19)$$

权重调整模块参照常见的隶属函数选取(式(20)), 参数  $a, b$  控制用于控制权重由 0 至 1 的切换速度, 参数  $c$  为切换的阈值, 残差值大于阈值  $c$  时, 则权重系数开始由 0 至 1 切换. 式中  $a = 3000, b = 2$ . 切换阈值  $c$  根据实际情况确定.

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x \geq c \\ 1 - \frac{1}{1 + a(x - c)^b}, & x < c \end{cases} \quad (20)$$

加入融合模块的观测器方程为

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + L_1 \cdot (y_{f1} - \hat{y}_1) \quad (21a)$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}, u) \text{ (观测器 1)} \quad (21b)$$

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + L_2 \cdot (y_{f2} - \hat{y}_2) \quad (22a)$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}, u) \text{ (观测器 2)} \quad (22b)$$

最终确定的切换阈值如表 6 所示.

表 6 融合函数切换阈值  $c$

Tab.6 Fusion function switching threshold			
$c$	直线	常规工况(转向)	非常规工况
观测器 1/(°·s <sup>-1</sup> )	3	5	8
观测器 2/(m·s <sup>-2</sup> )	0.6	0.8	1.2

2.2 融合算法故障诊断规则

从实际应用角度出发, 提取等价方程算法中估计效果较好的方程, 结合观测算法, 制定诊断规则, 融合的故障诊断算法可以提高对横摆角速度传感器, 侧向加速度传感器, 方向盘转角传感器的诊断效果. 对于轮速传感器的诊断, 由于观测算法无法实现, 诊断算法仍沿用等价方程算法. 诊断规则如表 7 所示. 表中,  $\Delta$  为故障值.

表 7 融合算法诊断规则

故障位置	观测器算法		等方程算法					
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$S_3$	$S_4$	$S_7$	$S_8$	$S_{11}$	$S_{12}$
$\dot{\Psi} \pm \Delta$	1	0	1	1	0	0	0	0
$a_y \pm \Delta$	0	1	0	0	1	1	0	0
$\delta \pm \Delta$	1	1	0	0	0	0	1	1

注: 0 表示残差未超过阈值, 1 表示残差超过阈值.

2.3 融合算法故障计数统计

对于在线故障诊断系统而言, 需要保证故障诊断信息的可靠性, 因此必须对初级诊断报错的结果进行后处理, 将处理后更加可靠的结果作为最终的故障信息. 本文采用计数统计的方法对初级诊断结果进行后处理, 在线对一段时间内报故障的时间占该时间的比率进行计算, 通过对在线计算的故障统计结果设定阈值作为最终的诊断结果.

统计时间的长短会影响故障诊断的实时性及可靠性. 因此可以建立不同时间长度的故障统计处理

模块,用于检测不同的故障,对于突变故障以及缓变故障,可以用较短统计时间的故障统计模块,传感器信号偏离正常值之后可以及时识别故障.对于间隙性故障,通常由接触不良,零配件老化造成,故障可以较长时间持续存在,对诊断的及时性要求可以适当降低,用较长时间长度的故障统计模块,以更加准确地识别故障的存在.本文对短时故障统计时间设置为 1 s,长时故障统计时间设置为 20 s,对故障统计结果设定的阈值为 30%.

### 3 故障诊断算法实车试验

本节通过一组合工况对融合故障诊断算法进行验证.该组合工况包含车辆正常直线行驶工况,转弯行驶工况,以及方向盘转角正弦输入与阶跃输入等剧烈侧向工况.图 4—5 为组合工况方向盘转角与车速信息,方框中放大部分图像为方向盘角阶跃工况与正弦工况输入时刻.故障模拟方式如表 8 所示.

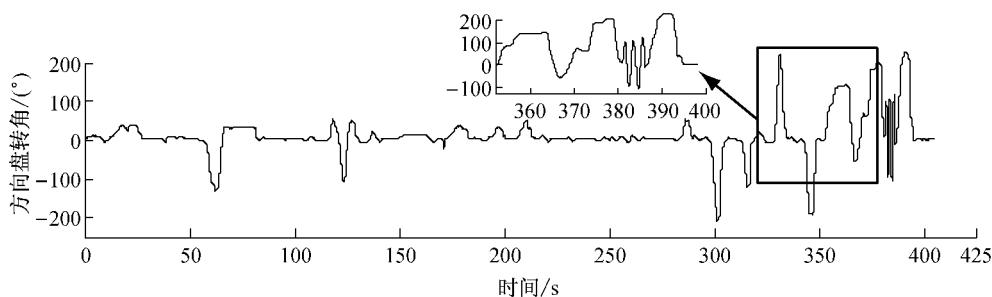


图 4 组合工况方向盘转角信息

Fig. 4 Steering wheel angle information at comprehensive working condition

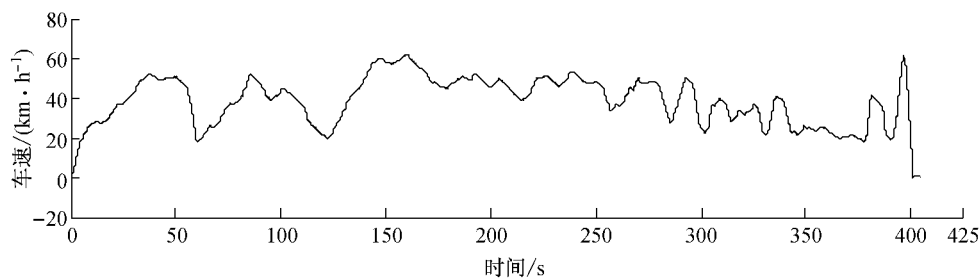


图 5 组合工况车速信息

Fig. 5 Velocity information at comprehensive working condition

表 8 故障模拟方式

Tab. 8 Fault simulation method

1	所有传感器(不同时段)	偏移	模拟突变故障
2	所有传感器(不同时段)	斜坡	模拟缓变故障
3	横摆角速度传感器	正弦	模拟间隙性故障

#### 3.1 突变故障

故障模拟:横摆角速度传感器  $6^\circ \cdot s^{-1}$  突变故障(加载时间:10~100 s);侧向加速度传感器  $1 m \cdot s^{-2}$  突变故障(加载时间:110~200 s);加载方向盘转角  $25^\circ$  突变故障(加载时间:210~300 s);轮速传感器  $1 m \cdot s^{-1}$  故障突变量(加载时间:310~400 s).

由图 6,突变故障模拟实验结果如下:

在 10~100 s,算法给出了准确的横摆角速度故障位置信息,在故障等级估计过程中,虽抖动较为剧烈,但依然给出了准确的故障等级信息.在其他没有故障的情况下,算法没有误报;

在 110~200 s,算法给出了准确的侧向加速度

故障位置信息,在故障等级估计过程中,虽抖动较为剧烈,但依然给出了准确的故障等级信息.在其他没有故障的情况下,算法没有误报;

在 210~300 s,由于车辆处于极限工况,方向盘转角故障诊断结果出现短暂的漏报,在故障等级估计过程中,虽抖动较为剧烈,但依然给出了较为准确的故障等级信息.在其他没有故障的情况下,算法没有误报;

在 310~400 s,由于车辆处于极限工况,轮速故障诊断结果出现短暂的漏报,在故障等级估计过程中,虽抖动较为剧烈,但依然给出了较为准确的故障等级信息.在其他没有故障的情况下,算法没有误报.

#### 3.2 缓变故障

故障模拟:从第 10 s 至 100 s 加载横摆角速度故障,故障从  $2^\circ \cdot s^{-1}$  匀速增加至  $32^\circ \cdot s^{-1}$ ;110~

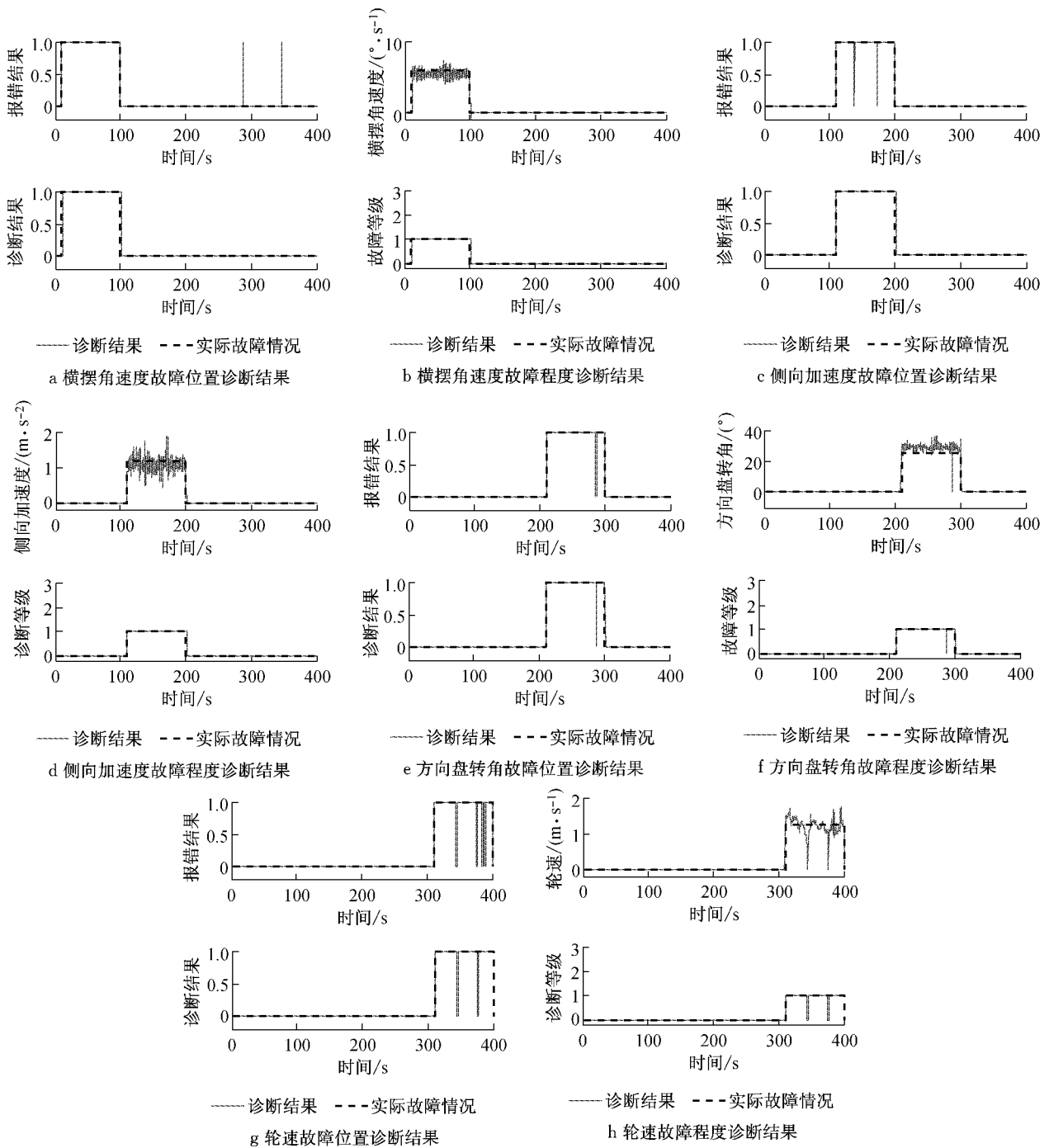


图 6 各传感器突变故障诊断结果

Fig.6 Each sensor step change fault diagnosis results

200 s 加载侧向加速度故障,故障从  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  匀速增加至  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 第 210~300 s 加载方向盘转角故障,故障从  $5^\circ$  匀速增加至  $85^\circ$ ; 310~400 s 加载轮速故障,故障从  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  匀速增加至  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

由图 7,缓变故障模拟实验结果如下:

在 10~100 s,因为横摆角速度故障开始比较小,算法无法识别,当故障逐渐增加到算法灵敏度允许范围之后,则及时给出了故障信息,且故障等级判

断准确,可随故障程度的变化及时更新.在其他没有故障的情况下,算法没有误报;

在 110~200 s,当侧向加速度出现故障时,及时给出了故障信息,且故障等级判断准确,可随故障程度的变化及时更新.在其他没有故障的情况下,算法没有误报;

在 210~300 s,当方向盘转角出现故障时,及时给出了故障信息,且故障等级判断准确,可随故障程度的变化及时更新.在其他没有故障的情况下,算法

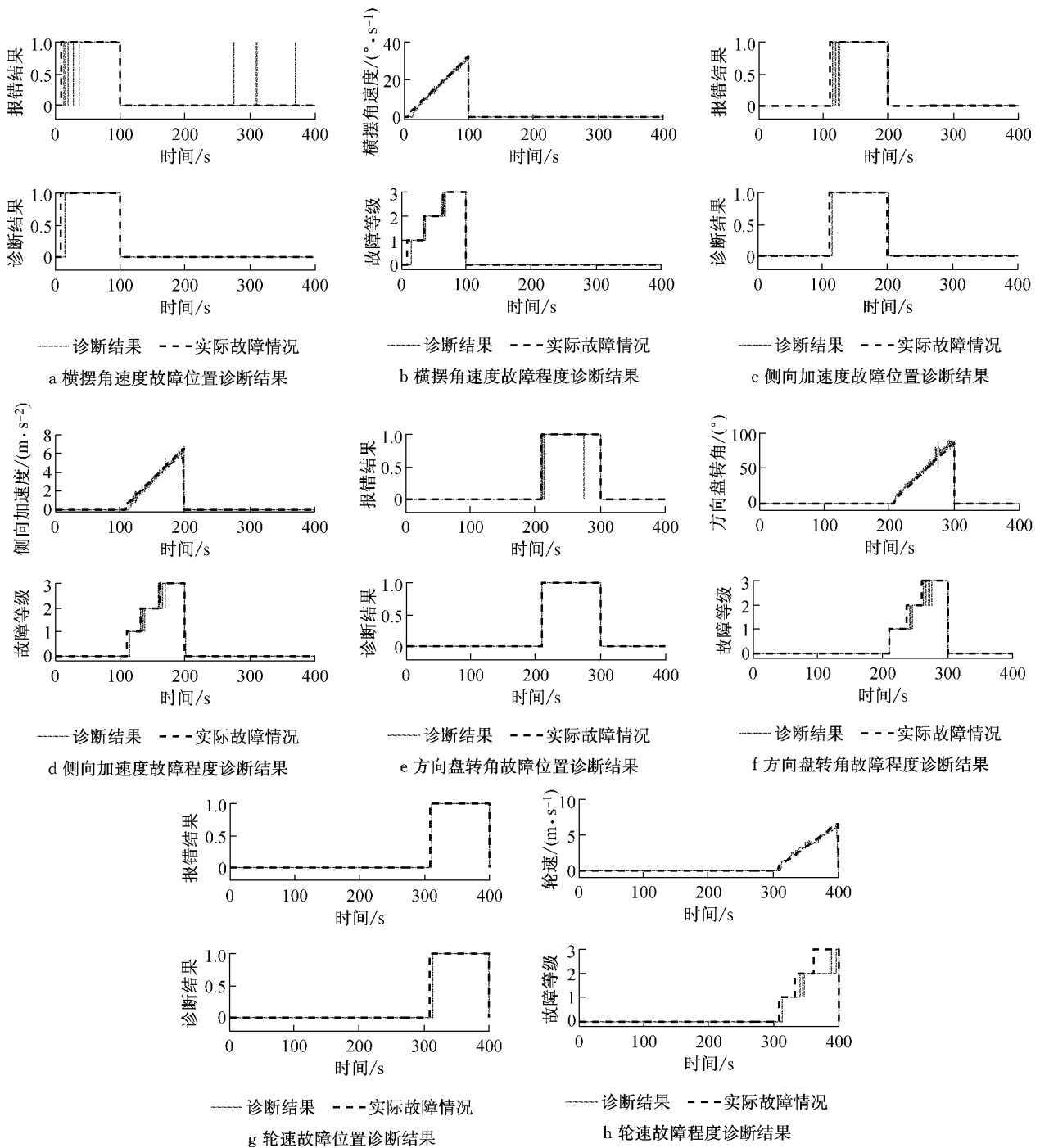


图 7 各传感器缓变故障诊断结果

Fig. 7 Each sensor ramp change fault diagnosis results

没有误报;

在 310~400 s,当轮速信号出现故障时,起初故障信息有短暂的延时,当故障逐渐增加到算法灵敏度允许范围之后,则及时给出了故障信息,且故障等级判断准确,可随故障程度的变化及时更新.在其他没有故障的情况下,算法没有误报.

### 3.3 间隙性故障

故障模拟:横摆角速度传感器信号叠加正弦信

号,正弦幅值  $6^\circ \cdot s^{-1}$ ,周期 8 s.

传感器发生间隙性故障表现为,故障时有时无,正常信号叠加正弦信号后即表现为时而在正常范围,时而超出正常范围.因此在图 8—9 中,初级诊断结果会出现不连续的现象,通过故障统计之后,算法可以给出准确没有漏报的故障信息.这说明故障统计模块可以较好地处理间隙性故障情况.由于故障统计时间较长,算法报故障延时了 10 s,但考虑到间



隙性故障在实际中通常持续时间较长,且对算法诊断的实时性要求不高,因此算法可以满足应用要求。

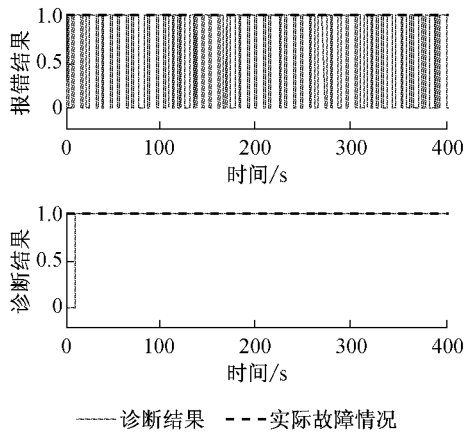


图8 故障位置诊断结果

Fig.8 Fault position diagnosis results

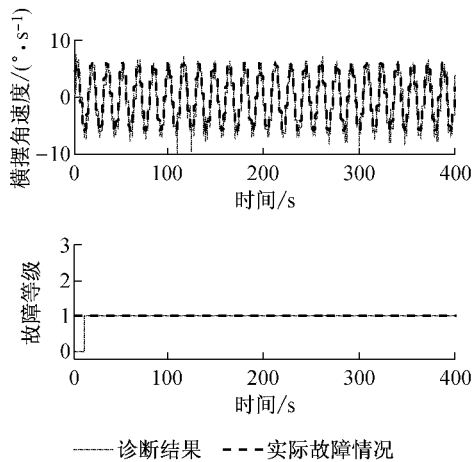


图9 故障程度诊断结果

Fig.9 Fault degree diagnosis results

## 4 总结

本文设计了一套针对操纵稳定性控制系统关键传感器的故障诊断算法。算法的诊断目标包括:横摆角速度传感器,侧向加速度传感器,方向盘转角传感器,及轮速传感器。论文从故障诊断的灵敏度与误报情况两方面考虑,将等价方程算法与观测器算法相融合。同时对故障计数统计方法进行分析,提出了通过短时故障统计对突变故障,缓变故障进行诊断,长时故障统计对间隙性故障进行诊断的策略。论文最后采用综合工况对算法的有效性进行了实车试验。结果证明,算法在常规工况下,对本文考虑的各种传感器,各种故障下都能准确快速地诊断出微小故障,并且准确估计出故障大小,给出故障等级信息。在非

传感器可以准确快速地诊断出微小故障,对于方向盘转角传感器与轮速传感器的微小故障,算法会出现漏报现象。算法的故障估计值会受到工况影响,但是仍然可以比较准确地判断出故障等级,可以满足应用要求。

## 参考文献:

- [1] 张武学,熊璐,余卓平,等. 质心侧偏角估计误差对车辆稳定性控制的影响[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 857.  
ZHANG Wuxue, XIONG Lu, YU Zhuoping, *et al.* The effects of sideslip angle estimation error on vehicle stability control [J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(10): 857.
- [2] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[J]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
ZHOU Donghua, YE Yinzong. *Modern fault diagnosis and fault-tolerant control*[J]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [3] 田承伟,宗长富,姜国彬,等. 基于双自适应 Kalman 滤波的线控转向汽车传感器故障诊断[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 115.  
TIAN Chengwei, ZONG Changfu, JIANG Guobin, *et al.* Sensor fault diagnosis for steer-by-wire car based on dual adaptive kalman filter [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(4): 115.
- [4] 姜国彬. 汽车线控转向系统故障诊断方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
JIANG Guobin. *Research of diagnosis method for vehicle steer-by-wire system*[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [5] Anwar S, Chen L. An analytical redundancy-based fault detection and isolation algorithm for a road-wheel control subsystem in a steer-by-wire system [J]. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2007, 56(5): 2859.
- [6] Kim J, Lee H. Sensor fault detection and isolation algorithm for a continuous damping control system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* [J]. Part D; *Journal of Automobile Engineering*, 2011, 225(10): 1347.
- [7] 许健雄,赵又群,刘英杰. 汽车方向盘转角试验数据去噪的小波基选择[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(6): 809.  
XU Jianxiong, ZHAO Youqun, LIU Yingjie. Wavelet Basis selection for denoising experimental data of steering wheel angle[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(6): 809.
- [8] 王辉,孙骏. 汽车轮速传感器工作稳定性研究[J]. 汽车技术, 2011(5): 30.  
WANG Hui, SUN Jun. Study on the operating stability of wheel-speed sensor [J]. *Automobile Technology*, 2011(5): 30.
- [9] 蒋克荣,王治森,孙骏. 基于小波变换的汽车轮速信号去噪[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 1.  
JIANG Kerong, WANG Zhisen, SUN Jun. Automobile anti-braking system wheel speed signal denoising based on wavelet transform [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(11): 1.

(下转第 481 页)