

# 基于传感器的车队故障检测与隔离

王高超<sup>1</sup>, 侯彦东<sup>1</sup>, 李 伟<sup>2</sup>, 周 毅<sup>2</sup>

(1. 河南大学 图像处理与模式识别研究所, 河南 开封 475004;

2. 河南省车联网协同技术国际联合实验室, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 针对车队的故障检测与隔离, 建立了基于车队的系统诊断模型, 并提出了两级故障诊断架构, 以车间距为基础对整个车队建立数学模型。同时, 构建了车队的状态空间模型, 并利用空间几何法设计了车间距的残差发生器。为了设计车队系统的残差生成模型, 加强了对车队和单辆车的结构分析, 并引入了虚拟力分析。通过采用自适应的阈值法加强了故障检测与隔离系统对残差的敏感性和对干扰的鲁棒性。为了促进车辆对自身和整个车队的信息感知能力, 智能车(自主移动机器人)装备有红外测距仪、里程计、增量式光学编码器 etc 传感器。实验证明提出的针对车队的故障检测架构和方法是可靠的。

**关键词:** 故障检测与隔离; 车队; 结构分析; 虚拟力分析; 残差生成

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-3767(2017)04-0051-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.04.008

## Model-based Sensor Fault Detection and Isolation for Vehicles Platoon

WANG Gaochao<sup>1</sup>, HOU Yandong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, ZHOU Yi<sup>2</sup>

(1. Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China;

2. International Joint Research Laboratory for Cooperative Vehicular Networks of Henan, Kaifeng, Henan 475004, China)

**Abstract:** In view of the fault detection and isolation (FDI) of vehicles platoon, a FDI system model based on vehicles platoon was established and a two-level fault diagnosis architecture was proposed. A mathematical model of the platoon based on the distance between vehicles was first set up. Meanwhile, the state space model of the platoon was constructed and the residual generator was designed with the space geometry method. In order to design the residual generation model of the platoon, the structure analysis of the platoon and the single vehicle was made and the virtual force analysis was introduced. Both the sensitivity of the FDI system to the residual and the robustness of disturbance were enhanced by using the adaptive threshold method. In order to promote the information perception ability of the vehicle itself and the platoon, the intelligent vehicles (Autonomous Mobile Robots) were equipped with sensors such as infrared distance meters, odometers, and incremental optical encoders. The experimental results show that the fault diagnosis architecture and method proposed in this paper are reliable.

**Key words:** FDI; vehicles platoon; structure analysis; virtual force analysis; residual generation

随着车联网技术的不断发展, 相关技术和成果也在不断地从理论走向实践。比如车载辅助倒车系统, 自动泊车系统和无人驾驶车等, 都使得用户的驾驶更加舒适、方便和快捷。但却有一个突出的问题摆在大家的面前——安全。澳大利亚《悉尼先驱晨报》报道, 大约 90% 的车祸归咎于人为失误, 而麦卡锡认为, 无人驾驶汽

收稿日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374134, 61304132); 河南省自然科学基金项目(162300410030)

作者简介: 王高超(1989—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究领域为故障诊断。

周 毅(1981—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士, 主要研究领域为车联网技术、宽带移动通信、信道测试与建模、车载嵌入式系统等, 本文通信作者。E-mail: zy@vip.henu.edu.cn

车有助于大幅降低车祸数量<sup>[1]</sup>。然而无人车技术也会发生事故,且由于无人车在发生事故时优先保护车内乘员,所以每次造成的损失很可能大于有人驾驶。在 2016 年 9 月 23 日,谷歌无人车在测试中发生了重大车祸。在此之前,匹兹堡的 Uber 无人驾驶汽车在实测中发生了两起事故,特斯拉 Model S 在开启 Autopilot 自动驾驶功能时发生事故导致司机身亡,美国硅谷谷歌的无人车撞上了一辆公共巴士。现在的车辆上面集成的控制系统越来越复杂,控制度也越来越高,一旦系统发生故障,若不能及时排除,很容易带来难以估量的损失,因此车辆系统的安全运行必须引起高度重视<sup>[2]</sup>。

为了保证无人车的运行安全,Monteriu 等人率先把 FDI 技术引入到了智能车系统,文献[3-4]对单辆无人车进行了故障建模分析,并用 ATVR-Jr 移动机器人成功的进行了故障检测与隔离实时试验。文献[5-8]针对单辆车用观测器法和残差分析法进行了故障检测与隔离,并针对文献[4]提到的方法进行了改进。据统计数据显示,交通事故往往发生在车辆密度较大的时候,尤其在上下班高峰期或节假日。所以针对多车的主动安全和故障诊断问题就越来越受到人们的重视。提到多车的主动安全和 FDI,容易想到车联网中多车协同控制的经典场景—车队。对车队研究的文献也有很多,比如文献[9]对车队基于车间距的定点刹车进行了研究,文献[10]对缺乏跟车数据的情况进行了分析研究。然而对车队系统故障诊断的研究文献却不是很多。为了建立车队的故障模型,根据文献[9-10]中对车队建模的思路,基于车间距建立了车队的故障模型。仿照控制系统的分级控制思路,把车队的故障分为系统故障和组元故障两级。所谓系统故障就是系统层次的故障;而组元故障就是具体传感器的故障。为了隔离出传感器故障,参照了文献[11-13]中对传感器故障的分类方式。

对车队进行故障检测与隔离,基于模型的方法是最常用的方法<sup>[14]</sup>。而残差生成和残差评估是基于模型 FDI 的主要组成<sup>[15]</sup>。在本文中,首先将根据空间几何理论推导出车间距的残差发生器,然后再设计一个自适应阈值的残差决策模块<sup>[15]</sup>来分隔故障,从而达到车队故障检测与隔离的效果。为了阐明引起车间距变化的因素,引入了虚拟受力分析的方法。通过对每辆车的受力分析,并根据运动学公式,可以得到每辆智能车的运动趋势和姿态。同时,为了减小外界干扰和传感器自身存在的误差,在决策环节采用了自适应的阈值。最后通过软件仿真实验和智能车车对实物实验,分别对提出的两级故障诊断架构和隔离算法进行了验证。

## 1 车队故障模型

首先对车队进行结构分析,并引进虚拟力<sup>[9]</sup>的分析方法从运动学角度对单车进行建模。同时对文献[11-12]中传感器的故障模型进行了改进,提高其鲁棒性,减少故障误报率。把车队的故障定义为两级,分别为系统故障和组元故障。系统故障是系统层次的故障,其参数包含了至少两辆车以上的数据;而组元故障指具体某个传感器的故障。系统故障是由一系列组元故障引起的。本文中系统故障指车间距故障,组元故障指红外测距仪故障( $f_s$ )、GPS 故障( $f_G$ )和左右编码器故障( $f_{EL}$ 、 $f_{ER}$ )。

假设有  $n$  辆智能车,组成车队行驶在笔直的公路上,车队中有一辆头车(leader)和  $n-1$  辆尾随车(follower),如图 1 所示。其中  $P_i$ 、 $V_i$ 、 $L_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ) 表示第  $i$  辆车的相对位置、速度和车身长度。 $\xi_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n-2$ ) 表示第  $i$  辆车和第  $i+1$  辆车之间的车间距,如图 1 所示。

车队数学结构如下:

$$\xi = P_{i+1} - P_i - \xi_i - L_{i+1} \quad (1)$$

$\xi$  是期望车间距和实际车间距之间的差值,也称为残差。

现在对第  $i$  辆车,以及它前后两辆车进行虚拟受力分析,其分析结果如图 2(a)所示。假如车队只有三辆车,则受力分析如图 2(b)所示,最后在实验验证中采用了三辆车的形式。火车车头拖动后面的车厢行驶,而火车的每一节车厢在前进过程中要受到前后车厢施加的力。仿照火车车厢的受力模型,假设 follower <sub>$i$</sub>  在行驶过程要受到车 follower <sub>$i+1$</sub>  朝向行驶方向的力  $F_{(i+1,i)}$ ,而且同时受到车 follower <sub>$i-1$</sub>  阻碍它行驶的力  $F_{(i-1,i)}$ ,则力  $F_{(i+1,i)}$  和力  $F_{(i-1,i)}$  就是车 follower <sub>$i$</sub>  在形式过程中受到的虚拟力<sup>[9]</sup>。虚拟力是一种间接力,例如  $F_{(i+1,i)}$  是 follower <sub>$i+1$</sub>  先告知 follower <sub>$i$</sub>  应该受到被施加力的大小和方向,然后 follower <sub>$i$</sub>  的动力系统根据要

求自身产生的。

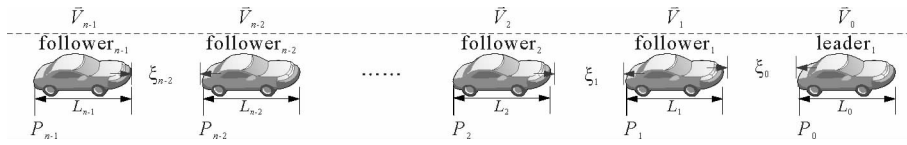


图 1 车队结构图

Fig. 1 The structure diagram of vehicles platoon

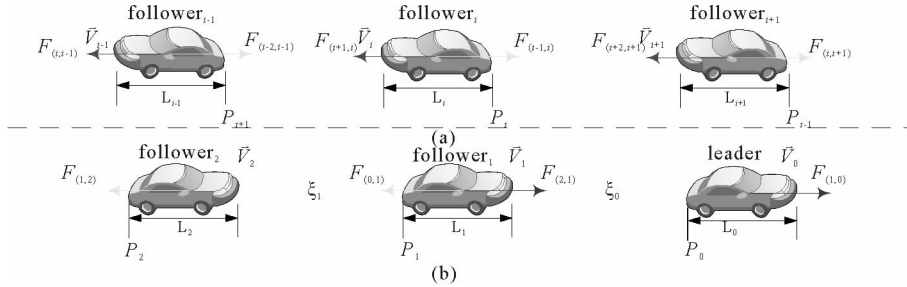


图 2 虚拟力分析

Fig. 2 Virtual force analysis

如图 2(a), 其中的  $F_{(i+1,i)}$  和  $F_{(i,i+1)}$  是一对相互作用力, 其大小是车间距的相关函数, 即车间距小于预设的安全距离就会变大, 当车间距大于预设的安全距离就会变小。设  $F_i$  是车 follower<sub>*i*</sub> 受到的合力, 那么会得到下列公式:

$$\begin{cases} F_{(i,i-1)} = -F_{(i-1,i)} \\ F_{(i+1,i)} = -F_{(i,i+1)} \\ F_{(i+2,i+1)} = F_{(i+1,i+2)} \end{cases}, \quad (2)$$

$$F_i = F_{(i+1,i)} - F_{(i-1,i)}, i=1, 2, 3, \dots, n-2. \quad (3)$$

车受力大小是和车间距相关的函数, 而车辆当前的速度  $V_i$ 、所受合力  $F_i$  和车间距  $\xi_i$  之间满足以下关系:

$$V_i = V_0(1+k), \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_i = \alpha\xi_i \\ \xi_i = \xi_0 + \beta k \end{cases}. \quad (5)$$

公式(4)中的  $\alpha, \beta$  都是常数。 $V_0$  表示当车间距恰好等于期望距离  $\xi_0$  时的速度, 也称为巡航速度, 此时  $k$  等于 0。

$$F_i = F_0 = \alpha\xi_0, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \xi_{\min} < \xi_i < \xi_{\max} \\ -1 < k < 1 \end{cases}. \quad (7)$$

车间距  $\xi_i$ 、所受合力  $F_i$ 、参数  $k$  的取值范围如公式(7)所示, 其中  $\xi_{\min}$  和  $\xi_{\max}$  分别为车间距的上下限。如果  $\xi_i$  超出这个变化范围, 就表示车队出现系统故障。特别的, 当  $\xi_i = \xi_0, k=0$  时, 车辆处在巡航跟车阶段, 这也是期望的最佳状态。

车间距  $\xi_i$  和 follower<sub>*i*</sub>, follower<sub>*i+1*</sub> 的速度  $V_i$  和  $V_{i+1}$  存在以下关系:

$$\xi = \xi_i - \xi_0 = \int_0^i (V_{i+1} - V_i) dt. \quad (8)$$

试验中用到的车辆是后置双驱动智能车, 根据运动学分析, 可以得到以下方程:

$$V_i = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L), \quad (9)$$

$$\omega = \frac{r}{d}(\omega_R - \omega_L). \quad (10)$$

其中:  $r$  是智能车轮半径,  $d$  是车轮轴距,  $\omega_L$  和  $\omega_R$  分别是左右轮角速度,  $\omega$  是车辆角速度。另外还可以通过 GPS 获知智能车的经度  $\lambda$  和纬度  $\varphi$ , 以及获知当前的速度  $V_i$  和当前的时间  $T_x$ 。

## 2 残差生成与决策

侯彦东等<sup>[12]</sup> 率先利用空间几何理论解决了执行器故障, 并有效的抑制了输入干扰和测量噪声。为了降低传感器测量噪声对故障诊断的影响, 给出了系统故障的残差发生器。如图 3 所示为 FDI 的结构图, 整个故障诊断与隔离系统由两大部分组成, 即残差生成单元和残差评估单元。接下来将分别对两个重要单元进行设计和实现, 从而实现车队的故障检测与隔离。

### 2.1 残差生成

实现故障检测与隔离的关键就是构造出能检测故障且将其有效隔离的残差产生器, 记输出的残差信号为  $r(t)$ ; 然后再把残差信号  $r(t)$  与自适应阈值  $TA(t)$  在残差决策单元进行比较, 判断故障是否已发生, 并把发生的故障隔离出来<sup>[12]</sup>。

本研究中, 系统故障是用空间几何理论设计出状态观测器和残差生成器, 从而诊断出车队故障; 而组元故障是我们根据对车队的结构分析, 得到一系列残差公式, 从而诊断出传感器的故障。

#### 2.1.1 传感器残差生成

车辆起步时的车间距为  $\xi_0$ , 在启动后  $t$  时刻 follower <sub>$i$</sub>  和 follower <sub>$i+1$</sub>  之间车间距的变化  $\Delta\xi_i$  由式(8)给出, 式(8)中的 follower <sub>$i$</sub>  和 follower <sub>$i+1$</sub>  的速度可由式(9)给出, 可以获得下列约束公式集:

$$\begin{cases} \xi_i = \int_0^t (V_{i+1} - V_i) dt \\ \xi_i = \xi_i - \xi_0 \\ V_i = \frac{r}{2}(\omega_R^i + \omega_L^i) \end{cases} \quad (11)$$

约束集中的参数  $\omega_R^i$  和  $\omega_L^i$  可由编码传感器直接获取, 车间距  $\xi_i$  可以由红外测距仪直接给出, 也可以通过 GPS 间接获取。把约束集式(11)整合后得到第一个残差公式:

$$n = \frac{r}{2} \int_0^{T_x} (\omega_R^{i+1} - \omega_R^i + \omega_L^{i+1} - \omega_L^i) dt - \xi_i. \quad (12)$$

通过公式(1)可以推导出第二个残差公式:

$$r_2 = P_{i+1} - P_i - L_i - \xi_i. \quad (13)$$

式中的  $P_i$  和  $P_{i+1}$  可以通过 follower <sub>$i$</sub>  和 follower <sub>$i+1$</sub>  车上分别配置的 GPS 获取,  $\xi_i$  可以由红外测距仪直接给出。

通过车上配置的里程计, 可以获得车辆当前里程, 相邻两辆车的里程  $S_{i+1}$  和  $S_i$  满足下列关系:

$$\Delta\xi_i = S_{i+1} - S_i. \quad (14)$$

结合公式(8)可以得到第三个残差公式:

$$r_3 = S_{i+1} - S_i - \int_0^{T_x} (V_{i+1} - V_i) dt. \quad (15)$$

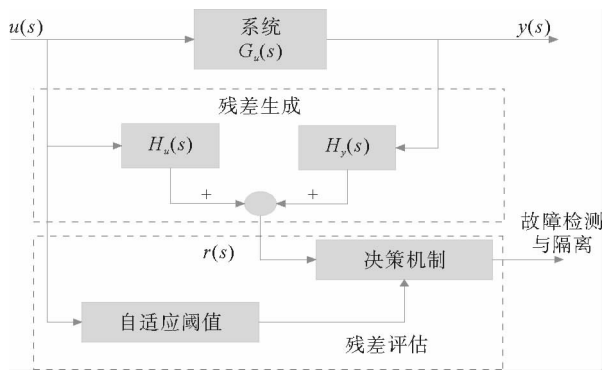


图 3 FDI 结构图

Fig. 3 The Structure diagram of FDI

公式中  $\text{follower}_i$  和  $\text{follower}_{i+1}$  的速度可以根据式(4)计算,  $T_x$  可以使用自身时钟计时,也可以采用GPS获取。

车间距可以通过多种形式获取,比如通过GPS、红外测距仪、速度、左右轮的角速度或里程计获取。其中通过激光测距仪可以直接获取车间距,其他方法都需要同时获取前后车辆的数据。 $\xi_0$  和  $\Delta\xi_i$  都可以通过公式进行估计,这样结合式(8)可以给出第四个残差公式:

$$r_4 = \xi_0 + \Delta\xi_i - \xi_i. \quad (16)$$

第  $i$  辆车偏离直行方向的夹角  $\theta_i$  受自身左右轮角速度的影响,有下列关系式:

$$\theta_i = \int_0^{T_x} (\omega_L^i - \omega_R^i) dt. \quad (17)$$

在试验中,为了减少GPS和红外测距仪所受的干扰,让车队沿直线行驶,那么  $\theta_i$  的大小可以忽略不计。但是测速传感器的故障,可导致  $\theta_i$  的值偏离期望值。因此第五个残差方程可以根据式(17)乘以一个常数  $\lambda$  得到:

$$r_5 = \lambda \int_0^{T_x} (\omega_L^i - \omega_R^i) dt. \quad (18)$$

最后根据公式(4)和(9)可以推导出第六个残差公式:

$$r_6 = \frac{r}{2} (\omega_R^i + \omega_L^i) - V_0(1+k). \quad (19)$$

### 2.1.2 车间距残差生成

对于车队来说,车间距  $\xi_i$  是判断车队稳定性和运行状态的极其重要参数。车辆在加速或减速运行时,车间距在可变范围内调整,如公式(7)所示,当车队稳定后,车间距  $\xi_i$  也趋于稳定,这时车间距保持在预设值  $\xi_0$  附近。考虑正常情况下的线性时不变(LTI)系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (20)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t). \quad (21)$$

其中,是系统的状态变量,  $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$  和  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^q$  分别是正常情况下系统的输入和输出信号,  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  是系统矩阵,  $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$  是输入矩阵,  $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{q \times n}$  是输出矩阵。

车间距的大小受传感器测量数据等多方面影响,而最终通过电机的转速直接影响其大小,所以把车队中的每一个车间距故障都当成一个执行器故障。若  $L_i$  表示第  $i$  个车间距  $\xi_i$  的故障特征形式,  $m_i(t)$  表示第  $i$  个车间距  $\xi_i$  的故障模型,则故障系统可以根据公式(20)和(21)表示为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \sum_{i=1}^k L_i m_i(t), \quad (22)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t). \quad (23)$$

基于执行器故障系统模型公式(22)和(23),用  $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^n$  作为观测器的状态变量,构造如下观测器:

$$\dot{\mathbf{w}}(t) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{w}(t) - \bar{\mathbf{B}}\mathbf{y}(t) + \bar{\mathbf{D}}\mathbf{u}(t), \quad (24)$$

$$\mathbf{r}(t) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{w}(t) - \bar{\mathbf{G}}\mathbf{y}(t) + \bar{\mathbf{M}}\mathbf{u}(t). \quad (25)$$

根据公式(24)和(25)可以设计出一个仅对第  $j$  个车间距  $\xi_j$  故障敏感的残差发生器:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{u}}(t) + \tilde{\mathbf{L}}m_j(t), \quad (26)$$

$$\mathbf{r}(t) = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{M}}\tilde{\mathbf{u}}(t). \quad (27)$$

其中:  $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) \\ \tilde{\mathbf{w}}(t) \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\bar{\mathbf{B}}\mathbf{C} & \bar{\mathbf{A}} \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{u}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ m_j(t) \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & L_j^j \\ \bar{\mathbf{D}} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{L}} = [L_j \quad \mathbf{0}]$ ,  $\tilde{\mathbf{H}} = [-\mathbf{G}\mathbf{C} \quad \bar{\mathbf{C}}]$ ,  $\tilde{\mathbf{M}} = [\bar{\mathbf{M}} \quad \mathbf{0}]$ 。

从公式(24)和(25)可以看出,需要合适的参数矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{M}$ ,使得输出残差信号  $\mathbf{r}(t)$  不仅不受  $\tilde{\mathbf{u}}(t)$  的影响,而且满足从  $m_j(t)$  到  $\mathbf{r}(t)$  是输入可观测的,对于这些参数矩阵的详细求解过程和方法可以参考文献[12]。

### 2.2 残差决策与评估

在系统中,传感器的加性故障和随机序列的均值噪声干扰都会影响故障隔离的准确度。为了解决这个

问题, 广义似然率<sup>[16]</sup>和临界似然率<sup>[17]</sup>的方法被提出, 用这种方法虽然能准确隔离出故障, 但是延时较大<sup>[4]</sup>, 所以采用自适应阈值法。残差评估与决策的结构如图 3 所示。阈值的大小决定了对故障隔离的分辨率, 下面将重点说明阈值如何选取。

假设  $\Delta G_u(s)$  是车队系统频域下的故障传递函数, 在系统没有发生任何故障的情况下, 残差可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$r(s) = H_y(s) \Delta G_u(s) u(s), \quad (28)$$

设  $\Delta G_u(s)$  有界, 即  $\exists \epsilon \in \mathbf{R}^+$  满足下式:

$$\|\Delta G_u(s)\| \leq \epsilon. \quad (29)$$

代入式(28)中得:

$$\|r(s)\| \leq \epsilon \|H_y(s) u(s)\|. \quad (30)$$

所以自适应阈值  $TA(s)$  的选取应满足下列公式:

$$TA(s) = \epsilon H_y(s) u(s). \quad (31)$$

其中:  $H_y(s)$  一定, 只要选择合适的  $\epsilon$  ( $\epsilon$  可以通过求解  $\Delta G_u(s)$  的极限获得近似值, 然后根据实验结果逐步修正), 就能保证故障有效的被诊断, 同时提高对输入干扰的鲁棒性。

### 3 试验结果分析

设计了软件仿真和实物验证。在软件仿真中, 只监测了三辆车的两个车间距  $\xi_0$  和  $\xi_1$ , 相应的对每辆车的红外测距仪 ( $f_s$ )、左右编码器 ( $f_{EL}$ 、 $f_{ER}$ ) 等故障进行了监测。在实物验证中, 使用了三辆智能车, 一个路边单元 (roadside unit, RSU), 车沿着直线循迹。智能车以 STM32 为控制单元, 装备 ZigBee 通信模块, 红外测距模块, 编码器测速模块等传感器。RSU 是由通信模块 ZigBee 和控制器 STM32 组成, 负责采集车辆传感器的实时数据, 对车队的车间距进行监测, 并把车间距状态上传上位机; 在某个车间距故障时, 把隔离出的组元故障上传到上位机。

图 4~9 为软件仿真效果图。图 4 和图 6 是对车队的车间距  $\xi_0$  和  $\xi_1$  进行跟踪监测的效果。在图 4 中, 可以看到  $\xi_0$  和  $\xi_1$  没有超出设定的阈值, 即车队运行正常。从图 5 中也可以看出车队没有发生传感器故障, 车队运行正常。图 4 中, 可以看到在 65 s 的时候,  $\xi_0$  受到干扰, 我们的自适应阈值也做出了合理的调整, 有效的杜绝了故障的误报。

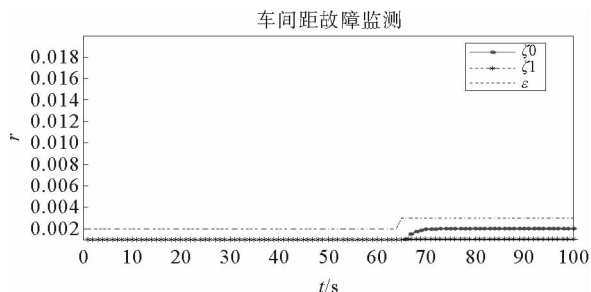


图 4 车间距监测 (无故障)

Fig. 4 Vehicle distance monitoring (fault-free)

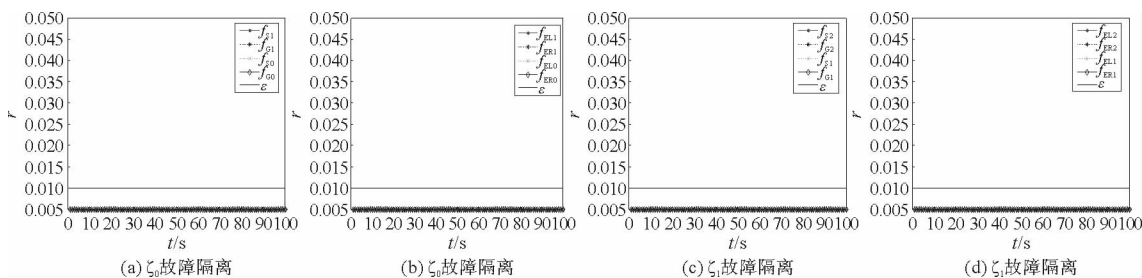


图 5  $\xi_0$  和  $\xi_1$  的故障隔离 (无故障)

Fig. 5 Fault isolation of  $\xi_0$  and  $\xi_1$  (fault-free)

图 6 和图 7 对应的是车队出现故障的效果图, 从图 6 中可以看到车间距  $\xi_0$  发生了故障, 而车间距  $\xi_1$  正

常。follower<sub>1</sub>和leader上面的传感器故障都可能引发 $\xi_0$ 发生故障,图7中显示了故障发生在哪一辆车上,同时显示出发生了什么故障。由图7可以清楚的看出 follower<sub>1</sub>的红外测距传感器发生了故障,从而引发了 $\xi_0$ 发生故障。

图8和图9对应的是 $\xi_0$ 出现故障的仿真效果图,在仿真中只有一辆车的一种传感器引发了系统故障。图8中可看到车间距 $\xi_1$ 和 $\xi_0$ 分别在30和50s的时候发生了故障。图9可看出 follower<sub>1</sub>的红外测距传感器发生了故障, follower<sub>2</sub>的右侧测速传感器发生了故障。

用三辆智能车对所提出算法和故障架构进行了简单验证,刚开始三辆智能车组成车队沿直线匀速行驶。车队车间距都保持在预设可控范围。在运行中,智能车把感知的自身和周围环境信息简单处理后发给RSU。RSU对数据进行处理,之后把处理结果上传上位机。如图10所示为验证现场。图10(a)中车队在稳定运行,如图11(a)上位机显示的一样。图10(b)中 follower<sub>1</sub>和leader的车间距明显变大,这时上位机发出警告,并隔离出了具体的故障,如图11(b)所示。

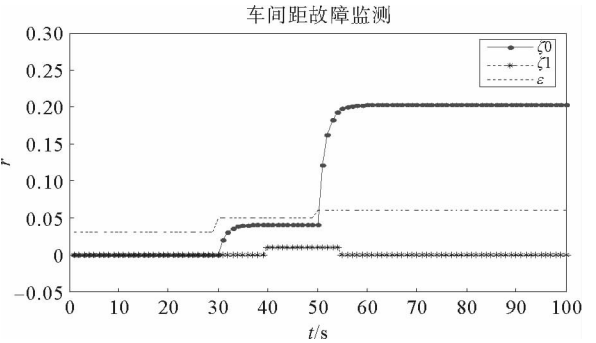


图6 车间距监测(故障)

Fig. 6 Vehicle distance monitoring (fault)

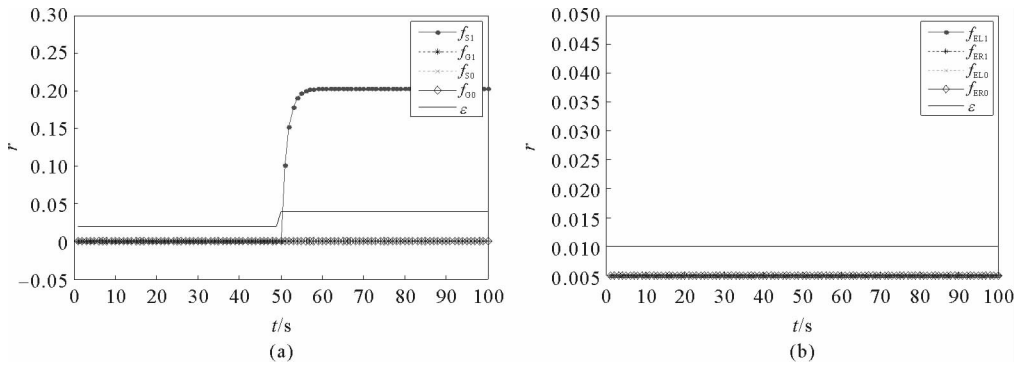


图7  $\xi_0$ 的故障隔离

Fig. 7 Fault isolation of  $\xi_0$

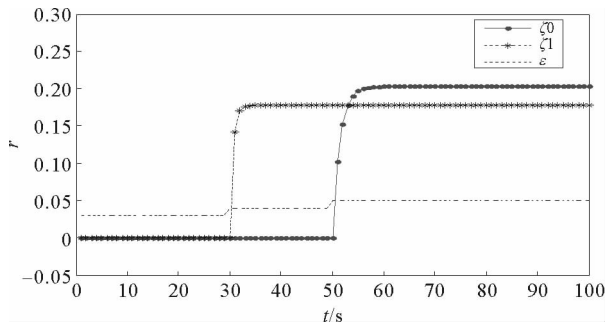


图8 车间距监测(故障)

Fig. 8 Vehicle distance monitoring (fault)

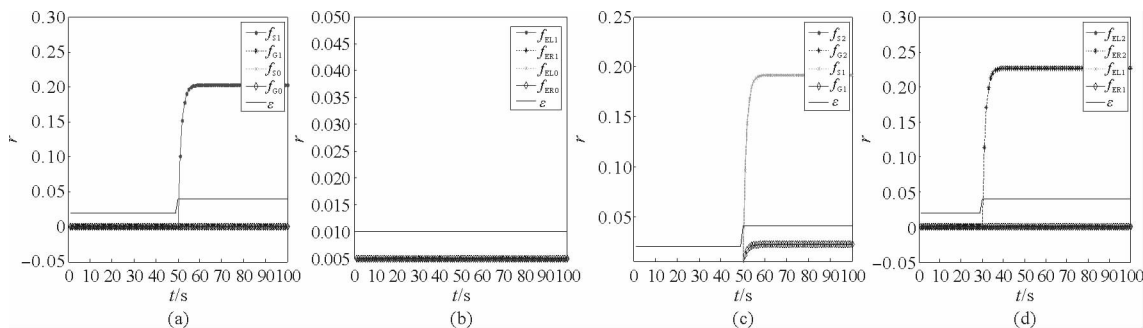


图 9  $\xi_0$  和  $\xi_1$  的故障隔离

Fig. 9 Fault isolation of  $\xi_0$  and  $\xi_1$

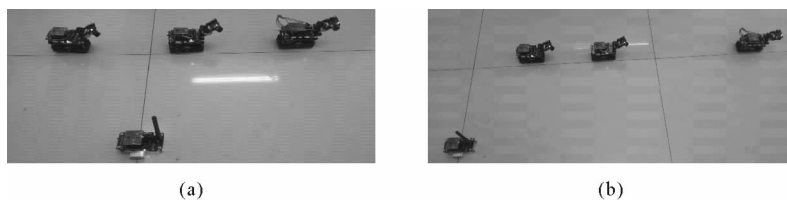


图 10 实物验证

Fig. 10 Physical verification

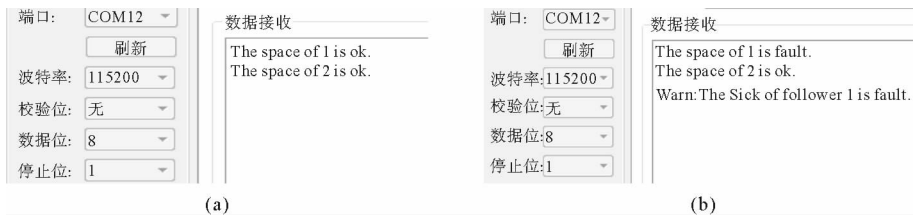


图 11 实物验证结果

Fig. 11 The results of physical verification

## 4 结论

基于空间几何理论和结构分析法对车队进行了故障建模分析,并且把故障定义为系统故障和组元故障两种类型。为了应对传感器的误差和外界干扰,采用了自适应的阈值法对残差进行评估。实验结果表明,提出的方法可以对车队进行简单有效的故障检测与隔离。本研究针对的是稳定不变的车队,即平稳跟车。对于车队的其它状态,都会引起车间距的大幅变化,在本研究中会当成故障进行处理。后续将对算法进行改进,使其适用性得到提高。

### 参考文献:

[1]王彬. 直面无人驾驶车伦理与现实的冲突[N/OL]. 中国质量报, 2016-10-24(004). [http://epaper.cqn.com.cn/html/2016-10/24/content\\_73671.htm?div=-1](http://epaper.cqn.com.cn/html/2016-10/24/content_73671.htm?div=-1).

[2]周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[3]MONTERIU A, ASTHANA P, VALAVANIS K, et al. Experimental validation of a real-time model-based sensor fault detection and isolation system for unmanned ground vehicles[C]//2006 Mediterranean Conference on Control and Automation, 2006: 1-8.

[4]MONTERIU A, ASTHANA P, VALAVANIS K, et al. Model-based sensor fault detection and isolation system for unmanned ground vehicles; experimental validation (part II)[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automa-



- tion, 2007; 2744-2751.
- [5]FOURLAS G K, KARRAS G C, et al. Sensors fault diagnosis in autonomous mobile robots using observer-Based technique [C]// IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics, 2015; 49-54.
- [6]FOURLAS G K, KARRAS G C, et al. Model based actuator fault diagnosis for a mobile robot[C]// IEEE International Conference on Industrial Technology, 2014; 79-84.
- [7]FOURLAS G K. On the application of structural analysis to fault diagnosis of a mobile robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics IEEE, 2015; 259-264.
- [8]FOURLAS K. Fault detection approach for a 4-wheel skid steering mobile robot[C]// IEEE International Conference on Industrial Technology, 2013; 64-68.
- [9]LIU Y, XU B, GAO H. Cooperative braking control for a platoon of vehicles under constraint with target stopping positions [C]// Chinese Control Conference, 2016; 9282-9287.
- [10]YUE W, WANG L, GUO G. Event-triggered platoon control of vehicles with time-varying delay and probabilistic faults [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 87: 96-117.
- [11]侯彦东, 陈志国, 汤天浩. 多传感器故障检测与隔离算法[J]. 化工学报, 2010, 61(8): 2008-2014.  
HOU Yandong, CHEN Zhiguo, TANG Tianhao. Multi-sensor fault detection and isolation algorithm[J]. CIESC Journal, 2010, 61(8): 2008-2014.
- [12]侯彦东, 文成林, 陈志国. 多传感器故障检测与隔离的残差产生器设计方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 429-434.  
HOU Yandong, WEN Chenlin, CHEN Zhiguo. Designing method of residual generator for multi-sensor fault detection and isolation[J]. ACTA Electronica Sinica, 2011, 39(2): 429-434.
- [13]MERZOUKI R, CONRARD B, KUMAR P, et al. Model based tracking control using Jerky behavior in platoon of vehicles [C]// Control Conference, 2013; 3488-3493.
- [14]MANH T N, XUAN M P, DOAN P N, et al. Tracking control for mobile robots with uncertain parameters based on model reference adaptive control[C]// International Conference on Control, Automation and Information Sciences, 2013; 18-23.
- [15]PATTON R J, CHEN J. Advances in fault diagnosis using analytical redundancy[C]// IEEE Xplore, 1993; 6/1-612.
- [16]BASSEVILLE B M E, BASSEVILLE M, NIKIFOROW I V. Detection of abrupt changes; Theory and application[C]// Englewood Cliffs, Prentice Hall; Information & System Sciences Series, 1993; 326-327.
- [17]GUSTAFSSON F. The marginalized likelihood ratio test for detecting abrupt changes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 41(1): 66-78.

(责任编辑: 李 磊)