

融合遗传算法和递推最小二乘法的 半挂车稳定性参数估计

曾小华¹, 李凯旋¹, 韩 凯², 宫铭遥³, 黄钰峰¹, 宋大风¹,

(1. 吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 潍柴动力股份有限公司内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 262123; 3. 吉林化工大学航空工程学院, 吉林省 吉林市 132102)

摘 要: 采用遗传算法与递推最小二乘法相结合的方法估计半挂车的稳定性参数, 从而解决轮胎侧偏刚度、车辆侧倾刚度、车身侧倾阻尼等参数难以通过传感器直接测量的问题。该方法有效弥补了传统离线辨识方法在工况适应能力方面的不足。相较于一般商用车, 半挂车的结构更加复杂且使用工况多样, 因此在确保车辆安全性和品质的过程中, 必须更加关注半挂车的稳定性控制。实现这一目标的前提是建立高精度、高置信度的半挂车动力学理论模型。在此基础上, 理论模型可作为跟随目标, 以实车或商用软件车辆模型与理论模型的输出状态差值作为控制量进行调节。本文通过 Truksim 与 Simulink 的联合仿真, 在特定输入和工况条件下, 对比 Truksim 软件模型与理论模型的输出重合情况。结果表明, 基于本文方法识别的侧倾刚度等参数所建立的理论模型, 在工况适应性和精度方面均优于传统离线辨识方法, 估计误差降低约 6%。该成果为后续基于该理论模型开展的半挂车稳定性控制研究奠定了基础。

关键词: 车辆工程; 半挂车稳定性; 参数估计; 遗传算法; 递推最小二乘法

中图分类号: U461.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3793-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240800

Semi-trailer stability parameter estimation based on genetic algorithm and recursive least squares method

ZENG Xiao-hua¹, LI Kai-xuan¹, HAN Kai², GONG Ming-yao³, HUANG Yu-feng¹, SONG Da-feng¹,

(1. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. The State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weichai Power Co., Ltd., Weifang, 262123, China; 3. School of Aeronautical Engineering, Jilin University of Chemical Technology, Jilin 132102, China)

Abstract: A combination of genetic algorithm and recursive least squares method was used to estimate the stability parameters of a semi-trailer, solving the problem that parameters such as tire cornering stiffness, vehicle roll stiffness and body roll damping are difficult to directly measure through sensors. In terms of adaptability to working conditions, the shortcomings of traditional offline identification methods are

收稿日期: 2024-05-14.

基金项目: 吉林省自然科学基金自由探索项目(YDZJ202101ZYTS159); 潍柴股份有限公司开放课题项目(sk-leps-sq-2023-003).

作者简介: 曾小华(1977-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 新能源汽车关键技术. E-mail: zeng.xiaohua@126.com

通信作者: 宫铭遥(1997-), 男, 助理教授, 硕士研究生. 研究方向: 车辆控制技术. E-mail: gongmingyuan@jlct.edu.cn

effectively made up for via this method. Compared with general commercial vehicles, semi-trailers have a more complex structure and diversified operating conditions. Therefore, in the process of ensuring vehicle safety and quality, greater attention must be paid to the stability control of semi-trailers. The prerequisite for achieving this goal is to establish a high-precision and high-confidence theoretical model of semi-trailer dynamics. On this basis, the theoretical model can be used as a following target, and the difference between the output state of the actual vehicle or commercial software vehicle model and the output state of the theoretical model is used as the control variable for adjustment. Joint simulation of Trucksim and Simulink is used in this paper to compare the output overlap between the Trucksim software model and the theoretical model under specific input and working conditions. Results show that the theoretical model established based on the parameters such as roll stiffness identified by the method proposed in this paper is superior to traditional offline identification method in terms of operating condition adaptability and accuracy, the estimation error is reduced by about 6%. This result lays the foundation for subsequent semi-trailer stability control research based on this theoretical model.

Key words: vehicle engineering; semi-trailer stability; parameter estimation; genetic algorithm; recursive least squares method

0 引言

半挂车是由牵引车与挂车通过鞍座铰接组成的车辆系统。由于半挂车载重更大,且多运营在高速长途运输工况下,一旦发生事故,将造成更为严重的经济损失和人员伤亡^[1]。因此,有必要对半挂车的稳定性控制展开详细研究。建立准确可信的半挂车动力学模型是开展稳定性控制的前提。根据已有研究,常见半挂车动力学模型有考虑牵引车和半挂车侧向运动、横摆运动的四自由度模型,以及在此基础上增加两车侧倾方向的六自由度模型等^[2]。建立准确的动力学模型需以精确的参数为支撑。部分参数可通过用台架实验或传感器测出,而轮胎和悬架等部件或系统的侧偏、侧倾参数则无法利用常规手段获取。

1989年,美国 Bolhasani 等^[3]以前轮转角为输入,以车辆侧倾角、横摆角速度和侧向加速度为输出,估计了单体车三自由度质心位置、侧偏刚度等参数,该研究被业界认为是利用算法估计车辆参数的先河;2004年, Bolhasani 等^[4]又提出一种估计三自由度车辆稳定性参数的无导数优化方法,并引入遗传算法对估计结果与实际结果进行误差最小化优化;2008年,法国 Baffet 等^[5]提出利用扩展卡尔曼滤波估计轮胎侧偏角和侧偏刚度,通过对比估计值与实验数据,验证了该方法辨识结果的准确性。2014年前后,吉林大学宗长富等^[6]基于 Trucksim 仿真数据,采用遗传算法离线估计了单体商用车前后轴侧偏刚度、车辆侧倾刚度等参

数。2019年,浙江大学王杰^[7]利用扩展卡尔曼滤波辨识单体车前后轴轮胎侧偏刚度,并在 NI 平台上对算法进行了实时性验证^[8]。

当前车辆稳定性参数辨识方法主要包括两大类:一类是基于智能优化算法的离线辨识方法;另一类是基于扩展卡尔曼滤波等技术的在线辨识方法。离线辨识方法可以实现全局最优,可将估计结果绘制成 Map,实际应用时只需查表即可,但存在辨识结果工况适应性差、实时性差等不足;在线辨识方法常用于估计轮胎侧偏刚度,较少用于估计车身侧倾刚度和阻尼系数,且需已知观测矩阵^[9]。为此,本文提出将遗传算法(Genetic algorithm, GA)与带遗忘因子的递推最小二乘法(Recursive least square, RLS)融合进行车辆稳定性参数估计,以解决离线辨识结果适应性差的问题。随后,基于 Simulink 建立半挂车动力学理论模型;在 Trucksim 中搭建半挂车实际车辆模型,以 40 km/h 正弦输入作为初始辨识场景,以 30 km/h、70 km/h、角阶跃输入、正弦输入作为验证工况。通过对比融合方法与单一遗传算法的估计结果,验证所提方法的有效性。本文研究对于提升半挂车动力学建模精度、准确获取车辆稳定性参数有参考价值。

1 半挂车动力学建模

1.1 半挂车四自由度动力学建模

研究对象为牵引车两轴,挂车等效简化为

单轴结构,如图 1 所示。为降低模型复杂程度,忽略部分次要因素,作如下假设:①不考虑转向系统的影响,认为方向盘转角和前轮转角呈线性关系,以前轮转角 δ 和纵向车速 u 作为模型输入;②牵引车和挂车的纵向车速相同且保持恒定;③车辆正常行驶时铰接角较小,可忽略不计;④轮胎处于线性侧偏区间内;⑤不考虑路面坡度和附着条件。

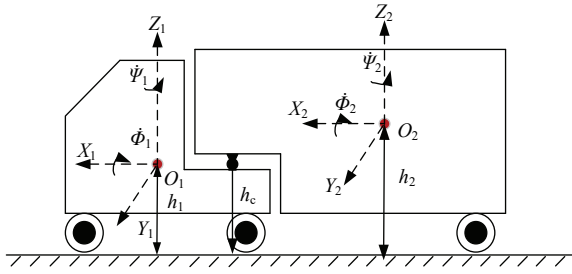


图 1 半挂汽车列车车辆坐标系

Fig. 1 Semi-trailer car train vehicle coordinate system

半挂车横摆运动和侧向运动的示意图如图 2 所示,其中, m_1 为牵引车质量; m_2 为挂车质量; d_1 为牵引车质心到前轴的距离; d_2 为牵引车质心到后轴的距离; d_3 为挂车质心到铰接点的距离; d_4 为挂车质心到挂车轴的距离; d_5 为牵引车质心到铰接点的距离; β_1 为牵引车质心侧偏角; β_2 为挂车质心侧偏角; δ 为前轮转角; γ 为铰接角(因数值较小可忽略不计); ψ_1 为牵引车横摆角; ψ_2 为挂车横摆角。

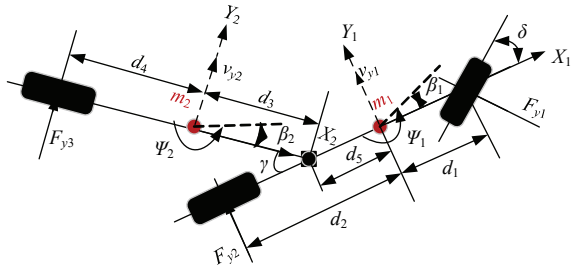


图 2 半挂车横、摆侧向运动示意图

Fig. 2 Diagram of the yaw and lateral motion of the semi-trailer

牵引车的侧向运动学方程为:

$$m_1 u_1 (\dot{\psi}_1 + \dot{\beta}_1) = k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2 - F \quad (1)$$

挂车的侧向运动学方程为:

$$m_2 u_2 (\dot{\psi}_2 + \dot{\beta}_2) = k_3 \alpha_3 + F \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为牵引车前轴轮胎等效侧偏刚度、牵引车后轴轮胎等效侧偏刚度和挂车轴轮胎等效侧偏刚度; α_1 、 α_2 、 α_3 为三轴轮胎侧偏角; F 为铰接点作用力; $\dot{\psi}_1$ 为牵引车横摆角速度; $\dot{\psi}_2$ 为挂车

横摆角速度; $\dot{\beta}_1$ 为牵引车质心侧偏角速度; $\dot{\beta}_2$ 为挂车质心侧偏角速度; u_1 、 u_2 分别为牵引车、挂车车速,两者相同且恒定。

牵引车的横摆运动学方程为:

$$d_1 k_1 \alpha_1 - d_2 k_2 \alpha_2 + d_5 F = I_{1zz} \ddot{\psi}_1 \quad (3)$$

挂车的横摆运动学方程为:

$$d_3 F - d_4 k_3 \alpha_3 = I_{2zz} \ddot{\psi}_2 \quad (4)$$

式中: I_{1zz} 为牵引车绕 z 轴的转动惯量; I_{2zz} 为挂车绕 z 轴的转动惯量; $\ddot{\psi}_1$ 为牵引车横摆角加速度; $\ddot{\psi}_2$ 为挂车横摆角加速度。

轮胎采用线性轮胎模型,三轴轮胎侧偏角 α_1 、 α_2 、 α_3 的计算公式分别为:

$$\alpha_1 = -\left(\delta - \frac{v_{y1} + d_1 \dot{\psi}_1}{u}\right) = -\delta + \beta_1 + \frac{d_1 \dot{\psi}_1}{u} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{v_{y1} - d_2 \dot{\psi}_1}{u} = \beta_1 - \frac{d_2 \dot{\psi}_1}{u} \quad (6)$$

$$\alpha_3 = \beta_1 - \frac{(d_3 + d_4 + d_5) \dot{\psi}_1}{u} - \gamma - \frac{(d_3 + d_4) \dot{\gamma}}{u} \quad (7)$$

1.2 半挂车六自由度动力学建模

在上述四自由度模型基础上,增加牵引车侧倾和挂车侧倾两个方向的自由度。半挂车侧倾运动示意图如图 3 所示。

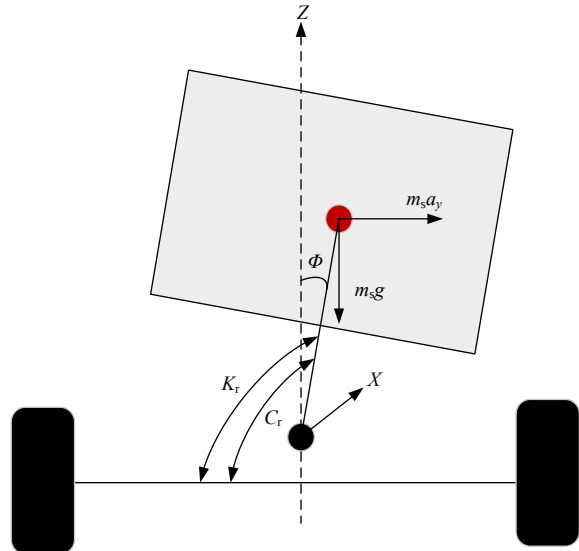


图 3 半挂车侧倾运动示意图

Fig. 3 Semi-trailer roll motion diagram

牵引车的侧倾运动学方程为:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}_1 I_{1rx} + m_{1s} h_1^2 \ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_1 I_{1rz} = m_{1s} h_1 g \phi_1 + \\ K_{12} (\phi_2 - \phi_1) - k_{r1} \phi_1 - c_{r1} \dot{\phi}_1 + \\ m_{1s} h_1 (u \dot{\beta}_1 + u \dot{\psi}_1 + h_1 \ddot{\phi}_1) - F h_c \end{aligned} \quad (8)$$

挂车的侧倾运动学方程为:

$$\ddot{\phi}_2 I_{2xx} + m_{2s} h_2 \ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_2 I_{2xz} = m_{2s} h_2 g \phi_2 - K_{12}(\phi_2 - \phi_1) - k_{r2} \phi_2 - c_2 \dot{\phi}_2 + m_{2s} h_2 (u \dot{\beta}_2 + u \dot{\phi}_2 - h_2 \ddot{\phi}_2) - F h_c \quad (9)$$

式中: I_{1xx} 为牵引车绕 x 轴的转动惯量; I_{2xx} 为挂车绕 x 轴的转动惯量; I_{1xz} 为牵引车簧载质量绕 x 轴和 z 轴的惯量积; I_{2xz} 为挂车簧载质量绕 x 轴和 z 轴的惯量积; ϕ_1 为牵引车侧倾角; ϕ_2 为挂车侧倾角; m_{1s} 为牵引车簧载质量; m_{2s} 为挂车簧载质量; k_{r1} 为牵引车等效侧倾刚度; k_{r2} 为挂车等效侧倾刚度; c_1 为牵引车侧倾阻尼; c_2 为挂车侧倾阻尼; K_{12} 为铰接点侧倾刚度; h_1 为牵引车质心高度; h_2 为挂车质心高度; h_c 为铰接点距地面距离。

由于铰接点的存在, 牵引车与挂车之间的运动满足如下约束条件:

$$\beta_1 = \beta_2 + \phi_2 - \phi_1 + \frac{h_c \dot{\phi}_1 - h_c \dot{\phi}_2 + d_5 \dot{\phi}_1 + d_3 \dot{\phi}_2}{u} \quad (10)$$

为提升模型可信性, 方便后续验证环节对比自建理论模型与商用软件中的车辆模型, 本文建模所用车辆结构参数来源于 Truckism 库模型, 具体参数如表 1 所示。

将半挂车六自由度动力学方程整理为状态空间表达式, 如式(11)所示。选取牵引车质心侧偏角 β_1 、横摆角速度 $\dot{\phi}_1$ 、侧倾角 ϕ_1 、侧倾角速度 $\dot{\phi}_1$ 、挂车质心侧偏角 β_2 、横摆角速度 $\dot{\phi}_2$ 、侧倾角 ϕ_2 和侧倾角速度 $\dot{\phi}_2$ 共 8 个状态变量作为观测量; 系统输入为前轮转角 δ 和车速 u 。

$$\begin{cases} A\dot{X} + BX = C\delta \\ X = [\beta_1, \dot{\phi}_1, \phi_1, \dot{\phi}_1, \beta_2, \dot{\phi}_2, \phi_2, \dot{\phi}_2]^T \end{cases} \quad (11)$$

式中: A 、 B 、 C 为系数矩阵。

将系统状态方程整理为标准形式, 如下所示:

$$\begin{pmatrix} P = -A^{-1}B \\ Q = A^{-1}C \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \dot{X} = PX + Q\delta \\ Y = MX + N\delta \end{cases} \quad (12)$$

式中: M 为 8×8 单位对角矩阵; N 为 8×8 零矩阵。至此, 六自由度理论模型建立完成, 系数矩阵 P 和 Q 中包含 8 个未知数, 分别为: 三轴轮胎等效侧偏刚度 k_1 、 k_2 、 k_3 ; 牵引车车身侧倾刚度 k_{r1} 、侧倾阻尼 c_1 ; 挂车车身侧倾刚度 k_{r2} 、侧倾阻尼 c_2 ; 铰接点侧倾刚度 K_{12} 。

只有准确获取这些未知参数, 建立的理论模型才具有实际应用价值。

表 1 半挂车车辆模型主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of the semi-trailer vehicle model

参数名称	符号	数值	单位
牵引车总质量	m_1	6 762	kg
牵引车簧载质量	m_{1s}	5 457	kg
挂车总质量	m_2	16 665	kg
挂车簧载质量	m_{2s}	16 000	kg
牵引车质心到前轴距离	d_1	1.113	m
牵引车质心到后轴距离	d_2	2.387	m
挂车质心到铰接点距离	d_3	5.221	m
挂车质心到挂车轴距离	d_4	4.779	m
牵引车质心到铰接点距离	d_5	2.287	m
牵引车质心高度	h_1	1.173	m
挂车质心高度	h_2	1.935	m
铰接点距地面距离	h_c	1.110	m
牵引车绕 x 轴转动惯量	I_{1xx}	2 287	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
挂车绕 x 轴转动惯量	I_{2xx}	25 350	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
牵引车绕 z 轴转动惯量	I_{1zz}	34 823	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
挂车绕 z 轴转动惯量	I_{2zz}	135 000	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
牵引车绕 x 、 z 轴惯量积	I_{1xz}	1 626	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
挂车绕 x 、 z 轴惯量积	I_{2xz}	0	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

2 遗传算法稳定性参数估计

2.1 遗传算法离线辨识稳定性参数

遗传算法是智能优化算法的一种, 利用优化算法估计参数一般包括以下步骤: ①确定待优化的目标函数, 将需要辨识的参数作为函数自变量; ②将理论数据与实车或试验数据的误差作为因变量; ③根据参数类型和参数意义划定约束边界; ④利用算法在可行域内对待估计参数进行搜索优化, 直至目标误差函数达到最小值或满足设定的误差下限。本文将自建理论模型与 Trucksim 车辆模型的状态变量差值平方和作为目标函数, 具体表达式为:

$$J = \sum_{i=1}^n [\beta_1(i) - \beta_1^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\dot{\phi}_1(i) - \dot{\phi}_1^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\phi_1(i) - \phi_1^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\dot{\phi}_1(i) - \dot{\phi}_1^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\beta_2(i) - \beta_2^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\dot{\phi}_2(i) - \dot{\phi}_2^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\phi_2(i) - \phi_2^*(i)]^2 + \sum_{i=1}^n [\dot{\phi}_2(i) - \dot{\phi}_2^*(i)]^2 \quad (13)$$

根据文献[2], 8 个待估计参数的边界范围为:

$$\begin{aligned} &[k_{1\max}, k_{2\max}, k_{3\max}, k_{r1\max}, c_{1\max}, k_{r2\max}, c_{2\max}, K_{12\max}] = \\ &[-10^5, -10^5, -10^5, 10^7, 10^6, 10^6, 10^6, 10^7] \\ &[k_{1\min}, k_{2\min}, k_{3\min}, k_{r1\min}, c_{1\min}, k_{r2\min}, c_{2\min}, K_{12\min}] = \\ &[-10^6, -10^6, -10^6, 10^6, 10^5, 10^5, 10^5, 10^6] \end{aligned}$$

遗传算法通过模仿生物物种进化过程求解实际寻优问题。可行解集类比生物学中的种群,每个单解对应生物个体。生物学中个体的独特性体现在不同个体染色体的差异,而染色体由多组基因构成。在本文研究场景下,个体对应不同的参数估计结果,8个待估计参数则对应8组基因。该

算法模仿自然界优胜劣汰法则,通过选择、交叉、变异3个步骤,使适应度高的个体得以保留。定义参数包括种群个数、进化代数、选择和变异的概率等。通过调研文献[10],这些参数并没有统一的选择标准,而是根据实际问题 and 经验选取,种群个数一般为几十个,进化代数在100至1 000代之间。本文设定种群规模为10个,进化代数为500代,采用实数编码方式。算法目标函数值越小,个体适应度越大;选择概率越高,变异概率越小,详细流程如图4所示。

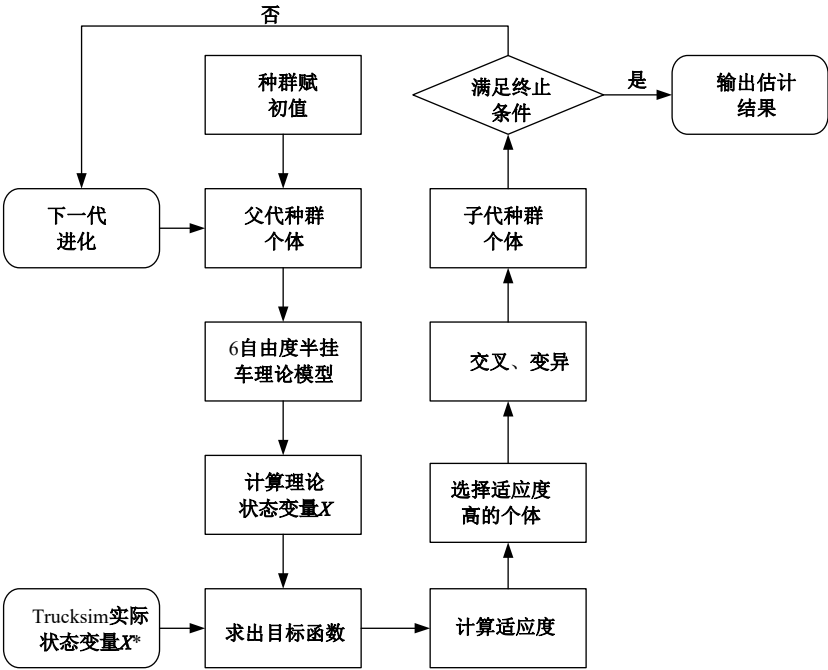


图4 遗传算法估计半挂车稳定性参数流程图

Fig. 4 Flow chat of semi-trailer stability parameters

最终得到目标函数 J 与遗传代数的关系曲线,如图5所示。

由图5可知,随着遗传代数的增加,目标函数

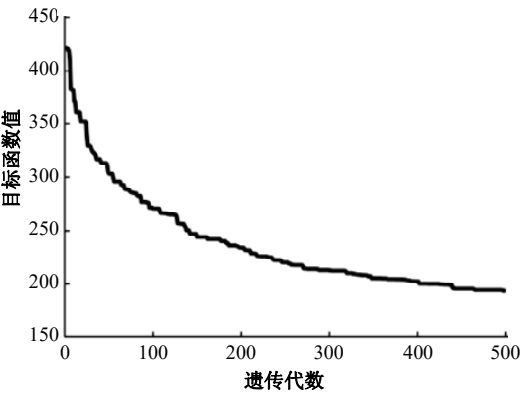


图5 目标函数与遗传代数关系

Fig. 5 Relationship between the objective function and number of generations

J 逐渐递减,这表明自建理论模型输出的8个状态变量与 Trucksim 软件输出的状态变量愈发趋近重合。最终估计得到的8个稳定性参数结果如表2所示。

表2 半挂车稳定性参数估计结果

Table 2 Estimation results f stability parameters of semi-trailer o

稳定性参数项	估计值
牵引车前轴轮胎等效侧偏刚度 $k_1/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-2.96×10^5
牵引车后轴轮胎等效侧偏刚度 $k_2/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-5.74×10^5
挂车轴轮胎等效侧偏刚度 $k_3/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-6.51×10^5
牵引车车身侧倾刚度 $k_{r1}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	2.07×10^4
牵引车车身侧倾阻尼 $c_1/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	3.62×10^5
挂车车身侧倾刚度 $k_{r2}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	6.05×10^5
挂车车身侧倾阻尼 $c_2/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	3.49×10^5
铰接点等效侧倾刚度 $k_{12}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	1.53×10^7

2.2 遗传算法离线辨识结果验证

将遗传算法辨识结果代入自建半挂车四自由度模型和六自由度模型中,工况为车速 40 km/h、前轮转角正弦输入,模型输出状态与 Trucksim 软件仿真输出状态对比结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在当前工况下,将遗传算法辨识的结果代入理论模型后,其输出状态变量的整体曲线趋势与 Trucksim 软件输出的基本吻合,但存在局部峰值偏差过大和滞后现象,特别是针对半挂车而言。尽管在车速 40 km/h、前轮

转角正弦输入工况下,利用估计结果构建的理论模型与 Trucksim 模型吻合相对较好,但无法保证遗传算法离线辨识的结果在其他工况下仍然具有较高的准确性。为此,本文修改了验证工况:第 1 次车速提升至 70 km/h,前轮转角正弦输入不变;第 2 次采用方向盘角阶跃输入,车速保持 40 km/h 不变;第 3 次车速调整为 30 km/h,采用前轮角阶跃输入。以此验证估计结果的工况适应性,以牵引车和半挂车的质心侧偏角为例,验证结果如图 7 所示。

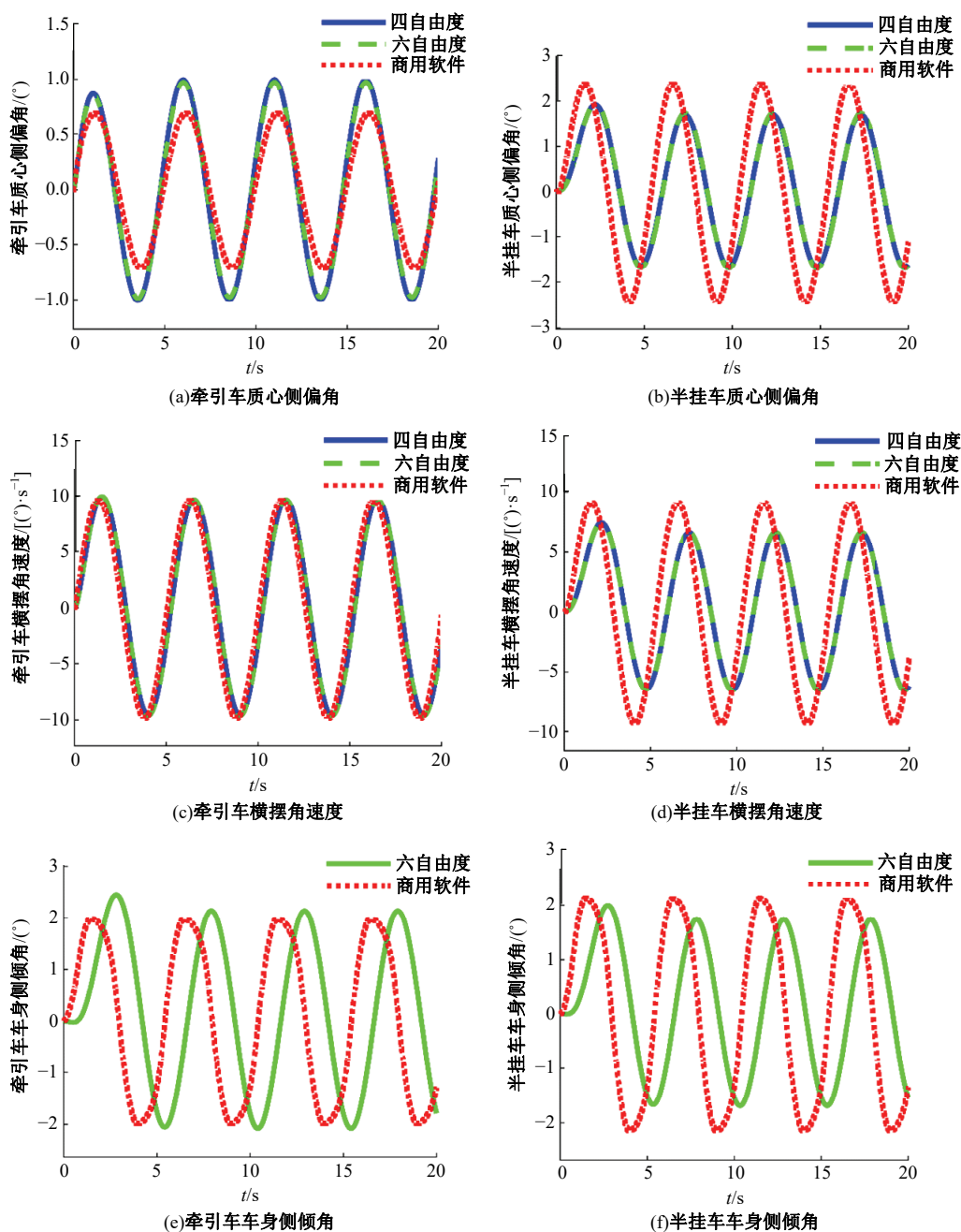


图 6 辨识工况下 40 km/h 正弦输入车辆状态

Fig. 6 40 km/h sinusoidal input the vehicle status under identifies working conditions

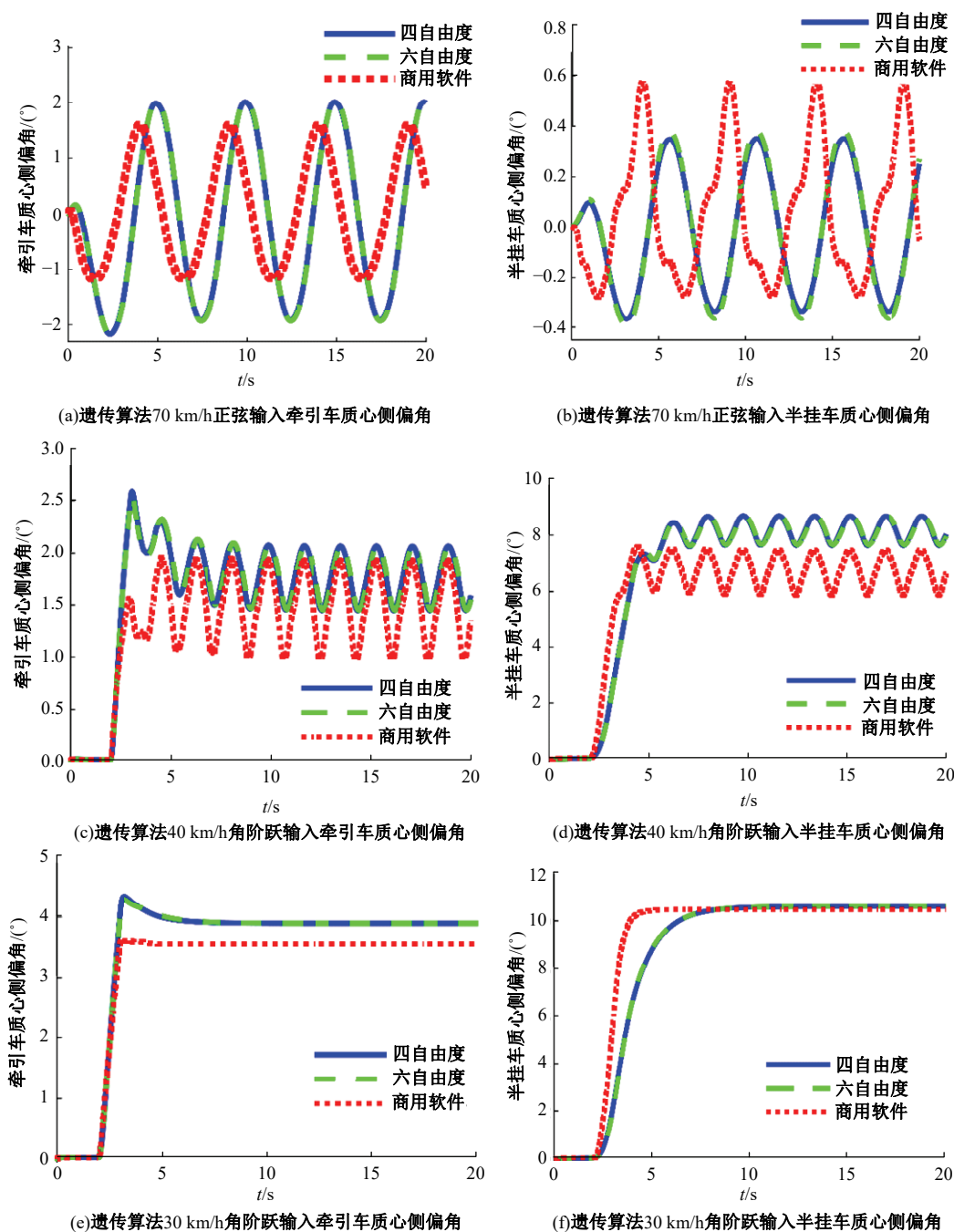


图 7 不同测试工况下牵引车与半挂车质心侧偏角

Fig. 7 Centroid side declination angle of tractor and semi-trailer under different test conditions

由图 7 可知,当修改测试工况后,40 km/h 正弦输入工况下辨识的参数代入理论模型,其输出结果与 Trucksim 实际输出结果的差距开始变大。这表明单一采用遗传算法离线估计车辆稳定性参数存在工况适应性差的问题,辨识工况下得到的参数结果无法适用于其他工况场景,致使理论模型精度下降,无法实时在线使用。为此,本文提出将遗传算法的估计结果作为初始值,代入带遗忘因子的 RLS 中进行在线修正。最终检验融合估

计方法是否能弥补单一遗传算法估计结果工况适应性差的不足。

3 基于 RLS 方法的稳定性参数估计

3.1 基于遗传算法初值的 RLS 辨识稳定性参数

带遗忘因子的 RLS 由传统最小二乘法 (Least squares, LS) 改进而来^[11]。最小二乘法的应用场景可概括为两类:一类是辨识含噪声系统中的未知量;另一类是求解矩阵不满秩的方程问

题^[12],如下所示:

$$B = \begin{cases} Ax + \theta \\ Ax \end{cases} \quad (14)$$

式中: θ 为噪声; A 不满秩。

估计轮胎侧偏刚度属于第一类情况,估计车身侧倾系数属于第二类情况。以三轴轮胎等效侧偏刚度 k_1, k_2, k_3 为例,轮胎侧偏角 α 可通过式(5)~式(7)计算得到,侧向力 F_y 可由 Trucksim 软件输出接口得到,实际应用中也可通过传感器测取。由于系统存在噪声干扰,本文利用侧偏角 α 和侧向力 F_y 估计三轴轮胎等效侧偏刚度。在该估计问题中,侧偏刚度 k 对应最小二乘法中的未知数 x ,侧向力 F_y 对应已知矩阵 B ,侧偏角 α 对应已知矩阵 A 。最小二乘法的目标是找到最优 x ,使目标函数取最小值,如下所示:

$$J = \min \|Ax - B\|^2 = \min \left(\sum_{i=1}^n (Ax_i - B_i)^2 \right) \quad (15)$$

利用数学求极值方法,对目标函数 J 关于 x 求偏导并令其等于0,得到 x 结果如下:

$$\frac{\partial \|Ax - B\|^2}{\partial x} = 0 \Rightarrow x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (16)$$

上述计算得到的 x 即为最优结果,但在实际问题中,矩阵 A 和 B 均随时间变化,且随着时间推移会不断新增元素,因此传统最小二乘法无法在线使用。此外,传统最小二乘法每新增一组数据均需重新计算矩阵乘法,非常耗费时间和算力。为此,本文采用 RLS 解决实时估计问题,具体步骤如下:

$$\begin{aligned} A_k &= \begin{bmatrix} A_{k-1} \\ a_k \end{bmatrix}, B_k = \begin{bmatrix} B_{k-1} \\ b_k \end{bmatrix} \\ \xrightarrow{\text{常规最小二乘法}} x_k &= (A_k^T A_k)^{-1} A_k^T B_k \\ \begin{cases} A_k^T A_k = \begin{bmatrix} A_{k-1}^T & a_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{k-1} \\ a_k \end{bmatrix} = A_{k-1}^T A_{k-1} + a_k^T a_k \\ A_k^T B_k = \begin{bmatrix} A_{k-1}^T & a_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{k-1} \\ b_k \end{bmatrix} = A_{k-1}^T B_{k-1} + a_k^T b_k \end{cases} \\ \xrightarrow{\text{代入} x_k \text{中}} x_k &= x_{k-1} + (A_k^T A_k)^{-1} a_k (b_k - a_k^T x_{k-1}) \\ \xrightarrow{\text{令} P_k = (A_k^T A_k)^{-1}} P_k &= \left[I - \frac{P_{k-1} a_{k-1} a_{k-1}^T}{I + a_{k-1}^T P_{k-1} a_{k-1}} \right] P_{k-1} \end{aligned} \quad (17)$$

最优 x_k 由上一时刻 x_{k-1} 、初始矩阵 A 与新增元素 a_k, b_k 递推得到,先计算增益 P_k ,再代入 x_k 递推公式中即可得到最优解。改进的 RLS 可以实时估计上述未知稳定性结构参数。但随着时间推

移,数据会逐渐递增,而 RLS 等价考虑所有数据影响,容易出现数据饱和问题。实际上,应该对新增的数据给予较高的考虑权重,对存在较久的旧数据给予较低权重。为此,本文引入遗忘因子 λ 对目标函数进行修正,具体计算方法与最终递推公式如下:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} \|Ax_k - B_k\|^2 \\ A_k^* &= \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda}^{k-1} a_1 & \sqrt{\lambda}^{k-2} a_2 & \dots & \sqrt{\lambda}^1 a_{k-1} & \sqrt{\lambda}^0 a_k \end{bmatrix}^T \\ B_k^* &= \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda}^{k-1} b_1 & \sqrt{\lambda}^{k-2} b_2 & \dots & \sqrt{\lambda}^1 b_{k-1} & \sqrt{\lambda}^0 b_k \end{bmatrix}^T \\ \xrightarrow{\text{按照递推公式}} x_k &= x_{k-1} + (A_k^{*T} A_k^*)^{-1} a_k^T (b_k - a_k^T x_{k-1}) \\ \xrightarrow{\text{令} P_k^* = (A_k^{*T} A_k^*)^{-1}} P_k^* &= \left[I - \frac{P_{k-1}^* a_{k-1} a_{k-1}^T}{I + a_{k-1}^T P_{k-1}^* a_{k-1}} \right] P_{k-1}^* \end{aligned} \quad (18)$$

所有未知参数的估计均按上述步骤进行,本文设定遗忘因子 $\lambda=0.95$,将遗传算法的估计结果为初值代入 RLS 算法中,仍以车速 40 km/h、前轮转角正弦输入为辨识工况。图 8(a)为三轴轮胎等效侧偏刚度的估计结果,与遗传算法的估计结果相比,可以发现 RLS 辨识的等效侧偏刚度最终趋于波动,而非精确不变的具体数值,但波动并不发散而是趋于较为稳定区间。以牵引车前轴轮胎等效侧偏刚度 k_1 为例,将结果放大后发现其波动范围大致围绕在遗传算法估计结果 -2.96×10^5 附近。这表明 RLS 在线估计方法的实时性较好,能够在遗传算法估计结果的基础上,根据车辆状态和外界环境实时调整参数估计值。其余待估计参数均与之类似,如图 8 所示。

3.2 基于遗传算法初值的 RLS 法辨识结果验证

为检验融合遗传算法与 RLS 的估计方法是否有效,能否解决遗传算法离线辨识工况适应性差和实时性不足的问题。将 RLS 的估计结果实时传输到半挂车四自由度和六自由度模型中,并与 Trucksim 软件的输出状态结果进行比对验证。采用与遗传算法相同的测试工况,即车速 70 km/h、正弦输入,车速 40 km/h、角阶跃输入,车速 30 km/h、角阶跃输入。由于涉及工况和状态变量较多,图 9 仅以牵引车和挂车横摆角速度为例展示测试结果。

由图 9 可知,遗传算法与 RLS 相融合的估计方法具有更好的工况适应能力,理论模型与实际 Trucksim 仿真结果的重合度比单一遗传算法估

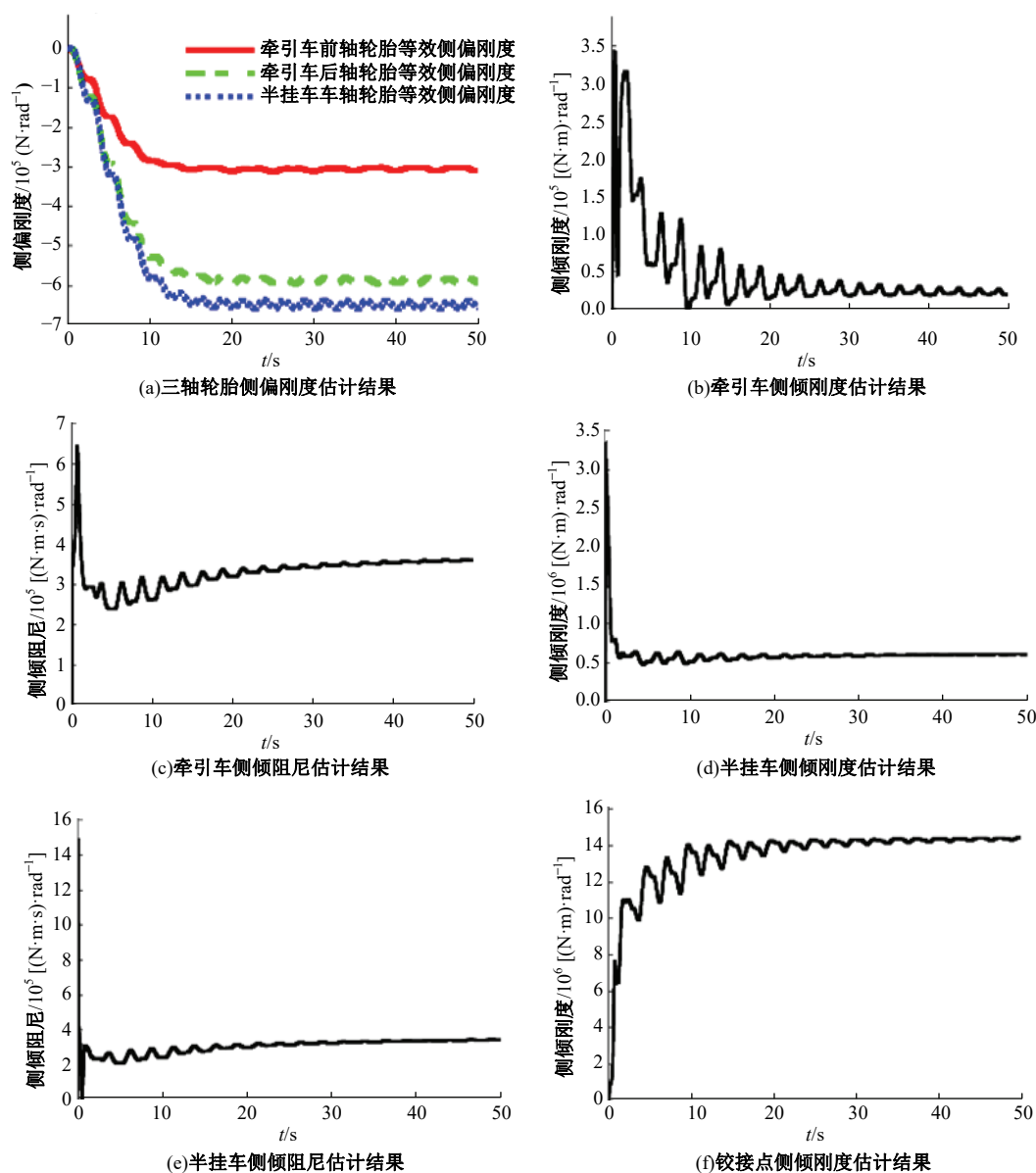


图 8 融合遗传算法与 RLS 的稳定性参数估计结果

Fig. 8 Estimation results of stability parameters based on fusion genetic algorithm and RLS

计更高。为定量对比两种方法的估计精度,分别计算两种方法的残差指标 MSE,计算公式如式(19)所示。其中上角标带有星号的数据为 Trucksim 结果,下角标 1 为牵引车状态,角标 2 为

挂车状态。MSE 的含义是辨识结果代入理论模型得出的状态数据与 Trucksim 仿真数据的相对误差平方根,数值越小表明理论模型与仿真数据误差越小,辨识结果的准确性越高。

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1, 2}^n \left[(\beta_j - \beta_j^*)^2 + (\dot{\beta}_j - \dot{\beta}_j^*)^2 + (\phi_j - \phi_j^*)^2 + (\dot{\phi}_j - \dot{\phi}_j^*)^2 \right]}{\sum_{i=1, j=1, 2}^n (\beta_j^{*2} + \dot{\beta}_j^{*2} + \phi_j^{*2} + \dot{\phi}_j^{*2})}} \quad (19)$$

表 3 为两种估计方法下状态变量 MSE 的平均值。采用单一遗传算法离线辨识的残差指标平均值为 0.196,采用带遗忘因子 RLS 融合辨识的残差指标平均值为 0.077,误差降低 6%。该结果证明,本文方法可以提升稳定性参数估计的工况

适应性和准确性。

两种辨识方法下状态变量的残差结果如图 10 所示。

考虑到成本、安全性及实验室设备条件,为了验证本文方法的科学性和有效性,以商用软件模

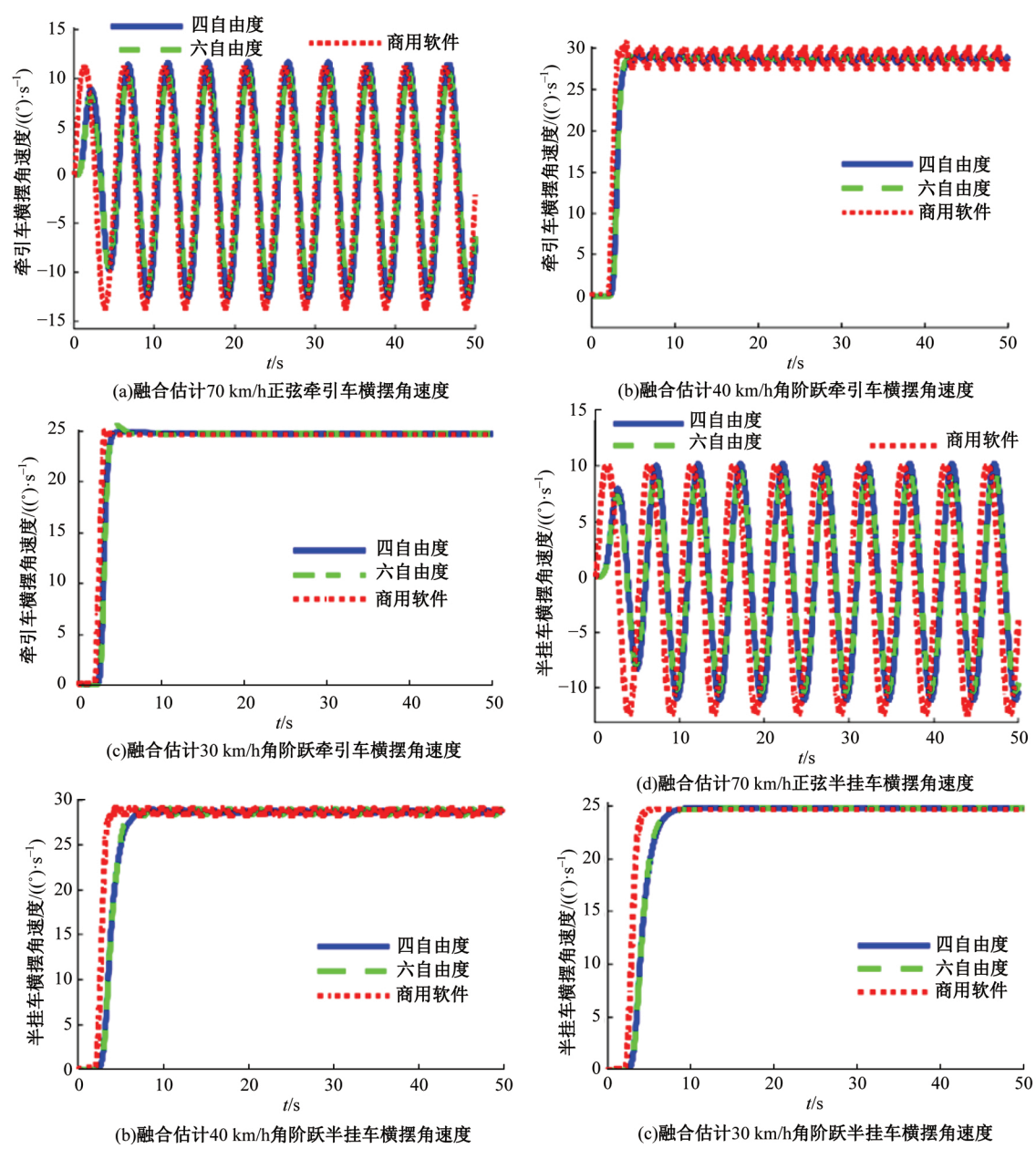


图9 融合遗传算法与RLS估计在不同测试工况下牵引车与挂车横摆角速度

Fig. 9 Combining genetics algorithm and RLS to estimate yaw velocity of a tractor and semi-trailer under different test conditions

表3 两种辨识方法下状态变量计算残差指标MSE均值

Table 3 Mean value of the residual inder MSE Calculated from state variable under two identification methods	
辨识方法	MSE均值
单一遗传算法离线辨识	0.196
带遗忘因子RLS融合辨识	0.077

型在相同工况下的输出结果作为对标对象,并与其他科研团队的仿真测试数据进行对比^[10]。结果显示,本文方法的参数估计结果均处于合理范围内。基于本文方法建立的挂车动力学模型,可为后续稳定性控制的研发奠定基础。

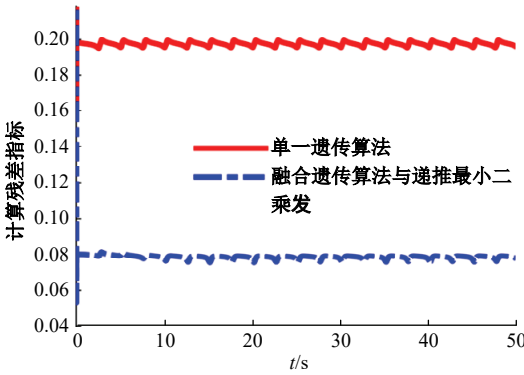


图10 两种辨识方法下状态量的计算残差MSE
Fig. 10 Calculated residual MSE of state variable under two identification methods

4 结 论

(1)融合遗传算法与RLS的辨识方法工况适应性更强,单一遗传算法离线辨识的结果仅在辨识工况下与商用软件仿真结果较吻合,在其他工况下两者差距较大。

(2)融合遗传算法与RLS的辨识方法估计精度更高,所得理论模型与软件仿真结果的误差更小,残差平均值为0.077,比单一遗传算法残差平均值降低约6%,提升了挂车动力学建模的精确性。

参考文献:

- [1] 李一兵, 孙岳霆, 徐成亮, 等. 基于交通事故数据的汽车安全技术发展趋势分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(3): 241-253.
Li Yi-bing, Sun Yue-ting, Xu Cheng-liang, et al. Analysis of the development trend of automobile safety technology based on traffic accident data[J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2016, 7(3): 241-253.
- [2] 刘钱. 基于参数辨识的半挂汽车列车稳定性控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械工程学院, 2021.
Liu Jian. Study on stability control strategy of semi-trailer based on parameter identification[D]. Wuhan: School of Mechanical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [3] Bolhasani M R, Goldberg T. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. Reading, Ma: Addison-Wesley, 1989.
- [4] Bolhasani M R, Azadi S. Parameter estimation of vehicle handling model using genetic algorithm[J]. Scientia Iranica, 2002, 11(12): 121-127.
- [5] Baffet G, Charara A, Lechner D. Experimental evaluation of observers for tire-road forces, sideslip angle and wheel cornering stiffness[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(6): 501-520.
- [6] 宗长富, 聂枝根, 张振. 厢式半挂车简化模型参数辨识研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(4): 112-120.
Zong Chang-fu, Nie Zhi-gen, Zhang Zhen. Parameters identification for simplified model of container semi-trailer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(4): 112-120.
- [7] 王杰. 基于扩展卡尔曼滤波的车辆参数辨识[J]. 现代机械, 2019, 1(3): 4-9.
Wang Jie. Vehicle parameter identification based on EKF[J]. Modern Machinery, 2019, 1(3): 4-9.
- [8] 易鑫, 陈勇. 扩展卡尔曼滤波与遗传算法结合的车辆状态估计[J]. 重庆理工大学学报, 2022, 36(12): 1-8.
Yi Xin, Chen Yong. Extended vehicle state estimation based on the combination of Kalman filter and genetic algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2022, 36(12): 1-8.
- [9] 李洪雪, 李世武, 孙文财, 等. 考虑垂向-侧向运动的半挂列车动力学建模及分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(5): 49-56.
Li Hong-xue, Li Shi-wu, Sun Wen-cai, et al. A semi-trailer train that considers vertical-lateral movement dynamic modeling and analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 49-56.
- [10] 梁群彰. 基于参数辨识的半挂汽车列车侧翻控制系统研究[D]. 南宁: 广西大学交通运输学院, 2016.
Liang Qun-zhang. Research on rollover control system of semi-trailer train based on parameter identification[D]. Nanning: School of Transportation, Guangxi University, 2016.
- [11] 叶明, 卢祥伟, 张利杰, 等. 双遗忘因子最小二乘法车辆质量和时变坡度估计[J]. 重庆理工大学学报, 2023, 37(6): 1-9.
Ye Ming, Lu Xiang-wei, Zhang Li-jie, et al. Double forgetting factor, least squares vehicle mass and time-varying slope estimation[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2023, 37(6): 1-9.
- [12] Miede A, Cebon D. Active roll control of an experimental articulated vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2005, 219(6): 791-806