



中国机械工程  
China Mechanical Engineering(中国机械工程)  
ISSN 1004-132X,CN 42-1294/TH

## 《中国机械工程》网络首发论文

题目：重型商用车辆质量估计算法研究  
作者：臧政，霍炜，王玉海，李兴坤，郑旭光，李圆圆  
收稿日期：2019-05-27  
网络首发日期：2019-10-09  
引用格式：臧政，霍炜，王玉海，李兴坤，郑旭光，李圆圆. 重型商用车辆质量估计算法研究. 中国机械工程.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20191009.1610.004.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 重型商用车质量估计算法研究

臧 政<sup>1</sup> 霍 炜<sup>1</sup> 王玉海<sup>2</sup> 李兴坤<sup>3</sup> 郑旭光<sup>3</sup> 李圆圆<sup>4</sup>

1. 青岛大学机电工程学院, 青岛, 266071

2. 吉林大学青岛汽车研究院, 青岛, 266071

3. 中寰卫星导航通信有限公司青岛分公司, 青岛, 266071

4. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京, 100089

**摘要：**针对重型卡车在预见性巡航控制(Predictive Cruise Control, PCC)过程中的质量精确估计这一问题,以车辆纵向动力学模型为基础,利用卡尔曼滤波算法(Kalman Filtering, KF)对车辆扭矩进行估计,将其作为质量估计的输入。基于最小二乘法对整车质量进行估计。将 Matlab/Simulink 搭建的质量估计控制策略进行 C 代码生成,嵌入到开发板中。并对其策略进行空载、1/3 载、满载实车道路试验。试验结果表明:本文的整车质量估计控制策略在满载时误差为 8.87%, 1/3 载误差为 7.43%, 空载误差为 4.4%,能够满足车辆在预见性巡航过程中 10%之内的质量估计误差要求,对车辆行驶的稳定性与安全性具有重要作用。

**关键词：**车辆质量; 最小二乘法; 卡尔曼滤波; 加速度传感器; 预见性巡航

**中图分类号：**U463.212

DOI :

## Research on Mass Estimation Algorithm for Heavy Commercial Trucks

ZANG Zheng<sup>1</sup> HUO Wei<sup>1</sup> WANG Yuhai<sup>2</sup> LI Xingkun<sup>3</sup> ZHENG Xuguang<sup>3</sup> LI Yuanyuan<sup>4</sup>

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao, 266071

2. Qingdao Automotive Research Institute, Jilin University, Qingdao, 266071

3. China Satellite Navigation Communications Co.Ltd. Qingdao Branch, Qingdao 266071,

4. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100089

**Abstract:** In order to accurately estimate the mass of heavy trucks in the Predictive Cruise Control (PCC) process, based on the vehicle longitudinal dynamics model, the Kalman filter algorithm is used to estimate the vehicle torque which is an input as the algorithm. The vehicle mass is estimated based on the least squares method. The mass estimation control strategy built by Matlab/Simulink is generated by C code and embedded in the development board. And the strategy is carried out with no-load, one-third load, full load road test. The test results show that the vehicle mass estimation control strategy of this paper is 8.87% at full load, 3.73% load error is 7.43%, and the no-load error is 4.4%, which can meet the requirement within 10% of the error. This algorithm plays an important role in the stability and safety of the vehicle.

**Key words:** vehicle mass; least squares method; Kalman filter; acceleration sensor; Predictive Cruise Control

## 0 引言

预见性巡航控制系统<sup>[1-3]</sup>通过全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)确定车辆位置,使用集成于 ADASIS 地图数据的 T-BOX(Telematics-BOX)可以预测前方道路路况如坡度的大小、道路弯曲度等,根据预测的路况信息对发动机的扭矩、转速、油门开度、挡位进行调节,可使发动机、变速器工作在最佳工况<sup>[4]</sup>。在预见性巡航过程中车辆状态参数估计对车辆的

安全行驶非常重要,其中整车质量是控制发动机期望扭矩和换挡控制系统挡位决策的关键参数量,其精确估计自动变速器换挡效率<sup>[5-6]</sup>,影响车辆的控制响应,同时也能使发动机的输出扭矩在合理范围内,有利于降低发动机燃油消耗率。

目前国内外研究者或研究机构在整车质量估计领域已取得一定的成果。文献[7]基于车辆纵向动力学方程,在假定道路坡度已知的情况下,通过获取发动机扭矩值,利用卡尔曼滤波观测器<sup>[8]</sup>对车辆质量进行估计,但坡度如果发生了变化该方法在估计整车质量就会出现较大的误差。文献

[9]车辆在加、减速行驶的过程中,利用车辆的惯性对整车质量进行估计,此方法如果用在道路坡度变化比较大的情况下,质量估计误差将会太大。文献[10]利用GPS获取道路坡度数据,然后将测量的道路坡度信息与发动机扭矩信息一起使用,基于纵向动力学平衡方程,通过对滚动阻力,空气阻力的估计进而得出质量估计值。由于道路坡度的时变形,文献[11]开发了一款道路坡度估计的非线性估计器,并通过车辆CAN获取车辆信息,基于自适应最小二乘策略来估计整车质量。文献[12]设计了一款车辆质量的主动在线估计方案,并结合扩展卡尔曼滤波器以生成在线参数估计和模型预测控制器以控制车辆速度轨迹,增强参数可识性,进而来估计车辆质量。该方法需要较大激励,难以对参数进行估计。文献[13]提出一种在线估计车辆质量估计的方法,该方法建立在受外部扰动较小理论基础上,对整车CAN信号进行滤波,并将滤波后的数据发送给基于递归最小二乘的质量估计器中。文献[14]验证了在崎岖道路上行驶车辆的簧载质量,提出了一种纵向行驶动力学的基本激励模型,它将非簧载质量加速度作为纵向动力学模型的输入,采用开发的多项式复合理论,基于递归最小二乘、扩展卡尔曼滤波与无迹卡尔曼滤波方法对车辆簧载质量进行估计,该方法计算量较大,程序运行比较复杂。文献[15]以纵向动力学模型为基础,运用前向欧拉法将空间模型状态方程离散化,获得方程向量函数的Jacobian 矩阵,基于扩展卡尔曼滤波算法对车辆质量进行了估计。文献[16]基于加速度与车轮转速信息,推导出两者之间得关系,进而求得整车质量,并用软件仿真进行了验证,但该方法没有对算法进行实车道路测试。

为此,为了在重型卡车预见性巡航控制过程中质量精确估计,提高变速器换挡效率。本文基于纵向动力学模型,利用普遍在智能车辆广泛安装的加速度传感器,通过卡尔曼滤波对扭矩进行估计,并作为载重估计算法的输入,利用最小二乘算法对多次计算结果进行迭代拟合。使用Matlab自动代码生成技术获得板级程序,最后并对算法进行空载、1/3载、满载实车道路试验,验证了算法的可行性,该算法在预见性巡航过程中进行质量估计具有重要作用。

## 1 整车质量估计算法

### 1.1 车辆纵向动力学模型

在车辆运动的过程中,可以把车辆看成一个刚体,行驶车辆纵向加速度是由滚动阻力、加速阻力、坡道阻力、空气阻力、驱动力等共同作用引起的。车辆的纵向动力学模型如图 1 所示。车

辆的纵向动力学方程可简化为

$$m\ddot{x} = F_{engine} - mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{x}^2 - fmg \cos \theta \quad (1)$$

在式中,  $m$  为车辆驱动力;  $\ddot{x}$  为车辆加速度;  $\dot{x}$  为车辆行驶速度;  $F_{engine}$  为车辆驱动力;  $\theta$  为道路坡度角;  $\rho$  为空气密度;  $C_D$  为空气阻力系数;  $A$  为车辆迎风面积,  $f$  为滚动阻力系数,

进一步可以整理为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} F_{engine} - \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \theta + f \cos \theta \end{bmatrix} g - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\rho C_D A}{2m} \end{bmatrix} \dot{x}^2 \quad (2)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

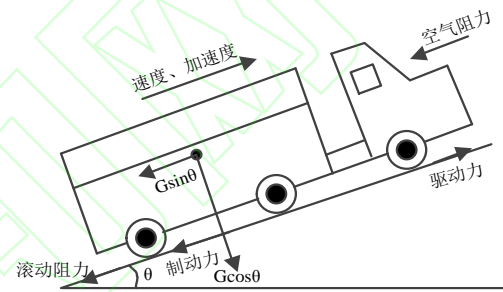


图 1 车辆纵向动力学模型

Fig. 1 Vehicle longitudinal dynamics model

### 1.2 基于 MXP7205VF 加速度传感器车辆质量估计

当车辆在平路或在坡道上行驶时,车辆沿行驶方向的加速度如图 2 所示,加速度传感器沿坡道方向测得值为车辆运动的加速度与重力沿坡道水平方向的分量和。其中,加速度传感器的  $x$  轴沿车辆行驶的方向,  $y$  轴沿垂直于车辆行驶路面方向。

车辆的加速度可由式(1)变形为,

$$m(\ddot{x} + g \sin \theta) = F_{engine} - \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{x}^2 - fmg \cos \theta \quad (4)$$

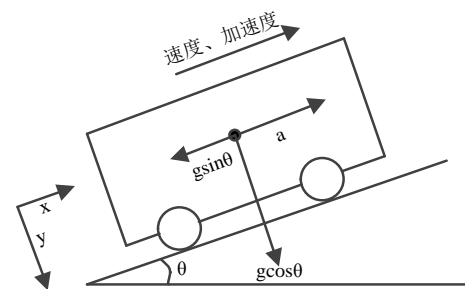


图 2 MXP7205VF 加速度传感器测量原理

Fig.2 MXP7205VF acceleration sensor measurement principle

在车辆行驶的过程中,发动机的扭矩,转速,速度可以从车辆 CAN 总线上获取,所以每一时刻车辆都会得到一个驱动力  $F_{engine}$ ;考虑到重型卡车一般在高速上行驶速度较低,空气阻力相对于其他阻力不在一个数量级上,所以可以忽略不计;滚动阻力系数  $f$  可以看作常量,则当车辆行驶的过程中没有刹车、没有踩离合踏板等情况下,可由前后两个时刻时间差来计算质量。一般情况下道路的路面坡度非常小,  $\cos\theta \approx 1$ ,则,

$$m(\underbrace{\ddot{x} + g \sin \theta}_{a_1}) = \underbrace{F_{engine}}_{F_1} - \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{x}^2 - fmg \cos \theta \quad (5)$$

$$m(\underbrace{\ddot{x} + g \sin \theta}_{a_2}) = \underbrace{F_{engine}}_{F_2} - \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{x}^2 - fmg \cos \theta \quad (6)$$

(5)、(6)可得,

$$m = \frac{F_2 - F_1}{a_2 - a_1} \quad (7)$$

### 1.3 质量拟合算法

RLS(Recursive Least Square)算法,是一种参数辨别的方法,是最小二乘法形式的递推,在每次取得一个新的观测值后,就会在上一次估计结果的基础之上,利用新的观测数据对上一次估计的结果,根据递推算法进行修正,减少估计误差,从而地推出新的参数估计值。随着新的观测值的引入,每次都会进行参数估计,直到参数值达到最佳。此方法不需要已知先验统计特性,并且收敛速度快、计算量较小。为了更好地估计整车质量,选择在车辆平稳行驶时进行估计。考虑到车辆的实际情况,在车辆行驶时,车辆应有较好的状态输入。故选择车辆在低速情况下进行整车质量估计,此时的轮胎侧偏特性在线性范围之内,所以可采用线性二自由度车辆模型。车辆整车质量估计模型如下:

$$ma_y = \frac{ak_1 - bk_2}{v_x} r + \beta(k_1 + k_2) - k_1 \alpha \quad (8)$$

其中,  $m$  为整车质量;  $a_y$  为侧向加速度;  $a$  为前轴到质心的距离;  $b$  为后轴到质心的距离;  $k_1$  为前轮总侧偏刚度;  $k_2$  为后轮总侧偏刚度;  $v_x$  为纵向加速度;  $r$  为横摆角速度;  $\beta$  为质心侧偏角;  $\alpha$  为前轮转角。

RLS 输入输出递推方程如下;

$$y(k) + \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) = \sum_{i=1}^n b_i u(k-i) + e(k) \quad (9)$$

$$y(k) = \varphi(k)^T \theta + e(k) \quad (10)$$

其中  $y(k)$  为输出量;  $u(k)$  为输入量;  $e(k)$  为建

模或者观测噪声引起的误差;  $\theta$  为待估参数组成的向量,

$$\theta = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)^T;$$

式中,  $n$  为待辨识参数的总个数。

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T$$

采用最小二乘法进行参数估计时,应该要求输出值  $y(k)$  偏差的加权平方和最小,  $y(k)$  可简化为每次计算的车辆牵引力,  $\varphi(k)$  可简化为车辆每次计算的加速度。因此本文整车质量参数估计,可以使此公式值最小

$$\sum_k^n [(y(k) - \theta \varphi(k))]^2,$$

对  $m$  求导可得:

$$\frac{d}{dm} \sum_i^n [y(k) - \theta \varphi(k)]^2 = -2 \sum_i^n [y(k) - \theta \varphi(k)] \varphi(k) = 0 \quad (11)$$

通过求解,即可得到整车质量最优估计值:

$$\hat{\theta} = \hat{m} = \sum_i^n y(k) \varphi(k) / \sum_i^n \varphi^2(k) \quad (12)$$

### 1.4 变速器动力学模型

本文研究的是某重型卡车单离合 12 挡商用车,定义  $i_1 \sim i_{12}$  分别为 1~12 挡的传动比,以 12 挡为例,假定各齿轮的传动效率均为  $\eta$ ,则在 12 挡行驶时的动力学方程为:

$$I'_{s,12} \dot{\omega}_s = T_e i_{12} i_{a12} \eta^2 - T_s - c'_{s,12} \omega_s \quad (13)$$

式中,  $I'_{s,12}$ ,  $c'_{s,12}$  分别为 12 挡行驶时等效到变速器输出轴上的转动惯量和旋转阻尼系数。

$I'_{s,12}$ ,  $c'_{s,12}$  计算方法为:

$$\begin{cases} I'_{s,12} = I_s + I_{m12} i_{a12}^2 \eta + (I_{c12} + I_e) i_{12}^2 i_{a12}^2 \eta^2 \\ c'_{s,12} = c_s + c_{m12} i_{a12}^2 \eta + (I_{c12} + I_e) i_{12}^2 i_{a12}^2 \eta^2 \end{cases} \quad (14)$$

12 挡稳定行驶时,变速器各轴满足以下关系:

$$\omega_e = \omega_{c12} = i_{12} i_{a12} \omega_s \quad (15)$$

$\omega_s$  可以从整车 CAN 总线上获取,将(13)整理为  $\omega_e$  的形式

$$I'_{s,12} \dot{\omega}_e = T_e i_{12} i_{a12} \eta^2 - T_s - c'_{s,12} \omega_e \quad (16)$$

在上述方程中忽略同步器的转动惯量、动态特性及同步器预换挡对  $I'_{s,12}$ ,  $c'_{s,12}$  的影响,所以车辆行驶时,  $I'_{s,n}$ ,  $c'_{s,n}$  可看作常数。设采样周期为  $dt$  对上式进行离散化处理:



$$w_{e,k} = \frac{dt}{I_{s,12}} (T_e i_{12}^2 i_{a12}^2 \eta^2 - i_{12} i_{a12} T_s - c_{s,1}' w_{e,k-1}) + w_{e,k-1} \quad (17)$$

假定系统的噪声均为相互独立的高斯白噪声，过程噪声向量为  $W_k$ ，测量噪声向量为  $V_k$ ，假定发动机输出扭矩与变速器输出转矩的瞬时变化较小，即  $T_e \approx 0$ ， $T_s \approx 0$ ，基于上述假设得到 12 挡稳定行驶时系统的状态方程(18)与测量方程(19)：

$$\begin{bmatrix} w_{e,k} \\ T_{e,k} \\ T_{s,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{c_{s,12}' dt}{I_{s,12}} & \frac{i_{12}^2 i_{a12}^2 \eta^2 dt}{I_{s,12}} & -\frac{i_{12}^2 i_{a12}^2 dt}{I_{s,12}} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{e,k-1} \\ T_{e,k-1} \\ T_{s,k-1} \end{bmatrix} + w_{k-1} \quad (18)$$

$$z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{e,k} \\ T_{e,k} \\ T_{s,k} \end{bmatrix} + V_k \quad (19)$$

### 1.5 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法利用反馈控制的方法估计过程状态；滤波算法估计过程中某一时刻的状态，然后以测得变量的行驶获得反馈。所以卡尔曼滤波可分为两部分，时间更新方程与状态更新方程。时间更新分为预测下一周期状态(20)，预测下一周期误差协方差(21)，

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1} \quad (20)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (21)$$

测量更新分为计算卡尔曼增量(22)，根据测量值更新估计值(23)，更新误差协方差(24)，

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{(HP_k^- H^T + R)} \quad (22)$$

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (23)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (24)$$

如此反复，每一次都用到前一次的状态而不需要之前所有的状态。一般情况下，在观测噪声协方差矩阵  $R$  与过程噪声协方差矩阵  $Q$  恒定的情况下，估计误差的协方差  $P_k$  与卡尔曼增益  $K_k$  会快速稳定并保持不变，因此可以先确定  $P_k$  与  $K_k$  的值，这样可以大大减少单片机的计算量，同时又保证了数据估算的准确度。采用卡尔曼滤波算法对变速器扭矩输出进行估计，在进行质量估计时，扭矩作为算法的输入。

## 2 质量估计算法与程序烧写

### 2.1 质量估计算法

对整车质量估计的 Matlab/Simulink 模型程序框图如图 3 所示，模型的输入参数有车辆行驶的速度，变速器的输入扭矩，发动机转速，车辆沿行驶方向的加速度，制动信号，离合信号。在对整车质量进行估计时，需要满足在没有制动信号、没有离合信号、速度大于零等条件下进行计算。

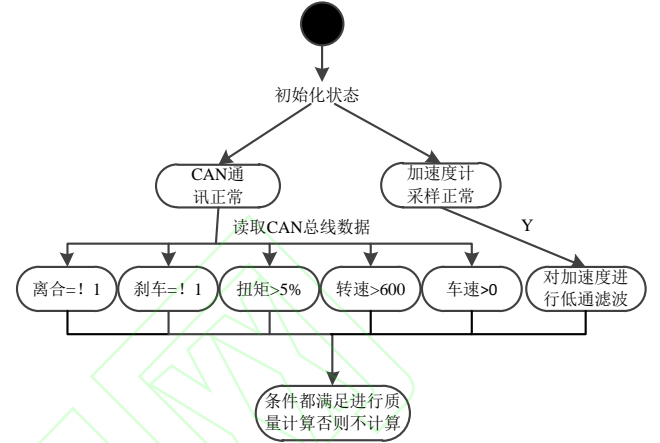


图 3 质量计算程序框图

Fig.3 mass calculation program block diagram

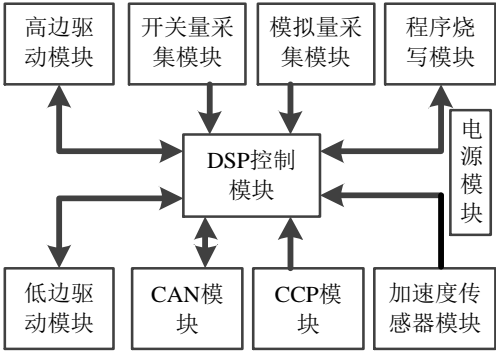
### 2.2 程序烧写

在完成质量模型的搭建后，用 Matlab/Simulink 自动代码生成技术，对所搭建的策略进行 C 代码生成。把生成的代码放到恩智浦 S32 Design Studio for ARM Version 编译环境中，用 J-link 烧写器对所生成的 C 代码进行程序烧写。其烧写的电路板为控制板，图为控制板功能图 4(a)，图为控制板试验实物图 4(b)，主要由 10 个模块组成

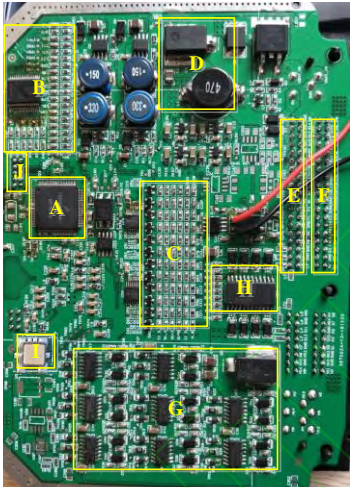
- 1) DSP(Digital Signal Process, 数字信号处理技术)控制模块，为进行质量估计运算的控制芯片，采用的 FREESCA 的 FS32K144HAML。L。
- 2) 开关量采集模块，是以开关量为输出形式的检测元件(如操作控制按钮、行程开关、接近开关、压力继电器等)的连接通道。如采集离合、刹车的开与关。
- 3) 模拟量采集模块，采集 0-5V 电压信号，4-20mA 电流信号的智能采集模块，其主要原理是将电压和电流信号采集输入，通过串口通信与上位机相连接。如采集加速踏板的大小。
- 4) 电源模块，为电路板供电，电压为 12V。
- 5) CAN 模块，通过接收车辆 CAN 总线发来的扭矩、转速、车速、离合、刹车等报文，并把计算的载重值发送到车辆 CAN 总线上。
- 6) CCP 模块，负责用外部设备监测标定变量的值。
- 7) 高边驱动模块，是指通过直接在用电器或者

驱动装置前通过在电源线闭合开关来实现驱动，开关位于电源和负载之间。

- 8) 低边驱动模块，是指通过在使用电器或者驱动装置后，通过闭合地线来实现驱动，开关位于负载和地之间。
- 9) 加速度传感器模块，负责计算车辆实时的加速度值，并把计算的加速度值发送到车辆 CAN 总线上。
- 10) 程序烧写模块，把生成的质量估计程序代码烧写进 DSP 中。



(a)控制板功能图



- A. DSP控制模块
- B. 开关量采集模块
- C. 模拟量采集模块
- D. 电源模块
- E. CAN模块
- F. CCP模块
- G. 高边驱动模块
- H. 低边驱动模块
- I. 加速度传感器模块
- J. 程序烧写模块

(b)控制板实物图

图 4 控制板功能图与实物图

Fig. 4 Control board function chart and physical map

3 实车验证

为了验证所设计得整车质量估计控制策略算法的有效性与准确性，以一汽解放 JH6 卡车为实车平台进行算法的验证，以实车道路数据为对象，分别以空车，半载，满载进行试验分别测定实车质量。图 5 为试验车辆，表 1 为车辆主要参数。试验之前，需要在车上固定好带有加速度传感器的电路板，电路板加速度传感器应该平行于车架，x 轴与车辆行驶方向相同。以图试验流程进行 3 种工况的实车数据采集与离线数据计算。试验车在道路上行驶时开始记录车辆 CAN 总线报文数据，记录算法所需要的发动机转速、车速、发动机扭矩、加速度等，在线采样装置周期为 0.01s。



图 5 一汽解放 JH6 实车

Fig.5 FAW Jiefang JH6 truck

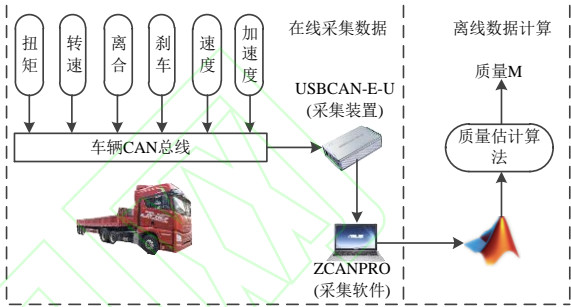


图 6 试验流程图

Fig.6 test flow chart

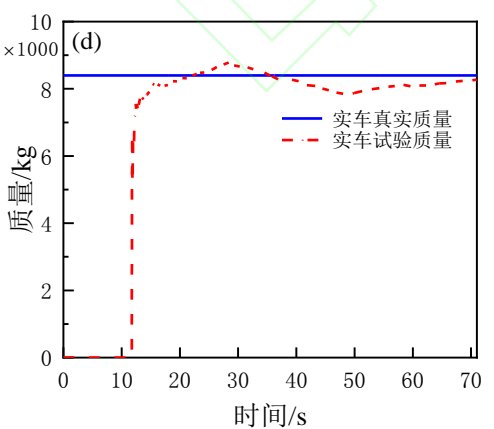
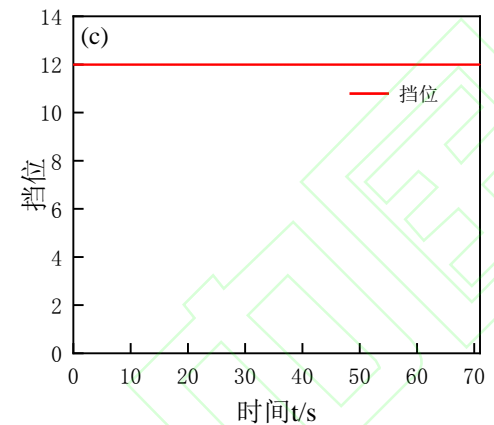
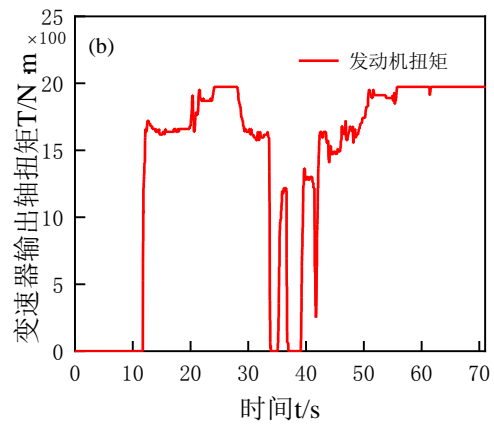
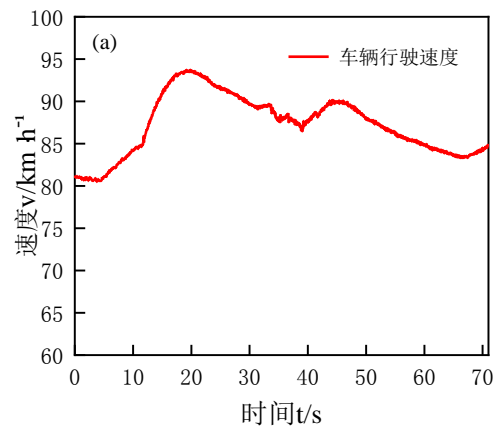
表 1 试验基本参数

Tab.1 Basic parameters of the test

参数名称/(单位)	数值
风阻系数 $C_d$	0.57
迎风面积 $A/(m^2)$	8
空气密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1.29
轮胎半径 $r/(m)$	0.5425
重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8
车辆质量(空载)/(kg)	8400
车辆质量(1/3 载)/(kg)	14800
车辆质量(满载)/(kg)	49600

3.1 空载试验

为了验证车辆在无负载的情况下的试验值，本次试验车辆没有进行加挂。此试验道路为平直道路。试验车辆的实际质量为 8.4 t，数据采集时刹车与离合处于关闭状态，试验过程中速度维持在 80 km/h 以上行驶，如图 7(a)所示。图 7(b)为利用卡尔曼滤波算法估计的扭矩值输出值。图 7(c)为行驶过程挡位图，图 7(d)为试验过程中质量试验值，试验质量最大值为 8.77 t，最小值为 7.9 t，最大误差为 4.4%。



(a)速度: (b)扭矩: (c)挡位: (d) 质量

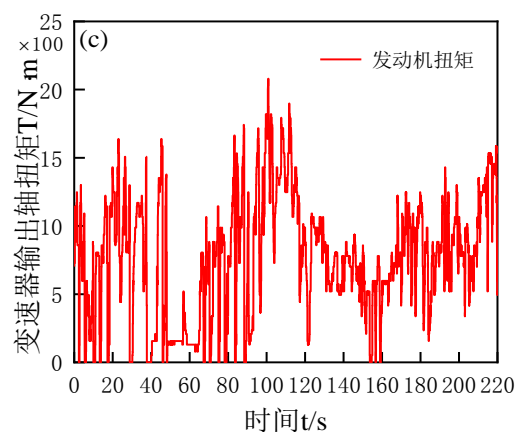
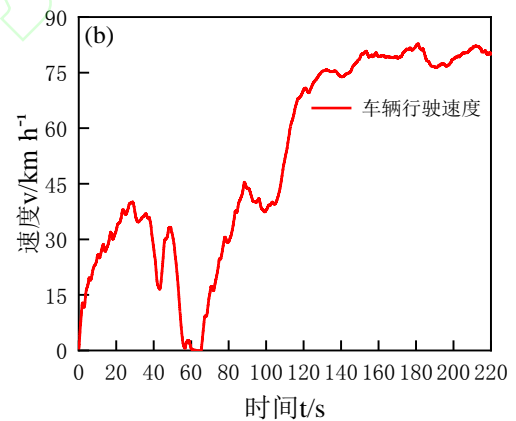
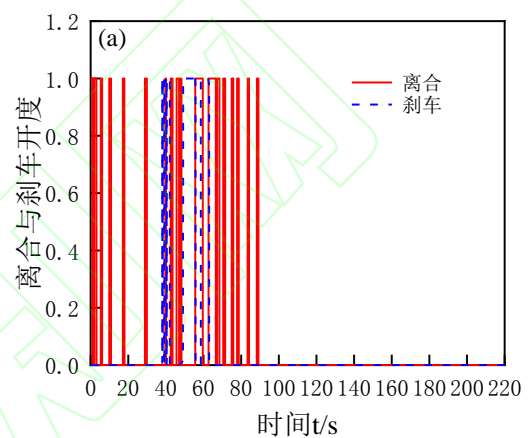
图 7 空载道路试验

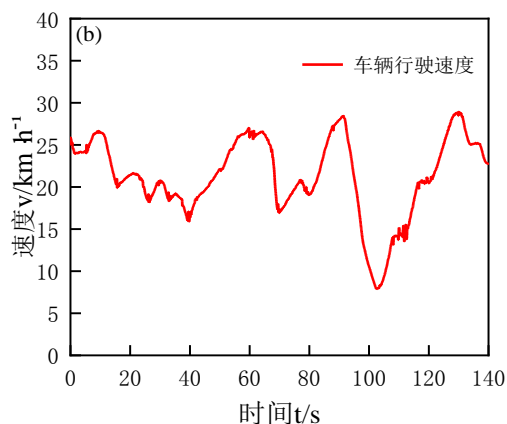
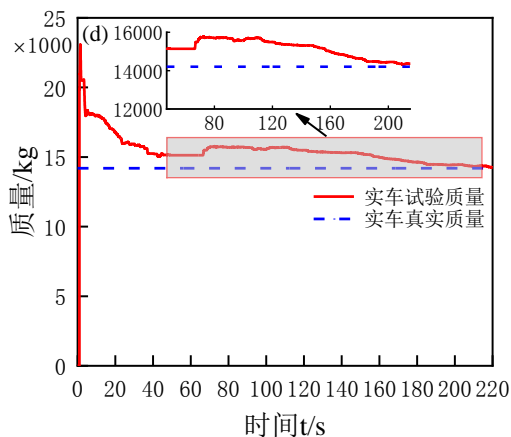
Fig.7 Empty load test

### 3.2 1/3 载试验

在空载试验结束后，对车辆进行带载试验。

为了验证车辆在 1/3 负载的情况下算法的可行性，首先对车辆加载质量，实际质量在 14.8 t。此试验道路为先平直与小上坡路结合的道路。图 8(a)为车辆在行驶过程中离合与刹车状态，其中 1 代表离合或者刹车被踩下，0 代表无离合或者刹车信号。试验过程中，道路工况比较复杂，在启动前 90 s 内离合刹车次数比较频繁，在 90 s 以后无离合刹车信号。图 8(b)为车辆行驶过程中车辆速度变化曲线。图 8(c)为利用卡尔曼滤波算法估计的扭矩值输出值。图 8(d)为测得试验车辆质量值，从图 8(d)可以发现车辆在行驶前 30 s 得时间范围内质量逐渐趋于真实值。在车辆质量逐渐趋于稳定得过程中，测得最大值为 15.9 t，最小值趋于 14.8 t，最大误差在 7.43%。





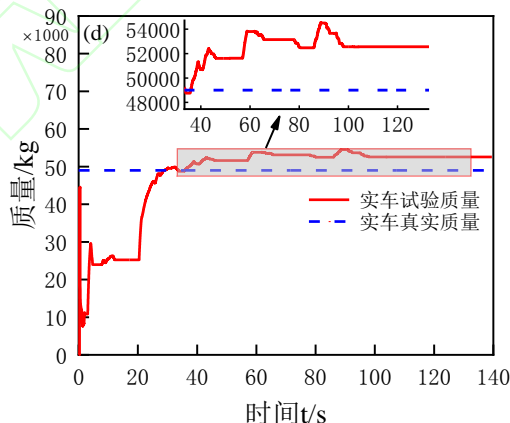
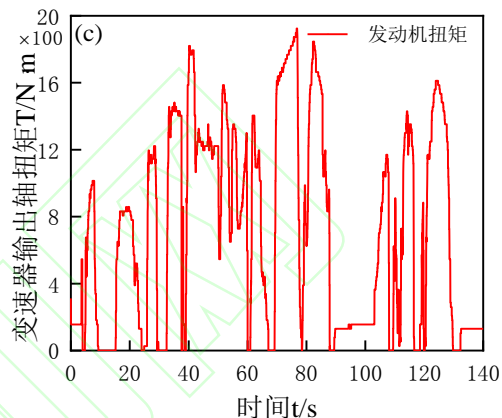
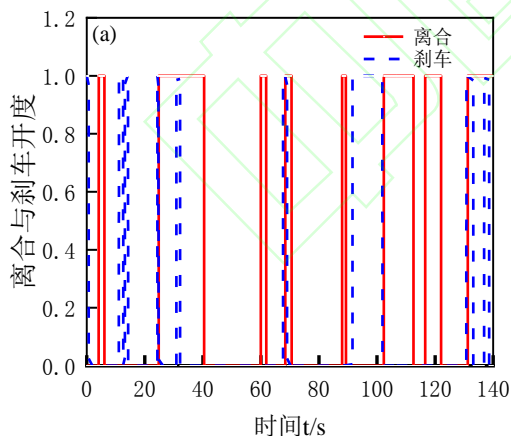
(a)离合与刹车: (b)速度: (c)扭矩: (d) 质量

图 8 1/3 载道路试验

Fig. 8 1/3 load test

### 3.3 满载试验

本次试验主要验证车辆在满载情况下算法的准确性,试验之前,对车厢加载,实际质量为 49.6 吨。此次试验道路与 1/3 载道路工况相同。图 9(a)为车辆行驶过程中离合与刹车的信号采集图。图 9(b)为车辆行驶过程中速度图,此次试验,由于载重太大,为了安全考虑,车辆速度一直维持在 20 km/h~25 km/h 行驶。图 9(c)为利用卡尔曼滤波算法估计的扭矩值输出值,此值作为载重计算的输入值。图(d)为试验过程中测得整车质量结果,可以看出在 35 s 之后试验载重值逐渐趋于稳定,在 35 s 之后测试载重值最大为 54 t,实际为 49.6 t,误差为 8.87%。可见该算法对估计整车质量时较为理想。



(a)离合与刹车: (b)速度: (c)扭矩: (d) 质量

图 9 满载道路试验

Fig. 9 Full load road test

## 4 结论

1) 本文基于车辆纵向动力学模型,利用 MXP7205VF 加速度传感器,对行驶车辆的加速度进行采集。并基于卡尔曼滤波算法对变速器扭矩进行估计。通过 Matlab/Simulink 对质量估计算法进行模型的搭建,基于 Matlab 自动代码生成技术,把模型生成的 C 代码烧写进 S32K144 电路板里。并通过最小二乘算法对车辆质量进行估计。

2) 基于一汽解放 JH6 重卡,对质量估计策略算法进行实车道路试验,分别进行了空载、半载、满载试验,与实际车辆载重误差分别为 4.4%, 7.43%, 8.87%, 具有较好的收敛性,均满足在预



见性巡航过程中质量估计误差 10% 以内的要求。

3)通过建立车辆变速器动力学模型, 利用卡尔曼滤波算法对变速器输出扭矩进行估计, 相比在半轴上加装扭矩传感器节约了成本。

4)算法在一定程度上能提高车辆在智能化方面的水平。车辆质量的精确估计有利于提高车辆行驶的稳定性与安全性, 同时也能提高变速器的换挡品质, 减少换挡次数。

**致谢** 本文得到了中寰卫星导航通信有限公司青岛分公司的试验支持, 及其吉林大学青岛汽车研究院的平台支持, 对此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] HellstroM E , Ivarsson M , Aslund, Jan, et al. LOOK-AHEAD CONTROL FOR HEAVY TRUCKS TO MINIMIZE TRIP TIME AND FUEL CONSUMPTION[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40(10):439-446.
- [2] Khayyam H , Nahavandi S , Davis S . Adaptive cruise control look-ahead system for energy management of vehicles[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3):3874-3885.
- [3] Bede Z , Németh, Balázs, Gáspár, Péter. Modeling and Simulation Based Analysis of Multi-Class Traffic with Look-Ahead Controlled Vehicles[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 27:593-599.
- [4] 杜葵. 载货汽车质量及路面坡度估计方法研究[D]. 长安大学, 2017.  
DU Yan. Research on the Method of Truck Quality and Road Slope Estimation [D]. Chang'an University, 2017.
- [5] 郝胜强, 罗培培, 席军强. 基于稳态卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计[J]. 汽车工程, 2018, 40(9):70-75+83.  
HAO Shengqiang , LUO Peipei , XI Junqiang. Estimation of Vehicle Mass and Road Slope Based on Steady-state Kalman Filter[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(9):70-75+83.
- [6] 郑戌华, 曹鑫磊, 王向周. 非公路车辆簧载质量实时估计[J]. 北京理工大学报, 2017, 37(12):1282-1286.  
ZHENG Shuhua, CAO Xinlei, WANG Xiangzhou. Real-Time Sprung Mass Estimation for Off-Road Vehicles[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(12):1282-1286.
- [7] Eriksson A. Implementation and evaluation of a mass estimation algorithm[D]. Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2009.
- [8] Lingman P, Schmidtbauer B. Road Slope and Vehicle Mass Estimation Using Kalman Filtering[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37: 12-23.
- [9] Huang X , Wang J. Longitudinal motion based lightweight vehicle payload parameter real-time estimations[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2012, 135(1):11-13.
- [10] Bae H S, Ryu J, Gerdes J C. Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2001: 25-29.
- [11] McIntyre M L, Ghotikar T J, Vahidi A, et al. A two-stage Lyapunov-based estimator for estimation of vehicle mass and road grade[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3177-3185.
- [12] Winstead V, Kolmanovsky I V. Estimation of road grade and vehicle mass via model predictive control[C] // IEEE Conference on Control Applications. 2005, 1588-1593.
- [13] Fathy H K, Dongsoo Kang, Stein J L. Online vehicle mass estimation using recursive least squares and supervisory data extraction[P]. American Control Conference, 2008.
- [14] Pence B , Hays J , Fathy H K , et al. Vehicle sprung mass estimation for rough terrain[J]. International Journal of Vehicle Design, 2013, 61(1-4):3-26.
- [15] 雷雨龙, 付尧, 刘科, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):9-13..  
Lei Yulong, Fu Yao, Liu Ke, et al. Vehicle Mass and Road Grade Estimation Based on Extended Kalman Filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):9-13.
- [16] 胡满江, 罗禹贡, 陈龙, 等. 基于纵向频响特性的整车质量估计[J]. 吉林大学学报(工学版), v.48;No.198(4):977-983.  
HU Manjiang, LUO Yugong, CHEN Long, et al. Vehicle mass estimation based on longitudinal frequency response characteristics[J]. Journal of University(Engineering and Technology Edition) , v.48;No.198(4):977-983.

**作者简介:** 臧政, 1992年生, 硕士研究生。主要研究方向为车辆节能减排与新能源技术。霍伟(通信作者), 女, 1974年生, 副教授、硕士研究生导师, 研究方向为车辆节能减排与新能源技术。E-mail: qdhuowei@163.com。