

基于扩展卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计*

雷雨龙 付尧 刘科 曾华兵 张元侠

(吉林大学汽车动态仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对车辆自动变速器控制系统难以实时测得车辆质量与道路坡度参数这一问题,运用最优估计理论,以车辆纵向动力学模型为基础,建立系统的状态空间模型,运用前向欧拉法将过程方程离散化,进一步对非线性过程方程进行近似线性化,获得过程方程向量函数的 Jacobian 矩阵,实现了基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的车辆质量及道路坡度估计算法。在 Matlab/Simulink 仿真平台下,进行了实车道路试验数据的离线仿真。仿真结果表明,该算法可有效估计车辆质量及道路坡度,能够满足车辆自动变速器控制系统的要求。

关键词: 自动变速器 最优估计 扩展卡尔曼滤波 车辆质量 道路坡度

中图分类号: U463.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0009-05

引言

随着车辆自动变速技术的发展完善,如何使自动变速器控制系统更加智能化成为研究人员关注的重点。智能化的自动变速控制系统可对各工况、车辆状态进行辨识,进而做出最合理的挡位决策,以满足驾驶员驾驶意图。因而各工况及车辆自身相关状态参数的获取显得尤为重要。车辆质量及道路坡度是换挡控制系统进行挡位决策的关键参量,若能对其进行精确辨识可提高自动变速器换挡控制品质,进一步提高整车的动力性、经济性及安全性。

通常情况下,车辆质量在装有电控悬架(ECS)车辆上可以通过压力传感器测量值计算得到,而道路坡度可以通过倾角传感器或加速度传感器间接测量^[1]。但这些方法均需要昂贵的测试设备,且只适合试验研究阶段,难以配置在量产车上。因此基于车辆现有传感器,利用软测量技术对相关参量进行估计的方法得到广泛应用^[2]。研究多集中于车辆行驶中横摆角速度^[3]、纵向车速^[4]、质心侧偏角^[5-7]等状态变量的估计。在车辆质量和道路坡度估计方面,国外学者关注较早并积累了一定的经验,提出了基于递归最小二乘法的车辆质量实时估计方法^[8]、基于 GPS 和 CAN 信息进行道路坡度估计^[9]、基于双遗忘因子最小二乘法的车辆质量和道路坡度估计方法^[10]。国内则主要针对道路坡度识别进行了研究,主要是基于纵向动力学的理论计算及其变

形^[11-12],识别方法较单一,与国外相比有一定差距,对于车辆质量和道路坡度联合估计方面的研究还比较匮乏。就实时估计算法而言,国外学者虽提出了一些联合估计算法,但这些算法大都基于复杂模型,计算过程繁琐,其用于自动变速器控制系统的实时性还有待检验。理想的联合估计算法应对系统硬件资源开销小且较易工程化。

为了准确实时获取车辆质量和道路坡度,提高自动变速器换挡品质,本文基于最优估计理论,结合非线性车辆纵向动力学模型,建立基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)的车辆质量及道路坡度联合估计算法模型,并利用实车道路试验数据进行算法的离线仿真验证。

1 扩展卡尔曼滤波技术

经典卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)由 Kalman 于 1960 年提出,是在已知系统和测量的数学模型、测量噪声统计特性及系统状态初值的情况下,利用输入信号的测量数据和系统模型方程,实时获得系统状态变量和输入信号的最优估计值^[13]。KF 滤波采用状态空间描述法,以最小均方误差为估计准则,可处理多维和非平稳的随机过程。其算法采用递推形式,数学结构简单,计算量小,适合用于实时计算。因其较优的性能广泛应用于通讯、航空及军事领域。KF 的应用结构如图 1 所示。在随机干扰和测量噪声存在的情况下给出系统状态变量的最优估计。

收稿日期: 2013-12-26 修回日期: 2014-02-13

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111712)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120061110027)、吉林大学“985”工程资助项目和长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1017)

作者简介: 雷雨龙,教授,博士生导师,主要从事汽车传动系统理论与控制研究, E-mail: leiyl@jlu.edu.cn

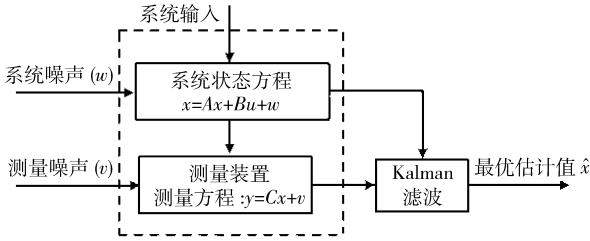


图1 卡尔曼滤波算法应用结构

KF 仅适用于线性系统的状态估计,对于非线性系统则使用扩展卡尔曼滤波(EKF)。EKF 通过把非线性系统模型函数在其参考点附近进行 Taylor 展开^[14],舍弃高阶项,得到非线性系统的近似线性关系。再利用线性化之后的状态方程和测量方程进行状态估计,算法流程与 KF 一致。

2 基于 EKF 的车辆质量与道路坡度联合估计

2.1 车辆纵向动力学模型

用 EKF 算法进行联合估计需建立系统的状态空间模型。系统的状态空间表达式一般由系统的物理、化学机理进行推导。对车辆在坡道行驶的受力情况进行分析,如图 2 所示。

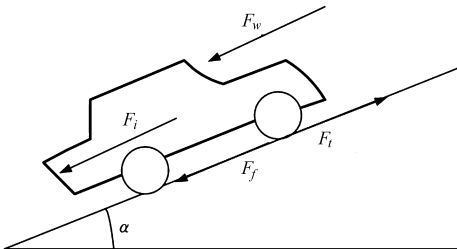


图2 车辆坡道行驶纵向受力分析图

Fig.2 Longitudinal force analysis of vehicle under uphill condition

根据牛顿第二定律,建立车辆的纵向动力学模型

$$m\dot{v}=F_t-F_f-F_w-F_i \tag{1}$$

式中 F_t ——驱动力 F_f ——滚动阻力
 F_w ——空气阻力 F_i ——坡道阻力
 m ——车辆质量 $\dot{v}$ ——车辆纵向加速度
驱动力 F_t ^[15] 为

$$F_t=\frac{T_{iq}i_gi_0\eta_T}{r} \tag{2}$$

式中 T_{iq} ——发动机输入到变速器的实际扭矩
 i_g ——变速器传动比
 i_0 ——主减速器传动比
 η_T ——传动系机械效率
 r ——车轮滚动半径
坡道阻力 F_i ^[15] 为

$$F_i=mgsin\alpha \tag{3}$$

式中 g ——重力加速度 α ——坡度角
空气阻力 F_w ^[15] 为

$$F_w=\frac{1}{2}C_DApv^2 \tag{4}$$

式中 C_D ——空气阻力系数
 A ——迎风面积
 ρ ——空气密度
 v ——车速
滚动阻力 F_f ^[15] 为

$$F_f=mgf\cos\alpha \tag{5}$$

式中 f ——滚动阻力系数
可得

$$\dot{v}=\frac{T_{iq}i_gi_0\eta_T}{mr}-gf\cos\alpha-\frac{1}{2m}C_DApv^2-gsin\alpha \tag{6}$$

考虑到公路路线设计规范,道路坡度一般较小^[15],则假设 $\cos\alpha\approx 1$, $\sin\alpha\approx\tan\alpha=i$,式(6)变为

$$\dot{v}=\frac{T_{iq}i_gi_0\eta_T}{mr}-gf-\frac{1}{2m}C_DApv^2-gi \tag{7}$$

2.2 EKF 算法实现

建立系统的状态空间模型,选定状态变量为车速 v 、车辆质量 m 、道路坡度 i ,则系统状态向量 $\mathbf{x}(t)=(v(t),m(t),i(t))$ 。车辆质量可看成常量,道路坡度变化较缓慢,二者对时间的导数均可近似为零。因而有微分方程组

$$\begin{cases} \dot{v}(t)=\frac{T_{iq}(t)i_gi_0\eta_T}{m(t)r}-gf-\frac{1}{2m(t)}C_DApv^2(t)-gi(t) \\ \dot{m}(t)=0 \\ \dot{i}(t)=0 \end{cases} \tag{8}$$

EKF 算法基于离散状态空间方程,采用前向欧拉法对式(8)进行离散化处理,得到离散化差分方程

$$\begin{cases} v_k=v_{k-1}+\Delta t\left(\frac{T_{iq}(t_{k-1})i_gi_0\eta_T}{m_{k-1}r}-gf-\frac{1}{2m_{k-1}}C_DApv_{k-1}^2-gi_{k-1}\right) \\ m_k=m_{k-1} \\ i_k=i_{k-1} \end{cases} \tag{9}$$

假设系统的过程噪声和测量噪声均为加性噪声,过程噪声向量和测量噪声向量分别为 $\mathbf{W}_k$ 和 $\mathbf{V}_k$,它们为相互独立、且均值为零的高斯白噪声。过程激励噪声协方差矩阵为 $\mathbf{Q}_k$,测量噪声协方差矩阵为 $\mathbf{R}_k$ 。则有

$$E[\mathbf{W}_k\mathbf{V}_k^T]=0 \tag{10}$$

$$\begin{cases} E[\mathbf{W}_k] = 0 \\ E[\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T] = \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} E[\mathbf{V}_k] = 0 \\ E[\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T] = \mathbf{R}_k \end{cases} \quad (12)$$

由式(9)及以上假设推得系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} v_k \\ m_k \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{k-1} + \Delta t(\dot{v}(t_{k-1})) \\ m_{k-1} \\ i_{k-1} \end{bmatrix} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (13)$$

其中

$$\dot{v}(t_{k-1}) = \frac{T_{iq}(t_{k-1})i_g i_0 \eta_T}{m_{k-1}r} - gf - \frac{1}{2m_{k-1}}C_D A \rho v_{k-1}^2 - g i_{k-1}$$

系统测量方程为

$$z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ m_k \\ i_k \end{bmatrix} + \mathbf{V}_k \quad (14)$$

式(13)和(14)组成了系统的状态空间表达式,形式为

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) + \mathbf{W}_{k-1} \\ z_k = \mathbf{H}x_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\mathbf{H}$ ——测量矩阵

由式(15),按照 EKF 算法对车辆质量 m 、道路坡度 i 进行估计。EKF 包括两个计算过程:时间更新和测量更新。时间更新方程向前推算先验状态估计值和先验误差协方差;测量更新方程将先验状态估计和测量变量结合产生状态的后验估计并更新估计状态的后验误差协方差。算法递归进行,只需获得上一时刻状态变量的估计值和当前状态变量的测量值便可获得当前状态变量的估计值。算法流程如图 3 所示。

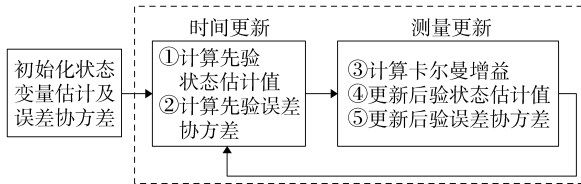


图 3 EKF 算法流程图
Fig. 3 Flow chart of EKF

时间更新方程为

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}) \quad (16)$$

$$P_k^- = \mathbf{J}_f(\hat{x}_{k-1}) P_{k-1} \mathbf{J}_f^T(\hat{x}_{k-1}) + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (17)$$

式中 $\hat{x}_{k-1}$ ——上一时刻状态变量的最优估计值

P_{k-1} ——上一时刻误差协方差

$\hat{x}_k^-$ ——状态变量的先验估计值

P_k^- ——先验误差协方差

$\mathbf{J}_f$ ——过程方程向量函数 f 对状态变量求偏导数得到的 Jacobian 矩阵

在本估计算法中,可得到

$$\mathbf{J}_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v} & \frac{\partial f_1}{\partial m} & \frac{\partial f_1}{\partial i} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v} & \frac{\partial f_2}{\partial m} & \frac{\partial f_2}{\partial i} \\ \frac{\partial f_3}{\partial v} & \frac{\partial f_3}{\partial m} & \frac{\partial f_3}{\partial i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{C_D A \rho v}{m} \Delta t & \frac{C_D A \rho v^2 r - 2 T_{iq} i_g i_0 \eta_T}{2 m^2 r} \Delta t & -g \Delta t \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

测量更新方程为

$$\mathbf{K}_k = P_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} P_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + \mathbf{K}_k (z_k - \mathbf{H} \hat{x}_k^-) \quad (20)$$

$$P_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) P_k^- \quad (21)$$

式中 $\mathbf{K}_k$ ——卡尔曼增益

$\hat{x}_k$ ——状态变量后验估计值

P_k ——后验误差协方差

$\mathbf{I}$ ——单位矩阵

卡尔曼增益根据测量噪声协方差 $\mathbf{R}_k$ 以及先验误差协方差 P_k^- 动态调节测量变量 z_k 和其估计 $\mathbf{H} \hat{x}_k^-$ 的权重。

3 仿真试验

为验证基于 EKF 的车辆质量及道路坡度估计算法的有效性及准确性,在 Matlab 平台上开发算法模型,并以实车道路试验数据为对象,进行算法的离线仿真验证。

3.1 试验设计

试验用车为国产某型 A 级轿车,该车装配了 DCT 变速器,空载质量为 1 030 kg。道路试验数据通过 CANOE 软硬件系统实时采集,CANOE 挂载在动力 CAN 上,采样周期为 0.01 s。仿真试验示意图 4 所示。

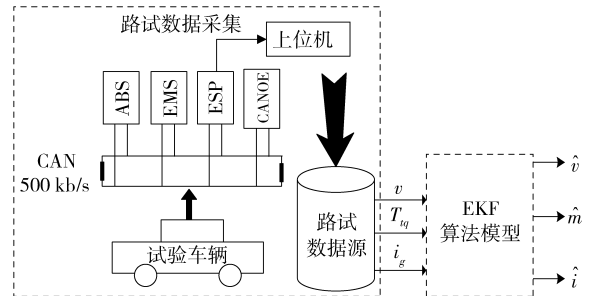


图 4 仿真试验示意图
Fig. 4 Simulation test

实车道路试验选择了一条依次包含 10% 上坡、水平路及 10% 下坡的综合路段以及一条试车场水

平路段进行。在综合路段及水平路段分别进行了不同载荷下的试验,并对路试数据进行了实时采集。试验中为验证 EKF 算法对道路坡度的估计效果,采用文献[1]中所述方法,在试验车上加装纵向加速度传感器对道路坡度进行实时计算。车辆空载质量采用地中衡测量。路试时,车上只乘坐驾驶员 1 人,安装必要数据采集设备,用米袋对车辆加载。将以上质量累加得到车辆质量真实值。

图 5 为综合路段试验所采集的整车信号。由图中可知,综合路段试验过程变速器挡位始终保持在 1 挡,车速信号值较小,但波动较大。上坡阶段,驾驶员通过控制油门踏板提高发动机输出扭矩以获得更大的驱动力。下坡阶段,驾驶员松开油门踏板,发动机输出扭矩为负值,进行辅助制动。

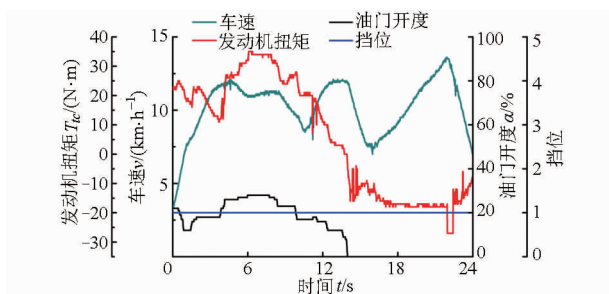


图 5 综合路段试验结果

Fig. 5 Comprehensive road section test

图 6 为截取的一段水平路段试验数据曲线,相比于综合路段试验,其车速信号波动较小。由于换挡过程中系统的状态方程不成立,因此 EKF 算法在换挡过程中所估计的状态变量是不准确的,为此本文所截取的路试数据均不包含换挡过程。

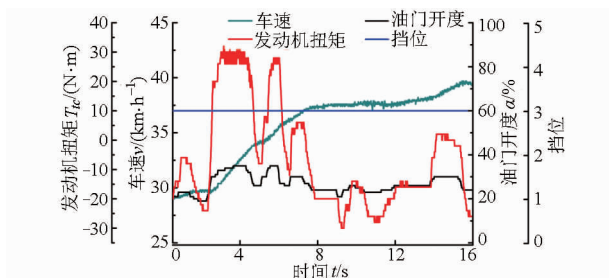


图 6 水平路段试验部分结果

Fig. 6 Horizontal road section test

3.2 仿真结果分析

应用 EKF 算法对路试数据进行算法的离线仿真。以发动机扭矩、车速、变速器当前挡位为输入量对车速、车辆质量及道路坡度进行估计。仿真结果如图 7~12 所示。图 7~9 为综合路段估计结果。图 10~12 为水平路段估计结果。

由综合路段估计结果可见,EKF 算法对于车速、车辆质量及道路坡度的估计结果与真实值较为

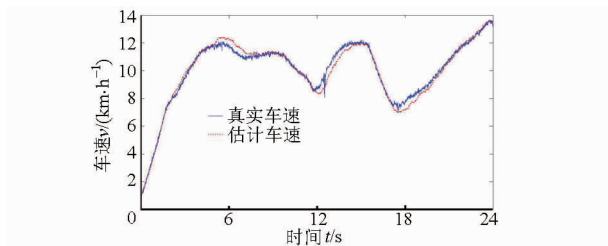


图 7 综合路段车速估计结果

Fig. 7 Vehicle speed estimation result in comprehensive road section

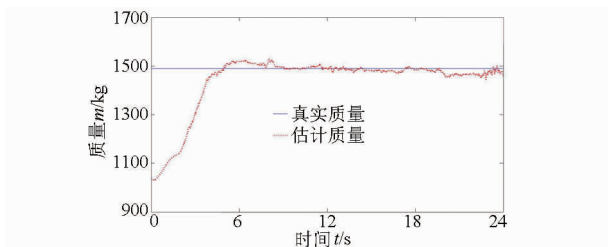


图 8 综合路段车辆质量估计结果

Fig. 8 Vehicle mass estimation result in comprehensive road section

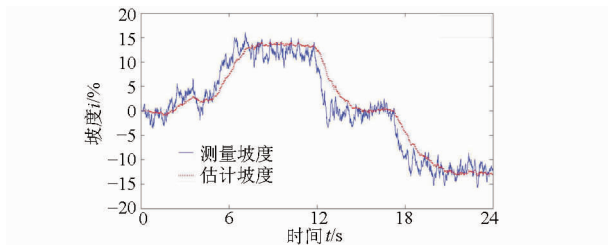


图 9 综合路段道路坡度估计结果

Fig. 9 Road grade estimation result in comprehensive road section

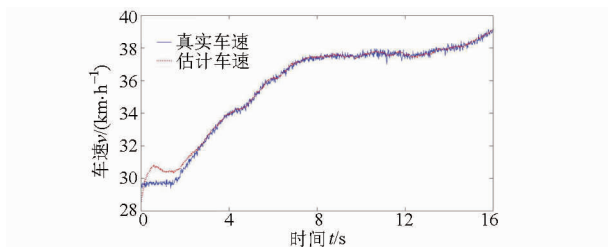


图 10 水平路段车速估计结果

Fig. 10 Vehicle speed estimation result in horizontal road section

一致。对于车速的估计有一定误差,但信号趋势相同。车辆质量估计值在开始 6 s 内与真实值偏差较大,随着算法的运行,逐渐逼近真实值。坡度的测量值噪声较大,但与估计结果基本吻合。

水平路段估计车速与真实车速误差较小,车辆质量估计值存在偏差,坡度估计结果在 4 s 之后较为准确。

以上仿真结果验证了 EKF 算法的有效性,由于状态方程所采用的动力学模型应用于算法时作了一些简化,非线性模型的近似线性化处理(泰勒展开,

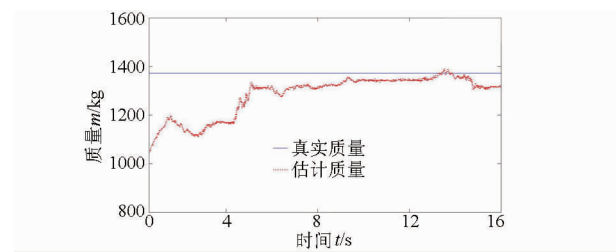


图 11 水平路段车辆质量估计结果

Fig. 11 Vehicle mass estimation result in horizontal road section

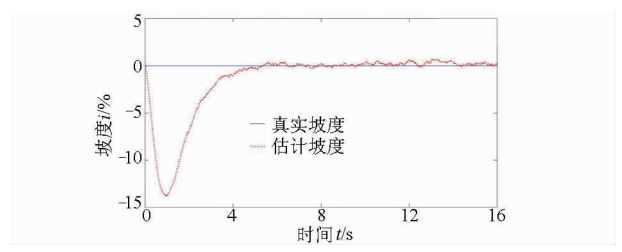


图 12 水平路段道路坡度估计结果

Fig. 12 Road grade estimation result in horizontal road section

舍弃高阶分项)都会造成估计结果的偏差。

4 结论

(1) 提出了基于 EKF 的车辆质量及道路坡度估计算法,以车辆纵向动力学模型为基础,构建系统的状态空间模型,由系统状态方程和测量方程推导 EKF 算法表达式。

(2) 基于 Matlab/Simulink 进行了算法实现。算法仿真结果表明 EKF 算法对于车辆质量及道路坡度估计有效,估计结果可用于自动变速器控制系统及换挡品质客观评价计算。

(3) 算法在一定程度上可提高车辆的智能化水平。换挡过程中的状态变量估计以及提高算法估计结果的精准度是后续研究工作的重点。

参 考 文 献

- 1 长安大学. 一种道路坡度采集装置: 中国, 201220529387.6[P]. 2013-05-01.
- 2 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.
Yu Zhuoping, Gao Xiaojie. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33. (in Chinese)
- 3 高振海, 郑南宁, 程洪. 基于车辆动力学和 Kalman 滤波的汽车状态软测量[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 22-24.
Gao Zhenhai, Zheng Nanning, Cheng Hong. Soft sensor of vehicle state based on vehicle dynamics and Kalman filter[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(1): 22-24. (in Chinese)
- 4 刘国福, 张纪, 王跃科. 汽车防抱制动系统车速估计方法的初步研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(6): 723-728.
Liu Guofu, Zhang Qi, Wang Yueke. A preliminary study on the estimation of vehicle speed in the anti-lock braking system[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(6): 723-728. (in Chinese)
- 5 Wenzel T A, Burnham K J, Blundell M V, et al. Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2): 153-171.
- 6 宗长富, 潘钊, 胡丹, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 272-276.
Zong Changfu, Pan Zhao, Hu Dan, et al. Information fusion algorithm for vehicle state estimation based on extended Kalman filtering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 272-276. (in Chinese)
- 7 郑智忠, 李亮, 杨财, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧向速度观测器[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 1-5.
Zheng Zhizhong, Li Liang, Yang Cai, et al. Vehicle lateral velocity observer using extended Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 1-5. (in Chinese)
- 8 Fathy H K, Kang Dongsoo, Stein J L. Online vehicle mass estimation using recursive least squares and supervisory data extraction[C]//American Control Conference, 2008: 1842-1848.
- 9 Per Sahlholm, Henrik Jansson, Ermin Kozica, et al. A sensor and data fusion algorithm for road grade estimation[C]//5th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 2007.
- 10 Winstead V, Kolmanovsky I V. Estimation of road grade and vehicle mass via model predictive control[C]//Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005: 1588-1593.
- 11 金辉, 葛安林, 秦贵和, 等. 基于纵向动力学的坡道识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1): 79-86.
Jin Hui, Ge Anlin, Qin Guihe, et al. Slope recognition method based on longitudinal dynamic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 79-86. (in Chinese)
- 12 金辉, 李磊, 李斌虎, 等. 基于加速度区间判断的坡道识别方法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 122-126.
Jin Hui, Li Lei, Li Binhu, et al. Slope recognition method based on acceleration interval judgment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 122-126. (in Chinese)
- 13 刘胜, 张红梅. 最优估计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 14 Welch G, Bishop G. An introduction to the kalman filter[R]. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2002.
- 15 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

17 Piyabongkarn D, Rajamani R, Grogg J A. et al. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 78 – 88.

18 Horiuchi S, Okada K, Nohtomi S. Improvement of vehicle handling by nonlinear integrated control of four wheel steering and four wheel torque[J]. JSAE Review, 1999, 20(4):459 – 464.

19 Wong J Y. Theory of ground vehicles[M]. 3rd ed. New York:John Wiley & Sons, Inc., 2001.

Estimation of Vehicle Status Parameters Based on
Compensation Adaptive Control Algorithm

Lin Cheng Zhou Fengjun Xu Zhifeng Cao Wanke Dong Aidao
(School of Mechanical, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Accurate estimation of vehicle status parameters is important to vehicle stability control. Combination of 3-DOF vehicle dynamics model and adaptive control algorithm, proposed a method that modifies adaptive law through compensation was proposed to estimate vehicle parameters correctly. Bases on the method, the vehicle dynamics model was simplified to reduce the calculation burden and improve the real-time performance. The starting and acceleration driving conditon and double lane change conditon were designed for the simulation and the hardware-in-loop test. Finally, both the simulation results and hardware-in-loop test results indicate that the proposed method could estimate the vehicle mass and moment of inertia more precisely and faster compared to the adaptive algorithm without compensation and satisfy the requirement of vehicle online estimation.

Key words: Vehicle dynamics Status parameters Estimation Compensation adaptive control algorithm

(上接第 13 页)

Vehicle Mass and Road Grade Estimation Based on Extended Kalman Filter

Lei Yulong Fu Yao Liu Ke Zeng Huabing Zhang Yuanxia
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To solve the problem that vehicle mass and road grade in automatic transmission control system are difficult to measure, the state-space model of system was established based on the vehicle longitudinal dynamic model, using the optimal estimation theory. The forward Euler method was adopted for discretization of the process equation. The Jacobian of the process equation was calculated for linearization of the non-linear process function. Then, the vehicle mass and road grade estimation algorithm using extended kalman filter was developed. The simulation using road test data was carried out in Matlab/Simulink environment. The simulation results show that this algorithm could estimate vehicle mass and road grade effectively and meet the requirements of the automatic transmission control system.

Key words: Automatic transmission Optimal estimation Extended Kalman filter Vehicle mass
Road grade