

适用于嵌入式系统的纯电动车辆在线质量估计

明杰婷, 文健峰, 杨杰君, 王坤俊, 龙爱军, 周艳辉

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:基于车辆动力学原理,提出轻量化的适用于嵌入式整车控制器的整车质量辨识算法。该算法基于差分原理,将坡道阻力、滚动阻力与加速阻力解耦,通过仿真分析与实车测试相结合的方法验证该算法的辨识精度。结果表明,该算法的估计误差可控制在10%以内。

关键词:在线质量估计; 嵌入式系统; 差分原理

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.01.004

On-line Mass Estimation of Pure Electric Vehicles Applied to Embedded System

MING Jieting, WEN Jianfeng, YANG Jiejun, WANG Kunjun, LONG Aijun, ZHOU Yanhui

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract:Based on the principle of vehicle dynamics, this paper proposes a lightweight vehicle mass identification algorithm applied to embedded vehicle controller. According to the difference principle, the algorithm decouples the slope resistance, rolling resistance and acceleration resistance. Through the combination of simulation analysis and real vehicle test, the identification accuracy of the algorithm is verified, which results show that the estimated error can be controlled within 10%.

Key words:on-line mass estimation; embedded system; difference principle

整车质量是影响前、后制动力分配的关键参数之一。大客车、中型货车、重型货车等车辆载质量的变化幅度较大,质量变化对车辆的动力学特征有着显著影响^[1-4],准确在线估计车辆质量是实现线控制动的前提,具有重要的工程意义。

国内外学者对车辆质量在线估计开展了很多研究,在不安装质量传感器的条件下,主要包括基于车辆纵向动力学模型,通过最小二乘法参数辨识对质量进行在线估计^[5];基于扩展卡尔曼滤波的车辆在线质量估计方法^[6];利用测量数据基于AEKF的车辆质量估计算法^[7]。这些算法大都以车辆纵向动力学模型为基础,通过数学推导得到辨识模型,最后采用最优求解方法得到整车质量。这些算法原理简单,计算步骤清晰,但不能实现滚阻、风阻、坡道阻力的解耦,计

算量大,需要大量数据,不适用于嵌入式。

为解决上述问题,本文提出一种差分辨识模型,在没有质量传感器数据的情况下,将车辆动力学模型转化为轮端扭矩差分与加速度差分之间的线性化关系,进而求出整车质量。经验证,该方法计算量小、稳定性高,适用于嵌入式系统,工程应用价值较高。

1 整车质量辨识模型

根据车辆动力学原理,汽车的纵向动力学方程可表示为^[8]:

$$F_t = F_f + F_i + F_w + F_j \quad (1)$$

式中: F_t 为车辆驱动力; F_f 为滚动阻力; F_i 为坡度阻力; F_w 为空气阻力; F_j 为加速阻力。

对于纯电动车辆,其纵向动力学模型可表示为:

收稿日期:2024-06-07。

第一作者:明杰婷(1989—),女,硕士,工程师,主要从事新能源车辆整车控制及车辆动力学仿真分析工作。E-mail:mingjieting@163.com。

$$\begin{cases} T = \left(mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A}{21.15} v^2 + \delta m a \right) r \\ T = T_e i \eta \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_e 、 T 分别为驱动电机扭矩和轮端驱动扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; i 为系统传动比; η 为系统效率; r 为轮胎滚动半径, m ; m 为整车质量, kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为滚动阻力系数; θ 为路面坡度, $(^\circ)$; C_D 是空气阻力系数; A 为迎风面积, m^2 ; v 为汽车与风速的相对速度, km/h ; a 为加速度, m/s^2 ; δ 为旋转质量换算系数, 该车经测量 δ 取 1.16。

本文分别选取一辆纯电动重型货车和一辆 10.5 m 纯电动客车作为研究对象。车辆运行时, 电机扭矩 T_e 可实时获取, 加速度 a 可通过加速度传感器获取, 车速 v 可根据电机转速及速比实时计算。但因 f 和 θ 与车辆的运行路况相关且实时变化, 故无法完全通过式(2)实时估算出整车质量 m 。

为了将坡度 θ 、滚动阻力系数 f 、整车质量 m 解耦, 运用差分原理, 对方程(2)进行离散化处理, 推导出整车质量的辨识模型。令变量 A 、 B 满足以下关系:

$$A = mg(f \cos \theta + \sin \theta) r \quad (3)$$

$$B = C_D A r / 21.15 \quad (4)$$

因此, 可将式(2)中的 T 式变形为:

$$T = A + Bv^2 + \delta mra \quad (5)$$

行车过程中, 可认为整车质量 m 是不变的, 变量 A 中的可变量为坡度 θ 和滚动阻力系数 f , 而且可假定在单个离散计算周期 (20 ms) 内 θ 、 f 是不变的。同理, 变量 B 中也不包含时变量, 单周期内更是保持不变。基于此设定, 对式(5)进行离散处理:

$$\Delta T_k = B[(v_k + v_w)^2 - (v_{k-1} + v_w)^2] + \delta m \Delta a_k \quad (6)$$

由于 $a^2 - b^2 = (a+b)(a-b)$, 式(6)可变形为:

$$\Delta T_k = B(v_k^2 - v_{k-1}^2) + 2Bv_w(v_k - v_{k-1}) + \delta m \Delta a_k \quad (7)$$

式中: v_w 为当前风速; v_k 为当前时刻 k 的绝对车速; Δa_k 为加速度差分, 即第 k 时刻加速度与第 $k-1$ 时刻加速度的差值; ΔT_k 为轮端扭矩差分, 即第 k 时刻轮端扭矩与第 $k-1$ 时刻轮端扭矩的差值。此外, 记 $C = 2Bv_w$, 式(7)写成矩阵形式为:

$$\underbrace{\Delta T_k}_Y = \underbrace{(v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (v_k - v_{k-1})}_{K} \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ C \\ m \end{bmatrix}}_X \quad (8)$$

式(8)即为含有整车质量 m 的辨识模型, 式(8)可写为 $Y = KX$, 其中 Y 、 K 均可实时获取, 实时获取的 Y 的值记为 y , 由式(8)得到的 Y 值称为计算值, X 为需辨识的参数, 通过辨识参数 X , 即可得到整车质量 m 。

2 工况识别

在车辆行驶过程中, 假定整车质量 m 不变, 质量在线估计的实时性要求不高, 但估计精度必须满足控制需求。为提高质量估计精度, 仅在起步持续加速工况下对质量进行估算。主要是因为起步加速工况可准确获取电机的驱动扭矩, 避免气制动扭矩叠加对 F_t 的精度造成不良影响。起步持续加速工况的判断条件如下:

- 1) 初始速度 $v_0 > v_0'$ (v_0' 为判断车辆起步阈值, 一般取 0.5 km/h)。
- 2) 持续加速时间 $t \geq 4$ s。
- 3) 加速过程中任一时刻均满足 $v_k > v_{k-1}$ 。
- 4) 最大速度 $v_{\max} < v_{\max}'$ ($v_{\max}'$ 为加速工况下的最高车速, 一般取 60 km/h)。
- 5) 最大加速度 $a_{\max} < a_{\max}'$ ($a_{\max}'$ 为加速工况下的最大加速度, 一般取 1.2 m/s^2)。
- 6) 加速过程中任一时刻 $a_k > a_{k-1}$ 。
- 7) 横摆角加速度 $a_w < a_w'$ (a_w' 为横摆角速度阈值, 一般取 0.5 rad/s, 表征车辆直线行驶)。

3 最小二乘法处理

通过采用最小二乘法^[9-12]最小化实测值 y 与计算值 Y 的误差平方和来辨识模型参数。由式(8)可得两者的误差 ε :

$$y - KX = \varepsilon \quad (9)$$

其中 X 为待辨识参数, 对式(9)两侧同时取平方, 并对 X 取导数, 可得:

$$2K^T(KX - y) = 0 \quad (10)$$

进一步求解, 可得:

$$X = (K^T K)^{-1} K^T y \quad (11)$$

经过离散处理后,质量参数辨识被简化成了利用最小二乘法求解线性回归方程解的问题。

基于最小二乘法及已知速度、加速度信息,设计适用于嵌入式系统的质量辨识算法,算法的计算逻辑见表 1。

表 1 整车质量实时估计算法

输入: v, a, T
if ($(a_k > a_{k-1}) \&\& (a_k < a_{\max}') \&\& (a_k > 0)$)
$Acce(i) = a_k$
$Speed(i) = v_k$
$MotTq(i) = T_k$
$Diffv(i) = Speed(i)^2 - Speed(i-1)^2$
$Diffv(i) = Speed(i) - Speed(i-1)$
$Diffa(i) = \delta(Acce(i) - Acce(i-1))$
$DiffT(i) = MotTq(i) - MotTq(i-1)$
end
$B = [Diffv \quad Diffv \quad Diffa]$
$Y = DiffT$
$X = (B^T B)^{-1} B^T Y$
$m = X(3)$
输出: m

通过对起步加速工况数据进行线性回归计算,即可求解得到整车质量。该算法每次最多对 200 组数据进行线性回归计算,计算量小,适用于整车控制器等嵌入式系统,具有较高的工程应用价值。

4 仿真及测试验证

4.1 仿真分析

为验证本文质量估计算法的可行性,搭建 MATLAB Simulink 与 AVL Cruise 的联合仿真模型^[13],通过 Cruise Interface 模块实现 Simulink 控制策略模型与 AVL Cruise 中整车模型的接口通信。在 AVL Cruise 中运行中国典型城市公交工况(CCBC),在 MATLAB Simulink 中集成质量估计算法。对每一次起步工况进行智能判断,对符合第 2 部分条件的起步工况实时辨识整车质量参数。联合仿真原理如图 1 所示。

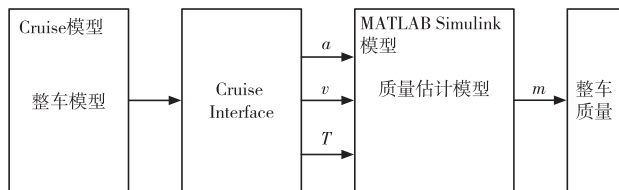


图 1 AVL Cruise 与 Simulink 联合仿真原理

1) 以满载 45 t 重型货车为例,在 AVL Cruise 中设定不同的载荷参数(仿真模型中车辆载荷即对应实际质量),车辆载荷从整备载荷 20 t 逐次增加到满载载荷 45 t 的仿真结果见表 2。重型货车在 20 t 和 45 t 载荷下的轮端驱动扭矩与加速度的关系如图 2 所示。

表 2 45 t 重型货车的实际及估算质量对比

实际质量/kg	估算质量/kg	估算误差/%
20 000	19 646	-1.77
25 000	24 121	-3.52
30 000	29 472	-1.76
35 000	36 506	4.30
40 000	41 817	4.54
45 000	45 247	0.55

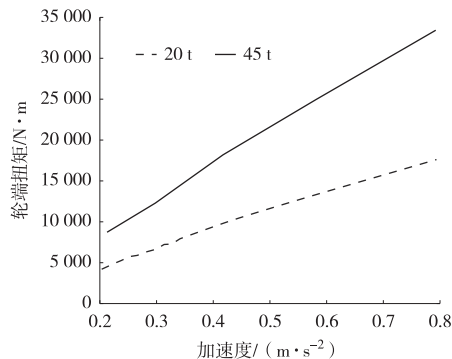


图 2 重型货车轮端扭矩与加速度关系

从图 2 可以看出,轮端扭矩与加速度之间基本成线性关系。结合式(5)分析可知,在瞬时加速工况下, A 和 Bv^2 变化较小,证明本文采用差分算法推导质量估计模型是可行的。

2) 以 10.5 m 城市客车为例,车辆载荷从整备载荷 11.5 t 逐次增加至满载载荷 16.9 t,仿真结果见表 3。10.5 m 城市客车不同载荷下的轮端驱动扭矩与加速度的关系如图 3 所示。

表 3 10.5 m 城市客车实际及估算质量对比

实际质量/kg	估算质量/kg	估算误差/%
11 500	12 320	7.13
12 500	13 459	7.67
13 450	14 349	6.68
14 500	15 779	8.82
15 550	17 025	9.49
16 900	16 809	0.78

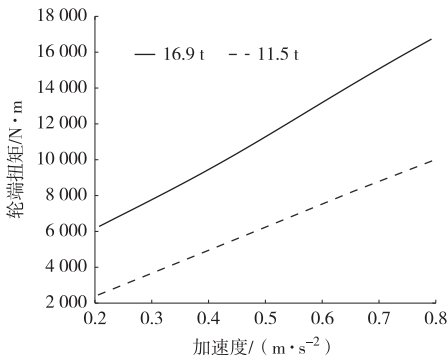


图 3 10.5 m 城市客车轮端扭矩与加速度关系

从图 3 可以看出,轮端扭矩与加速度之间也基本成线性关系。结合式(5)分析,同样可知在瞬时加速工况下, A 和 Bv^2 变化较小,进一步验证本文采用差分算法推导质量估计模型是可行的。

从表 2 和表 3 中的仿真结果可知,该质量辨识算法具有较高的精度,对于 45 t 重型货车,尽管质量变化大,但估算误差也能控制在 5% 以内;对于 10.5 m 城市客车,质量变化虽然小,但由于测量参数误差,对辨识结果的影响稍大,其估算误差也可控制在 10% 以内。该辨识精度可满足客车、货车对车辆动力学的控制要求,实现更准确的纵向动力学控制,可提高行驶安全性及乘坐舒适性。

4.2 实车测试

为了验证该质量估计算法的准确性,将该算法集成在 10.5 m 城市客车的整车控制器中,原理如图 4 所示。

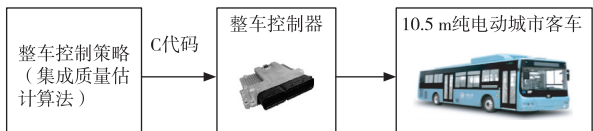


图 4 质量估计算法实车测试原理

通过加沙袋的方式,将试验车装载至满载载荷 16.9 t,并在公交线路上运行。在满足估计条件的工况下,对整车质量进行实时在线估算,结果见表 4。

表 4 质量估计算法实车辨识结果

辨识次数	估算质量/kg	估算误差/%
1	16 768	0.78
2	16 037	5.11
3	17 028	0.76
4	16 489	2.43
5	16 793	0.63
6	16 931	0.18

从实车测试结果可以看出,估算质量与实际质量基本吻合,估算误差可控制在 10% 以内,与仿真结果高度一致。

5 结束语

本文基于车辆动力学原理,提出了轻量化的适用于嵌入式整车控制器的整车质量辨识算法。该算法基于差分原理,有效将坡道阻力、滚动阻力与加速阻力解耦,通过识别特定工况,并在特定工况下对整车质量进行辨识,最后采用仿真分析与实车验证相结合的方法,对算法辨识精度进行验证。结果表明,通过质量估计算法估算的整车质量与实际整车质量相比,估算误差均可控制在 10% 以内。该质量估计算法的开发为后续线控制动系统的制动力精准分配奠定了基础,具有较高的工程应用价值。

参考文献:

[1] 吴苗苗,侯海贵,屈盼锋. 纯电动重卡线控底盘技术综述[J]. 重型汽车,2023(3):23-24.

[2] 魏凌涛,刘轶材,王翔宇,等. 基于分层控制的线控制动系统压力控制策略[J]. 机械工程学报,2024,60(10):487-496.

[3] 雍文亮,管欣,王博,等. 基于多传感数据融合滤波的纵向坡度识别算法[J]. 机械工程学报,2018,54(14):116-124.

[4] DRUZHININA M,STEFANOPOULOU A,MOKLEGAARD L. Adaptive Continuously Variable Compression Braking Control for Heavy-Duty Vehicles[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2002, 124(3):406-414.

(下转第 30 页)

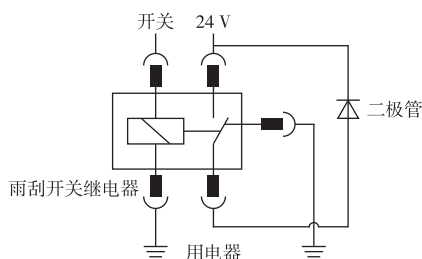


图7 增加二极管的电路原理图

3.2 解决方案实施

通过对比上述4个解决方案的效果可知,增加续流二极管的方案最好,且空调压力传感器供电电路的电流峰值和电压峰值最接近传感器的额定电流值和额定电压值,因此将此方案确定为最终解决方案,并在样车上实施。

采用增加续流二极管的解决方案对研发样机进行电路改进及测试验证。自该解决方案实施以来,原问题未再出现,说明该方案切实有效。将该方案作为雨刮器供电电路的标准化设计方案,推广应用于其他车辆开发,可降低设计风险,避免同类问题重复发生。

4 结束语

本文通过详细分析某电动客车空调压力传感器失效的原因,提出了多种解决方案,最终通过测试对比采取了增加续流二极管的措施。该解决方案能有效改善雨刮器供电电路上的电压波动,解决了空调压

力传感器因整车电压不稳而造成的EOS问题。

参考文献:

- [1] 吴建平,彭颖. 传感器原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2021:10-58.
- [2] 许钦清. 纯电动汽车空调系统故障诊断方法研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [3] 叶军红. 压力传感器在汽车行业的应用现状[J]. 汽车电器,2020(8):59-61.
- [4] 郑浩,李延夫,孙礼,等. 基于可靠性强化试验的硅基压力传感器设计改进[J]. 仪表技术与传感器,2011(12):12-31.
- [5] 陈玲. 新型流量测量仪表的应用和发展[J]. 传感器与微系统,2007,26(6):8-11.
- [6] 杨守武. 关于压力传感器与注氟嘴配合密封失效原因分析与改进措施[J]. 电子产品世界,2018,25(6):44-46.
- [7] 迟玉华. 一种燃油压力传感器失效故障分析及整改[J]. 汽车实用技术,2020(8):199-201.
- [8] 崔宏敏,陈宝成,崔光浩,等. 振动环境下压力传感器失效机理分析[J]. 振动与冲击,2017,36(2):207-211.
- [9] 赵光亮,史家涛,杨英振,等. 柴油发动机共轨压力传感器失效分析与研究[J]. 内燃机与配件,2022(1):41-43.
- [10] 杜科. 温度和压力条件下SiC电容式压力传感器的失效机理研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [11] 罗天成. SiC电容式高温压力传感器结构设计及其失效机理研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

(上接第18页)

- [5] 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.
- [6] 雷雨龙,付尧,刘科. 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.
- [7] 任志英,沈亮量,黄伟,等. 基于AEKF的车辆质量与道路坡度实时估计[J]. 振动、测试与诊断,2020,40(4):758-764.
- [8] 陈鹏飞. 汽车动力学控制系统中的状态参数实时估计与工程应用[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [9] 李传友,任宪丰,孙晓鹏,等. 基于最小二乘法的商用车整

车质量估计研究[J]. 汽车电器,2023(11):48-50.

- [10] 高林,吴青,贺宜. 复杂工况下货运车辆质量和道路坡度联合估计[J/OL]. 机械工程学报, [2024-06-07]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1r2s0rs07p3n0jw00r700jc06q698991&site=xueshu_se.
- [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(11):1-9.
- [12] 隋新宇. 应用于重型载货车的车辆质量估计方法研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [13] 徐达伟,回春. 基于Cruise的纯电动客车仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015(2):183-186.