

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108320

基于行驶场景的汽车燃油经济性评估方法

谢凌霄^{1,2}, 黎福海¹, 漆一宏^{1,2}

(1. 湖南大学 长沙 410082; 2. 领翌技术(横琴)有限公司 珠海 519000)

摘要:燃油经济性一直是汽车的关键性能指标,也是环境保护中迫切需要解决的问题,目前已有许多油耗测量的方法,但大多只实现了对汽车油耗的监控,无法快速且准确地评估不同车型的燃油经济性。本文基于实时的汽车 CAN 总线数据,提出了行驶场景的方法,将普通驾驶过程划分为短时间单元,对不同行驶状态下的汽车数据进行分类和分析,建立各场景下的评估模型,并根据各模型特点设计评分方法,综合评估汽车的燃油经济性。研究表明,评估结果不受驾驶环境或驾驶行为的影响,在规定的驾驶时间及路段测试后,油耗计算误差只有 0.4,同车最大评估误差仅为 4%。本方法可以为汽车购买者提供更为精准的车辆燃油经济性评估报告,避免实地试驾的不便,有效提升理想车辆的选购率,能够推动新兴的在线汽车市场。

关键词: 燃油经济性; 汽车 OBD; 行驶场景; 核密度估计; 贝叶斯拟合

中图分类号: TH701 U467.498 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A vehicle fuel economy evaluation method based on driving scenarios

Xie Lingxiao^{1,2}, Li Fuhai¹, Qi Yihong^{1,2}

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. LinkE Technologies (Hengqin) Inc., Zhuhai 519000, China)

Abstract: Fuel economy has always been a key performance indicator of automobiles, which is also an urgent problem to be addressed in environmental protection. At present, there are many methods for fuel consumption measurement. However, most of them only achieve monitoring of automobile fuel consumption, which cannot quickly and accurately evaluate the fuel economy of different models. In this article, based on real-time automotive controller area network bus data, a driving scenario method is proposed to divide the common driving process into short time units, classify and analyze automotive data under different driving states, establish evaluation models under each scenario, and design scoring methods according to the characteristics of each model to comprehensively evaluate the fuel economy of automobiles. The study shows that the evaluation results are not affected by driving environment or driving behavior. The fuel consumption calculation error is only 0.4 after the prescribed driving time and road test, and the maximum evaluation error of the same car is only 4%. This method can provide car buyers with more accurate fuel economy evaluation reports for their models, avoid the inconvenience of field test drives, effectively improve the purchase rate of desirable vehicles, and can promote the emerging online car market.

Keywords: fuel economy; automotive OBD; driving scenarios; kernel density estimation; Bayesian fitting

0 引 言

受近两年新冠疫情影响,2021 年全球汽车销售额下降超过 20%,促使线上汽车销售平台迅速发展。目前汽车电商平台提供的只有汽车的一些简单信息,而汽车性能中最为重要的实际燃油经济性是无法得知的^[1]。作为汽车损耗程度的关键参数以及环保低碳的主要因素,汽车燃油经济性在全球都受到密切关注^[2],其测试方法也

都有不同的详细规定。在中国,每种车型在出厂前都会根据《轻型汽车燃料消耗量试验方法》^[3]进行测试,并公布其燃料消耗量标识。美国环境保护署(environmental protection agency, EPA)^[4]、加拿大能源指南(EnerGuide)以及欧日的环保机构等都对燃油经济性有不同的测试标准和试验方法,这些方法均是在要求严格的实验室环境下进行的。汽车日常的实际燃油经济性通常是由驾驶过程中仪表盘的瞬时油耗和最终的平均油耗示数计算出大概的估值,但是同时提供这两种参数的车型较少,并且这

种方法既会给销售商和客户都带来很多不便,也无法保证准确性。目前对汽车实际燃油消耗量的准确测试,都是要借助额外的设备并采取专业的方法^[5-6]。常用的汽车油耗测量方法分为直接法和间接法两种^[7],直接的容积法和质量法需要用油耗仪对车辆进行一定的改装,而间接的碳平衡法需要在特定的场地使用尾气测量仪。以上的方法实现起来非常复杂且成本较高,都不适用于汽车销售前的燃油经济性测试,这也是现在网上汽车销售平台的缺陷。

高速的控制器局域网络(controller area network, CAN)总线,作为汽车内部数据传输的介质,包含了各传感器、控制器、执行器的实时数据,并且由汽车车载诊断系统(on board diagnostics, OBD)标准接口对外传输,根据 OBD-II 协议可实现各种参数的查询。OBD 接口的高响应速度以及通过网络的方式回传,可以保证数据的实时性。目前市面上已经有较多成熟的 OBD 采集设备,可实现车速、发动机转速、进气温度、进气歧管压力等汽车基本参数的实时采集,并计算出汽车的瞬时油耗。瞬时油耗的计算大多采用基于空燃比原理的方法^[8],准确性较高,可适配的车型比例也是最多的。对于汽车 OBD 系统的研究,国内外多倾向于车队管理^[9]、远程汽车状态监控^[10]、驾驶行为分析^[11-12]等应用,已经验证了 OBD 系统的准确性和实用性,并通过回归分析^[13]、多参数融合^[14]、支持向量机^[15]等方法基于 OBD 数据实现了汽车油耗的估计。但是,基础的油耗估计无法比较不同车型间的燃油经济性高低,驾驶过程中的油耗会受到许多不定因素的影响,包括驾驶行为、路况、天气等多方面。因此某次驾驶过程的油耗水平不能准确表明该车的燃油经济性,更无法作为不同车型间进行比对的评判标准,这是目前亟待解决的问题。

本文通过行驶场景分类的方法,细化分析驾驶过程,能在最大程度上减轻人为及环境噪声的干扰。对于不同车型间同类别的驾驶片段,采用核密度估计、贝叶斯拟合等方法针对不同场景建立汽车油耗的评估模型,并以各模型特点为基准设计评分方法。最终实现了燃油经济性的评估并进行了测试,验证了行驶环境和驾驶行为等因素对评估结果的影响很小,可忽略不计。在实际应用中,销售商可以代替用户对所有的本地车辆进行试驾,通过本方法建立车辆实际性能数据库,用户即可远程获取各种车型的燃油经济性报告,节省了繁琐的实地试驾过程,同时也降低了汽车的损耗率。

1 汽车数据的处理原理

1.1 汽车油耗计算原理

中国汽车燃油经济性指标的单位是 L/100 km,即行驶 100 km 所消耗的燃油升数。因此,本方法计算的瞬时

油耗单位为百公里油耗。根据汽油车发动机原理^[16],瞬时燃油消耗量为:

$$m(t) = q(t)/\lambda(t) \quad (1)$$

其中, q 为瞬时发动机进气量,单位 g/s; λ 为实时空燃比。发动机控制单元主要由发动机的进气量、工作温度、负荷和转速等信息确定基本喷油量,并根据氧传感器浓度进行修正,更准确地控制喷油量,使实时空燃比接近标准空燃比。该过程产生长期、短时燃油修正因数两个参数,由其可得实时空燃比:

$$\lambda(t) = \lambda_0 / ([\theta_L(t)][1 + \theta_S(t)]) \quad (2)$$

其中, $\lambda_0 = 14.7$ 为标准空气燃料比; θ_L 为长时燃油修正因数; θ_S 为短时燃油修正因数。通过 OBD 获得实时的 q 、 θ_L 、 θ_S ,由式(1)、(2)计算瞬时燃油消耗量 m 。根据燃油质量与体积的关系计算出实时燃油消耗体积,进行单位换算得出瞬时油耗为:

$$F_v(t) = 3600q(t)/(V(t)\lambda(t)\rho) \quad (3)$$

其中, V 为车速,单位为 km/h; ρ 为汽油密度,取值为 725 g/L。在汽车未提供瞬时发动机进气量时,可采用进气歧管绝对压力法来计算瞬时发动机进气量:

$$q = 0.029NV_b P/T \quad (4)$$

其中, V_b 为发动机排量,可由具体车型得出; N 为发动机转速; P 为进气歧管绝对压力; T 为进气绝对温度,为实际温度加上 273.15。以上数据均可由 OBD 提供,根据式(3)由瞬时发动机进气量可得出瞬时油耗。以上两种方法基本支持目前市面上汽油车的油耗计算。

1.2 数据采集及提取的工作原理

数据采集工作由车载 OBD 终端完成,该终端直插在汽车的 OBD 端口处,与汽车 CAN 总线通信并根据 OBD-II 协议解析原始数据,实现数据的预处理。实时数据通过网络上传到服务器,并按 OBD 设备号和采集时间保存到数据库。本方法调取指定设备的原始行驶数据进行数据二次处理工作,包括:

1) 油耗计算所用数据的提取:时间、速度、转速、空气流量、进气歧管绝对压力、进气温度、短时燃油修正因数、长时燃油修正因数;

2) 瞬时油耗的计算:为了达到更高的车型适配性,采用了优先级油耗计算方法,优先查询该车型的 OBD 是否支持燃油效率参数,该项只有少数车型支持,再通过空气流量法以及进气歧管绝对压力法进行互补计算;

3) 瞬时变速器传动比的计算;

4) 整合成以表 1 数据包为单元的驾驶过程数据集:以时间为索引,包含原始和计算数据,其中时间为当前与初始采集时间的差值,其他数据为当前时间的瞬时值。

表1 驾驶数据包样值

Table 1 Sample value of driving packet

序号	时间 /s	速度 /(km·h ⁻¹)	转速 /(r·min ⁻¹)	瞬时油耗 /(L·100 km ⁻¹)	瞬时传动比
1	0	11	1 544	34.4	4.24
2	2	14	1 865	38.1	4.71

2 基于行驶场景的分类方法

两段完整的驾驶过程由于驾驶行为、车况、路况等影响存在很多差异,无法控制过程的一致性。因此,本方法对驾驶过程的限制条件为:普通驾驶员在平坦无拥堵路况下驾驶 20 min 左右的时间,且每次行驶路段及里程接近。在此基础上,把驾驶过程划分为多种短时间单元,本文将其定义为行驶场景,试驾过程可以在不同类型的行驶场景下进行评估。

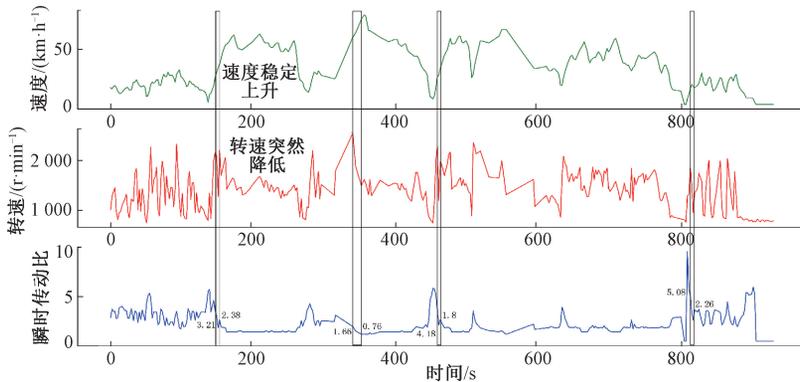


图1 汽车车速、转速、瞬时传动比的同步变化曲线

Fig. 1 The change curves of vehicle speed, rpm and instantaneous transmission ratio under synchronous time

2.2 行驶状态分类的流程分析

行驶状态分类程序的输入为表1的驾驶数据包,程序开始后先进行初始化,设置状态节点标志位,定义开始速度 VB 、结束速度 VE 、当前速度 V 的初值均为 0,单位为 km/h,定义开始时间 TB 、结束时间 TE 、当前时间 T 的初始值均为 0,单位为 s;再设置车态标志位,由于汽车发动后的初始状态一定是怠速,因此定义加速 A 、减速 D 、稳速 S 标志位的初值均为 0,怠速 I 为 1。然后顺序读取驾驶过程数据集中的数据包,设置历史状态标志位:定义上一个速度 $VL=V$,上一个时间 $TL=T$ 。再使 T 等于当前数据包中的时间,使 V 等于速度,并判断行程是否结束,若结束则退出程序。接着进行现车态判断:比较 V 和 VL 的大小。假设 $V>VL$,进入加速子流程,检查车态标志位进行前车态判断,若 $A=1$ 则说明车态无变化,更新加速状态:使

2.1 行驶场景分类的原理

汽车从发动到熄火的全过程包含加速、减速、稳速、怠速 4 种状态,其中加速和减速为瞬态状态,稳速和怠速为稳态状态。汽车油耗在稳态和瞬态下的影响因素不同,稳态受驾驶行为影响小,反映平稳行驶时的燃油经济性,而瞬态受驾驶行为影响大,反映动力性的强弱。由于瞬态较稳态的数据差异性更大,可将汽车行驶过程以车速变化状态为基准进行分类。

除此之外,汽车在不同的传动比(挡位)下,其驱动力和对应油耗也是有差异的。而自动变速器通常是由车载电脑根据汽车行驶状态进行自适应变化的,难以直接获得挡位情况。根据汽车传动系统原理,车速和转速综合控制了挡位及换挡阈值,汽车加速时,特定速度范围内转速达到换挡阈值时自动变速器会升挡。由于挡位升高,传动比减小,瞬时转速降低,而车速会维持稳定或上升。同理,降挡时的变化相反。图1方框处为4个加速变化过程,车速上升时,转速会骤减再上升,这是变速器发生了升挡。由该原理可实现挡位分类。

$VE=V, TE=T$,更新结束速度和时间来累积加速状态,并读取下一个数据包。若车态标志位为 $I=1, D=1$ 或 $S=1$ 时,则说明车态改变,输出对应的状态数据。假设 $D=1$:先重置减速标志位 D 为 0,再由结束速度 VE 和开始速度 VB 得出速度变化量 VD ,由结束时间 TE 和开始时间 TB 得出持续时间 TD ,这两个参数作为该车态的属性组成车态数据包,保存到减速车态数据集,并使 $VB=VL, TB=TL, A=1$ 重置开始速度、开始时间和车态标志位。再读下一个数据包,至此完成了一次减速行驶状态的分类。现车态判断为 $V<VL, V=VL, V=VL=0$ 时分别进入减速、稳速、怠速的子流程。

为了使车态判断更加可靠,本方法对稳态的定义增加了误差容限,设定车速上下波动 ≤ 2 的加减速状态均为稳速态。该设定有效避免了不稳定的驾驶行为对车态分类的影响。

每个车态数据包都包含以下4个属性:速度变化起止值、状态持续时间、速度变化量、累计油耗量。速度变化起止值和速度变化量从两个方面将车态限定在一个特殊的场景中,前者决定了车态处于哪种动力状态下,如低速、中速或高速,后者表明了该状态下的变化量,累计油耗量用于分类后辅助分析汽车的燃油经济性。一段行程中可能会包含多个类似的场景,不同车型间通过比较类似的场景得出油耗性能高低。

2.3 行驶挡位算法的理论分析

根据传动比原理^[16]中汽车行驶速度与变速器挡位及发动机转速的关系:

$$v_a = 0.377rn / (i_g i_0) \quad (5)$$

其中, v_a 为汽车行驶速度,单位为 km/h; n 为发动机转速,单位为 r/min; r 为车轮半径,单位为 m; i_g 为变速器传动比; i_0 为主减速器传动比。由式(5)得瞬时传动比 $i_g(t)$, 将其与各挡位的理论传动比范围比对,即:

$$(i_{g(n)} + i_{g(n+1)}) / 2 < i_{g(n)}(t) \leq (i_{g(n-1)} + i_{g(n)}) / 2 \quad (6)$$

其中, $i_{g(n)}(t)$ 、 $i_{g(n)}$ 分别表示第 n 挡的瞬时传动比和理论传动比,且 $n \geq 2$ 。式(6)可验证图1中的4个标记位置,其中第1个升挡处 $i_g(t)$ 由3.21降至2.38,对应2挡升至3挡,其他标记处的瞬时传动比变化也均符合升挡变化。所有的瞬时传动比会对2.1节挡位变化原理得到的挡位初值进行校准,对于异常值将结合前后挡位变化的升降序确定最终值。

3 燃油经济性的评估原理及方法

3.1 基于挡位场景的油耗估计模型

相同挡位下的发动机工作状态及燃油消耗量处于同一水平,但受驾驶行为和环境的影响会产生一定误差。核密度估计(kernel density estimation, KDE)^[17]作为非参数估计方法不需要引入假设变量,能够有效吸收误差样本。每挡位的油耗值 u_1, u_2, \dots, u_n 为独立同分布 F 的 n 个样本点,该分布的概率密度函数为 $f(u)$,用经验分布函数 $\hat{F}_n(t) = (\sum_{i=1}^n I_{x_i \leq t}) / n$ 代替 $f(u)$ 中的分布函数,则核密度估计 $\hat{f}_c(u)$ 为:

$$\hat{f}_c(u) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{u - u_i}{h}\right) \quad (7)$$

其中, $K(x)$ 为核函数, $x = (u - u_i) / h$; u_i 为第 i 个油耗样本值; h 为平滑参数。选择高斯核 $K_g(x) = \exp(-x^2/2) / \sqrt{2\pi}$, 以降低不同挡位下密度波形的差异程度。估计精度取决于其均方误差如式(8)所示。

$$E[\hat{f}_c(u) - f(u)]^2 = \text{var}(\hat{f}_c(u)) + [\text{bias}(\hat{f}_c(u))]^2 \quad (8)$$

其中, var 为方差, bias 为偏差。需要确定一个合适的平滑参数 h 使均方误差最小。为了避免数据量差异的影响,根据文献[18]提出的基于正态参考规则的改进方法——迭代求取法,将由正态参考规则得到的 $h_1 = 1.06\hat{\sigma}N^{-1/5}$ 以及 $K_g(x)$ 代入式(7)得到总体核密度估计:

$$\hat{f}_c(u) = \frac{1}{nh_1} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u - u_i}{h_1}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中: $\hat{f}_c(u)$ 为总体真实密度,对其求渐近积分均方误差(asymptotic MSE)得到最优平滑参数 h_0 ,使 $h_2 = h_0$,继续代入式(7)求最优平滑参数,持续迭代得到稳定最优值 h_{opt} 。图2为根据2.3节的挡位算法分类的1挡原始油耗样本值以及 h_{opt} 得到的核密度估计曲线,其峰值则为挡位油耗的估计值。

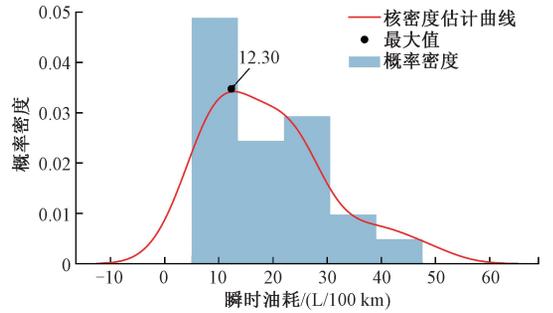


图2 1挡油耗的分布及曲线

Fig. 2 Distribution and curve of fuel consumption at gear 1

3.2 基于车速的总体油耗评估模型

为了评估汽车的总体燃油经济性,将一段行程中各个速度产生的油耗分别汇总。根据速度计算箱线图,得到各个速度下瞬时油耗的离散分布情况。由于各速度的油耗数据量不同,部分速度的箱线图四分位间距较大,数据量偏少或异常驾驶行为都会使分布离散。因此,取下四分位值来过滤掉大部分由于噪声产生的较大油耗值。在数据去噪的基础上,采用基于贝叶斯估计^[19]的多项式曲线拟合方法来建立总体油耗评估模型。

贝叶斯估计为概率估计,适用于样本量较少的情况,能够优化多项式拟合。多项式回归的本质是求解多元线性方程组问题:

$$y(x, \mathbf{W}) = \omega_n x^n + \omega_{n-1} x^{n-1} + \dots + \omega_1 x + \omega_0 \quad (10)$$

其中, $y(x, \mathbf{W})$ 为预测油耗; n 为多项式阶数; $\mathbf{W} = \{\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n\}$ 为多项式系数。根据已知的速度 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和对应油耗 $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 通过贝叶斯估计求解权值 ω 的线性方程,得拟合值 t_j 的分布 $p(t_j)$ 如式(11)所示。

$$p(t_f | x, \mathbf{X}, \mathbf{T}) = \int p(t_f | x, \mathbf{W}) p(\mathbf{W} | \mathbf{X}, \mathbf{T}) d\mathbf{W} \quad (11)$$

其中, $p(t_f | x, \mathbf{W})$ 为最大似然估计, $p(\mathbf{W} | \mathbf{X}, \mathbf{T})$ 为最大后验估计, 其高斯分布形式为:

$$p(t_f | x, \mathbf{X}, \mathbf{T}) = N(t_f | m(x), s^2(x)) \quad (12)$$

其中均值和方差分别为:

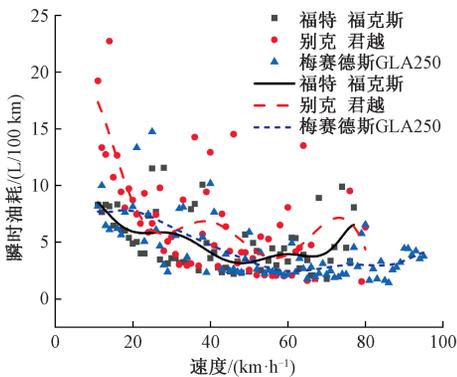
$$m(x) = \beta \phi(x)^T \mathbf{S} \sum_{n=1}^N \phi(x_n) t_n \quad (13)$$

$$s^2(x) = \beta^{-1} + \phi(x)^T \mathbf{S} \phi(x) \quad (14)$$

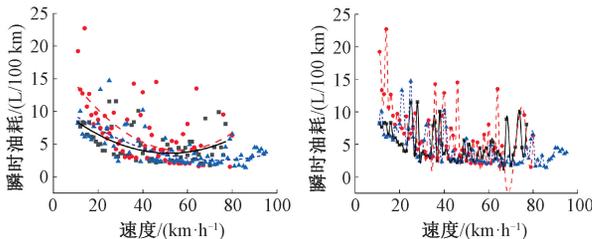
\mathbf{S} 矩阵为:

$$\mathbf{S}^{-1} = \alpha \mathbf{I} + \beta \sum_{n=1}^N \phi(x_n) \phi(x_n)^T \quad (15)$$

其中, \mathbf{I} 为单位矩阵; $\phi(x)$ 为速度样本; $\sum_{n=1}^N \phi(x_n)$ 为已知速度; α 为先验分布的超参数; $\beta = 1/\sigma^2$ 为高斯分布方差的倒数。得到均值 m 为拟合油耗值, 方差 s 为总体稳定度。本文对 3 种车型进行了评估, 结果如图 3(a) 所示, 通过 9 阶多项式拟合, 分别得到君越、福克斯、GLA250 的 s 的均值为 0.78、0.75、0.74, 且拟合油耗水平 GLA250 最低, 综合说明其燃油经济性最好。



(a) 贝叶斯曲线拟合
(a) Bayesian curve fit



(b) 二阶多项式拟合
(b) Quadratic polynomial fit
(c) 三次样条插值
(c) Cubic spline interpolation

图3 3种车型的总体油耗曲线

Fig. 3 Overall fuel consumption curves of three models

本方法对比了两种行驶数据处理算法, 文献[20]的二阶多项式回归拟合, 如图 3(b) 所示, 其整体油耗曲线较为平坦, 仅能比较整体的水平高低, 无法比较不同速度阶段的油耗稳定性。文献[21]的三次样条插值法,

如图 3(c) 所示, 易受部分异常值的影响, 产生过拟合, 只能反映出整体油耗的稳定性, 无法比较整体油耗水平, 存在较大的判断误差。而贝叶斯拟合既能反映各速度阶段的油耗稳定性, 也能从整体比较不同车辆的油耗水平, 能够实现基于速度的燃油经济性评估。

3.3 燃油经济性评价方法

对于汽车燃油经济性的评价, 本文设计了 3 种方法。第 1 种方法是基于挡位油耗, 评分为百分制, 综合了油耗及数据量。汽车正常的瞬时油耗一般不超过 30, 因此将实际油耗值根据分制 100 与最大值 30 的比进行等比例放大, 再由各挡位油耗样本量在总数据量中的占比得出评分, 并累加各挡位分值:

$$Score = \sum_{i=1}^N (10Fuel_{Gi}R_i/3) \quad (16)$$

其中, N 为挡位总数; $Fuel_{Gi}$ 、 R_i 分别为第 i 挡的估计油耗值和数量占比。该方法能够有效综合各挡位的油耗性能, 降低数据量的差异误差。

第 2 种方法基于总体油耗水平, 该方法也存在数据量差异问题, 同第 1 种方法在等比例放大实际值后, 以各速度下的油耗占比为基准将对应的油耗评分标准化。

第 3 种方法基于汽车的出厂油耗标准, 参考了国家标准汽车燃料消耗量标识。任一车型在出厂后都会由国家统一进行标准化测试, 确定其燃料消耗量的实际标准, 代表该车型的新车油耗水平。本方法计算行驶过程中的每个瞬时油耗与相同条件下国标油耗的比值, 取比值小于 1 的瞬时油耗数据在总量中的占比作为评分。对同一辆汽车 3 天中的 9 次行程进行了油耗评分, 结果如表 2, 其中路段 1 为城区内路段, 路段 2 为高速路段, 距离 1 较短, 距离 2 较长。在相同路段和距离下, 多次评分结果基本一致, 仅在路段 1 车况相对复杂的情况下行驶较长距离时达到 5.6% 的较大误差。

表 2 3 种条件下的油耗评分

Table 2 Fuel consumption scores in three situations

驾驶条件	2021/5/8	2021/5/9	2021/5/12	最大误差
路段 1, 距离 1	51.5	49.0	49.5	2.5
路段 1, 距离 2	54.0	51.0	56.6	5.6
路段 2, 距离 2	67.2	68.5	67.5	1.3

4 实车测试验证及分析

本文选用了航天无线公司的 OBD 远程定位诊断终端, 该设备符合乘用车和商用车诊断标准, 支持远程收发数据, 可达到周期 2 s 的高速采集, 高频的数据可以更准确地复现汽车发动机的变化细节。

4.1 燃油经济性评估结果及分析

如表 3 所示为实验所用的 3 款车的基本信息,表 4 为传动系统设计参数,年份和里程反映该车的的新旧程度,排量反映基本动力和油耗级别,传动比表示车型的挡位设计情况。根据 3.3 节的评分方法,本文对 3 种车型共进行了 8 次测试,结果如表 5 所示。其中,驾驶条件包括驾驶员、里程、时间。对 GLA250 进行了 2 次测试,驾驶条件均相同,3 种方法的最大误差为 4%。对君越进行了 4 次测试,第 1、2 次测试分别由不同的驾驶员操作,其中方法 3 评分误差较大,达到 15%,这是由于该方法是基于全部油耗数据的,未排除异常值,易受驾驶行为影响,而其他两种方法的最大误差仅有 2%,基本不受驾驶行为的影响。第 3、4 次测试为相同驾驶条件,所以误差均较小。但 1、2 次的测试时间为 5 月 12 日,3、4 次为 7 月 15 日,后者测试环境温度较高,使用了空调,油耗相对更高,所以评分普遍较低。对福克斯也进行了 2 次驾驶条件相同的测试,各项评分的误差均不高于 2%。各车型的多次测试结果误差均在 3% 左右,说明本方法具备稳定性。

表 3 测试车辆基本信息

Table 3 Basic information of the test vehicle

汽车车型	年份	排量 /L	里程 /km	轮胎尺寸	国标油耗 /(L/100 km)
别克君越	2011	2.4	147 043	245/45 R18	9.2
福特福克斯	2011	1.8	78 062	195/65 R15	8.1
梅赛德斯 GLA 250	2018	2.0	30 497	235/45 R19	7.3

表 4 测试车辆挡位及传动比

Table 4 Gear and transmission ratio of the test vehicle

变速器挡位	别克君越	福特福克斯	GLA 250
变速器型号	6T40	4F27E	7G-DCT
1 挡	4.584	2.816	15.943
2 挡	2.964	1.498	10.038
3 挡	1.912	1.000	6.927
4 挡	1.446	0.726	4.915
5 挡	1.000	-	3.606
6 挡	0.746	-	2.771
7 挡	-	-	2.232
主减速比	3.230	4.203	-

综合三款车型的评分和基本信息, GLA250 最高,是由于该车生产年份较晚且使用程度较轻。福克斯第二,评分接近 GLA250,是由于该车型为两厢轿车,相对于 GLA250 的 SUV 车型其体积和质量较小,且作为家用车有较好的日常维护,即使生产年份较早也有较好的燃

表 5 3 种车型的燃油经济性测试评分

Table 5 Fuel economy scores of three models

车型	GLA250		别克君越		福特福克斯			
条件	相同		不同司机		相同			
序号	1	2	1	2	3	4	1	2
方法 1	88	85	71	73	67	65	80	81
方法 2	89	85	77	76	71	67	85	84
方法 3	82	85	46	61	42	43	72	70

油经济性。君越为公司用车,相对于其他两款家用车,有较高的使用频率,且行驶里程较多,生产年份较早,因此其燃油经济性是最差的。以上评分结果均符合客观事实,能够说明本方法的准确性。

本方法分别从挡位、速度、出厂标准 3 个方面评价了汽车的实际燃油经济性。其中前两种方法是完全基于实际数据的,因此结果较为接近,能够比较不同车辆的实际性能。第 3 种方法参考了车型的设计性能,更适合反映汽车的损耗程度。

4.2 挡位油耗估计方法的对比测试及分析

1) 驾驶行为对比验证

实验方法为:司机 A 和 B 先后驾驶同一辆君越汽车在同一路段各行驶 20 min 左右。该方法规定了两次测试的驾驶车辆、里程、路段、时间 4 个条件基本一致,仅驾驶员不同,即驾驶行为不同。结果如图 4 所示,在 1~6 挡位的估计油耗误差分别为 2.67、0.35、3.47、2.71、0.05、0.46,最大误差不超过 3.5,最小误差仅有 0.05。两次测试在 1、3、4 挡位的数据量差分别为 6、9、6,相比于其他挡位的数据量差较大,所以油耗估计误差较大。说明本方法在数据量接近的情况下是基本不受驾驶行为影响的。

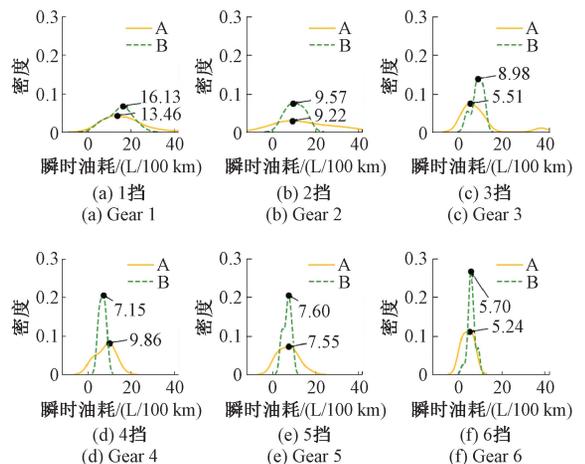


图 4 不同驾驶行为的核密度估计

Fig. 4 KDE for different driving behaviors

2) 驾驶时间对比验证

实验方法为:司机 C 分别在两天的同一时间段中驾驶同一辆福克斯汽车,行驶路段及里程近似。该方法规定了两次测试的驾驶车辆、里程、路段、行为 4 个条件基本一致,仅驾驶时间不同。结果如图 5 所示,由于该车型为 4 挡车型且 1 挡的数据量较少,因此只对 2~4 挡的油耗进行估计,在 2~4 挡位的估计油耗的误差分别为 0.16、1.4、1.38,最大误差不超过 1.5,最小误差只有 0.16。说明本方法可以有效避免驾驶时间带来的影响。

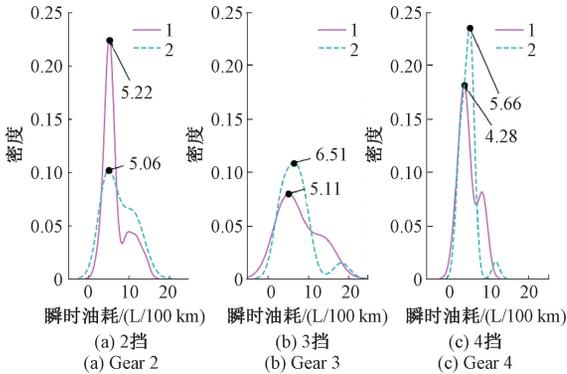


图 5 不同驾驶时间的核密度估计

Fig. 5 KDE for different driving times

4.3 高速公路油耗准确性测试及分析

参考了美国环境保护署 (EPA) 的汽车测量方法 (vehicle chassis dynamometer driving schedules, DDS) 中的高速公路燃油经济测试标准^[4],该测试要求在车速低于 60 mph (96.6 km/h) 的高速公路上进行短时间 (约 756 s) 的行驶。本文按照该测试标准进行了测试,以相似的起止方式和速度区间驾驶了 772 s,如图 6 所示。驾驶车型为 2011 款别克君越汽车,由北美燃油消耗评级查询工具 (natural resources canada) 查得该车型的高速公

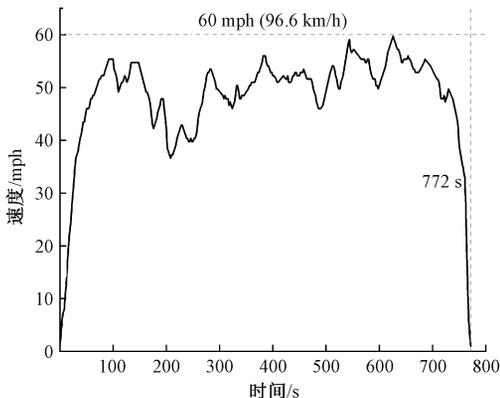


图 6 高速公路测试结果

Fig. 6 Highway test results

路平均油耗数据为 7.8 L/100 km,该工具的车型数据为大规模统计数据,有较高的准确性。本测试计算的平均油耗为 7.4 L/100 km,与查询标准的误差仅为 0.4,表明本方法的油耗测试结果是较为准确的。

5 结 论

本文提出的快速评价汽车燃油经济性的方法,实现了汽车端的实时信息采集和云端的数据处理分析。通过分析汽车各类行驶场景,设计了不同场景下汽车燃油经济性的评估模型,建立了不同车型间的通用评价体系,并提供了通俗易懂的性能评分。同时,能够有效地避免驾驶行为和环境对评估准确度的影响,可以为汽车销售补充实际燃油经济性的评估环节,快速地为不同车型提供可靠且全面的评价。

参考文献

- [1] 李志强,何凯宇,黄晓蓉. 基于 O2O 模式的国内二手车销售策略研究[J]. 中国经贸导刊,2020(8):109-111.
LI ZH Q, HE K Y, HUANG X R. Research on domestic used car sales strategy based on O2O model[J]. China Economic & Trade Herald, 2020(8):109-111.
- [2] JOSHI A,朱炳全. 全球汽车排放控制的最新发展动向(上)[J]. 汽车与新动力,2020,3(6):11-21.
JOSHI A, ZHU B Q. Recent developments in global vehicle emission control (Part I)[J]. Automobile and New Powertrain, 2020,3(6):11-21.
- [3] 国家标准化管理委员会. 轻型汽车燃料消耗量试验方法:GB/T 19233-2020[S]. 北京:国家市场监督管理总局,2020.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Measurement methods of fuel consumption for light-duty vehicles: GB/T 19233-2020[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2020.
- [4] Environmental Protection Agency (EPA). Fuel economy labeling of motor vehicles: Revisions to improve calculation of fuel economy estimates [EB/OL]. (2006-12-27) [2018-11-03]. Rules and Regulations. <http://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2006-12-27/pdf/06-9749.pdf>.
- [5] 姜印平,钱振洋,赵欣华,等. 车载油耗测量系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(2):190-194.
JIANG Y P, QIAN ZH Y, ZHAO X H, et al. Research on vehicle fuel consumption measuring system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

- 2010,24(2):190-194.
- [6] 周大为,高翔,夏长高. 基于混沌优化和SVM的发动机燃油消耗最低点软测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2011,32(2):463-468.
ZHOU D W, GAO X, XIA ZH G. Soft sensor method for estimating engine minimum fuel consumption of based on chaos optimization and SVM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(2):463-468.
- [7] 朱祖伟,华鹏,李明,等. 汽车油耗监测技术的研究分析[J]. 交通节能与环保, 2017,13(1):35-38.
ZHU Z W, HUA P, LI M, et al. Research and analysis of vehicle fuel consumption monitoring technology [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2017,13(1):35-38.
- [8] 杨彬彬,贾寿珂,巩惊好,等. 内燃机燃油消耗率检测方法综述[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021,50(1):85-90.
YANG B B, JIA SH K, GONG Q SH, et al. Review of fuel consumption measurement methods for internal combustion engines [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2021,50(1):85-90.
- [9] MALEKIAN R, MOLOISANE N R, NAIR L, et al. Design and implementation of a wireless OBD II fleet management system [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(4):1154-1164.
- [10] 李满. 基于OBD系统的车辆状态监测及故障诊断[D]. 北京:清华大学, 2016.
LI M. Vehicle state monitoring and fault diagnosis based on OBD system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [11] MESEGUER J E, TOH C K, CALAFATE C T, et al. Drivingstyles: A mobile platform for driving styles and fuel consumption characterization [J]. Journal of Communications and Networks, 2017,19(2):162-168.
- [12] ZHANG M, CHEN C, WO T, et al. SafeDrive: Online driving anomaly detection from large-scale vehicle data [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017,13(4):2087-2096.
- [13] HE W, CHENG Y, LIU Y, et al. Analysis of real-world fuel consumption characteristics of heavy-duty commercial diesel vehicle based on OBD method [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 774:012137.
- [14] EHSANI M, AHMADI A, FADAI D. Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53(JAN.):1638-1648.
- [15] ABUKHALIL T, ALMAHAFZAH H, ALKSASBEH M, et al. Fuel consumption using OBD-II and support vector machine model [J]. Journal of Robotics, 2020(1):1-9.
- [16] 侯树梅,冯健璋. 汽车发动机原理与汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
HOU SH M, FENG J ZH. Automotive engine fundamentals & automotive theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [17] QI LI, JEFFREY S R. Nonparametric econometrics: Theory and practice [M]. Princeton University Press, 2006.
- [18] 胡蓓蓓,宗刚. 非参数核密度估计在异方差模型中的应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2014,31(10):151-161.
HU P P, ZONG G. Application of heteroscedastic models in non-parametric kernel density estimation [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2014, 31(10):151-161.
- [19] BISHOP C M, NASRABADI N M. Pattern recognition and machine learning [M]. New York: Springer, 2006.
- [20] LEE M G, PARK Y K, JUNG K K, et al. Estimation of fuel consumption using in-vehicle parameters [J]. International Journal of u-and e-Service, Science and Technology, 2011, 4(4):37-46.
- [21] 陈弘,刘海,乔胜华,等. 基于三次样条插值的车辆行驶数据分析[J]. 汽车技术, 2013(8):54-57.
CHEN H, LIU H, QIAO SH H, et al. Analysis of vehicle driving data based on cubic spline interpolation [J]. Automobile Technology, 2013(8):54-57.

作者简介



谢凌霄, 2018年于中南林业科技大学获得学士学位, 2021年于湖南大学获得硕士学位, 现为领翌技术(横琴)有限公司研发工程师, 主要研究方向为汽车信息处理、边缘计算及云计算等。

E-mail: lingxiao.xie@linketech.cn

Xie Lingxiao received his B.Sc. degree from Central South University of Forestry and Technology in 2018 and received his M.Sc. degree from Hunan University in 2021. He is currently working as a R&D Engineer at LinkE Technologies (Hengqin)

Inc. His main research interests include vehicle information processing, edge computing and cloud computing.



黎福海 (通信作者), 1982 年于湖南大学获得学士学位, 1988 年于湖南大学获得硕士学位, 现为湖南大学的教授, 主要研究方向为电子测量和电磁测试、高精度定位技术、传感与机器视觉、嵌入式系统 (含 FPGA 及 DSP) 及其应用。

E-mail: fuhai-li@vip.sina.com

Li Fuhai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hunan University in 1982 and M. Sc. degree from Hunan University in 1988. He is currently a professor at Hunan University. His main research interests include electronic measurement and electromagnetic testing, high-precision positioning technology, sensing and machine vision, embedded systems (including FPGA and DSP) and their applications.



漆一宏, 1982 年于国防科技大学获得学士学位, 1985 年于中国空间技术研究院获得硕士学位, 1989 年于西安电子科技大学获得博士学位。现为领翌技术 (横琴) 有限公司的董事长, 西南交通大学和西安电子科技大学的名誉教授, 密苏里科技大学 EMC 实验室、加拿大

Western 大学、湖南大学和大连海事大学的兼职教授。主要研究方向为天线与射频技术、天线测量、云计算、雾计算、边缘计算、室外精准定位终端与系统、室内精准定位终端与系统、智能无线感知、工业大数据与人工智能、计算机应用技术等。

E-mail: yihong.qi@linketech.cn; qiyh@pcl.ac.cn

Qi Yihong received his B. Sc. degree from National University of Defense Technologies in 1982, received his M. Sc. degree from the Chinese Academy of Space Technology, and received his Ph. D. degree from Xidian University in 1989. He is currently the president of LinkE Technologies (Hengqin) Inc., honorary professor at Southwest Jiaotong University and Xidian University, adjunct professor in the EMC Laboratory, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, Western University, Hunan University, Dalian Maritime University. His main research interests include antenna and radio frequency technology, antenna measurement, cloud computing, fog computing, edge computing, outdoor precision positioning terminals and systems, indoor precision positioning terminals and systems, intelligent wireless perception, industrial big data and artificial intelligence, computer application technology, etc.