

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.025

驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响

赵佳伟^{1a}, 胡明辉^{1a,1b}, 荣正璧², 傅春耘^{1a,1b}

(1.重庆大学 a.机械与运载工程学院;b.机械传动国家重点实验室,重庆 400044;2.重庆长安汽车股份有限公司,重庆 400023)

摘要:纯电动汽车能耗受多种因素影响,为揭示驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响规律,采用控制单变量因子的实验思路,设计整车能耗实验。通过实验测试与理论计算相结合,得到各部件的能量分布,对能耗进行定量分析,为优化整车能耗指明方向。首先分析汽车在等速工况下的能量流动情况,得到确定因素对汽车能耗的影响;然后在综合工况下分析驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响。结果表明:电池能量主要被电机电控系统和车辆行驶阻力消耗,附件能耗较少,驾驶风格主要通过影响制动损耗和动力传动系统运行效率造成能耗波动,不同驾驶风格将导致百公里电耗相差10 kW·h以上。

关键词:纯电动汽车;驾驶风格;能耗分析

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)12-103-13

Effect of driving style on the energy consumption of an electric vehicle

ZHAO Jiawei^{1a}, HU Minghui^{1a,1b}, RONG Zhengbi², FU Chunyun^{1a,1b}

(1a. College of Mechanical and Vehicle Engineering; 1b. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing CHANGAN Automobile Co., Ltd., Chongqing 400023, P. R. China)

Abstract: The energy consumption of electric vehicle (EV) is affected by many factors. In order to reveal the influence of driving style on the energy consumption of EV, the energy consumption experiment of the whole vehicle was designed by controlling the univariate factor. Through the combination of experimental test and theoretical calculation, the energy distribution of each component was obtained, and the energy consumption was quantitatively analyzed to highlight the direction for optimizing the energy consumption of EV. Firstly, the energy flow of EV under the condition of constant speed was analyzed, identifying the influence of certain factors on the vehicle energy consumption. Then the influence of driving style on the energy consumption of EV was analyzed under the comprehensive working conditions. The results show that the battery energy was mainly consumed by the electric motor control system and vehicle driving resistance, and the energy consumption of accessories was very little. The driving style mainly causes the fluctuation of energy consumption by affecting the braking loss and the operating efficiency of power

收稿日期:2020-07-06 网络出版日期:2020-09-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0106100)。

Supported by National Key R&D Program of China (2018YFB0106100).

作者简介:赵佳伟(1997—),男,重庆大学硕士研究生,主要研究新能源汽车能量管理。

通讯作者:胡明辉(1975—),男,重庆大学教授,(E-mail)minghui_h@163.com。

transmission system. Different driving styles will lead to a difference of more than 10 kW·h in the energy consumption per 100 km.

Keywords: electric vehicle; driving style; analysis of energy consumption

纯电动汽车靠电机提供动力,能量转化效率高、结构简单,满足节能减排的要求,受到广泛的关注和重视。但纯电动汽车的续航里程与传统内燃机汽车存在较大差距^[1],在目前车载电池能量有限的情况下,对纯电动汽车进行能耗分析,提高能量的利用率,成为提高电动汽车续航里程的重要手段^[2]。

目前,对电动车的能耗研究多以固定循环工况,如新欧洲测试循环(new European driving cycle, NEDC)、全球轻型汽车测试循环(worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC)等为基础进行能耗分析^[3-5],但与实际道路运行工况存在较大差异。为此,一些研究学者基于车辆实际道路实验测试数据,着重研究了道路参数(坡度^[6]、交通状况^[7])、车辆运行特征参数^[8-10]以及环境温度^[11-12]对电动汽车能耗的影响,未考虑驾驶风格对车辆能耗的影响。然而,研究表明驾驶风格对于电池能量消耗有着重要影响^[13-16]。Yi等^[13]分析了驾驶风格对车辆能量的敏感性;通过考虑驾驶风格的影响,Wu等^[14]提出了一种高效的再生制动能量回收策略;秦大同等^[15]制定了更节能的能量管理策略;Jimenez等^[16]建立了更为准确的车辆续航里程估计模型。目前驾驶风格识别方法主要分为两种:通过问卷调查挑选不同驾驶风格的驾驶员进行试验^[17]和基于实验数据采用聚类分析对驾驶风格进行识别^[18-19]。李立治等^[20]针对国内人群驾驶风格分类不合理及识别精度不高的问题,提出一种驾驶风格分类及识别客观化的方案。王超等^[21]在原有最优预瞄侧向驾驶员模型的基础上建立了多点多目标决策模型,以驾驶员的视野特征和决策意愿表征驾驶风格。但关于驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响研究少有报道。

综上所述,目前纯电动汽车的能耗研究着重于研究车辆自身参数、道路及环境等因素的影响,对于驾驶员驾驶风格的影响关注较少。然而,研究表明考虑驾驶风格影响能显著改善车辆的能量消耗与回收,因此研究驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响对优化整车电耗有十分重要的意义。为此,笔者挑选不同驾驶风格的驾驶员,在等速和综合工况下对纯电动汽车进行测试,通过将实验数据和理论计算结合进行定量分析,在等速工况下确定因素对汽车能耗影响的基础上着重分析综合工况下驾驶风格对电动汽车能耗的影响。

1 整车能量流分析及计算

分析整车能量可知,车辆通过充电设备将外部电能存储到车辆动力电池,在电池放电时,动力电池的能量分为:流入直流转交流逆变器(direct current/ alternating current, DC/AC)以提供转向助力、流入直流转直流逆变器(DC/DC)为整车低压设备供电、在开启空调或汽车正温系数加热器(positive temperature coefficient, PTC)时流入空调压缩机或 PTC、流入电机电控驱动车辆行驶等 4 个部分,整车能量流如图 1 所示。

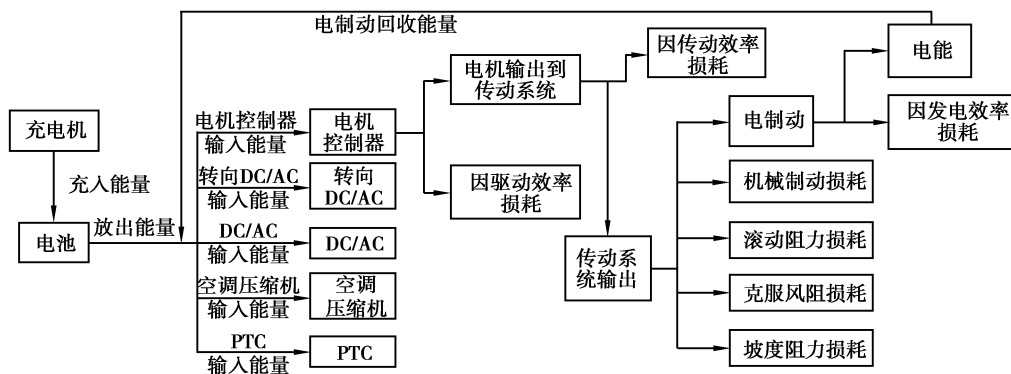


图 1 整车能量流

Fig. 1 Vehicle energy flow

流入电机电控的能量为动力电池能量的主要部分,会被自身效率损耗一部分,然后输出到传动系统;输入传动系统的能量也会因传动效率损耗一部分,随后输出能量用于车辆行驶;最后传动系统输出能量会被滚动阻力、风阻、坡度阻力和机械制动消耗,因电制动回收和发电效率产生损耗。

分析车辆能量和能耗,应计算出输入整车的能量、行驶阻力耗能、部件效率和部件耗能。输入车辆的能量由电池实际放出的能量决定,并流向各部件;行驶阻力包括滚动阻力、风阻、坡度阻力和加速阻力;部件效率包含传动系统效率、电机电控驱动效率和制动发电效率;部件耗能主要包含行车必须工作的部件的耗能,即:DC/DC 耗能和 DC/AC 耗能等。

1.1 电池输入能量

电池输入到车辆的能量包括整车驱动时电池放出的能量与制动时电池回收的能量,计算公式可表示为:

$$\begin{cases} W_B = W_{B_{in}} + W_{B_{out}}; \\ W_{B_{in}} = \frac{UI_{in}\Delta t}{3\,600 \times 1\,000}; \\ W_{B_{out}} = \frac{UI_{out}\Delta t}{3\,600 \times 1\,000} \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_B 表示电池输入到车辆的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $W_{B_{out}}$ 表示驱动时放出的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $W_{B_{in}}$ 表示制动时回收的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; U 为电池的端电压, V ; I_{out} 和 I_{in} 分别为驱动和制动时的电流,驱动时电流为正,制动时为负, A ; Δt 表示计算周期, ms 。

1.2 行驶阻力耗能

在平道路(纵向坡度小于 2%)的道路环境下研究电动汽车能耗,行驶阻力能耗的坡度阻力和滚动阻力均与道路相关,故把两种阻力合在一起考虑为道路阻力。

$$\begin{cases} W_f = \sum F_N f u_a \Delta t / 3\,600; \\ W_w = \sum \frac{C_D A u_a^3 \Delta t}{21.15 \times 3\,600} \end{cases} \quad (2)$$

式中: W_f 表示道路阻力消耗的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_w 表示风阻耗能, $\text{kW}\cdot\text{h}$; u_a 表示车速, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; F_N 表示车轮负荷, N ; f 表示道路阻力系数; C_D 表示空气阻力系数; A 表示迎风面积, m^2 。

1.3 效率损耗能量

1.3.1 电机发电耗能

$$\begin{cases} W_{TEB} = \sum \frac{U_{m_{in}} I_{m_{in}} \Delta t}{3\,600 \times 1\,000 \times \eta_{EBR}}; \\ W_{WEB} = W_{TEB} - W_{B_{in}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_{WEB} 表示电机发电消耗的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{TEB} 表示电制动总能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $U_{m_{in}}$ 表示电机控制器直流侧电压, V ; $I_{m_{in}}$ 表示电机控制器直流侧的电流, A , $I_{m_{in}} < 0$; η_{EBR} 表示制动时的实时效率,依据实时的总线电压、电机转速和转矩查询得到。

1.3.2 传动系统耗能

$$\begin{cases} W_{T_{out}} = W_f + W_w + W_{MB} + W_{TEB}; \\ W_{WT} = \frac{W_{T_{out}}}{\eta_T} (1 - \eta_T) \end{cases} \quad (4)$$

式中: W_{MB} 表示机械制动损耗的能量,直接由实验测得; $W_{T_{out}}$ 表示传动系统输出的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{WT} 为传动系统损耗的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; η_T 指传动系统效率,因实验用同一辆车,可认为传动系统效率不变,根据车辆状态并查询相关文献,将传动系统效率定为 95%。

1.3.3 电机电控驱动耗能

$$\begin{cases} W_{m_{in}} = \sum U_{m_{in}} I_{m_{in}} \Delta t / 3\,600\,000; \\ W_{m_{out}} = W_{T_{in}} = \frac{W_{T_{out}}}{\eta_T}; \\ W_{WMD} = W_{m_{in}} - W_{m_{out}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: W_{WMD} 表示电机电控消耗的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $W_{m_{in}}$ 表示输入电机电控的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $W_{m_{out}}$ 表示电机输出的

能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{T_in} 为经电机电控系统输入到传动系统的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; U_{m_in} 代表电机控制器直流侧电压, V ; I_{m_in} 代表电机控制器直流侧的电流, A , $I_{m_in} > 0$ 。

1.4 部件耗能

由于 PTC、空调压缩机、DC/DC、DC/AC 都可以通过输入电压和电流计算耗能, 所以它们各自耗能的计算方法为:

$$W_p = \sum \frac{UI\Delta t}{3\,600 \times 1\,000} \quad (6)$$

式中: W_p 代表部件耗能, $\text{kW}\cdot\text{h}$; U 代表部件输入电压, V ; I 代表流入部件的电流, A 。

1.5 百公里电耗折算

为排除空调压缩机和 PTC 等行车非必须工作部件对分析的影响, 整车百公里电耗计算公式为:

$$W_{100\text{ km}} = \frac{W_B - W_{PTC} - W_{AC}}{\Delta S} \times 100 \quad (7)$$

式中: $W_{100\text{ km}}$ 代表综合百公里电耗, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{PTC} 代表此计算周期 PTC 耗能, $\text{kW}\cdot\text{h}$; W_{AC} 代表此计算周期空调压缩机耗能, $\text{kW}\cdot\text{h}$; ΔS 为该计算周期里程的变化, km 。

2 实验设计

测试车辆为某纯电动货车, 其具体参数如表 1 所示。

表 1 实验车辆参数

Table 1 Experimental vehicle parameters

参数	取值	参数	取值
实验时总质量/kg	4 495	风阻系数	0.650
电池容量/($\text{kW}\cdot\text{h}$)	75	道路阻力系数	0.012
电机额定/峰值功率/ kW	55/90	迎风面积/ m^2	5.900
电机额定/峰值转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 650/4 000	主减速比	6.140
电机额定/峰值扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	318/1 000	滚动半径/ m	0.380

为得到整车的能量流动数据, 根据测试车辆的高、低压电气原理, 确定各安装节点, 并根据各节点电流选取适当量程的电流传感器, 测得流入各高压部件的电流^[22]。同时需要在制动回路添加压强传感器, 测得机械制动损耗的能量, 测试原理如图 2 所示。

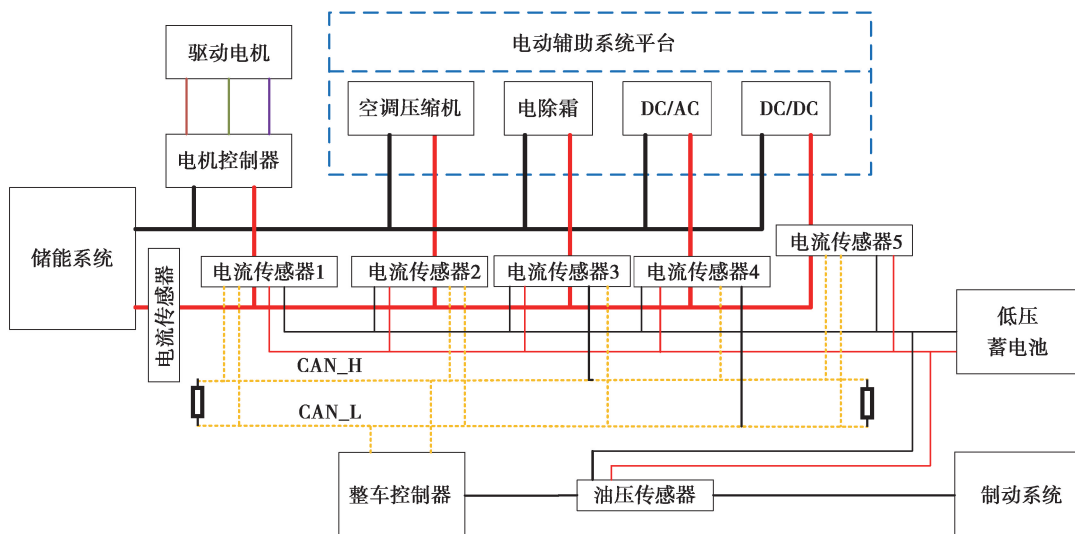


图 2 能量测试原理

Fig. 2 Principle of energy measurement

2.1 等速工况实验方案设计

等速工况实验以车速为单一变量,其他变量因素保持不变,测到车辆在 30,40,50,60,75 km·h⁻¹ 共 5 个车速下匀速行驶一段距离各部件的能耗。

2.2 综合工况实验方案设计

综合工况实验以驾驶风格和行驶工况两个参数为变量,该实验方案主要用于分析驾驶风格不确定因素对汽车能耗的影响。

2.2.1 行驶工况选择

行驶工况选择畅通和拥堵两种,交通拥堵不仅与交通需求和道路通行能力有关,而且与人们的心理承受能力有关,可以通过交通拥堵指数(traffic congestion index, TCI)来对行驶工况进行区分^[23]。笔者定义变量 M 为将特定区域特定时刻的单个路段的拥堵强度量化后的相对数,该指标值可以体现交通运行状态和拥堵强度,反映其运行质量,无量纲。 M 为一个连续变量,定义其取值范围是 0~5。指标值的大小代表了不同的交通运行状态和拥堵强度。值越大则评价时段内的道路运行状态越差,拥堵强度越大;反之,道路的运行状态越好,拥堵强度越小。计算公式如下:

$$M_{TCI_road} = \frac{\sum_{p=1}^q A_p M_p}{\sum_{p=1}^q A_p} \quad (8)$$

式中: M_p 表示该等级道路中路段 p 的交通拥堵指数; q 为路段数; A_p 表示路段 p 的重要性权重; M_{TCI_road} 为整个行驶路段的交通拥堵指数,取 $M_{TCI_road} > 2$ 为拥堵工况, $M_{TCI_road} \leq 2$ 为畅通工况。

2.2.2 驾驶风格选择

试验招募 18 名非职业驾驶人作为试验对象,年龄为 25.00~45.00 岁,均值为 30.64 岁,标准差为 8.90 岁,驾龄为 5.00~25.00 年(均值:9.54 年,标准差:4.86 年),上年度年驾驶经验里程为 4 000~50 000 km(均值为 12 649 km,方差为 10 462 km),采用问卷调查的形式对驾驶人进行调查。首先,基于驾驶人行为问卷,提取驾驶风格因子与负荷对应的问题,要求本实验的驾驶人给出个人该行为的发生频率,0~4 代表发生的频率逐渐增加。然后,采用信度系数对调查结果进行评估,基于主成分分析法实现对驾驶风格的量化^[24]。最后,计算其综合得分并进行驾驶风格分类。

$$\begin{cases} a_{ij} = \sqrt{\lambda_i} h_{ij}, & i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, m; \\ F_{li} = \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij}, & l = 1, 2, \dots, n; \\ F_l = \sum_{i=1}^k \lambda_i F_{li}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: a_{ij} 为载荷系数; λ_i 为第 i 个特征根; h_{ij} 为第 i 个特征向量的第 j 个元素; x_{ij} 表示原始变量标准化的结果; F_{li} 为第 l 个样本的第 i 个主成分得分; F_l 为第 l 个样本总得分,样本总得分越高,表明驾驶风格越激进,可将 18 名驾驶人分为保守型、正常型和激进型 3 类。根据不同的行驶工况和驾驶风格将实验分为 6 组进行,如表 2 所示。

表 2 行驶工况和驾驶风格组合

Table 2 Combination of driving conditions and driving behaviors

实验序号	行驶工况	驾驶风格	实验序号	行驶工况	驾驶风格
①	通畅	保守	④	拥堵	保守
②	通畅	正常	⑤	拥堵	正常
③	通畅	激进	⑥	拥堵	激进

3 整车能量流及其影响因素分析

3.1 整车能量流分析

3.1.1 等速工况

根据实验结果和理论的计算,得到等速工况下的整车及关键部件的能量消耗情况,整车能量流数据如表 3 所示。表中 E 为百公里电池实际放出能量, E_1 为百公里附件损耗能量, E_2 为百公里电机电控系统损耗能量, E_3 为百公里传动系统损耗能量, E_4 为百公里传动系统输出损耗能量。

表 3 等速工况能量流
Table 3 Energy flow at constant velocity

速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	E / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	E_1 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	$(E_1/E)/$ %	E_2 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	$(E_2/E)/$ %	E_3 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	$(E_3/E)/$ %	E_4 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	$(E_4/E)/$ %
30	36.57	2.22	6.10	17.24	47.20	0.90	2.40	16.12	44.10
40	38.47	1.66	4.30	15.55	40.40	1.15	4.00	20.01	52.00
50	38.67	1.24	3.10	10.73	27.70	1.44	3.70	25.08	64.80
60	44.42	1.02	2.30	10.43	23.50	1.76	4.00	30.96	69.70
75	52.46	1.07	2.00	10.45	19.90	2.27	4.30	38.48	73.30

可以看出在等速工况下,电池放出的能量,主要是因电机电控系统的效率而损耗和传动系统输出的能量用于车辆行驶所消耗,电机电控系统能耗占 19.90%~47.20%,传动系统输出损耗的能量占 44.10%~73.30%,附件消耗的能量很少,占 2.00%~6.10%。

电机电控系统损耗包括电机损耗和电机控制器损耗,通过实验和理论计算可得到不同转矩和转速下的电机电控整体效率图,并将等速工况实验下电机驱动的 50% 以上的转矩转速在其效率图上的落点区域标出(图 3)。可以看出随着汽车速度增加,电机电控系统效率增加,因此当转矩一定时,可以通过适当提高电机的转速,使电机电控系统损耗减少。

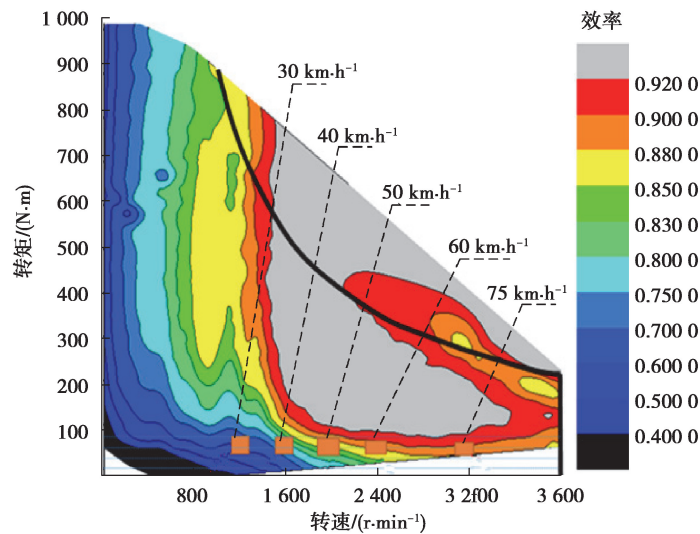


图 3 等速工况点效率分布

Fig. 3 Efficiency distribution at constant velocity points

传动系统输出的能量一部分通过制动能量回收到电池,其余的被电制动、机械制动、道路阻力和风阻 4 部分损耗,具体的能量消耗情况如图 4 所示。可以看出等速工况下,传动系统输出的能量以道路阻力和风阻消耗为主。道路阻力损耗 11.27~13.80 kW·h,受速度的影响不大;风阻损耗 4.12~21.94 kW·h,受速度的影响最明显。

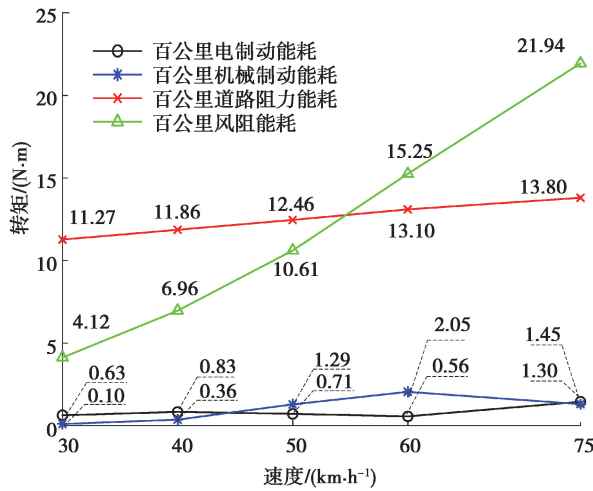


图 4 等速工况传动系统输出能量消耗情况

Fig. 4 The output energy consumption of the transmission system in constant speed condition

3.1.2 综合工况

根据实验结果和理论计算得到综合工况下不同行驶工况和驾驶风格下的能量分布,6 种综合工况实验的整车能量流数据如表 4 所示。可以看出电机电控系统的能耗占比为 12.70%~32.40%,传动系统输出能量占比为 63.10%~85.60%,仍为主要的能量消耗部分;DC/DC 和 DC/AC 等高压附件耗能占比非常少,DC/AC 能耗占比 1.20%~2.80%,DC/DC 能耗占比 0.60%~2.20%。

表 4 综合工况能量流

Table 4 Energy flow under comprehensive working condition

驾驶风格	行驶工况	电池实际放出能量/(kW·h)	DC/DC 能耗/(kW·h)	DC/AC 能耗/(kW·h)	电机电控系统能耗/(kW·h)	传动系统能耗/(kW·h)	传动系统输出能量/(kW·h)
激进	畅通	54.03	0.56	0.64	9.37	2.49	41.01
	拥堵	55.28	1.21	1.10	16.66	2.54	33.86
正常	畅通	47.00	0.32	0.55	5.95	2.14	38.10
	拥堵	45.91	0.83	1.22	14.87	1.85	27.12
保守	畅通	44.28	0.37	0.59	7.97	1.86	33.52
	拥堵	42.70	0.74	1.21	13.07	1.77	25.83

从电池实际消耗的能量来看,整车的能耗受驾驶风格和行驶工况的共同影响,其中受驾驶风格的影响更明显:相同驾驶风格不同行驶工况,整车百公里电能消耗相差 1.09~1.58 kW·h;相同行驶工况不同驾驶风格,整车百公里电能消耗相差 9.75~12.58 kW·h。因此着重分析驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响。

综合工况下,传动系统输出损耗能量仍然由电制动损耗能量、机械制动损耗能量、道路阻力损耗能量和风阻损耗能量 4 部分组成,具体能耗值如表 5 所示。传动系统输出损耗能量仍然以道路阻力损耗和风阻损耗为主,受驾驶风格的影响,仅道路阻力损耗波动较小,电制动损耗、机械制动损耗和风阻损耗均存在较大波动。道路阻力的百公里耗能相差 0.24~0.34 kW·h,电机制动相差 0.94~1.83 kW·h,机械制动相差 4.50~4.51 kW·h,风阻相差 1.47~3.04 kW·h。

表 5 综合工况传动系统输出能量损耗情况

Table 5 Transmission system output energy loss under comprehensive working condition

驾驶风格	行驶工况	电机制动百公里能耗/(kW·h)	机械制动百公里能耗/(kW·h)	道路阻力百公里能耗/(kW·h)	风阻百公里能耗/(kW·h)
激进	畅通	1.62	6.13	13.53	19.73
	拥堵	6.25	7.17	11.99	8.45
正常	畅通	0.79	2.71	13.72	20.88
	拥堵	4.33	3.82	11.75	7.23
保守	畅通	0.68	1.62	13.38	17.84
	拥堵	4.42	2.67	11.76	6.98

3.2 驾驶风格与能耗

在通畅工况条件下,将激进型驾驶风格与保守型驾驶风格的电机电控系统损耗、传动系统损耗、道路阻力损耗、克服风阻损耗、机械制动损耗和电制动损耗 6 个因素对比,如表 6 所示。总体上,激进的驾驶风格导致整车百公里能耗增加了 9.51kW·h,但 6 个影响因素增加的幅度存在较大的区别。

表 6 畅通工况下不同驾驶风格耗能分析

Table 6 Energy consumption analysis of different driving behaviors under smooth driving condition

驾驶风格	电机输入端消耗能量/(kW·h)	传动系统损耗/(kW·h)	电机电控系统损耗/(kW·h)	道路阻力损耗/(kW·h)	风阻损耗/(kW·h)	$W_{MB}/$ (kW·h)	电机制动损耗/(kW·h)
激进	52.87	2.49	9.73	13.53	19.73	6.13	1.62
保守	43.36	1.86	7.97	13.38	17.84	1.62	0.68
差值	9.51	0.36	1.52	0.15	1.89	4.51	0.93

因制动时才会引起机械制动耗能 W_{MB} 和电制动损耗的能量 W_{WEB} ,所以可将机械制动损耗能量和电制动损耗能量统称为制动损耗能量,占比 56.44%;风阻耗能 W_w 和道路阻力耗能 W_f 可以统称为车辆行驶阻力耗能,占比 21.20%;传动系统效率损耗能量 W_{WT} 和电机电控驱动效率损耗能量 W_{WMD} 统称为动力传动系统平均运行效率能耗,占比 22.36%。

同理,在拥堵工况条件下,将激进型驾驶风格与保守型驾驶风格的电机电控系统损耗、传动系统损耗、道路阻力损耗、克服风阻损耗、机械制动损耗和电机制动损耗 6 个因素对比,如表 7 所示。激进型驾驶风格导致整车百公里能耗增加了 12.39 kW·h,6 个影响因素增加的幅度也存在较大的区别。制动损耗能量占比 54.15%,车辆行驶阻力耗能占比 14.61%,动力传动系统平均运行效率能耗占比 31.23%。

表 7 拥堵工况下不同驾驶风格耗能分析

Table 7 Energy consumption analysis of different driving behaviors under congestion condition

驾驶风格	电机输入端损耗/(kW·h)	传动系统损耗/(kW·h)	电机电控系统损耗/(kW·h)	道路阻力损耗/(kW·h)	风阻损耗/(kW·h)	机械制动损耗/(kW·h)	电机制动损耗/(kW·h)
激进	53.06	2.54	16.66	11.99	8.45	7.17	6.25
保守	40.67	1.77	13.07	11.76	6.98	2.67	4.42
差值	12.39	0.77	2.88	0.24	1.47	4.50	1.83

在相同车辆状态和行驶工况下,激进型驾驶风格的百公里能耗会比保守型高出 10.00 kW·h 以上,多消耗的能量中,制动损耗能量占比 54.00% 以上,车辆行驶阻力耗能占 14.61%~21.20%,动力传动系统平均运行效率能耗占比 22.33%~31.23%。其中车辆行驶阻力损耗由行驶工况所决定,因此进一步分析驾驶风格对制动损耗和动力传动系统能耗的影响。

3.2.1 驾驶风格与制动能耗

驾驶风格对汽车制动能耗的影响体现在对机械制动能耗和电机制动时因发电效率的损耗两方面,如图 5 所示,畅通或拥堵路况下,驾驶风格越激进,汽车的制动损耗能量越高;汽车在制动时,制动力由机械制动机构和电机两部分提供,驾驶风格越激进,制动踏板开度变化率越大,机械制动能耗越高,呈现正相关趋势。受电机电控系统发电效率的影响,电制动损耗存在波动,需进一步分析驾驶风格对电机电控系统发电效率的影响。

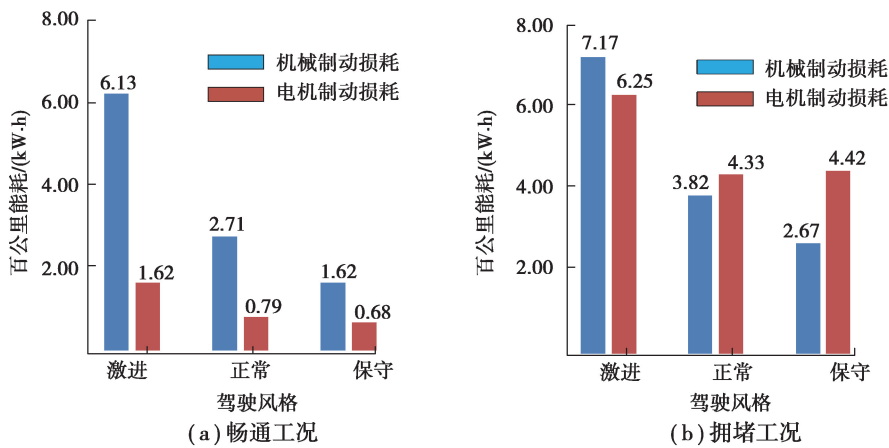


图 5 相同行驶工况、不同驾驶风格制动能耗

Fig. 5 Braking energy consumption with different driving behaviors under the same driving condition

电机电控系统发电效率如图 6 所示。电机电控系统发电的高效区处于中高速和中高负荷围成的区域,速度一定时,适当提高电机的制动力矩,可提高电机电控系统的发电效率,降低电机制动损耗。激进的驾驶风格存在汽车频繁急加速、急减速的情况,将导致制动次数增加和电机电控系统发电效率波动,若发电效率处于高效区的时间缩短,则电机制动损耗的能量增加。因此,适当提高电制动扭矩能提高电机电控系统的发电效率,降低因发电效率损耗的能量;同时电制动扭矩提高也可减少对机械制动力矩的需求,降低机械制动损耗能量。

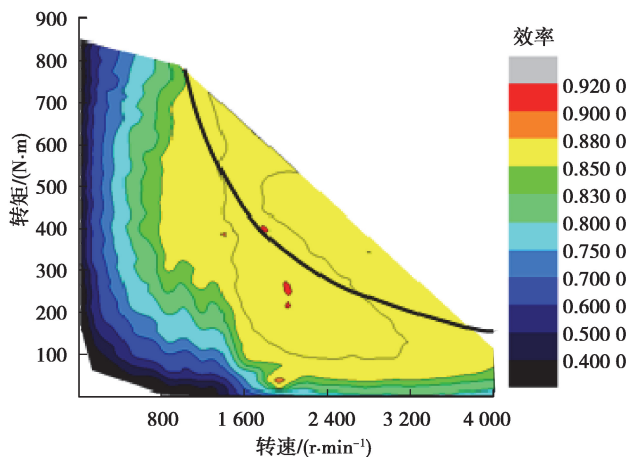


图 6 电机电控发电效率

Fig. 6 Electric power generation efficiency of electric motor

由以上分析可知,在制动时汽车对机械制动力和电机制动力的分配决定了汽车的制动耗能。在拥堵工况、激进的驾驶风格下,假设其他条件均不变,仅提升制动扭矩,使发电效率 η_{EBR} 提升 10.00%,可多回收 2 kW·h 电量,忽略提升制动扭矩对减小机械制动耗能的影响,百公里将减少 2 kW·h 电耗。因此通过制动力的分配提升电机电控系统发电效率来减少能耗的方法是可行的。

3.2.2 驾驶风格与动力传动系统能耗

动力传动系统能耗由效率决定,因传动系统的效率被认为固定不变,故能耗主要受电机电控系统驱动效率影响,对比畅通工况下激进和保守驾驶风格的电机驱动转矩转速工况点的分布(图 7),可以看出不同驾驶风格主要影响低速区电机工作点的分布数量。

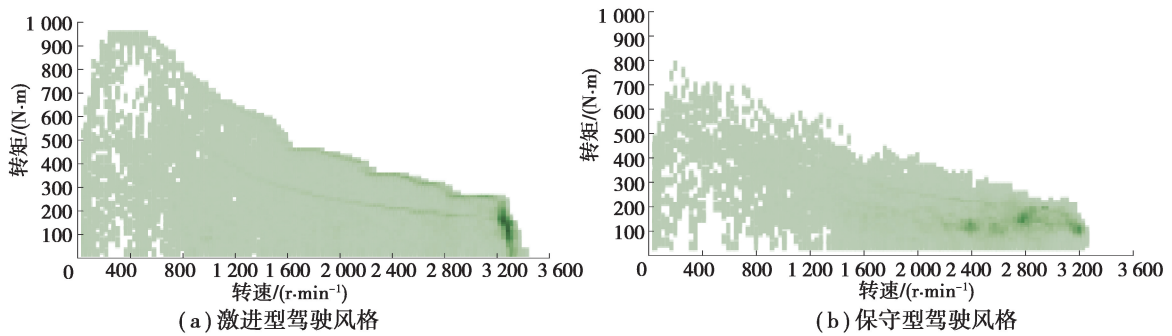


图 7 畅通工况不同驾驶风格工况点分布

Fig. 7 Point distribution of different driving behaviors in smooth driving condition

根据不同转速和转矩下的电机电控系统驱动效率(图 8),得到畅通工况不同驾驶风格电机电控驱动效率分布,如表 8 所示。在电机电控驱动效率低于 60.00% 的区间,保守型驾驶风格工作点占比 8.38%,小于激进型驾驶风格工作点的占比 10.97%。

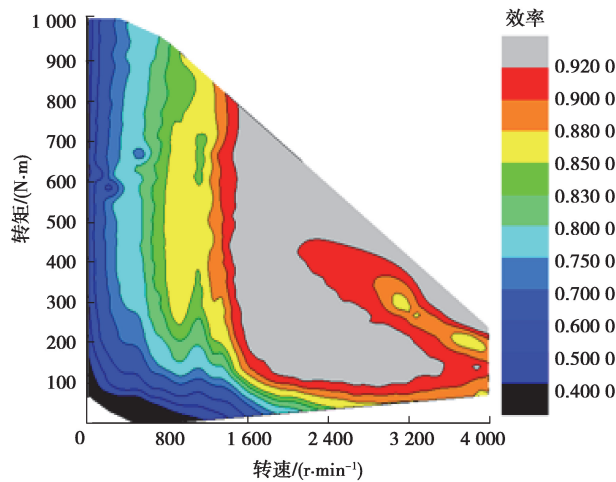


图 8 电机电控系统驱动效率图

Fig. 8 Drive efficiency diagram of motor control system

表 8 畅通工况不同驾驶风格电机电控效率分布

Table 8 Distribution of electrical control efficiency with different driving behaviors under smooth working condition

驾驶风格	占比/%						
	效率区间						
	≤50%	50%~60%	60%~70%	70%~80%	80%~90%	90%~95%	>95%
保守	1.99	6.39	4.71	9.08	26.32	51.15	0.37
激进	6.28	4.69	4.30	17.16	34.30	32.85	0.43

对比拥堵工况下激进和保守驾驶风格的电机驱动转矩转速工况点的分布(图 9)可以看出不同驾驶风格主要影响高速区电机工作点的分布数量。

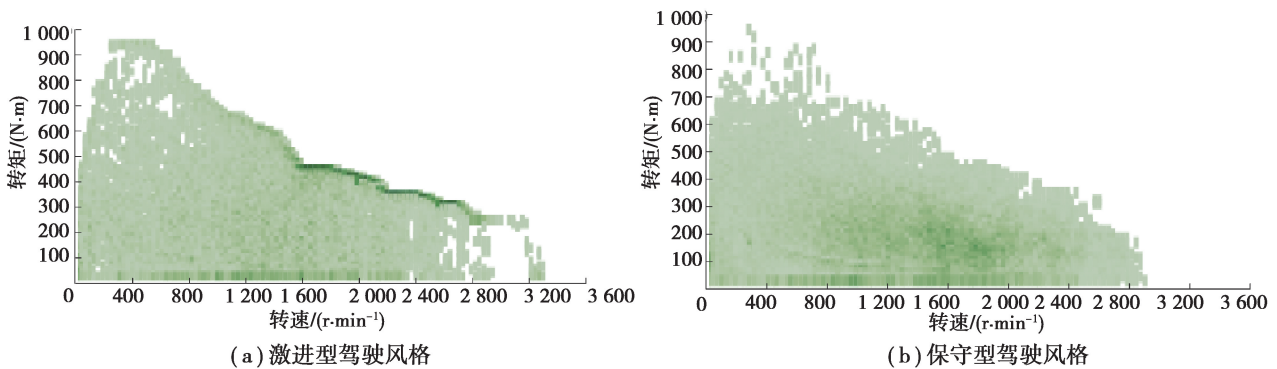


图 9 拥堵工况不同驾驶风格工况点分布

Fig. 9 Point distribution of different driving behaviors in congestion driving condition

拥堵工况不同驾驶风格电机电控驱动效率分布如表 9 所示。在电机电控驱动效率高于 80.00% 的区间,保守型驾驶风格工作点占比 59.58%,大于激进型驾驶风格工作点占比 54.49%。

表 9 拥堵工况不同驾驶风格电机电控效率分布

Table 9 Electric control efficiency distribution of motor with different driving behaviors under congestion condition

驾驶风格	占比/%						
	效率区间						
	≤50%	50%~60%	60%~70%	70%~80%	80%~90%	90%~95%	>95%
保守	7.35	7.34	6.95	18.78	32.87	26.44	0.27
激进	8.71	9.00	7.81	20.00	30.55	23.62	0.32

4 结 论

通过理论和实验相结合的方法研究纯电动汽车能量流动情况,着重分析驾驶风格对电动汽车能耗的影响,得出以下结论,在目前电动汽车电池储存能量有限的情况下,为优化整车的电耗指明了方向。

1) 电池放出的能量,19.90%~47.20%被电机电控系统的效率损耗,44.10%~73.30%由传动系统输出用于车辆行驶所消耗,附件消耗的能量很少,仅占 2.00%~6.10%。建议从减小风阻能耗、减少机械制动能耗、提高电制动发电效率和提高电机电控效率等方面开展整车电耗优化工作。

2) 驾驶风格主要影响制动损耗和动力传动系统平均运行效率损耗。激进的驾驶风格百公里电耗会比保守型高出 10 kW·h 以上,多消耗的能量中,制动损耗能量占比 54.00% 以上,车辆行驶阻力耗能占 14.61%~21.20%,动力传动系统平均运行效率能耗占比 22.33%~31.23%。

3) 畅通或拥堵路况下,驾驶风格越激进,汽车的制动损耗能量越高;受电机电控系统发电效率的影响,电制动损耗存在波动。增强电制动扭矩可提高电机电控系统发电效率,减少电制动损耗,同时减小机械制动扭矩,降低机械制动损耗。在制动时,应通过合理分配电制动和机械制动扭矩,优化整车能耗。

4) 在相同车辆状态下,电机电控系统驱动效率受驾驶风格的影响。畅通工况下,不同驾驶风格主要影响低速区电机工作点的分布数量;拥堵工况下,不同驾驶风格主要影响高速区电机工作点的分布数量。在电机转速低于 1 600 r/min 时,适当提高扭矩会提高实时效率,转速提升速率更大,以减小低效区时间,从而提升整体效率。

参考文献:

- [1] 林利红, 李雨龙, 李聪波, 等. 纯电动汽车驱动桥的轻量化设计[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(4): 17-28.
Lin L H, Li Y L, Li C B, et al. Lightweight design of electric rear axle of pure electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(4): 17-28. (in Chinese)
- [2] 胡建军, 杜瑞, 吉毅. 纯电动汽车起步控制策略[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(8): 19-25.
Hu J J, Du R, Ji Y. Control strategy for starting up of pure electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(8): 19-25. (in Chinese)
- [3] Yuan X M, Zhang C P, Hong G K, et al. Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles[J]. Energy, 2017, 141: 1955-1968.
- [4] Li L F, Dong W L. Experimental research on electric energy consumption and control method of electric vehicle[C]// Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017), July 24-25, 2017, Chongqing, China. Paris, France: Atlantis Press, 2017: 6.
- [5] Zhou B Y, Xu Y Y, He K X, et al. The on-road testing analysis of travel patterns and the integrated energy consumption of the new energy vehicles in China[C]// 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), December 11-14, 2017, Belfort, France. IEEE, 2017: 1-6.
- [6] Liu K, Yamamoto T, Morikawa T. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 74-81.
- [7] Li W, Stanula P, Egede P, et al. Determining the main factors influencing the energy consumption of electric vehicles in the usage phase[J]. Procedia CIRP, 2016, 48: 352-357.
- [8] 李礼夫, 梁翼. 基于不同加速方式的纯电动汽车电能量消耗研究[J]. 测试技术学报, 2018, 32(4): 335-340.
Li L F, Liang Y. Research on electric energy consumption of pure electric vehicles based on different acceleration modes [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(4): 335-340. (in Chinese)
- [9] Zhang R, Yao E J. Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 41: 177-187.
- [10] Zhao C, Gong G, Yu C, et al. Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles [J/OL]. SAE Technical Papers, 2019[2020-06-30]. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>.
- [11] Qi Z, Yang J, Jia R, et al. Investigating real-world energy consumption of electric vehicles: a case study of Shanghai[J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 367-376.
- [12] Liu K, Wang J B, Yamamoto T, et al. Exploring the interactive effects of ambient temperature and vehicle auxiliary loads on electric vehicle energy consumption[J]. Applied Energy, 2018, 227: 324-331.
- [13] Yi Z, Bauer P H. Effects of environmental factors on electric vehicle energy consumption: a sensitivity analysis[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2017, 7(1): 3-13.
- [14] Wu X K, Freese D, Cabrera A, et al. Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 52-67.
- [15] 秦大同, 詹森, 曾育平, 等. 基于驾驶风格识别的混合动力汽车能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 162-169.
Qin D T, Zhan S, Zeng Y P, et al. Management strategy of hybrid electrical vehicle based on driving style recognition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(8): 162-169. (in Chinese)
- [16] Felipe J, Amarillo J C, Naranjo J E, et al. Energy consumption estimation in electric vehicles considering driving style[C]// 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, September 15-18, 2015, Gran Canaria, Spain. IEEE, 2015: 101-106.
- [17] 刘思源, 喻伟, 刘洁莹, 等. 考虑驾驶风格的车辆换道行为及预测模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 28-35.
Liu S Y, Yu W, Liu J Y, et al. Characteristics analysis and prediction model of lane changing behavior under different

- driving styles[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 28-35. (in Chinese)
- [18] 李经纬, 赵治国, 沈沛鸿, 等. 驾驶风格 K-means 聚类与识别方法研究[J]. 汽车技术, 2018(12): 8-12.
Li J W, Zhao Z G, Shen P H, et al. Research on methods of K-means clustering and recognition for driving style[J]. Automobile Technology, 2018(12): 8-12. (in Chinese)
- [19] Sun B H, Deng W W, Wu J, et al. Research on the classification and identification of driver's driving style[C]//2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), December 9-10, 2017, Hangzhou, China, IEEE, 2017: 28-32.
- [20] 李立治, 杨建军, 刘双喜, 等. 国内人群的驾驶风格分类及识别方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(11): 33-40.
Li L Z, Yang J J, Liu S X, et al. Research on classification and recognition of driving style of domestic crowds[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(11): 33-40. (in Chinese)
- [21] 王超, 郭孔辉, 许男, 等. 表征驾驶风格和驾驶员能力的驾驶员模型[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(1): 41-45.
Wang C, Guo K H, Xu N, et al. Driver model characterizes driving style and driver's ability[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(1): 41-45. (in Chinese)
- [22] 郭健忠, 吴建立, 谢斌, 等. 汽车液晶仪表实车数据测试台开发及数据分析[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(5): 37-43.
Guo J Z, Wu J L, Xie B, et al. Development and data analysis of real vehicle data test bench for automobile LCD instrument[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(5): 37-43. (in Chinese)
- [23] 张雪莲, 于雷, 刘梦涵. 基于交通需求的路网交通拥堵评价模型[J]. 现代交通技术, 2008, 5(6): 71-75.
Zhang X L, Yu L, Liu M H. Traffic demand-based traffic congestion measurement models for road networks[J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(6): 71-75. (in Chinese)
- [24] 刘贺. 考虑驾驶员风格的汽车纵向控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Liu H. Vehicle longitudinal control strategy designed with considerations of the driving style[D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)