电动汽车滑行制动能量回收过程驾驶性综合评价方法研究

李朝斌[1,2,3]，易 侃[1,2]

（1. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室，重庆 401122；2. 中国汽车工程研究院股份有限公司，重庆 401122；
3. 中汽院智能网联汽车检测中心（湖南）有限公司，长沙 410000）

摘　要：电动汽车滑行制动能量回收过程的驾驶性是车辆纵向动力学瞬态品质的定性描述，为定量评价能量回收制动的驾驶性，对滑行制动过程中的减速特性进行分析，提取了最大减速度、减速滑行距离、最大减速度变化率、减速度变化率稳态占比4个客观指标，并通过相关性分析验证主观评价与客观参数的一致性。基于客观评价指标，利用非线性回归方法建立了主观评价预测模型。通过7台新能源车型共计18种能量回收模式下的综合评价，验证了评价体系的有效性和实用性。结果表明，基于主客观综合分析建立的评价体系能把主观感受和客观数据有机结合，实现驾驶性的量化评价。

关键词：驾驶性；主观评价；客观指标；相关性分析；非线性回归；主观预测模型

中图分类号：U461.4　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.2095–1469.2022.03.12

Study on Comprehensive Drivability Evaluation Method During Coasting Energy Recovery for Electric Vehicles

LI Chaobin[1, 2, 3]，YI Kan[1, 2]

（1. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology，Chongqing 401122，China；
2. China Automotive Engineering Research Institute，Chongqing 401122，China；
3. Intelligent Connected Vehicle Inspection Center（Hunan）of CAERI Co.，Ltd.，Changsha 410000，China）

Abstract: The drivability in the process of coasting energy recovery is vital to the transient quality of vehicle longitudinal dynamics for electric vehicles. In order to quantitatively evaluate the drivability during energy recovery, the deceleration characteristics were analyzed when the vehicle was coasting, and the four objective indexes were obtained, i. e. the maximum deceleration, the deceleration distance, the maximum deceleration rate and the steady-state proportion of deceleration rate. The consistency between the subjective evaluation and objective parameters was verified by correlation analysis. Based on the objective evaluation indexes, the subjective evaluation prediction model was established by using the nonlinear regression method. The effectiveness and practicability of the evaluation system were verified by the comprehensive evaluation considering 7 models of new energy vehicles with 18 energy recovery modes. The results show that the comprehensive evaluation system combining the subjective assessments based on human feelings and the objective evaluation data can achieve the quantitative evaluation of drivability.

Keywords: drivability; subjective evaluation; objective indicators; correlation analysis; nonlinear regression; subjective prediction model

收稿日期：2021–09–15　**改稿日期：**2021–11–04

基金项目：重庆市自然科学基金博士后科学基金（cstc2020jscx-dxwtBX0019）

参考文献引用格式：

李朝斌，易 侃.电动汽车滑行制动能量回收过程驾驶性综合评价方法研究[J].汽车工程学报，2022，12(3)：314–320.

LI Chaobin，YI Kan.Study on Comprehensive Drivability Evaluation Method During Coasting Energy Recovery for Electric Vehicles [J].Chinese Journal of Automotive Engineering，2022，12(3)：314–320.(in Chinese)

电动汽车滑行能量回收系统通过电机回馈转矩达到制动减速和能量再生的目的，在制动效能和经济性方面有先天优势[1]，但由于制动过程电机驱动系统的加入，在驾驶性评价方面与传统燃油车存在差异，而国内还未形成完整专有的评价体系和标准[2]。能量回收系统的应用使电动汽车的驾驶性评价更加复杂，而构建有效的主客观综合评价指标和评价体系是提升电动汽车滑行制动能量回收过程时用户体验和优化系统性能的重要前提[3]。

驾驶性评价研究主要包括构建主观评价标准和客观评价指标并将两者有机结合，从而对驾驶性进行综合评价。孙坚[4]从驾驶舒适性、操控性、驾驶员体感、路感、运动风格期望偏差建立主观评价项目并筛选确定现象敏感度高的物理指标，建立两者的相关模型。SHIN等[5]从动态性能和驾驶员舒适度两大类建立主观评价项目和客观指标，通过回归分析方法获得相关指标的权重因子。JOSEF等[6]通过基于能量和动量方程等构建的复杂动力传动模型，对自动变速器的驾驶性进行评价。LAKSHMANAN等[7]将驾驶性定义为车辆对驾驶员输入响应的平滑程度，并以启动能力、怠速质量等九大项作为主观评价项，从静态和动态两方面确定客观物理量，通过采集主观测试中的物理量来评价驾驶性能。HAYAT等[8]、郑诚[9]运用神经网络方法和模糊灰色理论等统计学方法，分析了主客指标两者的相关性，从而通过相关度高的客观评价指标表征驾驶性的主观结果。THORNTON等[10]对混合动力汽车冷启动时的驾驶性进行了研究。马翔[3]对比了纯电动汽车与传统燃油车构型及驾驶模式，研究了起步、普通加速、高速加速3种典型工况的驾驶性。何晓引[11]对纯电动汽车的复合制动系统在制动时驾乘人员的驾驶舒适性进行研究。

综上，目前传统燃油车的驾驶性研究相对成熟，而针对电动汽车特有的能量回收系统的驾驶性研究还比较少。本文对电动汽车滑行能量回收系统滑行制动过程中的减速特征进行分析，以主观评价项目为纲，确定相应的客观指标，通过相关性分析明确最终的特征客观指标，最后通过非线性回归方法建立主观评价预测模型，并在实车测试中进行预测模型的验证。

1 基于主观评价的客观指标分析

1.1 主观评价项目及客观指标初选

驾驶员主观评价是驾驶性评价体系中的一个重要组成部分，通过事后调查的方式获取系统使用者的主观感受。本文主观结果通过定量评分的方式，按国内主机厂主流的评价准则将评价进行量化[4]，见表1。

表1 主观评分标准

评分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
等级	非常差	很差	差，不可接受	稍差	不可接受	可接受	比较满意	好	很好	非常好
故障水平	抱怨、愤怒	抱怨、愤怒	抱怨、愤怒	不舒适，不接受	不舒适	可以感觉到且不舒适	可以感觉到但无不舒适	没有故障	几乎感觉不到	完全感觉不到
是否改进	需要	需要	需要	需要	需要	可有可无	可有可无	不需要	不需要	不需要

电动汽车滑行能量回收系统滑行制动过程中的主观评价项目包括减速强度、减速响应、减速冲击三大类。减速强度依据驾驶员身体姿态进行描述，一般减速强度越大，驾驶员姿态越不稳定，但过大或过小的减速强度会降低舒适性或安全感，与之对应的客观指标包括最大减速度、减速度极差、减速度均方根。减速响应依据减速过程系统制动响应快慢，包括系统达到制动需求是否迅速和整个制动过程是否迅速，该项目也应在合理范围内，过大或过小都会降低安全性，与之对应的客观指标包括达到减速度拐点所需时间、减速滑行距离；减速冲击依据制动过程中对驾驶员的冲击度和眩晕感，同样该项目应在合理范围内有最优解，与之对应的客观指标包括最大减速度变化率、减速度变化率极差、减速度变化率均方根、减速度变化率稳态占比。

1.2 客观指标分析

1.2.1 减速度及减速度变化率最大值

减速度表征滑行制动时的减速强度，是速度的变化量与发生这一变化的所用时间的比值，其最大值反映了减速过程中单位时间内速度变化最大量。

减速度变化率表征车辆纵向的瞬态冲击度，把垂直方向上如因道路条件引起的弹跳和颠簸加速度的影响排除在外，其最大值反映了减速过程中单位时间内减速度变化最大量，减速度变化率的数学表达式为：

$$j = \frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2V}{\mathrm{d}t^2}。\tag{1}$$

式中：j为冲击度，m/s³；a为车辆加速度，m/s²；V为车辆速度，m/s；t为时间，s。

1.2.2 减速度及减速度变化率极差

极差又称为范围误差或全距，以R表示，是用来表示统计资料中的变异量数，用观察数据的最大值减最小值。在统计中用于反映数据的离散程度和变异范围，同时能体现数据波动范围，一定程度上，极差越大，离散程度越大。减速度及减速度变化率极差的数学表达式为：

$$R_a = a_{\max} - a_{\min}。\tag{2}$$

$$R_j = j_{\max} - j_{\min}。\tag{3}$$

式中：R_a为减速度极差，m/s²；$a_{\max}$、$a_{\min}$分别为减速度最大值和最小值，m/s²；R_j为减速度变化率极差，m/s³；$j_{\max}$、$j_{\min}$分别为减速度变化率最大值和最小值，m/s³。

减速度及减速度变化率的极差表征了减速过程中速度及减速度变化的稳定程度。

1.2.3 减速度及减速度变化率均方根

减速度（减速度变化率）均方根值描述了纵向减速度（减速度变化率）时间历程内的平均减速度值（减速度变化率值），表征了减速度（减速度变化率）持续时间和变化快慢[12]。其减速度均方根数学表达式为：

$$a_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\int_{t_0}^{t_f} a^2 \mathrm{d}t \Big/ \left(t_{\mathrm{f}} - t_0\right)}。\tag{4}$$

式中：a_{RMS}为减速度均方根值，m/s²；t_0、t_{f}分别为起止时间，s。

1.2.4 达到减速度拐点所需时间

电动汽车滑行能量回收系统从滑行制动初始状态开始时（t_0）减速至减速度达到拐点时（t_{ainfle}）所需时间，其中减速度拐点为减速过程中减速度曲线最大折点，可通过最大减速度变化率时刻辅助判断。此指标表征了系统达到预期制动需求的响应速度。滑行制动过程中各时刻如图1所示，其中达到最大减速度所需时间为$t_{\mathrm{ainfle}}-t_0$。

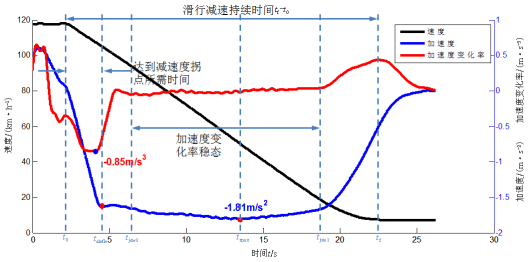

图1 滑行制动过程各时刻分布

1.2.5 减速滑行距离

电动汽车滑行能量回收系统从滑行制动初始状态开始减速时（t_0）至首次达到稳态（蠕行或静止）时（t_{f}）所行驶的距离。此指标表征了电机制动效能的大小，可侧面反映滑行能量回收系统能量转换效率。

1.2.6 减速度变化率稳态占比

电动汽车滑行能量回收系统在滑行制动过程中应尽可能地减小对驾驶员的瞬态冲击，减速度变化率达到稳态的时间越长，说明减速度在单位时间内变化量相等，可降低滑行制动过程中的眩晕感，提高驾驶舒适性。减速度变化率稳态占比数学表达式为：

$$j_{\mathrm{SteadyRation}} = \frac{t_{j\,\mathrm{ste}\,1} - t_{j\,\mathrm{ste}\,0}}{t_{\mathrm{f}} - t_0} \times 100\%。\tag{5}$$

式中：$j_{\mathrm{SteadyRation}}$为减速度变化率稳态占比，无量纲；$t_{j\mathrm{ste0}}$为减速度变化率首次达到稳态的时刻，s；$t_{j\mathrm{ste1}}$为减速度变化率稳态结束时刻，s。

减速度变化率稳态的判别依据为减速度变化率值波动范围±0.05 m /s²，持续时长≥1 s。

1.3 客观指标与主观评分相关性分析

客观指标与主观评分的关联度，将直接影响主观评价预测模型的预测精度[13-14]。本文通过相关性分析法对前文初选的客观指标进行重筛选，提取相关性较高的评价指标。

通过主观判断，初选的若干个客观指标与主观评分间存在非线性关系，如减速强度测试项目中，

最大减速度过大时会降低舒适性，过小时会减弱安全感。所以首先需通过图表相关分析对数据进行可视化处理，大致判断数据间的趋势和联系；再初步判断是线性相关还是曲线相关，如果是曲线相关，则需用线性回归的方式将非线性的变量关系转换成线性的变量关系，再进行线性相关分析。

以某样品车型滑行制动时最大减速度数值与主观评分的相关性分析为例，如图2所示，通过散点图的趋势判断，基本呈现二次函数变化规律，所以需要对非线性模型线性化处理，对样本集进行加权，加入样本最大加速度的平方项，从而将非线性模型转换成线性相关性分析。

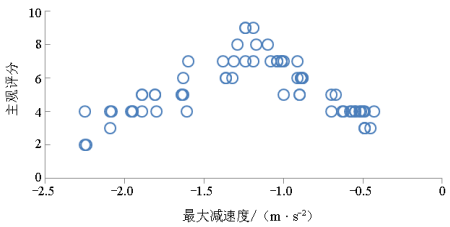

图2 最大减速度与主观评分的分布趋势

线性相关分析将通过主观评分与客观指标的样本数据求得其相关关系，并可依据相关系数的大小筛选出高度相关性的客观指标。设$X_i(i=1,2,\cdots,n)$为客观指标参数，$Y_i(i=1,2,\cdots,n)$为主观评分，线性相关系数的数学表达式为：

$$r(X,Y)=\frac{n\sum_{i=1}^{n}X_iY_i-\sum_{i=1}^{n}X_i\sum_{i=1}^{n}Y_i}{\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}X_i^2-(\sum_{i=1}^{n}X_i)^2}\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}Y_i^2-(\sum_{i=1}^{n}Y_i)^2}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}X_iY_i-n\overline{X}\overline{Y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}X_i^2-n\overline{X}^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2-n\overline{Y}^2}}。\quad(6)$$

式中：$r(X,Y)$为线性相关系数；i为指标样本计数；n为指标样本总数；$\overline{X}$，$\overline{Y}$分别为客观指标参数和主观评分的均值。

$r(X,Y)$相关系数值与相关程度见表2。

客观指标与主观评分相关性分析结果见表3。

2 主观评价预测模型

通过上文相关性分析，筛选出相关系数≥0.8的客观指标作为预测模型的解释变量，结合图表相关分析得出的关系模型，建立主观评价预测模型为：

$$Y=\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_1^2+\beta_5X_2^2+\beta_6X_3^2+\beta_7\ln X_4+\varepsilon。\quad(7)$$

式中：$\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_7$分别是回归参数；$\varepsilon$为扰动项。

将原非线性模型进行线性化，对样本集进行加权，令$X_1'=X_1^2$，$X_2'=X_2^2$，$X_3'=X_3^2$，$X_4'=\ln X_4$，则模型线性化后为：

$$Y=\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_1'+\beta_5X_2'+\beta_6X_3'+\beta_7X_4'+\varepsilon。\quad(8)$$

利用减速滑行测试中符合条件的各解释变量数据进行回归分析，SPSS输出结果见表4～5，分别为模型汇总表及方差分析表。

表2 相关系数与相关程度关系

$r(X,Y)$取值范围	相关程度
0.00～0.19	极低相关
0.20～0.39	低度相关
0.40～0.69	中度相关
0.70～0.89	高度相关
0.90～1.00	极高相关

注：当$r(X,Y)$为正时，变量间存在正相关；$r(X,Y)$为负时，变量间存在负相关。

表3 相关性分析结果

主观评价项目	客观评价指标	图表相关分析	相关系数
减速强度	最大减速度	二次模型	0.836 573
	减速度极差	–	0.325 326
	减速度均方根	二次模型	0.693 705
减速响应	达到减速度拐点所需时间	–	0.353 978
	减速滑行距离	二次模型	0.806 537
减速冲击	最大减速度变化率	二次模型	0.876 534
	减速度变化率极差	–	0.257 544
	减速度变化率均方根	二次模型	0.649 825
	减速度变化率稳态占比	对数模型	0.818 793

注：–表示散点图无明显趋势。

表4 模型汇总

模型	R	R方	调整R方	估计标准误	德宾—瓦特逊检验
1	0.878[a]	0.772	0.753	0.81127	1.330

最终输出回归系数得出预测模型为：

$Y=-4.603X_1-3.442X_2+0.007X_3-1.795X_1'-2.658X_2'-$

表5 方差分析表

	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	195.707	7	27.958	42.479	.000[b]
残差	57.918	88	0.658		
总计	253.625	95			

$$1.06E-5X_3'+0.442X_4'-0.665。\quad (9)$$

3 实车验证

3.1 测试方案

对比7款新能源汽车不同能量回收模式下滑行制动过程中的主观评价与客观指标间的映射关系，其中主观评价被试对象为6名专业测试工程师，能量回收测试工况见表6。

表6 滑行能量回收驾驶性测试工况

车型	动力电池容量/Ah	电机峰值功率/kW	能量回收模式	初始速度/（km·h^{-1}）	场景描述
车型1	250	193/193（前轴/后轴）	低 标准	10～120 km/h（步长10 km/h）	主车在SOC≈60%时，分别以10、20…120 km/h速度稳定行驶，随后驾驶员松开电门，车辆进行能量回收直至稳态（静止或低速恒定）
车型2	145.7	202	低 标准		
车型3	177	135	低 中 高		
车型4	202	196	低 高 舒享 X-pedal		
车型5	110	100/140（前轴/后轴）	舒适 标准		
车型6	135	163	标准 较大		
车型7	192	240/240（前轴/后轴）	极低 低 标准		

3.2 测试结果

以不同被测车型最大能量回收强度模式下的测试为例，4个客观指标的测试结果见表7～10。

通过主观评价预测模型输出结果和实测主观评分进行对比分析，其中主观评分有1 296份样本数据，最大能量回收强度模式时不同初始速度下预测模型结果与实际主观评分平均值的对比，如图3所示。

通过预测模型输出结果曲线与主观评分分布曲

表7 最大能量回收模式下最大减速度实车测试结果

车型 \ 速度/（km·h^{-1}）	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
车型1	−0.44	−1.33	−1.92	−2.10	−2.11	−2.10	−2.12	−2.10	−2.08	−2.09	−2.09	−2.08
车型2	−1.14	−2.24	−2.25	−2.27	−2.25	−2.26	−2.25	−2.25	−2.24	−2.25	−2.24	−2.25
车型3	−0.43	−1.08	−1.21	−1.24	−1.27	−1.28	−1.28	−1.26	−1.28	−1.32	−1.29	−1.31
车型4	−0.06	−0.56	−1.25	−1.57	−1.61	−1.62	−1.62	−1.63	−1.63	−1.63	−1.64	−1.64
车型5	−0.10	−0.58	−0.88	−1.01	−1.10	−1.18	−1.23	−1.23	−1.23	−1.24	−1.24	−1.24
车型6	−0.26	−0.65	−0.82	−0.80	−0.81	−0.85	−0.94	−0.96	−0.90	−1.00	−1.04	−1.01
车型7	−0.39	−1.21	−1.64	−1.71	−1.77	−1.80	−1.82	−1.81	−1.83	−1.80	−1.81	−1.81

表 8　最大能量回收模式下最大减速度变化率实车测试结果

车型 \ 速度/(km·h^{-1})	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
车型 1	−0.31	−0.82	−1.23	−1.32	−1.30	−1.10	−1.26	−1.06	−1.54	−1.21	−1.10	−1.47
车型 2	−0.77	−2.03	−1.12	−1.02	−1.20	−1.03	−1.11	−1.09	−0.99	−1.44	−0.79	−0.83
车型 3	−0.35	−0.65	−0.62	−0.67	−0.69	−0.77	−0.77	−0.74	−0.68	−0.64	−0.66	−0.86
车型 4	−0.07	−0.36	−0.64	−0.81	−0.82	−0.75	−0.80	−0.84	−0.77	−0.74	−0.65	−0.50
车型 5	−0.19	−0.29	−0.65	−1.11	−1.20	−1.21	−1.36	−1.37	−0.80	−0.84	−0.84	−0.87
车型 6	−0.19	−0.36	−0.36	−0.38	−0.38	−0.62	−0.84	−0.63	−0.53	−0.89	−0.57	−0.94
车型 7	−0.28	−0.72	−0.87	−0.85	−0.94	−0.92	−0.93	−0.90	−0.88	−0.90	−0.79	−0.85

表 9　最大能量回收模式下减速滑行距离实车测试结果

车型 \ 速度/(km·h^{-1})	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
车型 1	18.38	30.92	34.61	53.82	78.61	100.82	136.02	180.14	218.73	260.79	358.88	389.27
车型 2	3.46	9.62	18.36	33.00	52.68	69.84	96.42	128.32	159.25	203.24	249.82	332.23
车型 3	11.53	21.77	45.07	56.94	77.59	119.78	149.17	213.72	230.66	304.84	370.88	449.09
车型 4	62.28	33.47	38.66	50.93	78.15	99.43	132.98	168.27	216.71	263.75	324.90	399.84
车型 5	31.83	74.63	121.18	169.48	222.00	394.68	459.48	511.26	579.50	886.85	860.89	1169.23
车型 6	19.20	37.32	57.79	101.22	150.18	211.28	229.21	306.21	397.83	449.34	525.73	644.69
车型 7	13.32	18.57	29.33	47.88	69.43	90.48	120.50	152.94	189.30	237.08	282.34	333.79

表 10　最大能量回收模式下减速度变化率稳态占比实车测试结果

车型 \ 速度/(km·h^{-1})	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
车型 1	1	1	1	11	25	27	50	58	53	63	68	65
车型 2	1	1	1	30	34	50	50	52	57	76	65	78
车型 3	1	16	37	50	58	61	66	67	75	78	80	80
车型 4	1	1	1	2	11	25	45	43	53	57	56	48
车型 5	69	65	55	47	54	51	45	50	40	40	32	35
车型 6	20	31	19	32	46	59	67	56	68	63	61	80
车型 7	1	1	1	10	25	40	55	43	64	67	67	73

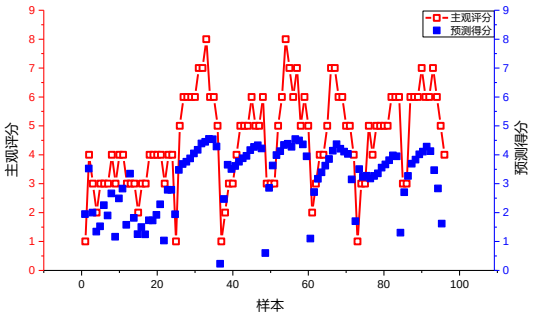

图 3　最大能量回收模式下模型预测结果对比

线的垂直距离作为预测精度，垂直距离越小说明预测精度越高。从整体上看，预测模型结果与实际主观评分的趋势一致，预测精度良好。

4 结论

（1）建立了针对电动汽车滑行制动驾驶性综合评价的客观指标体系。对电动汽车滑行能量回收系统滑行减速特性进行分析并提出特征指标，通过相关系数法筛选出与主观评价结果相关度高的客观评价指标，能够通过量化的客观数据对驾驶性主观评价项进行表征。

（2）基于客观评价指标建立了主观评价预测模型。通过对样本数据的客观指标参数和主观评分结果进行回归分析，确定了各解释变量的回归参数，解释比例77%，模型拟合优度良好，在量化的客观数据和

非量化的主观感受间建立了映射关系，可从人因工程角度为电动汽车滑行能量回收系统减速控制的参数标定和调优提供依据。进一步丰富主客观测试数据库样本量，优化预测模型参数是继续研究的方向。

（3）基于实车测试结果验证预测模型的有效性。通过设计电动汽车滑行制动测试方案，以7台新能源车型共计18种能量回收模式下的客观指标实测数据作为输入量，将6名专业测试工程师的主观评分与预测模型输出结果进行对比，验证了模型的预测精度。

参考文献（References）

[1] 郑建化.电动汽车驾驶性评价及多目标优化控制研究[D].重庆：重庆理工大学，2020.
ZHENG Jianhua. Research on the Evaluation of Drivability and Multi-Objective Optimal Control of Electric Vehicles[D].Chongqing：Chongqing University of Technology，2020.(in Chinese)

[2] 张海峰.新能源汽车驾驶性评价研究[D].天津：河北工业大学，2018.
ZHANG Haifeng. Evaluation Research on the Drivability of New Energy Vehicle [D].Tianjin：Hebei University of Technology，2018.(in Chinese)

[3] 马翔.搭载机电控制CVT纯电动汽车驾驶性研究[D].重庆：重庆理工大学，2017.
MA Xiang. The Study on Drivability of the Electric Vehicle Equipped with Electric-Mechanical Continuously Variable Transmission [D]. Chongqing：Chongqing University of Technology，2017. (in Chinese)

[4] 孙坚.驾驶性评价及其仿真方法研究[D].北京：北京理工大学，2017.
SUN Jian. Research on Driveability Evaluation and Simulation Method [D].Beijing：Beijing Institute of Technology，2017.(in Chinese)

[5] SHIN C W，KIM H. Development of an Evaluation Method for Quantitative Driveability in Heavy-Duty Vehicles [J]. IEEE Journal of Mechanical Science and Technology，2014，28(5)：1615-1621.

[6] JOSEF G，PHILIPPE A，KLAUS M. Improved Comfort Analysis and Drivability Assessment by the Use of an Extended Power Train Model for Automatic Transmissions[C]//SAE Technical Papers，2012-01-1529，2012.

[7] LAKSHMANAN S，PALANIAPPAN A. Methodology for Evaluation of Drivability Attributes in Commercial Vehicle[C]//SAE Technical Papers，2015-01-2767，2015.

[8] HAYAT O，LEBRUN M，DOMINGUES E. Powertrain Driveability Evaluation：Analysis and Simplification of Dynamic Models [C]//SAE Technical Papers，2003-01-1328，2003.

[9] 郑诚.冷基于模糊灰色理论的汽车驾驶性能评价方法[D].兰州：兰州大学，2012.
ZHENG Cheng. The Driving Performance Evaluation Method of Automobile Based on Fuzzy Gray Theory[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2012.(in Chinese)

[10] THORNTON M，JORGENSEN M.Cold-Start and Warm-up Driveability Performance of Hybrid Electric Vehicles Using Oxygenated Fuels [C] //SAE Technical Papers，2003-01-3196，2003.

[11] 何晓引.基于制动舒适性纯电动客车再生制动控制策略的研究[D].长春：吉林大学，2011.
HE Xiaoyin. Study on Control Strategy of Regenerative Braking for Electric Bus Based on Braking Comfort[D]. Changchun：Jilin University，2011.(in Chinese)

[12] 章桐.汽车燃油经济性及动力性与驾驶性客观评价体系[J].同济大学学报(自然科学版)，2015，43(12)：1865-1872.
ZHANG Tong. Objective Evaluation System of Vehicle Fuel Economy，Performance and Drivability[J]. Journal of Tongji University(Natural Science)，2015，43(12)：1865-1872.(in Chinese)

[13] 吴礼军，管欣.汽车整车性能主观评价[M].北京：北京理工大学出版社，2016.
WU Lijun，GUAN Xin. Subjective Evaluation of Vehicle Performance[M].Beijing：Beijing Institute of Technology Press，2016.(in Chinese)

[14] 陈涛.汽车动力学性能主观评价试验的方法和指标权重分析[D].长沙：湖南大学，2009.
CHEN Tao. Method and Index Weight Analysis of Subjective Evaluation Test of Vehicle Dynamic Performance [D].Changsha：Hunan University，2009.(in Chinese)

作者简介

李朝斌（1986-），男，四川武胜人，硕士，工程师，主要研究方向为智能驾驶测试与评价。

Tel：18680752046

E-mail：lichaobin@caeri.com.cn

通信作者

易侃（1991-），男，湖北荆州人，硕士，工程师，主要研究方向为智能驾驶测试与评价。

Tel：13667120108

E-mail：yikan@caeri.com.cn