

DOI: 10.7652/xjtuxb201601007

电动车动力总成噪声品质粒子群-向量机预测模型

方源^{1,2}, 章桐^{1,2,3}, 陈霏霏^{1,2}, 郭荣^{1,2}

(1. 同济大学新能源汽车工程中心, 201804, 上海; 2. 同济大学汽车学院, 201804, 上海;
3. 同济大学中德学院, 201804, 上海)

摘要: 为了实现电动车动力总成噪声品质的预测,以某集中驱动式电动车为例,在考虑动力总成辐射噪声品质频域特性和已设立的敏感频带能量比这一客观评价参数的基础上进行了心理声学参数,即响度、尖锐度、粗糙度、抖动度、语音清晰度等与主观评价的相关性分析,由此建立了电动车动力总成噪声品质粒子群支持向量机预测模型,内容涉及采用支持向量机建立噪声品质预测模型、利用粒子群优化算法对向量基惩罚因子及核函数参数进行优化,最后验证了敏感频带能量比评价参数的有效性。研究表明:敏感频带能量比与主观评价相关度达到 0.946,可以较好地反映主观感受;基于粒子群支持向量机的噪声品质预测模型的平均相对误差和最大相对误差分别为 2.0% 和 6.7%,表明以敏感频带能量比作为输入特征的粒子群优化支持向量机模型,在电动车动力总成噪声品质的预测精度上优于基于遗传算法优化及网格搜索优化的预测模型。

关键词: 电动车动力总成;噪声品质;粒子群优化;支持向量机;敏感频带能量比

中图分类号: U463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0041-06

Sound Quality Prediction of Electric Power Train Noise Based on Particle Swarm Optimization and Support Vector Machine

FANG Yuan^{1,2}, ZHANG Tong^{1,2,3}, CHEN Feifei^{1,2}, GUO Rong^{1,2}

(1. New Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An electric power train is taken as a sample to predict its radiation noise quality. Studying frequency characteristics of sound quality and sensitive frequency-band energy ratio, a correlation analysis is conducted between subject evaluation and psychoacoustics parameters including loudness, sharpness, roughness, fluctuation and articulation index. Then a predicting model of sound quality of electric powertrain is established based on particle swarm optimization (PSO) and support vector machine (SVM). After optimizing the penalty factor of SVM and parameters of kernel function by PSO, the effectiveness of R is confirmed. The results indicate that subjective feeling can be reflected by sensitive frequency band energy ratio with correlation coefficient being 0.946. The absolute value and maximum value of the relative error are 2.0% and 6.7% respectively, which shows that the prediction accuracy of PSO-SVM is superior to those of the genetic algorithm method and grid search method.

收稿日期: 2015-05-30。 作者简介: 方源(1989—),男,博士生;章桐(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(20U11AA11A265);国家自然科学基金资助项目(51205290);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(1700219118)。

网络出版时间: 2015-10-23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151023.1109.016.html>

Keywords: electric powertrain; sound quality; particle swarm optimization; support vector machines; sensitive frequency-band energy ratio

大量的声学研究发现,A计权声压级不能完全反映人对噪声的主观感受。在这种情况下,噪声品质这个现代噪声研究的全新概念应运而生,它指出人对噪声的感觉是受心理和生理因素的共同影响。

噪声品质的准确预测是对产品声学优化设计的重要前提。噪声品质预测研究包括车内噪声^[1-2]、柴油机噪声^[3-6]、齿轮声^[7]、喇叭声^[8]、关门声^[9]和胎噪^[10]等。电动车的出现引发了一些新的噪声问题:动力总成的改变使噪声源发生了变化,由此带来了高阶次噪声;内燃机掩蔽效应的消失使得原来不被注意的声音变得突兀。许雪莹通过主观评价研究认为,电动车的内部噪声评价方法不能简单地用传统的A计权和频谱,而是要结合心理声学的评价方法,才能较为全面地进行评价^[11]。Okoshi发现,声品质心理声学参数更适用于分析电动车噪声特性,而且电动车的声场分布极不均匀^[12]。目前对于电动车噪声品质的研究还停留在试验阶段^[11-13],鲜有文献基于电动车存在的噪声频域特性和人类听觉系统对电动车主要噪声源之一的动力总成的噪声品质进行预测模型研究。

本文研究了主观感受及电动车动力总成辐射噪声的心理声学特征,通过相关分析找出电动车噪声品质主观评价的主要心理声学参数,同时建立了支持向量机的动力总成噪声主、客观预测模型,利用粒子群优化算法对向量机模型参数进行了优化。通过分析有、无敏感频带能量比参数下噪声品质模型的预测精度,验证了作为电动车动力总成噪声品质客观评价参数的敏感频带能量比的有效性。

1 电动车噪声高频特性

人耳和大脑如何感知并处理声音是心理声学的研究范畴。心理声学客观评价参数可以定量地反映人对噪声某一特征的主观感受^[5],包括响度、尖锐度、粗糙度、抖动度、语音清晰度等。

人对噪声的主观感受不仅与声压有关,还与频域特征有关。电动车的声压级普遍低于传统车,没有了发动机噪声的掩蔽作用,很多原本并不显著的噪音,且多为高频噪声越加显著,而高频噪声特别容易引起驾、乘者焦躁^[14]。

考虑电动车噪声品质频谱特性,建立了敏感频带能量比噪声品质客观评价参数,同时以与主观评

价相关性大于0.7的频带作为敏感频带,详细内容见文献^[15]。敏感频带能量比

$$R = \sum_{m=1}^j P(E_{km}) = \frac{E_{k1} + E_{k2} + \cdots + E_{kj}}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (1)$$

式中: E_{km} 为敏感频率带上的能量; E_i 为频带能量, $i=1,2,\dots,30$ 为频带编号。

2 噪声品质主、客观评价

2.1 样本采集及处理

在半消声室内,采用声学人工头进行电动车动力总成噪声的采集试验,采样频率为44 kHz,并通过电脑实时记录试验工况。选取26个不同工况下的电动车动力总成噪声样本作为主观评价样本,且在软件Artemis中截取所选声样本,用于主观评价的样本信号长度为5 s。

2.2 主观评价

在背景噪声达标的听审室内,采用专业声卡和高保真耳机对电动车动力总成辐射噪声进行了主观评价试验。试验中将等级评分法和语义细分法相结合,评价者对听到的噪声样本的焦躁程度进行打分,分值为1~10表示从悦耳到极度焦躁的变化。试验选取了21名评价者,其中男性15名、女性6名,均为车辆工程专业的研究生。试验前对评价者进行了声品质基础知识和试验内容的相关培训,以确保主观评价的正确性。使用软件Artemis计算各噪声样本的心理声学客观评价参数值,通过Matlab编程计算了敏感频带能量比,部分结果如表1所示。

2.3 相关性分析

相关系数可以反映两个变量之间关系的密切程度,计算式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)^{1/2}}$$

式中: X_i, Y_i 为变量; $\bar{X}, \bar{Y}$ 为变量的平均值。经过筛选和检验数据的有效性后,本文采用统计学软件SPSS对噪声品质主观评价得分值与客观评价参数值进行了相关性分析,结果见表2。从表2可以看出,与响度、尖锐度、粗糙度、抖动度等心理声学参数相比,敏感频带能量比与主观评价值的相关性更高,其相关系数达到0.946,表明敏感频带能量比对主观

表 1 噪声样本主、客观评价结果

样本编号	响度/sone	尖锐度/acum	粗糙度/asper	抖动度/vacil	语音清晰度/%	敏感频带能量比/%	主观评价值
1	26.05	2.93	2.60	0.012 00	0.343 5	0.264 6	6.2
2	36.10	3.16	3.22	0.014 35	0.168 0	0.362 6	8.8
3	29.70	3.05	2.91	0.015 10	0.267 5	0.294 9	7.3
4	32.80	3.12	3.11	0.016 80	0.223 5	0.350 6	8.4
5	24.05	2.85	2.38	0.013 65	0.399 0	0.198 6	3.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	22.40	2.81	2.23	0.010 65	0.432 0	0.220 4	4.7
23	36.60	3.20	3.31	0.016 50	0.165 0	0.404 3	9.2
24	23.40	2.86	2.37	0.014 40	0.413 0	0.234 9	5.3
25	25.90	2.94	2.60	0.013 80	0.347 5	0.264 5	6.4
26	29.90	3.04	2.86	0.013 70	0.263 5	0.267 9	6.7

评价的影响很大,可以较好地反映声样本的主观焦躁程度。因为敏感频带能量比充分考虑了人耳听觉特性和电动车动力总成噪声的特殊性,并以各频带内能量比与主观感受的相关性作为依据,因此敏感频带能量比作为评价电动车动力总成的噪声品质的参数优于其他心理声学参数。

表 2 噪声品质与客观参数的相关性

参数	<i>r</i>	参数	<i>r</i>
响度	0.734	抖动度	0.418
尖锐度	0.838	粗糙度	0.751
语音清晰度	-0.742	敏感频带能量比	0.946

3 粒子群-向量机预测模型

3.1 向量机基本原理

设训练样本集 $T=\{x_i,y_i\}$,其中 $x_i\in R^n,y_i\in R^n$,通过非线性映射可将数据 X 映射到高维特征空间 F 中,并构造最优决策函数

$f(x)=w\phi(x)+b,\quad \phi:R^n\rightarrow F,\quad w\in F\quad (2)$

基于结构风险最小化准则,引入松弛因子 ξ 和 ξ^* ,将式(2)转化为如下优化问题^[16]

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^l (\xi + \xi^*) \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} y_i - w\phi(x) - b \leq \epsilon + \xi \\ w\phi(x) - b - y_i \leq \epsilon + \xi^* \\ \xi, \xi^* \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得优化问题的对偶问题,即

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (a_i - a_i^*)(a_j - a_j^*)(\phi(x_i) \cdot$$

$$\phi(x_j)) + \sum_{j=1}^l [a_i(\epsilon - y_i) + a_i^*(\epsilon - y_i)] \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) = 0 \\ a_i, a_i^* \in [0, c] \end{cases} \quad (6)$$

通过二次规划算法可得支持向量机回归预测模型

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) K(x_i, x) + b \quad (7)$$

式中: $K(x_i, x)=\phi(x_i)\phi(x)$ 为核函数。

本文采用了径向基核函数

$$K(x_i, x) = \exp(-g \|x_i - x\|^2)$$

3.2 粒子群优化

在寻优过程中,粒子通过每次的迭代得到 2 个最优解后进行自我更新,一个是个体最优解 S_{pbest} ,另一个是全局最优解 S_{gbest} 。粒子的迭代式为^[17]

$$\begin{aligned} v_{id}^k &= w_i v_{id}^{k-1} + c_1 \gamma_1 (S_{\text{pbest}i}^{k-1} - x_{id}^{k-1}) + \\ &\quad c_2 \gamma_2 (S_{\text{gbest}i}^{k-1} - x_{id}^{k-1}) \\ x_{id}^k &= x_{id}^{k-1} + v_{id}^{k-1} \end{aligned}$$

式中: v_{id}^k 为第 k 次迭代时第 i 个粒子移动速度; x_{id}^k 为第 k 次迭代时第 i 个粒子的空间位置; w_i, c_1, c_2 为权重系数; γ_1, γ_2 为随机数。

粒子群中每个粒子都对应着支持向量机的惩罚因子 C 和核函数参数 G ,以每个粒子学习预测的错误率作为该粒子的适应值,并根据当前的局部最优解和全局最优解判断算法是否停止迭代。

3.3 噪声品质粒子群-向量机模型预测

支持向量机预测模型以表 1 所示的噪声样本的心理声学客观评价参数作为输入,将 26 组噪声样本集分为训练组和测试组,其中 1~20 组作为训练组

样本,用于估计 C 、 G ,21~26 组作为测试组样本,用于预测噪声品质的主观评价价值。粒子群优化适应度是优化结果的评价标准,图 1 为 $c_1=1.5$ 、 $c_2=1.7$ 时不同迭代次数下的适应度值。优化后的 C 、 G 最优取值分别为 9.62 和 0.98。

图 2 为预测模型对电动车动力总成前 20 组噪声样本主观评价值的拟合曲线。数据拟合的最小相对误差为 0.003,最大相对误差为 0.286,表明该模型具有较好的拟合能力。

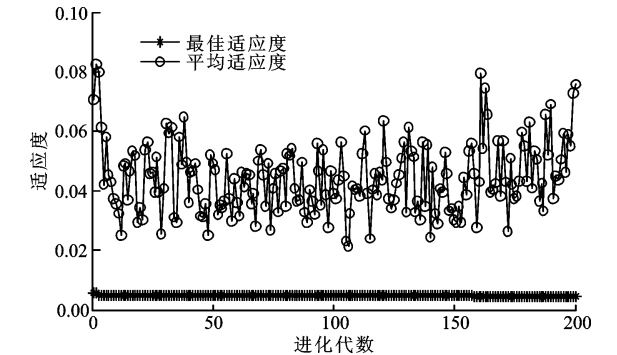


图 1 $c_1=1.5$ 、 $c_2=1.7$ 时不同迭代次数下的适应度曲线

3.4 预测结果分析

噪声品质预测值的相对误差是预测准确性的综合评价指标,其计算式为

$$e = \frac{|Q - Q'|}{Q}$$

表 3 测试样本的预测结果

实测值	GS-SVM		GA-SVM		PSO-SVM	
	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
6.5	5.977	8.0	6.223	4.3	6.507	0.1
4.7	4.314	8.2	4.301	8.5	4.387	6.7
9.2	9.170	0.3	9.198	0.0	9.172	0.3
5.3	4.883	7.9	5.093	4.0	5.284	0.3
6.4	6.305	1.5	6.484	1.3	6.602	3.2
6.7	6.676	3.6	6.785	1.3	6.774	1.1
最大值		8.2		8.5		6.7
平均值		4.9		3.2		2.0

3.5 敏感频带能量比的影响

为了进一步验证敏感频带能量比作为客观评价参数对噪声品质预测的有效性,对模型输入参数中有、无敏感频带能量比的主观评价价值进行了分析,以获取它们对噪声品质模型预测结果的影响。从图 3 及表 4 中可以看出,相对有敏感频带能量比的模型,无敏感频带能量比模型(NS-PSO-SVM)的预测结果平均相对误差为 9.4%,最大相对误差为 17.8%,均方差为 0.010,可见该预测模型的精度降低明显,

式中: Q 为实际噪声品质主观评价价值; Q' 为估计得到的噪声品质主观评价价值。

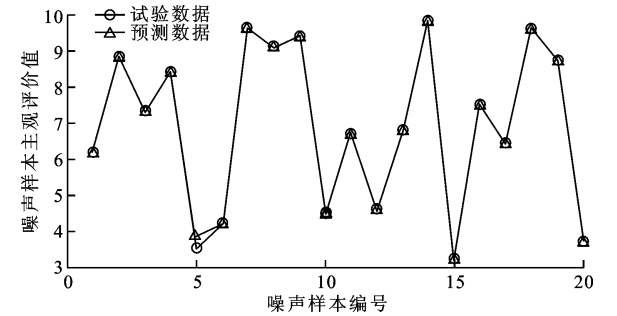


图 2 预测模型对电动车动力总成前 20 组噪声样本主观评价的拟合曲线

本文对基于粒子群优化算法的支持向量机回归模型(PSO-SVM)、基于网格搜索法模型(GS-SVM)和基于遗传算法优化的支持向量机回归模型(GA-SVM)的准确性进行了比较,各模型对电动车动力总成噪声品质的主观评价预测值见表 3。由表 3 可以看出,各模型估计误差都在 10% 以下,其中 PSO-SVM 模型的预测精度最优,平均相对误差和最大相对误差分别为 2.0% 和 6.7%,表明该模型具有较强的泛化能力。对比各模型的预测结果发现,采用粒子群进行参数寻优后所建立的模型,其预测能力明显优于基于传统网格搜索法和遗传算法的优化模型。

表 4 2 种噪声品质模型预测误差

模型	平均相对误差/%	最大相对误差/%	均方差
PSO-SVM	2.0	6.7	0.004
NS-PSO-SVM	9.4	17.8	0.010

表明敏感频带能量比在电动车动力总成噪声品质客观评价方面是有效的。

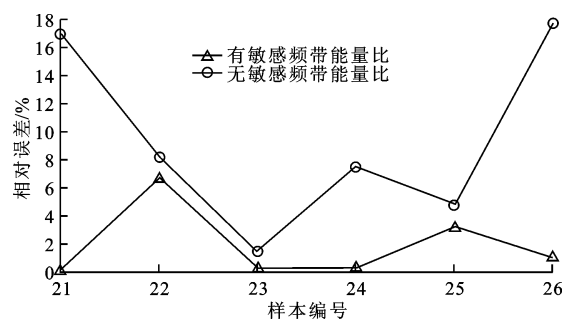


图 3 有、无敏感频带能量比的噪声品质模型预测结果对比

4 结 论

(1)针对电动车动力总成辐射噪声进行了噪声客观心理参数与主观偏好性间的相关性分析,发现敏感频带能量比的相关系数达到了 0.946,优于其他的心理声学参数,说明敏感频带能量比在一定程度上可以较好地反映电动车动力总成噪声品质。

(2)基于支持向量机建立了噪声品质预测模型,利用粒子群优化算法对向量基惩罚因子及核函数参数进行了优化。该模型的预测结果的平均相对误差和最大相对误差分别为 2.0%和 6.7%,预测精度优于基于遗传算法及网格搜索法优化的支持向量机预测模型。

(3)通过对比模型输入参数中有、无敏感频带能量比的预测结果发现,无敏感频带能量比的平均相对误差为 9.4%,最大相对误差为 17.8%,均方差为 0.010,说明敏感频带能量比可以表征电动车动力总成的噪声品质。

参考文献:

[1] 申秀敏,左曙光,韩乐,等. 基于支持向量机的车内噪声声品质预测 [J]. 振动、测试与诊断, 2011(1): 55-58.
SHEN Xiumin, ZUO Shuguang, HAN Le, et al. Interior vehicle noise quality prediction using support vector machines [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011(1): 55-58.

[2] 高印寒,唐荣江,梁杰,等. 基于径向基函数神经网络的车内噪声品质评价系统 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(6): 1378-1383.
GAO Yinhan, TANG Rongjiang, LIANG Jie, et al. Vehicle interior noise sound quality evaluation system based on RBF neural network [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(6): 1378-1383.

[3] 孟祥德,张俊红,李立顺,等. 基于回归分析的车用柴油机声品质预测技术 [J]. 内燃机学报, 2011, 29(6): 534-537.
MENG Xiangde, ZHANG Junhong, LI Lishun, et al. Sound quality prediction of diesel engine noise based on regression analysis [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(6): 534-537.

[4] 刘海,张俊红,张桂昌,等. 车用柴油机噪声品质预测模型的建立 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 159-164.
LIU Hai, ZHANG Junhong, ZHANG Guichang, et al. Prediction model for diesel engine noise quality [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 159-164.

[5] 刘海,张俊红,倪广健,等. 基于遗传支持向量机的柴油机辐射噪声品质预测技术 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 111-114.
LIU Hai, ZHANG Junhong, NI Guangjian, et al. Sound quality prediction of diesel engine noise based on genetic algorithm and support vector machine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(2): 111-114.

[6] SASAKI M, NAKASHIMA K. Human auditory models and sound quality evaluation method for diesel noise, SAE 2007-01-2219 [R]. New York, USA: SAE, 2007.

[7] HUALLPA B, MARANO J, SCZIBOR V, et al. Gear lever sound quality evaluation, SAE 2010-36-0369 [R]. New York, USA: SAE, 2010.

[8] 徐中明,张芳,周小林,等. 汽车喇叭声品质主观评价与分析 [J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 188-192.
XU Zhongming, ZHANG Fang, ZHOU Xiaolin, et al. Subjective evaluation and analysis on car horn sound quality [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2): 188-192.

[9] 王长山,张立军. 汽车关门声声品质评价方法的研究 [J]. 汽车工程, 2011, 33(10): 902-906.
WANG Changshan, ZHANG Lijun. A study on the method of evaluating the sound quality of vehicle door closing noise [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(10): 902-906.

[10] 王万英,彭为,靳晓雄,等. 由轮胎引起的车内噪声品质分析 [J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 267-270.
WANG Wanying, PENG Wei, JIN Xiaoxiong, et al. Sound quality analysis on in-car noise induced by tire [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(3): 267-270.

[11] 许雪莹,韩国华,吴瑛,等. 电动汽车的噪声特点及评价方法 [J]. 汽车工程学报, 2011, 1(z1): 17-20.

- XU Xueying, HAN Guohua, WU Ying, et al. Sound character and evaluation method of electric vehicle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1 (z1): 17-20.
- [12] OKOSHI M, HASHIMOTO Y, SUZUKI M, et al. Test equipment maker's cooperative approach to the measurement next generation automobiles: comparison of noise and vibration characteristics between ice vehicle and EV, SAE 2011-39-7202 [R]. New York, USA: SAE, 2011.
- [13] FANG Y, ZHANG T. Modeling and analysis of electric powertrain NVH under multi-source dynamic excitation, SAE 2014-01-2870 [R]. New York, USA: SAE, 2014.
- [14] HUSSAIN M, GOLLES J, RONACHE A, et al. Statistical evaluation of an annoyance index for engine noise recordings [C]//SAE Noise and Vibration Conference and Exhibition. New York, USA: SAE, 1991: 911080.
- [15] 方源, 章桐, 陈霏霏, 等. 电动车噪声品质心理声学主客观评价模型 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49 (8): 97-101.
- FANG Yuan, ZHANG Tong, CHEN Feifei, et al. A subjective and objective evaluation model for psychoacoustical quality of electric vehicle noise [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 97-101.
- [16] 彭令, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 基于核主成分分析和粒子群优化支持向量机的滑坡位移预测 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(2): 148-152.
- PENG Ling, NIU Ruiqing, ZHAO Yannan, et al. Prediction of landslide displacement based on KPCA and PSO-SVR [J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science Edition, 2013, 38 (2): 148-152.
- [17] 徐中明, 谢耀仪, 贺岩松, 等. 基于粒子群-向量机的汽车加速噪声评价 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(2): 25-29.
- XU Zhongming, XIE Yaoyi, HE Yansong, et al. Evaluation of car interior sound quality based on PSO-SVM [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (2): 25-29.
- 价模型. 2015, 49(8): 97-101. [doi: 10. 7652/xjtuxb201508016]
- 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 采用模拟退火算法的电动汽车复合电源能量管理系统优化. 2015, 49(8): 90-96. [doi: 10. 7652/xjtuxb201508015]
- 杨晴霞, 曹秉刚, 徐俊, 等. 一种估计锂电池充电状态的分数阶阻抗模型. 2015, 49(8): 128-132. [doi: 10. 7652/xjtuxb201508021]
- 高建平, 葛坚, 赵金宝, 等. 复合电源系统功率分配策略研究. 2015, 49(7): 17-24. [doi: 10. 7652/xjtuxb201507004]
- 赵立军, 张艳芬, 刘清河. 纯电动商用车机械式自动变速器综合换挡策略. 2015, 49(6): 46-52. [doi: 10. 7652/xjtuxb201506008]
- 袁希文, 文桂林, 周兵. 考虑侧向稳定性的分布式电驱动汽车制动滑移率控制. 2015, 49(5): 43-48. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505007]
- 许建, 张政, 李翔, 等. 独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法. 2014, 48(7): 83-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201407015]
- 刘瑞玲, 钟德星, 韩九强. 汽车伞齿轮多目视觉检测系统与算法. 2014, 48(4): 1-7. [doi: 10. 7652/xjtuxb201404001]
- 史文库, 毛阳, 姜雪, 等. 发动机半主动液压悬架的动态特性及参数影响分析. 2014, 48(1): 42-47. [doi: 10. 7652/xjtuxb201401008]
- 盛新堂, 黄瑾, 王小荣, 等. 自然吸气二甲醚发动机排气再循环 NO_x 满足国 IV、V 排放标准的研究. 2013, 47(7): 18-22. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307004]
- 续丹, 王国栋, 曹秉刚, 等. 独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究. 2012, 46(3): 42-46. [doi: 10. 7652/xjtuxb201203008]
- 赵彤航, 卢炳武, 姜文君, 等. 轿车车内噪声品质偏好性评价方法的研究. 2012, 46(5): 127-131. [doi: 10. 7652/xjtuxb201205022]
- 陆良, 杨殿阁, 顾铮珉, 等. 采用模块化思想的汽车电器智能化设计方法. 2010, 44(5): 111-115. [doi: 10. 7652/xjtuxb201005023]
- 许鹏, 曹秉刚, 曹建波, 等. 两轮独立驱动电动车的转矩协调控制. 2009, 43(7): 53-57. [doi: 10. 7652/xjtuxb200907012]
- 曹秉刚, 曹建波, 李军伟, 等. 超级电容在电动车中的应用研究. 2008, 42(11): 1317-1322. [doi: 10. 7652/xjtuxb200811001]
- 郭金钢, 王军平, 曹秉刚. 电动车最大化能量回收制动力分配策略研究. 2008, 42(5): 607-611. [doi: 10. 7652/xjtuxb200805021]

[本刊相关文献链接]

方源, 章桐, 陈霏霏, 等. 电动车噪声品质心理声学主客观评

(编辑 苗凌)