

文章编号 1004-924X(2013)02-0462-07

# 汽车声品质的 GA-BP 神经网络预测与权重分析

高印寒<sup>1</sup>, 唐荣江<sup>2</sup>, 梁杰<sup>1\*</sup>, 赵彤航<sup>3</sup>, 张澧桐<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061; 3. 中国第一汽车股份有限公司技术中心, 吉林 长春 130062)

**摘要:**为了高效而准确地评价与控制车内噪声品质,以 B 级车稳态工况下副驾位置的车内噪声为研究对象,采用等级评分法对采集到的声音样本进行了主观评价试验,同时计算了 7 个客观参数。以客观参量为输入,声品质主观结果为输出,引入基于遗传算法的 BP 神经网络建立了声品质预测模型。实验显示该模型输出结果与实际评分的相关系数达到 0.928,检验组的预测最大误差为 $\pm 8\%$ 。以所建模型的连接权值,分析了客观参数对主观评价结果的贡献度,并以影响系数较大的参数为输入重新构建了预测模型。研究结果表明:稳态工况下,车内声品质主要受响度、粗糙度和尖锐度的影响,其预测模型可由这 3 个参数来描述。

**关键词:**车内噪声;声品质预测;GA-BP 神经网络;权重分析

**中图分类号:**U467.4:TP183 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0462

## Sound quality prediction and weight analysis of vehicles based on GA-BP neural network

GAO Yin-han<sup>1</sup>, TANG Rong-jiang<sup>2</sup>, LIANG Jie<sup>1\*</sup>, ZHAO Tong-hang<sup>3</sup>, ZHANG Li-tong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;  
2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China;  
3. R&D Center, FAW Group Corporation, Changchun 130062, China)

\* Corresponding author, E-mail: liangjie1965@yahoo.com.cn

**Abstract:** This paper carried out a subjective evaluation test with magnitude estimation for 78 noise samples to evaluate the sound quality of vehicles. In the test, six types of B-Class vehicles were taken as the study objects and sound signals collected in co-driver locations at steady states as experimental samples. Meanwhile, seven objective parameters were calculated to describe the sound characteristics. By using objective parameters as inputs, subjective values as outputs, a GA-BP neural network was adopted to establish a sound quality prediction model. Experiments show that the model gives good predictions of high correlation (0.928) and low error ( $\pm 8\%$ ). Then, the network connection coefficients were used to calculate the impact weight of objective parameters on the results of subjective evaluation, and a new model with main parameters was established. As expected, the loudness, sharpness and roughness with a total relative importance of 83% are the most influential parameters in vehi-

收稿日期:2012-08-30;修订日期:2012-09-11.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20100361, No. 20126007)

cle interior sound quality.

**Key words:** vehicle interior noise; sound quality prediction; GA-BP neural network; weight analysis

## 1 引言

车内噪声特性是衡量现代汽车的重要性能指标之一,是人们评价和选购汽车的重要因素。传统的 A 计权声级方法已不能适应工程需要和消费者的需求。声品质是在满足人和环境的要求下,评价主体的人对车内噪声的主观感受,它全面反映了乘客对车内声音的总体感受<sup>[1]</sup>。以心理声学客观参数为基础,建立可以客观衡量声品质的评价预测模型,对于现代汽车噪声的评价、分析与控制都具有重要意义。

目前,对汽车声品质的研究主要采用多元线性回归模型及 BP 神经网络<sup>[2-5]</sup>。多元线性回归算法简单直观,但忽略了人耳对声音的非线性感觉,预测精度达不到理想效果。BP 神经网络具有良好的非线性映射能力,但存在初始连接权值随机性强、收敛速度慢等缺点。此外,神经网络汽车声品质的研究还局限于进行评价预测,没有进一步分析客观参量对主观评价结果的影响,无法为声品质的分析与控制提供理论指导。

本文在借鉴国内外研究的基础上,针对稳态工况下 B 级车车内噪声,采用等级评分法进行了主观评价和客观分析,提出了基于遗传算法(Genetic algorithm,GA)的 BP 神经网络的声品质预测模型,并与 BP 网络的结果进行了对比分析。最后通过神经网络输入与输出之间的权重算法,计算出了声品质客观评价参量对主观评价结果的贡献度。结果表明,稳态工况下,B 级车声品质主要受响度、粗糙度和尖锐度 3 个客观评价参量的影响。

## 2 车内噪声主观评价试验

### 2.1 数据采集

选用市场上具有代表性的 6 款 B 级轿车,变速器置最高档,人工头布置在副驾驶位置,车内噪声测量的测点距座椅纵中心线 200 mm,距座位

表面垂直高度 700 mm,布置如图 1 所示。记录不同车速下稳态工况时车内的噪声样本,记录时间大于等于 30 s。通过筛选、分段截取后,得到共计 78 个长度为 5 s 的样本信号,并对样本做等响处理。



图 1 车内人工头布置

Fig.1 Arrangement of artificial head

### 2.2 主观评价试验

采用等级评分法对车内噪声样本进行主观评价打分,按照国际标准将声品质值分为 11 个等级<sup>[5]</sup>,如表 1 所示。

表 1 声品质主观评价等级刻度表

Tab.1 Subjective evaluation metric of sound quality

非常坏	坏	很差	差	不满意	可接受	满意	较好	好	很好	极好
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

评审团共选取 32 名评价人员,由具有一定噪声经验的司机、声学专家和工程师组成,其中男女分别为 22 人和 10 人,年龄在 26~50 岁之间。

为保证数据的有效性,对评价结果进行数据检验。剔除 6 个与其他人相关系数较低的评价结果后,进行 K-均值聚类分析。聚类分析结果如表 2 所示,第一类 4 例,第 2 类 20 例,缺失 2 例。第一类的评价者人数太少,不能代表大多数评价者的结果,因此选择第二类的 20 名评价者的评分结果计算样本的声品质主观评价等级分值。

表 2 聚类分析结果

Tab. 2 Results of cluster analysis

Cluster		Valid	Missing
1	2		
4.000	20.000	24.000	2.000

## 2.3 客观参数计算

心理声学参数综合考虑了人体心理反应机制和声学感知特性,反映了不同声音信号造成的主观感受差异。参考现有客观心理声学参数的特征及其适用性<sup>[2]</sup>,选择响度、尖锐度、粗糙度、抖动度、AI指数和音调度值,同时考虑A计权声级,这7个参数基本能表征噪声样本的心理学特性。

## 3 基于遗传算法的BP神经网络

### 3.1 BP神经网络

BP神经网络采用基于梯度下降和误差方向传播的学习方法,其目标是使网络输出与训练样本的均方误差最小,具有自学习和推广概括的能力,特别适用于求解内部机制复杂的问题,是目前较为成熟且应用最为广泛的人工神经网络。但BP网络存在易陷入局部极值,初始权值和阈值随机,稳定性差,收敛缓慢甚至是不能收敛等缺点<sup>[6-8]</sup>,为此许多学者将智能算法加入BP网络中,以达到优化的目的。

### 3.2 基于遗传算法的BP网络

遗传算法(GA)采用选择(selection)、交叉(crossover)、突变(mutation)3个主要算子对群体进行操作,算子交换个体间的信息,群体中的个体一代一代地得以优化,并逐步逼近最优解<sup>[8,10]</sup>。初始权值由遗传算法给出的GA-BP算法是一种改进的BP算法,它应用GA算法的全局搜索能力找到网络的初始次优解所对应的权值,然后把这个权值作为网络初始权值,再利用BP算法训练网络以获得最优解<sup>[8-10]</sup>,算法流程如图2所示。它可以很好地避免网络陷入局部极小,提高收敛速度,并使得网络摆脱了对初始值的依赖。

由于人对声音的听觉感受是一个复杂的心理过程,其主观评价与客观参量之间存在复杂的非线性关系,且具有很强的随机性。本文提出采用GA-BP网络来建立汽车声品质评价预测模型。

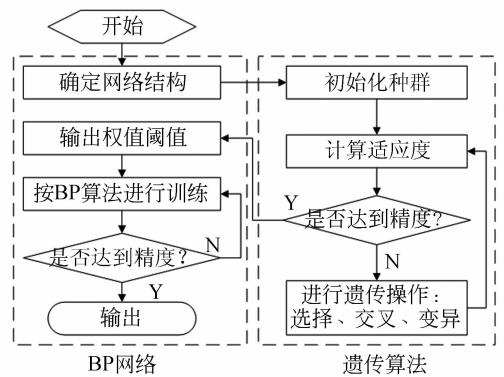


图 2 GA-BP网络算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart of GA-BP neural network

## 4 声品质GA-BP预测模型

选择车内噪声的声品质主观评价作为网络输出,7个表征噪声心理学特性的客观参数作为网络输入,采用GA-BP网络来实现噪声客观参数到主观声品质之间的映射,从而建立汽车声品质的预测模型。网络的训练样本选择为采集到的78个稳态噪声信号,每个信号都包含计算得到客观心理学参数和通过主观评价试验获得的评分值。样本集涵盖了6款B级车在不同车速下的车内稳态噪声,具有很强的代表意义。模型的建立需要具体解决网络结构、训练参数以及GA算法优化几个问题。

### 4.1 网络结构的确定

理论表明,一个S型隐含层加上一个线性输出层的3层BP网络,能够逼近任何函数<sup>[9]</sup>,因此本文选用一个3层神经网络来构建声品质的评价模型。输入层为7个客观参量,节点数为7;输出

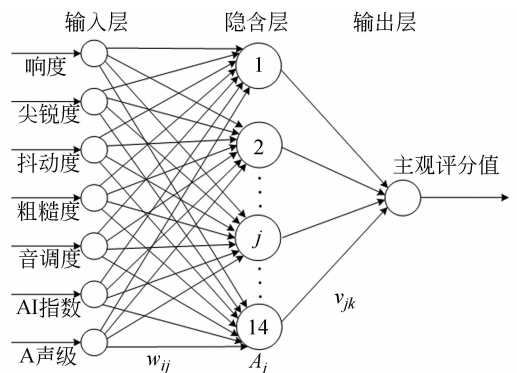


图 3 建立的神经网络结构

Fig. 3 Structure of neural network

层为主观声品质值,节点数为 1。结合隐含层选择规律,并通过试验,选定隐含层节点数为 14。最终构建的网络拓扑结构为 7-14-1,如图 3 所示。网络隐含层采用 logsig 函数,输出层采用 purlin 线性函数。

### 4.2 训练参数的设定

具体训练参数的设定对神经网络至关重要,其直接影响网络的性能。经过反复试验,期望误差设定为 0.000 3,学习速率为 0.3,附加动量因子为 0.5,训练次数设定为 5 000 次。

### 4.3 GA 算法优化

在正式训练网络之前,引入 GA 算法对 BP 网络的初始权值和阈值进行优化,设定群体规模为 50,遗传代数为 150,变异概率为 0.05。本文采用实数编码方式对权值和阈值进行编码,利用 Matlab 的 GA 工具箱进行求解,获得个体最优解后,作为 BP 网络的初始权值和阈值。

### 4.4 模型训练及检验

对建立的声品质 GA-BP 网络预测模型进行检验,并与同结构参数的 BP 网络模型对比,分析 2 种模型的收敛性能和预测精度。选用 1~70 号样本做为训练,71~78 号样本用于检验。训练前所有数据按式(1)归一化处理,保证所有数据在 0~1。

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

式中: $x_i$  和  $x_i'$  分别为归一化处理前、后的值; $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为数据变化范围的最小值和最大值;

图 4 为 GA-BP 网络与 BP 网络的训练误差曲线。可以看出:GA-BP 网络在训练 1 202 步后达到设定目标误差,远低于 BP 网络的 3 913 步,收敛速度提高 3 倍多。图 5 为 GA-BP 网络模型的输出值与实际评分值之间的相关性散点图,其相关系数达到 0.928,说明模型能很好地实现客

观参数到主观声品质的映射。

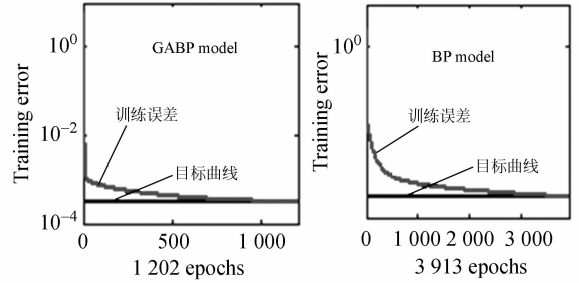


图 4 两种模型的训练误差性能曲线

Fig. 4 Training error curves of two models

表 3 为检验样本在 2 种模型下的预测值与实际评分值的误差统计。可以看出:GA-BP 模型预测最大误差为 8% 之间,比 BP 模型的 11% 低 3%;平均误差为 5.42%,比 BP 模型的 8.71% 低了 3.29%。这说明了建立的声品质 GA-BP 预测模型要优于 BP 神经网络方法,能准确地对车内噪声进行评价预测。应用该模型,只需计算噪声的客观参数,就可预测得到主观声品质值,省去了繁琐的主观评价试验,为汽车声品质的评价分析提供了一个高效便捷的工具。

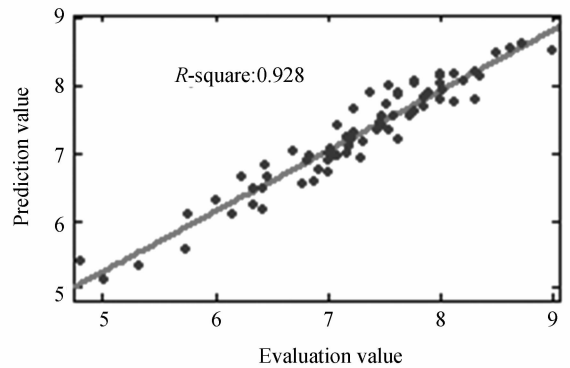


图 5 模型预测值与实际评分值相关性图

Fig. 5 Correlation between the output of prediction model and subjective result

表 3 两种模型的预测误差

Tab. 3 Results of two predict models

模型	各样本百分比误差(%)								平均误差(%)
	71	72	73	74	75	76	77	78	
BP	8.65	-8.41	-7.62	-8.08	-9.83	-9.36	10.57	7.23	8.71
GA-BP	5.70	3.64	-6.56	-5.81	-7.64	4.39	4.52	5.11	5.42

### 5 声品质客观评价参量权重分析

#### 5.1 权重分析

汽车声品质 GA-BP 模型训练完毕的权值和阈值如表 4 所示,各输入变量到输出变量的连接权值的大小,代表了其对输出变量的影响程度。Garson 提出了利用神经网络的连接权值计算输入参量对输出变量影响权重的方法<sup>[11]</sup>,计算公式

如下:

$$I_j = \frac{\sum_{m=1}^{N_h} (|\omega_{jm}^1| / \sum_{k=1}^{N_i} |\omega_{km}^1|) \times |\omega_{nm}^2|}{\sum_{k=1}^{N_i} \{ \sum_{m=1}^{N_h} (|\omega_{km}^1| / \sum_{k=1}^{N_i} |\omega_{km}^1|) \times |\omega_{nm}^2| \}} \quad (2)$$

式中: $I_j$  为第  $j$  个输入参量对第  $n$  个输出变量的影响权重; $N_i, N_h$  为输入和隐含层节点数; $\omega^1$  为输入层到隐含层的连接权值, $\omega^2$  为隐含层到输出

表 4 权值和阈值矩阵

Tab. 4 Matrixes of weights and thresholds

$\omega^1$ 神经 元	$\omega$ 输入变量							阈值	$\omega^2$ 神经元 主观值	
	响度	尖锐度	粗糙度	抖动度	AI 指数	音调度	A 声级			
1	0.001 9	-0.801 0	0.050 8	1.009 7	0.633 9	0.980 0	0.673 1	-0.298 6	1	-0.247 5
2	-0.234 1	0.207 1	0.203 4	-0.778 6	-0.610 8	0.931 7	0.693 3	0.032 6	2	-0.114 1
3	-0.068 9	-0.098 1	-0.831 5	0.954 8	-0.286 4	-0.743 8	-0.514 4	-0.370 1	3	0.268 1
4	-0.275 3	0.108 9	-0.037 3	-0.029 0	0.701 3	-0.648 2	0.089 5	-0.485 3	4	-0.080 6
5	-0.593 0	-0.005 8	-0.570 5	-0.367 1	-0.736 9	0.391 4	-0.124 6	0.465 8	5	-0.058 5
6	-0.356 4	-0.340 3	-0.591 8	0.942 2	0.605 0	-0.151 6	-0.680 2	0.842 7	6	-0.225 5
7	0.192 0	-0.817 3	0.158 3	0.133 0	-0.242 3	0.391 9	-0.089 0	-0.668 1	7	0.483 8
8	0.646 1	0.274 9	-0.456 1	0.349 7	-0.549 4	-0.433 4	0.123 4	-0.690 3	8	-0.305 6
9	0.371 3	0.900 0	-0.739 8	0.788 8	-0.110 0	0.471 7	-0.610 0	-0.108 2	9	-0.146 1
10	0.875 2	0.374 0	0.322 5	-0.627 2	0.183 4	-0.610 7	0.554 9	-0.223 0	10	-0.426 4
11	-0.101 8	0.140 9	0.839 1	0.946 4	-0.152 4	0.126 4	-0.566 2	-0.619 9	11	-0.516 4
12	-0.902 9	-0.470 4	0.042 1	0.738 8	0.389 8	0.372 2	0.864 4	-0.363 7	12	0.245 5
13	0.445 1	0.743 9	-0.290 6	0.670 4	0.833 4	-0.776 9	0.249 7	0.063 1	13	0.176 2
14	-0.834 1	0.317 3	0.810 4	-0.040 4	-0.179 1	-0.079 4	-0.107 2	-0.450 6	14	0.462 1
								阈值		0.851 1

层的连接权值,相应的下角标  $j, m, n$  为第几个神经元。例如: $\omega_{jm}^1$  为第  $j$  个输入神经元与隐含层第  $m$  个神经元的连接权值。 $I_j$  值越大,影响权重比例越高,表示输入参量对输出的影响越大。

按式(2)计算得到的权重系数如图 6 所示。

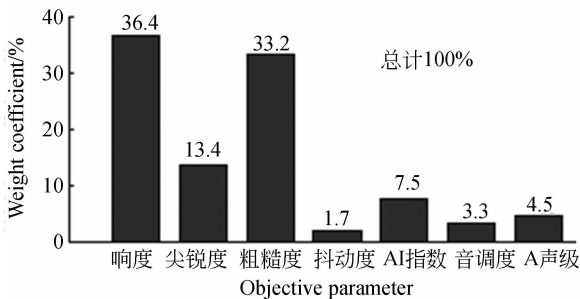


图 6 客观参数的权重系数

Fig. 6 Relative importance of input variables

可以看出:对声品质主观评价结果影响最大的参数为响度,其次为粗糙度和尖锐度。3 个参数对声品质的贡献度之和达到了 83%,其他参数影响较小。

#### 5.2 模型重建

将对声品质有重要影响的响度、粗糙度、尖锐度 3 个参量作为输入,声品质主观结果为输出,重新构建声品质 GA-BP 模型。网络拓扑结构为 3-7-1,学习参数、GA 优化步骤、训练与检验数据保持不变。3 输入参数模型(GA-BP-3)与 7 输入参数模型(GA-BP-7)的预测结果对比如图 7 所示。

可以看出,两种模型预测结果与实际主观打

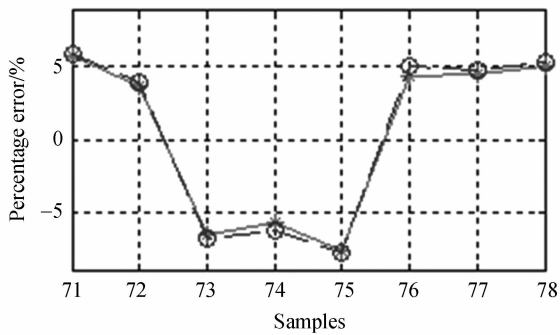


图7 预测结果对比图

Fig. 7 Comparison of predictions

分值的误差基本一致。这说明, B 级车稳态工况下的车内声品质预测模型可由响度、粗糙度和尖锐度 3 个参数来描述, 其他参量可以排除于模型之外。在对稳态工况下的车内声品质进行评价分析及优化控制时, 只需考虑响度、粗糙度和尖锐度 3 个参数就能达到满意的效果, 无需考虑其他多个参量的影响, 减少了测试分析时间, 提高了工作效率, 为汽车声品质的评价及改进提供了依据。

## 参考文献:

- [1] GENUIT K. The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the NVH engineers [J]. *Vehicle Noise and Vibration*, 2004, 1(1):158-168.
- [2] SANG-KWON L. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 310(5):149-168.
- [3] 高印寒, 孙强, 梁杰. B 级轿车车内噪声品质的主观评价研究 [J]. *噪声与振动控制*, 2010, 30(4):115-118.  
GAO YH, SUN Q, LIANG J. Subjective evaluation research of B class car's interior sound quality [J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, 30(4):115-118. (in Chinese)
- [4] 申秀敏, 左曙光, 李林, 等. 车内噪声声品质的支持向量机预测 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(6):66-68.  
SHEN X M, ZUO S G, LI L, et al.. SVM predictor of vehicle interior sound quality [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(6):66-68. (in Chinese)
- [5] SAHIN Y, IKBALK E. Sound quality analysis of cars using hybrid neural networks [J]. *Simulation*

## 6 结 论

对稳态工况下 B 级车车内噪声, 采用等级评分法进行了主观评价并进行了客观分析, 提出了基于 GA-BP 神经网络的声品质预测模型。与 BP 神经网络相比, GA-BP 声品质预测模型的收敛速度提高了 3 倍, 平均预测误差减少 3.29%; 模型的相关系数达到 0.928, 预测误差为  $\pm 8\%$ 。这表明 GA-BP 网络能准确地描述汽车声品质主观评价结果与客观参数之间复杂的非线性关系, 建立高质量的预测模型, 收敛速度快, 预测精度高, 可以节省主观评价所需的大量人力物力资源, 降低研发成本, 为汽车声品质的评价预测提供了一个可靠的方法。对神经网络的权重计算和只考虑 3 参数输入模型的分析结果表明: 稳态工况下, 车内噪声声品质主观评价结果主要受响度、粗糙度和尖锐度 3 个客观参数影响, 其他参量影响较小, 可以排除在声品质评价预测模型之外。研究结果对汽车声品质的评价改善具有指导意义。

- [6] 孙强. 基于人工神经网络的汽车声品质评价与应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011:50-53.  
SUN Q. *Research on evaluation and application of vehicle sound quality based on artificial neural network* [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 50-53. (in Chinese)
- [7] 董长虹. *Matlab 神经网络与应用* [M]. 北京: 国防工业出版社工程, 2005:89-93.  
DONG C H. *Matlab Neural Network and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:89-93. (in Chinese)
- [8] 郭海湘, 诸克军, 胡杰. GA-BP 嵌套算法的理论及应用 [J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(1):116-125.  
GUO H X, ZHU K J, HU J. The theory and application of GA-BP-NESTING algorithm [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(1):116-125. (in Chinese)
- [9] 王平, 王彩芸, 王文健. GA-BP 网络在钢轨磨损量预测中的应用 [J]. *润滑与密封*, 2011, 36(2):99-102.  
WANG P, WANG C Y, WANG W J. Application of GA-BP ANN in the prediction of wear volumes of

rail steel [J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36 (2):99-102. (in Chinese)

- [10] MENG X P, ZHANG H G, TAN W Y. A hybrid method of GA and BP for short-term economic dispatch of hydrothermal power systems [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2000, 51(4):

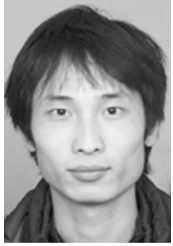
341-348.

- [11] ALEBOYEH A, KASIRI M B. Prediction of azo dye decolorization by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> using artificial neural networks [J]. *Dyes and Pigments*, 2008 (77):288-294.

#### 作者简介:



**高印寒**(1951—),男,吉林长春人,吉林省高级专家,教授,博士生导师,主要从事车辆测试技术及仪器方面的研究。E-mail: gaoyinhan@sohu.com.



**唐荣江**(1986—),男,广西桂林人,博士研究生,主要从事车辆测试技术及车内噪声的研究。E-mail: trj-1986@163.com



**梁杰**(1965—),男,博士,研究员,主要从事车辆 NVH 性能分析与控制方面的研究。E-mail: liangjie1965@yahoo.com.cn



**赵彤航**(1979—),男,广西桂林人,博士,中国一汽集团技术中心高级工程师,主要从事汽车 NVH 性能控制方面的研究。E-mail: zhaotonghang@tom.com



**张澧桐**(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事车辆测试技术及车内噪声的研究。E-mail: 635377166@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)