

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.004

基于神经网络的车辆排气噪声声音品质预测技术*

石岩 舒歌群 毕凤荣 刘海

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

【摘要】 通过评审团成对比较法测试得到18种车辆排气噪声的满意度评价,考察并选取响度、尖锐度、粗糙度、波动度和峭度作为描述车辆排气噪声声音品质的客观心理声学参数,使用BP神经网络理论建立车辆排气噪声声音品质神经网络预测模型,对排气噪声样本的满意度进行预测,并与使用多元线性回归模型所得的预测值进行了比较。结果表明,神经网络模型预测值更接近实测值,误差在10%范围以内,对于单一噪声样本满意度的预测精度高于多元线性回归模型,能够更好地反映客观参数和主观满意度间的非线性关系,可用于车辆排气噪声声音品质的预测研究。

关键词: 车辆 声音品质 排气噪声 神经网络 预测模型

中图分类号: TK411+.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)08-0016-04

Sound Quality Prediction of Vehicle Exhaust Noise Based on Neural Network

Shi Yan Shu Gequn Bi Fengrong Liu Hai

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

Sensory pleasantness evaluation of eighteen vehicle exhaust noises were obtained by paired comparison jury test. Loudness, sharpness, roughness, fluctuation strength and kurtosis were selected for objectively characterizing the sound quality of exhaust noise. The sound quality prediction model of vehicle exhaust noise was established based on back-propagation neural network. Sensory pleasantness of exhaust noise samples were obtained through the prediction model and the results were compared with that obtained through multiple linear regression prediction model. The result showed that the prediction values were close to the measured values, the neural network model was more effective than multiple linear regression model in prediction of individual exhaust noise. The neural network prediction model represented the nonlinear relation between sensory pleasantness and objective parameters exactly and could be used for predicting the sound quality of vehicle exhaust noise.

Key words Vehicle, Sound quality, Exhaust noise, Neural network, Prediction model

引言

随着工业水平的不断提高,车辆噪声的声压级问题已经得到有效的控制,研究人员注意到不同音色噪声会对人的心理感受产生不同的影响,即对噪声的主观感受直接影响着人们对产品的选择趋向。

改善车辆噪声的声音品质已经成为车辆噪声研究领域的主要方向。

目前国内针对车辆声音品质的研究工作,绝大部分是基于线性回归方法,得到客观评价参量和主观评价结果间的关系,并以此建立车辆噪声声音品质评价模型^[1-2]。由于人耳对声音的接收过程从生

收稿日期: 2010-02-22 修回日期: 2010-04-27

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA110113)和天津市应用科学及前沿技术研究计划重点项目(10JCZDJC23200)

作者简介: 石岩, 博士生, 主要从事车辆噪声声音品质评价与控制研究, E-mail: nvh@tju.edu.cn

通讯作者: 毕凤荣, 副教授, 主要从事车辆与动力机械 NVH 研究, E-mail: fr_bi@tju.edu.cn

理上讲是非线性的,并且人对噪声的主观感受又受到个人经历、周围环境和心理状态等内、外界因素的影响,导致各客观评价参量对主观感受的影响是非线性且相互作用的^[3]。通过人工神经网络所建立起来的具有自学习能力和自适应能力的声音品质评价模型,能够更为准确地描述人对车辆噪声的主观感受和客观评价参量间的非线性关系,具有其他线性回归方法^[4-5]难以比拟的优点。

排气噪声是发动机与车辆的主要噪声源之一,改善其声音品质对提高动力机械乃至整车的 NVH 特性具有重要的影响。本文以车辆的排气噪声作为研究对象,通过主观评价研究得到对排气噪声的主观感受,考察并选取适当的客观心理声学参数,分别采用多元线性回归分析和人工神经网络的方法建立车辆排气噪声声音品质主观评价预测模型,并对两种评价模型的预测结果进行比较。

1 车辆排气噪声声音品质主观评价

1.1 评审团测试

选取 18 种车型在常用行驶速度下的排气噪声作为主观评价的测试样本,在半消声室中进行噪声信号的记录,测试设备采用 LMS 公司的 Test. Lab 数据采集系统。为了保证真实地还原所记录的噪声信号,评审团测试使用专业声卡和监听耳机进行回放,并在安静的听音室内进行,回放时各样本的声压级与记录时一致^[6]。

评审团测试采用成对比较法,使用满意度作为量化评价指标,以 P 表示,为无量纲系数,其值越大代表声音品质越好。测试时测试者选择成对播放的样本 A 和 B 哪个听起来更能被人所接受,由程序随机排列组合产生样本对。本次研究一共产生 $N = 18 \times (18 - 1) = 306$ 对样本,每对样本间播放时间相隔 1 s,一对样本回放结束后由测试者自行选择重复回放之前的样本对或者继续下一对,总测试时间约为 1 h。测试人员共 51 人,其中男性 28 人,女性 23 人,年龄为 20 ~ 40 岁不等。全部测试者测试完成后统计各样本得分情况,并计算每名测试者所做出评价的可靠性,以此作为对满意度进行加权修正的依据。

由于对声音品质的描述主观性很强且研究时间较短,目前提出的客观心理声学参数中除了响度和语音干扰级以外其他均未得到一致的认可。经过全面考察现有可用心理声学参数的特征及其适用性,参考有关文献的研究结果^[7-8],选取响度、尖锐度、粗糙度、波动度和峭度作为描述车辆排气噪声声音品质的客观参数,各参数的定义及描述见文献[9]。

整个测试的平均重合度系数为 0.704,平均一致性系数为 0.932,说明成对比较法的评审团测试是成功的。从中去除掉 9 个重合度系数小于 0.6 和一致性系数小于 0.5 的数据,总共有效数据为 42 个。最后得到的各样本心理声学参数和满意度见表 1。

表 1 各样本心理声学参数及满意度
Tab. 1 Psychoacoustic parameters and sensory pleasantness of samples

样本 序号	响度 L /sone	尖锐度 S /asum	粗糙度 R /asper	波动度 F /vacil	峭度 K	满意度 P
1	47.9	1.71	0.42	0.13	0.06	4.2
2	46.3	1.78	0.46	0.18	0.02	5.4
3	23.4	1.75	0.95	0.13	1.79	28.9
4	22.8	1.62	0.57	0.19	2.27	28.5
5	29.3	1.72	0.14	0.14	-0.11	21.9
6	45.7	1.64	0.26	0.12	-0.52	9.4
7	39.3	1.75	1.15	0.11	0.14	13.1
8	49.4	1.64	0.34	0.15	-0.35	5.4
9	30.6	1.24	2.18	0.06	-0.94	19.8
10	27.7	1.18	1.92	0.11	-0.37	22.6
11	36.9	1.41	0.94	0.09	-0.01	14.0
12	29.0	1.30	1.14	0.10	0.61	24.4
13	47.2	1.90	0.29	0.11	-0.12	2.2
14	26.1	1.47	0.5	0.09	-0.49	22.3
15	25.3	1.44	1.21	0.08	-0.18	23.8
16	46.5	1.51	1.10	0.24	-0.23	11.0
17	25.5	1.81	2.09	0.08	-0.32	25.3
18	30.6	1.58	1.00	0.12	0.31	23.9

1.2 多元线性回归模型

由表 1 中的数据可以看出,响度和满意度之间具有很强的显性影响关系,响度越高满意度越差。除响度外,其他各客观参数和满意度之间均没有表现出明显的相关性,可以认为各心理声学参数对满意度的影响不是相互独立或者线性的,而是非线性和互相影响的。

通过最小二乘法拟合表 1 中的数据进行多元线性回归分析,建立回归模型预测表达式为

$$P = 46.39 - 0.878L - 1.855S + 0.914R + 26.915F + 0.479K$$

模型的 R^2 为 0.96,均方根误差为 1.99。通常认为回归模型的 R^2 在 0.8 以上即为可用,说明建立的预测模型与实际值间具有较好的一致性。

2 排气噪声声音品质神经网络预测模型

神经网络 (artificial neural network, 简称

ANN)实际上是由大量简单元件相互连接而成的复杂网络,具有高度的非线性,能够进行复杂的逻辑操作和非线性关系实现,目前已在车辆噪声声压级及振动控制等研究中得到应用^[10-11]。

在现有的 ANN 模型中,反向传播网络^[12](back-propagation network,简称 BP 网络)应用最为广泛。BP 网络的算法被称为误差反向传播法,简称 BP 算法。图 1 为典型的 BP 网络拓扑结构图,由输入层、隐含层和输出层组成,其中隐含层可以为单层或多层,同层节点间无关联,异层节点间相互连接。

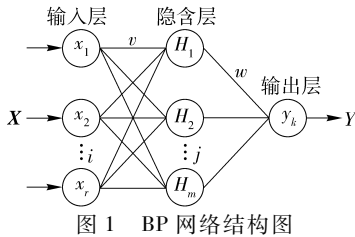


Fig. 1 Back-propagation neural network

假设输入为 X , 输入神经元有 r 个; 隐含层内有 m 个神经元, 激活函数为 f_H ; 输出层内有 n 个神经元, 对应的激活函数为 f_y , 输出为 Y 。则隐含层中第 j 个神经元的输出为

$$H_j = f_H \left(a_j + \sum_{i=1}^r v_{ij} x_i \right) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

输出层第 k 个神经元的输出为

$$y_k = f_y \left(b_k + \sum_{j=1}^m w_{jk} H_j \right) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中 v, w ——权值 a, b ——偏差

通常情况下, 隐含层采用对数 S 型激活函数

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}, \text{ 输出层采用线性激活函数 } f(n) = n。$$

理论上已经证明对于任何在闭区间的连续函数都可以用一个隐含层的 BP 网络来逼近, 因此一个带有偏差和至少一个隐含层及一个线性输出层的 BP 神经网络可以完成任意的映射^[13]。隐含层数的增加可以进一步提高精度, 但会使得网络复杂化, 增加权值的训练时间。增加隐含层中神经元的个数可以有效调整误差, 并且比增加隐含层数简单得多, 因此选择单隐含层 BP 网络建立预测模型。

隐含层神经元的数目, 即隐藏节点数是拟合过程中需要指定的最重要的数值, 若此值设定得过低则会拟合不足, 而设定得过高则会过度拟合^[14]。过拟合罚项则有助于防止过度拟合模型, 优化准则等于残差平方和加上过拟合罚项, 然后乘以参数估计值的平方和。隐含节点数的选取尚无确切的理论指导, 通过设置不同隐藏节点的数量和过拟合罚项的数值进行拟合, 以找出最佳的拟合模型。

根据实际运行的结果, 对于当前的训练数据而言, 过多的隐藏节点对拟合精度的提高并没有太大帮助, 反而增加了训练时间。故选择隐藏节点数为 5、过拟合罚项为 0.001 作为模型的拟合参数。由描述车辆排气噪声声音品质的主、客观参数可知, 输入层节点数为 5, 输出层节点数为 1。图 2 为该神经网络的 5-5-1 结构形式, 各隐藏节点和客观参数间均执行折迭交叉验证^[15]。

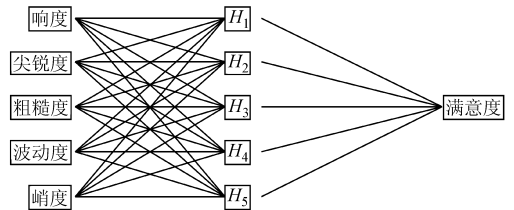


图 2 预测模型网络结构图

Fig. 2 Network structure of the prediction model

取初始权值为 $(-1, 1)$ 之间的随机数, 学习速率自适应, 初始值设为 0.02, 收敛精度设为 0.001, 并对拟合结果进行 5 次折迭交叉验证。在进行模型拟合之前, 还要将输入层数据进行线性归一化处理, $x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$, 将数据转换为 $(0, 1)$ 区间的值, 以避免 S 函数进入饱和区^[8]。

经过 1 200 次训练后预测误差达到 0.001, 误差平方和为 0.021, 均方根误差为 0.041, 训练数据 R^2 约等于 1, 校验数据 R^2 为 0.93, 说明样本数据几乎被模型完全拟合, 精度很高。

3 神经网络模型和多元线性回归模型预测结果比较

将目标样本的各客观参数值输入拟合得到的满意度神经网络预测模型中, 便可得到满意度预测值。为了验证神经网络预测模型和多元线性回归预测模型的有效性, 另外准备了一组共 10 个车辆排气噪声样本, 分别通过两种预测模型计算出全部样本的满意度预测值, 并与评审团测试得到的满意度实测值进行对比。其中参与评审团测试的人员与之前相同, 同样采用成对比较法, 为了保证两次比较法的测试数据间具有关联, 将上一次评审团测试中获得最好和最差评价的噪声样本加入此次测试中, 并以此对测试结果进行归一化处理。

表 2 为 10 个样本心理声学参数, 以及声音品质满意度评审团测试实测值和两种预测模型预测值, 并给出了模型预测值和实测值间的误差百分比。

从表 2 中数据可以看出, 通过 BP 神经网络建立的车辆排气噪声主观评价预测模型对样本满意度

表 2 模型预测值与实测值比较
 Tab. 2 Comparison between predicted and measured values

样本 序号	响度 L /sone	尖锐度 S /asum	粗糙度 R /asper	波动度 F /vacil	峭度 K	满意度 P				
						实测值	神经网络预测		多元回归预测	
							预测值	误差/%	预测值	误差/%
1	41.23	1.68	0.69	0.13	0.24	11.0	10.77	-2.1	11.34	3.1
2	36.84	1.51	0.95	0.16	0.48	18.4	20.11	9.3	16.67	-9.4
3	31.37	1.76	0.53	0.09	-0.27	18.9	18.41	-2.6	18.38	-2.8
4	45.10	1.62	0.70	0.21	0.10	9.10	9.66	6.1	10.15	11.5
5	24.62	1.50	1.63	0.15	-0.35	28.9	27.83	-3.7	27.36	-5.3
6	29.32	1.24	1.06	0.10	1.01	24.3	25.36	4.4	22.51	-7.4
7	35.58	1.45	0.82	0.17	0.63	21.2	22.49	6.1	18.11	-14.6
8	48.60	1.19	1.20	0.16	-0.43	7.50	8.05	7.3	6.73	-10.2
9	43.93	1.80	0.21	0.19	-0.72	8.70	8.30	-4.6	9.46	8.8
10	27.87	1.47	0.92	0.12	0.11	24.6	25.76	4.7	23.33	-5.2

的预测结果比较理想,预测值均在 10% 误差范围以内。而多元线性回归模型的预测结果仅有 60% 在 10% 的误差范围内,且误差波动较大,预测结果不稳定。模型预测值和实测值对比结果说明,神经网络模型的预测能力优于多元线性回归模型,能够更好地反映客观参数和主观满意度间的非线性关系。但是,由于影响人对声音主观感受的非线性因素较多,使用神经网络方法建立满意度预测模型又受到训练样本数、输入层节点数、隐含层数及隐藏节点数等条件的影响,预测结果的准确性仍有待提高。

4 结论

(1) 基于 BP 神经网络建立的车辆排气噪声声品质预测模型,能够较好地反映客观参数和主观满意度间的非线性关系,对于单一样本满意度的预测精度高于多元线性回归模型,并具有自学习和自适应能力,方便使用和控制。

(2) 采用 BP 神经网络模型研究车辆声品质,可以省去声品质主观评价的环节,节约大量人力物力资源,并可大大提高研究的效率。

参 考 文 献

- 舒歌群,王养军,卫海桥,等. 汽车车内噪声声品质的测试与评价[J]. 内燃机学报, 2007, 25(1):77~83.
Shu G Q, Wang Y J, Wei H Q, et al. Measurement and evaluation of sound quality of interior noise of vehicle cabin[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(1):77~83. (in Chinese)
- 陈双籍,陈端石. 基于心理声学参数的车内声品质偏好性评价[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(3):45~47.
Chen S J, Chen D S. Sound quality preference evaluation for car interior noise based on psychoacoustic parameters[J]. Noise and Vibration Control, 2005, 25(3):45~47. (in Chinese)
- Shin S H, Ih J G, Hashimoto T, et al. Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(2):309~320.
- Yildinm S, Eski I. Sound quality analysis of cars using hybrid neural networks[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(4):410~418.
- Wang Y S, Lee C M, Kim D G, et al. Sound-quality prediction for nonstationary vehicle interior noise based on wavelet pre-processing neural network model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299:933~947.
- Otto N, Amman S, Eaton C, et al. Guidelines for jury evaluations of automotive sounds[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 35(4):24~47.
- Parot J M, Thirard C, Vincent B. A neural network estimating the psychoacoustical annoyance from physical data[C]// Proceedings of the Intelligent Vehicles'92 Symposium, 1992:310~314.
- Lee S K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(1):149~168.
- Zwicker E, Fastl H. Psychoacoustics - facts and modals[M]. 2nd ed. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1999.

0.004 11 ~ 0.006 05 rad 时胎面能产生自激振动,等效角度为 $0.2355^\circ \sim 0.3466^\circ$,因此在设定车轮定位参数时,可以调整前束角使其避开这一范围,以避免或减少轮胎多边形磨损发生。

4 结论

(1) 建立了基于侧向变刚度的轮胎多边形磨损模型,并对系统的稳定性进行了分析,指出轮胎的自激振动是一种由系统 Hopf 分岔引起的稳定周期振动现象。当参数达到临界分岔点时,系统将失去稳定性,出现稳定的周期解。

(2) 基于自激振动理论,指出轮胎多边形磨损为胎面均匀磨损和扰动磨损叠加引起的周向不均匀磨损,其发生与胎面的侧向振动有关,多边形磨损的边数近似等于胎面的侧向振动频率与车轮转动频率

之比,此观点能较好的解释轮胎多边形磨损现象。

(3) 通过仿真得出当车速在 79.2 ~ 116.5 km/h 之间时,轮胎将会发生自激振动,从而易于出现多边形磨损现象,这与经常行驶在高速公路上的汽车更易出现多边形磨损的实际情况一致,验证了模型的有效性和正确性。

(4) 由于在不同车速下轮胎多边形磨损的边数是不同的,以不同车速行驶将使轮胎磨损均匀化,不易导致多边形磨损的发生,因此应避免长时间以同一速度行驶。

(5) 为避免汽车高速行驶时发生轮胎多边形磨损,通过仿真得到了引起胎面自激振动的车轮前束角范围,从而可以通过调整前束角使其避开这一范围,以避免或减少轮胎多边形磨损发生。

参 考 文 献

- 1 Fujijawa T, Yamazaki S, Uchiyama Y. Tire wear caused by mild slip of tread[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1997, 70(4): 572 ~ 583.
- 2 Fujijawa T, Uchiyama Y, Yamaguchi I. Tire model to predict treadwear[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(2): 106 ~ 125.
- 3 黄海波,彭为,靳晓雄,等. 复合式后悬架轮胎偏磨振动动态仿真[J]. 同济大学学报, 2006, 34(11): 1 530 ~ 1 533. Huang Haibo, Peng Wei, Jin Xiaoxiong, et al. Composite suspension tire uneven wear dynamic simulation[J]. Journal of Tongji University, 2006, 34(11): 1 530 ~ 1 533. (in Chinese)
- 4 郭伟,何仁. 基于减少轮胎磨损的悬架初始定位参数的优化[J]. 江苏大学学报, 2002, 9(5): 49 ~ 53. Guo Wei, He Ren. Optimization of suspension initial alignment parameters based on reducing tire wear[J]. Journal of Jiangsu University, 2002, 9(5): 49 ~ 53. (in Chinese)
- 5 Sueoka A, Ryu T, Kondou T, et al. Polygonal wear of automobile tire[J]. JSME, 1997, 40(2): 210 ~ 217.
- 6 杨宪武,左曙光,雷镭,等. 轮胎非线性自激振动的动力学稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1 251 ~ 1 254. Yang Xianwu, Zuo Shuguang, Lei Lei, et al. Dynamics stability analysis of tire's non-linear self-excited vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1 251 ~ 1 254. (in Chinese)
- 7 周震华. 基于摩擦自振的扭杆梁式悬架和轮胎系统建模与分析[D]. 上海:同济大学,2008. Zhou Zhenhua. The research of system of twist beam suspension and tire based on friction self-excited vibration [D]. Shanghai:Tongji University,2008. (in Chinese)
- 8 Canudas D W C, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(3):419 ~ 425.

(上接第 19 页)

- 10 Mungiole M, Wilson D K. Prediction of outdoor sound transmission loss with an artificial neural network[J]. Applied Acoustics, 2006, 67(4):324 ~ 345.
- 11 白书战,李国祥,王浩国,等. 基于神经网络的排气消声器的优化设计方法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 153 ~ 155.
- 12 丛爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 3 版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.
- 13 Robert H N. Theory of the backpropagation neural network[C] // 1989, IJCNN, International Joint Conference on Neural Networks, 1989, 1:593 ~ 605.
- 14 李俊川,秦国军. 神经网络学习算法的过拟合问题及解决方法[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(4):260 ~ 264.
- 15 韩萌,丁剑. 基于交叉验证的 BP 算法的改进与实现[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14):3 738 ~ 3 742. Han M, Ding J. Improvement of BP algorithm based on cross-validation method and its implementation [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(14):3 738 ~ 3 742. (in Chinese)