

文章编号:1006-1355(2017)01-0142-07

基于BP神经网络的电机噪声在线评价系统

易子馗, 谭建平, 闫 涛

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 为有效甄别存在异常噪声的车窗电机, 提出一种基于BP神经网络的车窗电机噪声在线评价系统。由于现有客观参量不能够完全适用于车窗电机的噪声评价, 根据车窗电机噪声特点提出了一种形如窗函数的加权因子用于修正尖锐度参量, 并通过主客观评价实验优化了心理声学客观参量。在此基础上, 以有效的客观参量和物理参量为特征值, 构建使用附加动量法优化的BP神经网络分类器, 并最终建立了噪声在线评价系统。测试结果表明, 该系统对车窗电机噪声的分类准确率在90%以上, 且与传统BP神经网络分类器相比, 具有更高的准确率和更少的耗时, 可用于车窗电机噪声的在线评价。

关键词: 声学; 车窗电机噪声; 心理声学参量; 附加动量法; BP神经网络; 在线评价系统

中图分类号: U467.4⁹³; TM301.4³; X839 **文献标识码:** A **DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.01.031

Analysis of an Online Evaluation System of Motor Noises based on BP Neural Network

YI Zi-kui, TAN Jian-ping, YAN Tao

(State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, 410083 Changsha, China)

Abstract : In order to realize the effective detection of the noise of window motors, an online evaluation system for window lift motor noise based on BP neural network is presented. Since the current objective parameters is not completely applicable to the window motor noise evaluation, a weighting factor similar to the window function is proposed for sharpness parameter correction according to the characteristic of the window lift motor noise. Through the subjective and objective evaluation experiments, the psychoacoustic objective parameters are optimized. On this basis, with the effective objective parameters and the physical parameters as the characteristic values, the BP neural network classifier with additional momentum method is constructed, and the online noise evaluation system is established. Test results show that the accuracy of the evaluation system for the window lift motor noise classification can be above 90 %. In comparison with the traditional BP neural network classifier, this online evaluation system has higher accuracy and less time consuming. So, it is feasible for online evaluation of the window lift motor noises.

Key words : acoustics; window lift motor noise; psychoacoustic parameter; additional momentum method; BP neural network; online evaluation system

随着汽车工业的快速发展,对于车内环境舒适度的要求越来越高。车窗电机噪声对车内乘员的心理和生理均能产生不同程度的影响,导致汽车声音品质下降。因此,在车窗电机出厂前,需要对其噪声进行测试和分类评价。

控制噪声的研究主要集中在噪声分贝水平的降低。为了满足法规和国标的要求^[1-2],普遍应用时频

分析方法。然而,这种传统方法用于评价噪声时并不能反映人的主观感受的不足^[3-5],车窗电机生产厂往往采用人工听诊法对电机噪声进行检测评价。但人工听诊法评价结果准确率低、一致性差且不能适应工厂生产节拍。因此有必要建立一种能够准确反映人的心理感受、具有高准确性和一致性的全自动车窗电机噪声分类在线评价系统。基于心理声学的噪声评价方法考虑了人耳听觉特性,能够反映人对声音的主观感受,因而成为当前噪声控制领域的重要内容^[6-9],并被有效地应用于柴油机辐射噪声、车内噪声等多种噪声的预测、分类与评价中。因此,可以从心理声学角度出发,对于常见的主要噪声如齿

收稿日期:2016-07-10

作者简介:易子馗(1983—),男,湖南省攸县人,博士生,主要研究方向为故障诊断技术。

E-mail: 18692200622@163.com

通信作者:谭建平,男,博士生导师。

轮噪声、碳刷噪声等建立有效的噪声评价方法用于车窗电机噪声评价。

典型的基于心理声学的噪声分类评价方法以客观参量为特征值,通过构建合理的分类模型来进行分类评价。但是,目前常用的响度、尖锐度等客观心理声学参量通用性不足^[10-11]。在车窗电机噪声评价中,单纯使用以上参量会导致:

① 计算结果不能准确反映人们主观感受、评价结果准确率较低;

② 对于不同类型缺陷噪声的区分效果有限。为实现有效的噪声评价,一方面需根据车窗电机声音信号特点对参量进行修正,并以主观评价实验验证其有效性;另一方面可借鉴传统信号时频分析方法,引入合适的物理声学参量作为辅助。

同时,不同型号车窗电机结构和物理参数存在差异导致噪声特征不同。人为设置噪声特征阈值的方式不能有效区分不同类型车窗电机噪声,需要借助分类模型实现噪声分类评价。常用的噪声品质评价模型大多基于线性回归理论^[12],使用线性回归模型得到定量的预测、分类和评价结果。但人对声音的感知过程是一个非线性映射过程,因此使用线性回归建立的分类模型精度很难达到理想精度要求。目前研究人员更多地从机器学习角度出发,使用神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、支持向量机(SVM)等机器学习方法构建分类模型用于噪声的分类评价,并取得较好应用效果^[13-14]。

本文以某车窗电机生产厂生产数据为样本,针对现有电机噪声检测方法不能完全反映人的主观感受、而传统心理声学参量不能完全满足车窗电机噪声评价的现状,根据车窗电机噪声特点对传统尖锐度参量进行修正,提出一种以修正的客观心理声学参量为特征值、以使用附加动量法改进的BP神经网络为分类器的车窗电机噪声评价方法,并最终开发在线评价系统,应用于电机的生产与检测。

1 车窗电机噪声分类评价原理

某车窗电机生产厂商的统计数据显示,车窗电机的异常噪声大致可分为碳刷-换向器噪声、蜗杆-齿轮噪声、轴承噪声和间隙噪声。其中,碳刷-换向器噪声和蜗杆-齿轮噪声为异常电机噪声的主要类型,这两类噪声之和约占异常电机总数的94%。因此本文所研究的分类评价方法主要用于区分正常电机、碳刷-换向器噪声电机和蜗杆-齿轮噪声电机。

车窗电机噪声分类评价方法建立流程可大致分为以下三个部分:

(1) 获取有效客观心理声学参量:

分别进行客观参量计算和主观评价实验,通过主客观一致性分析得到可用于车窗电机噪声评价的有效客观心理声学参量。

(2) 物理声学参量选择:

选择合适的物理声学参量作为输入,用于辅助客观心理声学参量来构建电机噪声分类评价模型。

(3) 构建BP神经网络分类评价模型:

以客观心理声学参量和物理声学参量为输入,构建基于BP神经网络的电机噪声分类评价模型。

2 车窗电机噪声评价参量研究

2.1 主观心理声学评价方法

2.1.1 主观评价方法选择

主观评价用于判断电机噪声给人们带来的主观感受是否可用客观参量准确描述,需要对大量样本的多个声音属性进行研究。根据文献[20]中介绍的常用主观评价方法,选择语义细分法进行主观评价。

语义细分法提供一些极性的形容词作为评价标准,并设置若干个等级区间供评价者选择。由于语义细分法在主观评价时存在评价者评价标尺不断变化、评价者受心理预期影响不会选取极端值的缺点,导致评价结果一致性差、易集中在小范围内。在实验设计时,使用带有极端分值样本的参考语义细分法,选择参考样本和各语义对的极端分值对应样本,评价过程中先回放参考样本和极端分值样本,再回放待评价样本,根据评价语义对给出评价分值。

2.1.2 主观评价实验设计

在参考语义细分法的基础上,本文进行的主观评价实验流程可设计如下:

(1) 样本预处理:去除待评价声音样本中品质较差的部分,设置样本播放时长一致;

(2) 选定评价人员与环境:车窗电机噪声带来的主观感受是大多数驾驶员和乘客都比较在意的因素,因此评价人员选择无听力障碍的普通人;

(3) 选取语义对:根据客观参量对应的主观感受拟定评价者普遍接受的语义词,作为主观评价语义对;

(4) 选取极端分值样本:选择参考语义细分法评价时极端分值对应的样本进行主观评价;

(5) 进行主观评价实验:使用带有极端分值样本的参考语义细分法进行主观评价实验;

(6) 评价结果筛选剔除:对于每个语义对,计算各评价者评价结果间相关系数,剔除与其他评价者评价结果相关系数较低的评价者;

(7) 得到各语义对主观评价结果:对于每个语

义对,计算剔除后剩余评价结果的算术平均值,作为该语义对的主观评价结果。

2.2 客观心理声学评价方法

2.2.1 响度计算

Zwicker 模型通过计算每个临界频带特征响度进而求得总响度值。特征响度反映一个频带内噪声的响度,可通过激励级 E 计算得到。式(1)为主响度计算公式。根据 DIN 45631 向主响度加入斜坡响度,即可构成特征响度。

$$N_s = N'_0 \left(\frac{E_{TQ}}{sE_0} \right)^k \left[(1-s + \frac{sE}{E_{TQ}})^k - 1 \right] \left(\frac{\text{Sone}}{\text{Bark}} \right) \quad (1)$$

其中 E_{TQ} 为安静听阈激励级; E_0 是参考声强为 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 时的激励级, N'_0 为参考特征响度,当其值为 0.08 时, $s=0.5, k=0.23$; 当其值为 0.063 5 时, $s=0.25, k=0.25$ 。激励级 E 为经过外中耳传递的特征频带声压级。

对特征响度在整个特征频带域内积分,得到总响度 N 。

2.2.2 粗糙度和抖动度计算

粗糙度和抖动度用于描述噪声的调制特性,当调制频率在 20 Hz 以下时,噪声体现抖动度;反之则体现粗糙度。本文对噪声的客观评价中包含 Zwicker 响度参量计算,因而可选择相应的 Zwicker 粗糙度和抖动度模型进行计算。

粗糙度的计算公式如下

$$R = 0.3 f_{\text{mod}} \int_0^{24 \text{ bark}} \Delta L_E(z) dz \quad (2)$$

其中 R 为粗糙度, f_{mod} 声音信号的为调制频率,

$\Delta L_E(z) = 20 \log_{10} \left(\frac{N'_{\text{max}}}{N'_{\text{min}}} \right)$, 为激励级的变化量。

抖动度的计算公式如下

$$F = 0.008 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L_E(z) dz}{\frac{f_{\text{mod}}}{f_0} + \frac{f_0}{f_{\text{mod}}}} \quad (3)$$

其中 F 为抖动度, f_{mod} 和 $\Delta L_E(z)$ 的含义与粗糙度计算公式中相同。 f_0 为调制基频, $f_0=4 \text{ Hz}$ 。

2.2.3 针对车窗电机噪声的尖锐度模型修正

尖锐度反映声音尖锐刺耳的感受,根据 Zwicker 提出的尖锐度模型,能够显著体现出声音在高频段的较大能量。声音尖锐度通过式(4)计算

$$S = C \frac{\int_0^{24 \text{ bark}} N_s(z) g(z) dz}{N} \quad (4)$$

其中 S 为尖锐度, N 为总响度, $C=0.11$ 为比例系数, z 为特征频带率, N_s 为特征响度。 $g(z)$ 为加权因子,常

用的加权因子如式(5)。

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 16 \\ 0.066 e^{0.171z} & z > 16 \end{cases} \quad (5)$$

根据式 4 计算出的尖锐度都存在尖锐度值与主观感受不一致的问题,明显存在尖锐刺耳声音的噪声电机样本的尖锐度指标与正常电机的基本一致,如图 1,正常电机的尖锐度结果完全在碳刷噪声电机的尖锐度结果区间内。因此需要根据车窗电机噪声特点对 Zwicker 尖锐度模型进行修正。

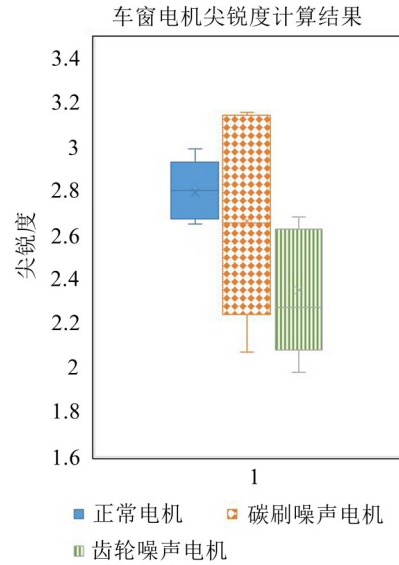


图 1 Zwicker 尖锐度计算结果

Zwicker 尖锐度计算模型如式(4)。从数学形式上理解该模型,可知尖锐度本质上为声音信号特征响度加权 1 阶矩的数据标准化处理结果。其中标准化处理用于消除不同声音样本由于响度值不同带来的差异,加权因子用于强调特征响度中对“尖锐刺耳”感受做出贡献的成分。

选择 7 个正常电机、15 个碳刷-换向器噪声电机、10 个蜗杆-齿轮噪声电机,对不同类别电机的特征响度 N_s 进行分析。

首先计算所有电机声音样本的特征响度和响度,对每一样本的特征响度作标准化处理,标准化处理方式如式(6)。

$$N'_s = \frac{N_s}{N} \quad (6)$$

其中,令 N'_s 为标准化处理后的特征响度, N_s 为特征响度, N 为响度。

而后计算每一类别下各电机噪声标准化特征响度的算术平均值,作为该类别电机噪声的标准化特征响度。将三类电机噪声的标准化特征响度作图并分析,可知:由图 2 中标准化特征响度曲线可见,在大约 2 Bark~10 Bark (其中 Bark 为单位)的临界频带率范围内,碳刷噪声电机与齿轮噪声电机的特征

响度显著高于正常电机,而在其它临界频带时则不具有共性差异。

因此可假设碳刷噪声和齿轮噪声的尖锐刺耳特点是由2 Bark~10 Bark内的差异所造成的。根据这一假设,式(4)~(6)中的加权因子无法满足强调2 Bark~10 Bark内特征响度对尖锐刺耳感受的贡献。因此提出一种形如窗函数新的加权因子 $g(z)$ 对尖锐度模型进行修正,以强调这一成分对尖锐度的贡献。通过主客观评价实验验证这一修正的有效性和加权因子式(7)中整数 a 的取值。

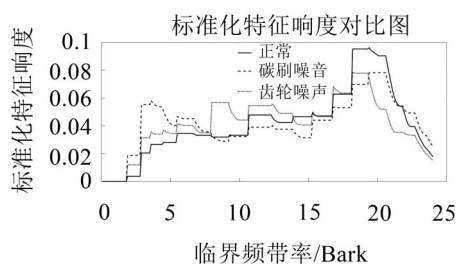


图2 正常电机与不同故障电机标准化特征响度对比图

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z < 2 \\ a & 2 \leq z \leq 10 \\ 1 & z > 10 \end{cases} \quad (7)$$

2.3 车窗电机噪声解调分析

对于车窗电机噪声的粗糙度计算需要调制频率这一参量。同时,故障源往往对信号起到调制作用。因而,对车窗电机噪声的解调不仅可用于粗糙度参量的计算,而且能获取故障信息,有助于车窗电机的分类评价。

常用的解调方法为Hilbert解调法。Hilbert解调法首先求得原始信号的解析信号,而后对解析信号求包络谱即可得到调制频率。对32个车窗电机噪声样本进行解调,得到调制频率分布如图3。

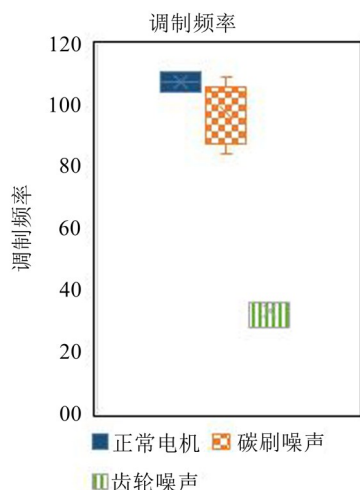


图3 不同类型电机噪声调制频率分布

由图3可以看出,正常电机的调制频率在104 Hz到110 Hz之间,碳刷噪声的调制频率在82 Hz至

108 Hz之间,而齿轮噪声的调制频率在26 Hz至37 Hz之间,由此得到以下结论:

① 车窗电机噪声的调制频率均在20 Hz以上,噪声体现粗糙度特征;

② 蜗杆-齿轮噪声电机的调制频率和其它两种噪声调制频率差别较大,即调制频率可作为一特征值用于辨识蜗杆-齿轮噪声电机。

3 基于BP神经网络的车窗电机噪声分类评价模型

3.1 BP神经网络基本原理

BP神经网络模型中,输入前向传递,误差反向传播。根据误差调整网络权值和阈值,使得输出值逐渐逼近期望值。BP神经网络的权值与阈值学习算法为梯度修正法,从网络预测误差的负梯度方向对权值与阈值进行修正,当误差小于设定值,网络训练结束。本文使用BP神经网络构建分类器模型。

3.2 基于附加动量法的BP神经网络改进

由于BP神经网络算法是一种局部寻优算法,因而在搜寻复杂非线性函数的全局极值时,可能由于陷入局部极值而训练失败。同时,BP算法没有先前经验的积累,学习过程慢。为克服这些问题,可利用附加动量来滑过局部极值,得到更好的训练效果。

附加动量法是在BP算法的基础上,在每次权值阈值更新时,加上一项正比于前次权值阈值变化量的值,并根据BP算法产生新的权值阈值。采用附加动量法可使BP神经网络训练时从局部极小值中跳出,减少局部收敛的情况,同时提高收敛速度。以权值更新为例,带附加动量的权值学习公式为

$$\omega(k) = \omega(k-1) + \Delta\omega(k) + \alpha[\omega(k-1) - \omega(k-2)] \quad (8)$$

其中 $\omega(k)$ 、 $\omega(k-1)$ 、 $\omega(k-2)$ 为不同迭代次数时权值, α 为动量学习率。

4 车窗电机噪声分类评价实验

4.1 主客观一致性实验

4.1.1 实验目的

对FPC3 12V F00S1W2 014型车窗电机噪声分别进行主客观评价,通过对评价结果进行一致性分析筛选能够准确反映人们主观感受的客观心理声学参量,同时确定修正尖锐度模型中加权因子的取值。

4.1.2 实验条件

(1) 样本选择与预处理:选取32个电机噪声样本,包含7个正常样本、15个碳刷-换向器噪声样本、10个蜗杆-齿轮噪声样本。使用CoolEdit Pro 2.1软件去除样本中被人声、设备运转声污染严重的片

段。人声、设备声往往接近脉冲噪声,而电机声较平稳,因此去除此类片段对整体不产生明显影响。

(2) 评价人员:选择7名女性、10名男性评价者构成评审团,评审团年龄为21~23岁,无听觉疾病。

(3) 软件环境:实验平台为Microsoft Windows 10 64 bit下的Matlab R2014 b。其中,为规范主观评价流程、便于数据处理,使用自主开发的Matlab GUI界面进行参考语义细分法主观评价,如图4。

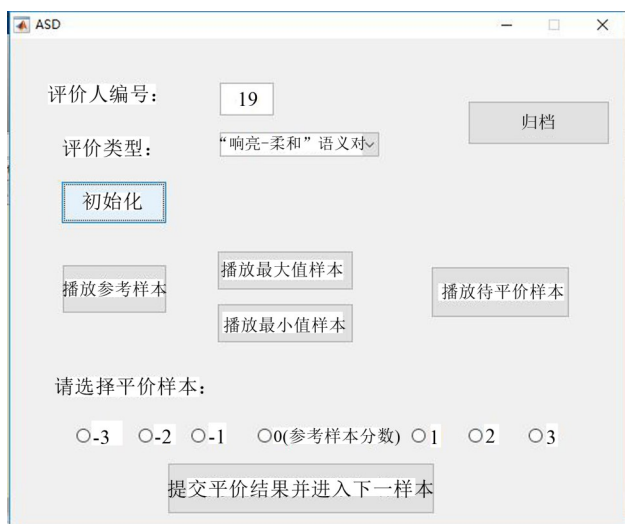


图4 参考语义细分法主观评价界面

(4) 硬件环境:笔记本电脑硬件配置为: Intel (R) Core(TM) i5-3210M CPU, 回放设备为1MORE耳机。

4.1.3 实验步骤

(1) 主观评价:按照2.1.2节中设计的主观评价流程开展主观评价实验,得到各评价者的主观评价结果;计算评价者间相关系数,剔除表现不佳的评价者后对剩余评价者评价结果取算术平均值,即可得到主观评价结果;

(2) 客观评价:对各样本进行客观心理声学参量计算,即可得到客观评价结果;

(3) 主客观一致性分析:计算客观评价结果和主观评价结果间相关系数,以验证客观参量反映主观感受时的有效性。

4.1.4 实验结果分析

通过主客观一致性实验,可以判断响度、尖锐度和粗糙度三个参量是否能够准确反映人的主观感受。具体结果如下:

(1) 主观评价所得各评价者间评价结果相关系

数如图5—图7,可见评价者对于粗糙度参量所反映的“嘈杂-清晰”语义对的主观感受波动较大,如图7。

根据评价者反馈,车窗电机噪声“嘈杂”特征体现并不显著,且评价者对齿轮噪声是否体现“嘈杂”特征分歧较大。因而,本文认为车窗电机“嘈杂”特性不明显,因此不把粗糙度作为有效特征值。

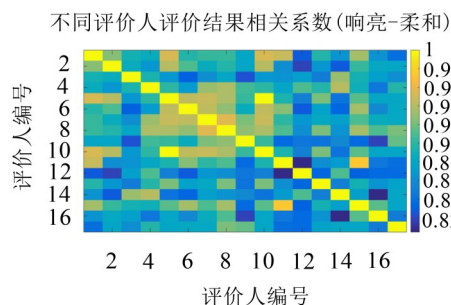


图5 响亮-柔和”语义对评价者间相关系数

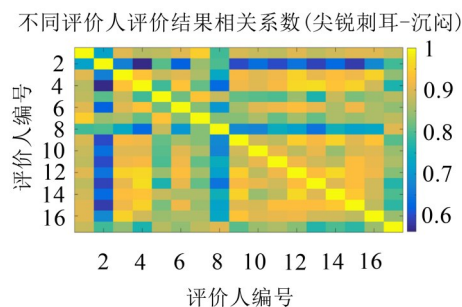


图6 “尖锐刺耳-沉闷”语义对评价者间相关系数

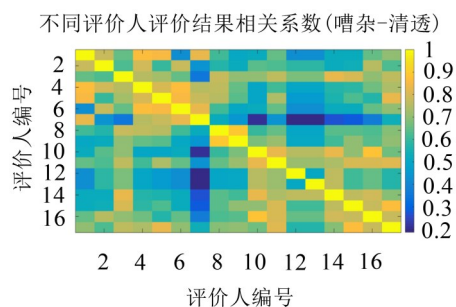


图7 “嘈杂-清晰”语义对评价者间相关系数

(2) 去除粗糙度参量后,响度和“响亮-柔和”语义对、修正后尖锐度和“尖锐刺耳-平顺”语义对的相关系数如表1,响度可作为特征值反映主观感受,修正后尖锐度在加权因子式中 $a=6$ 时与主观感受相关系数最高,可作为准确反映主观感受的特征值。

4.2 车窗电机分类评价模型对比实验

4.2.1 实验目的

本实验用于测试基于BP神经网络构建的车窗

表1 主客观评价相关系数

响度	尖锐度 $a=2$	尖锐度 $a=4$	尖锐度 $a=6$	尖锐度 $a=8$	尖锐度 $a=10$	尖锐度 $a=12$
0.743 8	-0.600 7	0.184 9	0.722 1	0.713 9	0.711 3	0.703 9

电机噪声分类器模型的有效性,并比较使用传统BP算法的分类器模型和附加动量法改进后的分类器模型在准确率和耗时性方面的差异。

4.2.2 实验条件

(1) 样本选择和预处理:选取61个噪声样本构成样本库,样本库包含23个正常电机样本、28个碳刷-换向器噪声电机样本和10个蜗杆-齿轮噪声电机样本,使用最大最小法对样本进行数据预处理。

(2) 分类器结构:分类器为3-5-3型神经网络,即输入层3个节点,代表响度、修正后尖锐度、调制频率三个参量;输出层3个节点,代表正常电机、碳刷-换向器噪声电机、蜗杆-齿轮噪声电机三种电机类型;隐含层节点数参考相关文献,设定为5。

(3) 软件环境:实验平台为Microsoft Windows 1064 bit 下的 Matlab R 2014 b,使用自主编写的 Matlab 脚本进行分类器训练与测试。

(4) 硬件环境:主客观评价实验在笔记本电脑上进行,笔记本电脑硬件配置为: Intel(R) Core(TM) i5-3210 M CPU, 4 GB RAM。

4.2.3 实验结果分析

对比使用传统BP算法和附加动量法的分类器模型分类准确率和耗时,其中采用附加动量法的分类器模型动量学习率为0.01。为减少随机误差影响,每种分类器模型分别进行5次训练与测试,结果如表2:

由表可知,使用传统BP算法的分类器模型在5次训练测试中准确率波动较大,且耗时较高;而使用附加动量法的分类器模型在5次训练中准确率均保持在90%以上,且耗时相比传统BP算法的分类器模型减少约0.3 s,表明了改进后BP神经网络分类器模型能够更好地满足需求。

5 系统实现

5.1 系统功能需求分析

(1) 为实现电机异常噪声诊断,系统设计要求包含:数据采集、心理声学特征值提取、BP神经网络判断分类、系统数据库等功能的实现。

(2) 系统需要具备:电机异常噪声测试界面和分析界面。

(3) 检测界面要求:操作简单,界面简洁,能够实现对电机异常噪声的实时诊断,诊断时间满足8 s生产节拍并且具有防漏检功能。

(4) 分析界面要求:能够实现样本及参数调整,登陆信息及历史数据库信息添加、修改及删除。

5.2 系统实现

系统提供了一个简洁的电机异常噪声检测软件操作平台,使用者能够在不具备故障诊断基础的情况下,完成对电机异常噪声的检测,具有以下特点:

(1) 实时性强,每4 s完成一次噪声检测;

(2) 操作简单,界面简洁,除电机型号、故障类型、故障程度外,隐藏其它设置,防止误操作;

(3) 具备数据采集、存储并对数据进行实时分析、电机异常噪声诊断以及数据管理等功能;

(4) 检测过程中设置进度条;

(5) 防漏判。当电机检测结果为存在异常噪声时,系统弹出提示对话框,并锁死系统,需按【开始】按钮解除锁死才能开始下次操作,防止由于使用者疏忽导致不合格电机出厂。

6 结 语

(1) 本文以FPC3 12V F00S1W 2014型车窗电机为研究对象,建立了能够准确反映主观感受并用于车窗电机的噪声客观评价体系;

(2) 基于附加动量法的BP神经网络改进,构建了有效的车窗电机噪声分类器。测试结果显示分类准确率可达95%,具有较好的应用价值。

(3) 搭建了车窗电机异常噪声的在线诊断系统,实时性强、操作方便,能够有效应用于生产制造现场。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 10069. 3-2008 旋转电机噪声测定方法及限值 第3部分: 噪声限值[S]. 北京, 2008.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GBT 18697-2002 声学汽车车内噪声测量方法[S]. 北京: 2002.
- [3] 黄伟国. 基于振动信号特征提取与表达的旋转机械状态监测与故障诊断研究[D]. 武汉: 中国科学技术大学, 2010.

表2 附加动量法与传统BP算法在准确率和耗时的比较

		1	2	3	4	5
传统BP算法	准确率	100 %	85 %	80 %	95 %	60 %
	耗时/s	2.115	1.989	2.040	2.074	2.096
附加动量法	准确率	95 %	95 %	90 %	100 %	100 %
	耗时/s	1.817	1.729	1.710	1.884	1.718

- [4] 严莉, 张志谊, 蒋伟康, 等. 汽车电机噪声在线检测技术的研究[J]. **汽车工程**, 2003, 23(3): 269-271.
- [5] HAI LIU. Sound quality prediction for engine-radiated noise[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 2015: 277-287.
- [6] UTE J. Meaning in the context of sound quality assessment [J]. **Acta Acustica United with Acustica**, 1999, 85(5): 681-684.
- [7] WINFRIED K. Sound quality evaluation in the product cycle[J]. **Acta Acustica United with Acustica**, 1997, 83 (5): 784-788.
- [8] WANG Y S, SHEN G Q, XING Y F. A sound quality model for objective synthesis evaluation of vehicle interior noise based on artificial neural network[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2014, 45: 255-266.
- [9] TANG RONGJIANG. Prediction and control technology of sound quality evaluation in vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [10] ZHANG WEI, JIANG WEI-KANG. Identification of Abnormal In-car Noise Based on Psychoacoustics Analysis [J]. **Automotive Engineering**: 2003, 25(6): 603-605.
- [11] JEONG UN-CHANG, KIM JIN-SU, JEONG JAE-EUN, et al. Development of a sound quality index for the wash cycle process of front-loading washing machines considering the impacts of individual noise sources[J]. **Applied Acoustics**, 2015, 87: 183-189.
- [12] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[J]. **Neural Networks IEEE Transactions on**, 1995, 10(5): 988-999.
- [13] TAN GANG-PING, WANG DENG-FENG, LI QIAN. Vehicle interior sound quality prediction based on back propagation neural network[J]. **Procedia Environmental Sciences**, 2011. 11: 471-477.
- [14] 肖玉飞. 基于小波包熵与支持向量机的模拟电路故障诊断. 湖南科技大学, 2012.
- [15] PHAM D T, KARABOGA D. Self-tuning fuzzy controller design using genetic optimisation and neural network modelling[J]. **Artificial Intelligence in Engineering**, 1999, 13(2): 119-130.
- [16] RICARDO PENNA LEITE, STEPHAN PAUL, SAMIR N Y GERGES. A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model[J]. **Applied Acoustics**, 2009, 70: 636-645.
- [17] JIAO ZHONG-XING. The algorithm and realization of psychoacoustic metrics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [18] DIN45631 — 1991, Program for Calculating Loudness. Deutsche Industrie Normen. 1991,03.
- [19] ISO 532 — 1975 Acoustic-Method for calculating loudness level[S].
- [20] MAO DONG-XING. Progress in sound quality research and application[J]. **Technical Acoustics**, 2007, 26(1): 159-164.
- [21] ZWICKER E, FASTL H, WIDMANN U, et al. Program for calculating loudness according to DIN45631(ISO 532B) [J]. **Journal of the Acoustical Society of Japan**, 1990, 12(1): 39-42.
- [22] SUN HUIHUI. Research on Evaluation of vehicle sound quality based on GA-BP neural network[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [23] FASTL H, ZWICKER E. Psychoacoustics facts and models[M]. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007.
- [24] ZHAO ZHONG-FENG, CHEN KE-AN. Objective evaluation approaches for noise based on zwicker theory [J]. **Audio Engineering**, 2005(12): 68-70.
- [25] TAO JIANXING, DING HOUMING, YANG SHENGMEI. Development and Application of Techniques for Evaluating Sound Quality of Air-conditioners[J]. **Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis**, 2001(3): 215-219.
- [26] WANG NA, CHEN KE-AN. Application of specific-loudness-based psychoacoustic features in automobile recognition[J]. **Audio Engineering**, 2006(6): 34-36.

(上接第88页)

- [3] 陶洪敏,宋雷鸣.轨道结构的减振降噪技术[J]. **噪声与振动控制**,2005,25(4):43-44.
- [4] 翟婉明,蔡成标,王开云.轨道刚度对列车走行性能的影响[J]. **铁道学报**,2000,(6):80-83.
- [5] 王平,徐金辉,汪力等.轨道刚度对车辆-轨道系统频率响应的影响[J]. **铁道工程学报**,2014(9):46-52.
- [6] 铁道部. GB5599-1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京:中国标准出版社,1987.
- [7] 中国船舶工业声学振动仪器检测中心. 南京地铁机场线压缩型减振扣件在线性能测试报告[R]. 上海:中国船舶重工集团公司第七一一研究所,2015.