

文章编号:1671-8879(2018)02-0112-08

一种基于心理声学品质和调制频率的 车窗电机检测方法

易子馥,谭建平

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室,湖南 长沙 410083)

摘 要:为保证车窗电机出厂前声品质和性能达到要求,提出了基于心理声学参量和调制频率的车窗电机检测方法。基于传统的心理学客观参量模型计算正常电机和故障电机声音样本的响度、粗糙度、尖锐度,基于修正的模型计算其尖锐度值,并通过主客观评价试验分析正常电机和故障电机的响度、粗糙度、尖锐度、修正后尖锐度与主观感受反映的相关性;以响度、修正后尖锐度作为特征向量,将电机分为正常电机和异常噪声电机,在此基础上为了诊断异常噪声电机的故障类型,加入物理参量调制频率作为预测车窗电机故障类型的特征量;最后,构建附加动量法优化的 BP 神经网络分类器对电机进行分类,通过试验验证优化的神经网络分类器。研究结果表明:正常电机与故障电机的响度和修正后尖锐度值存在明显差别,响度和修正后尖锐度与人的主观心理一致性较好,一致性系数达 0.8 以上;碳刷-换向器缺陷的电机噪声频率在 80~100 Hz,蜗杆-齿轮缺陷的电机噪声频率在 20~40 Hz,而正常电机的噪声频率在 100 Hz 以上,调制频率可作为检测电机故障类型的特征量;优化的神经网络分类器对车窗电机的分类准确率达 90% 以上,且与传统 BP 神经网络分类器相比其准确率更高和耗时更少。

关键词:汽车工程;车窗电机检测;响度;修正尖锐度;主客观评价;调制频率;BP 神经网络优化
中图分类号:U463.853 **文献标志码:**A

A method of window motor detection based on psychological acoustic quality and modulation frequency

YI Zi-kui, TAN Jian-ping

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

Abstract: In order to ensure the sound quality and performance of the window motor before leaving the factory, the method of window motor detection based on the psychoacoustic parameters and modulation frequency was put forward. Based on the traditional psychology objective model of, the loudness, roughness and sharpness of the sound samples of the normal motor and fault motor were calculated. The sharpness was calculated based on the modified

收稿日期:2017-10-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2005CB057305);

高性能复杂制造国家重点实验室自主探索基金项目(ZZYJKT2016-07)

作者简介:易子馥(1983-),湖南长沙人,工学博士研究生,E-mail:18692200622@163.com。

通讯作者:谭建平(1963-),湖南攸县人,教授,博士研究生导师,E-mail:jptan@163.com。

model, and the correlation between the loudness, roughness, sharpness, corrected sharpness and subjective perception of the normal motor and fault motor was analyzed through subjective and objective evaluation experiments. The motor was divided into normal motor and abnormal noise motor by using the loudness and corrected sharpness as feature vectors. On this basis, the modulation frequency of physical parameters was added as the characteristic quantity to predict the fault type of the vehicle window motor in order to diagnose the fault type of the abnormal noise motor. Finally, the BP neural network classifier optimized by the additional momentum method was constructed to classify the motor, and the optimized neural network classifier was verified by experiments. The results show that there are obvious differences between the loudness and the corrected sharpness of the normal motor and fault motor. The loudness and corrected sharpness have good consistency with people's subjective psychology, and the consistency coefficient is more than 0.8. The frequency of motor noise of carbon brush-commutator defect is 80 to 100 Hz, the motor noise of worm-gear defect is 20 to 40 Hz, while the noise of normal motor is above 100 Hz. The modulation frequency can be used as the characteristic quantity to detect the fault type of motor. The classification accuracy of the optimized neural network classifier for vehicle window motor is more than 90%, and it has higher accuracy and less time consumption compared with the traditional BP neural network classifier. 5 tabs, 10 figs, 20 refs.

Key words: automobile engineering; window motor detection; loudness; fixed sharpness; subjective and objective evaluation; modulation frequency; optimization of BP neural network

0 引言

随着中国汽车工业的迅猛发展,汽车的 NVH (噪声、振动和声振粗糙度)特性已成为衡量车辆品质的重要指标。车内噪声是影响乘员的舒适性、听觉损害程度、语言清晰度以及对车外各种音响讯号识别能力的重要因素,因此车内声音的品质成为人们评价和选购汽车的重要因素之一^[1-2]。汽车车窗升降电机作为最常用的车用电机,其工作位置靠近驾驶人和乘客。车窗升降电机内部缺陷会导致运行时异常噪音,影响车内声学舒适度,而且影响电机使用寿命。为确保产品质量、减少和杜绝噪声不合格的电机流向客户,车窗升降电机在出厂前需要依据国家标准进行 100% 的异常噪音检测。目前,中国各大电机生产厂商普遍采用人工听诊方法,即凭借有经验的电机噪音检测员用耳朵听电机运转时声音的大小及尖锐程度来判断电机是否存在异常噪音。如“吱吱”声通常表征电机存在碳刷-换向器缺陷,“咕噜咕噜”声通常表征电机存在蜗杆-齿轮缺陷。该方法具有诊断效率低,检测准确率低的缺点。

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,并被有效地应用于柴油机辐射噪声、车内噪声等的预测、分类与评价中^[3-4]。

典型的基于心理声学的噪声分类评价方法以响度、尖锐度、粗糙度等客观心理声学参量为特征值,通过构建合理的分类模型进行评价^[5-6]。电机的故障诊断可以通过电机运行的声信号,振动信号,热信号以及综合信号分析实现^[7-10]。在车窗电机检测过程中,单纯使用心理声学参量保证噪声符合人的心理效应,但是无法有效区分正常电机和故障电机,并且对于不同类型缺陷的电机区分效果有限。为实现车窗电机出厂的全面评价,一方面需根据车窗电机声音信号特点对参量进行修正,并以主观评价试验验证其有效性;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。

不同车窗电机结构和物理参数存在差异,导致噪声特征不同,需要借助分类模型实现噪声分类评价^[11]。常用的噪声品质评价模型大多基于线性回归模型得到定量的预测、分类和评价结果^[12]。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神经网络机器学习方法构建分类模型用于噪声分类评价^[13-16],并取得较好的应用效果。神经网络算法在异常噪声样本数量足够大的情况下可以自学习,提高判断准确率,但是样本数量的增加会导致 BP 神经网络学习和判断的速率下降、训练时间增长,影响系统的检测时效性。也

有学者对 BP 神经网络进行了改进^[17-19],提高了网络的收敛速度,降低了训练误差。

本文以某车窗电机生产厂生产数据为样本,针对现有车窗电机检测不能完全反映人的主观感受,检测效率和准确率低的问题,提出一种以修正的客观心理声学参量和普通物理参量为特征值,以附加动量法改进的 BP 神经网络为分类器的车窗电机检测方法,使得噪声评价符合人的主观感受,且能够对电机的故障及故障类型具有较高的分类效率和准确率。

1 车窗电机噪声分类评价原理

博世车窗电机生产厂的统计数据显示,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,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。图 1 为车窗电机噪声分类评价方法的流程,可大致分为如下 3 个部分。

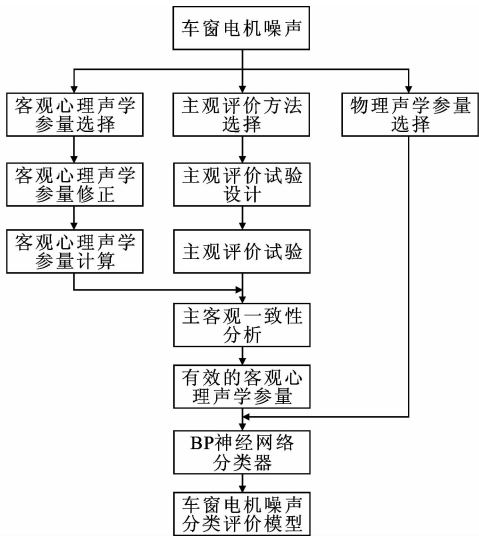


图 1 车窗电机噪声分类评价方法的流程

Fig. 1 Flow of classification and evaluation process of window motor noise

(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试验,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车窗电机分类评价模型。

(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,构建并优化基于 BP 神经网络的车窗电机噪声分类评价模型。

2 客观参量计算

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 N_s 可通过激励级计算得到

$$N_s = N'_0 \left(\frac{E_{TQ}}{sE_0} \right)^k \left[\left(1 - s + \frac{sE}{E_{TQ}} \right)^k - 1 \right] \left(\frac{S_{one}}{B_{ark}} \right) \quad (1)$$

式中: E_{TQ} 为安静听阈激励级; E_0 为参考声强 $1 \times 10^{-12} \text{ w/m}^2$ 时的激励级; E 为经过外中耳传递的特征频带声压级; S_{one} 为响度; B_{ark} 为临界边带,本文中取 $1 \sim 24 \text{ Bark}$ 。 N'_0 为参考特征响度,当 $N'_0 = 0.08$ 时, $s = 0.5$, $k = 0.23$, 当 $N'_0 = 0.0635$ 时, $s = 0.25$, $k = 0.25$ 。

对特征响度在整个特征频带域内积分,即可获得总响度 N 。对测试样本的声音信号进行响度值计算,可得响度的分布如图 2 所示。由图 2 可知,故障电机的噪声响度明显高于正常电机的响度。

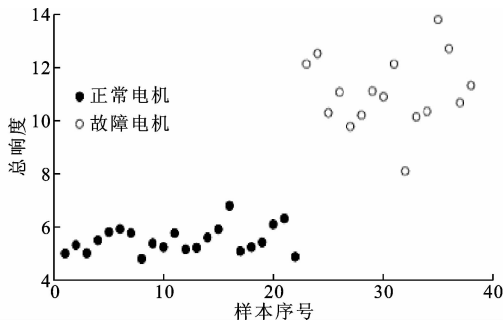


图 2 响度分布

Fig. 2 Distributions of loudness

2.2 粗糙度计算

粗糙度与抖动度可反映人耳对声音调制程度的感受。粗糙度适用于评价调制频率 $20 \sim 200 \text{ Hz}$ 的声音,可反映音频信号的调制幅度大小、调制频率分布情况等特征;抖动度适用于评价调制频率为 20 Hz 以下声音的感受。使用 Hilbert 变换对电机噪音进行包络解调发现电机噪声的调制频率在 100 Hz 附近,故车窗电机噪音体现粗糙度。采用 Zwicker 模型对测试声音样本粗糙度 R 进行计算

$$R = 0.011 \frac{f_0 f_{mod}}{f_{mod}^2 + f_0^2} \int_0^{B_{ark}} \Delta L_E(z) dz \quad (2)$$

式中: f_{mod} 为调制频率; f_0 为调制基频,取值为 70 Hz ; z 为特征频带率; $\Delta L_E(z)$ 为激励级的变化

量, $\Delta L_E(z) = 20 \lg \left(\frac{N'_{\max}}{N'_{\min}} \right)$, N'_{\max} 、 N'_{\min} 分别为参考特征响度的极大值、极小值。

根据式(2)计算测试样本声音粗糙度分布如图 3 所示。由图 3 可知,故障电机的噪声粗糙度与正常电机的粗糙度差异不显著。

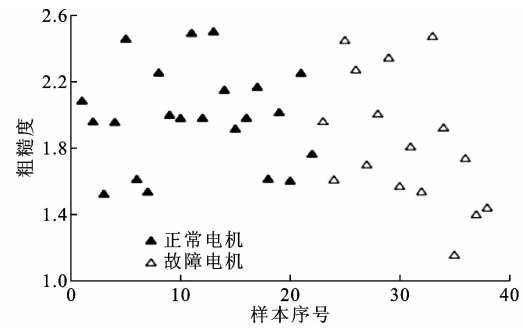


图 3 粗糙度分布
Fig. 3 Distributions of roughness

2.3 尖锐度计算及模型修正

尖锐度反映声音尖锐刺耳的感受,Zwicker 模型的尖锐度 S 计算式为

$$S = C \frac{\int_0^{B_{\text{ark}}} N_s(z) z g(z) dz}{N} \quad (3)$$

式中: $C=0.11$ 为比例系数; $g(z)$ 为加权因子,常用的加权因子如下

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 16 \\ 0.066e^{0.171z} & z > 16 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)计算的尖锐度值分布如图 4 所示。由图 4 可知,正常电机与故障电机的尖锐度值分布无明显区别。

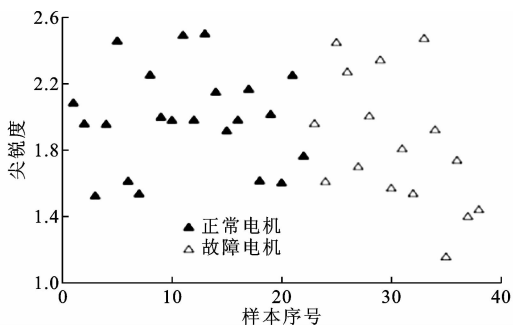


图 4 修正前尖锐度分布
Fig. 4 Distributions of sharp degree before correction

尖锐度值分布特点与主观感受存在不一致的问题,明显存在尖锐刺耳声音的噪声电机样本在尖锐度指标上与正常电机基本一致,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,通过修正加权因子用于强调特征响度中对尖锐刺耳感

受的贡献。

分别测试 7 台正常电机、15 台碳刷-换向器噪声电机、10 台蜗杆-齿轮噪声电机声音样本的特征响度和响度,进行标准化处理,并以其平均值作为该类电机噪声的标准化特征响度。3 类电机噪声的标准化特征响度如图 5 所示。

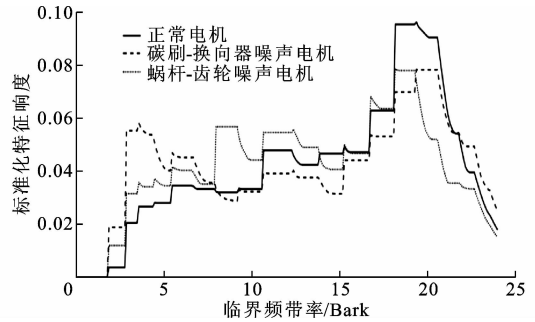


图 5 正常电机与不同故障电机标准化特征响度对比
Fig. 5 Comparisons of standard loudness of normal motor and motor with different fault

由图 5 可知,在 2~10 Bark 的临界频率率范围内,碳刷-换向器噪声电机与蜗杆-齿轮噪声电机的特征响度显著高于正常电机,而在其他临界频率率时则不具有共性差异。

因此,可假设碳刷-换向器噪声和蜗杆-齿轮噪声的尖锐刺耳特点是由 2~10 Bark 内的差异造成的。根据这一假设,针对式(4)中的加权因子无法满足强调 2~10 Bark 内特征响度对尖锐刺耳感受的贡献,提出一种形如窗函数的新的加权因子 $g(z)$,如式(5)所示,对尖锐度模型进行修正, a 值用以强调这一成分对尖锐度的贡献,即

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z < 2 \\ a & 2 \leq z \leq 10 \\ 1 & z > 10 \end{cases} \quad (5)$$

通过修正后尖锐度计算声音样本的尖锐度值见图 6。由图 6 可知,正常电机和故障电机的修正后尖锐度参量值具有明显差异,能够作为评价电机是否故障的客观参量。

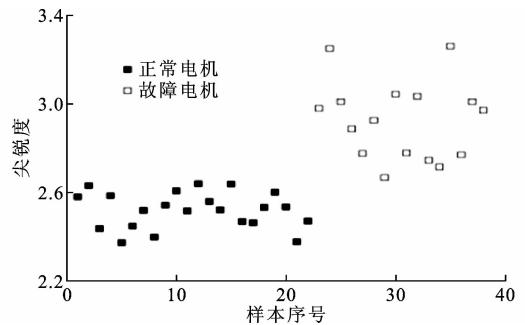


图 6 修正后尖锐度分布
Fig. 6 Distributions of sharp degree after correction

3 主客观评价及相关分析

选择 20 名受试者组成评审团进行主观评价试验,包括 7 名女性,13 名男性,年龄为 21~23 岁,无听觉系统疾病。测试样本为电机噪声样本库中的 38 个电机空载运转噪声,其中 1~22 号为正常电机,23~38 号为故障电机。

3.1 主观评价与试验

3.1.1 主观评价方法选择

主观评价用于判断车窗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。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。具体步骤:①建立主观评价语义对和赋值表,根据响度、尖锐度、粗糙度 3 个客观参量,建立用于描述噪声特征的 3 个主观评价语义对,分

别为响亮-柔和、尖锐刺耳-沉闷嘈杂-清晰,并建立相应的语义赋值表,以响亮-柔和语义对为例,赋值如表 1 所示;②评审团声学训练;③噪声样本预处理,使用 CoolEdit 软件设置每一声音样本时长均为 10 s;④第 1 次听音;⑤根据听音反馈,选择每个语义对极端样本;⑥第 2 次听音;⑦评审团打分。

表 1 主观评价语义细分与赋值

Tab. 1 Semantic segmentation and assignment of subjective assessment

语义对	响亮-柔和				
语义细分	非常	有些	一般	有些	非常
赋值定义	2	1	0	-1	-2

3.1.2 车窗电机噪声主观评价试验

响亮-柔和语义、尖锐刺耳-沉闷语义、嘈杂-清晰语义主观评价结果如图 7 所示。

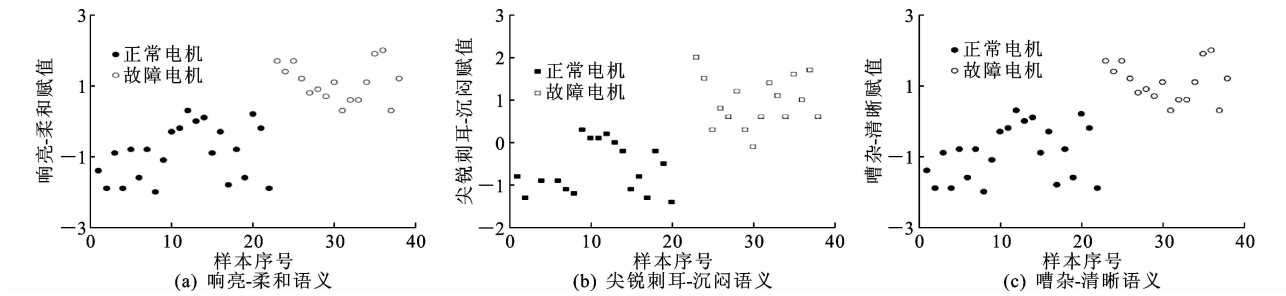


图 7 主观评价结果

Fig. 7 Subjective evaluation results

由图 7 可知:故障电机噪声给评审团带来显著的响亮与尖锐刺耳感受;但除个别电机噪声外,正常电机与故障电机在嘈杂-清晰语义对的主观评价结果差异并不显著。

3.2 主客观评价结果分析

为确保客观心理声学参量在噪声评价中的有效性,根据主观评价试验结果与客观参量计算结果,采用计权一致性系数检验主客观评价的一致性,结果如表 2 所示。

表 2 主观与客观评价结果相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of subjective and objective evaluation results

客观参量 与主观评价	响度与响 亮-柔和	传统尖锐 度与尖锐 刺耳-沉闷	修正后尖锐 度与尖锐 刺耳-沉闷	粗糙度与 嘈杂-清晰
相关系数	0.858 6	-0.464 5	0.819 2	0.277 3

由表 2 可知,响度与响亮-柔和语义对相关系数达 0.858 6,修正后尖锐度与尖锐刺耳-沉闷语义对相关系数达 0.8192,故选择响度与修正后尖锐度指

标作为车窗电机主客观心理声学的评价标准。

4 物理声学参量选择

故障源往往对信号起到调制作用^[9]。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。采用 Hilbert 解调法求得原始信号的解析信号,并对解析信号求包络谱即可得到调制频率。对 32 台车窗电机噪声样本进行解调(其中 7 台正常电机、15 台碳刷-换向器噪声电机、10 台蜗杆-齿轮噪声电机),得到调制频率分布如表 3 所示。

表 3 不同类型电机噪声调制频率范围

Tab. 2 Frequency ranges of different types motor noise

电机类型	正常电机	齿轮噪声	碳刷噪声
频率/Hz	105~112	30~35	90~107

由表 3 可知,蜗杆-齿轮噪声电机的调制频率与其他 2 种噪声调制频率差别较大,碳刷-换向器噪声电机调制频率略小于正常电机的调制频率,可将调制频率作为辨识电机故障类型的特征值。

5 基于附加动量法的 BP 神经网络的分类评价

5.1 预测模型

为克服 BP 算法陷入局部极值、学习过程缓慢的问题,采用附加动量法使 BP 神经网络训练时从局部极小值中跳出,减少训练过程局部收敛的情况,同时提高学习过程收敛速度。对权值进行附加动量优化如下

$$\omega(k)=\omega(k-1)+\Delta\omega(k)+\alpha[\omega(k-1)-\omega(k-2)]$$
 (6)

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

按照图 8 中的 BP 神经网络模型建立流程。根据车窗电机噪声评价参量(响度、修正后尖锐度、调制频率),建立基于附加动量法的 BP 神经网络分类器。

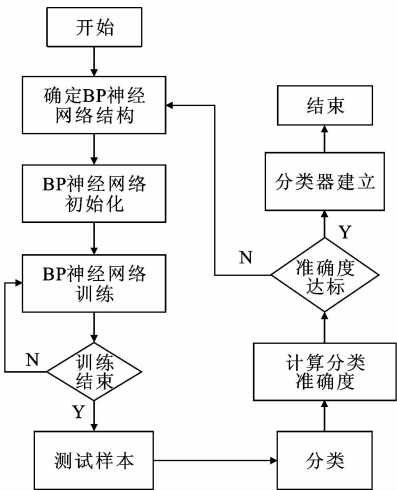


图 8 BP 神经网络分类器建立流程
Fig. 8 Flow of BP neural network

5.2 分类器试验

试验采用型号为 FPC3 12V F00S1W2014 的车窗升降电机,选取 100 台正常电机,40 台电机不作任何处理,40 台电机制造碳刷-换向器噪音的故障,20 台电机制造蜗杆-齿轮噪声的故障,部分故障如图 9 所示。根据车窗电机噪声来源设计了故障及故障类型,如表 4 所示。

5.2.1 试验过程及设备

根据试验要求设计电机噪声测试试验台,如图 10 所示。试验步骤如下。

(1)噪声样本采集和预处理。采用传声器在全消音时采集电机运行的声音信号,用最大最小法对噪声样本进行数据预处理。

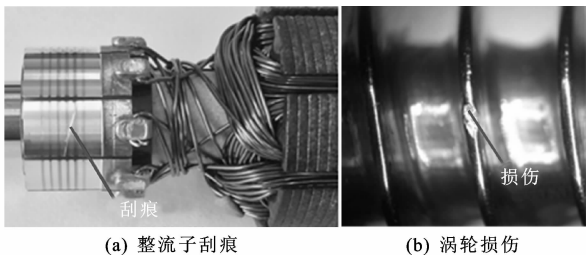


图 9 部分人为制造故障
Fig. 9 Part of artificial fault

表 4 故障及电机数量分布

Tab. 4 Failure and motor quantity distributions

噪声类型	噪声来源	故障设置	规范值/ μm	调整值/ μm	电机数量
碳刷-换向器噪声	撞击	调整整流子片的高度差	0~2	2~3	20
	摩擦	调整整流子粗糙度	3~6	7~8	20
蜗杆-齿轮噪声	啮合不良	齿轮跨球距(MDK)不良	10 833~11 083	11 110~11 120	10
	啮合面损伤	齿面刮痕	没有碰伤	明显碰伤	10

(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;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;隐含层节点数设定为 3。

(3)软件环境。试验平台为 Microsoft Windows 10 64 bit 下的 MATLAB R2014b,使用自主编写的 MATLAB 脚本进行分类器训练与测试,将 60% 的电机用于神经网络的训练,40% 电机用于测试。

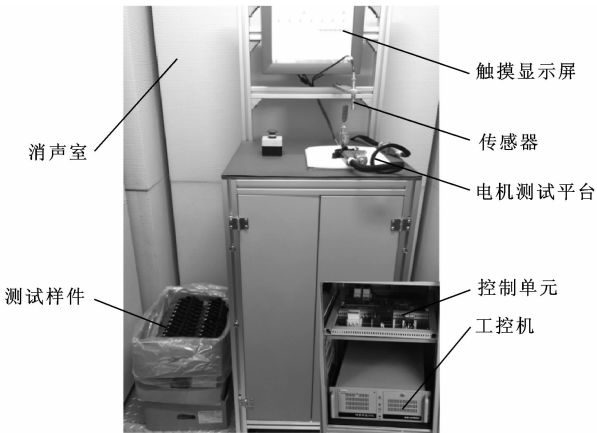


图 10 试验系统

Fig. 10 Experimental system

5.2.2 试验结果分析

使用传统 BP 算法与附加动量法优化的 BP 算

法(改进的 BP 算法)的分类器模型对比分类准确率和耗时指标,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,对每种分类器模型分别进行 5 次训练和测试,结果如表 5 所示。

表 5 传统 BP 算法与改进的 BP 算法的对比结果
Tab. 5 Comparisons of traditional BP algorithm with improved BP algorithm

指标		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
改进的 BP 算法	准确率/%	95	95	90	100	100
	耗时/s	1.817	1.729	1.710	1.884	1.718

由表 5 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;使用改进的 BP 算法的分类器模型在 5 次训练中准确率均保持在 90%以上,且耗时比传统 BP 算法减少约 0.3 s。

6 结 语

(1)本文以 FPC3 12V F00S1W2014 型车窗电机为研究对象,基于客观心理声学参量评价异常电机噪声的方法,提出了采用响度和修正的尖锐度对车窗电机噪声进行评价的方法。通过试验验证了响度与响亮-柔和主观感受、修正后尖锐度和尖锐刺耳-沉闷关系,主客观评价一致性系数均在 0.8 以上,基本能准确反映主观感受并用于车窗电机的噪声评价。

(2)为保证电机质量,提出了基于心理声学参量(响度、修正尖锐度)和物理参量(调制频率)的多特征值车窗电机测试方法,保证出厂的车窗电机噪声符合人的心理感受,且内部无缺陷。

(3)构建了基于附加动量法的 BP 神经网络分类器,分类器基于心理声学特征值将电机分为正常噪声电机和异常噪声电机,并将异常噪声电机的故障类型进行分类,以利于故障的排查。试验结果表明,本文算法的分类准确率可达 90%,具有较好的应用价值。

(4)本文方法虽然解决了电机声品质的评价问题,但未考虑现场环境的复杂性,使该方法具有一定的局限性,这是下一步研究的重点。

参考文献:

References:

[1] 申秀敏,左曙光,李 林,等. 车内噪声品质的支持向

量机预测[J]. 振动与冲击,2010,29(6):66-68,236.
SHEN Xiu-min,ZUO Shu-guang,LI Lin,et al. Interior sound quality forecast for vehicles based on support vector machine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(6):66-68,236.
[2] 谭刚平,王登峰,陈书明,等. 车内噪声的声品质优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(增1):51-56.
TAN Gang-ping,WANG Deng-feng,CHEN Shu-ming,et al. Sound quality optimization of vehicle interior noise[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2012,42(S1):51-56.
[3] 徐中明,夏小均,贺岩松,等. 汽车发动机启动声品质评价与分析[J]. 振动与冲击,2014,33(11):142-147.
XU Zhong-ming,XIA Xiao-jun,HE Yan-song,et al. Analysis and evaluation of car engine starting sound quality[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(11):142-147.
[4] 黄海波,李人宪,黄晓蓉,等. 基于 Adaboost 算法的车内噪声声品质预测[J]. 汽车工程,2016,38(9):1120-1125.
HUANG Hai-bo,LI Ren-xian,HUANG Xiao-rong,et al. Sound quality prediction of vehicle interior noise based on Adaboost algorithm[J]. Automotive Engineering,2016,38(9):1120-1125.
[5] 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 Jun-hong,ZHANG Gui-chang,et al. Prediction model for diesel engine noise quality[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(2):159-164.
[6] 张 可,周东华,柴 毅. 复合故障诊断技术综述[J]. 控制理论与应用,2015,32(9):1143-1157.
ZHANG Ke,ZHOU Dong-hua,CHAI Yi. Review of multiple fault diagnosis methods[J]. Control Theory & Applications,2015,32(9):1143-1157.
[7] GERMEN E,BASARAN M,FIDAN M. Sound based induction motor fault diagnosis using Kohonen self-organizing map[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2014,46(1):45-58.
[8] GLOWACZ A. Diagnostics of synchronous motor based on analysis of acoustic signals with the use of line spectral frequencies and K-nearest neighbor classifier[J]. Archives of Acoustics,2014,39(2):189-194.
[9] PICAZO-RODENAS M J,ROYO R,ANTONINO-DAVIU J,et al. Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors; Application to fault diagnosis [J]. Engineering Failure Analysis,

- 2013,35:178-192.
- [10] AGOSTON K. Fault detection of the electrical motors based on vibration analysis[J]. Procedia Technology, 2015,19:547-553.
- [11] 姜吉光,王登峰,苏丽俐,等. 车内噪声品质偏好性主客观评价及相关性分析[J]. 汽车技术, 2012(8): 6-10.
JIANG Ji-guang, WANG Deng-feng, SU Li-li, et al. Subjective and objective evaluation of vehicle interior noise sound quality preference and correlation analysis [J]. Automobile Technology, 2012(8): 6-10.
- [12] 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 Xiang-de, ZHANG Jun-hong, LI Li-shun, et al. Sound quality prediction of diesel engine noise based on regression analysis [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(6): 534-537.
- [13] 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.
- [14] 申秀敏,左曙光,何吕昌,等. 车内噪声声品质的神经网络预测[J]. 声学技术, 2009, 28(3): 264-268.
SHEN Xiu-min, ZUO Shu-guang, HE LU-chang, et al. BP neural network prediction of car interior sound quality[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(3): 264-268.
- [15] 蒋伟康,严莉. 基于神经网络的电机噪声性能在线检测技术研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 51-53, 57.
JIANG Wei-kang, YAN Li. Research on on-line detection technology of motor noise performance based on neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(4): 51-53, 57.
- [16] 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.
- [17] 刘永建,朱剑英,曾捷. 改进BP神经网络在发动机性能趋势分析和故障诊断中的应用[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2010, 34(1): 24-29.
LIU Yong-jian, ZHU Jian-ying, ZENG Jie. Improved BP neural network system for engine performance trend analysis and fault diagnosis[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 34(1): 24-29.
- [18] 汪怡平,谷正气,杨雪,等. 汽车天窗风振噪声数值模拟与控制[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 108-114.
WANG Yi-ping, GU Zheng-qi, YANG Xue, et al. Numerical simulation and control of automobile sunroof buffeting noise [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 108-114.
- [19] 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 Fei-fei, 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.
- [20] 康润程,叶常景,李青林. 汽车声品质主客观评价方法研究[J]. 汽车科技, 2011(3): 57-61.
KANG Run-cheng, YE Chang-jing, LI Qing-lin. Study on the objective and subjective evaluation of vehicle sound quality[J]. Automobile Technology, 2011(3): 57-61.