

一种永磁同步电机声品质主观评价方法研究

王 博¹, 王海文¹, 江祖毅¹, 胡 溧¹, 龚海清²

(1. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 武汉 430065;
2. 博格华纳汽车零部件(武汉)有限公司 工程中心, 武汉 430100)

摘要: 对永磁同步电机的稳态信号声品质进行了分析, 并以声压级、响度、尖锐度、语音清晰度、波动度、粗糙度和音调调度作为评价指标, 建立了永磁同步电机声品质评价体系。采用分组成对比较法进行了主观评价, 通过 Bradley-Terry 算法对评价结果进行了优化处理, 分别搭建多元线性回归预测模型和 MPGA-RBF 预测模型, 通过预留的检验样本对模型进行检验。结果表明, MPGA-RBF 模型能对永磁同步电机声品质评价结果实现准确的预测。

关键词: 永磁同步电机; 主观评价; 声品质预测; 多元线性回归; RBF 神经网络; 多种群遗传算法

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.01.12

Study on Subjective Evaluation Method of Sound Quality for Permanent Magnet Synchronous Motors

WANG Bo¹, WANG Haiwen¹, JIANG Zuyi¹, HU Li¹, GONG Haiqing²

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. Engineering Center of Borg Warner Auto Parts (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430100, China)

Abstract: The sound quality of PMSM steady-state signals was analyzed in this paper. The sound pressure level, loudness, sharpness, articulation index, volatility, roughness and tone scheduling were selected as evaluation indicators and then the sound quality evaluation system for permanent magnet synchronous motors was established. Firstly, the grouped pair-wise comparison method was applied for subjective quality assessment. Afterwards, the evaluation results were optimized by adopting the Bradley-Terry equation. Finally, the multiple linear regression prediction model and the MPGA-RBF prediction model were built respectively and tested using the testing samples. The results show that the MPGA-RBF model can accurately predict the outcomes of the sound quality evaluation for permanent magnet synchronous motors.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; subjective evaluation; sound quality prediction; multiple linear regression; RBF neural network; multi population genetic algorithm

在当前汽车领域, 纯电动汽车发展速度与规模正成逐年上升趋势, 其中永磁同步电机因其弱磁性

能好、输出功率大、输出效率高和输出稳定的优势, 在电驱动系统中被广泛应用^[1-2]。由于永磁同

收稿日期: 2021-03-23 改稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51905389)

参考文献引用格式:

王博, 王海文, 江祖毅, 等. 一种永磁同步电机声品质主观评价方法研究 [J]. 汽车工程学报, 2022, 12(1): 90-97.

WANG Bo, WANG Haiwen, JIANG Zuyi, et al. Study on Subjective Evaluation Method of Sound Quality for Permanent Magnet Synchronous Motors [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(1): 90-97. (in Chinese)



步驱动电机是电动汽车的重要组成部分,其噪声水平直接影响到车内噪声质量,进一步对汽车竞争力产生重要影响^[3-4]。要想抑制电动汽车车内噪声,优化车内噪声声品质,必须对电机噪声特性有所了解。对电机噪声声品质的分析预测和研究成为新能源汽车发展的关键点^[5-6]。

王永超等^[7]以4辆不同类型的纯电动汽车在匀速和缓油门加速工况下电机近场合驾驶员右耳旁噪声采集样本为评价对象,分析了电磁噪声对电动汽车声品质的影响。邱子桢等^[8]对稳态工况下电动汽车驱动永磁同步电机的主观声品质预测模型进行研究,利用多元线性回归法,建立了声品质主客观预测模型。左言言等^[9]以某款混合动力汽车为研究对象,针对其非稳态工况下的噪声声品质进行研究,基于最小二乘支持向量机算法,建立了声品质评价预测模型。莫愁等^[10]采用成对比较法对某混合动力汽车进行主观声品质评价,采用回归分析法和神经模糊逻辑算法建立了主观烦扰度预测模型和声品质等级评价标准。

本文以某型10极60槽永磁同步电机为研究对象,利用Bradley-Terry数学模型对主观评价的条件概率似然度进行最大似然估计^[11],在先验概率的基础上求解出声品质评价结果的最大似然估计值,得到可对声品质定量描述的选择偏好度值,并将该值作为因变量参与声品质预测模型的搭建。以径向基函数(Radical Basis Fuction, RBF)神经网络为非线性逼近函数,通过多种群遗传算法(Multi-Population Genetic Algorithm, MPGA)优化RBF神经网络,建立基于MPGA-RBF神经网络的永磁同步电机声品质主观评价预测模型,再通过预留样本对模型进行检验,发现该模型性能稳定,泛化能力强,预测精度高,可以有效地对永磁同步电机声品质进行预测评价。

1 Bradley-Terry模型简介

设有 n 个体集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,其中个体 $x_i(i=1, \dots, n)$ 在某方面的能力参数值为 γ_i ,令 Y_{ij} 表示集合个体 x_i 与 x_j 相互比较的结果,当个体 x_i 优于

(或不小于) x_j 时,有 $Y_{ij}=1$,反之 $Y_{ij}=0$ 。记 $P(Y_{ij}=1)$ 为 x_i 优于 x_j 的概率, $P(Y_{ij}=0)$ 为 x_i 小于 x_j 的概率,则

$$L_n \frac{P(Y_{ij}=1)}{P(Y_{ij}=0)} = L_n \frac{P(Y_{ij}=1)}{1-P(Y_{ij}=1)} = \gamma_i - \gamma_j \quad (1)$$

即

$$P(Y_{ij}=1) = \exp(\gamma_i - \gamma_j) / [1 + \exp(\gamma_i - \gamma_j)] \quad (2)$$

因此,个体之间比较结果只取决于个体之间的能力参数值之差。考虑到模型的可识别性,取集合中某个个体 x_k 能力参数值为0,即 $\gamma_k=0$,或者取 $\sum_{k=1}^n \gamma_k=0, (k=1, 2, \dots, n)$ ^[12]。记 N_{ij} 为个体 x_i 与 x_j 相互比较的总次数, n_{ij} 为个体 x_i 优于 x_j 的次数,由于每次比较相互独立,即 n_{ij} 服从二项分布 $\text{bin}(N_{ij}, P_{ij})$,则个体能力参数 γ_i 的最大似然值 L 为:

$$L = \prod_{1 \leq i < j \leq n-1} \frac{N_{ij}!}{n_{ij}!(N_{ij} - n_{ij})!} \times \left[\frac{\exp(\gamma_i - \gamma_j)}{1 + \exp(\gamma_i - \gamma_j)} \right]^{n_{ij}} \left[\frac{1}{1 + \exp(\gamma_i - \gamma_j)} \right]^{N_{ij} - n_{ij}} \quad (3)$$

通过最大似然估计法对式(3)进行处理求解,先对式(3)取对数化简,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{N_{ij}!}{n_{ij}!(N_{ij} - n_{ij})!} + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_{ij}(\gamma_i - \gamma_j) - \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n N_{ij} \ln [1 + \exp(\gamma_i - \gamma_j)] \quad (4) \end{aligned}$$

对式(4)通过最大似然法化简得到矩阵:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{e^{\gamma_1 - \gamma_2}}{1 + e^{\gamma_1 - \gamma_2}} + \frac{e^{\gamma_1 - \gamma_3}}{1 + e^{\gamma_1 - \gamma_3}} + \dots + \frac{e^{\gamma_1 - \gamma_n}}{1 + e^{\gamma_1 - \gamma_n}} - \frac{\sum n_{1j}}{\sum N_{1j}} &= 0 \\ \frac{e^{\gamma_2 - \gamma_1}}{1 + e^{\gamma_2 - \gamma_1}} + \frac{e^{\gamma_2 - \gamma_3}}{1 + e^{\gamma_2 - \gamma_3}} + \dots + \frac{e^{\gamma_2 - \gamma_n}}{1 + e^{\gamma_2 - \gamma_n}} - \frac{\sum n_{2j}}{\sum N_{2j}} &= 0 \\ \vdots & \\ \frac{e^{\gamma_{n-1} - \gamma_1}}{1 + e^{\gamma_{n-1} - \gamma_1}} + \frac{e^{\gamma_{n-1} - \gamma_2}}{1 + e^{\gamma_{n-1} - \gamma_2}} + \dots + \frac{e^{\gamma_{n-1} - \gamma_n}}{1 + e^{\gamma_{n-1} - \gamma_n}} - \frac{\sum n_{n-1j}}{\sum N_{n-1j}} &= 0 \\ \frac{e^{\gamma_n - \gamma_1}}{1 + e^{\gamma_n - \gamma_1}} + \frac{e^{\gamma_n - \gamma_2}}{1 + e^{\gamma_n - \gamma_2}} + \dots + \frac{e^{\gamma_n - \gamma_{n-1}}}{1 + e^{\gamma_n - \gamma_{n-1}}} - \frac{\sum n_{nj}}{\sum N_{nj}} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

求解方程组即可以得出每个个体的能力参数值 $\{\gamma_i\}$ 。

2 永磁同步电机噪声采集与处理

以某型10极60槽永磁同步电机为试验对象,通过电机测试台架模拟各种工况,试验主要设备见表1。

表 1 试验仪器设备

编码	主要设备
1	LMS SCADAS Mobile 16通道数据采集分析系统 1套
2	GRAS 系列声压传感器 4个
3	移动数据处理工作站一部
4	前端数据采集线 4根, 通道线 4根, 卷尺 1份, 传感器夹持架 4个, 胶带 1份

为了降低背景噪声的影响, 试验在封闭隔声的室内进行, 并且尽可能减少外部干扰。根据 GB/T 6882—2016^[13] 和 GB/T10069.1—2006^[14] 在电机测试控制台架所能提供的最大安全转速条件下, 确定出的测试电机稳定转速测试范围为 1 000 r/min、2 000 r/min、3 000 r/min、4 000 r/min、5 000 r/min 和 6 000 r/min, 电机转矩测试范围为 35 Nm、70 Nm、105 Nm、130 Nm, 共计 24 个稳态工况。

在 LMS.Test.Lab 声振测试系统下, 通过 LMS SCADAS Mobile 16 通道数据采集前端, 利用 GRAS 声压传感器对噪声进行采集。噪声样本采样率为 12 500 Hz, 频率分辨率为 1 Hz, 采样时长为 30 s, 每个工况信号采集 3 次, 测点布置遵循 5 点测试法, 测距为距离电机外壳 30 cm 处, 采用近场测试。试验台架布置如图 1 所示。

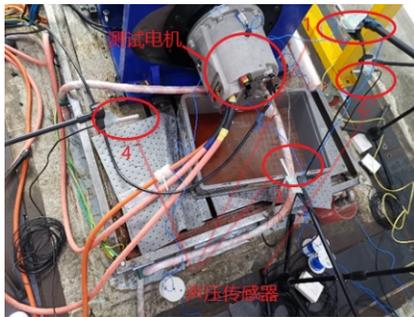


图 1 噪声测试试验布置

去除受到干扰的样本噪声, 为了避免噪声样本时间过长引起听觉疲劳, 导致评价精确度下降, 将用于主观评价的样本信号时长截取为 4 s。使用音频编译软件将噪声样本两两结合, 以便利用成对比较法进行主观评价试验。为了降低样本间后掩蔽效应, 在样本 A 后面插入 2 s 静音^[15]。处理后的成对比较样本信号如图 2 所示。

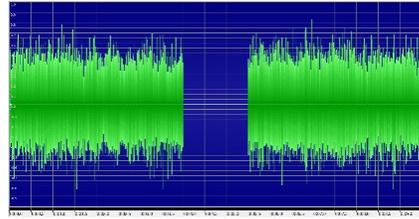


图 2 成对比较样本

3 永磁同步电机声品质主观评价

评审团共招募了 23 名年龄在 20~32 岁听力正常并具有一定声品质主观评价经验的学生, 其中有 19 名男性以及 4 名女性, 通过听力培训使评审团成员熟悉评价流程。

3.1 基于 Bradley-Terry 算法优化成对比较法

采用分组成对比较法进行声品质主观评价试验, 将经过模型计算得到的声品质舒适度感知能力参数值作为改进的主观评价值。为保证评价结果的稳定性, 需要审核评价数据, 使用 Spearman 相关分析法, 如式 (6) 所示, 对每个评价者进行相关分析, 剔除不稳定的评价结果。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: ρ 为 Spearman 相关系数; \bar{x} 、 \bar{y} 为样本数据均值。

然后, 计算每一个样本与其它样本之间相关系数的平均值, 结果见表 2。

表 2 样本间平均相关系数

评审员序号	1	2	3	4	5	6
平均相关系数	0.73	0.74	0.75	0.14	0.69	0.63
评审员序号	7	8	9	10	11	12
平均相关系数	0.51	0.64	0.68	0.65	0.64	0.70
评审员序号	13	14	15	16	17	18
平均相关系数	0.71	0.70	0.74	0.75	0.75	0.71
评审员序号	19	20	21	22	23	
平均相关系数	0.74	0.65	0.70	0.22	0.44	

由表 2 可知, 4 号、7 号、22 号、23 号评审员的平均相关系数小于 0.6, 呈现低相关。剔除这 4 个评价主体。为计算 Bradley-Terry 模型, 对剩余 19 个

评价主体的所有评价样本的序关系频数表进行加总降维^[16]。对单一评价主体加总降维后得到的平均总体见表3。

表3 平均总体

样本	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	...	x_{23}	x_{24}
x_1	-	17	17	15	14	...	19	18
x_2	2	-	9	13	12	...	18	18
x_3	2	10	-	11	11	...	18	19
x_4	4	5	8	-	6	...	18	19
...
x_{21}	2	2	1	4	3	...	17	18
x_{22}	2	2	2	3	5	...	16	18
x_{23}	0	1	1	1	1	...	-	14
x_{24}	1	1	0	0	2	...	5	-

根据平均总体表,样本数为24,评审员19人,所以每个样本评价比较总次数 $N_k=23 \times 19$,表3中的数据是样本 x_i 声品质评价结果优于(不小于) x_j 的得分 n_{ij} 。由于每个评审员的评价结果相互独立,比较结果符合二项分布,所以可以通过 Bradley-Terry 模型建立似然函数,根据式(5)对每个噪声样本声品质进行计算,将先验概率事件主观得分均值转换成后验概率事件声品质舒适度感知能力参数值。为方便数据处理和计算,以样本24(6 400/130 (r·min⁻¹)/Nm)为参考样本(保证模型收敛,设定其声品质舒适度感知能力参数值为0),得到所用样本声品质舒适度感知能力参数值,并用其作为声品质主观评价得分。为便于表示,将噪声样本进行编号,如1 000/35 (r·min⁻¹)/Nm表示为1-35,见表4。

3.2 声品质客观分析

为了更为系统全面地描述人对电机噪声的主观感知,将心理声学 and 物理学参量相结合对电机噪声进行分析评价。本文采用的客观评价参量有声压级 L_p 、响度 N (ISO532B^[17])、尖锐度 S 、粗糙度 R 、波动度 F 、音调度 T 和语音清晰度 A_i ,通过 LMS Test.Lab 的 Acoustic Sound Diagnosis 模块进行计算,结果见表5。

表4 声品质主观评价结果

噪声样本	声品质分值	噪声样本	声品质分值
1-35	4.430	4-35	2.317
1-70	3.921	4-70	2.290
1-105	4.099	4-105	1.640
1-130	3.970	4-130	1.570
2-35	3.410	5-35	1.411
2-70	3.720	5-70	2.198
2-105	3.510	5-105	1.730
2-130	3.180	5-130	0.860
3-35	3.070	6-35	1.645
3-70	2.810	6-70	1.401
3-105	2.319	6-105	0.815
3-130	2.250	6-130	0

4 声品质预测模型搭建

探究声品质主观得分均值和声品质舒适度感知能力参数值对于声品质预测模型的精度差异,采用多元线性回归搭建永磁同步电机声品质预测模型,并对模型预测效果进行对比。为了避免客观参数处于不同数量级带来的影响,对客观参数按式(7)进行按行归一化处理,使数据之间具有可比性。

$$SS = \frac{x(i)}{\sum_1^n x(i)} \quad (7)$$

式中:SS为归一化结果; $x(i)$ 为待归一化数组。

4.1 多元线性回归模型

使用声品质能力参数值与客观评价参数值进行 Pearson 相关性分析,结果见表6。

由表6可知,声压级、响度、尖锐度、语音清晰度与主观评价结果具备较明显的线性关系,可以作为因变量参与到多元线性回归预测模型的搭建。

从噪声样本中随机取5组噪声样本作为模型检验样本:2 000/70 (r·min⁻¹)/Nm, 2 000/130 (r·min⁻¹)/Nm, 3 000/35 (r·min⁻¹)/Nm, 5 000/70 (r·min⁻¹)/Nm, 5 000/105 (r·min⁻¹)/Nm, 剩余样本作为模型的训练样本,将声压级、响度、尖锐度、AI指数、音调度作为模型的自变量,见表7。

表 5 电机噪声信号客观参数

样本序号	声压级 L_p /dB	AI 指数%	波动度 F /vacil	响度 N /sone	粗糙度 R /asper	尖锐度 S /acum	音调度 T /tu
1-35	82.17	5.360	1.120	60.76	0.426	1.800	0.071
1-70	82.85	4.470	1.108	60.94	0.407	1.824	0.075
1-105	83.31	4.860	1.027	62.45	0.431	1.767	0.064
1-130	83.64	4.560	0.992	63.73	0.434	1.736	0.051
2-35	84.30	4.030	0.903	63.96	0.434	2.043	0.080
2-70	84.80	3.910	0.898	64.25	0.454	1.915	0.076
...
5-70	87.76	1.954	0.980	76.63	0.493	2.306	0.088
5-105	87.89	1.920	1.007	77.31	0.492	2.273	0.086
5-130	88.13	1.958	0.995	78.67	0.428	2.256	0.078
6-35	87.86	2.034	0.964	76.78	0.434	2.454	0.116
6-70	88.27	2.022	0.958	77.03	0.397	2.425	0.101
6-105	88.72	1.751	0.980	78.26	0.375	2.334	0.092
6-130	88.69	1.767	1.043	79.08	0.330	2.305	0.083

表 6 声品质能力参数值与客观参数值之间的 Pearson 系数

客观参量	声压级 L_p /dB	响度 N /sone	尖锐度 S /acum	粗糙度 R /asper	AI 指数/%	波动度 F /vacil	音调度 T /tu
相关系数	0.94	0.95	0.87	0.12	0.93	0.03	-0.46

表 7 多元线性回归系数

客观参量	非标准化系数	标准化系数	R^2 (调整后)
(常数)	34.427		0.900
A 声级	-0.252	-0.405	
AI 指数	-0.171	-0.168	
响度 N /sone	-0.144	-0.764	
尖锐度 S /acum	0.229	0.042	
音调度 T /tu	0.043	0.001	

表 8 多元线性回归模型预测结果

样本序号	1-70	1-105	4-70	5-35	6-70
观测值	3.92	4.00	2.05	1.41	1.40
预测值	4.43	4.02	2.08	1.65	1.31
残差	0.510	0.016	0.026	0.241	-0.096
相对误差	13.01%	0.41%	1.25%	17.08%	-6.82%

从表 6~7 求解结果中得出声品质线性回归预测模型，如式 (8) 所示。

$$F = 34.427 - 0.252L_p - 0.171A_l - 0.144N + 0.229A + 0.043T \quad (8)$$

式中： L_p 为声压级； N 为响度； S 为尖锐度； A_l 为语音清晰度； T 为音调度。

将检验样本带入回归预测模型中，进行模型预测精度检验，结果如表 8 和图 3 所示。

由表 8、图 3 和图 4 可知，多元线性回归模型预测平均误差为 9.64%，部分样本预测误差达到 17.06%，预测误差较大，且预测结果不稳定，说明

多元线性回归模型在永磁同步电机声品质预测中无法达到理想的预测效果，原因在于声品质与客观参数之间仅仅靠线性关系进行分析建模还不太全面，还需要考虑非线性关系。

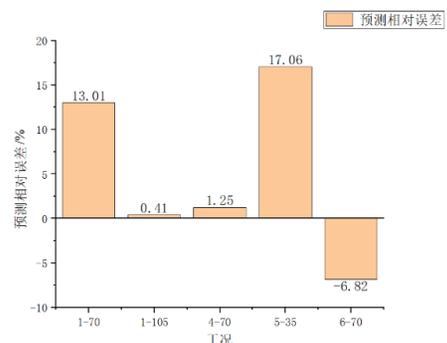


图 3 多元线性回归模型预测相对误差

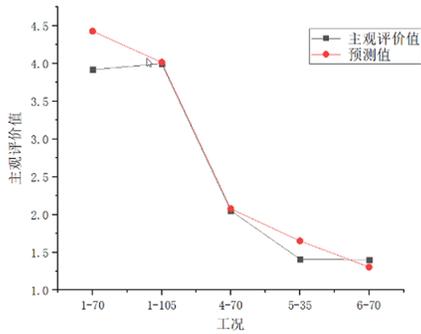


图 4 多元线性回归模型预测结果

4.2 MPGA-RBF 模型

RBF 神经网络是 3 层前向型神经网络模型^[18], 其结构简单, 学习效率高, 且相比于 BP 神经网络可直接由线性方程求解网络权值, 避免了出现局部极值问题^[19], 其全局最有搜索能力, 能实现最佳函数逼近。

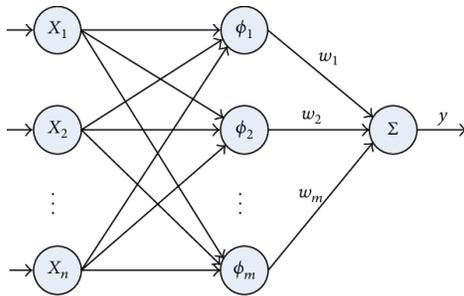


图 5 RBF 神经网络结构

由于采用梯度下降法优化网络参数, 对于参数初始位置的设置具有较大的要求。倘若设置不当, 会大幅度影响网络性能。因此, 为了保证网络的性能必须对网络初始值进行寻优。

MPGA 不仅可以优化 RBF 神经网络基函数中心点以及基函数宽度等网络初始参数, 而且由于 MPGA 是多种群不同参数 (选择、交叉、变异) 共同进化, 通过移民算子实现种群间交流, 通过人工选择算子实现精英个体的筛选, 使 MPGA 避免了经典遗传算法 SGA 出现的易早熟问题。MPGA-RBF 网络结构如图 6 所示。

MPGA-RBF 初始参数设置中, 种群数目设为 10, 种群内部个体总数为 50, 各种群交叉率在区间 [0.7, 0.9] 随机选取, 变异率在区间 [0.001, 0.05] 随机选取, 将归一化处理的训练样本带入 MPGA-RBF 网络模型中进行训练, 使用检验样本对模型训练结果进行检验, 模型运行结果如表 9 和图 7 所示。

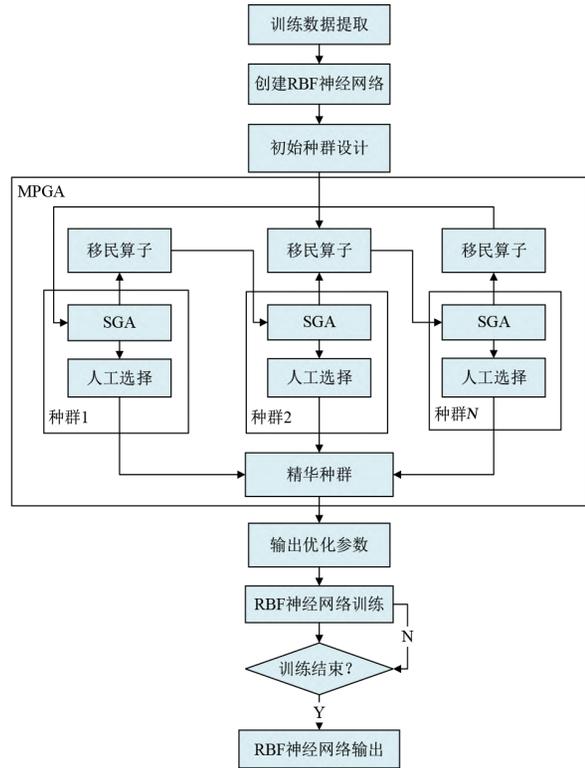


图 6 MPGA-RBF 神经网络结构

表 9 MPGA-RBF 预测结果

样本序号	1-70	1-105	4-70	5-35	6-70
主观分值	3.92	4.00	2.05	1.41	1.40
预测值	3.81	3.86	2.13	1.43	1.34
残差	-0.064	-0.138	0.080	0.016	-0.140
相对误差	-2.94%	-3.45%	3.90%	1.15%	-4.58%

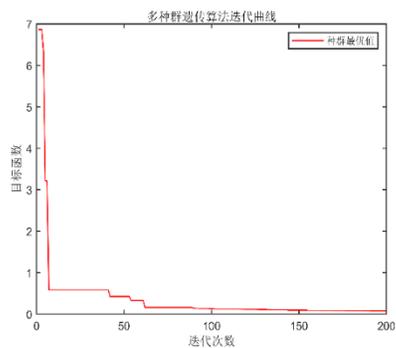


图 7 MPGA-RBF 迭代收敛曲线

遗传算法通过 200 次迭代得到最优函数收敛值为 0.007, 达到了预期收敛值, 且由图 8~9 可知, 该网络模型收敛速度快, 网络预测精度高, 平均误差为 4%, 说明该模型预测精度有了明显的提升, 可以十分精准地实现对永磁同步电机声品质的评价预测。

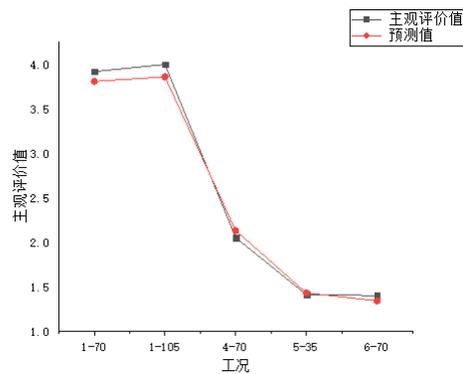


图8 MPGA-RBF 模型预测误差

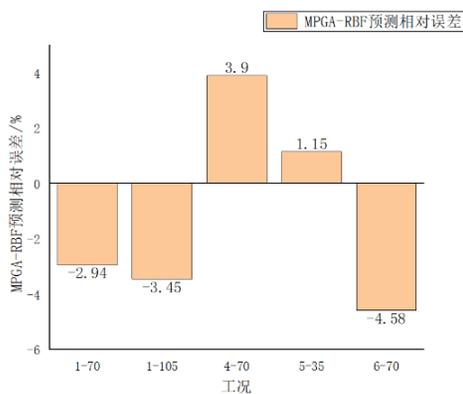


图9 MPGA-RBF 模型预测结果

5 结论

本文针对永磁同步电机台架稳态噪声信号声品

质开展了研究,对电机噪声特性进行了分析,确定了电机噪声成分,并基于 Bradley-Terry 公式对成对比较法评价结果进行处理得到声品质能力参数值。以声压级、响度、尖锐度、音调度、语音清晰度、波动度、粗糙度为指标的客观参量为自变量,分别通过多元线性回归,用 MPGA-RBF 神经网络搭建声品质预测模型。结论如下:

(1) 声压级、响度、尖锐度、音调度、语音清晰度、波动度和粗糙度等客观参量与声品质主观评价结果之间存在不可忽视的非线性关系,仅靠线性关系搭建声品质预测模型无法保证模型的预测精度。

(2) 在评审团成员有限的情况下,采用贝叶斯 Bradley-Terry 公式对主观评价结果进行最大似然估计,将有限样本观测的先验概率事件转变成后验概率事件,可以降低事件观测值与真值之间的误差,提升模型的预测效果。

(3) 综合 RBF 神经网络和 GA 算法的优缺点提出了 MPGA-RBF 神经网络模型。从预测结果中得出,MPGA-RBF 神经网络预测精度达到了 96%,并且具备优良的收敛能力,能有效地对永磁同步电机声品质进行预测评价。

参考文献 (References)

- [1] 方源,章桐,于蓬,等.切向电磁力对电动车动力总成振动噪声的影响分析[J].电机与控制学报,2016,20(5):90-95.
FANG Yuan, ZHANG Tong, YU Peng, et al. Effect of Tangential Electromagnetic Force on Vibration and Noise of Electric Powertrain [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(5): 90-95. (in Chinese)
- [2] 王宇.车用驱动电机声学仿真及声品质优化研究[D].杭州:浙江大学,2020.
WANG Yu. Research on Acoustic Simulation and Sound Quality Optimization of Vehicle Drive Motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [3] LIU Hai, ZHANG Junhong, GUO Peng, et al. Sound Quality Prediction for Engine-Radiated Noise [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56-57: 277-287.
- [4] 邹丽媛,王宏.基于 EEG 的车内噪声评价研究[J].汽车工程,2017,39(12):1425-1430.
ZOU Liyuan, WANG Hong. A Research on the Evaluation of Interior Noise Based on EEG Technique [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(12): 1425-1430. (in Chinese)
- [5] QIAN Kun, HOU Zhichao, SUN Dengke. Sound Quality Estimation of Electric Vehicles Based on GA-BP Artificial Neural Networks [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (16): 5567.
- [6] 刘宁宁,李文静,王岩松,等.声品质主观评价方法对比分析[J].现代制造工程,2016(10):6-11.
LIU Ningning, LI Wenjing, WANG Yansong, et al. Comparative Analysis of Subjective Evaluation Methods of Sound Quality [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(10): 6-11 (in Chinese)
- [7] 王永超,顾灿松,陈达亮.纯电动汽车声品质评价及电磁噪声分析[J].汽车实用技术,2018,44(4):3-6.
WANG Yongchao, GU Cansong, CHEN Daliang. Analysis of Sound Quality and Electromagnetic Noise for Electric Vehicle [J]. Car Practical Technology, 2018, 44 (4): 3-6. (in Chinese)
- [8] 邱子楨,陈勇,康洋,等.电动汽车驱动永磁同步电机声品

- 质预测研究 [J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 146-151.
- QIU Zizhen, CHEN Yong, KANG Yang, et al. Sound Quality Prediction for Permanent Magnet Synchronous Motors Used in Electric Vehicles [J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(2): 146-151. (in Chinese)
- [9] 左言言, 宋文兵, 陆怡, 等. 基于LSSVM-样本熵的车内噪声声品质预测 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 1-7.
- ZHUO Yanyan, SONG Wenbing, LU Yi, et al. Interior Noise Sound Quality Prediction Based on Least Square Support Vector Machine-Sample Entropy [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] 莫愁, 陈吉清, 兰凤崇. 着眼于主观烦扰度的混合动力汽车声品质评价方法研究 [J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1334-1338.
- MO Chou, CHEN Jiqing, LAN Fengchong. A Study on Sound Quality Evaluation Method for Hybrid Electric Vehicles Focusing on Subjective Annoyance [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(11): 1334-1338. (in Chinese)
- [11] 曲皎, 陈嘉钰, 李丹. 基于Bradley-Terry模型的学术期刊影响力分析 [J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 326-331.
- QU Jiao, CHEN Jiayu, LI Dan. Analysis of the Influence of Academic Journals Based on Bradley-Terry Model [J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 326-331. (in Chinese)
- [12] 欧阳祖琛, 杨啟梁, 胡漂, 等. 重型变速箱壳体模态频率激励下声品质预测模型 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(1): 244-249.
- OUYANG Zuchen, YANG Qiliang, HU Li, et al. Sound Quality Prediction of Gearbox Under Modal Frequency Excitation [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(1): 244-249. (in Chinese)
- [13] GB/T 6882—2016. 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 消声室和半消声室精密法 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2016.
- GB/T 6882—2016. Acoustics—Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure—Precision Methods for Anechoic Rooms and Hemi-Anechoic Rooms [S]. Beijing: Standardization Administration of the P.R.C., 2016. (in Chinese)
- [14] GB/T 10069.1—2006. 旋转电机噪声测定方法及限值 第1部分: 旋转电机噪声测定方法 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006.
- GB/T 10069.1—2006. Measurement of Airborne Noise Emitted by Rotating Electrical Machines and the Noise Limits Part 1: Method for the Measurement of Airborne Noise Emitted by Rotating Electrical Machines [S]. Beijing: Standardization Administration of the P.R.C., 2006. (in Chinese)
- [15] 陈冬进, 刘建平. 基于Bradley-Terry模型与层次分析法的一种综合评价方法 [J]. 统计与决策, 2013(3): 81-83.
- CHEN Dongjin, LIU Jianping. A Comprehensive Evaluation Method Based on Bradley-Terry Model and Analytic Hierarchy Process [J]. Statistics and Decision, 2013(3): 81-83. (in Chinese)
- [16] QIAN Kun, HOU Zhichao, SUN Dengke. Sound Quality Estimation of Electric Vehicles Based on GA-BP Artificial Neural Networks [J]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 1-15.
- [17] SEIICHIRO N, SONOKO K, KENJI K, et al. Application of Zwicker's Method (ISO 532B) to Loudness and Timbre Evaluation [C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. USA: Institute of Noise Control Engineering, 1991: 49-52.
- [18] HU Tongyue, FEI Juntao. Adaptive RBF Neural Vibration Control of Flexible Structure [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 7(2): 1-10.
- [19] ZHANG Dawei, LI Weilin, WU Xiaohua, et al. Application of Simulated Annealing Genetic Algorithm Optimized Back Propagation (BP) Neural Network in Fault Diagnosis [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2019, 10(4): 46-49.

作者简介



王博 (1987-), 女, 河南漯河人, 博士, 讲师, 主要研究方向为车身CAD、NVH。

Tel: 13100705169

E-mail: wangbohds@163.com