

基于深度学习的轮胎花纹噪声预报方法研究

项大兵¹, 张春生², 王红彦², 侯丹丹²

[1. 易瑞博科技(北京)有限公司, 北京 100084; 2. 中策橡胶集团有限公司, 浙江 杭州 310018]

摘要: 在进行大量不同花纹轮胎通过噪声试验基础上, 利用图像识别和深度学习建立了轮胎花纹几何结构与轮胎通过噪声试验结果之间的数学模型, 并采用该模型对新设计的轮胎花纹进行通过噪声预测。结果表明: 以1 dB声压级为预测精度时, 模型预测准确度达到83%; 利用花纹图像识别和深度学习理论所建立的轮胎噪声预报数学模型方便可靠, 而且随着试验数据的不断积累和算法的改进, 基于该方法的预报模型精度会进一步提高。

关键词: 轮胎噪声预报; 花纹识别; 深度学习; 神经网络

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: B

文章编号: 1006-8171(2019)08-0503-04

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.08.0503

轮胎花纹形式是决定轮胎通过噪声性能的关键因素。通常情况下, 轮胎花纹都采用经验设计方法, 轮胎通过噪声性能采用试验方法获取, 从而导致花纹设计初期很难对其噪声性能进行有效评估, 具有很大的盲目性。而且轮胎花纹的成型依赖于特定的模具, 通过试验验证来反复修改花纹形式周期长、成本高。因此建立一种花纹噪声快速预报的方法不但可以缩短新花纹开发周期, 而且大大节约开发成本。

由于轮胎花纹形式与噪声性能之间存在着非常复杂的非线性关系, 很难建立完整的物理理论模型。传统的解析计算模型由于对花纹过度简化, 只提取若干简单的设计参数作为输入变量, 很难适用于各种形式复杂的花纹^[1-4]。近年来发展的基于CAE的轮胎噪声预报方法虽然能够考虑复杂的花纹结构^[5-8], 但是计算时间长、耗费资源大, 也很难满足当前企业快速开发产品的要求。深度学习理论近年来在图片识别、人工智能等领域取得了重大突破^[9]。基于深度学习的轮胎花纹噪声预报方法, 并不依赖现有的物理经验模型, 而是对大量的试验数据进行分析总结, 从而找出轮胎花纹形式与通过噪声之间的内在规律, 最终形成完整的预报模型。此外, 深度学习支持多维度变量输

入, 非常有利于复杂的轮胎花纹几何结构参数化, 而且通过学习层次的设置, 对复杂非线性的数学模型也可达到可观的精度。因此, 深度学习可以为轮胎花纹噪声预报提供一种简单可靠的理论方法。

1 轮胎花纹图像识别

1.1 花纹图像二值化

为突出影响轮胎噪声的花纹主要形式特征, 需简化轮胎花纹图像。首先对真实花纹图像进行二值化处理, 即用黑白两色表示花纹块和花纹沟几何特征, 忽略花纹沟深度和沟壁倾斜角度, 只考虑二维几何形状及空间布局关系对噪声性能的影响(见图1)。轮胎花纹的二值图像可由两种方法获取: 一是采用正面拍摄的轮胎花纹图像, 通过专业的图像处理算法, 去除图像上的噪声信号, 从中检测出花纹块和花纹沟特征, 处理成二值图像; 二是从轮胎花纹设计图中进行填充, 将花纹块区域填充为黑色, 花纹沟区域填充为白色, 从而获得轮胎花纹的二值图像。

1.2 花纹参数降维

一般情况下, 花纹二值图像并不能直接用作深度学习的输入参数。主要有以下两点原因: 一是直接获得二值图像像素普遍较高, 以断面宽为315 mm的轮胎花纹图像为例, 生成的胎面花纹二值图像像素一般大于100万, 如果所有像素点数值都用作输入参数, 会导致输入向量维度过大, 无法

作者简介: 项大兵(1989—), 男, 安徽六安人, 易瑞博科技(北京)有限公司总经理, 硕士, 主要从事轮胎噪声理论与仿真优化方法研究。

E-mail: xiangdabing@e-rubber.cn

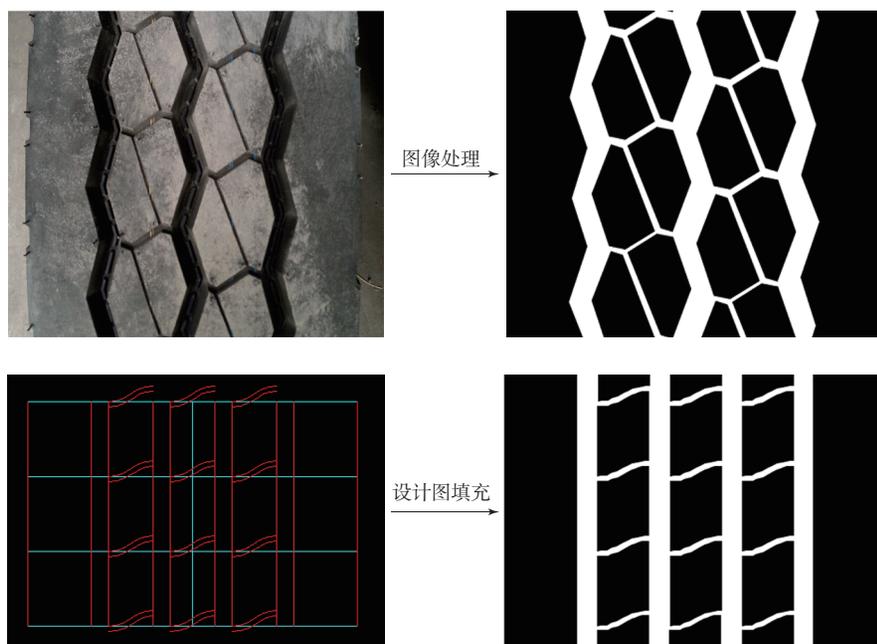


图1 胎面花纹图像二值化

实现模型训练；二是花纹上的节距具有高度的几何相似性，而且影响花纹噪声的主要特征集中于花纹块的边缘处，上述所有的像素点构成的输入向量并非是相互独立的，而是具有一定的相关性，这对于模型输入参数是冗余的。因此在获得输入向量前，需对获得的花纹二值图像进行降维。首先对图像像素进行压缩，为保留花纹上一些较小的特征，按照每个像素尺寸约为1 mm的大小对图像进行压缩；再利用PCA主成分分析法对压缩后的图像进行降维，从中提取区别不同花纹的主要特征参数。本工作对于C3轮胎，共选取了含有90个特征参数的一维向量作为深度学习模型的输入向量。结果表明，对于常见C3轮胎花纹，90个相互独立的参数能够有效地区分出不同花纹的主要特征。

2 构建噪声预报模型

2.1 BP神经网络介绍

构建出表征轮胎花纹的输入向量后，需选择合适的深度学习算法实现模型的训练。为兼顾模型学习效率和准确度，选择了BP神经网络算法作为花纹噪声预报模型的学习算法。BP神经网络是一种按照误差逆向传播训练的多层前馈神经网络（见图2），其以网络误差的平方和为目标函数，采

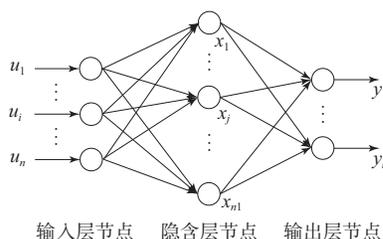


图2 多层BP神经网络拓扑结构示意图

用梯度下降法计算目标函数最小值，实现指定误差精度的学习效果^[10]。

2.2 神经网络构建

多层BP神经网络一般由输入层、隐含层和输出层3个层级构成，每个层级根据需要含有若干个神经元。其中输入层对应需要训练的输入向量(u)，神经元个数为输入向量的维度。隐含层根据训练需要设置向量(x)，可以是单层也可以设置为多层。输出层对应模型的训练结果向量(y)。本研究中输入向量为轮胎花纹主特征向量，共90个元素，故输入层神经元数目为90。理论上，轮胎花纹噪声预报模型为单一目标预测，输出层神经元为1个，即轮胎通过噪声的声压级水平。考虑到常见C3轮胎的通过噪声试验结果在70~79 dB范围内（对于该范围之外的试验样本，将结果归入邻近的边界上进行处理，如试验结果大于79 dB的轮胎设定其训练目标为79），以1 dB为识别精度，模型

输出结果的向量空间可表示为 t :

$$t=[70,71,72,73,74,75,76,77,78,79]$$

在实际训练过程时,需对目标向量进行归一化处理,表达成10阶单位矩阵的形式更有利于模型训练,因此实际训练过程中的目标向量空间为 T ,输出层神经元数目为10。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \cdots & 0 \\ 0 & 1 \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

一般情况下,采用3层学习网络就可以完成任意 n 到 m 维的映射,本研究采用一个隐含层的网络模型,隐含层神经元数目设定为40个。

2.3 训练学习模型

首先将相互独立且无重复的轮胎通过噪声试验数据分为两组,第1组学习样本为42个,第2组测试样本为18个,每个样本由输入值(处理得到的花纹图像特征参数)和输出值(归一化的声压级向量)组成。目前有多种成熟的深度学习框架和算法可供神经网络模型训练使用,本研究采用MATLAB平台下的trainlm作为训练函数,隐含层和输出层传递函数分别采用“tansig”“logsig”函数^[10]。设定学习速率为0.1,误差精度控制为0.000 05,最大学习次数设定为500。模型经过318次学习后收敛至预期精度。

2.4 测试学习结果

模型学习结束后,使用18个测试样本对训练好的预报模型进行检测,测试结果如表1所示。

从表1可以看出,在18个测试样本中,15个样本的预报完全正确,另外3个样本的预报结果有偏

表1 轮胎噪声预报模型测试结果 dB(A)

| 样本编号 | 预报值 | 测试值 | 样本编号 | 预报值 | 测试值 |
|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 1 | 72 | 71 | 10 | 71 | 73 |
| 2 | 72 | 72 | 11 | 72 | 73 |
| 3 | 72 | 72 | 12 | 74 | 74 |
| 4 | 72 | 72 | 13 | 74 | 74 |
| 5 | 72 | 72 | 14 | 75 | 75 |
| 6 | 72 | 72 | 15 | 75 | 75 |
| 7 | 72 | 72 | 16 | 76 | 76 |
| 8 | 73 | 73 | 17 | 77 | 77 |
| 9 | 73 | 73 | 18 | 78 | 78 |

差,总体预报准确率达到83%。对于测试样品所呈现出的预测误差,主要有以下三方面的原因:

(1)对轮胎花纹图像二值化处理过程中忽略了花纹沟的深度及其不同节距排列方式,而这类参数对轮胎花纹噪声的影响具有一定权重;(2)在图像压缩过程中,采用PCA主成分分析法提取的轮胎花纹主要特征参数有待进一步优化;(3)训练模型使用的测试样本数目较少,本研究中模型输入参数为90维,而学习样本只有42个,无法完全覆盖所有输入参数特征。按每个特征最少3个变量计算,对于90维度的输入向量,学习样本数目应大于270个。

3 噪声预报模型在新花纹开发中的应用

新花纹设计过程中,使用本研究的轮胎噪声预报模型可以对花纹噪声做出适当评估,并从中选择出低噪声的花纹方案。对某款275/70R22.5轮胎及其两款改进花纹进行噪声预报,不同方案花纹二值图像如图3所示,噪声预报结果如表2所示。

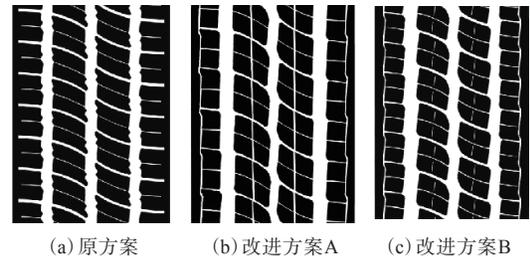


图3 不同方案花纹二值图像

表2 不同花纹方案噪声预报结果 dB(A)

| 项目 | 模型预报结果 | 通过噪声测试结果 |
|-------|--------|----------|
| 原方案 | 74 | 74 |
| 改进方案A | 72 | 72 |
| 改进方案B | 74 | 74 |

从图3和表2可以看出,两种改进方案较原方案的花纹形式及外观相差不大,根据经验较难分辨其噪声性能优劣,采用本文建立的预报模型对其噪声预报可知改进方案A的噪声性能要明显优于原始设计方案以及改进方案B。完成上述新方案A和B样胎试制并进行测试后,发现轮胎花纹噪声预报结果与试验结果较为吻合。通过设计初期的优选可有效提高新花纹的开发效率,降低开

发成本。

4 结论

由于轮胎花纹的各项设计参数相互耦合、互相影响,而且对轮胎噪声性能的影响呈现出非独立的特点,传统解析方法直接采用简单的花纹设计参数来预测轮胎噪声很难满足复杂花纹的情况。而BP神经网络有着很强的非线性模式识别能力,可以通过对试验数据大规模学习后,自行定义和识别影响轮胎噪声的花纹参数及其影响权重。

利用BP神经网络构建的轮胎花纹噪声预报模型可以有效地对新设计轮胎花纹噪声进行评估,精度高且速度快,有利于新产品开发过程中的花纹优化迭代,提高了开发效率。

参考文献:

[1] Hayden R E. Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface[J]. The Journal of the Acoustical Society of

America, 1971, 50(1A): 113.

[2] 陈理君, 杨立, 钱业青, 等. 轮胎花纹噪声的发声模型[J]. 轮胎工业, 1999, 19(10): 599-602.

[3] 于增信. 轮胎噪声机理与仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

[4] 朱家顺, 葛超, 张晓鹏, 等. 基于TTA噪声数据库的花纹噪声仿真分析[J]. 轮胎工业, 2018, 38(6): 323-327.

[5] 冯希金, 危银涛, 项大兵, 等. 基于MLE方法的滚动轮胎冲击振动噪声仿真分析[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(4): 20-24.

[6] 王鹏斌. 道路/轮胎泵气噪声的流固耦合分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.

[7] 项大兵. 轮胎滚动噪声三维仿真的MLE方法[D]. 北京: 清华大学, 2015.

[8] 王琦, 翟辉辉, 周海超, 等. 带束层结构参数对轮胎振动噪声的影响[J]. 橡胶工业, 2018, 65(5): 490-494.

[9] Ian G, Yoshua B, Aaron C. 深度学习[M]. 赵申剑, 译. 北京: 北京人民邮电出版社, 2017.

[10] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB神经网络43个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.

收稿日期: 2019-02-08

Tire Pattern Noise Prediction Based on Deep Learning

XIANG Dabing¹, ZHANG Chunsheng², WANG Hongyan², HOU Dandan²

[1. E-Rubber Technology (Beijing) Co., Ltd, Beijing 100084, China; 2. Zhongce Rubber Co., Ltd, Hangzhou 310018, China]

Abstract: Based on a large number of tire noise testing with various tread pattern, a mathematical model between the tire pattern geometry and tire noise level was developed using image recognition and deep learning technology, and the noise level of the new tire pattern was predicted by this model. The results showed that the model prediction accuracy reached 83% when the resolution was 1dB. This model was reliable and convenient for application, and the prediction accuracy would be constantly improved with the accumulation of more testing data and improvement of the algorithm.

Key words: tire noise prediction; pattern image recognition; deep learning; neural network

一种新能源汽车所使用的高抓地力的真空轮胎

由南京菱亚汽车技术研究院申请的专利(公开号 CN 109572329A, 公开日期 2019-04-05)“一种新能源汽车所使用的高抓地力的真空轮胎”,包括轮胎趾口与胎侧,胎侧位于轮胎趾口的上端外表面,胎侧上端外表面固定连接胎肩,胎肩上端固定连接胎冠,胎冠上端外表面设置胎面,胎面内侧下端表面设置胎面底胶与胎冠保护层,

且胎冠保护层位于胎面底胶的下端外表面。本发明轮胎能够通过菱格纹上的四边凸起完成对土质路面的防滑效果,斜条纹在菱格纹的基础上提高了二次附着力,即使是泥泞的路面,也能够保证较大的抓着力,胎冠保护层强度高、不易拉伸,保证了外胎面的接地面积基本保持不变,且能够使胎侧不易破裂和变形。

(本刊编辑部 储 民)