

轮胎花纹噪声仿真与优化系统软件设计

陈理君¹, 钟克洪¹, 李海涛¹, 张晓红¹, 杨光大²

[1. 武汉工业大学 自动化研究所, 湖北 武汉 430070; 2. 上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司, 上海 200082]

摘要:从软件实现的角度阐述了构建轮胎花纹噪声仿真与优化系统(TPN-ODS)的整体思路,分析了系统的结构及其功能分布,并分别从轮胎花纹噪声仿真分析、噪声评判、缺陷诊断和低噪声优化4个方面阐述了系统的具体实现。表明 TPN-ODS 可成为轮胎花纹低噪声设计及研究和开发轮胎新产品的有力辅助工具。该系统已达到工程实用水平。

关键词:轮胎;花纹噪声;仿真;优化;系统设计

中图分类号: TQ336.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2000)04-0199-05

近年来,一些汽车生产厂家在选用配套轮胎时,已将噪声大小列为轮胎质量的主要性能指标。我国轮胎生产厂家送验的应征方案中,噪声性能指标与美国和西欧的相关标准有一定差距。部分生产厂家为了生产低噪声轮胎,需一次次地把设计方案或手工所刻花纹轮胎样品送往国外的有关测试中心仿真测试,资金投入高,而且费时,严重影响了轮胎新产品的开发周期和成功率。

鉴于这种形势,我们与轮胎生产厂家合作,研究开发出轮胎花纹噪声仿真与优化系统(简称 TPN-ODS)。该系统的设计是建立在轮胎花纹噪声发声机理的理论基础之上^[1~3],根据轮胎花纹噪声数学物理模型和评判标准,编制了应用程序系统,从而实现了轮胎花纹噪声微机仿真分析、噪声评判、低噪声缺陷诊断和低噪声优化一体化构架操作。该系统适用于轮胎生产厂家和轮胎研究部门对新设计的轮胎花纹方案进行噪声仿真分析检测、优先排队、低噪声缺陷诊断及其优化设计,是低噪声轮胎研究和开发强有力的通用辅助工具。

1 系统设计的整体构思

TPN-ODS的整体运作流程如图1所示。

作者简介:陈理君(1938-),男,上海人,武汉工业大学教授,长期从事噪声控制、模糊控制方面的研究与教学工作。

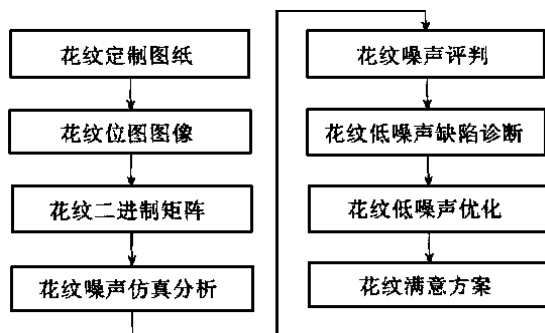


图1 TPN-ODS整体运作流程图

轮胎生产厂家或轮胎花纹研究部门轮胎花纹方案设计完毕,将其绘制成轮胎花纹方案图纸,由扫描仪输入到微机,再经图像预处理后,形成轮胎花纹二进制矩阵,或直接在微机上设计轮胎花纹,确定相关参数,集中输入,运行 TPN-ODS 软件;在花纹噪声仿真分析的基础之上,进行花纹噪声评判以实现花纹噪声的优先排队;通过花纹低噪声的缺陷诊断,寻找花纹低噪声优化途径,进行花纹相关参数的修正和调整;再进行其它性能的综合考虑,初步优化修改后再经此系统运行操作,周而复始,多次循环,直至花纹各项性能均达到满意为止。

2 系统构成及其开发环境

TPN-ODS 由图像处理、仿真分析、噪声评判、缺陷诊断和低噪声优化5个子系统组成。

图像处理子系统提供扫描驱动、图象平滑、二值化、旋转、镜像、裁剪及拼接操作;仿真分析

子系统可实现轮胎花纹噪声时域仿真分析及频域分析;噪声评判子系统可分析噪声频谱各评判指数,依据模糊加权合成为综合评判指数,据此进行花纹低噪声的优先排队;缺陷诊断子系统提供时域和频域多视角的低噪声缺陷诊断分析;低噪声优化子系统可对轮胎花纹设计参数进行调整优化。

TPN-ODS 开发和运行于 Microsoft Windows 95/98 系统,采用 Microsoft 的可视化开发工具 Visual C++ 6.0,运用面向对象编程技术,实行开放式设计,便于功能扩充和维护。

3 轮胎花纹噪声的仿真实现

图 2 为一种典型的轮胎花纹,沿圆周方向把胎面花纹等分为若干排。等分的原则为:采样后的花纹图像具有保持性。经过采样以后(如图 3 所示),可将每个花纹块或槽分为若干个小花纹块或小花纹槽。

依据轮胎花纹噪声仿真数学物理试验模型^[4],可按如下步骤对轮胎花纹噪声进行仿真分析。

(1) 对轮胎花纹图像进行 m 线扫描处理,获取花纹块、槽信息,以 $m \times n$ 的二进制胎面矩阵 A 表示。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

其中, m 表示绕轮胎圆周划分的纵向行数, n 表示胎面划分的横向列数, a_{ij} 表示第 i 行、第 j 列的元素。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{花纹块元素(黑)} \\ 0, & \text{花纹槽元素(白)} \end{cases}$$

(2) 根据花纹块的发声模型,可分别得到所有块线条的发声时域波形,然后按线进行叠加合成,可得到花纹块发声的时域波形。令 M 为块分离函数, P_{sb} 为花纹块发声准正弦模型函数,则花纹块发声的时域波 $P_b(t)$ 为:

$$P_b(t) = \sum_l^x P_{sb} \left\{ \sum_{i+h_l}^i M[b_{ij}(t)] \right\} \quad (2)$$

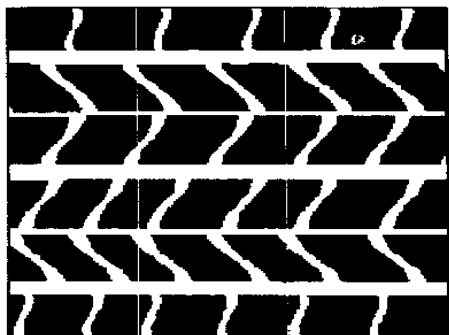


图 2 一种典型的轮胎花纹

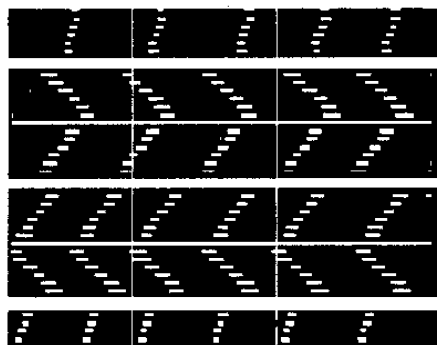


图 3 经扫描处理后的花纹图像

式中, l 为花纹条序号, h_l 为第 l 条所占的行数, $t = f(j, v)$, v 为车速。

(3) 根据花纹槽的发声模型,同样可得其发声的时域波 $P_s(t)$:

$$P_s(t) = \sum_l^x P_{ss} \left\{ \sum_{i+h_l}^i N[s_{ij}(t)] \right\} \quad (3)$$

式中, N 为槽分离函数, P_{ss} 为花纹槽准正弦波函数。

(4) 同理可求得随机砂声时域波 $P_t(t)$, 气柱共鸣声波 $P_c(t)$ 等。

(5) 对花纹块、槽等时域波叠加合成,可得到花纹块、槽合成时域波 $P(t)$:

$$P(t) = \alpha P_b(t) + \beta P_s(t) + \gamma P_t(t) + \eta P_c(t) + \cdots \quad (4)$$

式中, α, β, γ 和 η 为各时域波合成因数,其大小可通过试验确定。

(6) 对合成时域波进行采样离散化,经过快速傅立叶变换(FFT),可得到花纹合成噪声频谱 $H(kf_0)$:

$$H(kf_0) = \sum_n^{N-1} P(nT) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (5)$$

$$(k=0, 1, 2, \cdots, N-1)$$

式中, f_0 为花纹噪声的基频, $f_0 = \frac{1}{T_l}$, T 为采样周期, N 为采样点数, T_l 为花纹周期, k 为谐波次数。

(7) 根据合成的噪声谱推算出轮胎接地印痕后沿的噪声谱 $H_B(kf_0)^{[5]}$:

$$\begin{aligned} H_B(kf_0) &= (\psi_N^{\frac{2\pi}{N}})^{km} \cdot H(kf_0) \\ &\equiv W_N^{km} \cdot H(kf_0) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $k=0, 1, \cdots, N-1$; m 为时域左移点数。

(8) 将轮胎接地印痕前沿合成噪声谱和轮胎接地印痕后沿噪声谱频域合成, 便可得到轮胎花纹噪声谱。图4即为某种轮胎花纹噪声仿真频域谱线图。

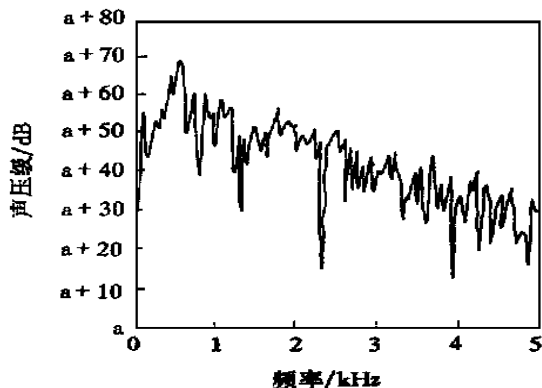


图4 轮胎花纹噪声仿真频域谱线图

4 轮胎花纹噪声的评判

4.1 基于最高声峰值的噪声评判

最高声峰值指数 $P_{\max}$ 即噪声谱中最大声压值, 它是噪声大小的客观反映量。我们可在一定程度上依据 $P_{\max}$ 来评判轮胎噪声的优劣程度。

4.2 基于模糊判决的噪声评判^[6]

依据轮胎花纹噪声的特性和人对噪声的主观感受, 我们对轮胎花纹噪声频谱建立如下5个评判指数: 最高声峰值指数 $P_{\max}$, 声能量指数 P_e , A 声压级指数 L_A , 声峰值起伏度指数 P_w 和声峰值落差离散度指数 P_s 。再进行适当加权求和, 可得综合评判指数 C :

$$C = \alpha_1 P_{\max} + \alpha_2 P_e + \alpha_3 L_A + \alpha_4 P_w + \alpha_5 P_s \quad (7)$$

式中, $\alpha_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为各指数的权因数, 其

具体数值可通过试验模糊综合评判矩阵求逆解来确定。

根据综合评判指数可对轮胎花纹噪声进行综合评判, 并实现花纹噪声的优先排队。

4.3 基于噪声容许标准线的噪声评判^[7]

目前, 国内外尚无正式的轮胎噪声容许标准, 轮胎厂家一般是根据汽车配套厂家提出的要求作为达标值。图5的a线部分为美国某研究中心为汽车生产厂家在选用配套轮胎时提出的噪声容许M标准曲线。我们可将仿真出来的噪声谱线(图中b线部分)同噪声容许标准线进行比较, 若位于其下, 则视为达标, 否则必须进行低噪声优化处理, 使“b线”全部落于“a线”以下。

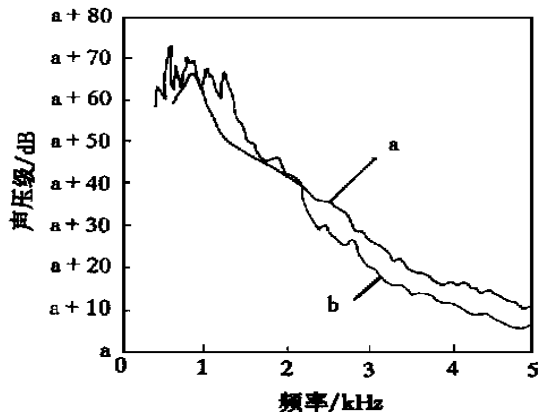


图5 噪声容许M标准线示意图

5 轮胎花纹的低噪声缺陷诊断^[8]

在轮胎花纹噪声控制的长期实践中, 我们提出了“三条线准则”的花纹低噪声缺陷诊断方法, 即噪声容许M标准线、频域声能量均衡线和时域声中心能量均衡线。在保证噪声频谱线位于噪声容许M标准线以下的前提下, 尽量使频域声能量均衡线和时域声中心能量均衡线低矮平直。

对于一个较理想的噪声来说, 其频谱趋势平缓, 声能量在频域上分布均衡, 这种噪声给人的感觉烦躁程度较低。低噪声优化的最终目的表现在频谱图上, 就是使花纹频域声能量均衡线平直(如图6所示)。根据频域能量集中区域, 调整节距比例, 花纹块、槽面积进行低噪声

优化。

轮胎圆周上的每个花纹块和槽在触地时均发声,可在其中心处等价点声源,沿周向叠加形成声中心能量均衡线(如图7所示)。图7中, S 为声能量比例值, t 为轮胎花纹随时间变化压过路面位置的标值, A 为声中心能量累加分布曲线下的面积。通过调整节距排列和错位,保证声中心能量均衡线低而平直。

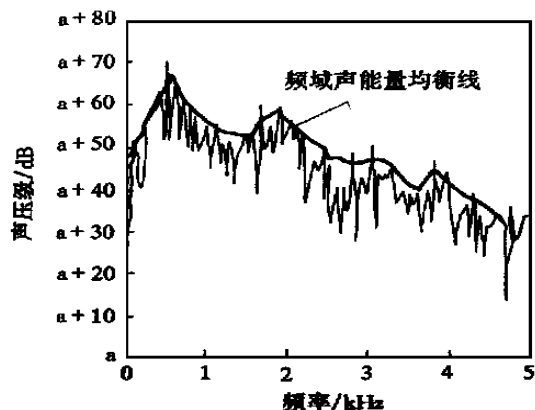


图6 频域声能量均衡线示意图

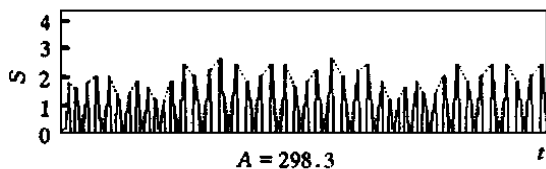


图7 声中心能量均衡线示意图

6 轮胎花纹低噪声优化设计

轮胎花纹的低噪声优化设计是 TPN-ODS 的核心之一,也是难点之一,是主观评判与客观评判相统一和低噪声轮胎标准的问题。经过深入探讨研究,提出了综合评判方法,通过多个实例分析、优化,效果显著。此外,采用“宏观”参数调整和“微观”参数调整相结合的方法,使优化过程更快速合理。

轮胎花纹的宏观设计参数包括:节距数、节距比、节距排列和错位。我们依据低噪声花纹设计积累的经验,建立花纹节距比例参数库,根据当前设计方案进行节距比例的寻优设定。而对于节距排列的选取也有很多的相关专利成果,并有一些建议的选取方式,我们将遗传算法

(Genetic Algorithm)应用到轮胎花纹节距排列的低噪声优化当中来^[9,10]。其大致的思路为:随机产生若干节距排列方案(其中约束条件由待优化方案设定),根据寻优目标对候选方案进行优胜劣汰,把胜出的方案进行交叉变异,产生新方案,将其替代已淘汰方案,依次反复直至产生满意解为止。而对于错位的优化相对而言较为简单,可以采用穷举法进行寻优。

轮胎花纹的微观设计参数包括:花纹块的大小、花纹槽的走向和花纹槽的开口形式等。对于这些参数的修改,若用微机实现自动修正有较大难度。采用的方法是:根据轮胎花纹低噪声优化设计的经验,并结合已有的低噪声轮胎花纹设计方案,对这些参数进行修改,再对其进行花纹噪声的仿真分析和噪声评判。由于设计参数之间的相互耦合性和轮胎其它性能的折衷考虑,这种微观参数的修改可能需要反复多次,方可取得令人满意的效果。

7 结语

TPN-ODS 运用科学而实用的轮胎花纹噪声数学物理模型,实现了对轮胎花纹噪声的仿真分析,并且可对花纹噪声进行噪声评判,实现了花纹低噪声的优先排队。在对花纹低噪声诊断的基础上,对轮胎花纹进行优化设计。TPN-ODS 可适用于轮胎生产厂家和轮胎花纹研究设计部门进行新型轮胎花纹的设计和开发。上述研究成果达到工程实用水平,已被某生产厂家采用。

致谢:董芹、钱业青、施旻、金星航、黄向宇和马浩等在本工作的前期做了大量的探索研究,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈理君,杨立,钱业青,等. 轮胎花纹噪声的发声机理[J]. 轮胎工业,1999,19(9):515-518.
- [2] Heckl M. Tyre noise generation[J]. Wear,1986,113:151-170.
- [3] Willett P R. Tire tread pattern sound generation[J]. Tire Science and Technology,1975,3(4):252-266.
- [4] 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.

- [5] 宗孔德,胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1988. 80-115.
- [6] 杨立. Fuzzy 综合评判在评价仿真噪声中的应用[J]. 模糊集理论及应用,1998(7):237-240.
- [7] Chen Lijun, Yang Li, Ma Hao, et al. Designing method for optimization low noise level tread pattern[A]. Proceedings International Rubber Conference '99 Seoul[C]. Seoul Korea: Korea Research Foundation, the Korean Foundation of Science and Technology Societies, 1999. 25-29.
- [8] 陈理君,杨立,钱业青,等. 轮胎花纹噪声的控制[J]. 轮胎工业,1999,19(11):643-647.
- [9] 金家德. 遗传算法在轮胎花纹节距排列低噪优化中的应用[D]. 武汉:武汉工业大学,1999.
- [10] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.

收稿日期:1999-12-09

Tread pattern noise simulation and optimization system software design

CHEN Li-jun¹, ZHONG Ke-hong¹, LI Hai-tao¹, ZHANG Xiao-hong¹, YANG Guang-da²

[1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070; 2. Shanghai Tire and Rubber (Group) Co., Ltd., Shanghai 200082]

Abstract: The train of thought for establishing tread pattern noise simulation and optimization system (TPN-ODS) is described, and the structure and function distribution of system is analysed from the view of software realization. The concrete realization is presented separately from four parts: simulation analysis, noise evaluation, defect diagnose and noise reduction optimization. It is found that TPN-ODS can be used as a useful aid in the noise-reduced tire design and the research and design of new tire. The system is ready to be used in engineering practice.

Keywords: tire; tread pattern noise; simulation; optimization; system design

成山橡胶集团钢丝帘线项目 取得实质性突破

中图分类号:TQ330.38⁺9 文献标识码:D

在过去的一年里,作为山东省荣成市跨世纪十大系列重点工程一号工程的山东成山橡胶集团年产5 000 t 钢丝帘线项目,在上级有关部门的大力支持下及山东成山橡胶集团的积极筹划下取得了实质性突破,2000年年底有望全线投产。

1999年是山东成山橡胶集团年产5 000 t 钢丝帘线项目建设及发展史上的一个里程碑,该集团成立了钢丝帘线有限公司,实行自主经营,独立核算,自负盈亏。在各方面的积极努力下,1 415万美元的外汇贷款获得了中国银行的批准;技术及设计资料提供到位;1 460万美元的项目引进设备信用证已全部开出,第一批引进设备已于1999年12月从意大利启运,部分国产配套设备基本订好,去年9月份公司派往美国的首批技术培训人员已学成归国。土建

工程完成总工程量的70%,累计投资达1.3亿元。

2000年将有1.4亿元资金用于钢丝帘线项目的续建,预计6月份可产出钢丝帘线样品,9月份可产出胎圈钢丝样品,10月份可正式投产,全年可生产2 000 t 钢线帘线和胎圈钢丝。钢丝帘线项目的建设意味着成山集团将从此结束其轮胎生产用钢丝帘线依赖于他人的历史,从而迅速提高子午线轮胎的生产能力。目前,成山集团半钢子午线轮胎生产线已形成年产220万条的能力,全钢子午线轮胎生产线累计投资5亿元,形成了年产30万条的能力,预计到2000年年底将形成年产300万条半钢子午线轮胎和60万条全钢子午线轮胎的能力。另外,年产100万条高性能子午线轮胎产业化示范工程也将争取年内开工建设。

(山东成山橡胶集团《成山报》社
黄彩霞供稿)