

低噪声轮胎花纹设计原理与方法

陈理君¹,张艳¹,杨立¹,杨光大²

[1. 武汉工业大学 应用技术研究所,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:阐述了低噪声轮胎花纹的设计原理与方法及低噪声评价准则。低噪声轮胎花纹设计原则如下:不同花纹块和不同花纹槽的宽度比均应取无理数比;花纹条数越多,降噪效果越好;花纹的节距比例应取无理数比;花纹节距序列不要呈周期性排列;花纹应有合理错位,但错位量与花纹周期不应成整数比;花纹周期越长越有利于降噪。依据以上原则进行低噪声轮胎花纹设计,并进行微机仿真噪声模拟,再根据低噪声评价准则对花纹方案进行对比和择优,最后确定最佳设计方案。

关键词:轮胎;花纹噪声;设计原理;噪声评价

中图分类号: TQ336.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2001)05-0270-07

在满足轮胎花纹设计基本要求^[1]的前提下,低噪声轮胎花纹的设计涉及花纹块、花纹沟槽、花纹条的设计以及花纹节距排列、节距比例和错位的调整。采用声点阵法对轮胎花纹噪声进行分析,得到两个关于轮胎花纹噪声的发声准则^[1~3]:花纹块的发声与其面积有关,而与形状无关;花纹沟槽的发声与其长度、宽度和走向有关,与深度基本无关。并得到一个法则^[1,4]:轮胎花纹的节距比等参数应采用不接近整数比的无理数比。

根据上述准则,用等价的矩形块模仿轮胎花纹图形,通过“轮胎噪声微机仿真系统”的运行,对可能的各种情况进行仿真模拟,得到噪声频域谱图,并对结果进行对比分析、排队与择优,即可得到低噪声轮胎花纹设计方案。

1 低噪声轮胎花纹设计原理

选取由矩形块序列构成的等价轮胎花纹方案做仿真试验,每个节距由几个花纹块与花纹沟构成(例如取3个),轮胎的1/4周期由3个节距构成,3个节距采用不等节距比。图1所示为左半轮胎花纹节距A的图案,然后通过改变相应参数,逐个仿真分析、优劣排序^[5]。

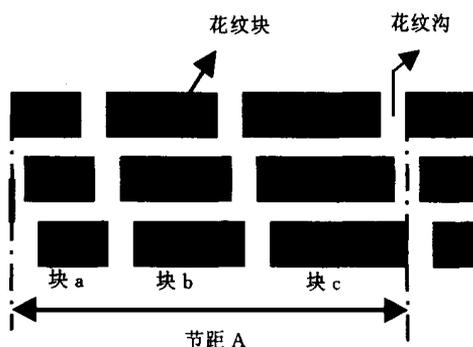


图1 等价的轮胎花纹方案示意图

1.1 花纹块的设计

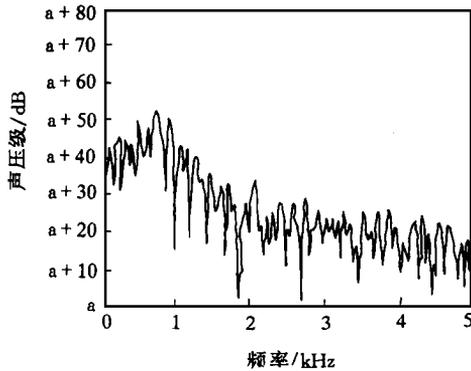
花纹块的设计主要涉及花纹块的宽度比。对于每个节距有3个花纹块的轮胎花纹图案而言,首先花纹块之间的宽度比最大应不超过7,轮胎花纹块总面积应占行驶面积的60%~80%;轮胎花纹块的面积比正比于发声的波长,试验与理论分析已证实了这一点^[6,7]。花纹块的面积比取不接近整数比的无理数比时,降噪效果较好^[1,8]。

由于轮胎花纹条排列比较整齐,同一行的花纹块具有同样的高度,因此花纹块的面积比可取其宽度比。我们取两种花纹块的宽度比——素数比和无理数比进行仿真分析(采用相对总声压级表示噪声大小)。图2(a)和(b)所示是花纹块的宽度比为素数比和无理数比时的对照(花纹均无错位),图2(c)所示为花纹块的

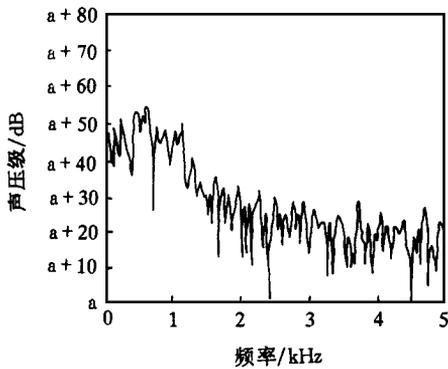
作者简介:陈理君(1938-),男,上海人,武汉工业大学教授,长期从事噪声控制、模糊控制方面的研究与教学工作。

宽度比取倍数比时的情况。从图 2 可以看出, 花纹块的宽度比取无理数比的效果比取素数比的效果略好些, 取倍数比的噪声比取无理数比的噪声要高得多。

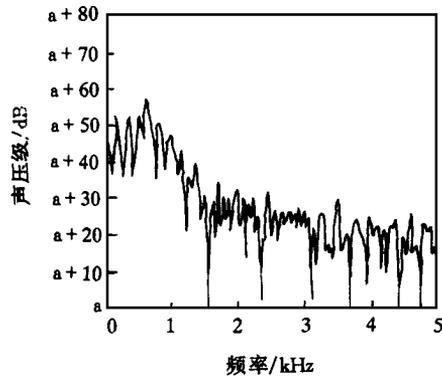
综上所述, 可以得出同行的花纹块的宽度比取无理数比最好、素数比次之、倍数比最差的



(a) 花纹块的宽度比为 2:3:5, 相对总声压级为 (a+40.14) dB



(b) 花纹块的宽度比为 $\sqrt{3}:\sqrt{5}:\sqrt{7}$, 相对总声压级为 (a+39.39) dB



(c) 花纹块的宽度比为 1:2:4, 相对总声压级为 (a+42.36) dB

图 2 不同花纹块宽度比的噪声频谱图

结论。理论上也证明了这一点^[1,4]。

1.2 花纹沟的设计

依据轮胎花纹沟槽的发声机理^[6]与发声模型^[7,9], 经一定的处理, 它的声点矩阵与块的声点矩阵为互补阵, 故分析类同, 又有“其发声与其深度基本无关”的准则, 因此取各槽的宽度比为不接近整数比的无理数比为好。其它参数, 诸如长度、角度、走向、封闭程度等可参阅表 1^[10]。

1.3 花纹条数的选择

轮胎花纹条数也是影响轮胎花纹噪声的重要因素。图 3 所示为花纹条数分别为 6, 7 和 8 的噪声效果(有错位)。从图 3 可以看出, 随着轮胎花纹条数的增加, 噪声的相对总声压级下降。因此可得出以下结论: 轮胎花纹条数越多, 轮胎花纹的降噪效果越好(但其它物理性能会下降, 诸如耐磨性、抓着力等, 故要折衷处理)。

1.4 节距的选择

根据节距的划分方法, 由一种节距构成的花纹称为等节距花纹, 由多种节距构成的花纹称为不等节距花纹(图 4 所示为不等节距花纹图案)。

等节距的轮胎花纹噪声频谱按轮胎基本频率的整数倍分布, 导致它的噪声频谱线上峰值和声能量集中, 声压级增大, 使人听起来烦躁程度高。因此, 轮胎花纹的设计应以不等节距花纹进行排列组合, 这样可以分散轮胎花纹噪声的频谱分布与声能量分布, 降低人的烦躁度。此外, 轮胎花纹节距比例的选择以及节距的排列顺序都是影响轮胎花纹噪声的因素。下面分别进行说明。

(1) 节距比例的选择

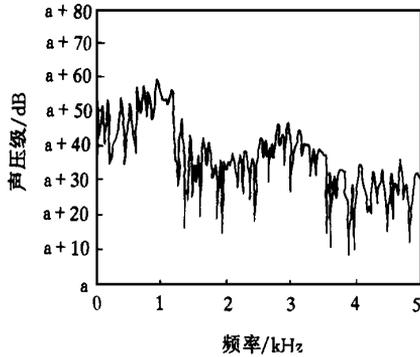
图 5 为不同节距比的噪声谱图。从对图 5 的分析可以得出: 轮胎花纹的节距比例取不接近整数比的无理数比最好、素数比次之、倍数比最差。理论上也证明了这一点^[9]。

(2) 节距排列顺序和节距数的选择

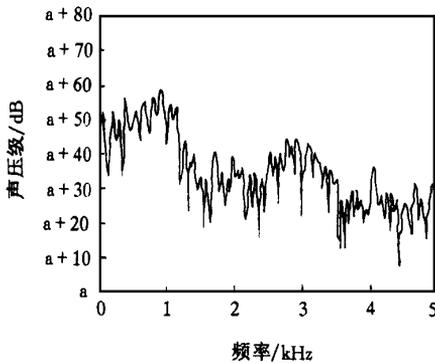
如果轮胎花纹的节距以固定的规律重复出现, 频谱峰值将会有规律地在某些频率处叠加, 从而产生很大的噪声。为了降低噪声, 在设计轮胎花纹时, 应赋予轮胎花纹重复出现部分不

表1 花纹沟参数对轮胎花纹噪声的影响

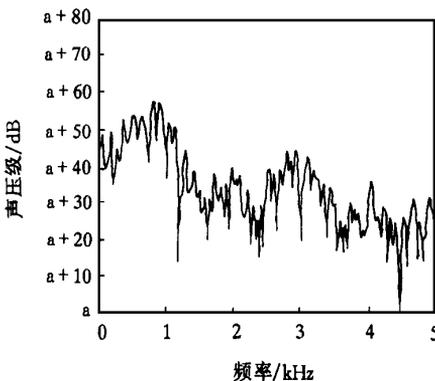
项 目	花纹沟宽度/mm		花纹沟数		花纹沟走向		花纹沟形状		花纹沟深度/mm	
	30	20	54	44	逆向	正向			15	10
声压级/dB	66.5	65	65.5	63	76	65	69.5	63	65.0	64.0



(a)花纹条数为6,相对总声压级为(a+39.17)dB



(b)花纹条数为7,相对总声压级为(a+36.99)dB



(c)花纹条数为8,相对总声压级为(a+36.73)dB

图3 不同花纹条数的噪声频谱图

同的宽度以使之不规则化,从而减少相同频率的集聚。通过合理调整节距排列顺序,可避免噪声在相同频率上发生叠加性加强。

用随机抽取节距尺寸和分布的方法,可将

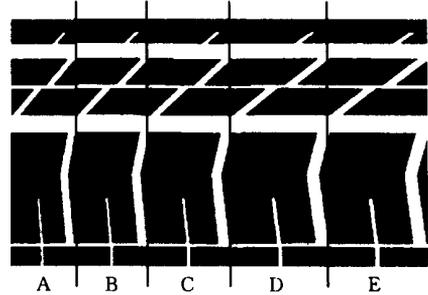


图4 5种不等节距的轮胎花纹图案

A,B,C,D,E五种节距的长度比为30 34 38 47 47

轮胎花纹噪声产生的频谱线分布到一个很宽的频带上,使之接近于白噪声。

节距的排列可用遗传算法进行优化^[2],确定目标函数后,经过选择初始群体、交叉、变异、繁殖产生子代,寻找节距排列顺序在噪声方面最优的序列。对由5种不等节距构成的新花纹进行优化,产生新的节距排列,图6为优化前后的噪声频谱图。可采用综合评价指数进行噪声评价。它是对噪声的起伏度、离散度、声峰值以及声能量等诸多噪声的评价指标进行权重综合计算而得。综合评价指数越高,降噪效果越差^[9]。

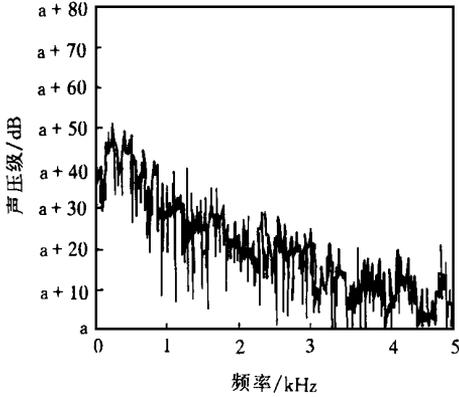
试验证明,节距数以取素数为好,诸如3,5,7,11,不宜选2,4,6,8,10^[2,8,11]。

通过以上寻优过程,可以得出:花纹节距序列不宜呈周期性排列;在节距序列中3个连续接近相同长度的节距不要安排在相邻位置;大、中、小3种节距长度在整个序列长度中占的比例分别为37%,19%和44%左右为好。

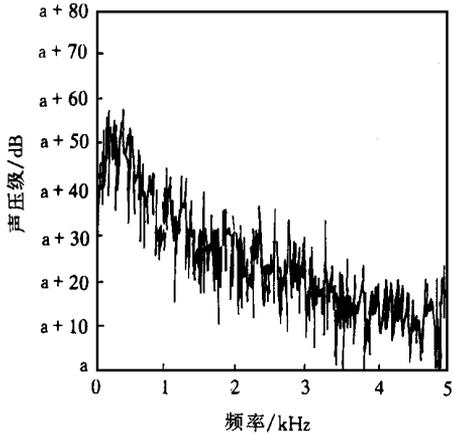
1.5 错位的调整

组合完整的轮胎花纹一般应有错位。错位有两种:一种为各花纹条之间的错位,另一种为左半节距序列花纹与右半节距序列花纹之间的错位(见图7)。轮胎花纹的合理错位会使时域声中心能量分布趋于均匀,从而降低轮胎花纹的总噪声峰值级。

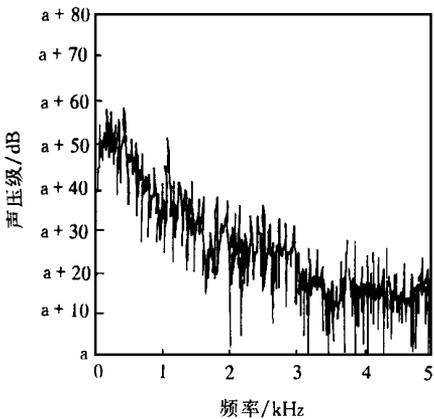
利用点声源进行分析,花纹块为矩形,其重心在它的中心上(定为声中心),图7(a)中,4排



(a) 节距比为 $\sqrt{3} : \sqrt{17} : \sqrt{77}$, 相对总声压级为 $(a + 51.66)$ dB



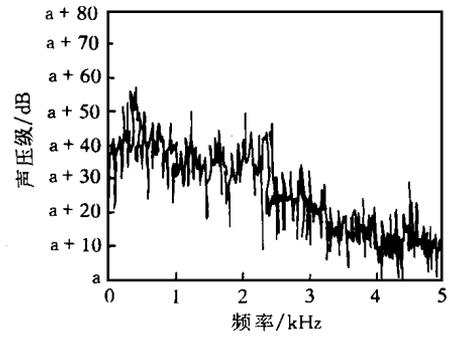
(b) 节距比为 2:3:5, 相对总声压级为 $(a + 58.34)$ dB



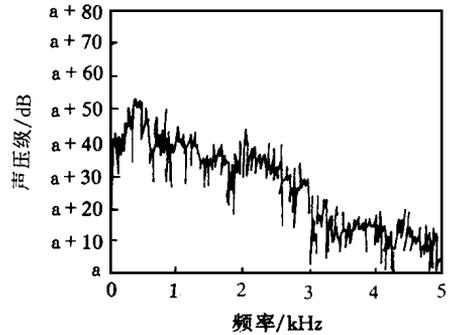
(c) 节距比为 1:2:4, 相对总声压级为 $(a + 58.43)$ dB

图 5 不同节距比的噪声频谱图

花纹块的声中心在同一参考线上,声中心能量分布密集;图 7(b)有两排花纹的声中心在同一参考线上,声中心能量相对分散些;图 7(c)的各排花纹块的声中心相对错开,声中心能量分布最均匀。

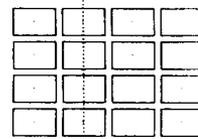


(a) 优化前的频谱图, 综合评价指数为 191.95

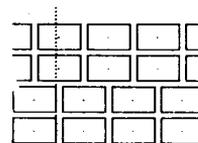


(b) 优化后的频谱图, 综合评价指数为 182.34

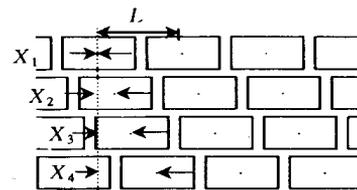
图 6 节距排列优化前后的噪声频谱图



(a) 无错位



(b) 错位 1/2 节距



(c) 错位 1/4 节距

图 7 轮胎花纹错位示意图

试验分析也证明有错位的轮胎花纹噪声较无错位的轮胎花纹噪声的相对总声压值降低 1 dB 左右,峰值可降低 4~7 dB。试验及理论分

析证明^[1],不同错位情况下的声压级 L (单位: dB) 有以下关系:

若 $L_a = m$
 则 $L_b = m - 3, L_c = m - 4.7$

另外,错位量 i 一般不应与花纹周期 l 成整数比,即

$$l/i = k \quad (k \text{ 为整数}) \quad (1)$$

以上素数组与无理数组的选取是随意的,未经优化,故降噪效果不是最佳的。

2 低噪声轮胎花纹设计方法

为了降低轮胎花纹噪声,可在轮胎花纹设计过程中进行一些参数的寻优与修改。那么,多参数的选择与修改顺序应如何呢?下面给出了这些参数在轮胎花纹设计过程中的选择与修改方法。

(1) 在满足轮胎花纹设计基本要求^[1,2]的前提下,一个节距内花纹块和花纹槽的最大面积 S_{\max} 与最小面积 S_{\min} 之比尽可能不取整数比。

(2) 花纹块的参数应尽可能满足各花纹块面积比不接近整数比的无理数比,如: $S_{b1} : S_{b2} : S_{b3} = \sqrt{11} : \sqrt{7} : \sqrt{5}$ 。

(3) 花纹沟的参数选择与花纹块相同,应尽可能满足各花纹槽的面积比取不接近整数比的无理数比,同时花纹槽应满足: $S_{\max}/S_{\min} > 3$ 。

(4) 根据选定的花纹块与花纹槽组成第一个花纹的节距的矩形条列,在此基础上再组成花纹条列,见图 8。其中两种花纹方案的关系应满足:

$$S_{b1} = S_{b1} ; S_{b2} = S_{b2} ; \dots ; S_{bi} = S_{bi}$$

$$l_s (\text{矩形长度}) = h_p (\text{花纹块中心宽度})$$

花纹槽作类同处理,它的走向可稍作各自不同的变化。

(5) 根据实际情况,同时遵循花纹条尽可能多的原则,在考虑其它物理性能的基础上折衷处理,花纹条的宽度比不宜取接近整数比例。

(6) 根据选定的不接近整数比的无理数节距比(图 9)与节距数目,通过寻优设计软件运行定出整个轮胎花纹的节距序列。安排节距

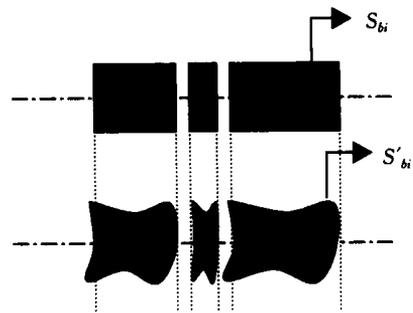


图 8 矩形条列形成花纹条列

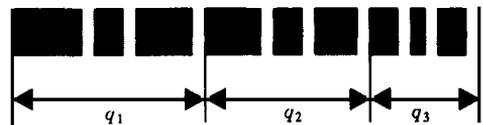


图 9 节距比示意图

时应注意上面提到的几条原则。当然,节距的排列要为模具厂加工时可接受。

(7) 对组成的轮胎花纹雏形进行微机噪声仿真,逐步调整错位的大小,找出最佳的错位值,注意错位的选取应满足式(1)。

(8) 确定花纹周期列,例如花纹周期为轮胎周长的 $1/4, 1/3, 1/2$ 或一个轮胎周长,一般花纹周期越长越好。

(9) 花纹块面上开刀槽、软化块以达到降噪效果。

(10) 避免开横向槽和死槽沟。

当然,所有的参数设计除要求低噪声性外,还需顾及其它性能(如磨损度、排水性、承重性等)和符合工艺的要求。

3 低噪声轮胎花纹方案的评价

设计出的轮胎花纹方案在投产前必须经过评价,确认为低噪声轮胎后(即达到设计要求)方可批量生产,否则,必须做修改。一般评价过程如下:先通过微机仿真分析^[1,2]、仿声放声监听^[12]和优化设计及评判^[8,9],选出最优的二三个方案,通过人工刻花制成试验轮胎,再进行主客观评价。

首先在消声室内对轮胎花纹噪声进行噪声测量,如图 10~12 所示。测试条件:轮胎型号 215/70R15;轮胎气压 250 kPa;轮胎负荷 5 880 N;轮胎速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

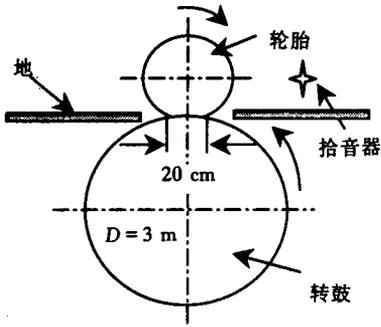


图 10 轮胎花纹噪声室内测量图

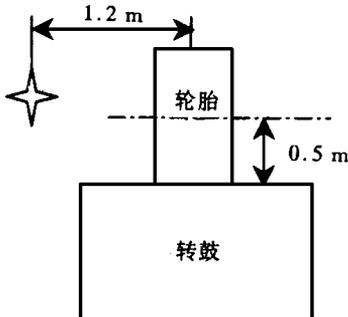


图 11 轮胎花纹噪声测量设备侧视图

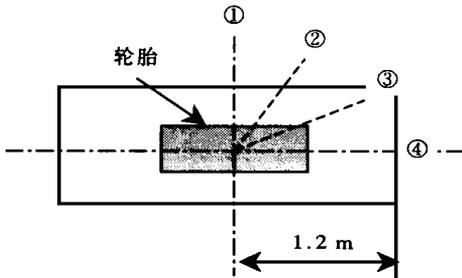


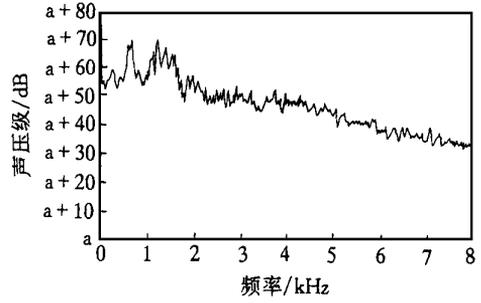
图 12 拾音器位置俯视图

3.1 客观评价

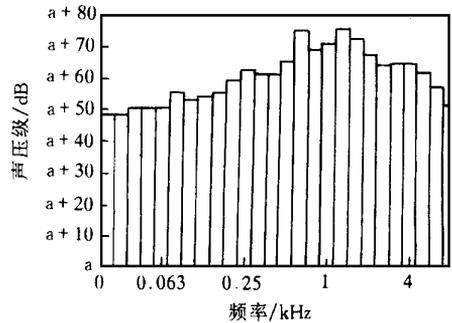
对轮胎花纹噪声进行 4 点测量,得到对应各点位置测量的频谱图与直方图,并用高保真度录音机录音(日本 TEAC XR-20C 记录仪及丹麦 B & K2144 双通道实时分析仪、B & K4165 电容话筒)进行监听和记录,结果见图 13。

实测得各点谱图 $F_i (i = 1, \dots, 4, \text{线性频程})$ 在同一频区的峰值相差 7~8 dB,谱直方图(1/3 倍频程)相差 4~5 dB。显而易见,决不可用一点作为代表,故当 4 点的谱线均低于低噪声标准线(如美国某研究中心提出的 M 标准线)时方可认为该花纹方案为低噪声轮胎花纹方案。可借用模糊数学“并”运算符“ \cup ”对各频谱曲线进行运算,即令

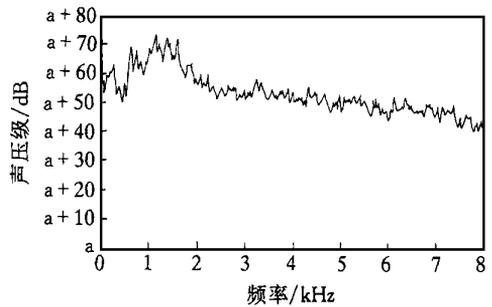
$$F = \bigcup_{i=1}^4 F_i$$



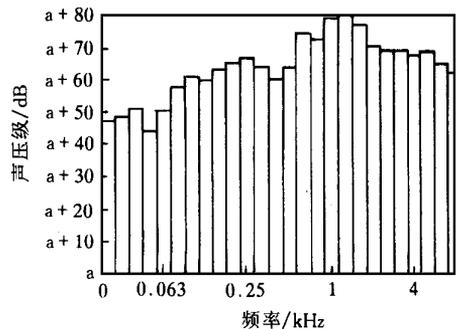
(a)①点处的噪声频谱图



(b)①点处的噪声谱直方图



(c)④点处的噪声频谱图



(d)④点处的噪声谱直方图

图 13 点的噪志声谱图

(取 100 dB 为 1 单位量)

只有当 $F \subseteq M$ 时,才达到低噪声标准。当然,除在轮胎前进方向半边取数个测点外,还应在轮胎前方上下位置取数个测点,求出总值 F 。

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m F_{ij} \right)$$

在满足 $F \subseteq M$ 时方可达到目的。

3.2 主观评价

以上4点的图例说明了各点差异,因此必须对4点分别进行主观评判打分。由于等响曲线随声压级升高而变平直,故发声一定要保持原音量的大小,否则,导入误差极大。排队优选时,采用2/3通过法则,若未通过必须重新修改或作并列处置。以上是最少测点数,建议试验时再加入上下4点,一起进行打分为好。

4 结语

本工作对影响轮胎花纹噪声的部分参数设计提出了一些方案,在实际的轮胎花纹优化设计过程中,这些方案在降低轮胎噪声方面收到了很好的效果。

致谢:上轮公司轮胎研究所的常传贤高级工程师和王卫防博士完成了上述测试任务,并提供了详尽的测试报告,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈理君,杨光大,董芹. 低噪声轮胎花纹设计原则[J]. 橡胶工业,1997,44(3):150-155.
 [2] 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.

- [3] Heckl M. Tire noise generating mechanisms state-of-the-art report[A]. Proceedings of the Styrelsen for Teknisk Utveckling International Tire Noise Conference [C]. Stockholm: American Society for Testing,1979. 411-455.
 [4] Lee J J, Ni A E. Structure-borne tire noise statistical energy analysis model [J]. Tire Science and Technology,1997,25(3):176-186.
 [5] 陈理君,林海军,陈敏伟,等. 轮胎花纹噪声的综合评判方法[J]. 轮胎工业,2000,20(3):140-143.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [8] 陈理君,钟克洪,张晓红,等. 基于遗传算法的低噪声轮胎花纹节距排列的优化方法[J]. 轮胎工业,2000,20(2):76-79.
 [9] 陈理君,钟克洪,李海涛,等. 轮胎花纹噪声仿真与优化系统设计[J]. 轮胎工业,2000,20(4):199-203.
 [10] 施曼. 低噪声轮胎花纹的设计优化方法[D]. 武汉:武汉工业大学,1999.
 [11] 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.
 [12] 杨立,金新航. 轮胎花纹噪声仿真系统[J]. 轮胎工业,1998,18(2):82-85.
 第11届全国轮胎技术研讨会论文(三等奖)

Principle and method of low noise tread patterns' design

CHEN Li-jun¹, ZHANG Yan-kun¹, YANG Li¹, YANG Guang-da²

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

Abstract: The principle and method of low noise tread patterns' design and the assessment criteria of low noise are described. The principle of low noise tread patterns' design is as follows: a) the width ratios between different tread blocks and different tread grooves should be irrational; b) the more tread ribs, the lower tread noise; c) the pitch ratios of tread patterns should be irrational; d) the pitch series of tread patterns should not be arranged periodically; e) the tread patterns' units should be reasonably misaligned, and the ratio between the deviation and the tread patterns' period should not be integral; and the longer tread patterns' period, the lower tread noise. The various tread patterns with low noise are designed based on the above said principle, the noises of these tread patterns are simulated by the computer, and the various designs are compared and optimized according to the assessment criteria of low noise to obtain the optimum design.

Key words: tire; tread patterns' noise; design principle; noise assessment