

轮胎花纹沟的发声模拟计算

李福军, 吴桂忠

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

摘要:通过对不同花纹沟轮胎发声机理的研究,建立预测数学模型,模拟计算具体的发声情况,提高轮胎花纹的设计水平。研究表明,对于与轮胎中心线成一定角度的花纹沟,其深度和宽度对轮胎噪声的影响不大,而花纹沟角度的影响很大,其每增大 15°,轮胎的噪声声压将提高 110%~130%。

关键词:轮胎;噪声;数学模型;球面声源

中图分类号:TQ336.1+1 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8171(2006)04-0203-05

声波是由与流体介质相接触的任何固体的振动或由直接作用在流体上的振动力、流体本身的剧烈运动(如射流)、振荡的热效应(如调制激光束产生的热效应)等产生,能量从源转移到流体,源的特性决定所产生声场的频率和特性^[1]。因此,在处理轮胎发声时,首先考虑发声源的特性,从而确定轮胎噪声场的特性。

对轮胎进行噪声分析时,主要考虑花纹块与路面的撞击噪声及花纹沟的泵浦^[2]噪声。我院与高校合作,对轮胎的发声机理进行了不断研究,但对花纹沟的泵浦噪声的分析还比较少。所谓泵浦噪声就是在轮胎接地和离开地面时,由花纹沟与地面所组成的腔体体积收缩和膨胀所引起的压力变化,从而产生声音。

本研究注重讨论轮胎花纹沟的发声机理,以声学上的单极子源^[3]为出发点,对轮胎花纹沟进行简化,应用理论计算得到轮胎花纹沟泵浦噪声的特征,并利用计算机模拟分析结果。

1 理论计算

1.1 简单球面声源

如果源区非常紧凑,而所发生的运动在各个方向都没有差别,它所产生的波就呈球形面向外扩展。如果介质是无限延伸的,波形就依赖于距

源中心的距离 r 而与球面角 θ 和 φ 无关,就像波是由一中心在原点的球均匀地膨胀和收缩时所产生的,这种情况下的波称为球面波^[1]。为了简化计算,本文将花纹沟的发声简化为球面波。对于有源波动方程^[4],简单声源的声压表达式为:

$$p(r,t) = \frac{\rho \partial Q(t - \frac{r}{c})}{4\pi r \partial t} \tag{1}$$

式中 $p(r,t)$ —— t 时刻距离声源 r 处的声压;
 Q ——源点介质的体积流量;
 ρ ——介质密度;
 c ——声波在介质中的传播速度。

声源可以理想化为简单球面声源的条件是:
①声源的特征尺寸比声的波长小得多;
②观测点距离声源的距离远大于声源的特征尺寸。

轮胎花纹沟的发声基本可以满足上述两个条件,因此将花纹沟发声简化为简单球面声源具有一定的合理性。但这种简化仅限于对轮胎花纹沟发声的简单分析,不能将轮胎花纹沟的发声场简单地理解为是球面的。

由式(1)可知,声压与场点介质体积流量的变化率成正比,若 Q 为常数,则 p 恒等于零,即不产生声音,因此可以略去轮胎纵沟的发声,只考虑有一定角度的花纹沟的发声情况,本文注重计算由花纹沟与地面所组成的腔体的体积流量。

1.2 花纹沟

花纹沟是由轮胎花纹块所构成的开放腔体,

作者简介:李福军(1976-),男,河南濮阳人,北京橡胶工业研究设计院工程师,硕士,主要从事轮胎结构设计和轮胎的基础研究工作。

当轮胎行驶时,花纹块与地面接触,地面将花纹沟封闭,产生一个封闭的腔体,从而为泵浦声音的产生提供了条件。

由于纵沟的排气是定常的,理论上是不发声的;横沟的发声是瞬时的,可以简化为脉冲声源^[5],本研究不讨论上述两种花纹沟,只对与胎面中心线成一定角度的花纹沟进行研究。为了便于计算,并且能够分析出花纹沟的具体发声情况,本文讨论与轮胎中心线成一定角度的一条沟的情况,如图1所示。

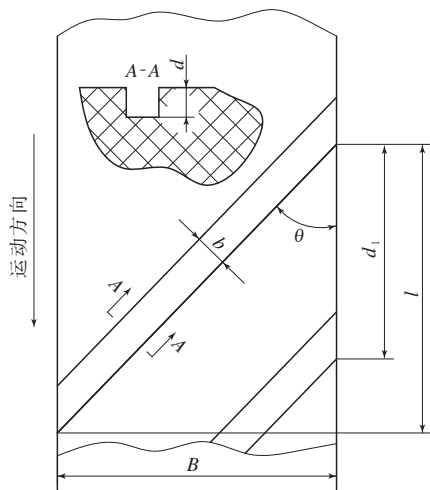


图1 胎面花纹示意

B —胎面宽度; b, d —花纹沟宽度、深度; θ —花纹沟与胎面中心线所夹角度; d_1 —花纹沟之间的错位距离;
 l —花纹沟沿轮胎中心线方向的长度。

1.3 运动过程中的变形

当花纹接地时,其四周的橡胶向花纹沟处挤压,从而使花纹沟的体积减小,其中的气体将会被挤压出去,从而引起花纹沟接地处气体流量的变化,产生声音,这是本研究的计算基础。在此基础上假设橡胶的变形情况。为了与实际情况较好地吻合并便于计算,假设橡胶在挤压过程中以圆弧形突出,如图2所示。

1.4 花纹沟的变形过程

花纹沟的变形过程如图3所示,花纹上任意一点 A 于 t 时刻在 x 方向上的投影为 x ,经过时间微量 dt , A 点在 x 方向上的投影有一个增量 dx ,假设其变形情况与 x 直接相关,设

$$\alpha = kx \quad (2)$$

式中, k 为压缩系数,可由试验测得。

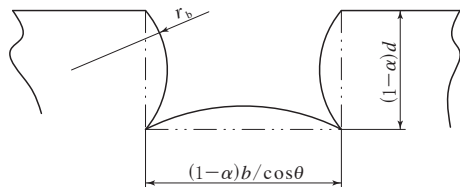


图2 花纹沟变形示意

α —变形因数; r_b —变形后的圆弧半径。

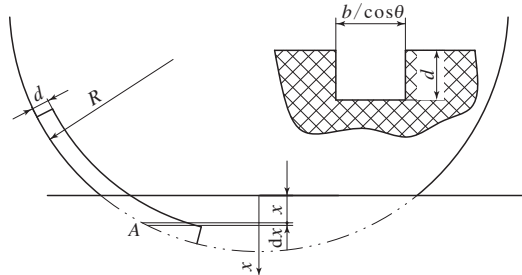


图3 花纹沟接地情况示意

1.5 速度及时间

花纹沟的接地速度分析如图4所示。设轮胎滚动的角速度为 ω , 轮胎的线速度(v)为

$$v = r\omega$$

为了描述花纹沟的变形情况,方便模拟计算,本研究以试验条件为基础,设轮胎的旋转中心为轮胎的参考对象,也就是轮胎只作旋转运动而没有平动,因此由图4分析可知,沿 x 方向的速度(v_1)为

$$v_1 = R\omega \cos \alpha t$$

在花纹沟最低点也就是 A 点处

$$x = R(1 - \cos \beta_0)$$

$$t_z = \frac{\alpha_0 + \beta_0}{\omega}$$

花纹沟在 x 方向从0到最大值(A 点)的任意一点的 x 表示为

$$x = R(1 - \cos \alpha t)$$

$$t \in \left[\frac{\alpha_0}{\omega}, \frac{\alpha_0 + \beta_0}{\omega} \right]$$

1.6 花纹沟体积

花纹沟在 x 处以切线为法线的花纹沟的截面积为:

$$S_{\perp} = \frac{(1-\alpha)^2 db}{\cos \theta} - \frac{d^3}{12r_1} - \frac{b^3}{12r_2 \cos^3 \theta} \quad (3)$$

设轮胎花纹沟侧壁的变形为小变形,采用小角度近似,取

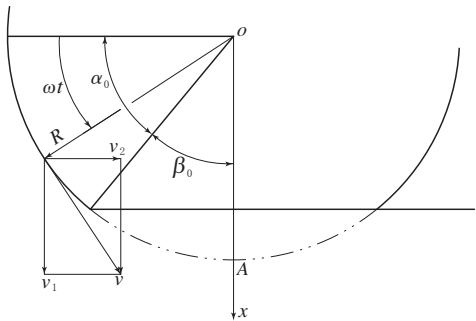


图 4 花纹沟接地速度分析

$$r_1 = \frac{d}{2 \sqrt{6\alpha}}$$
$$r_2 = \frac{b}{2\cos\theta \sqrt{6\alpha}}$$

花纹沟截面面积转换如图 5 所示。根据图 5 的分析,花纹沟以 x 方向为法线的花纹沟的截面积为

$$S = S_{\perp} \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{4})}{\sin(\frac{\beta}{4} + \frac{\beta_1}{2})} \quad (4)$$

由此可以建立截面面积与时间和 x 的关系,从而可以得到任意时刻花纹沟排出气体的体积(V):

$$V = \int_0^x (db/\cos\theta - S)dx$$

V 即等于排除气体的体积流量。

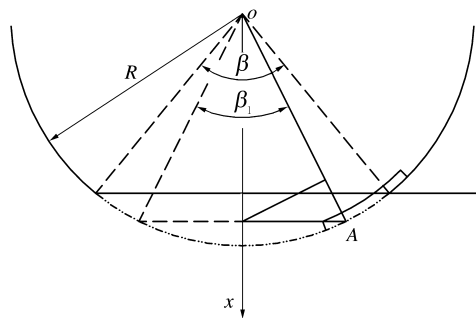


图 5 花纹沟截面面积转换示意

1.7 花纹沟排除气体的声压

已知花纹沟排除气体的体积流量,即可通过式(1)求得排出气体的声压值。

2 模拟分析计算

根据上述理论公式进行程序编辑,通过 Matlab^[6]计算,从而可以得到任意时刻观测点处的声

压值。

由于计算机只能计算确定的数值,因此,必须将不同的情况进行分类、判断。依据轮胎半印痕长度与花纹长度的关系,该程序计算分为三部分。

设轮胎印痕的长度为 l_p ,轮胎的下沉量为 $x_{\max}$,花纹长度(l)与轮胎印痕长度和下沉量之间的关系存在如下 3 种情况:

$$l^2 = (l_p/2)^2 + x_{\max}^2$$

$$l^2 > (l_p/2)^2 + x_{\max}^2$$

$$l^2 < (l_p/2)^2 + x_{\max}^2$$

在程序编辑过程中,需要对上述情况分别给予处理。

3 计算结果

模拟分析选取 195/65R15 轮胎,轮胎参数为:花纹沟宽度 变量;花纹深度 变量;花纹沟角度 变量;断面宽 150 mm;外直径 633 mm;行驶速度 50,80,100 和 120 km · h⁻¹。

3.1 不同深度花纹沟

针对不同轮胎花纹深度进行模拟(花纹沟宽度 7 mm,花纹沟角度 45°),模拟结果如表 1 所示。

表 1 花纹深度对轮胎噪声的影响

项 目	最大声压/Pa	最小声压/Pa	平均声压/Pa
花纹深度 3 mm			
50 km · h ⁻¹	3.22×10 ⁻⁶	1.16×10 ⁻⁶	2.19×10 ⁻⁶
80 km · h ⁻¹	8.24×10 ⁻⁶	2.96×10 ⁻⁶	5.60×10 ⁻⁶
100 km · h ⁻¹	1.29×10 ⁻⁵	4.62×10 ⁻⁶	8.75×10 ⁻⁶
120 km · h ⁻¹	1.86×10 ⁻⁵	6.65×10 ⁻⁶	1.26×10 ⁻⁵
花纹深度 4 mm			
50 km · h ⁻¹	4.29×10 ⁻⁶	1.63×10 ⁻⁶	2.96×10 ⁻⁶
80 km · h ⁻¹	1.10×10 ⁻⁵	4.17×10 ⁻⁶	7.58×10 ⁻⁶
100 km · h ⁻¹	1.71×10 ⁻⁵	6.52×10 ⁻⁶	1.18×10 ⁻⁵
120 km · h ⁻¹	2.47×10 ⁻⁵	9.39×10 ⁻⁶	1.70×10 ⁻⁵
花纹深度 5 mm			
50 km · h ⁻¹	5.37×10 ⁻⁶	2.10×10 ⁻⁶	3.74×10 ⁻⁶
80 km · h ⁻¹	1.38×10 ⁻⁵	5.37×10 ⁻⁶	9.56×10 ⁻⁶
100 km · h ⁻¹	2.15×10 ⁻⁵	8.40×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻⁵
120 km · h ⁻¹	3.10×10 ⁻⁵	1.21×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻⁵

由表 1 可见,在花纹沟宽度及其它情况完全不变的情况下,花纹深度增大将引起轮胎噪声增强。

3.2 不同宽度花纹沟

针对不同轮胎花纹沟宽度进行模拟(花纹深度 4 mm,花纹沟角度 45°),模拟结果如表 2 所示。

表 2 花纹沟宽度对轮胎噪声的影响

项 目	最大声压/Pa	最小声压/Pa	平均声压/Pa
花纹沟宽度 6 mm			
50 km·h ⁻¹	3.68×10 ⁻⁶	1.43×10 ⁻⁶	2.56×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	9.43×10 ⁻⁶	3.66×10 ⁻⁶	6.54×10 ⁻⁶
100 km·h ⁻¹	1.47×10 ⁻⁵	5.71×10 ⁻⁶	1.02×10 ⁻⁵
120 km·h ⁻¹	2.12×10 ⁻⁵	8.23×10 ⁻⁶	1.47×10 ⁻⁵
花纹沟宽度 7 mm			
50 km·h ⁻¹	4.30×10 ⁻⁶	1.63×10 ⁻⁶	2.96×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	1.10×10 ⁻⁵	4.17×10 ⁻⁶	7.59×10 ⁻⁶
100 km·h ⁻¹	1.72×10 ⁻⁵	6.52×10 ⁻⁶	1.19×10 ⁻⁵
120 km·h ⁻¹	2.48×10 ⁻⁵	9.39×10 ⁻⁶	1.71×10 ⁻⁵
花纹沟宽度 8 mm			
50 km·h ⁻¹	4.91×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻⁶	3.36×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	1.26×10 ⁻⁵	4.66×10 ⁻⁶	8.62×10 ⁻⁶
100 km·h ⁻¹	1.96×10 ⁻⁵	7.28×10 ⁻⁶	1.35×10 ⁻⁵
120 km·h ⁻¹	2.83×10 ⁻⁵	1.05×10 ⁻⁵	1.94×10 ⁻⁵

由表 2 可见,在花纹深度及其它情况完全不变的情况下,花纹沟宽度增大将会使轮胎的噪声声压有所提高,但不明显。

3.3 不同角度花纹沟

针对不同轮胎花纹沟角度进行模拟(花纹深度 4 mm,花纹沟宽度 7 mm),模拟结果如表 3 所示。

由表 3 可见,随着轮胎花纹沟角度的加大,花纹的泵浦噪声加强,且随着角度接近 90°,声压的增幅加大;轮胎速度提高同样使花纹沟角度所引起的轮胎噪声的差异明显增大。

4 结论

(1)随着轮胎花纹的加深,花纹沟的泵浦噪声将明显加强,而且随着轮胎速度提高,花纹深度增大所引起的噪声增幅将加大。总的来说,在其它条件不变时,花纹深度增大对轮胎噪声的影响不大。

(2)随着轮胎花纹沟宽度值的加大,花纹的泵浦噪声加强但并不明显。

表 3 花纹沟角度对轮胎噪声的影响

项 目	最大声压/Pa	最小声压/Pa	平均声压/Pa
花纹沟角度 30°			
50 km·h ⁻¹	2.03×10 ⁻⁶	7.90×10 ⁻⁷	1.41×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	5.18×10 ⁻⁶	2.02×10 ⁻⁶	3.60×10 ⁻⁶
100 km·h ⁻¹	8.10×10 ⁻⁶	3.16×10 ⁻⁶	5.63×10 ⁻⁶
120 km·h ⁻¹	1.17×10 ⁻⁵	4.55×10 ⁻⁶	8.11×10 ⁻⁶
花纹沟角度 45°			
50 km·h ⁻¹	4.30×10 ⁻⁶	1.63×10 ⁻⁶	2.96×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	1.10×10 ⁻⁵	4.17×10 ⁻⁶	7.59×10 ⁻⁶
100 km·h ⁻¹	1.72×10 ⁻⁵	6.52×10 ⁻⁶	1.19×10 ⁻⁵
120 km·h ⁻¹	2.48×10 ⁻⁵	9.39×10 ⁻⁶	1.71×10 ⁻⁵
花纹沟角度 60°			
50 km·h ⁻¹	1.05×10 ⁻⁵	3.72×10 ⁻⁶	7.12×10 ⁻⁶
80 km·h ⁻¹	2.69×10 ⁻⁵	9.51×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻⁵
100 km·h ⁻¹	4.21×10 ⁻⁵	1.49×10 ⁻⁵	2.85×10 ⁻⁵
120 km·h ⁻¹	6.06×10 ⁻⁵	2.14×10 ⁻⁵	4.10×10 ⁻⁵

(3)在花纹沟宽度和深度及其它情况完全不变的情况下,花纹沟角度每增大 15°,轮胎的噪声声压将提高 110%~130%。从试验中也得到相似的结论,但由于其它参数的影响,无法准确测量具体的影响程度,可以得到一个趋势:花纹沟角度对轮胎的噪声有很大影响。

本研究没有考虑地面的反射,在模拟计算过程中假设地面为声学刚性界面,将花纹端部的发声视为两个单极子声源的发声,只讨论了花纹沟的发声情况,下一步应该结合花纹块,整体考虑轮胎花纹的发声情况,并对程序进行更深入的分析编辑,以指导花纹设计。

参考文献:

[1] Morse P M, Ingad K U. 理论声学[M]. 杨训仁译. 北京:北京科学出版社,1984.

[2] Heckl M. Tyre noise generating[A]. Seminar on Friction and Contact Noise. Delft, Netherlands;1985-06-20.

[3] 何祚镭,赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1981.

[4] 诺顿 M P. 工程噪声和振动分析基础[M]. 盛元生,顾伟豪,韩建民,等译. 北京:航空工业出版社,1993.

[5] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.

[6] 陈永春. Matlab M 语言高级编程[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

Computational simulation of sound emission in tread groove

LI Fu-jun, WU Gui-zhong

(Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the sound emission mechanism in different tread grooves, a mathematic model was established to simulate the sound generation and modify the tread patterns' design. The results showed that the depth and width of the groove with a certain angle to the central line of tread had little effect on the tire noise, but the angle of groove had great effect on the tire noise, and the sound pressure of tire noise would increase by 110%~130% with every 15° increase of angle of groove.

Keywords: tire; noise; mathematic model; sphero-sound source

胎面标准胶 GK270N 密炼机直混工艺

中图分类号: TQ330.4⁺3 文献标识码: B

标准胶在生产过程中已经过初步加工, 相对分子质量和粘度比烟胶片低, 有利于配合剂混入。标准胶塑炼会使橡胶大分子链进一步剪断, 且标准胶塑炼加工性能较差, 塑性值不一致, 包辊性差, 生产难度较大, 后续生产的混炼胶塑性值大, 挤出时半制品尺寸不稳定、成型过程中易粘连, 生产成本较高。标准胶直接混炼可有效避免过炼, 大大提高硫化胶的强伸性能和轮胎的耐磨性能。

1 标准胶直混工艺制定

我厂采用泰国产 20[#] 标准胶, 一段胎面胶采用 GK270N 密炼机混炼, 直混工艺为: 加生胶, 降压砣 40 s → 提压砣, 加炭黑, 降压砣 25 s → 提压砣, 降压砣 35 s → 提压砣, 加油, 降压砣 20 s → 提压砣, 加炭黑, 降压砣 25 s → 提压砣, 降压砣 40 s, 设备动作时间为 80 s (包括加炭黑和油的时间及升降压砣的时间)。

相对于先塑炼再混炼工艺, 直混工艺适当延长了各料段降压砣时间和次数, 以保证各种配合剂分散均匀。

二段胎面胶料采用 XM140/120 密炼机混炼, 混炼工艺与一段相同。

2 胶料物理性能对比

混炼胶 3 项快检指标如表 1 所示, 硫化胶物

理性能如表 2 所示, 硫化条件为 143 ℃ × 30 min。

表 1 混炼胶 3 项快检指标对比

项 目	直混工艺	塑炼工艺
塑性值	0.27~0.33	0.29~0.35
密度/(Mg·m ⁻³)	1.120~1.140	1.120~1.140
邵尔 A 型硬度/度	59~63	57~61

表 2 硫化胶物理性能对比

项 目	直混工艺	塑炼工艺
密度/(Mg·m ⁻³)	1.130	1.130
邵尔 A 型硬度/度	62	59
300%定伸应力/MPa	9.9	8.6
拉伸强度/MPa	22.0	20.0
拉断伸长率/%	551	545
拉断永久变形/%	18	19

从表 1 和 2 可以看出, 采用标准胶直混工艺生产胎面胶, 胶料塑性值有所降低, 硬度略有升高, 密度无变化, 而强伸性能得到显著提高, 可有效改善成品轮胎的使用性能。

3 结语

采用标准胶直混工艺生产胎面胶, 由于免去了塑炼过程, 能耗降低, 生产效率提高 20%, 而且挤出胎面挺性好, 返回胶料少, 胎面一次合格率达到 96%。市场反馈信息表明, 轮胎的耐磨和抗撕裂性能得到明显改善, 顾客满意率有所提高。

(山东泰山轮胎有限公司 肖桂军

汪 霞供稿)