

轮胎花纹噪声的发声机理

陈理君 杨立 钱业青 施 马 浩

(武汉工业大学 430070)

杨光大

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司 200082]

摘要 从声学理论和实验两方面对轮胎花纹噪声的发声机理进行了深入分析研究,得出花纹块的拍打撞击声、花纹沟的泵浦噪声、光面胎沙声及沟内气柱共鸣声是轮胎花纹噪声的主要噪声源。轮胎接地区域前沿、中央和后沿区由于各种因素产生振动所激发的辐射噪声强度以前沿区为最强,中央区次之,后沿区最小。在综合分析的基础上提出两条经验法则:一是轮胎花纹块的撞击声谱只和它的面积有关而与它的形状无关;另一条是花纹沟的泵浦噪声谱只和花纹沟的长度、宽度和走向有关,与它的深度基本无关。本文还对某些有异议的噪声机理作了评述。

关键词 轮胎花纹,噪声,发声机理

汽车在高速行驶中,轮胎胎面与路面相互作用会产生烦人的噪声。这种噪声基本上由两部分组成,一部分是轮胎直接辐射出来的直接噪声,另一部分是轮胎激振车体产生的间接噪声。而轮胎直接辐射的噪声又分为胎面花纹噪声和弹性振动噪声。当车速大于 $60 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮胎花纹噪声为车辆的主要噪声源^[1],它的强弱与花纹的结构形式有关。而轮胎花纹结构可以说是五花八门、式样众多,不同的花纹排列结构,其噪声特性也不一样。要对轮胎花纹噪声进行有效控制,首先必须了解轮胎花纹的发声机理,进而建立科学而实用的轮胎噪声数学物理模型。据此编制相关软件程序,通过该仿真程序运行,对所设计的轮胎花纹方案作计算机仿真分析、仿真发声、主客观评价、方案比较和优化设计,最终可设计出低噪声轮胎并投入生产。

1 轮胎花纹的发声机理

轮胎在滚动时发出的轮胎噪声可以归结为如下几种:花纹块打击地面时所发出的撞击噪声、沟槽腔体中空气被挤压和膨胀而产生的“泵

浦效应”噪声、横沟槽内气柱共鸣的噪声、光面胎面作用在地面中大小不等的隙腔时而产生的不规则沙声(随机噪声)、由于道路的凹凸不平 and 轮胎均匀性不良而激起的轮胎振动噪声(一般频率较低,为 $80 \sim 150 \text{ Hz}$)、轮胎滚动时切割空气产生的切割噪声、轮胎与地面相摩擦而产生的摩擦噪声以及车辆行驶时对路面产生的低频路面噪声^[2]。

所有这些噪声中,花纹块的撞击噪声、花纹沟的泵浦噪声、横沟槽的气柱共鸣噪声和光面胎面的随机沙声是四大主要噪声源。现分别对它们的发声机理进行陈述。

1.1 花纹块的发声^[1,2]

轮胎行驶时,如图1所示,在轮胎接地区域前沿A点块的矢量速度 \vec{v} 突变成 \vec{v}_1 ,但 $|\vec{v}_1| = |\vec{v}|$,根据平行四边形分析原则,必有指向轮胎中心的 \vec{v}_2 存在。显然,要突然产生 \vec{v}_2 ,必伴有指向轮胎中心区的力 F ,形成块撞击地面引起的激振,产生撞击噪声。轮胎接地后沿情况类同,但产生的负压声强度比前者弱。花纹块拍打地面时,块与地面之间的空气被压缩,空气密度增大形成正声压,而随着花纹块离开地面,空气密度变小形成负声压,从而产生气流噪声。两者合成,即为块的发声。实测也证实这一点为上大下小的N形波形。

如果两个花纹块面积相同但形状不同,可以认为其发声由许多点声源构成,每一单位面积作为声点^[3]。应用声点阵法对花纹块进行

作者简介 陈理君,男,1938年11月出生。武汉工业大学自动化研究所和应用技术研究所所长,教授。1963年毕业于南京大学电声专业。长期从事噪声控制、模糊控制方面的研究与教学工作,获得多项科研成果,著有《微机模糊控制》等书3本,发表论文三十余篇。

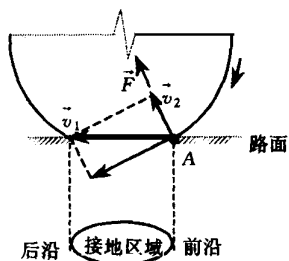


图1 轮胎接地区域的前沿和后沿

分析,显然两花纹块包含相同数目的声点阵数。各点阵撞击地面时发出的声能相同,即具有相等的声压幅值。而相应点阵间的相位十分接近,因而根据声能叠加原理,两花纹块发出的总声能也相同。试验也证实了以上分析结果。

在仿真中,我们用一个准正弦函数 $P_b(t)$ 来近似表示这种N形波形,取得了较好的仿真结果。

1.2 花纹沟的发声^[2,4]

由于胎面橡胶是弹性体,因而在轮胎接地前沿区轮胎触地时花纹沟两侧的花纹块被压缩变形,沟槽腔内空气因体积减小而压力增大,空气被突然压缩排出,形成类似喷射的噪声,声强度较大。而在轮胎接地后沿区轮胎离开地面时,沟槽腔体又恢复原状,腔内空气压力变小,周围空气急速补充到腔体内产生“扑”声,声强度较弱。腔中空气被挤压和膨胀的泵浦效应产生了花纹沟的噪声^[5,6]。

对于匀速行驶的汽车,不同的花纹沟仍可能具有相同的体积压缩比,也就是说沟槽内各声点阵产生的声振幅是相等的,因而沟槽体积越大,总声压也越大。在实际花纹设计中,沟槽的深度有一定要求,可以认为是在2个常数范围内,所以花纹沟的发声与沟的长度和宽度有关,与它的深度基本无关。此外,花纹沟的发声还与其走向有关。

花纹沟的基本样式为横沟、斜沟和纵沟。对于横沟,在汽车行驶中类似脉冲式地不断喷气和吸气,产生泵浦噪声。对于有角度的斜沟,由于接地时间比横沟长,气流的压缩和释放也较慢,声压幅值就较小。而对于纵沟槽,由于车辆行驶时槽内空气受压随时间基本不变,只产生声压的“直流成分”,仅仅在气体喷出时因受阻而产生涡流,但能量较小可以忽略。可以

理想地认为纵沟槽不发声。试验实测也验证了这一假设。

假设横沟槽发声的时域波为 $P_{s0}(t)$,那么具有 θ 角的槽所发出的噪声可近似地用下式表示

$$P_s(t) = P_{s0}(t) \sin \theta \quad (1)$$

式中 $P_{s0}(t)$ 为横沟槽发声的声压值, θ 为 0 和 90° 时,分别对应着纵沟槽和横沟槽。

1.3 随机沙声^[5,6]

由于路面和胎面不可能绝对光滑平坦,胎面不可能完全紧贴地面,在胎面和地面之间存在着大小不等的隙腔,其中的空气被压缩和膨胀就产生了不规则沙沙声,称之为随机沙声。对于有花纹的胎面,随机沙声能量较小,可以不作考虑。但是对于没有花纹的光面和肋条花纹(忽略纵槽的直流噪声),随机沙声即是它们的“花纹”噪声。

各隙腔的大小是随机的,与胎面相接触的位置也是随机的。而发声原理与花纹块和花纹沟腔体的发声原理相同。

1.4 花纹沟的气柱共鸣声^[4]

花纹沟与路面接触时形成的结构类似于管子。管内空气柱振动发声的频率决定于管长和端口的开放情况。如果管子一端开放一端封闭,管长为 l ,则基频的波长为 $4l$,其谐振频率 f_n 为

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4l}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中, c 为声速。

如果管子两端开放,基频的波长则为 $2l$,谐振频率为

$$f_n = \frac{nc}{2l}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

当花纹沟的谐振频率和其它花纹噪声相一致,空气流急速吹过槽口时,就会产生气柱管的共鸣,这将导致轮胎噪声在此频率出现峰值。

可以看出,花纹沟两端开放和沟长小一些都使基频变高, $f_n > 5 \text{ Hz}$ 时产生的气柱共鸣对轮胎噪声影响较小。因此设计花纹沟时可通过开放花纹沟的两端和合理选择花纹沟的长度和间距数目来降低气柱共鸣声。

2 有待验证的几个发声机理

近几年国内外有关文献^[5~8]还提到以下几个发声机理:

(1) 亥姆霍兹共振机理

汽车行驶时,轮胎着地部分花纹沟空腔中的空气可看作为一个共振弹簧,它与空腔跟外部空气之间连接处——“颈部”喷口的空气构成一个共振器,从而发出很强的噪声。我们对这个机理进行了研究,认为有几个疑点。

首先,众所周知,亥姆霍兹共振器有3个功能:由于颈口附近和颈内的摩擦力,它能吸收声能;由于共振特性,它能储存声能;存在颈口辐射,起二次声源作用,如与空气耦合较好,方可辐射出去。

其次,由于轮胎接地区域内空腔体积一般十分小,喷口处空气质量也有限(否则推动不了它振动),经计算其共振频率在3 kHz以上,所以这种共振导致的噪声辐射对轮胎噪声的影响也是微弱的,实测中尚未发现这种影响的存在。

最后,观察一下这种亥姆霍兹器的形成过程:假若轮胎接地印痕长度为10~15 cm,车速达到70 km·h⁻¹时,轮胎线速度约为20 m·s⁻¹,则某些花纹沟在轮胎接地区域内形成的腔体暂留时间 t 为

$$t = \frac{1}{2} \times \frac{(10 \sim 15)}{20 \times 10^2} \\ = (2.25 \sim 3.75) \times 10^{-3} (\text{s})$$

在这样短的时间内,要完成声能存储、共振、二次声源辐射声波,这是难以想象的,除非辐射的噪声频率十分高。故这种机理还有待做进一步的研究与验证。

(2) 喇叭筒效应^[1,6]

轮胎接触路面前后的胎面与路面之间,形成了声学喇叭筒,提高了轮胎噪声的发射率。经我们模拟实测,发现波长小于胎面宽度 d 的那些频带的噪声,在这种喇叭筒正前方有明显的增强,约有5~6 dB,然而指向性十分明显。轮胎行进方向左右侧噪声增强不十分明显。这种现象国外有人归结为滤波放大作用,我们认为不妥。因为声学喇叭筒本身就没有滤波和放大功能,它可通过电声类比来分析,即用一个变压器来描述,仅仅是有变压作用而已,不可能滤去某频带噪声。至于喇叭筒的长度、伸展曲线及喇叭口大小,只是影响其辐射阻抗,喇

叭口越大,低频辐射效率就越高。我们在模拟轮胎噪声实测与仿真分析中也未发现有明显放大与滤波现象。至于这种效应在轮胎噪声中起多大作用,还有待探讨。

3 轮胎接地区域的噪声辐射分析^[9]

轮胎接地区域根据车前进方向可划分为前沿、后沿和中央3区(见图1)。前沿区轮胎花纹触地时,花纹块拍打击地面生成撞击噪声、花纹沟被挤压生成类似喷射脉冲的噪声,沿轮胎横向合成声波,因其声阻抗大,辐射频率高,声强度较大,是轮胎噪声能量的主要分量。

后沿区,轮胎花纹快速离开路面,无撞击和挤压,只有花纹沟槽和胎面跟路面间空隙快速膨胀恢复,空气被吸入空腔,形成“扑”声。该声波谱相位与前沿波差180°,且滞后一段时间(走过轮胎接地长度所需的时间),但其强度较前者弱。因声阻抗小,辐射频率低,它是轮胎噪声的次要分量。至于胎面花纹接地处摩擦力和粘滞作用下产生切向变形,当后沿胎面单元突然失去接触时产生的切向高频振动,因声耦合差,辐射出的噪声量极微弱,可以不考虑。

轮胎接地中央区,由于接地的区域内沟槽形成管状体,特别是该管状体开口在轮胎接地区域外侧,只要有声激发或强气流吹过,就产生气柱共鸣声,从而辐射噪声。这种分噪声能量是必须加入到总噪声中去的,不可忽略。

4 奇异发声机理的解释^[9]

同一种花纹构造的轮胎,一般来说,旧轮胎噪声比新轮胎噪声大。尽管旧轮胎因磨损花纹块变薄、花纹沟变浅,即块质量变小,沟槽深度变浅了,按理说噪声应减小,可实际情况却相反。这是因为旧轮胎除橡胶老化变硬外,还因磨损不均匀,导致轮胎的动态性能变坏,另外花纹块上的刀槽花纹因磨损而消失,使花纹块柔软性变差,从而使轮胎噪声变大。

手工热刻或冷刻花纹的实验轮胎,行驶时实测噪声与同种花纹批量投产的轮胎相比,前者主观评价和客观评价往往比后者好。这是因为手工刻的一致性差,花纹块以及花纹沟有差异,而机制生产的轮胎一致性较好,它们生成的声波形,根据傅立叶分析,前者声能频率均衡性

要比后者好。也就是说对同一种花纹结构,手工刻能使声能较均匀地分散到各频带上,使其接近白化噪声,故在一定程度上可改善噪声烦躁程度。

5 结论

(1)在诸多轮胎花纹噪声源中,起主要作用的是花纹块撞击地面的噪声、花纹沟的“泵浦效应”噪声和花纹沟内气柱共鸣噪声。对于肋条花纹和没有花纹的光面轮胎,随机沙声是主要噪声源。

(2)经过理论分析和实验验证,花纹块噪声只跟它的面积有关而与它的形状无关。花纹沟的泵浦噪声与花纹沟的长度、宽度和走向有关,与沟的深度基本无关。沟槽内气柱共鸣噪声取决于沟的长度和端口开放情况。

参考文献

- 1 马大猷. 噪声控制学. 北京:科学出版社,1983. 414
 - 2 Willett P R. Tire tread pattern sound generation. Tire Science and Technology, 1975, 3(4):252~266
 - 3 Park D H, Bathe K. Method for improving tread noise by relative rotation of a rib and simulating the effect thereof. USA, USP 4 788 651. 1988
 - 4 庄继德. 汽车轮胎学. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 323
 - 5 Heckl M. Tyre noise generation. Wear, 1986, 113:151~170
 - 6 Schaaf K, Ronneberger D. Noise radiation from rolling tires—sound amplification by the horn effect. Inter Noise, 1982, 82(2):131~134
 - 7 贺海留, 贾云海. 轿车轮胎的室内噪声测试. 橡胶工业, 1997, 44(2):102~111
 - 8 Lee J J. Structure-borne tire noise statistical energy analysis model. Tire Science and Technology, 1997, 25(3):176~186
 - 9 Chen Lijun, Yang Li. Computer automatic synthesizer assessment for noise spectrum. Sensor World, 1996, 2(6):3~5
- 收稿日期 1999-03-30

Sound Generating Mechanism of Tire Tread Pattern's Noise

Chen Lijun, Yang Li, Qian Yeqing, Shi Min and Ma Hao

(Wuhan University of Technology 430070)

Yang Guangda

[Shanghai Tire and Rubber (Group) Co., Ltd. 200082]

Abstract The sound generating mechanisms of the tire tread pattern's noise were investigated based on the acoustic theory and the experiment. It was found that the pat and impact sound from the tread blocks, the pump noise from the grooves, the swish sound from the smooth tread and the air column resonance from the grooves were the main noise resources; the noise radiation energy by the vibration in the front ground contact area was the most strong, that in the central ground contact area was the medium, and that in the back ground contact area was the least. The two experienced rules were proposed based on the comprehensive analysis: a) the impact sound spectrum of the tread blocks was only relative to their area, but not to their shape; and b) the pump sound spectrum of the grooves was only to their length, width and direction, but not to their depth. Some noise generating mechanisms in dispute were reviewed.

Keywords tread patterns, noise, sound generating mechanism

我国公路通车总里程达 127.8 万 km

据悉,截至 1998 年年底,我国公路通车总里程已达到 127.8 万 km,提前两年实现了“九五”发展计划。

据了解,到 1998 年年底,我国规划中的公路骨干线“两纵两横三条重要路段”已累计完成

41%,在建 46%。“两纵”公路骨干线为:黑龙江同江市至海南三亚市、北京至珠海;“两横”线路为:江苏连云港至新疆霍尔果斯、上海至成都;三条路段为:北京至沈阳、北京至上海、重庆至北海。到 2002 年,以上路网将基本完成。

(摘自《中国汽车报》,1999-06-23)