

文章编号: 1002-0268 (2007) 03-0046-05

轮胎/路面噪声模型研究进展

曹卫东¹, 吕伟民²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092)

摘要: 在系统地总结国外学者对轮胎/路面噪声模型研究现状的基础上, 对轮胎/路面噪声的物理模型、统计模型和混合模型分别进行了描述和评价, 指出了其各自的适用性, 物理模型主要用于轮胎设计, 统计模型主要用于路面设计, 而混合模型则是考虑轮胎和路面的最优组合。由于轮胎/路面噪声机理十分复杂, 到目前为止, 还没有任何一种模型可直接用于轮胎和路面设计。但从物理意义和使用的角度来看, 统计-物理混合模型应当最有发展前景。

关键词: 道路工程; 轮胎/路面; 评价; 噪声模型; 现状

中图分类号: U491.9⁺1; TB533⁺.2 **文献标识码:** A

Progress in Tire/Pavement Noise Models

CAO Wei-dong¹, LV Wei-min²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Shandong Jinan 250061, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the summary of the current status of research on tire/pavement noise models by overseas experts, the physical models, statistical models and hybrid models of tire/pavement noise were evaluated, respectively. The applicability of each of the models was pointed out. The physical models can be applied for tire design, the statistical models are applied for pavement design and the hybrid models focus on the optimization of the combination of tire and pavement. At present, there is no model can be applied directly for tire and pavement design because of the complexity of the mechanism of tire/pavement noise. However, from the point of physics and application, a combined statistical-physical approach is thought to be most promising.

Key words: road engineering; tire/pavement; evaluation; noise model; the current status

轮胎/路面噪声是道路交通噪声的重要声源, 尤其小汽车车速在 50 km/h 以上时, 轮胎/路面噪声上升为主导声源。轮胎/路面噪声产生机理和模型的研究对于低噪声轮胎和路面设计具有重要的指导意义。国外对此已有 20 多年的研究历史, 而我国研究的甚少。本文旨在系统地介绍国外学者对轮胎/路面噪声模型的研究现状, 为我国轮胎/路面噪声的理论研究提供参考。

1 物理模型

1.1 Kropp 模型^[1]

1.1.1 模型描述

Kropp 模型给出了两种机理的综合性理论描述, 这些机理通常被认为是轮胎/路面噪声产生的最重要

因素, 即: 径向轮胎振动; 空气共鸣现象。同时, 它也包括轮胎辐射噪声模型, 且考虑了路表面的吸声影响。

(1) 径向轮胎振动模型

轮胎振动行为的理论基础是板弯曲理论。轮胎模型为弹簧基础上的受拉板, 其有效频率范围为 400 ~ 3 000 Hz, 由于忽略了轮胎曲率, 导致低于 400 Hz 的结果有偏差。较高的有效频率界限取决于板厚, 在最高频率时, 板厚与弯曲波的波长相当, 因此经典的弯曲理论不适用超过此频率的情况。轮胎和路面的接触呈非线性, 轮胎振动特性的描述以时间域的形式来表达; 轮胎某点的变形由脉冲响应函数的总和来描述, 它表示作用在整个轮胎上的力引起的变形。由于力取决于轮胎变形, 因此该机理是非线性的, 必须应用特

收稿日期: 2005-09-23

作者简介: 曹卫东 (1972-), 男, 山东嘉祥人, 博士, 讲师, 研究方向为沥青路面。(cawd2001@sdu.edu.cn)

殊的方法计算轮胎振动。

(2) 轮胎声辐射模型

轮胎声辐射模型建立在等效声源原理基础之上。两个多极声源对称地分布于路表面的两侧,且必须满足轮胎表面的边界条件;另外,路表面垂直方向上的反射因素也要满足。

(3) 空气泵噪声模型

由于不平整度因素引起的轮胎变形可看作小体积源,辐射声可通过计算接触区置换体积的总和求得。和的一部分来自于接触区的前端,另一部分来自于尾部,以区别接触区的压缩和扩张部分。

1.1.2 评价

Kropp 模型结合了噪声产生机理,这些机理是研究者公认的轮胎/路面接触噪声产生的重要因素。尽管该模型十分复杂,它仍能对行驶在粗糙路面上的光滑轮胎辐射的噪声进行合理预测。在预测精确的声压辐射量时,仍表现出一些缺陷,但对于定性的研究不同参数(如行车速度、轮胎材料劲度或路表面特性)对声辐射的影响是非常有用的。

模型没有考虑轮胎花纹块产生的噪声。这意味着未考虑两种过程:花纹块撞击路面引起的花纹块振动;试样撞击路面的修正。

1.2 TRIAS 模型^[2]

1.2.1 模型描述

TRIAS 模型旨在建立分析小汽车噪声的综合性模型,特别强调轮胎/路面噪声。该模型考虑了3种类型的噪声源:振动轮胎的声辐射;空气动力声辐射对轮胎/路面接触区的影响;汽车发动机和驱动系统的声辐射。

目前,该模型的主要努力方向为轮胎和轮胎/路面接触模型。

(1) 轮胎振动模型

TRIAS 模型是 Kropp 模型的应用和扩展。该模型提出了计算轮胎振动的方法:第1步,应用 Green 方程计算单位力引起轮胎振动的脉冲相应,轮胎模型简化为薄壁圆柱筒,应用弯曲波方程求解。第2步,计算施加在轮胎与路表纹理接触区上的作用力,采用简单的弹簧模型,将轮胎局部变形和作用力联系起来。

接触力取决于轮胎变形,它反过来取决于振动和轮胎上的动态作用力,这意味着轮胎的实际变形取决于变形(振动)历史。因此,轮胎振动一定要迭代计算。

(2) 轮胎振动辐射模型

轮胎振动向周围辐射声波。在 TRIAS 模型中,声

辐射采用 Kropp 提出的经验-分析法。该方法由以下两步组成:

计算地面上无限圆柱筒的声辐射,采用 Hankel 函数叠加计算;

轮胎宽度的校正。

严格地讲,声辐射模型仅对轮胎的平面辐射有效。因此,当考虑噪声的方向性时要进行经验校正。

(3) 空气泵噪声辐射模型

轮胎/路面接触区由于空气运动引起噪声辐射,其模型建立在 Ronneberger^[3]的研究基础之上。在轮胎和路面的接触区,空气被封闭在路面和轮胎花纹包围的洞穴内,这会造成局部随时间变化的空气体积的压缩和膨胀。空气体积的变化被认为是声源,其强度与空气泵吸的加速度呈正比。总的声源强度根据接触区的轮胎变形速度计算。

路表面的多孔性影响空气泵声源的声辐射,通过引入附加的辐射阻抗来考虑。可由接触区的尺寸和纹理参数来估计辐射阻抗,多孔性总的影响以附加传递损失函数表示。

(4) 号筒效应模型

轮胎与路面接触区形成的几何形状类似号筒。声学上,号筒效应对轮胎花纹前面和后面的声辐射放大作用非常显著。对轮胎振动,辐射模型中结合了轮胎形状,号筒效应已经考虑进去。对空气泵噪声,建议采用两项技术:第一,将空气泵声源模拟为接触区附近附加的轮胎局部振动。第二,在号筒楔形中引入多极子图像声源。Ronneberger^[3]采用该技术,但假定道路是完全反射的。原则上讲,应尽可能的考虑路表面的吸声。

1.2.2 评价

模型包含了轮胎/路面噪声机理的最重要声源,模型的不同部分仍可改进,但要进一步成功地开发模型,完备的试验资料是必须的。

模型的复杂性和参数的个数,限制了直接从物理意义上探讨轮胎/路面噪声问题,而且,采用如此多的参数,使模型预测与有限的试验资料拟合是不可靠的。

轮胎振动噪声和空气泵噪声被认为是两个独立的噪声源。然而,尽管噪声机理是独立的,但引起的声波是干涉的。

1.3 Bremner/ Huff/Bolton 模型^[4]

Bremner, Huff 和 Bolton 给出了统计能量分析(SEA)模型,以预测轮胎参数变化对振动引起的辐射噪声。

1.3.1 模型描述

依据 SEA 标准, 模型非常简单, 如图 1 所示。路面不平度和轮胎花纹是两个不相关的激励源; 轮胎振动模型简化为圆柱形薄壳的振动, 声辐射模型为无限隔音板上的平面辐射。轮胎的振动行为通过比较计算的圆周辐射特性与轮胎测量的特性进行试验性验证, 已表明二者具有合理的一致性。

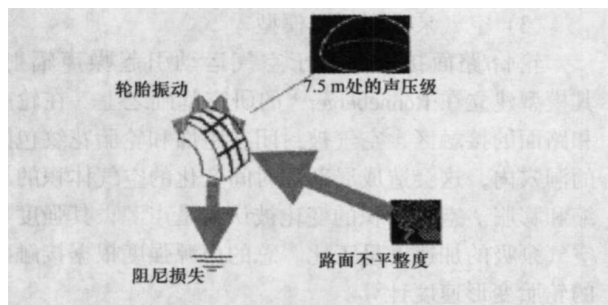


图 1 轮胎振动和辐射的 SEA 模型

Fig. 1 SEA model for tire vibration and radiation

利用上述模型, 进行了一系列参数的研究。通过改变轮胎参数, 如橡胶杨氏模量、束带和轮胎花纹等, 评估引起的辐射噪声变化。

1.3.2 评价

模型应用了具有吸引力的数字技术, 适合轮胎的

振动行为。模型仅试验性地验证了轮胎的振动行为, 对声预测的准确性未作评论; 模型只考虑了径向振动, 其他的噪声预测机理 (如切向振动或空气动力机理) 未做考虑。

2 统计模型

2.1 Sandberg/Descornet 模型^[5]

2.1.1 模型描述

Sandberg 和 Descornet 模型描述了路表纹理和通过声谱的关系。轮胎/路面噪声机理假定两种: 径向激励的轮胎振动 (低频); 空气泵吸作用 (高频)。两种机理的贡献大小取决于路表纹理特性。

模型基于 33 条路面上 4 种轮胎的通过噪声谱和纹理轮廓的测量结果, 计算每一对测量噪声和 1/3 倍频程纹理谱之间的相关系数。相关系数 ρ 是声频率 f 和纹理轮廓波长 λ 的函数。不同轮胎的相关系数等值线图显示了其典型的声学特性, 如图 2 所示。在相对大纹理波长 ($\lambda > 10$ mm) 和低频 ($f < 1\,500$ Hz) 之间的相当大区域有很好的相关性; 在相对高声频 ($f > 2\,500$ Hz) 和较短的纹理波长 ($\lambda < 10$ mm) 间有较小的区域存在负相关。

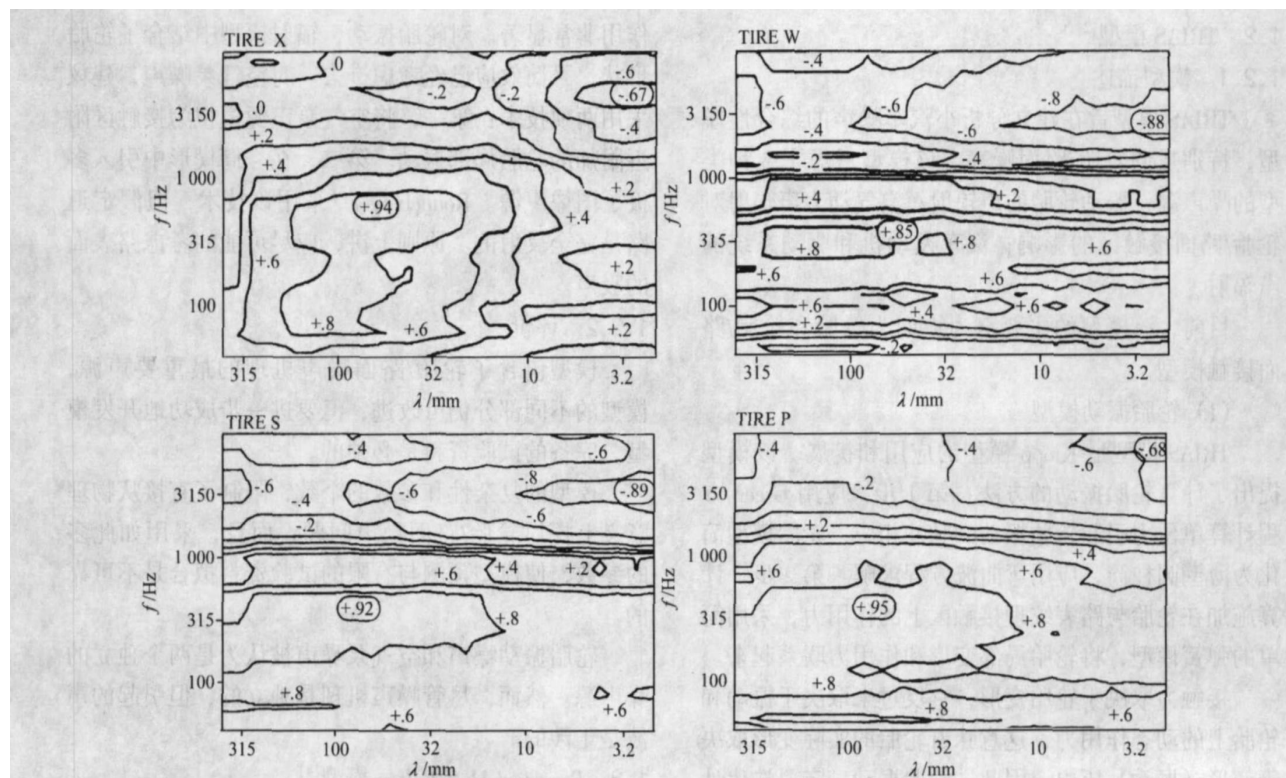


图 2 4 种轮胎的相关系数等值线图

Fig. 2 Contour graphs of the correlation coefficient for four different tires

图2中两个明显的区域表明噪声的产生至少存在两个独立的机理:一个区域是当长纹理波长的幅值增加时,低频噪声随之增加;另一个区域是当短波长的幅值减小时,高频噪声随之增加。多种路面类型的相关关系表明,决定路面噪声的主要特性是表面纹理的几何特征。

2.1.2 评价

模型提供了轮胎/路面噪声的定性描述,并显示纹理轮廓谱和轮胎/路面噪声间的关系。有关纹理的结论非常清晰:减少大纹理构造($\lambda > 50\text{ mm}$)和增加宏观构造(λ 为 $0.5 \sim 50\text{ mm}$)可降低轮胎/路面噪声。然而,必须指出,减少大纹理构造的相关性很强,但增加宏观构造的相关性不强。

Sandberg和Descornet给出了修建安静路面的几条建议和启示:限制波长大于 10 mm 的表面纹理;增加波长小于 10 mm 的表面纹理;避免表面的沟槽和封闭的洞穴;良好的吸声(如多孔路面)。

2.2 TINO模型^[6]

2.2.1 模型描述

TINO模型作为TINO工程的一部分,应用统计模型将路表特性与噪声辐射相联系。采用控制通过法(Controlled Pass-by Method)测量单车在7种密实型路面上的噪声。根据纹理波谱,提出了纹理指数(TI)的概念。基于上述测量结果,发现TI与 7.5 m 处的总声压级 SPL 相关性较好,回归方程如下:

$$v = 50\text{ km/h}, SPL = 0.47 TI + 42.94, R^2 = 0.91; (1)$$

$$v = 80\text{ km/h}, SPL = 0.47 TI + 49.39, R^2 = 0.91. (2)$$

TI和 SPL 的关系为低噪声路面的设计提供了指南。首先,沥青混合料必须获得具有较低最大峰值的纹理谱,可通过适当选择集料最大尺寸和集料级配曲线来实现;其次,在铺筑混合料时,应尽可能减少波长在 $500 \sim 800\text{ mm}$ 范围内的不平整度。

2.2.2 评价

TINO模型给出了纹理参数和声级之间的简单关系,但输入参数的物理背景尚不清楚。从模型中不能获得声谱信息,而且输入参数和噪声产生机理之间的关系不清晰。

3 混合模型

3.1 Fong模型^[7]

3.1.1 模型描述

Fong的声学模型涉及纹理引起轮胎振动产生的噪声模型。采用转移函数计算路表纹理引起的接触压力和轮胎辐射噪声。

采用激光轮廓测定仪测量路表面纹理。利用测量资料,将路面简化为数字化的二维轮廓,作为接触压力计算模型的输入参数。在这个二维模型中,轮胎简化为带有普通花纹块的弹性半平面,路面模型为完全刚度,轮胎花纹在接触面上发生变形。当路表纹理承受的接触荷载等于轮胎压力时,达到平衡。根据接触的初始几何形状,可估计接触压力分布。接触压力分布大致呈三次曲线。

由于路表面的纹理突起不能被轮胎的接触完全包络,以致在轮胎和路面之间留下空隙。接触压力线为负值的部分,空隙出现。这种情形下,接触压力可设置为0,表明轮胎/路面没有接触。

声强测量采用卡车和小汽车,均安装两种类型轮胎。不同路面类型上的行车速度均为 45 km/h ,声强在接近轮胎表面的4个位置记录。

对计算的接触压力级和声强测量进行谱分析:随纹理的增加,接触压力幅值增加;而且,卡车轮胎较高的花纹橡胶劲度和充气压力导致接触谱高于小汽车轮胎。

采用谱分析技术分析接触压力谱和噪声谱(每种路面和轮胎对应一转移函数)之间的关系。转移函数通过简单的输出(声强)和输入(接触压力)谱比来计算。采用能量转移函数可预测任意路面上轮胎产生的噪声。测量声强与采用能量转移函数的预测值比较显示,二者具有很好的一致性。

Fong得出的结论:轮胎和路面纹理的接触压力是噪声产生的推动力。

3.1.2 评价

Fong模型将接触压力谱作为轮胎/路面接触模型的重要输入参数,这非常有吸引力。它表明接触压力和其附近产生的噪声存在线性关系。但路表纹理和噪声之间的一般关系没有发现,这意味着路表纹理和接触压力之间的转移函数是非线性的,纹理轮廓谱可能不是噪声预测的参数。

Fong提出的方法仅对单一行驶速度有效,对不同的车速,转移函数未必一定相同。Fong的结果来自于密实沥青路面,是否适于其他路面值得关注。

模型对基于纹理资料的安静路面设计提供了机遇,但没有给出安静轮胎设计的直接方法。

3.2 PREDIT/SL R. U. US模型^[8]

3.2.1 模型描述

PREDIT和SL R. U. US模型是统计和物理方法相结合的混合模型,将纹理参数和轮胎噪声相联系。模型的物理部分集中在轮胎包络的路表面上。当大纹理

幅值出现时,由于轮胎不能完全与路面轮廓形状吻合,接触区上存在非线性动态行为,这意味着路表纹理深度与作用在轮胎花纹上的激振力呈非线性关系。

PREDIT 模型集中在静态的路面轮廓包络线上,采用 Clapp^[9] 静态接触模型来实现。通过变化弹性模量,轮胎花纹包络的路表面突起可得到控制。

SI. R. U. US 模型采用与 PREDIT 类似的方法,仅用动态包络代替静态包络。动态包络采用 Kropp 的轮胎滚动模型,该模型还处于试验验证阶段。

3.2.2 评价

路面轮廓包络似乎是一种合理和具有物理意义的方法,它可得到路面纹理和轮胎/路面噪声之间的良好的相关性。

作者试图采用路面纹理包络方法缩小密实和多孔路面的差距。然而,多孔路面的纹理特性不仅影响振动特性、吸声特性,还影响号筒效应和声传播。因此,多孔路面仅应用包络的方法使用该模型是不可能的。

3.3 SPERON 模型^[10]

3.3.1 模型描述

SPERON (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) 模型由德国研究项目 (Sperenberg Project) 发展而来。该混合模型是统计/物理模型的结合。采用这种模型,可以解释密实路面上的通过声级。模型采用多元回归分析技术,建立了通过声级 L_{Amax} 谱与 4 个变量(车速、接触压力谱、轮胎宽度和纹理轮廓形状因子)之间的关系。接触压力计算是二维的,根据 Clapp^[9] 接触压力计算公式进行。

3.2.2 评价

模型在数量上与实际测量的通过声级有良好的一致性。尤其对光滑和凹槽轮胎,90 % 的观测测量可以解释。

模型忽略了轮胎花纹的影响,在多元回归分析中输入和输出变量之间可能存在的非线性没有考虑。

4 结语

本文系统地介绍了三类轮胎/路面噪声模型。要

客观的比较这些模型,必须明确其各自的目的。有些模型是为了解释轮胎的影响,而另一些模型主要考虑路面因素。三种物理模型都集中在轮胎上,其他模型主要在路面上,而混合模型尽可能地考虑轮胎和路面部分。因此,可以说:物理模型主要用于轮胎设计,统计模型主要用于路面设计,而混合模型则是考虑轮胎和路面的最优组合。

由于轮胎/路面噪声机理十分复杂,到目前为止,还没有任何一种模型可直接用于轮胎和路面设计。但从物理意义和使用的角度来看,统计-物理混合模型应当最有发展前景。

参考文献:

- [1] W KROPP. A Two Dimensional Acoustic Rolling Model for Investigating the Source Mechanisms of Tyre Noise [C] Proc. of the 15th International Congress on Acoustics. Trondheim:1995.
- [2] F DE ROO, E GERRETSEN. TRIAS-tyre road interaction acoustic simulation model [C] Internoise 2000. Nice:2000.
- [3] D RONNEBERGER. Towards quantitative prediction of tire/road noise [C] Proc. Workshop on rolling noise. Berlin:1989.
- [4] P BREMNER, *et al.* A model study of how tire construction and materials affect vibration-radiated noise [C] Vibro-Acoustic Sciences publication 972049, 1997.
- [5] U SANDBERG, G DESCORNET. Road surface influence on tire/road noise [C] Proc. inter. noise 80. Miami:1980: 259 - 272.
- [6] L DOMENICHINI, *et al.* Relationship between Road Surface Characteristics and Noise Emission [C] 1st International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction. Rome:1999.
- [7] S FONG. Tyre noise predictions from computed road surface texture induced contact pressure [C] Proc. inter. noise 98. Christchurch:1998.
- [8] J F HAMET, P KLEIN. Road Texture and Tire Noise [C] Internoise 2000. Nice:2000.
- [9] T G CLAPP, A C EBERHARDT, C T KELLEY. Development and Validation of a Method for Approximating Road Surface Texture-Induced Contact Pressure in Tire Pavement Interaction [J]. Tire Science and Technology, TSTCA, 1988, 16(1): 2 - 17.
- [10] T BECKENBAUER, A KUIJPERS. Prediction of Pass-by Levels Depending on Road Surface Parameters by Means of a Hybrid Model [C] Internoise 2001. Hague:2001.