

钢轨噪声产生的机理及评价指标研究

谢怀德

中铁电气化铁路运营管理有限公司, 陕西 榆林 719000

[摘要] 针对钢轨噪声声源抑制问题, 通过对钢轨垂向和横向振动沿钢轨纵向的衰减分析, 线声源声功率密度求解, 以及线声源外一点声压级的求解阐述了钢轨噪声产生的机理, 给出了钢轨振动衰减率与噪声之间的对应关系, 并通过实验进行了验证, 结果表明: 钢轨振动衰减率是决定轨旁噪声频带分布及其大小的主要决定因素, 是钢轨噪声控制设计研究的重要参数和指标。

[关键词] 钢轨噪声; 衰减率; 线声源; 声压级

DOI: 10.33142/aem.v2i1.1426

中图分类号: U216.424

文献标识码: A

Research on the Mechanism and Evaluation Index of Rail Noise

XIE Huaide

China Railway Electrified Railway Operation Management Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract: In view of the problem of rail noise source suppression, this paper expounds the mechanism of rail noise generation by analyzing the attenuation of rail vertical and horizontal vibration along the rail longitudinal direction, solving the sound power density of the line sound source, and solving the sound pressure level at a point outside the line sound source, and gives the corresponding relationship between rail vibration attenuation rate and noise, which is verified by experiments. The results show that the attenuation rate of rail vibration is the main determinant of the frequency distribution and size of trackside noise, and it is also an important parameter and index in the design and research of rail noise control.

Keywords: rail noise; attenuation rate; line sound source; sound pressure level

在列车运行时, 轮轨滚动噪声是由轮轨表面粗糙度激发车轮、钢轨和轨枕等结构振动, 并通过周围空气向外传播产生, 如图 1(a)所示。典型的轮轨滚动噪声主要集中在 500–1600Hz 频率范围内, 它们主要来自于钢轨, 如图 1(b)所示, 从中可见, 若抑制了钢轨在这些频率的噪声, 也就能降低总的轮轨噪声值。

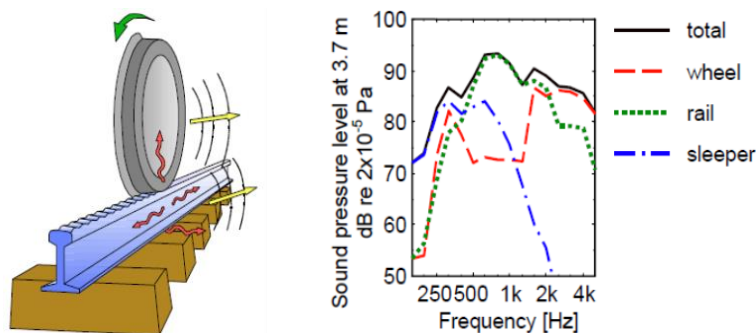


图 1 轮轨噪声的组成及贡献示意图

在钢轨受到外加激励后, 在较长的范围内, 钢轨各截面都会发生振动而成为声源, 由于钢轨具有诸多的振动模式, 且振动沿着钢轨纵向传播时会逐渐衰减, 因而钢轨可视为一个非均匀的线声源向外辐射噪声。钢轨噪声与振动研究涉及钢轨的振动分布问题、结构振动与声源的关联性问题、线声源外一点声压的计算与分析问题^[4]等, 而在钢轨噪声声源抑制方面, 关键点是找到一个合理的评价方法或设计指标。目前国际上通用的评价指标是钢轨振动衰减率, 它体现了钢轨的垂向振动或横向振动沿钢轨纵向的衰减特性, 单位为 dB/m , 可通过现场实验获得, 即: 利用力锤实验法获取钢轨纵向方向上一系列点的频率响应函数, 针对每个频带, 利用这一系列点的幅值求解指数衰减曲线的指数系数, 即得该频带对应的振动衰减率。它不仅揭示了钢轨振动分布规律, 而且是轨旁噪声频带分布及其大小的主要决定因素, 是钢轨噪声控制设计研究的重要参数和指标。

为将钢轨振动衰减率这一重要的设计参数和评价指标引入国内, 本文综合整理国内外已有的研究成果, 阐述了钢轨噪声产生的机理, 给出了钢轨振动衰减率与噪声之间的对应关系, 并进行了实验验证。

1 钢轨振动衰减特性分析

在钢轨上作用一个冲击载荷后，设距离冲击点 x 远处钢轨的振动速度 $v(x)$ 是由 n 个频率成分所组成，即

$$v(x) = \sum_{i=1}^n V_i(x) \sin[\omega_i t + \varphi_i(x)] \tag{1}$$

其中 $V_i(x)$ 和 φ_i 分别为振动速度中 ω_i 频率成分的幅值和相位。

对于 f_i 为 1/3 倍频程频内第 i 个中心频率，对于其对应频带 $[f_1, f_2]$ ，保留式(3)中属于该频带内的各个频率成分(即滤波处理)后，可得该频带范围内在时域 $[t_1, t_2]$ 内钢轨的振动速度有效值为

$$[v_{\text{rms}}(0)]_{f_i} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_{\omega_i \in [f_1, f_2]} V_i(0) \sin(\omega_i t + \varphi_i(0)) \right)^2 dt} \tag{2}$$

$$[v_{\text{rms}}(x)]_{f_i} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_{\omega_i \in [f_1, f_2]} V_i(x) \sin(\omega_i t + \varphi_i(x)) \right)^2 dt} \tag{3}$$

其中 $[v_{\text{rms}}(0)]_{f_i}$ 为载荷作用点处钢轨在第 i 个中心频率内的振动速度有效值， $[v_{\text{rms}}(x)]_{f_i}$ 为 x 远处钢轨在第 i 个中心频率内的的振动速度有效值。

$$[v_{\text{rms}}(x)]_{f_i} = e^{-\beta_i x} [v_{\text{rms}}(0)]_{f_i} \tag{4}$$

其中 β_i 为钢轨对应第 i 个频带的振动衰减率

式(4)即为目前国际上常用的一种钢轨振动衰减模型，值得一提的是，不同频带下钢轨振动衰减率 β_i 不尽相同。

2 钢轨噪声决定因素分析

在空气中振动的物体会向外辐射噪声而成为声源。对于钢轨而言，由于钢轨各截面的振动是按式(4)进行衰减，因而钢轨是一个非均匀的线声源，如图2所示。

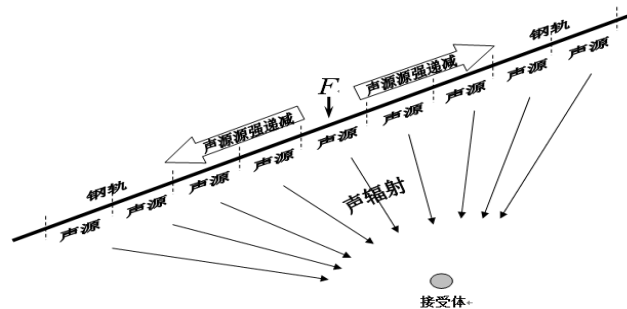


图2 钢轨线声源示意图

依据声功率与振动之间的关系，可得 x 处钢轨在第 i 个频带上振动所致声源的声功率为

$$[W(x)]_{f_i} = \Omega \sigma \rho_0 c_0 [v_{\text{rms}}(x)]_{f_i}^2 \tag{5}$$

其中 σ 为声辐射比； $\rho_0 c_0$ 为声阻抗率； Ω 为声辐射面积； $[v_{\text{rms}}(x)]_{f_i}$ 为 x 远处钢轨在第 i 个频带内的振动速度有效值。

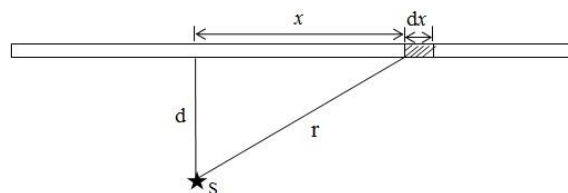


图3 线声源外一点噪声计算示意图

对于如图 3 所示的轨外一点 s，整根钢轨第 i 个频带振动所致的声压平方为

$$\left[p_r^2(t) \right]_{f_i} = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[W(x)]_{f_i}}{r^2} dx = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Omega \sigma \rho_0 c_0 [v_{\text{rms}}(x)]_{f_i}}{r^2} dx \quad (6)$$

将式(4)代入上式后，得

$$\left[p_r^2(t) \right]_{f_i} = \frac{\Omega \sigma (\rho_0 c_0)^2 [v_{\text{rms}}(0)]_{f_i}}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\beta_i x}}{d^2 + x^2} dx \quad (7)$$

则该频带内对应的声压级为

$$\begin{aligned} [SPL]_{f_i} &= 10 \log \left(\frac{[p_r^2(t)]_{f_i}}{p_0^2} \right) \\ &= 10 \log \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\beta_i x}}{d^2 + x^2} dx \right) + 10 \log (\Omega \sigma (\rho_0 c_0)^2 [v_{\text{rms}}(0)]_{f_i} / 4\pi) - 10 \log (p_0^2) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 为参考声压。

从式(8)中可见，对于同一段钢轨，声压级完全由载荷作用点处钢轨振动速度的均方根值 $v_{\text{rms}}(0)$ 和衰减率 β 决定。

3 实验分析

为能直观地展示钢轨振动衰减率与噪声之间的对应关系，这里分别针对如图 4 和图 5 所示实验对象进行了现场实验。

实验对象 1：整体道床，DTVI₂型扣件，12.5 米长，两端自由，扣件间距 0.625 米；

实验对象 2：有砟道床，弹条 II 型扣件，12.5 米长，两端自由，扣件间距 0.625 米。



图 4 实验对象 1



图 5 实验对象 2

3.1 实验方法

为获得钢轨的振动衰减率，按方法进行了敲击实验，测点布置方法如图 6 所示，现场照片如图 7 所示。

为对实验对象 1 和 2 各自钢轨发出的噪声进行对比分析，这里按图 8 所示方法进行了加载和噪声测试，现场照片如图 9 所示。

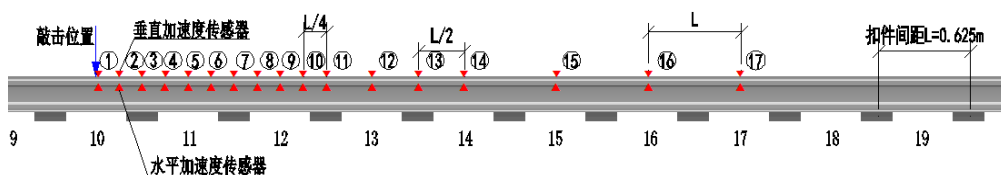


图 6 敲击测试布点示意图



图 7 获取钢轨振动衰减率的实验

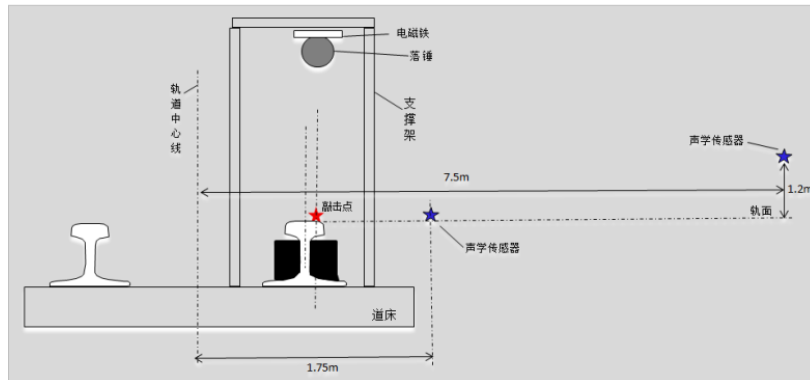


图8 钢轨加载和噪声测试实验示意图



图9 钢轨加载与噪声测试现场照片

3.2 实验结果

振动衰减率的实验结果如图 10-11 所示，其中实线和虚线分别代表实验对象 1 和 2。在载荷作用点处钢轨振动速度相同这一前提下，两根钢轨分别由于垂直振动和横向振动所辐射出的各个频段的噪声值之差就完全可以由这两个图获得，即式(8)第一项之差。从中可见，衰减率反映了不同情形下钢轨噪声辐射的一种固有属性。类似于评价隔振措施时并不考虑载荷因素而单纯对比固有的隔振属性或减振能力一样，也可单纯地用振动衰减率评价不同情形下钢轨固有的噪声辐射属性或抑制能力。然而，由式(8)可知，两根钢轨实际发出的噪声不仅与衰减率 β 密切相关，而且也与载荷作用点处钢轨振动速度的均方根值 $V_{rms}(0)$ 有关。为此，在工程实际应用中，须同时考虑这两项因素。特别地，当某些措施在使用前和后对列车载荷作用点处钢轨振动速度影响不大时，就可以完全靠衰减率说明钢轨噪声的抑制效果。

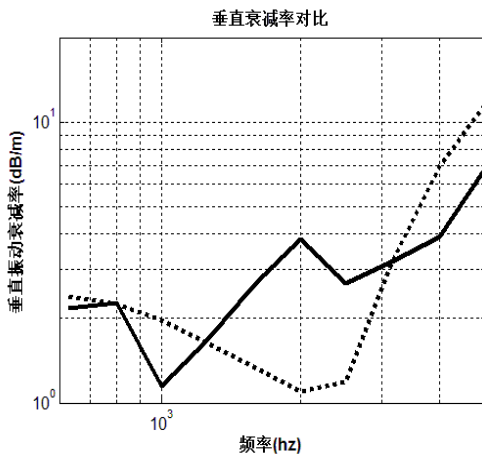


图10 钢轨垂直振动衰减率对比图

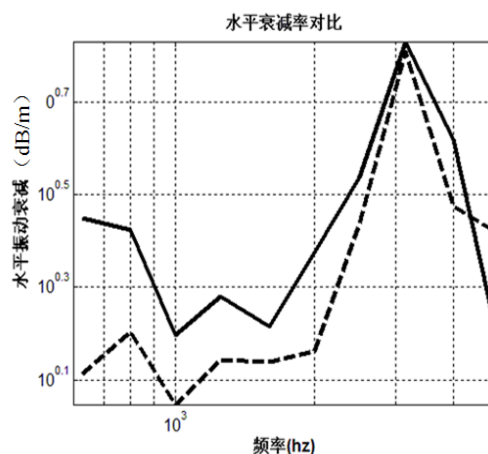


图11 钢轨水平振动衰减率对比图

图 12 是两根钢轨的落球实验结果, 其中实线和虚线分别代表实验对象 1 和 2。在偏心载荷作用下, 钢轨噪声是由垂直振动衰减率, 水平振动衰减率, 以及载荷作用点处钢轨垂直和水平振动速度的均方根值这四项因素共同决定。由于在这些频段内两根钢轨载荷作用点处的振动速度差异不大, 则噪声结果主要由衰减率决定, 图 10-12 体现出振动衰减率与声压级之间良好的对应关系。特别地, 在 3000Hz 附近, 两根钢轨的垂直振动衰减率、水平振动衰减率都很接近, 则噪声也很接近; 而在 1000Hz 附近图 10 和图 11 衰减率规律刚好相反, 使得图 12 中该频带二者噪声差异很小。

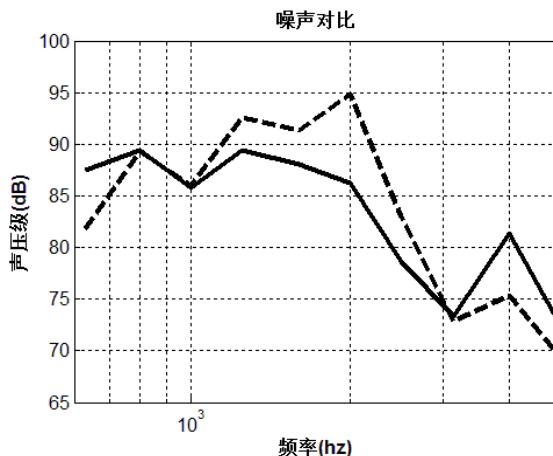


图 12 钢轨 7.5m 远处的噪声对比图

4 结论

钢轨噪声是轮轨噪声的主要组成部分, 抑制钢轨噪声是降低轮轨总噪声值的一个有效途径。本文阐述了钢轨噪声产生的机理, 给出了钢轨振动衰减率与噪声之间的对应关系, 并通过实验进行了验证, 结果表明:

- 1) 钢轨振动衰减率的研究不仅揭示了钢轨噪声产生的机理, 也体现了钢轨的声源特性, 是钢轨噪声控制设计研究的重要参数和评价指标;
- 2) 钢轨噪声主要由载荷作用点处钢轨振动速度的均方根值 $V_{rms}(0)$ 和衰减率 β 共同决定, 其中包括垂直振动与水平振动;
- 3) 抑制钢轨噪声的主峰值能有效地降低总的轮轨噪声值, 而拟抑制特定频段的钢轨噪声, 可在不对 $V_{rms}(0)$ 产生较大影响下通过提高衰减率 β 加以实现。

[参考文献]

- [1] 徐志胜, 翟婉明. 高速铁路轮轨噪声预测分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 20-26.
 - [2] 杨新文, 石广田, 张小安. 车轮滚过钢轨错牙接头处产生的轮轨冲击噪声机理分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(17): 59-63.
- 作者简介: 谢怀德 (1979.6.13-), 男, 汉族, 陕西西安, 助工, 本科, 主要从事轨道交通运营管理工作。