

文章编号: 1000-4750(2016)12-0112-07

车轨桥中高频耦合振动分析的功率流方法及模型

李 奇, 程石利, 励吾千, 宋晓东

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要: 轮轨滚动激励引起的桥梁振动响应和输入功率是计算桥梁结构辐射噪声的重要参数。时域车轨桥耦合振动分析常用于低频振动分析, 但在中高频分析时效率较低。为此, 提出一种基于力法原理的频域功率流方法解决这一问题。采用无限长 Euler 梁或 Timoshenko 梁建立钢轨部件, 采用无限大 Kirchhoff 板、Mindlin 板或有限元模型建立桥梁部件, 采用弹簧元件模拟钢轨与桥梁之间的连接扣件, 并以弹簧力为未知量建立力法基本方程。对比计算了不同轨桥模型对 U 梁和箱梁桥振动功率的影响。结果表明: U 梁桥面板的剪切效应对桥梁振动功率计算结果影响很大, 采用传统的无限大 Kirchhoff 板模型将导致功率级计算误差达到 15 dB, 而采用 Mindlin 板模型可获得良好的计算精度与效率。相对于箱梁实体有限元模型而言, 采用 Mindlin 板模型的误差仍然较大。

关键词: 车轨桥耦合振动; 噪声; 功率流方法; 无限大板; 有限元法

中图分类号: U233; TB53 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.0303

A POWER FLOW METHOD AND ITS MODELING FOR COUPLING VIBRATION ANALYSIS OF TRAIN-TRACK-BRIDGE SYSTEM IN THE MEDIUM-TO-HIGH FREQUENCY RANGE

LI Qi, CHENG Shi-li, LI Wu-qian, SONG Xiao-dong

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is very crucial to obtain the vibration of a bridge and the power input to it through wheel/rail interactions in order to predict structure-borne noise from the bridge. The time domain train-track-bridge interaction analysis is widely used to solve the low frequency vibration problem of the coupled system. However, its efficiency becomes quite low in the medium-to-high frequency range. This paper then aims to propose a power flow method to tackle the system based on the principle of the force method in a frequency domain. The rail component in the system can be represented by either an infinite Euler beam or a Timoshenko beam. The bridge component can be modeled by an infinite Kirchhoff plate, a Mindlin plate or a finite element model. And the fasteners between the rail and the bridge are considered as a spring-dashpot pairs. The compatibility equation of the coupled system is obtained by regarding the internal forces of the spring-dashpot pairs as unknowns. In the case study, the vibration power of a U-shaped girder and a box girder is calculated with various models for the rail and the bridge components. The results show that the shear effect of the bridge deck significantly influences the power input to the U-shaped girder. The use of a conventional Kirchhoff plate model can lead to a calculation error of 15 dB, while the adoption of a Mindlin plate model can gain both high accuracy and efficiency. A Mindlin plate model still produces large computation errors compared with the finite element model of a box girder using volume elements.

Key words: train-track-bridge vibration; noise; power flow method; infinite plate; finite element method

收稿日期: 2015-04-16; 修改日期: 2016-01-18

基金项目: 上海市自然科学基金项目(15ZR1442800)

通讯作者: 程石利(1991—), 男, 福建霞浦人, 硕士生, 从事桥梁振动与噪声研究(E-mail: 1332581@tongji.edu.cn).

作者简介: 李 奇(1980—), 男, 湖南湘阴人, 副教授, 博士, 从事桥梁振动与噪声研究(E-mail: liqi_bridge@tongji.edu.cn);

励吾千(1989—), 女, 浙江宁波人, 硕士生, 从事桥梁振动与噪声研究(E-mail: liwuqian657@163.com);

宋晓东(1987—), 男, 江苏南通人, 博士生, 从事桥梁振动与噪声研究(E-mail: song_4567875@163.com).

高架轨道交通噪声影响人的工作、休息与睡眠,使人紧张、烦躁甚至情绪失控,导致投诉频发和部分群体性事件,为当前民生关切和研究热点。高架轨道交通噪声主要源于桥梁与轮轨振动,因此振动分析是噪声预测及其传播机理研究的前提和关键。若振动预测精度不足,则噪声预测不准确,导致对多个噪声源的贡献量估计错误,以致采取的减振降噪措施的针对性和有效性不强,最终使得噪声问题成为轨道交通发展的主要制约因素。

在面向噪声预测的桥梁结构振动分析中,国内外主要有两类方法:一是时域耦合振动分析,二是频域统计能量分析。前者主要用于低频范围,而后者主要用于中高频范围。谢旭等^[1]、Zhang等^[2]基于公路车桥耦合振动理论和边界元法,研究了公路钢桥的低频声辐射。在轨道交通方面,李晶等^[3]、高飞等^[4]、王小宁等^[5]、石广田等^[6]、李小珍等^[7]、Zhang等^[8]结合时域车轨桥耦合振动分析和频域边界元法预测桥梁结构低频噪声。Li等^[9-10]采用模态叠加法进行车轨桥耦合振动分析,先后提出了基于3维和2.5维模态声传递向量的200 Hz内桥梁结构低频噪声预测方法。

上述时域方法所涉及的桥梁有限元模型单元尺寸随分析频率提高相应减小,难以适应高频分析,而统计能量分析是解决这一难题的有效方法。在运用统计能量法预测桥梁结构噪声时,确定传入桥梁的振动功率是其关键之处。Janssens和Thompson^[11]假定轨桥振动解耦,在低频和高频段分别采用无限长 Euler 梁和 Timoshenko 梁的驱动点导纳公式,计算由钢轨振动通过扣件传入桥梁的振动功率,再采用统计能量分析方法计算钢梁各部件的空间均方速度,进而依据辐射系数得到各部件的辐射声功率。随后, Bewes和Thompson等^[12]采用有限长双层 Timoshenko 梁模型,以考虑钢轨与桥梁的耦合作用,提高了桥梁低频振动功率的计算精度;同时,在中高频段则运用综合考虑钢梁翼板弯曲和腹板压缩效应的近似导纳公式来改善振动功率的计算精度。在国内,李小珍等^[13]采用统计能量法进行了铁路桥梁的中高频结构噪声预测,但在计算由扣件传入桥梁的振动功率时仍然采用了时域车轨桥方法,这虽然简化了声场分析,但其高频振动计算量仍然极大。李增光和吴天行^[14]结合车辆、轨道解析模型和高架桥有限元模型,在频域内计算传递到高架桥梁的振动功率,并分析了扣件刚度和

阻尼参数对高架桥振动功率的影响。Li和Wu^[15]以扣件弹簧力为未知量,提出了基于力法原理的车轨桥系统功率流分析方法,其中钢轨采用无限长 Euler 梁模型,桥梁采用有限元法建模。

文献[14-15]可适应任意复杂桥梁结构的计算需要,但所采用的功率流方法依赖桥梁有限元模型,中高频计算效率较低。为此,本文在文献[15]的研究基础上,引入无限长 Timoshenko 梁模型模拟钢轨、无限大 Kirchhoff 板(薄板)和 Mindlin 板(厚板)模拟桥梁,以提高车轨桥系统耦合振动功率流方法的计算效率、拓展其分析频率范围。通过对比分析上述梁、板模型与有限元模型的相对计算误差,为轨道交通 U 型梁和箱型梁中高频振动与噪声预测模型的合理选择提供参考。

1 车轨桥耦合振动分析功率流方法

1.1 车轨桥系统耦合模型

一般轨道交通列车的车体刚体自振频率在 1 Hz 左右,转向架构架的刚体自振频率低于 10 Hz,而支撑在轨道上的车轮的刚体自振频率可达几十赫兹及几百赫兹。本研究提出面向噪声预测的 20 Hz~2000 Hz 车轨桥振动频域分析方法,列车可以简化为仅包含车轮刚体质量和轮轨接触弹簧的模型^[15-16],得到如图 1 所示的车轨桥耦合系统模型。此模型中,钢轨部件采用无限长 Euler 梁或 Timoshenko 梁模拟;桥梁部件采用有限元模型或无限大板模型模拟。各个部件之间采用弹簧元件连接,用以模拟轮轨接触弹簧、扣件以及桥梁支座等。

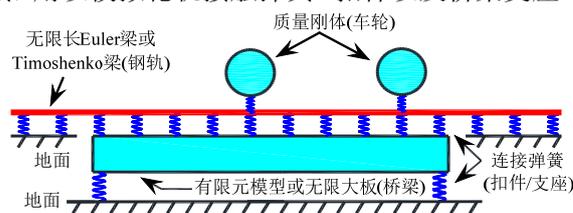


图 1 车轨桥系统模型示意图

Fig.1 Schematic model of a train-track-bridge system

对于车速在 100 km/h 范围内轨道交通列车,车轮移动荷载的主要激励频率在 20 Hz 以下,可以假设车轮不做纵向运动,采用移动不平顺^[16]的方式进行系统垂向振动的频域分析。

1.2 耦合系统力法方程

借鉴静力学中的力法原理求解车轨桥耦合系统振动问题,将各弹簧元件内力作为基本未知量(图 2),得到各部件在无弹簧连接状态下的基本体

系, 再根据弹簧的变形协调建立力法方程^[15]:

$$\boldsymbol{\delta}(\omega)\mathbf{F}(\omega) + \boldsymbol{\Delta}_p(\omega) = -\mathbf{A}(\omega)\mathbf{F}(\omega) \quad (1)$$

式中: ω 为外激励的圆频率; $\mathbf{F}(\omega)$ 为待求的弹簧力向量; $\boldsymbol{\delta}(\omega)$ 代表结构的动柔度矩阵; $\boldsymbol{\Delta}_p(\omega)$ 是在单位简谐力 $P(\omega)$ 作用下各弹簧的变形向量; $\mathbf{A}(\omega)$ 为弹簧动柔度矩阵。

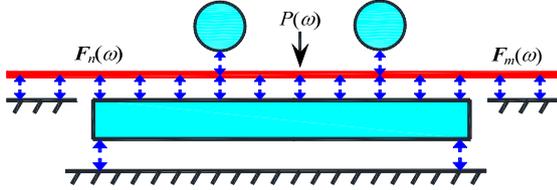


图2 将弹簧力作为未知量的基本体系

Fig.2 Release structure of the train-track-bridge system

动柔度矩阵 $\boldsymbol{\delta}(\omega)$ 各元素由下式给出^[15]:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = \delta_{mn}^{11}(\omega) + \delta_{mn}^{22}(\omega) + \delta_{mn}^{12}(\omega) + \delta_{mn}^{21}(\omega) \quad (2)$$

其中, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ ($a=1, 2; b=1, 2$) 表示在 n 弹簧的 b 节点上施加单位简谐力时, 在 m 弹簧的 a 节点上产生的位移。当 n 弹簧的 b 节点和 m 弹簧的 a 节点连接在不同部件上时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 为 0, 否则按以下情况计算。

1) 当两个弹簧节点连接于同一个质量刚体上时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可表示为^[15]:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = -\frac{(-1)^{a+b}}{M_l \omega^2} \quad (3)$$

式中, M_l 为所连接的质量刚体的质量。

2) 当它们连接于同一个无限长 Euler 梁上时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可表示为^[15]:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = \frac{-j(-1)^{a+b} (e^{jk|x_n-x_m|} - je^{-k|x_n-x_m|})}{4EI k^3} \quad (4)$$

式中: j 为复数的虚部单位; x_n 和 x_m 分别为 b 节点和 a 节点的 x 坐标; EI 为抗弯刚度; k 为梁的弯曲波数。

3) 当它们连接于同一个无限长 Timoshenko 梁上时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可表示为^[16]:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = u_1 e^{-jk_e|x_n-x_m|} + u_2 e^{-jk_p|x_n-x_m|} \quad (5)$$

式中: 波数 k_p 和 k_e 分别是式(6)中接近正实轴的解

和接近负虚轴的解^[16]。

$$k^2 = -\frac{C_2}{2} \pm \sqrt{\frac{C_2^2}{4} - C_3} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{GA\kappa}{EI} - \frac{\rho I \omega^2}{EI} \\ C_2 = -\frac{m' \omega^2}{GA\kappa} - \frac{\rho I \omega^2}{EI} \\ C_3 = \frac{m' \omega^2}{EI} \left(\frac{\rho I \omega^2}{GA\kappa} - 1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ 为密度; m' 为单位梁长质量; G 为剪切模量; A 为正截面面积; κ 为剪切系数且 $\kappa < 1$ 。

式(5)中 u_1 和 u_2 由下式计算得到^[16]:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{-j}{GA\kappa} \left(\frac{k_e^2 + C_1}{4k_e^3 + 2k_e C_2} \right) \\ u_2 = \frac{-j}{GA\kappa} \left(\frac{k_p^2 + C_1}{4k_p^3 + 2k_p C_2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

4) 当两弹簧节点连接于同一个有限元桥梁上时, 根据模态叠加原理, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可表示为^[15]:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = \sum_{i=1}^{N_l} \frac{(-1)^{a+b} \phi_{li}^a \phi_{li}^b}{\omega_{li}^2 - \omega^2 + 2j \xi_{li} \omega_{li} \omega} \quad (9)$$

式中: ω_{li} 和 ξ_{li} 分别为第 1 个桥梁结构的第 i 阶模态的自振频率和阻尼比; ϕ_{li}^a 和 ϕ_{li}^b 表示相应的模态振型; N_l 为参与计算的模态数。

5) 当它们连接于同一个无限大 Kirchhoff 板时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可根据文献[17]给出的解析解表示为:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{8jB'k_B^2}, & r=0 \\ \frac{H_0^{(2)}(k_B r) - H_0^{(2)}(-jk_B r)}{8jB'k_B^2}, & r \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: r 为 a 与 b 节点间的距离; $H_0^{(2)}(\cdot)$ 为第三类 Bessel 函数(或称为 Hankel 函数); k_B 为板的弯曲波数; B' 为单位板宽抗弯刚度。

6) 当它们节点连接于同一个无限大 Mindlin 板时, $\delta_{mn}^{ab}(\omega)$ 可根据文献[18]计算:

$$\delta_{mn}^{ab}(\omega) = \begin{cases} \frac{C_1}{2jr_0 \sqrt{C_3^2 + 4C_4}} \left[\frac{(1+C_2 k_1^2)}{k_1} \Phi(k_1 r_0) - \frac{(1+C_2 k_2^2)}{k_2} \Phi(k_2 r_0) \right], & r=0 \\ \frac{C_1}{4j\sqrt{C_3^2 + 4C_4}} [(1+C_2 k_1^2) H_0^{(2)}(k_1 r) - (1+C_2 k_2^2) H_0^{(2)}(k_2 r)], & r \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： r_0 为激励点接触圆斑的半径；波数 k_1 和 k_2 分别是式(12)中接近正实轴的解和接近负虚轴的解；系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 及函数 $\Phi(\cdot)$ 由式(13)和式(14)给出^[18]。

$$k^2 = \frac{C_3}{2} \pm \sqrt{\frac{C_3^2}{4} + C_4} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{B'} \left(1 - \frac{\rho I \omega^2}{GA' \kappa} \right) \\ C_2 = \frac{B'}{GA' \kappa - \rho I \omega^2} \\ C_3 = \frac{m'' \omega^2}{GA' \kappa} + \frac{\rho I \omega^2}{B'} \\ C_4 = \frac{m'' \omega^2}{B'} \left(1 - \frac{\rho I \omega^2}{GA' \kappa} \right) \end{cases} \quad (13)$$

$$\Phi(k_1 r_0) = J_1(k_1 r_0) - j N_1(k_1 r_0) - \frac{2j}{\pi k_1 r_0} \quad (14)$$

式中： $J_1(\cdot)$ 为第一类 Bessel 函数； $N_1(\cdot)$ 为第二类 Bessel 函数； A' 为单位宽度的横截面积； m'' 为单位面积的质量；剪切系数 κ 由下式给出^[19]：

$$\kappa = \frac{20(1+\mu)}{24+25\mu+\mu^2} \quad (15)$$

根据位移互等定理，有 $\delta_{mn}(\omega) = \delta_{nm}(\omega)$ ，综合式(2)~式(15)，可求得基本结构柔度矩阵 $\delta(\omega)$ 。

对于节点外荷载 $P(\omega)$ ，可视为一端固定于地面一端连接于作用点上的弹簧产生的激励，根据式(2)，位移向量 $\Delta_p(\omega)$ 的元素可表示为^[15]：

$$\Delta_{mp}(\omega) = \delta_{mp}^{11}(\omega) + \delta_{mp}^{21}(\omega) \quad (16)$$

弹簧柔度矩阵 $A(\omega)$ 中的各元素由下式给出^[15]：

$$A_{mn}(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{K_n + j\omega C_n}, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases} \quad (17)$$

式中， K_n 和 C_n 分别表示第 n 个弹簧的复刚度和粘滞阻尼。

1.3 导纳和输入功率计算

通过建立力法方程，取单位简谐荷载 $P(\omega)$ ，求得弹簧力 $F(\omega)$ 后，可进一步得到 m 弹簧 a 节点的速度导纳^[15]：

$$Y_m^a(\omega) = (-1)^a j \omega \cdot \left[\sum_{n=1}^{N_s} \sum_{b=1}^2 \delta_{mn}^{ab}(\omega) F_n(\omega) - \delta_{mp}^{a1}(\omega) \right] \quad (18)$$

式中， N_s 为 a 节点所在部件上连接的弹簧数。

在轮轨组合粗糙度激励下的轮轨力并非单位力，它应按轮轨位移协调条件求得^[16]，即：

$$F_c(\omega) = \frac{j\omega r}{Y_w + Y_c + Y_r} \quad (19)$$

式中： Y_w 为车轮导纳，是车轮质量和分析频率的函数； Y_c 为接触弹簧导纳； Y_r 为钢轨导纳； r 为相应车速和计算频率下某一波长对应的粗糙度幅值。

根据式(19)，求得 $F_c(\omega)$ ，则可计算 $F_c(\omega)$ 作用下的各弹簧内力及相应的弹簧节点速度，进而可得到 m 弹簧对某一部件的输入功率^[15]：

$$W_m^a(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re} [(-1)^a F_m(\omega) Y_m^a(\omega)^*] \quad (20)$$

式中， $Y_m^a(\omega)^*$ 为 $Y_m^a(\omega)$ 的共轭复数。整合所有连接于该部件上的弹簧的输入功率，即得到总的输入功率。

2 无限大板模型对 U 梁的适用性分析

2.1 计算模型

由于 U 梁具有外形美观、建筑高度低、腹板兼具防撞和隔音等功能，在国内外城市轨道交通高架中得到广泛应用。图 3 为某跨径 30 m 的 U 梁跨中截面布置。混凝土弹性模量 40 GPa，密度 2600 kg/m³，泊松比 0.2，阻尼损耗因子 0.02。

在功率流模型中，桥梁部件分别采用如下四种模型：与 U 梁底板厚度一致的无限大 Kirchhoff 板模型；与 U 梁底板厚度一致的无限大 Mindlin 板模型；反映 U 梁的弯曲、剪切效应及截面形状的 SOLID95 实体有限元模型(ANSYS 软件)；以及不考虑剪切效应但考虑 U 梁近似外形的 SHELL63 板壳有限元模型。为便于与等截面的无限大板模型对比，在 U 梁有限元模型中均暂时忽略承轨台的贡献。实测表明城市轨道交通 A 计权噪声的峰值频率在 800 Hz 附近，2000 Hz 时噪声级下降较为明显，故拟定最高分析频率 2000 Hz。根据“一个波长至少划分 6 个单元”的准则，单元划分尺寸不应大于 0.15 m。这样，U 梁的实体有限元模型包含 160238 个节点和 30612 个 SOLID95 单元，板壳有限元模型有 12462 个节点和 12200 个 SHELL63 单元。为减小模态叠加法截断误差，提取 2100 Hz 内的约 2000 阶模态用于模态叠加分析。

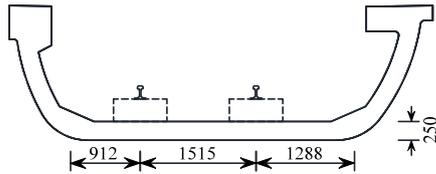


图3 U梁跨中截面布置 /mm

Fig.3 Mid-span section of the U-shaped girder

扣件采用 WJ-2 型扣件, 间距为 0.6 m, 刚度为 40 MN/m, 损耗因子为 0.1。钢轨部件分别采用无限长 Euler 梁和 Timoshenko 梁进行模拟。不失一般性的, 在 2/5 桥跨的右侧钢轨上施加垂向外荷载, 计算轨桥耦合模型下的钢轨驱动点导纳, 再根据式(19)计算单个车轮在单位粗糙度下的轮轨力, 进而得到此轮轨力下的桥梁和钢轨振动速度及传入它们的功率。计算中取车轮质量 831.5 kg, 轮轨接触刚度 1.4 GN/m。

不同钢轨和桥梁模型的组合情况如表 1 所示。其中, 采用 Timoshenko 钢轨和实体 U 梁有限元模型的功率流模型最为精确, 以此组合作为参考组, 对比分析其他组合模型的适用性。

表 1 钢轨和桥梁模型的组合列表

Table 1 Different combinations of rail and bridge models

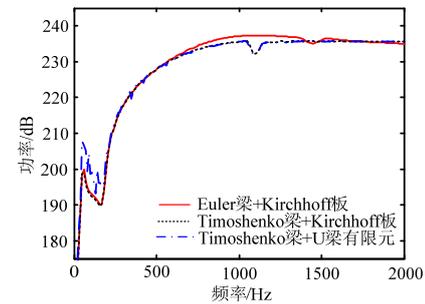
组合情况	钢轨模型	桥梁模型
组合 1	Euler 梁	Kirchhoff 板
组合 2	Timoshenko 梁	Kirchhoff 板
组合 3	Timoshenko 梁	Mindlin 板
组合 4	Timoshenko 梁	U 梁有限元(SHELL63)
参考组	Timoshenko 梁	U 梁有限元(SOLID95)

2.2 剪切效应分析

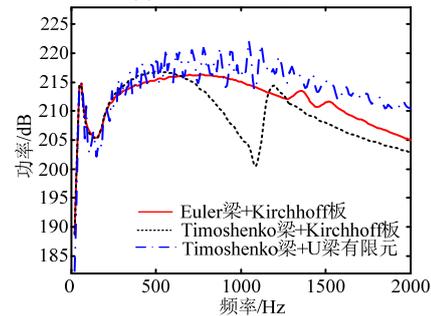
分别采用组合 1、组合 2 及参考组计算的输入钢轨和桥梁的振动功率级如图 4 所示。可见, 三组模型得到的钢轨输入功率均吻合较好, 剪切效应考虑与否对钢轨输入功率的影响较小。但是, 桥梁输入功率对剪切效应较为敏感: 组合 1 的桥梁振动功率级与参考组相比, 在 500 Hz 以上中高频段相差 4 dB 左右; 组合 2 在 1000 Hz 附近的计算偏差达到 15 dB。

组合 2 与组合 4 模型的桥梁输入功率对比如图 5 所示。可见, 采用不考虑剪切效应的 Kirchhoff 板和 SHELL63 有限元模型计算的桥梁输入功率吻合良好。这验证了所采用的功率流方法本身是可靠的, 但是否考虑桥梁剪切效应对桥梁功率输入的影响较大。当考虑剪切变形的钢轨模型与不考虑剪切变形的桥梁模型配合使用时(即组合 2 或组合 4), 会

严重低估桥梁输入功率(图 4(b))。值得注意的是, 文献[16]正是采用了 Timoshenko 梁钢轨与 Kirchhoff 板桥梁模型。



(a) 钢轨输入功率



(b) 桥梁输入功率

图 4 不同轨桥模型对钢轨和桥梁输入功率的影响

Fig.4 Comparison of power comparison between different models for the rail and bridge

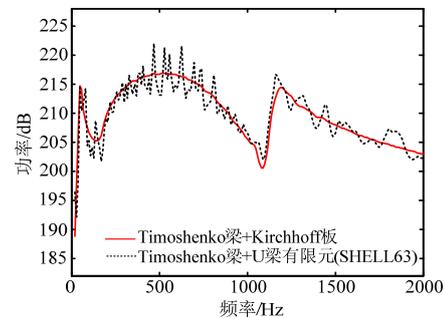


图 5 不考虑桥梁剪切效应的组合模型下桥梁输入功率

Fig.5 Power flow to bridge without shear effect of bridge

组合 2 和组合 3 的桥梁输入功率对比如图 6 所示。可以看出, 在考虑钢轨剪切效应情况下, 计入桥梁剪切效应的无限大 Mindlin 板与实体 U 梁有限元模型的桥梁输入功率在整个频段内吻合较好。在功率流方法中采用无限大板桥梁模型, 无需进行单元划分、模态求解及模态叠加计算, 这为解决有限元方法在中高频计算时效率较低的问题提供了一种良好的替代方案。需指出的是, 参数分析表明: 当钢轨与 U 梁腹板底部中心的距离超过 0.7 m 时, 采用 Mindlin 板计算得到的桥梁功率具有较高的精度, 否则计算误差达到 3 dB~5 dB。

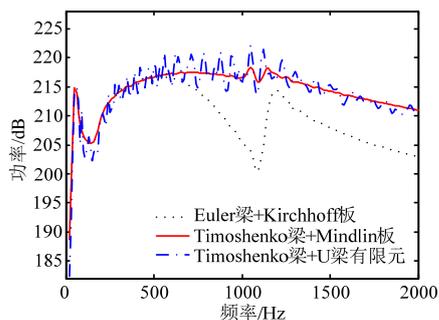


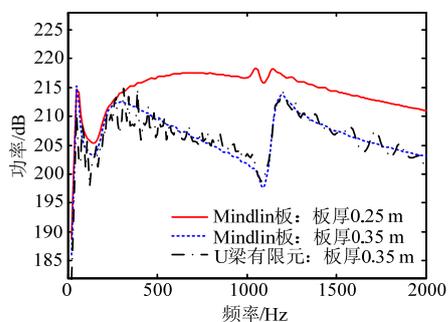
图6 是否考虑桥梁剪切效应下桥梁输入功率对比

Fig.6 Power flow to bridge with or without its shear effect

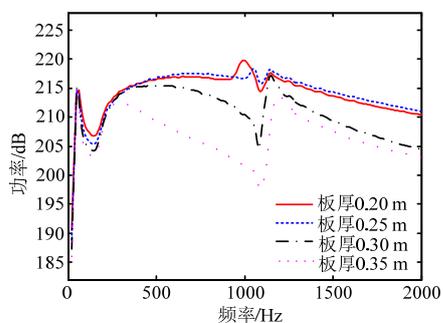
2.3 板厚的影响

图7(a)给出了板厚为0.35 m的Mindlin板模型和底板厚度为0.35 m的U梁实体有限元模型的桥梁输入功率。可见,两种模型计算结果吻合良好,再次验证了用无限大Mindlin板代替U梁有限元模型进行功率流分析的准确性。

此外,由图7(a)可知,当板厚从0.25 m增加到0.35 m时,500 Hz以上桥梁输入功率减小了5 dB~20 dB。采用无限大Mindlin板模型计算的4种板厚下的桥梁输入功率如图7(b)所示。由图可知,随着板厚的增加,500 Hz以上频段的桥梁输入功率明显减小,且呈非线性关系。在实际工程应用中,可通过所提出的功率流方法进行参数分析,得到减振降噪效果明显的合理U梁底板厚度。



(a) 无限大板与有限元模型对比



(b) 不同板厚下无限大板计算结果对比

图7 板厚对桥梁输入功率的影响

Fig.7 Influence of plate thickness on the vibration power

3 无限大板模型对箱梁的适用性分析

香港西铁高架桥采用了双箱双室箱梁,并将钢轨布置于腹板正上方的设计^[16],其半幅箱梁如图8所示。假设箱梁的跨度和材料特性、轨道形式及扣件参数均与U梁相同。钢轨采用Timoshenko梁模型,分别采用无限大Mindlin板和实体单元建立桥梁模型用以对比分析。有限元模型包含250315个节点和50200个SOLID95单元,尺寸最小为0.15 m,提取前2100 Hz的2500阶模态进行分析模态叠加计算。无限大板的板厚取箱梁顶板厚度。

根据上述两个模型计算得到的桥梁输入功率如图9所示。据图可知,在300 Hz~1200 Hz频段内,Mindlin板的桥梁输入功率与有限元模型计算结果相差达到15 dB,而1500 Hz以上两者差异减小到5 dB以内。因此,对于钢轨布置在腹板正上方的箱梁,不能采用无限大模型代替有限元模型进行输入功率计算。由于无限大Mindlin板模型与相同板厚的U梁的计算结果接近,图9也可表明钢轨布置于腹板上方的箱梁振动功率较U梁减小5 dB~15 dB,能起到显著的降噪作用。

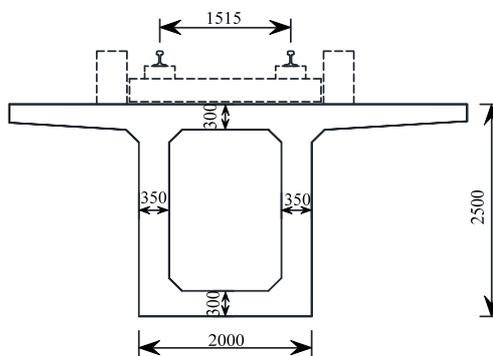


图8 箱梁截面布置 /mm

Fig.8 Mid-span section of the box girder

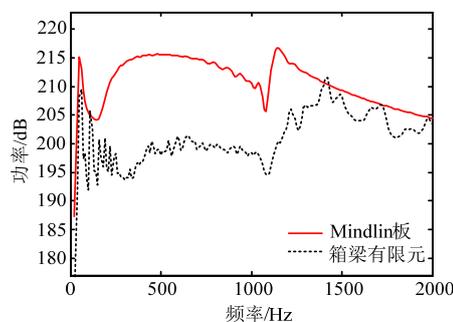


图9 无限大板与箱梁有限元模型下桥梁输入功率对比

Fig.9 Comparison of vibration power between the infinite plate model and FE model of box girder

考虑到钢轨可能偏离箱梁腹板一定距离布置,对于上述同一箱梁模型,分别取钢轨中心与腹板中心线的横向距离为:① 0.0068 m(钢轨在腹板正上方)、② 0.26 m、③ 0.38 m、④ 0.76 m。由此得到桥梁输入功率结果如图 10 所示。可见,随着钢轨偏移腹板的距离增大,桥梁输入功率逐渐增大。这是钢轨下桥梁导纳随横向偏移距离增大而增大的缘故。可以预见,当偏移距离达到某个阈值时,腹板对顶板的约束作用可以忽略,在这种情况下,采用无限大 Mindlin 板也能很好的模拟箱梁的输入功率。

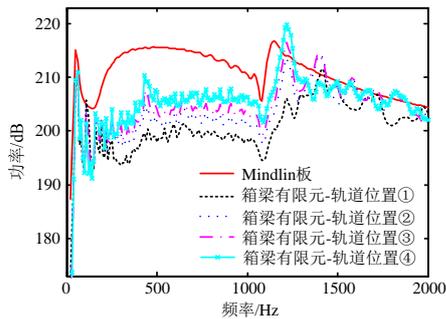


图 10 不同轨道位置下的箱梁输入功率对比

Fig.10 Power flow to bridge under different rail positions

实际的轨道交通双线箱梁上通常有一股钢轨靠近腹板位置,而另一股钢轨则靠近顶板中心。对这种情况,在计算由靠近顶板中心线的钢轨输入至桥梁的功率时,可采用无限大板模型,而在计算靠近腹板的钢轨对应的桥梁输入功率时,建议采用有限元模型来模拟箱梁。

4 结论

本文基于力学基本原理提出了车轨桥耦合振动分析功率流方法,并建立了相应模型,其中钢轨部件可以分别采用无限长 Euler 梁和无限长 Timoshenko 梁模拟,桥梁部件可以分别采用无限大 Kirchhoff 板、无限大 Mindlin 板以及有限元模型模拟。对比计算了不同钢轨与桥梁模型组合对 U 梁和箱梁输入功率的影响,得到以下结论:

(1) 剪切效应对传入桥梁的中高频振动功率影响很大,若考虑钢轨剪切效应但忽略桥梁剪切作用,将导致极大的计算误差,建议钢轨和桥梁均采用考虑剪切变形的模型计算。

(2) 对于钢轨距腹板横向距离较大的 U 梁而言,建议采用考虑剪切变形的无限大 Mindlin 板代替精细的有限元模型,计算传入桥梁的中高频振动功率,以简化建模和提高计算效率。

(3) 对于钢轨距腹板横向距离较小的箱梁而

言,无限大板模型难以反映桥梁顶板的复杂受力状态,建议采用有限元方法进行桥梁建模。

上述结论是在没有考虑承轨台情况下得出的,今后有必要对考虑承轨台轨道、板式轨道和梯形轨道后的桥梁输入功率计算的合理模型进行研究。此外,如何采用简化的解析模型计算箱梁输入功率也是需进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 谢旭,张鹤,山下幹夫,张治成.桥梁振动辐射低频噪声评估方法研究[J].土木工程学报,2008,41(10):53-59.
Xie Xu, Zhang He, Yamashita Mikio, Zhang Zhicheng. Theoretical analysis of low-frequency noise radiated from bridge vibrations [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 53-59. (in Chinese)
- [2] Zhang He, Xie Xu, Jiang Jiqing, Yamashita Mikio. Assessment on transient sound radiation of a vibrating steel bridge due to traffic loading [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 336: 132-149.
- [3] 李晶,张楠,张立彬.高架桥梁振动与结构噪声数值模拟[J].环境工程,2012,30(增刊1):156-160.
Li Jing, Zhang Nan, Zhang Libin. Numerical simulation of the vibration and structure-borne noise of the viaduct [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(Suppl 1): 156-160. (in Chinese)
- [4] 高飞,夏禾,曹艳梅,安宁.用边界元-有限元法研究高架结构辐射噪声[J].土木建筑与环境工程,2012,34(1):42-46.
Gao Fei, Xia He, Cao Yanmei, An Ning. Analysis of elevated structure radiated noise with BEM-FEM method [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 42-46. (in Chinese)
- [5] 王小宁,张楠,孙奇.城市轨道交通桥梁振动及噪声辐射研究[J].铁道建筑,2014(1):11-15.
Wang Xiaoning, Zhang Nan, Sun Qi. Study on vibration and noise radiation of urban rail transit bridges [J]. Railway Engineering, 2014(1): 11-15. (in Chinese)
- [6] 石广田,杨新文,孙昊天.双块式无砟轨道-箱梁结构振动与噪声参数影响分析[J].兰州交通大学学报,2014,33(4):131-135,145.
Shi Guangtian, Yang Xinwen, Sun Haotian. Influence of noise parameter on structure vibration of box girder with double-block ballastless track [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(4): 131-135, 145. (in Chinese)
- [7] 李小珍,张迅,李亚东.高速铁路简支箱梁结构噪声的边界元方法[J].土木工程学报,2011,44(增刊1):95-101,185.
Li Xiaozhen, Zhang Xun, Li Yadong. Application of boundary element method in study of noise from simply-supported box girder in high speed railway [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Suppl 1): 95-101, 185. (in Chinese)
- [8] Zhang Xun, Li Xiaozhen, Liu Quanmin, Wu Jinfeng, Li Yadong. Theoretical and experimental investigation on bridge-borne noise under moving high-speed train [J]. Science China-Technological Sciences, 2013, 56(4): 917-924.

(参考文献[9]-[19]转第127页)

- assemble frame structure joints [J]. Construction Technology, 2012, 41(376): 11—14. (in Chinese)
- [9] 钱稼茹, 彭媛媛, 张景明, 等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 1—6.
Qian Jiaru, Peng Yuanyuan, Zhang Jingming, et al. The seismic performance experiment of vertical reinforcements spliced by grout sleeves precast concrete shear wall [J]. Building Structure, 2011, 41(2): 1—6. (in Chinese)
- [10] 张微敬, 钱稼茹, 陈康, 等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 12—16.
Zhang Weijing, Qian Jiaru, Chen Kang, et al. The seismic performance experiment of single-line connected with vertical distributed steel bar precast shear wall [J]. Building Structure, 2011, 41(2): 12—16. (in Chinese)
- [11] 张微敬, 钱稼茹, 于检生, 等. 竖向分布钢筋单排间接搭接的带现浇暗柱预制剪力墙抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 89—97.
Zhang Weijing, Qian Jiaru, Yu Jiansheng, et al. Seismic performance experiment of the precast shear wall, whose reinforcement is vertical distributed, structure is single indirect splicing and has cast-in-situ embedded column inside [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 89—97. (in Chinese)
- [12] JGJ 107-2010, 钢筋机械连接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ 107-2010, Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 李宁波, 钱稼茹, 叶列平, 刘时伟. 竖向钢筋套筒挤压连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 31—40.
Li Ningbo, Qian Jiaru, Ye Lieping, Liu Shiwei. Tests on seismic behavior of precast RC shear walls with vertical rebar splicing by pressed sleeve [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1): 31—40. (in Chinese)
- [14] Watson S, Zahn F A, Park R. Confining reinforcement for concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(6): 1798—1824.
- [15] 张微敬, 张兵, 李振宝, 周宏宇. 强约束大尺寸钢筋混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(12): 236—241.
Zhang Weijing, Zhang Bing, Li Zhenbao, Zhou Hongyu. Experimental study on seismic performance of large scale reinforced concrete columns with strong confinement [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 236—241. (in Chinese)
- [16] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [17] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(上接第118页)

- [9] Li Q, Xu Y L, Wu D J. Concrete bridge-borne low-frequency noise simulation based on train-track-bridge dynamic interaction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2457—2470.
- [10] Li Qi, Song Xiaodong, Wu Dingjun. A 2.5-dimensional method for the prediction of structure-borne low-frequency noise from concrete rail transit bridges [J]. Journal of Acoustical Society of America, 2014, 135(5): 2718—2726.
- [11] Janssens M H A, Thompson D J. A calculation model for the noise from steel railway bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 295—305.
- [12] Bewes O G, Thompson D J, Jones C J C, Wang A. Calculation of noise from railway bridges and viaducts: Experimental validation of a rapid calculation model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 933—943.
- [13] 李小珍, 张迅, 刘全民, 张志俊, 李亚东. 高速铁路桥梁结构噪声的全频段预测研究(I): 理论模型[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 101—107.
Li Xiaozhen, Zhang Xun, Liu Quanmin, Zhang Zhijun, Li Yadong. Prediction of structure-borne noise of high-speed railway bridges in whole frequency bands (part I): Theoretical model [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 101—107. (in Chinese)
- [14] 李增光, 吴天行. 铁道车辆-轨道-高架桥耦合系统振动功率流分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 78—82, 93, 254.
Li Zengguang, Wu Tianxing. Analysis of the vibration power flow for a railway vehicle-track-viaduct coupled system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 78—82, 93, 254. (in Chinese)
- [15] Li Q, Wu D J. Analysis of the dominant vibration frequencies of rail bridges for structure-borne noise using a power flow method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(18): 4153—4163.
- [16] Thompson D J. Railway noise and vibration: mechanisms, modeling and means of control [M]. UK: Elsevier Science Ltd., 2009: 43—47, 65—67, 110—111, 123—131.
- [17] Cremer L, Heckl M, Petersson B A T. Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies [M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 2005: 251—256.
- [18] Buhlert K J. Driving point impedances of thick homogeneous plates in flexure [J]. Journal of Sound and Vibration, 1981, 78(2): 235—245.
- [19] Liu Chunchuan, Li Fengming, Liang Tingwei, Huang Wenhui. The wave and vibratory power transmission in a finite L-shaped mindlin plate with two simply supported opposite edges [J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(5): 785—795.