

# 板式无砟轨道钢轨共振特性 影响参数敏感性分析\*

高亮,崔日新<sup>†</sup>,侯博文,肖宏

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

**摘要:**为研究无砟轨道钢轨 pinned-pinned 共振影响因素,基于周期性支撑梁结构振动计算理论,建立板式无砟轨道振动实体有限元模型,采用单参数敏感性分析方法,分析了无砟轨道结构参数对钢轨 pinned-pinned 共振特性的影响,并计算了各参数的敏感度系数。研究表明:扣件间距的改变会引起钢轨 pinned-pinned 共振特性的明显改变,属于敏感参数。钢轨类型对钢轨 pinned-pinned 共振频率的敏感度系数相对较小,但仍在较敏感范围内。扣件刚度、阻尼及轨道板弹性模量对钢轨 pinned-pinned 共振频率几乎没有影响,属于不敏感参数。在钢轨表面附加约束阻尼结构会降低钢轨共振振幅,但几乎不改变钢轨的共振频率。受扣件间距的影响,无砟轨道钢轨 pinned-pinned 共振频率低于有砟轨道钢轨。

**关键词:**钢轨;pinned-pinned 共振;周期性结构;无砟轨道;敏感度系数

**中图分类号:**U213.2

**文献标志码:**A

## Sensitivity Analysis of Influence Parameters on Resonance Characteristics of Ballastless Track Rail

GAO Liang, CUI Rixin<sup>†</sup>, HOU Bowen, XIAO Hong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to study the influence factors on the pinned-pinned resonance of ballastless track rail, in this paper, based on the vibration calculation theory of periodically supported beam, the influence parameters of ballastless track on the pinned-pinned resonance of rail were analyzed by using the solid vibration analysis model established by FEM, and the sensitivity coefficients of those parameters were calculated through the single-dimensional sensitivity analysis method. The results show that the pinned-pinned resonance of rail is sensitive to the fastener span as the resonance frequencies vary remarkably with the increase of fastener span. Rail mass is a slightly sensitive parameter to the pinned-pinned frequency of rail, although its sensitivity coefficient is smaller than that of fastener span. The stiffness, damping of fastener and elastic modulus of track slab are all classified as insensitive parameters since they have little influence on the pinned-pinned frequency of rail. The constrained damper attached to the non-working surface of rail can reduce the vibration amplitude of the pinned-pinned resonance effectively, but hardly change the reso-

\* 收稿日期:2016-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578056), National Natural Science Foundation of China(51578056); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2016G009-B), Science and Technology Development Program of China Railway(2016G009-B); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016JBM037), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016JBM037)

作者简介:高亮(1968-),男,山东滕州人,北京交通大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail:bjtu\_cuirixin@163.com

nance frequencies. With the influence of fastener span, the pinned-pinned frequency of rail on ballastless track is lower than that on ballasted track.

**Key words:** rail; pinned-pinned resonance; periodical structure; ballastless track; sensitivity coefficient

随着线网密度的增加及行车速度的提高,高速铁路运营产生的环境振动噪声污染问题日益突出,控制铁路振动噪声的排放对促进高速铁路与自然、社会协调发展具有重要意义. 轮轨滚动噪声是高速铁路噪声的主要组成部分,由轮轨表面不平顺诱发车轮及轨道系统振动并辐射噪声形成. 根据 TWINS 轮轨噪声预测软件的预测及实测结果可知,在 500~1 600 Hz 频段内,钢轨辐射噪声是轮轨滚动噪声的主要成分,其中出现在 1 000 Hz 附近的轮轨滚动噪声峰值是由钢轨一阶 pinned-pinned 共振引起的<sup>[1]</sup>.

钢轨的 pinned-pinned 共振是指钢轨在作用于跨中位置处的某一特定频率激励下,其振型的驻波节点刚好在扣件的支承处,扣件位置处的钢轨振幅为零. 此时,钢轨的振型像是被“钉”(pinned)在扣件上一样,所以称为“pinned-pinned”共振. 当钢轨发生 pinned-pinned 共振时,任何一个扣件范围之内钢轨的振型均为  $n$  个半波长,振动在整个钢轨内几乎无衰减,导致轮轨辐射噪声在该频段达到峰值.

国内外学者在对钢轨振动特性的研究中,逐渐发现了钢轨 pinned-pinned 振动的特殊性,并对其展开了一定的研究. Grassie<sup>[2]</sup> 研究发现采用离散支撑 Timoshenko 梁轨道模型能有效地预测钢轨的 pinned-pinned 共振频率. Thompson<sup>[3-4]</sup> 通过理论及试验研究对振动波形在钢轨中的传播形式进行了分析. 李克飞等<sup>[5]</sup> 基于移动荷载作用下轨道结构的周期解析解,分析了有砟轨道结构刚度及阻尼等参数对各轨道动力响应主频的影响. 方锐等<sup>[6]</sup> 采用有砟轨道三维有限元实体模型,分析了不同轨道结构参数对钢轨和轨枕振动特性的影响. 孙晓静等<sup>[7]</sup> 采用锤击法测定剪切型减振器扣件轨道的垂向频率响应特性,认为钢轨 pinned-pinned 共振不是发生在剪切型减振器扣件区间的钢轨波磨现象的主要原因. 此外, Maes 等<sup>[8]</sup>、Liu 等<sup>[9]</sup> 针对钢轨的 pinned-pinned 振动进行了动力吸振器的设计研究,并对其减振降噪效果进行了评估.

由上述分析可知,控制钢轨 pinned-pinned 振动是在源头上降低轮轨辐射噪声峰值的有效途径. 而目前国内外既有研究对无砟轨道钢轨 pinned-pinned 共

振特性的研究较为少见. 本文基于周期性支撑梁结构振动计算理论,建立板式无砟轨道振动分析实体有限元模型,分析了无砟轨道设计参数对钢轨一、二阶 pinned-pinned 共振特性的影响,并基于单参数敏感性分析方法计算了各参数的敏感度系数,以便为无砟轨道结构减振降噪设计提供一定的参考.

## 1 周期性支撑梁结构 pinned-pinned 振动求解

实际中,钢轨可视为以扣件间距  $L$  为周期支撑的梁结构<sup>[10]</sup>,如图 1 所示.

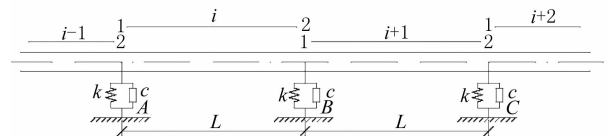


图 1 周期支撑梁结构示意图

Fig. 1 Sketch of beam with periodical supports

对于 A、B 两支撑点间的第  $i$  段梁结构而言,当梁产生弯曲振动时,1、2 两点的位移  $w$ 、转角  $\Theta$ 、力矩  $M$  与力  $F$  满足如下关系:

$$\begin{Bmatrix} w_2 \\ \Theta_2 \\ M_2 \\ F_2 \end{Bmatrix}_i = \mathbf{A}_i \begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_i \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}_i$  为  $4 \times 4$  的传递矩阵,其单元  $a_{ij}$  的表达方式如下:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{2}(\cos \beta + \cosh \beta) \\ a_{12} &= \frac{1}{2\kappa}(\sin \beta + \sinh \beta) \\ a_{13} &= \frac{1}{2D\kappa^2}(\cos \beta - \cosh \beta) \\ a_{14} &= \frac{1}{2D\kappa^3}(\sin \beta - \sinh \beta) \\ a_{21} &= \frac{\kappa}{2}(-\sin \beta + \sinh \beta) \\ a_{22} &= \frac{1}{2}(\cos \beta + \cosh \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{23} &= \frac{1}{2D'\kappa}(-\sin\beta - \sinh\beta) \\
a_{24} &= \frac{1}{2D'\kappa^2}(\cos\beta - \cosh\beta) \\
a_{31} &= \frac{D'\kappa^2}{2}(\cos\beta - \cosh\beta) \\
a_{32} &= \frac{D'\kappa}{2}(\sin\beta - \sinh\beta) \\
a_{33} &= \frac{1}{2}(\cos\beta + \cosh\beta) \\
a_{34} &= \frac{1}{2\kappa}(\sin\beta + \sinh\beta) \\
a_{41} &= \frac{D'\kappa^3}{2}(-\sin\beta - \sinh\beta) \\
a_{42} &= \frac{D'\kappa^2}{2}(\cos\beta - \cosh\beta) \\
a_{43} &= \frac{\kappa}{2}(-\sin\beta + \sinh\beta) \\
a_{44} &= \frac{1}{2}(\cos\beta + \cosh\beta)
\end{aligned}$$

式中:  $D'$  为截面抗弯刚度;  $\kappa$  为弯曲波数,  $\kappa = \sqrt[4]{\frac{m'}{D'} \cdot \omega^2}$ ,  $m'$  为梁的单位长度质量,  $\omega$  为梁的振动圆频率;  $\beta = \kappa L$ .

根据支点平衡条件,  $i$  段与  $i+1$  段在支点  $B$  处位移  $w$ 、转角  $\Theta$ 、力矩  $M$  与力  $F$  4 个方面应满足:

$$\begin{Bmatrix} w_2 \\ \Theta_2 \\ M_2 \\ F_2 \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 + i\omega w_1/Y \end{Bmatrix}_{i+1} \quad (2)$$

式中:  $Y$  为支撑点处位移导纳。

由式(1)、(2)可得:

$$\begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_{i+1} = \mathbf{A}'_i \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_i \quad (3)$$

矩阵  $\mathbf{A}'_i$  中  $a'_{11} \sim a'_{34}$  与  $\mathbf{A}_i$  中  $a_{11} \sim a_{34}$  相同.  $a'_{41} \sim a'_{44}$  如下:

$$a'_{4j} = a_{4j} - i\omega\alpha_{1j}/Y, j=1\sim 4$$

根据 Bloch 定理, 周期性结构的自由振动方程也具有周期性, 即

$$f(x+nL) = e^{i\varphi} f(x) \quad (4)$$

方程  $f(x)$  描述的是梁上任意一点的振动幅值, 其中  $\varphi$  为  $x$  与  $x+nL$  两点处振动的相位角. 由于这种周期性性质对位移、角位移、力矩及力均成立<sup>[11]</sup>, 因此有:

$$\begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_{i+1} = e^{i\varphi} \begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_i = \mathbf{A}'_i \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ \Theta_1 \\ M_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}_i \quad (5)$$

即

$$\text{Det}[\mathbf{A}' - e^{i\varphi}\mathbf{I}] = 0 \quad (6)$$

当周期支撑结构出现 pinned-pinned 振动时, 支撑点位移为零, 可得

$$e^{2i\varphi} - 2e^{i\varphi} \left( \frac{\sin\beta\cosh\beta - \cos\beta\sinh\beta}{\sin\beta - \sinh\beta} \right) + 1 = 0 \quad (7)$$

$$\cos\varphi = \frac{\sin\beta\cosh\beta - \cos\beta\sinh\beta}{\sin\beta - \sinh\beta} \quad (8)$$

此时  $x$  与  $x+nL$  两点振幅相位差  $\varphi = n\pi$ ,  $\cos\varphi = \pm 1$ , 由此可解出圆频率  $\omega$  即为 pinned-pinned 共振频率。

由上述分析可知, 周期性支撑结构 pinned-pinned 共振频率主要由结构自身设计参数所控制, 当外界激励频率与该频率一致时, 结构就会发生 pinned-pinned 共振. 因此, 分析无砟轨道结构设计参数对钢轨 pinned-pinned 共振特性的影响规律, 可为避免与控制钢轨 pinned-pinned 共振提供一定的理论依据。

## 2 无砟轨道振动分析有限元模型的建立

无砟轨道振动分析有限元模型中, 钢轨、轨道板及砂浆层均采用实体单元<sup>[12]</sup>模拟, WJ-7 型扣件间距 0.65 m, 结构材料参数见表 1. 为减少端面振动反射, 模型长度设置为 13 m, 两端采用对称约束, 砂浆层底部采用固定约束. 垂向激振力采用基于相对力激励模型计算的高速轮轨力频谱<sup>[13]</sup>, 作用于跨中对称端面. 无砟轨道系统振动分析模型见图 2.

表 1 无砟轨道模型参数

Tab. 1 Parameters of the ballastless track

部件	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比	厚度/ mm
钢轨	7 800	$2.06 \times 10^{11}$	0.3	—
轨道板	2 500	$3.57 \times 10^{10}$	0.2	200
砂浆层	1 800	$7 \times 10^9$	0.16	30
	横向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	横向阻尼/ ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	垂向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	垂向阻尼/ ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )
扣件	$3 \times 10^7$	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^7$	$6 \times 10^4$

目前, 由于国内外尚缺少对无砟轨道钢轨振动频域特性的实测结果, 本文采用文献<sup>[14]</sup>中对有砟

轨道钢轨加速度导纳特性的实测结果对本文的建模方法进行验证. 基于本文建模方法, 建立与文献[14]中参数一致的有砟轨道振动分析模型, 钢轨加速度导纳实测与预测结果对比如图3所示. 由图3可知, 本文模型预测结果与实测结果吻合较好, 另外在高频频段内, 由于本文的模型长度较长, 避免了实测结果中由钢轨端面反射导致的振动叠加对高频测试结果的影响, 可有效反映出钢轨的二阶 pinned-pinned 共振.

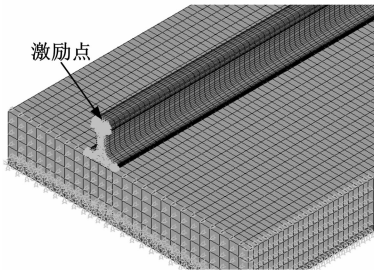


图2 无砟轨道系统振动分析有限元模型

Fig.2 Vibration finite element model of ballastless track

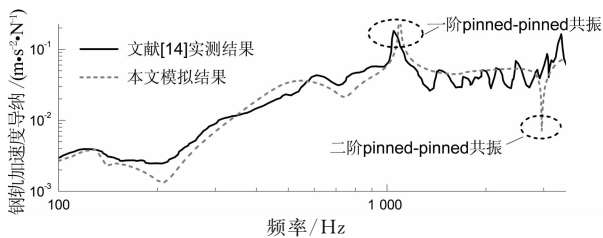


图3 钢轨振动特性实测与预测结果对比

Fig.3 Comparison between measured and predicted vibration characteristic of rail

位移导纳是结构在单位力作用下的位移响应, 可有效反映结构的振动特性. 图4为无砟轨道钢轨在垂向轮轨力作用下距离激励点分别为1、2、4、5和6个扣件间距处跨中钢轨垂向位移导纳特性. 由图4可知, 在振动频率达960 Hz时, 各钢轨跨中点的振幅达到最大, 钢轨发生一阶 pinned-pinned 共振, 其振型如图5(a)所示; 当振动频率为2 590 Hz时, 各钢轨跨中点的振幅最小, 钢轨发生二阶 pinned-pinned 共振, 其振型如图5(b)所示. 可见, 钢轨垂向位移导纳可有效反映钢轨 pinned-pinned 共振的特性. 因此在以下的分析中, 均采用距离激励点1个扣件间距的钢轨垂向位移导纳进行对比分析.

### 3 参数敏感性分析

设某一系统, 其系统特性  $P$  主要由参数  $a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n$  所决定, 记  $P = f\{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n\}$ .

单参数敏感性分析方法即令参数  $a_k$  在其基准值  $a_k^*$  的一定范围内变化, 其他参数取基准值固定不变, 这时的系统特性  $P = f\{a_1^*, \dots, a_{k-1}^*, a_k, a_{k+1}^*, \dots, a_n^*\}$  偏离基准状态  $P^*$  的趋势和程度即可反映  $P$  对参数  $a_k$  的敏感程度.

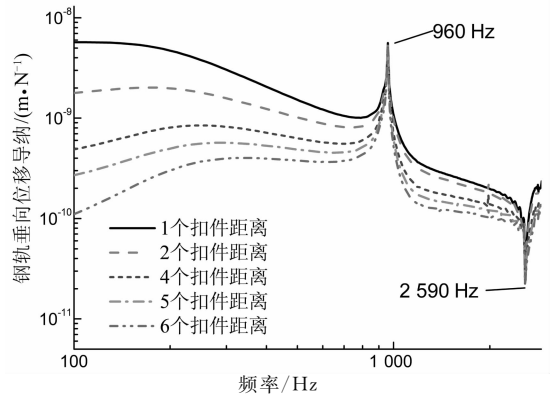


图4 钢轨各跨中点垂向位移导纳

Fig.4 Vertical displacement mobility of points on rail tread center at different mid-span along the rail

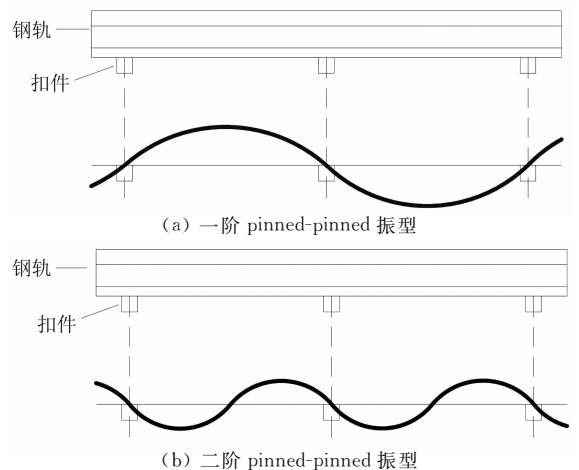


图5 钢轨的一阶与二阶 pinned-pinned 振型

Fig.5 The 1st and 2nd pinned-pinned resonance modes of rail

实际系统中, 影响系统特性的各参数往往是单位与量级不相同的物理量, 为便于各参数敏感度间的比较, 需对敏感度进行无量纲化处理. 即将系统特性  $P$  的相对误差  $\delta_p = |\Delta P|/P$  与参数  $a_k$  的相对误差  $\delta_{a_k} = |\Delta a_k|/a_k$  的比值定义为参数  $a_k$  的敏感度函数  $S_k(a_k)$ :

$$S_k(a_k) = \delta_p / \delta_{a_k} = (|\Delta P|/P) / (|\Delta a_k|/a_k) = \left| \frac{\Delta P}{\Delta a_k} \right| \frac{a_k}{P}, k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

在  $\delta_{a_k} = |\Delta a_k|/a_k$  相对较大的情况下,  $S_k(a_k)$  可近采用式(10)计算<sup>[15-16]</sup>:

$$S(k) = \max \left\{ \left( \frac{P_{k\max} - P^*}{P^*} \right), \left( \frac{P^* - P_{k\min}}{P^*} \right) \right\} \quad (10)$$

式中:  $S(k)$  为参数的敏感度系数;  $P^*$  为相应于基准参数集的系统特性;  $P_{k\max}$  和  $P_{k\min}$  分别为系统特性在参数  $a_k$  的变化域中达到的极大值和极小值。

工程中按敏感度系数  $S(k)$  的大小, 将各参数划分为敏感参数、较敏感参数及不敏感参数. 将  $S(k) \geq 0.2$  的参数定义为敏感参数,  $0.04 \leq S(k) < 0.2$  的参数定义为较敏感参数,  $S(k) < 0.04$  的参数定义为不敏感参数。

基于上述参数敏感性分析方法, 对钢轨设计参数(钢轨类型、阻尼钢轨)、扣件设计参数(扣件刚度、阻尼、间距)、轨道板弹性模量及轨道结构类型对钢轨 pinned-pinned 共振特性的影响进行分析。

### 3.1 钢轨设计参数

图 6 为钢轨类型对其垂向位移导纳的影响. 由图 6 可知, 当钢轨类型由 50 kg/m 钢轨改变至 75 kg/m 钢轨时, 钢轨的一阶 pinned-pinned 共振频率由 1 050 Hz 降低到 860 Hz, 二阶 pinned-pinned 共振频率由 2 830 Hz 降低到 2 310 Hz, 且一阶 pinned-pinned 共振的振幅也随之降低. 以 60 kg/m 钢轨工况为基准值时, 一阶 pinned-pinned 振动频率对钢轨类型的敏感系数为 0.104, 振动幅值的敏感系数为 0.701; 二阶 pinned-pinned 振动频率对钢轨类型的敏感系数为 0.108, 振动幅值的敏感系数为 0.238. 可见, 钢轨类型是 pinned-pinned 振动的较敏感参数, 采用重型钢轨可有效降低钢轨的振动幅值。

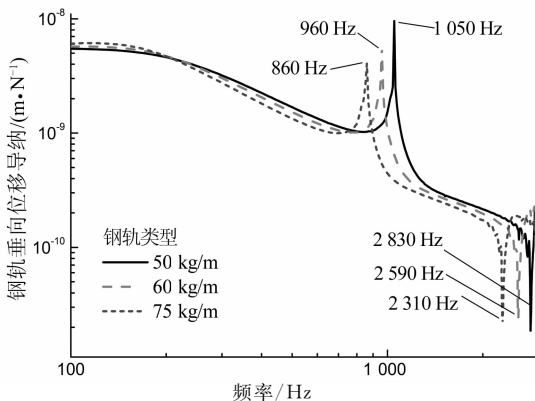


图 6 钢轨类型对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 6 Influence of rail type on vertical displacement mobility

图 7 为添加约束阻尼前后钢轨垂向位移导纳特性对比. 由图 7 可知, 在钢轨的非工作面添加约束阻尼结构后, 钢轨的一阶 pinned-pinned 共振频率变化

幅度很小, 但共振幅值有所降低; 二阶 pinned-pinned 共振频率由 2 590 Hz 增加到 2 630 Hz, 高频范围内钢轨的振动幅值有明显的衰减. 采用约束阻尼钢轨可降低钢轨 pinned-pinned 振动的幅值, 但不能从根本上抑制钢轨 pinned-pinned 振动的发生。

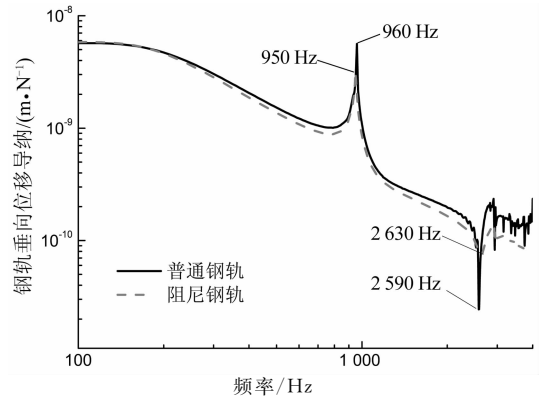


图 7 阻尼钢轨对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 7 Influence of rail with or without damping material on vertical displacement mobility

### 3.2 扣件设计参数

图 8~图 10 分别为扣件间距、刚度以及阻尼对钢轨垂向位移导纳的影响. 由图 8 可知, 当扣件间距由 0.55 m 逐渐增加到 0.70 m 时, 钢轨 pinned-pinned 共振频率有明显的降低, 共振振幅逐渐增大. 图 9 中, 扣件刚度在  $2.5 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$  N/m 间变化时, 对钢轨的 pinned-pinned 共振特性没有显著的影响. 由图 10 可知, 增加扣件阻尼可有效降低钢轨在低频内的垂向振动, 但对钢轨 pinned-pinned 共振的频率影响较小. 扣件阻尼对 pinned-pinned 共振振幅的影响大于扣件刚度的影响。

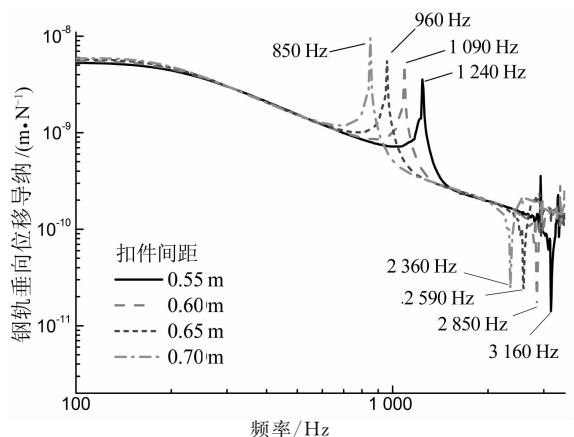


图 8 扣件间距对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 8 Influence of span length on vertical displacement mobility

表 2 为扣件设计参数对钢轨 pinned-pinned 共振特性的敏感系数汇总. 由表 2 可知, 扣件间距为钢

轨 pinned-pinned 共振特性的敏感参数;扣件刚度为钢轨 pinned-pinned 振动的不敏感参数;扣件阻尼对钢轨 pinned-pinned 共振频率没有影响,但由于受阻尼减振的影响,钢轨共振幅值随着阻尼的增加而略有降低,扣件阻尼对共振幅值而言为较敏感参数.

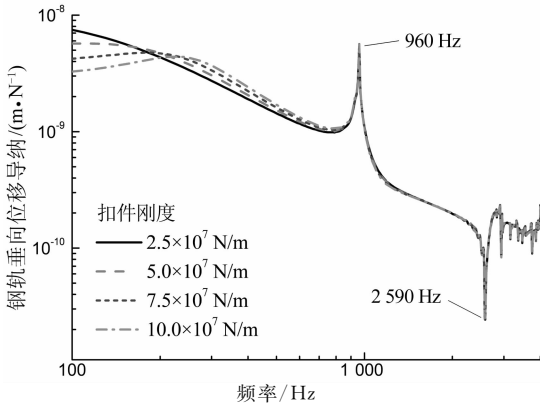


图9 扣件刚度对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 9 Influence of fastener stiffness on vertical displacement mobility

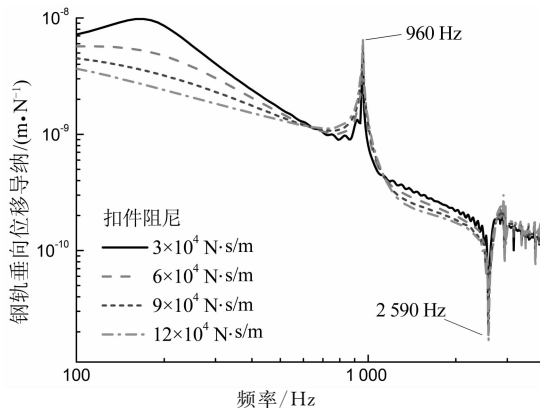


图10 扣件阻尼对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 10 Influence of fastener damping on vertical displacement mobility

表2 扣件设计参数对钢轨 pinned-pinned 共振特性的敏感系数汇总

Tab. 2 Sensitivity coefficients of fastener parameters to pinned-pinned resonance of rail

参数	一阶 pinned-pinned 共振		二阶 pinned-pinned 共振	
	频率敏感系数	振幅敏感系数	频率敏感系数	振幅敏感系数
扣件间距	0.292	0.698	0.220	0.421
扣件刚度	0	0.018	0.004	0.026
扣件阻尼	0	0.160	0.004	0.140

### 3.3 轨道板设计参数

图 11 为轨道板弹性模量对钢轨垂向位移导纳的影响. 由图 11 可知,当轨道板弹性模量由  $1.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  增加到  $9.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  时,钢轨在高频的振动得到了有效的衰减,但钢轨的 pinned-pinned

共振特性几乎没有变化. 以轨道板弹性模量  $3.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  为基准值时,一阶和二阶 pinned-pinned 共振频率没有变化;一阶和二阶 pinned-pinned 振动幅值的敏感系数分别为 0.008 和 0.174,其中二阶 pinned-pinned 共振振幅主要受高频振动衰减影响.

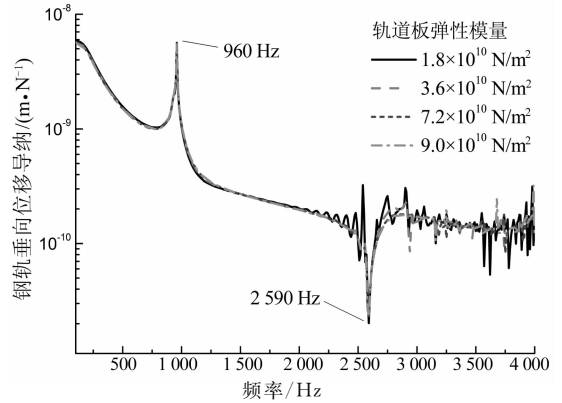


图11 轨道板弹性模量对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 11 Influence of elastic modulus of track slab on vertical displacement mobility

### 3.4 轨道结构类型的影响

图 12 对比了无砟轨道扣件间距 0.65 m、扣件间距 0.6 m 与有砟轨道轨枕间距 0.6 m 条件下钢轨的位移导纳特性. 其中无砟轨道扣件间距 0.6 m 为一种理想状态,其与有砟轨道计算结果的对比可反映仅由轨道结构类型引起的钢轨振动特性变化. 有砟轨道的钢轨类型、扣件参数均与无砟轨道相同. 轨枕采用Ⅲ型混凝土枕,道床垂向支撑刚度采用实测值  $142.43 \text{ kN/mm}$  [17].

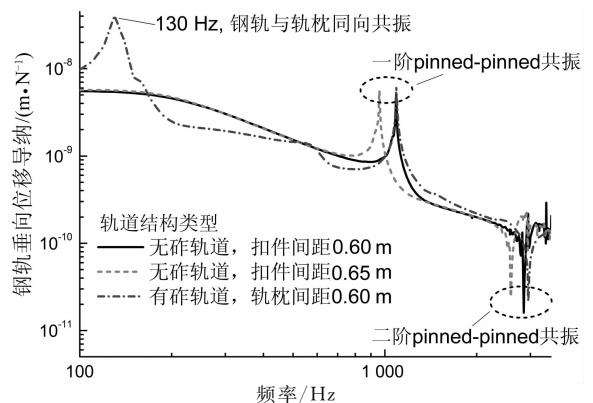


图12 轨道结构类型对钢轨垂向位移导纳的影响  
Fig. 12 Influence of track types on vertical displacement mobility

由图 12 可知,无砟轨道与有砟轨道钢轨振动特性的区别主要集中在低频频段. 对于有砟轨道而言,在低频频段内(本文计算条件下为 130 Hz)会出现钢轨和轨枕在道床弹性基础上的第一阶垂向同相共振,而无砟轨道则不会出现这一现象. 此外,受道床

弹性的影响,有砟轨道钢轨在低于 1 000 Hz 以下的振动幅值要低于无砟轨道。当无砟轨道与有砟轨道扣件间距相同时,两者的钢轨 pinned-pinned 共振特性差别不大,然而,实际条件下无砟轨道扣件间距一般为 0.65 m,如图 12 所示,实际条件下无砟轨道钢轨的 pinned-pinned 共振频率要小于有砟轨道钢轨。

## 4 结 论

为充分了解无砟轨道钢轨 pinned-pinned 振动特性,为有效降低由钢轨 pinned-pinned 共振引起轮轨辐射噪声峰值提供依据,本文基于单参数敏感性分析方法分析了钢轨类型、约束阻尼结构、扣件设计参数、轨道板弹性模量及轨道结构类型等轨道设计参数对钢轨 pinned-pinned 共振特性的影响,得出以下结论:

1) 钢轨类型对 pinned-pinned 共振频率属于较敏感参数,对共振幅值属于敏感参数,采用重型钢轨可有效降低钢轨共振幅值。

2) 在钢轨非工作面添加约束阻尼结构几乎不改变钢轨的 pinned-pinned 共振频率,但对钢轨 pinned-pinned 共振振幅有显著的衰减作用。

3) 扣件间距对钢轨 pinned-pinned 共振特性的影响最为显著,属于敏感参数。

4) 由于钢轨 pinned-pinned 共振发生时,扣件位于振动波形的驻波节点位置,振动能量不通过扣件向轨下基础传递,因此扣件刚度、阻尼及轨道板弹性模量对板式无砟轨道钢轨 pinned-pinned 共振频率没有影响,属于不敏感参数。由于扣件阻尼及轨道板弹性模量对轨道系统的阻尼特性有一定的影响,在高频范围内,钢轨共振振幅随着二者的增加而略有降低。

5) 轨道结构类型对钢轨低频振动特性影响较为显著。实际条件下,受扣件间距的影响,无砟轨道钢轨 pinned-pinned 共振频率低于有砟轨道钢轨。

## 参考文献

[1] THOMPSON D J, FODIMAN P, MAHÉ H. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 2: results [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1): 137-147.

[2] GRASSIE S L. The dynamic response of railway track to high frequency vertical excitation[J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1982, 24(2): 77-90.

[3] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, Part III: rail vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 161(3): 421-446.

[4] THOMPSON D J. Experimental analysis of wave propagation in railway tracks[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203

(5): 867-888.

[5] 李克飞, 韩志伟, 刘维宁, 等. 基于现场锤击试验的地铁轨道振动特性分析及参数研究[J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(2): 12-16.  
LI K F, HAN Z W, LIU W N, *et al.* Characteristic analysis and parameter study of metro track structure vibration based on in-situ hammer excitation test [J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(2): 12-16. (In Chinese)

[6] 方锐, 肖新标, 房建英, 等. 轨道结构参数对钢轨和轨枕振动特性的影响[J]. *铁道学报*, 2011, 33(3): 71-76.  
FANG R, XIAO X B, FANG J Y, *et al.* Effect of structure parameters of railway track on dynamic behavior of rail and sleeper [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(3): 71-76. (In Chinese)

[7] 孙晓静, 张厚贵, 刘维宁, 等. 采用剪切型减振器扣件的钢轨频率响应特性测试分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(S1): 419-423.  
SUN X J, ZHANG H G, LIU W N, *et al.* Laboratory measurement on rail frequency response behavior for egg fastening system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 419-423. (In Chinese)

[8] MAES J, SOL H. A double tuned rail damper-increased damping at the two first pinned-pinned frequencies [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267: 721-737.

[9] LIU H P, WU T X, LI Z G. Theoretical modelling and effectiveness study of rail vibration absorber for noise control [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 323(4): 594-608.

[10] 于向东, 吴志花, 闫斌, 等. 多线铁路拱加劲连续梁桥上无缝线路梁格模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9): 76-81.  
YU X D, WU Z H, YAN B, *et al.* Grillage models of CWR on continuous beam-arch composite railway bridges with multi-track [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9): 76-81. (In Chinese)

[11] NILSSON A C, LIU B L. *Vibro-acoustics; Volume I* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 307-309.

[12] 肖汉宁, 彭苏华, 高朋召, 等. 支柱瓷绝缘子表面裂纹应力强度因子的有限元分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(12): 53-58.  
XIAO H N, PENG S H, GAO P Z, *et al.* Stress intensity factor analysis of surface crack on rod porcelain insulator through finite element method[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, 41(12): 53-58. (In Chinese)

[13] CUI R X, GAO L, CAI X P, *et al.* Vibration and noise reduction properties of different damped rails in high-speed railway [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2014, 62: 176-185.

[14] VINCENT N, THOMPSON D J. Track dynamic behaviour at high frequencies. Part 2: experimental results and comparisons with theory [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1995, 24(S1): 100-114.

[15] 朱维申, 章光. 节理岩体参数对围岩破损区影响的敏感性分析[J]. *地下空间*, 1994, 14(1): 10-15.  
ZHU W S, ZHANG G. Sensitivity analysis of influence of jointed rock parameters on damaged zone of surrounding rock [J]. *Underground Space*, 1994, 14(1): 10-15. (In Chinese)

[16] 朱正旺, 练松良. 轨道参数对无缝线路稳定性影响的敏感性分析[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(1): 72-75.  
ZHU Z W, LIAN S L. Analysis of track parameters sensitivity to CWR stability [J]. *China Railway Science*, 2004, 25(1): 72-75. (In Chinese)

[17] 刘衍峰, 高亮. 秦沈客运专线道床状态指标的试验研究[J]. *铁道标准设计*, 2004, 48(9): 18-20.  
LIU Y F, GAO L. Experimental research on the state indexes of ballast bed on Qinhuangdao-Shenyang passenger special line [J]. *Railway Standard Design*, 2004, 48(9): 18-20. (In Chinese)