

车轮辐板阻尼涂层对钢轨波磨的影响

夏晨光, 陈光雄, 朱旻昊, 赵晓男

(西南交通大学 材料科学与工程学院 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究车轮辐板涂敷有阻尼性能的涂层对小半径曲线钢轨波磨的影响, 并根据试验结果提出减缓或抑制钢轨波磨的建议。**方法** 基于摩擦自激振动导致钢轨波磨机理, 利用 ABAQUS 有限元仿真软件, 建立轮对、钢轨、轨枕、车轮辐板涂层有限元模型, 模拟曲线半径为 300 m 的工况, 采用 ABAQUS 中内置的复特征值分析方法, 分析轮轨系统在小曲线半径工况下的稳定性。**结果** 在曲线半径为 300 m 的工况下, 轮轨间因存在饱和蠕滑力引起自激振动, 于频率 $f=502.32$ Hz 时产生不稳定振动, 从而引起钢轨波磨。通过在车轮辐板内侧和双侧涂敷有阻尼涂层, 可有效增强轮轨系统的稳定性, 减缓钢轨波磨的发生趋势。只在车轮辐板外侧添加涂层会增加钢轨波磨的发生概率。车轮辐板双侧和内侧涂层模型中, 涂层厚度的增加会提高系统稳定性; 外侧涂层模型中, 涂层厚度的增加会降低系统的稳定性。涂层的阻尼系数对钢轨波磨有较大影响, 提高涂层阻尼系数可有效减缓钢轨波磨发生趋势。**结论** 在地铁小半径曲线上, 通过在车轮辐板内侧涂敷有阻尼涂层, 可有利于减缓钢轨波磨现象, 当涂层阻尼系数增大至 1.5e^{-3} 时, 可有效抑制钢轨波磨。

关键词: 阻尼涂层; 钢轨波磨; 车轮辐板; 复特征值; 有限元; 摩擦自激振动

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0134-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.017

Effect of Damped Coating of Wheel Web on Rail Corrugation

XIA Chen-guang, CHEN Guang-xiong, ZHU Min-hao, ZHAO Xiao-nan

(Tribology Research Institute, School of Materials Science and Engineering
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of the damped coating of the wheel web on rail corrugation on the tight curved track. Based on the results, measures will be proposed, by which the rail corrugation can be effectively restrained. Based on the theory that friction-induced vibration causing rail corrugation, a finite element model is established using ABAQUS, which consists of wheels, rails, a number of sleepers and damped coating. The stability of the wheel-rail system on the condition of curve radius 300 meters is analyzed using the complex eigenvalue method of ABAQUS. Under the influence of saturated creep forces, the rail corrugation was prone to occur, and the unstable vibration frequency of the wheel-rail system was $f=502.32$ Hz.

收稿日期: 2019-08-01; 修订日期: 2019-09-10

Received: 2019-08-01; Revised: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51775461)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775461)

作者简介: 夏晨光 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钢轨波磨。

Biography: XIA Chen-guang (1994—), Male, Master, Research focus: rail corrugation.

通讯作者: 陈光雄 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦振动与噪声。邮箱: chen_guangx@163.com

Corresponding author: CHEN Guang-xiong (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: frictional vibration and noise. E-mail: chen_guangx@163.com

引文格式: 夏晨光, 陈光雄, 朱旻昊, 等. 车轮辐板阻尼涂层对钢轨波磨的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 134-140.

XIA Chen-guang, CHEN Guang-xiong, ZHU Min-hao, et al. Effect of damped coating of wheel web on rail corrugation[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 134-140.

The occurring propensity of rail corrugation can be reduced by adding damped coatings on the insides and both sides of the wheel webs. At the same time, the stability of the wheel-rail system can be effectively improved. The occurring propensity of rail corrugation will be increased by adding the damped coating on the outer sides of the wheel webs. The stability of the wheel-rail system will be enhanced by adding the thickness of coating which on the inner and both sides of the wheel webs. The stability of the model with damped coating on the outer sides of wheel webs will be decreased if the thickness of coating increases. The damping coefficient of the coating make a great influence on rail corrugation. The occurring propensity of rail corrugation can be reduced by increasing the damping coefficient of the coating. Rail corrugation can be reduced or even removed, by adding the damped coating on the insides of the wheel webs under the tight curved track. Raising the damping coefficient of the coating up to 1.5e^{-3} can effectively relieves rail corrugation.

KEY WORDS: damping coating; rail corrugation; wheel web; complex eigenvalue analysis; finite element; self-excited vibration

2017 年 6 月 25 日,“复兴号”在京沪高铁线上开通运营,这标志着我国标准动车组达到世界先进水平。轨道交通(高速列车、地铁、轻轨)的快速发展,缓解了城市内与城市间的交通压力,带动了整体经济的快速发展。然而世界范围内轨道交通自身无法避免多个技术性难题,钢轨波磨就是其中之一。钢轨波磨^[1-6]即在钢轨工作表面存在的一种波浪形磨耗的现象。根据现波磨特征,可将其分为六大类,依次为重载波磨、轻轨波磨、弹性轨枕波磨、接触疲劳波磨、响轨波磨和车辙波磨。钢轨波磨一方面会大大降低旅客乘坐的舒适性,产生令人不适的轮轨振动噪声;另一方面,钢轨波磨会增加轮轨间的振动,列车各部位相关零件的使用寿命在一定程度上会降低。世界各国相关科研学者从不同角度提出了减缓或抑制钢轨波磨的建议措施^[7-11],但都有一定的局限性。Grassie 与 Kalousek 等^[12]通过对钢轨波磨多年的研究,根据其特性将钢轨波磨分为六大类,并针对这六种不同类型的波磨提出了不同的解决方案。荷兰科研工作者 Oostermeijer^[13]根据多年的研究分析,认为提高钢轨材质中锰元素的含量可以有效减缓钢轨波磨。Eadie 与 Kalousek 等^[14]研究开发了一种消除钢轨波磨的摩擦调节剂。总的来说,世界各国轨道交通相关部门都会在钢轨波磨问题上花费大量的费用,因而认清钢轨波磨的产生机理,并能提出减缓或抑制钢轨波磨的措施,具有深刻意义。近年来阻尼材料^[15]发展迅猛,它有着优良的吸振缓冲作用,并在各行业得到专业人员的肯定。在轨道交通相关研究领域,阻尼材料也得到了应用,例如采用高阻尼性能的扣件轨垫可有效抑制钢轨波磨,通过对列车等相关部位涂敷阻尼涂层^[16]可有效降低列车运行中的振动噪声。然而在辐板表面涂敷带有阻尼性能的涂层,其对钢轨波磨影响的研究却比较少。

2010 年陈光雄等^[17-18]提出摩擦自激振动导致钢轨波磨的机理。在小曲线半径下,半径小于等于 350 m,转向架前轮对与钢轨间存在饱和的蠕滑力,会导致轮轨系统的自激振动,因而引起钢轨波磨。本

文研究内容建立在该理论基础之上,利用 ABAQUS 有限元仿真软件,建立由轮对、钢轨、轨枕以及轮对辐板涂层组成的有限元模型,研究曲线半径为 300 m 的工况下,轮对辐板有无阻尼涂层时轮轨系统的稳定性及钢轨波磨的发生趋势;接着研究辐板单内侧、单外侧和辐板双侧有阻尼涂层的三种情况下,钢轨波磨的发生趋势;与此同时,还研究了涂层在不同厚度情况下钢轨波磨的发生趋势;最后以辐板单内侧有阻尼涂层模型为例,探讨了涂层阻尼性能参数对钢轨波磨的影响。

1 有限元模型和理论方法

1.1 轮轨系统及涂层有限元模型

在有限元软件中采用实体单元(C3D8I),分别建立轮对、钢轨、轨枕以及涂层实体模型。其中,车轮踏面为 LM 磨耗型踏面,车轮直径为 840 mm,车轮辐板形状为 S 形。ABAQUS 中模拟钢轨长 $L=36\text{ m}$,轮对与钢轨间的摩擦因数设置为 $\mu=0.4$,轨底坡为 1/40,轨枕间距为 625 mm。相关部件及材料属性如图 1 和表 1 所示。

表 1 材料性能参数
Tab.1 Parameters of material property

| Parts | Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | Young's modulus E/GPa | Poisson's ratio | Damping coefficient β |
|----------|---|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Wheelset | 7.80 | 210 | 0.3 | |
| Sleeper | 2.50 | 39 | 0.3 | |
| Rail | 7.80 | 210 | 0.3 | |
| Coating | 1.76 | 220 | 0.2 | 1.5e^{-6} |

1.2 轮轨系统平面接触模型

曲线半径为 300 m 的工况下,地铁轮轨系统几何接触关系如图 2 所示,现对其做简要说明。通过在点

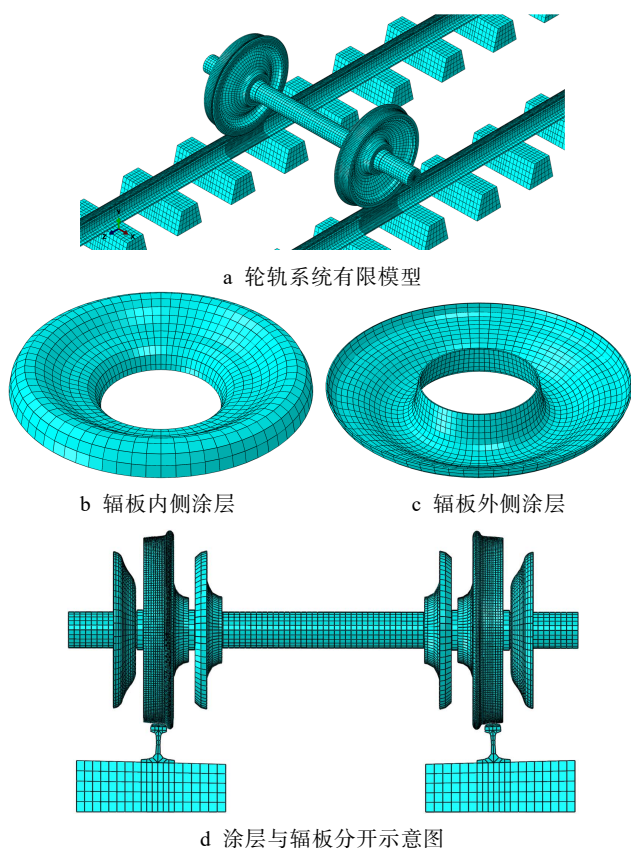


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model: a) finite element model of a wheelset-track system; b) inside coating; c) outer side coating; d) sketch map of web with parted coating

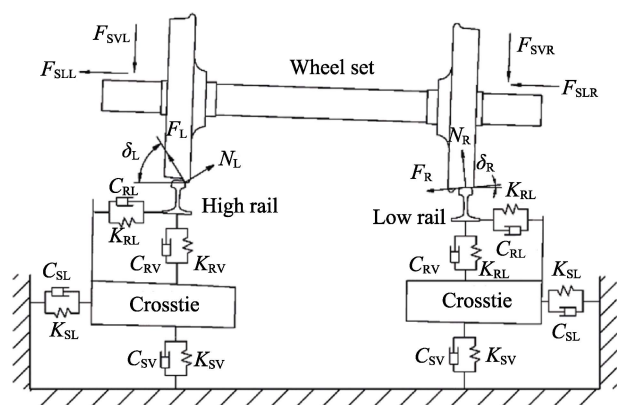


图2 轮轨几何接触图

Fig.2 Wheel-rail geometry contact model

与点之间施加弹簧阻尼来模拟扣件单元,同样通过在地面与点之间施加弹簧阻尼模拟地面对钢轨的支撑。图中轮对和钢轨之间的法向力、蠕滑力分别用 N_L 、 N_R 和 F_L 、 F_R 表示,轮对两端的横向力和垂向力分别用 F_{SLR} 、 F_{SLL} 和 F_{SVR} 、 F_{SVL} 来表示, δ_L 为外轮与外轨的接触角, δ_R 为内轮与内轨间的接触角,在 Simpack 动力学仿真软件通过相关模拟计算可得到以上参数。 K_{RL} 、 K_{RV} 和 K_{SL} 、 K_{SV} 分别为扣件和道床的横向和垂向支撑刚度, C_{RL} 、 C_{RV} 和 C_{SL} 、 C_{SV} 分别为扣件和道

床横向和垂向阻尼。

1.3 钢轨波磨有限元分析方法

采用 ABAQUS 中常用的方法复特征值分析^[19],对轮对辐板涂敷有阻尼涂层后轮轨系统的稳定性进行分析。现对复特征值分析方法作简要介绍。根据 Yuan^[20]提出的方法系统,首先在忽略外力和摩擦力的条件下,系统的动力学方程可表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\gamma}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\gamma}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\gamma} = 0 \quad (1)$$

系统动力学方程中: $\boldsymbol{\gamma}$ 为位移矢量, \mathbf{M} 为质量对称矩阵, \mathbf{C} 为阻尼对称矩阵, \mathbf{K} 为刚度对称矩阵。依据线性代数相关知识,可知方程(1)没有实部为正的 eigenvalue,这说明该情况下系统是稳定的。

当把摩擦力考虑进来以后,系统的动力学方程需要重新进行转化,可表示为:

$$(\mathbf{M}_r\ddot{\boldsymbol{\gamma}} + \mathbf{C}_r\dot{\boldsymbol{\gamma}} + \mathbf{K}_r\boldsymbol{\gamma})\boldsymbol{\phi} = 0 \quad (2)$$

其中, \mathbf{M}_r 、 \mathbf{C}_r 、 \mathbf{K}_r 为考虑摩擦力后经过转化得到的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,经过转化后的矩阵都不再是对阵矩阵。将方程(2)的通解表示为:

$$\boldsymbol{\gamma}(t) = \sum \boldsymbol{\phi}_i \exp(\lambda_i t) \quad (3)$$

方程(3)的特征值为 $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$, 特征值的实部为 α_i , 特征值的虚部为 β_i 。再依据线性代数相关知识可知,方程(3)存在实部为正的 eigenvalue,说明系统有不稳定的可能性,即表明轮轨系统有产生摩擦自激振动的趋势。为了衡量这种趋势,引入等效阻尼比的相关概念,其中等效阻尼比可以表示为:

$$\xi_i = -\alpha_i / (\pi |\beta_i|) \quad (4)$$

ξ_i 为负数时表明系统有产生摩擦自激振动的趋势,一般其绝对值越大,则表明系统产生摩擦自激振动的趋势越大,越容易引发钢轨波磨。

1.4 Rayleigh 阻尼

ABAQUS 中有多种阻尼表达方式,瑞利阻尼^[21-22]就是其中一种,本文研究内容采用瑞利阻尼形式。假设可以通过质量和刚度矩阵来表示 Rayleigh 阻尼,并正比于质量和刚度,即:

$$\mathbf{C}_R = \alpha \mathbf{M}_R + \beta \mathbf{K}_R \quad (5)$$

其中, \mathbf{C}_R 为 Rayleigh 阻尼矩阵, \mathbf{M}_R 为质量矩阵, \mathbf{K}_R 为刚度矩阵, α 、 β 分别为对应的矩阵系数。存在如下关系为:

$$\varepsilon_i = \frac{\alpha_i}{2\omega_i} + \frac{\beta_i\omega_i}{2} \quad (6)$$

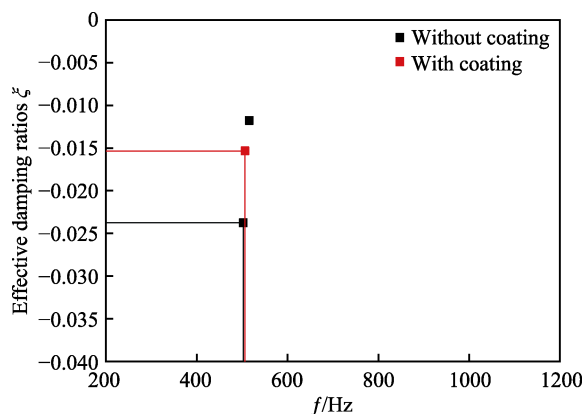
其中, ω_i 为第 i 阶模态的圆频率,一般 α 、 β 的确定需要对材料进行模态分析,得出其圆频率和模态阻尼比,然后联立方程(6)求得 α 、 β ,在许多实际问题中质量阻尼可以忽略 ($\alpha=0$)。本文所用的阻尼材料,其阻尼参数来源于文献[23]。

2 结果分析

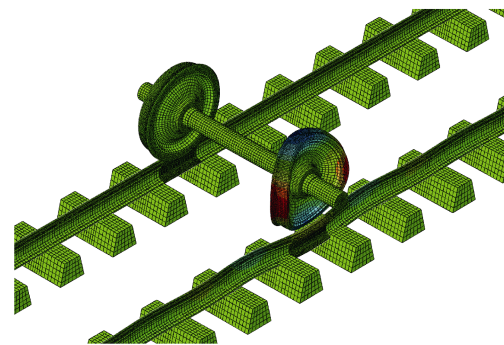
2.1 300 m 曲线半径有无阻尼涂层轮轨系统稳定性分析

曲线半径为 300 m 的情况下, 轮轨系统在轮对辐板有无阻尼涂层时的摩擦自激振动计算结果如图 3 所示。当轮对辐板无阻尼涂层时, 轮轨系统是不稳定的, 其产生了两阶不稳定振动, 对应频率为 502.32 Hz 和 515.70 Hz, 其等效阻尼比分别为 -0.02376 和 -0.01177 。依据等效阻尼比相关概念可知, 轮轨系统最容易在 502.32 Hz 处发生自激振动, 从而引起钢轨

波磨。地铁运行速度一般在 60~75 km/h 左右, 实际线路的波磨通过频率大约在 200~700 Hz 范围内, 其对应的波长在 50~70 mm 之间, 并且波磨是发生在小曲线半径的内轨上, 通过观察其不稳定振动模态图 3b 以及不稳定振动频率可发现, 模型计算结果与实际发生的波磨参数比较一致, 说明本文建立的波磨预测模型基本正确。当轮对辐板涂敷有阻尼涂层时, 此时的轮轨系统只产生一阶不稳定振动, 对应的频率为 506.23 Hz, 其等效阻尼比为 -0.01534 。通过与辐板无阻尼涂层模型计算结果对照, 可发现轮轨系统的稳定性得到明显提升, 说明轮对辐板涂敷有阻尼涂层对减缓钢轨波磨是有作用的。



a 辐板无涂层和有涂层轮轨系统等效阻尼比分布



b 轮轨系统不稳定振动模态($f=502.32$ Hz, $\zeta=-0.02376$)

图 3 轮轨系统自激振动结果

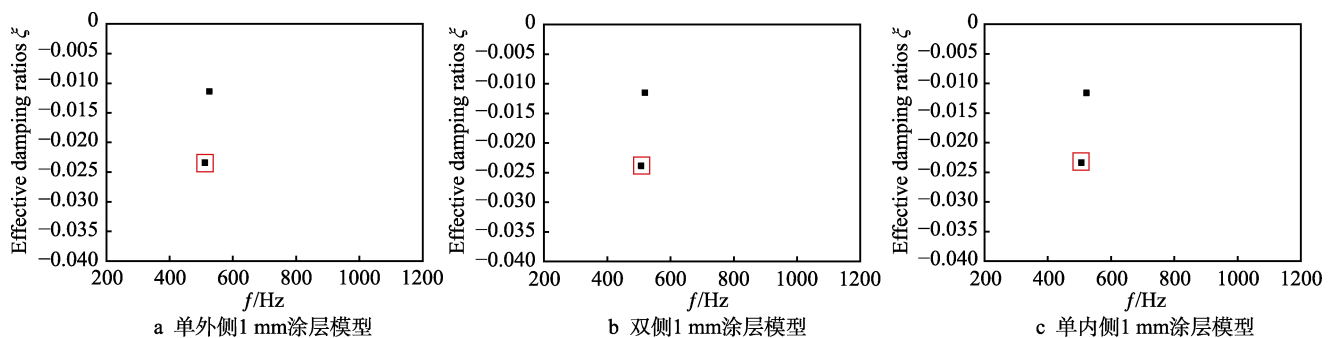
Fig.3 Prediction result of self-excited vibration of wheel-rail system:

- a) distribution of the effective damping ratios of the wheel set-track system with or without damped coating;
b) mode shape of unstable vibration of the wheel set-track system ($f=502.32$ Hz, $\zeta=-0.02376$)

2.2 轮对辐板单内、外侧及双侧阻尼涂层对钢轨波磨的影响

以涂层厚度 1 mm 为例, 讨论轮对辐板在三种不同涂敷阻尼涂层方式的情况下对钢轨波磨的影响。只在轮对辐板外侧涂敷阻尼涂层时, 轮轨系统摩擦自激振动计算结果如图 4a 所示, 轮轨系统产生两阶不稳定振动, 对应频率为 507.17 Hz 和 519.18 Hz, 等效阻尼比为 -0.02384 和 -0.00150 , 与其对应的不稳定振

动模态如图 5a 所示, 相较于轮对辐板无阻尼涂层模型 (图 3b), 轮对辐板外侧涂敷阻尼涂层时会使得轮轨系统的不稳定性有所上升, 表明产生钢轨波磨的趋势有所增加, 因而轮对辐板外侧涂敷有阻尼涂层时并不能起到减缓钢轨波磨发生趋势的作用。当轮对辐板内外侧都涂敷有相同厚度的阻尼涂层时, 模型计算结果如图 4b 所示, 此时轮轨系统也产生两阶不稳定振动, 其频率分别为 511.17 Hz 和 525.41 Hz, 对应的等效阻尼比为 -0.02340 和 -0.01139 , 其不稳定振动模



a 单外侧 1 mm 涂层模型

b 双侧 1 mm 涂层模型

c 单内侧 1 mm 涂层模型

图 4 不同涂层方式计算结果

Fig.4 Prediction results of different coating ways: a) outer side coating of thickness 1 mm;
b) both side coatings of thickness 1 mm; c) inside coating of thickness 1 mm

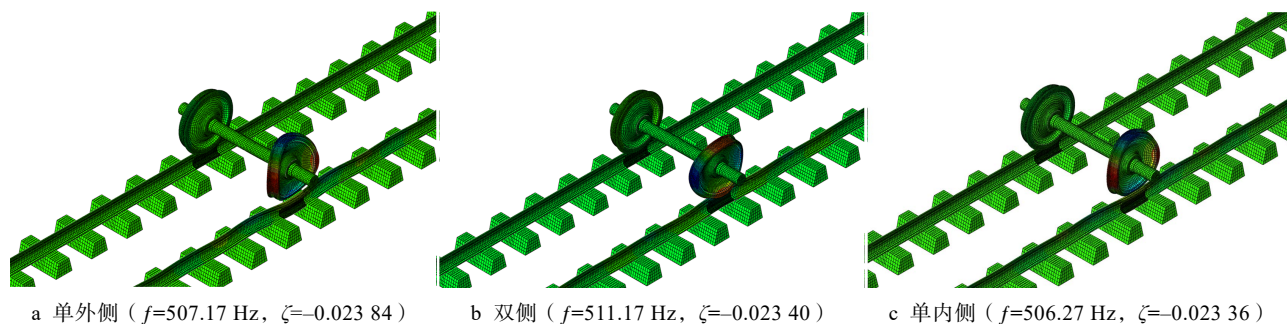


图5 不同涂层方式对应的模态图
Fig.5 Mode shapes of different coating ways

态如图 5b 所示。相较于辐板无阻尼涂层模型, 轮对辐板双侧涂敷有阻尼涂层时, 轮轨系统的稳定性提升很小。当只在轮对辐板内侧涂敷有相同厚度的阻尼涂层时, 其模型的计算结果如图 4c 所示, 此时轮轨系统产生两阶不稳定振动, 其频率为 506.27 Hz 和 522.01 Hz, 对应的等效阻尼比为-0.023 36 和-0.011 61, 其对应的振动模态如图 5c 所示。综合对比可发现, 轮对辐板内侧涂敷有阻尼涂层时, 轮轨系统的稳定性有所提升, 在一定程度上可以减缓钢轨波磨的发生趋势, 但并不能起到抑制钢轨波磨的作用。

2.3 轮对辐板阻尼涂层厚度对钢轨波磨的影响

轮对辐板在三种不同涂敷方式的情况下, 阻尼涂层厚度对钢轨波磨的影响。涂层厚度变化范围在 1~4 mm 之间。首先研究只在辐板单外侧涂敷有阻尼涂层的情况下, 阻尼涂层厚度对钢轨波磨的影响, 结果如图 6a 所示, 这里依据等效阻尼比相关定义选取一阶等效阻尼比进行比较。图 6 中横坐标 0 表示辐板

无阻尼涂层对照模型计算结果, 纵坐标为相对应的等效阻尼比数值。通过与轮对辐板无阻尼涂层计算结果对照, 可发现随着阻尼涂层厚度的增加, 轮轨系统的不稳定性逐渐上升, 这意味着发生钢轨波磨的趋势在增加, 说明只在轮对辐板外侧涂敷有阻尼涂层并不能起到减小轮轨系统不稳定性的作用, 反而会增加钢轨波磨的发生趋势, 这结果也与 2.2 节的结论相似。当在轮对辐板双侧涂敷有相同厚度的阻尼涂层时, 通过计算结果 (图 6b) 可知, 轮轨系统的稳定性随着两侧涂层厚度的增加有一定的上升趋势, 说明发生钢轨波磨的趋势逐渐减小, 这表明双侧涂层对减缓钢轨波磨的发生趋势是有作用的。当只在轮轨辐板内侧涂敷有阻尼性能的涂层 (图 6c) 时, 随着涂层厚度的增加, 轮轨系统的稳定性逐渐提升, 发生钢轨波磨的可能性逐渐降低, 相较于双侧涂层, 单内侧涂层对轮轨系统的稳定性提升更明显, 这说明只在轮对辐板单内侧涂敷有适当厚度的阻尼涂层时, 对减缓钢轨波磨有积极的影响, 但不能从根本上消除钢轨波磨。

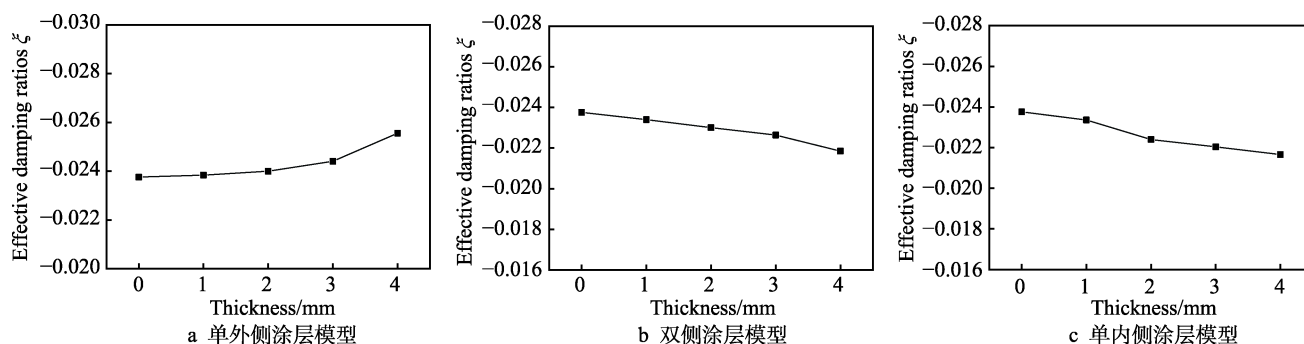


图6 不同涂层厚度计算结果
Fig.6 Prediction results of models with coating of different thickness:
a) outer side coating; b) both sides coating; c) inside coating

2.4 涂层阻尼参数对钢轨波磨的影响

阻尼对结构振动有重要影响, 尤其是高阻尼性能的材料对振动的吸收很强。为了研究轮对辐板阻尼涂层的阻尼性能参数对钢轨波磨的影响, 选取单内侧涂层方式进行研究, 轮对辐板单内侧涂层厚度都为

1 mm。假设阻尼正比于刚度矩阵, 即 $\alpha=0$, 研究阻尼系数 β 在 $1.5 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ 取值范围内, 涂层阻尼性能参数对钢轨波磨的影响。当阻尼性能参数 $\beta = 1.5 \times 10^{-6}$ 时, 轮轨系统产生两阶不稳定振动, 对应频率为 506.27 Hz 和 522.01 Hz, 其相对应的等效阻尼比为

-0.023 36 和-0.011 61。当阻尼系数 β 增大至 1.5×10^{-5} 时, 轮轨系统也产生两阶不稳定振动, 其频率为 506.27 Hz 和 522.01 Hz, 其对应的等效阻尼比为-0.022 63 和-0.010 53 (如图 7a 所示), 通过对比可知轮轨系统的稳定性提升较小, 在此情况下并不能消除钢轨波磨。然而, 当阻尼系数 β 增大至 1.5×10^{-4} 时, 轮轨系统稳定性得到明显增强, 轮轨系统只产生了一

阶不稳定振动, 对应的频率为 506.23 Hz, 其相应的等效阻尼比为-0.015 34 (如图 7b 所示), 说明阻尼性能的增强可增加轮轨系统的稳定性, 减缓钢轨波磨的发生趋势。当阻尼系数 β 增大至 1.5×10^{-3} 时, 轮轨系统稳定, 没有产生任何不稳定振动 (如图 7c 所示), 说明钢轨波磨得到抑制。这意味着高阻尼性能的涂层能够显著增强轮轨系统的稳定性, 可以消除钢轨波磨现象。

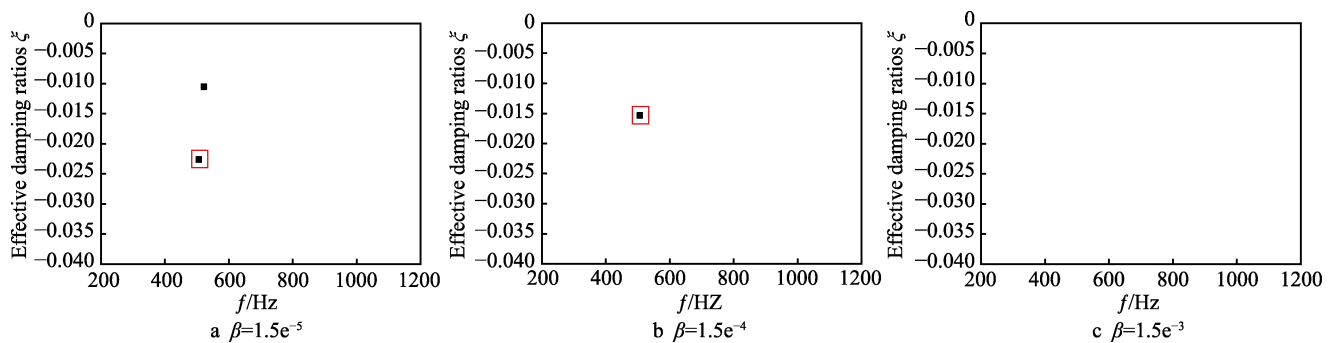


图 7 不同阻尼系数计算结果图

Fig. 7 Prediction results of models with different damping coefficients

3 结论

1) 地铁线路曲线半径为 300 m 的工况下, 轮轨间因存在饱和蠕滑力而导致轮轨系统摩擦自激振动, 从而引起小半径曲线钢轨波磨。

2) 在轮对辐板涂敷有阻尼涂层的三种方式中, 只在轮对辐板内侧涂敷有阻尼涂层, 可有效地减缓钢轨波磨现象。其中, 只在轮对辐板外侧涂敷阻尼涂层并不能起到减缓钢轨波磨的作用, 反而会增加钢轨波磨的产生趋势。此外, 在轮对辐板双侧涂敷涂层对钢轨波磨的减缓作用一般。

3) 在轮对辐板内侧和辐板双侧涂敷有阻尼涂层的模型中, 轮轨系统的稳定性会随着涂层厚度的增加而增加, 产生钢轨波磨的趋势会随着涂层厚度的增加而降低。轮对辐板外侧涂层模型中, 涂层厚度的增加会增加系统的不稳定性, 产生钢轨波磨的趋势会随着厚度的增加而增加。

4) 轮对辐板涂层的阻尼性能对钢轨波磨的产生趋势有较大影响。内侧涂层阻尼系数越大, 越不容易产生钢轨波磨, 当内侧涂层的阻尼系数 β 增大至 1.5×10^{-3} 时, 可有效抑制钢轨波磨。

参考文献:

- [1] 金学松, 李霞, 李伟, 等. 铁路钢轨波浪形磨损研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 264-273.
JIN Xue-song, LI Xia, LI Wei, et al. Review of rail corrugation progress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 264-273.
- [2] NIELSEN J C O, LUND N R, JOHANSSON A, et al.

- Train-track interaction and mechanisms of irregular wear on wheel and rail surfaces[J]. Vehicle system dynamics, 2003, 40(1-3): 3-54.
- [3] SATO Y, MATSUMOTO A, KNOTHE K. Review on rail corrugation studies[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 253(1): 130-139.
- [4] GRASSIE S L. Rail corrugation: Advances in measurement, understanding and treatment[J]. Wear, 2005, 258(7): 1224-1234.
- [5] SUDA Y. Effects of vibration system and rolling conditions on the development of corrugations[J]. Wear, 1991, 144(1-2): 227-242.
- [6] AHLBECK D r, DANIELS L E. A review of rail corrugation processes under different operating modes[C]//Proceedings of the 1990 ASME/IEEE joint railroad California. New York: IEEE, 1990: 12-18.
- [7] TOMEOKA M, KABE N, TANIMOTO M, et al. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication[J]. Wear, 2002, 253(1): 124-129.
- [8] EADIE D T, SANTORO M, OLDFKNOW K, et al. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves[J]. Wear, 2008, 265(9): 1212-1221.
- [9] SUDA Y, KOMINE H, MATSUMOTO K, et al. Feedback friction control between wheel and rail by detecting yaw moment of wheelset[J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1512-1517.
- [10] ISHIDA M, BAN T, IIDA K, et al. Effect of moderating friction of wheel/rail interface on vehicle/track dynamic behavior[J]. Wear, 2008, 265(9): 1497-1503.
- [11] EGANA J I, VINOLAS J, GIL-NEGRETE N. Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail

- contact and rail corrugation[J]. Tribology international, 2005, 38(8): 769-774.
- [12] GRASSIE S L. Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2009, 223(6): 581-596.
- [13] OOSTERMEIJER K H. Review on short pitch rail corrugation studies[J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1231-1237.
- [14] EADIE D T, KALOUSEK J, CHIDDICK K C. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena[J]. Wear, 2002, 253(1): 185-192.
- [15] 刘棣华. 粘弹阻尼减振降噪应用技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- LIU Di-hua. Application technology of viscoelastic damping in noise and vibration reduction[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1990.
- [16] 雷晓燕, 张鹏飞. 阻尼车轮减振降噪的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 60-64.
- LEI Xiao-yan, ZHANG Peng-fei. Experimental study on reducing the noise and vibration of damped wheels[J]. China railway science, 2008, 29(6): 60-64.
- [17] CHEN G X, ZHOU Z R, OUYANG H, et al. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of sound and vibration, 2010, 329(22): 4643-4655.
- [18] 陈光雄, 钱韦吉, 莫继良, 等. 轮轨摩擦自激振动引起小半径曲线钢轨波磨的瞬态动力学[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 71-76.
- CHEN Guang-xiong, QIAN Wei-ji, MO Ji-liang, et al. A transient dynamics study on wear-type rail corrugation on a tight curve due to the friction-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(9): 71-76.
- [19] 赵晓男, 陈光雄, 崔晓璐, 等. 高速列车车轮多边形磨耗的形成机理及影响因素探究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 8-13.
- ZHAO Xiao-nan, CHEN Guang-xiong, CUI Xiao-lu, et al. Formation mechanism and influencing factors of the polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 8-13.
- [20] YUAN Y. An eigenvalue analysis approach to break squeal problem[C]//Proceedings of the 29th ISATA conference on automotive braking systems. Florence: ISATA, 1996: 3-6.
- [21] OREGUI M, LI Z, DOLLEVOET R. An investigation into the modeling of railway fastening[J]. International journal of mechanical sciences, 2015, 92(6): 1-11.
- [22] 潘旦光. 直接确定 Rayleigh 阻尼系数的一种优化方法[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 16-21.
- PAN Dan-guang. An optimization method for the direct determination of Rayleigh damping coefficients[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(9): 16-21.
- [23] 岳金. 碳纤维复合材料防护门抗冲击性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- YUE Jin. Study on the impact resistance performance of the carbon fiber composites blast door[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

(上接第 111 页)

- [16] 丁云飞, 伍彬, 吴会军, 等. 柱状微结构超疏水表面制备及其结霜性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 106-111.
- DING Yun-fei, WU Bin, WU Hui-jun. Preparation of superhydrophobic surface with cylindrical microstructure and the research of the surface frost characteristics[J]. Surface technology, 2015, 44(1): 106-111.
- [17] 周荃卉, 余新泉, 张友法, 等. 喷砂-阳极氧化-氟化处理构筑铝合金超疏水表面[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(3): 456-462.
- ZHOU Quan-hui, YU Xin-quan, ZHANG You-fa, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum alloy by sandblasting-anodizing-fluorination[J]. Chemical journal of Chinese universities, 2010, 31(3): 456-462.
- [18] 丁云飞, 伍彬, 吴会军. 微纳米结构 ZnO 超亲/疏水表面结霜特性研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2013, 12(4): 52-55.
- DING Yun-fei, WU Bin, WU Hui-jun. Study on frost characteristics of micro-nano structure ZnO superhydrophilic/hydrophobic surface[J]. Journal of guangzhou university (Natural science edition), 2013, 12(4): 52-55.
- [19] 吴晓敏, 王维城. 冷面结霜初始形态的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 286-288.
- WU Xiao-min, WANG Wei-cheng. Theoretical analysis of initial behavior of frost formed on a cold surface[J]. Journal of engineering thermophysics, 2003, 24(2): 286-288.
- [20] 闵乃本. 晶体生长的物理基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 45-70.
- Min Nai-ben. Physical basis of crystal growth[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 45-70.
- [21] 郑黎俊, 乌学东, 楼增, 等. 表面微细结构制备超疏水表面[J]. 科学通报, 2004, 49(17): 1691-1699.
- ZHENG Li-jun, WU Xue-dong, LOU Zeng, et al. Superhydrophobicity from microstructured surface[J]. Chinese science bulletin, 2004, 49(17): 1691-1699.
- [22] WENZEL R N. Resistance of solid surface to wetting by water[J]. Industrial and engineering chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [23] CASSIE A, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans faraday soc, 1944, 40: 546-551.