

高速列车车轮多边形磨耗的形成机理及影响因素探究

赵晓男, 陈光雄, 崔晓璐, 吕金洲, 张胜, 朱琪

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究高速列车车轮多边形磨耗的形成机理以及轮轨系统结构参数对车轮多边形磨耗的影响。**方法** 基于轮轨间蠕滑力饱和引起轮轨系统摩擦自激振动从而导致车轮多边形磨耗的理论, 建立了包含车轮、钢轨、轨枕和道床的实体模型, 然后导入到有限元软件 ABAQUS 中, 钢轨和轨枕之间采用点对点的无质量弹簧阻尼单元组进行模拟, 轨枕和道床之间采用绑定约束连接, 道床底部支撑采用点对地的无质量弹簧阻尼单元组。采用复特征值方法研究高速线路上发生制动滑动时轮轨系统的运动稳定性。**结果** 在饱和蠕滑力的作用下, 高速线路轮轨系统产生的不稳定振动频率为 $f=495.01$ Hz, 列车轮对容易产生 18 阶多边形磨耗。在一定范围内, 扣件的垂向刚度对抑制车轮多边形磨耗影响较小, 适当提高扣件的垂向阻尼, 可以有效抑制轮轨系统的摩擦自激振动, 从而达到抑制车轮多边形磨耗的目的。不同偏心形式对轮轨系统不稳定振动几乎没有影响。**结论** 在高速线路上, 列车制动滑动容易引起车轮多边形磨耗, 适当提高钢轨扣件的垂向阻尼, 可有效抑制车轮多边形磨耗。

关键词: 车轮多边形磨耗; 自激振动; 复特征值分析; 垂向刚度; 垂向阻尼; 重心偏移

中图分类号: U211; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0008-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.002

Formation Mechanism and Influencing Factors of the Polygonal Wear of High-speed Train Wheels

ZHAO Xiao-nan, CHEN Guang-xiong, CUI Xiao-lu, LYU Jin-zhou, ZHANG Sheng, ZHU Qi

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to study the formation mechanism of the polygonal wear of high-speed train wheels and the effect of wheel-rail system structural parameters on the wheel polygonalization. Based on the theory that wheel-rail system frictional self-excited vibration caused by the saturated wheel-rail creep force could lead to wheel polygonal wear, a solid model including wheel, rail, sleepers and track beds was established. The solid model was imported into the finite element software ABAQUS. The rail and sleepers were simulated by point-to-point massless spring damping unit and the sleeper and the track bed were connected by binding constraint. Then the point-to-ground massless spring damping unit was used as the bottom support of the track bed. The stability of the wheel-rail system when the brake slip occurred on the high-speed railway lines was studied by the

收稿日期: 2018-03-29; 修订日期: 2018-05-11

Received: 2018-03-29; Revised: 2018-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775461)

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

作者简介: 赵晓男 (1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为高速列车车轮多边形磨耗机理。

Biography: ZHAO Xiao-nan (1990—), Male, Doctor, Research focus: mechanism of polygonal wear of high-speed train wheels.

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。

Corresponding author: CHEN Guang-xiong (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: frictional vibration and noise.

complex eigenvalue method. Under the effect of saturated creep force, the unstable vibration frequency of the wheel-rail system was $f=495.01$ Hz, the wheel was prone to generate 18-degree polygonalization. Within a certain range, the vertical stiffness of the fastener did not play a significant role in suppressing the wheel polygonalization. In order to suppress the wheel polygonalization, properly increasing the vertical damping of the fastener can suppress the frictional self-excited vibration of the wheel-rail system effectively. Different eccentric forms hardly had effects on the unstable vibration of the wheel-rail system. On a high-speed line, the braking slippage of the train can easily cause the wheel polygonalization. The wheel polygonalization can be effectively restrained by raising the vertical damping of the fastener.

KEY WORDS: wheel polygonalization; self-excited vibration; complex eigenvalue analysis; vertical stiffness; vertical damping; center of gravity shift

截止 2017 年底,随着宝兰高铁、西城客专等高铁线路的开通,我国高速铁路运营里程已经达到 2.5 万公里,占世界高速铁路总里程的 70% 以上。中国高速列车的运行速度居世界最高,达到 300~350 km/h,列车如此高速运行,必然加大轮轨之间的相互动力作用,出现一些涉及高速列车安全运行的重大技术问题。其中,高速列车车轮多边形磨耗是现阶段我国高速列车最突出的技术问题之一。所谓高速列车车轮多边形磨耗(也称为车轮非圆磨耗或椭圆形磨耗),即车轮半径沿圆周方向呈现出一种周期不圆顺,是指高速列车车轮从制造厂新造或修理厂镟修出来并装车使用一段时间以后,车轮上与钢轨滚动接触的踏面轮廓由原来的圆形变为多边形,如图 1 所示。当具有多边形轮廓的车轮在钢轨上滚动通过时,该车轮多边形轮廓类似于线路不平顺,将激起轮轨系统的强烈振动,而且列车前进速度越高,激励出来的轮轨振动越大。实测车轮多边形磨耗引起的轮对轴箱振动幅值最大可达 $1000\sim 3000\text{ m/s}^2$,如此强烈的振动将会引起轮对轴箱端盖的脱落,以及转向架构架上一些管卡的松脱掉落,有可能酿成重大行车安全事故。同时,车轮多边形磨耗引起的强迫振动给轴承、车轴、车轮和钢轨都施加了一个极大的动态附加力,长此以往,势必对车辆轴承、车轴、车轮和钢轨的使用寿命产生不利影响。



图 1 车轮多边形

Fig.1 Wheel polygonalization

对车轮多边形磨耗的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代,到目前为止,国内外学者提出的车轮多边形磨耗产生机理主要有 4 种: 1) 车轮在钢轨上滚动时,轮轨表面粗糙度激励轮轴共振而引起轮轨摩擦功变化,从而产生车轮多边形磨耗^[1-5]; 2) 轮轨系统的粘-滑自激振动引起车轮多边形磨耗^[6]; 3) 高速时轮对的重心偏移导致轮轨系统的共振振动,从而引起车轮的多边形磨耗^[7]; 4) 车轮初始多边形(初始不圆顺)与轮轴发生共振,引起车轮多边形磨耗^[8-9]。这 4 种车轮多边形磨耗机理可以部分解释车轮多边形磨耗的成因,但都不能满意地解释我国高速列车车轮多边形磨耗的现象。

根据大量实测结果的统计分析^[10-11],我国高速列车车轮多边形磨耗具有以下特点: 1) 全列车,无论动车还是拖车,8 辆编组时,整列车共有 64 个车轮,每个车轮都会出现形状类似的车轮多边形磨耗,但动车车轮的多边形磨耗相对拖车车轮更严重; 2) 低速铁路,如我国的碎石道床铁路和地下铁路,其车轮多边形磨耗发生的概率很低,偶有发生也是个别车轮发生而非整列车的所有车轮都发生; 3) 高速列车车轮多边形磨耗对应的振动频率大约为 500~550 Hz。这说明上面总结的第 1 条车轮多边形磨耗机理存在局限性,不能说明为何高铁车轮多边形磨耗严重但低速铁路的车轮多边形磨耗比较少见这个现象。对于第 2 条车轮多边形磨耗机理,轮轨系统的粘-滑自激振动的频率为 20~80 Hz^[12],与我国高铁车轮多边形磨耗的激励频率 500 Hz 差别较大,故此磨耗机理同样存在局限性。对于第 3 条车轮多边形磨耗机理,一列高速列车共有 32 根轮对,每根轮对的重心都有一定的偏移量,且大小不一,如果是轮对的重心偏移量导致轮轨系统共振,引起车轮多边形磨耗,那么每根轮对的重心都会有不同的偏移量,且不会出现每个车轮都发生边数相同的多边形磨耗现象,故该机理也存在局限性。对于第 4 条车轮多边形磨耗机理,假如车轮初始多边形(初始不圆顺)与轮轴发生共振,引起车轮多边形磨耗,则整列车 64 个车轮的多边形磨耗形状会多种多样,该结果与我国高速列车整列车车轮多边形磨耗形状基本相同的现象矛盾,因此第 4 条车轮多

边形磨损机理也存在局限性。

本文基于轮轨系统摩擦耦合自激理论,建立了由车轮-钢轨-轨枕-道床组成的轮轨摩擦自激振动模型,采用复特征值分析方法研究了高速列车出现车轮多边形磨损的现象。研究表明,使用该模型可以预测车轮发生频率为 500 Hz 左右的多边形磨损^[13],预测结果与我国高速列车发生车轮多边形磨损对应的振动频率比较一致。

1 高铁线路轮轨系统摩擦自激振动模型

1.1 复特征值分析

复特征值分析法是一种能够在频域范围内准确预测系统发生摩擦自激振动时振动频率和振动模式的线性方法,从而预测系统的稳定性^[14-17]。有限元分析软件 ABAQUS 内置了该方法,现对其进行简要介绍。根据 Yuan^[18]从数学角度提出的法向接触约束模型,该模型能够有效地模拟两个弹性体之间的摩擦耦合,不考虑摩擦时,系统的动力学方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

式中: x 为节点位移向量; M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,且均为对称矩阵,所以方程(1)的特征方程对应的特征值不会出现实部为正的情况,即系统稳定。当考虑摩擦耦合作用后,系统的动力学方程为:

$$M_r\ddot{x} + C_r\dot{x} + K_r x = 0 \quad (2)$$

式中: M_r 、 C_r 、 K_r 分别为简化后系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,由于摩擦力的耦合作用导致 M_r 、 C_r 和 K_r 均为非对称矩阵。方程(2)对应的特征方程为:

$$(M_r\lambda^2 + C_r\lambda + K_r)\phi = 0 \quad (3)$$

得到方程(3)的通解:

$$x(t) = \sum \phi_i \exp(\lambda_i t) \quad (4)$$

式中: λ_i 为方程(3)的第 i 阶复特征值, $\lambda_i = \beta_i + j\omega_i$ (β_i 、 ω_i 分别为特征值的实部和虚部, j 为虚数单位); ϕ_i 为方程(3)的特征向量。由于方程(3)的系数矩阵为非对称矩阵,因此可能会出现实部为正的 eigenvalue。当实部 $\beta_i > 0$ 时,系统的节点位移随着时间的延长而增加,这意味着系统的振动逐渐增加,系统趋于不稳定,即使扰动非常小,随着时间的增加,系统振动的振幅可能会越来越大。系统的等效阻尼比通常用来评价摩擦自激振动发生的趋势,定义如下:

$$\xi_i = -\frac{\beta_i}{\pi|\omega_i|} \quad (5)$$

当 ξ_i 为负数时,系统存在发生摩擦自激振动的趋势,且 ξ_i 的绝对值越大,系统发生摩擦自激振动的趋势就越大。

1.2 轮轨接触模型

本文采用由车轮、钢轨、轨枕以及道床构成的轮轨系统模型,研究高速线路车轮多边形磨损现象。由于高速线路通常为直线轨道或大半径 ($R \geq 6000$ m) 曲线轨道,轮对的横向位移很小,其左右轮轨的接触状态近乎一致,因此这里只研究轮对一边的轮轨关系,如图2所示。图2中, F_v 为作用在内轮轴箱上的垂向悬挂力,高铁车轮的名义滚动圆直径 $d=920$ mm,踏面类型为 LM 磨损型踏面。 F 、 N 为轮轨接触产生的横向蠕滑力和法向力。钢轨长度 $L=36$ m,选用 60 kg/m 钢轨,轮轨间的动摩擦系数 $\mu=0.4$,轨底坡为 1/40,轨枕间距 $l_s=625$ mm, δ 为车轮与钢轨间的接触角,扣件的横向刚度和阻尼分别为 $K_L=9.0$ MN/m 和 $C_L=1830.22$ (N·s)/m,垂向刚度和阻尼分别为 $K_v=25.0$ MN/m 和 $C_v=15$ (kN·s)/m。地基对道床的支撑刚度和阻尼同样采用弹簧和阻尼单元模拟,刚度和阻尼值分别为 $K_v=170$ MN/m 和 $C_v=310$ (kN·s)/m。

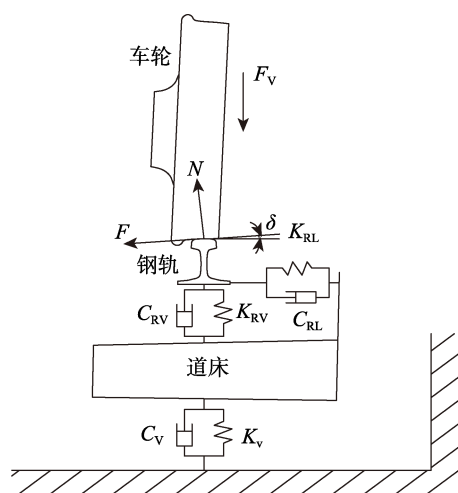


图2 高速线路轮轨接触几何关系

Fig.2 Wheel-rail contact geometry of high-speed railway

1.3 有限元模型

使用 Solidworks 软件建立 CRH3 系高速列车车轮和轨道的实体模型,该模型由车轮、钢轨、轨枕和道床组成。然后将实体模型输入到有限元软件 ABAQUS 中,系统有限元模型如图3所示,模型中的单元类型均选用非协调单元 C3D8I,轮轨接触部分使用过渡网格进行细化,综合采用结构化、扫掠等技术进行网格划分,模型单元总数为 153 372,节点总数为 599 073。钢轨和轨枕之间采用点对点的无质量弹簧阻尼单元组进行模拟。由于无砟轨道采用轨枕嵌入式(支撑块式)整体道床,将轨枕和道床之间通过绑定约束连接,道床底部支撑采用添加点对地的无质量弹簧阻尼单元组来实现。模型中各部件的材料参数如表1所示。

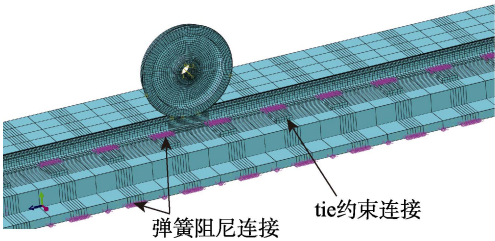


图 3 轮轨系统有限元模型
Fig.3 Finite element model of wheel-rail system

表 1 材料参数
Tab.1 Material parameter

Part	$\rho/(\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	Poisson's ratio
Wheel	7.8	210	0.3
Rails	7.8	210	0.3
Sleeper	2.5	35	0.3
Track bed	1.75	265	0.167

2 计算结果及分析

2.1 高速线路车轮多边形磨耗的研究

高速列车在行驶过程中，为满足区段设定的速度要求，需要不断地牵引加速和制动减速。同时，高速列车的制动力完全来自轮轨间的粘着力，随着速度的提高，轮轨间的粘着系数会降低，加之一些雨雪恶劣气候，粘着系数会进一步降低，容易发生轮轨滑动。当轮轨发生滑动即轮轨之间的蠕滑力饱和时，轮轨系统可能发生摩擦自激振动。根据我国某高铁段实地现场测量，部分动车组车轮存在 18 阶多边形磨耗，当列车在 280~300 km/h 速度高速运行时，其相应的扰动频率为 485~520 Hz。因此，在高铁线路上，500 Hz 左右的不稳定振动频率是引起高速列车车轮多边形磨耗的主要频率。

采用复特征值法研究高速线路轮轨系统的稳定性。图 4 显示了高速列车发生制动时轮轨系统摩擦自

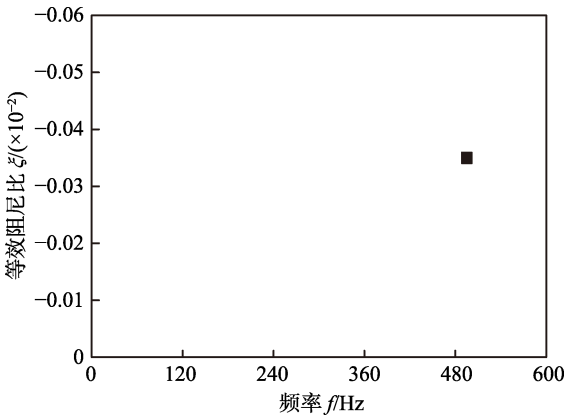


图 4 高铁线路轮轨系统摩擦自激振动频率分布
Fig.4 Frequency distribution of frictional self-excited vibration of wheel-rail system in high-speed railway

激振动的频率分布，发现频率 $f=495.01 \text{ Hz}$ 时，轮轨系统可能发生摩擦自激振动，此时对应的不稳定振动模态如图 5 所示，可以看出车轮与钢轨都出现了不稳定振动。根据车辆运行速度可知，该自激振动会对动车组轮对产生 18 阶多边形磨耗，这与实际线路测量数据基本一致，说明车轮多边形磨耗可能是由轮轨间蠕滑力饱和导致轮轨系统产生摩擦自激振动引起的。通常在高速列车装备轮对防滑装置，尽量避免由于各种外界因素引起的轮轨系统摩擦自激振动以及车轮多边形磨耗现象的发生。

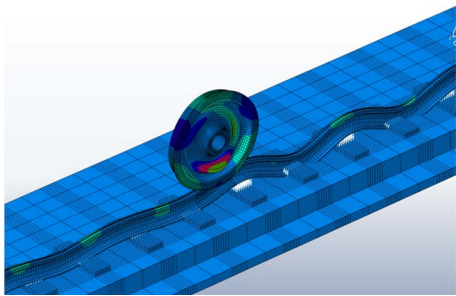


图 5 高铁线路轮轨系统不稳定振动模态
Fig.5 Unstable vibration modes of wheel-rail system in high-speed railway

2.2 扣件参数对车轮多边形磨耗的影响

我国高速铁路无砟轨道扣件的垂向刚度 K_v 约为 25 MN/m，为了分析扣件垂向刚度对车轮多边形磨耗的影响，本文取 K_v 为 10~35 MN/m，对高速线路轮轨系统的稳定性进行分析。从图 6a 可以看出，当 K_v 取 10、15、20、25、30、35 MN/m 时，得到两个基本相同的不稳定振动频率，分别为 $f=495.20 \text{ Hz}$ 和 $f=495.21 \text{ Hz}$ ，对应的等效阻尼比如图 6a 所示。综合图 6a、b 可以看出，随着刚度的增大，对应等效阻尼比的数值有轻微变化，说明不同的钢轨扣件垂向刚度对轮轨系统摩擦自激振动的影响较小，仅通过改变钢轨扣件刚度不能消除轮轨系统的摩擦自激振动，也不能消除车轮多边形磨耗。

综合分析图 6 可知，随着阻尼的增大，不稳定振动发生的趋势越来越小，当 $C_v=20 \text{ (kN} \cdot \text{s)/m}$ 时，系统没有出现等效阻尼比小于 0 的情况，此时轮轨系统的蠕滑力饱和不会产生车轮多边形磨耗，这说明在一定范围内，增加扣件垂向阻尼可以抑制车轮多边形磨耗。

2.3 重心偏移对车轮多边形磨耗的影响

本文研究在两种重心偏移形式下，轮对发生不稳定振动的情况。在 ABAQUS 中，建立 CRH3 系高铁轮对，然后对轮对实现重力偏心加载。图 7 列出了两种重心偏移加载形式，轴端偏心和轴中偏心，其中图 7a 通过对轴端的耦合点施加不同的垂向力模拟，图 7b 通过增加一侧轴盘，然后对轴盘施加重力场模拟车轮运行过程中的偏心工况。取 $K_v=25 \text{ MN/m}$ 、 $K_L=$

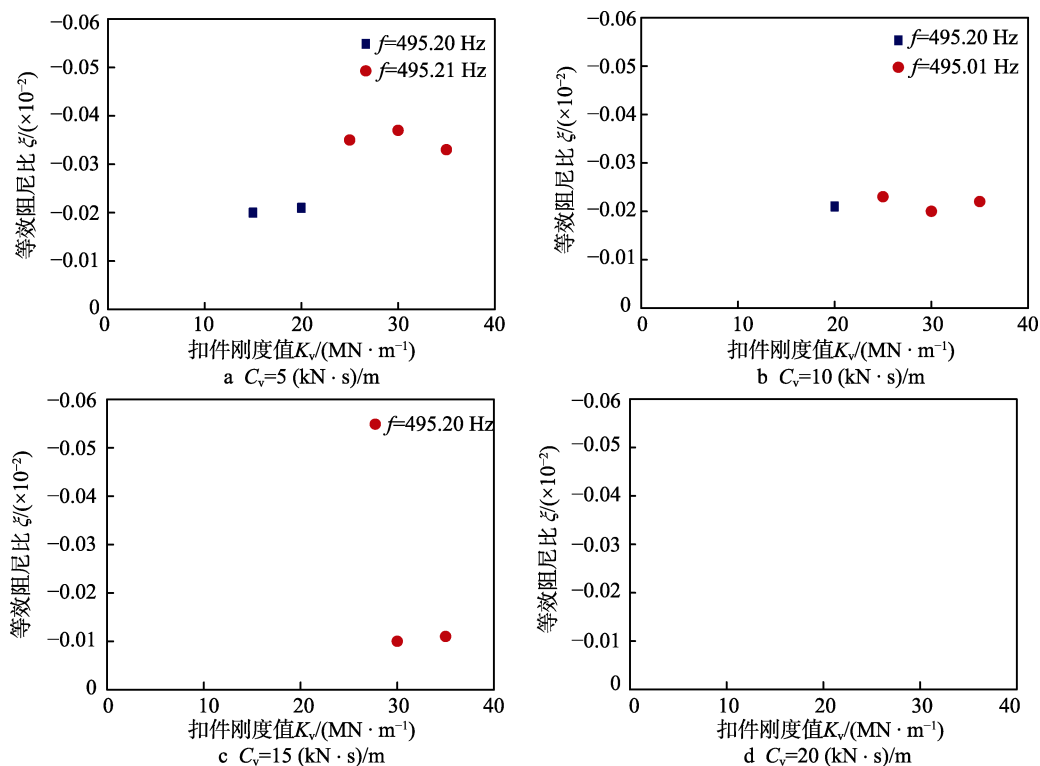


图6 不同扣件垂向刚度和阻尼值对应的等效阻尼比分布情况

Fig.6 Distribution of equivalent damping ratio corresponding to different vertical stiffness and damping value of fastener

10 MN/m、 $C_v=10$ ($\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$)、 $C_L=5$ ($\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$)、 $\mu=0.4$ 时, 两种形式下, 轮轨系统出现不稳定振动频率分别为 $f=356.67$ Hz 和 $f=356.11$ Hz。在不稳定振动的频率下,

不同偏心力对轮轨系统等效阻尼比的影响如图 8 所示, 可以看出, 不同偏心形式对轮轨系统不稳定振动几乎没有影响。

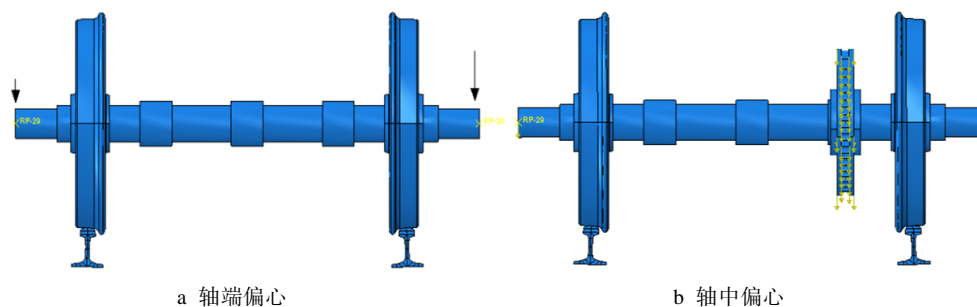


图7 轮对偏心工况示意图

Fig.7 Schematic diagram of wheelset eccentricity

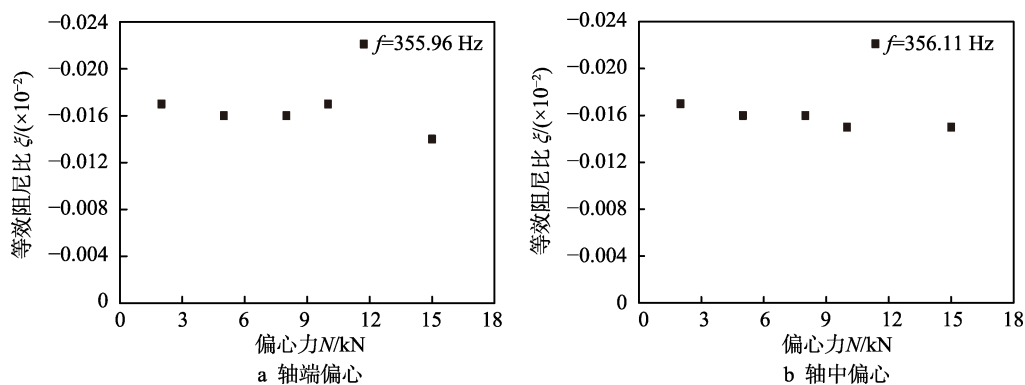


图8 不同偏心力作用下等效阻尼比分布情况

Fig.8 Equivalent damping ratio distribution under different eccentric forces

3 结论

1) 由于高速列车在运行过程中的调速制动, 很容易导致轮轨之间的蠕滑力饱和, 进而引起轮轨系统的摩擦自激振动。研究表明, 摩擦自激振动是导致高速列车车轮多边形磨耗发生的主要原因。

2) 在一定范围内, 增加扣件阻尼可以有效抑制车轮多边形磨耗的产生。仅改变扣件的垂向刚度对轮轨系统摩擦自激振动的影响很小, 无法抑制车轮多边形磨耗。

3) 轮对重心偏移对轮轨系统运动的稳定性影响不大。

参考文献:

- [1] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. *Journal of sound and vibration*, 1999, 227(5): 965-978.
- [2] JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels-assessment of wheel tread irregularities in train traffic[J]. *Journal of sound and vibration*, 2006, 293(3-5): 795-806.
- [3] JOHANSSON A, ANDERSSON C. Out-of-round railway wheels-a study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear[J]. *Vehicle system dynamics*, 2005, 43(8): 539-559.
- [4] MEINDERS T, MEINKE P. Rotor dynamics and irregular wear of elastic wheelsets[M]. Heidelberg: Springer, 2003: 133-152.
- [5] DEKKER H. Vibrational resonances of non-rigid vehicles: polygonization and ripple patterns[J]. *Applied mathematical modelling*, 2009, 33: 1349-1355.
- [6] BROMMUNDT E. A Simple mechanism for the polygonalization of railway wheels by wear[J]. *Mechanics research communication*, 1997, 24(4): 435-442.
- [7] MEINKE P, MEINKE S. Polygonalization of wheel treads caused by static and dynamic imbalances[J]. *Journal of sound and vibration*, 1999, 227(5): 979-986.
- [8] MEYWERK M. Polygonalization of railway wheels[J]. *Archive of applied mechanics*, 1999, 69(2): 105-120.
- [9] JIN X, WU L, FANG J, et al. An investigation into the mechanism of the polygonal wear of metrotrain wheels and its effect on the dynamic behaviour of a wheel/rail system[J]. *Vehicle system dynamics*, 2012, 50(12): 1817-1834.
- [10] 李贵宇. 基于轨道振动的车轮多边形机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LI Gui-yu. Wheel polygonal mechanism based on orbit vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [11] 刘佳. 高速车轮非圆化磨耗发生机理及转向架高频减振设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LIU Jia. Mechanism of non-rounded wear of high-speed wheels and design of high-frequency damping of bogies[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [12] SUN Y Q, SIMSON S. Wagon-track modelling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track[J]. *Wear*, 2008, 265: 1193-1201.
- [13] MA Wei-hua, SONG Rong-rong, LUO Shi-hui. Study on the mechanism of the formation of polygon-shaped wheels on subway vehicles[J]. *Journal of rail and rapid transit*, 2016, 230(1): 129-137.
- [14] 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 G X, QIAN W J, MO J L, 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.
- [15] 崔晓璐, 陈光雄, 杨宏光. 轮对结构和扣件刚度对钢轨波磨的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(1): 112-117.
- CUI X L, CHEN G X, YANG H G. Influence of wheel set structure and fastener stiffness on rail corrugation[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(1): 112-117.
- [16] 陈光雄, 金学松, 郭平波, 等. 车轮多边形磨耗机理的有限元研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(1): 14-18.
- CHEN Guang-xiong, JIN Xue-song, WU Ping-bo, et al. Finite element study on wear mechanism of wheel polygons[J]. *Journal of the China railway society*, 2011, 33(1): 14-18.
- [17] 陈光雄, 崔晓璐, 王科, 等. 高速列车车轮踏面非圆磨耗机理[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(2): 244-250.
- CHEN Guang-xiong, CUI Xiao-yu, WANG Ke, et al. Non-circular wear mechanism of high-speed train wheels[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(2): 244-250.
- [18] YUAN Y. An eigenvalue analysis approach to brake squeal problem[C]//*Proceedings of the 29th ISATA conference*. Florence: Automotive braking systems, 1996: 3-6.