文章编号：1006-1355(2017)04-0085-05+154

地铁钢轨波磨对轨道结构振动及减振特性影响

仲莹涵，关庆华，温泽峰，李 伟，陶功权，张 晴

（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031）

摘 要：现场调查某地铁线路上普通短轨枕、先锋扣件和钢弹簧浮置板三种轨道的钢轨波磨特征，并分别进行振动测试，研究钢轨存在波磨时，三种轨道结构的振动特性及减振效果。结果表明：三种轨道结构都是内轨波磨明显，外轨表面不平顺幅值相比内轨都很小，可以忽略不计其影响；波磨主波长频率成分很容易在轨道各零部件（包括隧道壁）振动中激发出来，并且会引起较大幅值的振动；在4 Hz～200 Hz频率范围内，波磨激励下的减振型轨道依然具有良好的减振性能，但是与其最初设计用于的减振效果相比，有明显的下降；先锋扣件轨道短波长波磨会削减隧道壁在高频段的减振效果；钢弹簧浮置板轨道的波磨幅值显著，虽然对其隧道壁的减振效果影响不明显，但是会造成钢轨振动增加。

关键词：振动与波；地铁轨道结构；波磨；减振效果

中图分类号：U270.1⁺6 **文献标识码：**A **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2017.04.017

Influence of Metro Rail Corrugation on Track System's Vibration and Mitigation Characteristics

ZHONG Ying-han, *GUAN Qing-hua*, *WEN Ze-feng*,
LI Wei, *TAO Gong-quan*, *ZHANG Qing*

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract : Rail corrugation characteristics of 3 types of track structures of the selected metro line including fix-dual short sleepers, Vanguard fasteners and steel spring floating slabs are investigated. The vibration experiments are carried out to analyze the influence of rail corrugation on track system's vibration and mitigation characteristics. The results show that the corrugation on the inner rail is much more obvious and deeper than that on the outer rail. The main frequency mostly depends on the wavelengths of the corrugation. In the range of 4 Hz-200 Hz, the vibration damping track with short-pitch corrugation still have a good vibration damping performance. The vibration mitigating effect at high frequencies is reduced obviously due to the short-pitch corrugation on the rail of the Vanguard fastener track. There's no obvious influence of long-pitch corrugation of steel spring floating slab track on vibration mitigation. But the greater amplitude of the corrugation on the steel spring floating slab track may cause increase of rail vibration.

Key words : vibration and wave; metro track system; rail corrugation; vibration mitigating effect

近年来，由于地铁线路减振降噪要求的提高，我国越来越多地采用了新型减振轨道形式，如减振扣件轨道、梯形轨枕轨道、钢弹簧浮置板轨道等，但随着新型减振扣件轨道的使用，多个城市地铁线路减振轨道结构出现的钢轨波磨现象越来越普遍。文中以先锋扣件和钢弹簧浮置板轨道作为减振轨道代表，研究其在出现波磨时的振动特性及减振效果，并和非减振型轨道即普通短轨枕轨道进行对比，以分析两种轨道结构在已经存在波磨现象时能否达到预期的减振效果。

虽然对于钢轨波磨的研究已经长达一个多世纪，但是由于其萌生和发展是车辆系统和轨道系统相互作用的结果，其中涉及的因素错综复杂，本文不涉及波磨成因的研究，因此不再赘述。

针对城市轨道交通振动和噪声问题，国内外也探索出一系列着眼于轨道结构振源处的控制振动方法，尤其是减振轨道的广泛应用，能够有效减少振动对沿线周围环境的影响。对不同轨道结构的振动特

收稿日期：2016-12-24
基金项目：国家科技支撑计划资助项目(2015BAG12B01-16)；
国家自然科学基金资助项目（51305360）；
中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
（2682016CX126）
作者简介：仲莹涵（1992－），女，南京市人，硕士生，主要研究方向为车辆系统动力学。
通信作者：关庆华（1981－），男，硕士生导师。
E-mail: guan_qh@163.com

性和减振效果，不少学者展开了仿真和试验研究，巫江建立车辆轨道耦合有限元模型，计算地铁四种轨道结构动力特性，并从振动加速度级、三分之一倍频程、传递函数等指标分析几种轨道结构的减振效果，发现梯形轨枕减振效果最好，普通轨道最差[1]。刘鹏辉等对某地铁隧道内五种轨道结构进行振动测试，发现钢弹簧浮置板对隧道壁减振效果最好[2]。这些研究中很少把钢轨波磨对轨道结构振动的影响考虑进去，而现场钢轨波磨出现较普遍，在这种情况下，钢轨的振动一定会受到影响，至于实际影响有多大，就需要根据现场测试数据进行定量分析。

1 钢轨波磨现场测试

1.1 钢轨不平顺

现场调查某地铁线路半径为390 m的普通短轨枕轨道和先锋扣件轨道（两处路段的道床均为混凝土整体道床）以及半径为400 m的钢弹簧浮置板轨道处（钢弹簧浮置板轨道采用普通扣件）的曲线内外侧钢轨波磨情况。发现三种类型轨道的曲线内侧钢轨表面均有明显的波磨，外侧钢轨表面肉眼看不到明显的波磨。上述三种轨道结构所在曲线半径接近，运行同样的地铁列车，因此，下文可以对其钢轨波磨特征和振动特性进行对比分析。图1分别示意普通短轨枕轨道、先锋扣件轨道和钢弹簧浮置板轨道内轨波磨波长和形貌特征。图2和图3分别是三种轨道结构的测点(对应图中横坐标零点)前后1 m以内的波磨不平顺幅值和频谱特征图，从测试结果可以看到，曲线内轨波磨幅值比外轨大很多，现场经常发现小半径曲线上有这种现象，其中的原因很复杂，金学松等从理论上解释了内外轨产生不同初始波磨的原因[3]。李霞结合现场试验分析，认为当内轨轮重较大（过超高）时，容易导致内侧钢轨和轨道板作垂向弯曲振动，伴随翻转振动或横向1阶弯曲振动，会首先导致曲线内轨产生波磨[4]。从图2和图3中还发现先锋扣件轨道内轨不平顺幅值相比其它两种轨道要小，但波长要短，关于不同轨道结构的波磨形成机理文中不做研究，但是这种情况可以与其它两种轨道结构的波磨特征作比较，以分析内轨钢轨的振动大小主要是由波磨幅值还是波长决定的。

试验车辆通过这三种轨道的运行速度是57 km/h～59 km/h，对应到每种轨道上的波磨通过频率见表1。

表1 不同轨道结构钢轨波磨通过频率

轨道类型		波长/ mm	波深/mm	通过频率/ Hz
普通短轨枕	外轨	315，20	0.016	52，792
	内轨	160～200	0.24	80～100
先锋扣件	外轨	20	0.016	792
	内轨	63	0.03	260
钢弹簧浮置板	外轨	315	0.021	52
	内轨	200	0.23	80

2 轨道振动测试与分析

为了分析上述已有波磨下三种轨道结构的振动特性，进行实际列车运行试验，测试轨道结构在列车运行激励下的动力响应。

测试采用坚固型动态数据采集分析系统和压电式加速度传感器，轨道的振动测量位置参照图1所示，主要测试量有：

（1）轨枕上方轨头垂向和横向加速度；

（2）相邻两轨枕中间处（跨中）轨头垂向和横向加速度；

（3）扣件或弹条垂向和横向加速度；

（4）轨枕垂向加速度；

（5）道床垂向加速度；

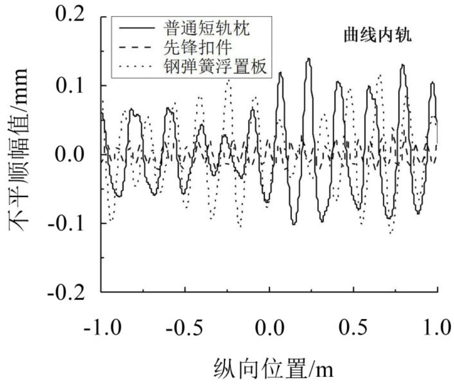
（6）隧道壁垂向和横向加速度，测点选在距离钢轨轨面1.2 m处（见图4）。

测试列车为地铁B型车，4动2拖，测试工况为空载，通过曲线速度约为59 km/h。下面就测试结果对波磨激励下轨道结构振动特性进行分析。

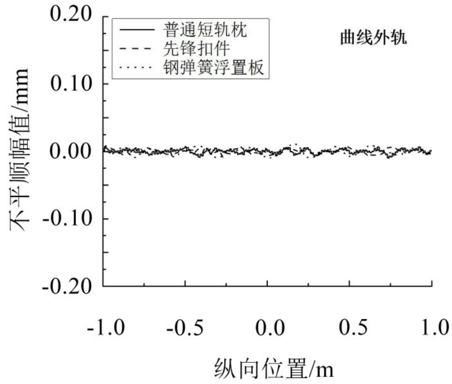
分别采集三种轨道结构在地铁列车正常运营条件下钢轨、扣件、道床（板）以及隧道壁的振动时程响

(a) 普通短轨枕轨道 (b) 先锋扣件轨道 (c) 钢弹簧浮置板轨道

图1 三种轨道结构内轨波磨

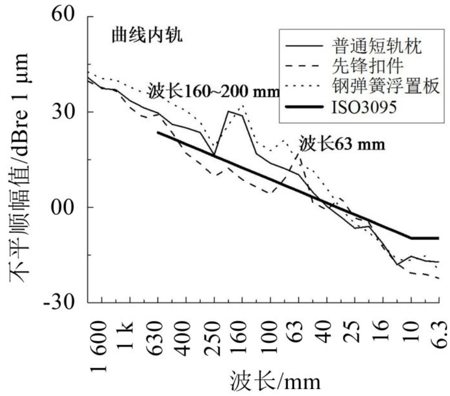


(a) 曲线内轨

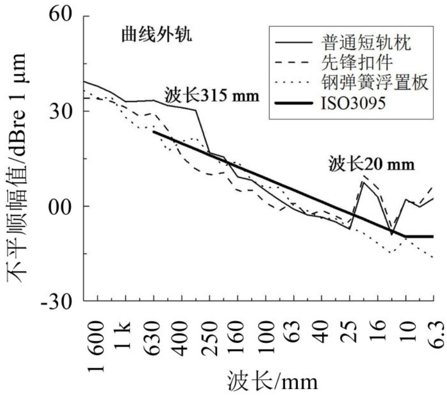


(b) 曲线外轨

图2　曲线内外轨不平顺幅值



(a) 曲线内轨



(b) 曲线外轨

图3　曲线内外轨波磨不平顺等级

图4　隧道壁(内轨侧)传感器布点

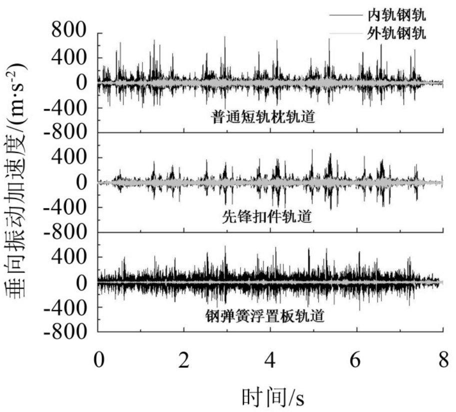


图5　三种轨道结构内外钢轨振动时域图

应信号，并进一步分析其相应的1/3倍频程频谱结果。

图5给出三种轨道结构钢轨的振动加速度时域图，可以明显看到内轨侧钢轨的振动加速度峰值都高于外轨；其中先锋扣件轨道内外侧钢轨振动幅值差异最小，对应波磨测试结果，该轨道内外轨表面波磨幅值相差亦最小。

从图6中普通短轨枕轨道各测点振动加速度有效值可知，内轨弹条的振动有效值最大，内轨侧钢轨的振动次之，这是因为由波磨引起的特定频率使轮轨系统发生振动，从而激发了弹条的共振。

图7为普通短轨枕轨道结构内外侧钢轨、道床及隧道壁振动加速度1/3倍频曲线，各测点的垂向振动加速度分频振级都在80 Hz～100 Hz频率段存在峰值，该频率段正好和该测试断面内轨波磨不平顺的通过频率对应，说明波磨的主波长成分在整个轨道系统的振动中发挥了重要作用，即主波长波磨的激励很容易在轨道结构的振动中体现出来，下面两种轨道结构振动特性分析也能得出以上结论。

由图8可知，先锋扣件轨道结构振动特性规律与普通短轨枕轨道不同，从钢轨经扣件减振后传递到轨下结构的能量大大减少；从图9可知，内外轨、道床和隧道壁四个测点的垂向振动加速度分频振级均在260 Hz存在峰值，这个频率和该测试断面内轨

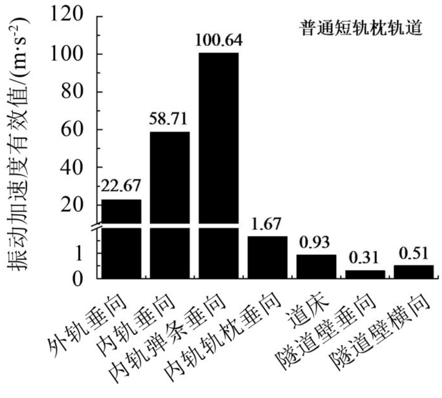


图6 普通短轨枕轨道各测点加速度有效值

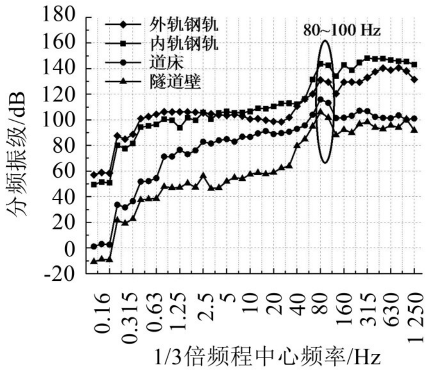


图7 普通短轨枕轨道垂向振动分频振级

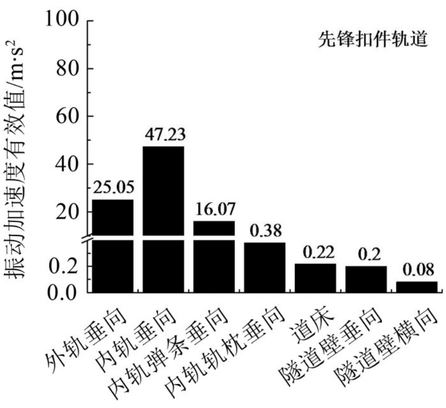


图8 先锋扣件轨道各测点加速度有效值

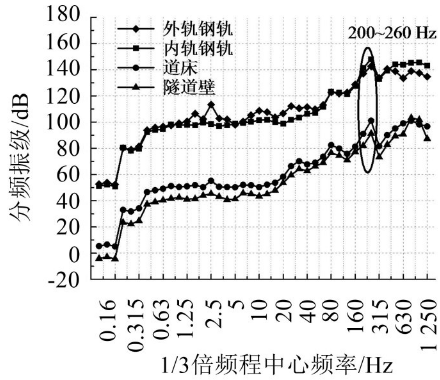


图9 先锋扣件轨道垂向振动分频振级

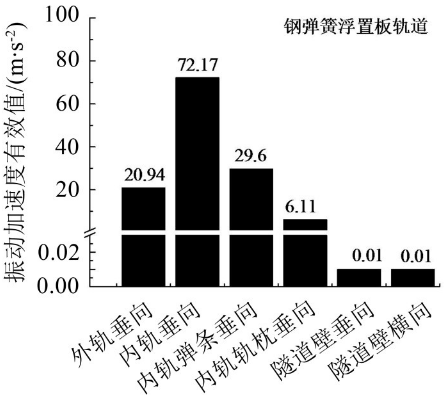


图10 钢弹簧浮置板轨道各测点加速度有效值

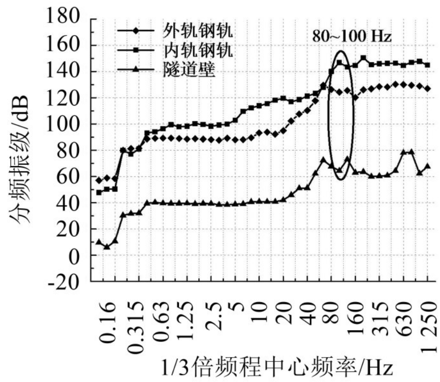


图11 钢弹簧浮置板轨道垂向振动分频振级

波磨不平顺通过频率对应。

如图10和图11所示，钢弹簧浮置板轨道结构振动特性与先锋扣件轨道相比，内轨轨枕及以上结构的振动有效值要高，这是由于钢弹簧浮置板轨道的波磨不平顺幅值更大和扣件刚度更大所致。

比较表2中三种轨道结构振动水平还能发现：

（1）钢弹簧浮置板轨道的隧道壁振动明显小于其他两种轨道，这是由于钢弹簧浮置板轨道作为减振轨道，浮置板质量大，吸收了大量能量，从而大大减小隧道壁的振动。

（2）钢轨以下结构的振动基本是逐层递减的，但是波磨主波长对应的通过频率会传递到轨道的所有结构中，包括隧道壁，所以相比于没有波磨的情况，减振效果会有一定影响，至于存在波磨时的减振效果有多大影响将在下节中详细分析。

表2 不同轨道结构垂向振动加速度级/ dB

位置	普通短轨枕	先锋扣件	钢弹簧浮置板
外轨	127.11	127.97	126.42
内轨	135.37	133.48	137.17
道床	99.36	87.03	—
隧道壁	89.75	86.08	62.99

3 波磨激励下轨道结构减振性能分析

3.1 减振效果评价标准及数据处理方法

我国目前对轨道交通减振措施的减振效果的评

价尚没有制定统一的标准规范，可依据JGJ/T170-2009评价城市轨道交通引起建筑物振动的标准进行评价[5]，文中根据上述轨道结构振动特性的分析，发现由波磨引起的中高频率成分都能传递到隧道壁上，因此建议采用轨旁隧道壁铅垂向加速度作为评价指标[6]，并采用ISO2631/1-1997标准规定的1/3倍频程中心频率Z计权因子进行数据处理[7]，轨道减振效果系统评价的频率范围为4 Hz～200 Hz。

除此之外，还用铅垂向振动加速度级分别计算先锋扣件轨道和钢弹簧浮置板轨道相对于普通短轨枕轨道的对比损失，得到这两种轨道在该地段取得的减振效果。加速度有效值计算时长为列车通过测点时段。

3.2 测试结果及分析

不同轨道结构隧道壁4 Hz～200 Hz计权铅垂向加速度级修正后所得各中心频率振动加速度级见图12，隧道壁振动加速度级未计权对比损失如图13所示，分频最大振级见表3。需要注意的是，表3中先锋扣件轨道隧道壁分频最大振级与表2中的加速度振级相差很大，这是因为表2中加速度振级是由列车通过8 s内的加速度有效值计算得到，这个过程包含了所有频率成分的振动，说明高频段振动对先锋扣件轨道隧道壁影响较大。

表3 隧道壁处分频最大振级（4 Hz～200 Hz）

轨道类型	VL_{max}/dB
普通短轨枕	89.01
先锋扣件	59.71
钢弹簧浮置板	58.46

由表3、图12和图13看出：

（1）如图12所示，先锋扣件和钢弹簧浮置板轨道隧道壁的振动在4 Hz～200 Hz频率范围内都小于普通短轨枕轨道。普通短轨枕分频最大振级VL_{max}为89.01 dB，先锋扣件VL_{max}为59.71 dB，钢弹簧浮置板VL_{max}为58.46 dB。

（2）图13中，与普通短轨枕轨道相比，先锋扣件和钢弹簧浮置板轨道在高于1 Hz时减振效果明显，但由于先锋扣件轨道短波长波磨的存在，使得其在160 Hz以上频率段的减振效果不如钢弹簧浮置板轨道，但是振动波在轨道沿线传播时振动频率高的分量会在岩土介质中很快衰减[8]，而人体全身垂向振动最敏感的振动频率是4 Hz～10 Hz，JGJ/T170-009标准适用的城市轨道交通列车运行引起沿线建筑物振动的频率范围为4 Hz～200 Hz，因此如果不考虑200 Hz以上频率，则不论是从计权或未计权振动加速度级的减振效果看，两种减振型轨道在钢轨表面存在波磨的前提下也有良好的减振性能。

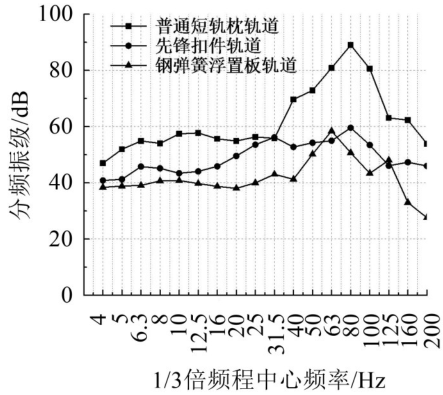


图12 隧道壁振动加速度1/3倍频程频谱图

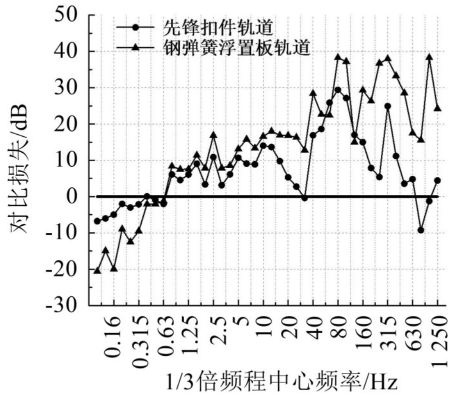


图13 隧道壁振动对比损失1/3倍频程频谱图

（3）虽然两种减振型轨道存在波磨时也有良好的减振性能，而依据《地铁噪声与振动控制规范》（DB11/T 838-2011）标准规定，没有波磨时钢弹簧浮置板轨道设计用于特殊减振，减振效果应该要明显好于先锋扣件轨道（设计用于高级减振），但是从图12和图13明显可以看到先锋扣件轨道和钢弹簧浮置板轨道的分频振级和对比损失值相差都不大，这是因为：

1）文中钢弹簧浮置板轨道的波磨幅值明显大于先锋扣件轨道；

2）钢弹簧浮置板轨道的波磨主波长激振频率在200 Hz以内，先锋扣件轨道波磨主波长激振频率在200 Hz以上，而文中选用减振效果评价标准频率范围就是4 Hz～200 Hz，即不管是波磨的波深还是波长都对减振轨道的减振效果产生了一定影响。

4 结 语

（1）三种轨道结构内轨波磨明显；普通短轨枕轨道内轨波磨主波长为160 mm～200 mm，波深最大值为0.24 mm，对应通过频率为80 Hz～100 Hz；先锋扣件轨道内轨波磨主波长是63 mm，波深最大为0.03 mm，通过频率260 Hz；钢弹簧浮置板轨道内

（下转第154页）