

高速铁路扣件动刚度频变和温变特性研究*

陈宗平¹, 成 功¹, 刘清源¹, 圣小珍², 徐忠辉², 高晓刚²

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都, 610031)

(2. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海, 201620)

摘要 以我国高速无砟轨道常用的 3 种扣件(WJ-7B, WJ-8 和 Vossloh 300)为研究对象, 基于轮轨宽频激励的特点, 提出了一个确定扣件系统动刚度的试验方法和理论模型。根据该试验方法, 采用力锤激励, 在装配情况下测试了 3 种扣件在 100~800 Hz 频率范围内、不同温度(-50~10℃)条件下的动态响应, 结合理论模型确定了 3 种扣件的动刚度。研究结果表明: WJ-8 和 Vossloh 300 扣件的动刚度对温度的变化比较敏感, WJ-8 扣件在 -50℃ 时的动刚度比 10℃ 时最大增加了 23 倍, 而 Vossloh 300 扣件在 -50℃ 时的动刚度比 10℃ 时最高增加了 67 倍; WJ-7B 扣件的动刚度则受频率的影响更大, 800 Hz 时的动刚度是 100 Hz 时的 12~17 倍; WJ-8 和 Vossloh 300 扣件的阻尼比均随着温度降低而增大, 在玻璃化转变温度时达到极值, 此后随着温度继续降低而开始下降。该结果可为极端低温环境下的扣件设计和选择提供参考。

关键词 高速铁路; 无砟轨道扣件; 动刚度特性; 温变特性

中图分类号 U211.3

引 言

扣件是轨道结构的重要组成部分, 扣件系统的轨下弹性垫板是高速轨道结构中最主要的弹性支撑元件^[1]。轨下弹性垫板在工作时要承受频率范围很大的动荷载作用, 同时可能还要经历季节交替带来的温差影响。轨下弹性垫板是高分子黏弹性材料, 其动力学参数受温度和频率的影响很大^[2-3]。因此, 研究扣件动刚度的频变、温变特性具有重要意义。文献[4]以低频(3~5 Hz)激振器直接激振扣件系统的弹性垫板, 得到其低频动刚度, 把该动刚度当作扣件的动刚度来使用。上述单自由度方法不能有效分离钢轨和扣件的动刚度成份, 且随着频率升高, 动刚度中钢轨的成分越来越大。文献[5]研究表明, 扣件的弹性垫板在高频时的动刚度远大于其静刚度, 以及在很低频率激振下得到的动刚度。因此, 以测得的垫板的低频动刚度去代替扣件的高频动刚度是不准确的。综上所述, 应用单自由度模型及试验方法去模拟扣件的动态特性并不能取得很好的效果。

目前, 应用理论模型结合试验的方法获得扣件系统的动刚度。文献[2-3, 6]利用配备温度箱的万能

试验机测试了高速铁路无砟轨道扣件弹性垫板(WJ-8, Vossloh 300 和 WJ-7B)在定频(0.3 Hz)、宽温域(-60~20℃)下的动态特性, 利用温频等效原理、分数阶 Zener 模型及 WLF 方程预测了弹性垫板在 1~10 000 Hz 内的动力性能, 得出在低温条件下无砟轨道扣件橡胶垫板的静刚度、动刚度及阻尼均有明显增加的结论。文献[7-9]使用配备温度箱的万能试验机测量了上述 3 种无砟轨道扣件弹性垫板在 -60~20℃ 下的静刚度。文献[10]给出了用直接和间接方法测量弹性元件动刚度的理论和方法, 其中: 直接法适用于低频(≤ 30 Hz)的动刚度测量, 间接法适用于中高频。Nadeau 等^[11]利用直接法, 分别采用激振器和锤击试验测量了发动机橡胶支架的动态特性, 得出在 0~30 Hz 范围内动态驱动点刚度可以表示动态传递刚度。Thompson 等^[12]在间接法的基础上, 对动刚度的测量方法进行扩展, 使其适用于更高频率范围, 并测量了轨道扣件在不同预压力(20~80 kN)下的高频(100~1 000 Hz)动力性能。Maes 等^[13]利用间接法, 在不同预压力(375~1 000 N)下测量了弹性垫板在 20~2 500 Hz 内的动刚度。

笔者基于钢轨-扣件-轨枕系统, 提出了一种装

* 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项资助项目(2016YFE0205200); 国家自然科学基金委员会-中国国家铁路集团有限公司高速铁路基础研究联合基金资助项目(U1834201)

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-05-09

配条件下扣件动刚度的模型及计算方法,通过试验方法获得模型中所需的相关参数。由于待测扣件的自由度数目未知,该模型将扣件视为一个弹簧阻尼组合系统,通过测试扣件两端的导纳,代入模型中计算求得该扣件的动刚度。该模型的优点在于,在实际的装配条件下,能够有效地从钢轨-扣件-轨枕系统中分离出扣件的动刚度成分,通过理论与试验结合的方法求得扣件整体动刚度,不再将扣件视为简单的线性系统,理论上得到的动刚度的频率范围仅受限于锤击试验能激起的带宽。以外,还考虑了低温对扣件动刚度的影响,旨在为极端低温地区的扣

件选择提供参考。

1 试验及扣件系统动刚度的确定

1.1 试验对象和方法

本次试验对象为广泛用于中国高速铁路线路的 WJ-7B 型、WJ-8 型和 Vossloh 300 型 3 种扣件。WJ-7B 为无挡肩弹性分开式扣件, WJ-8 和 Vossloh 300 为有挡肩弹性不分开式扣件。3 种扣件分别对应安装在无挡肩和有挡肩的单个双块式轨枕上。图 1 为 3 种扣件的示意图^[14]。

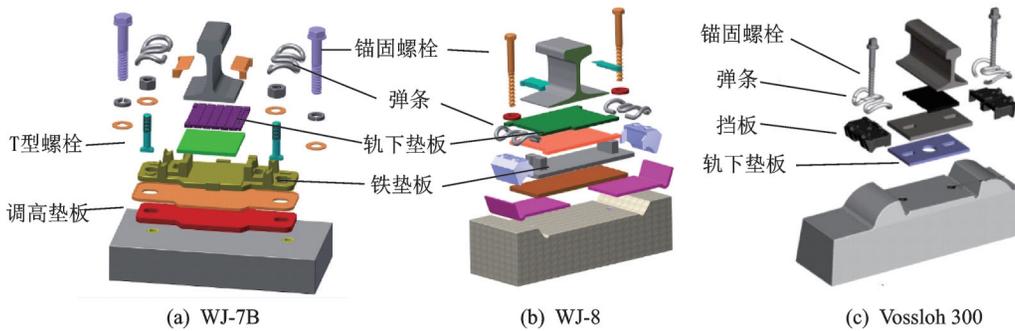


图 1 WJ-7B, WJ-8 及 Vossloh 300 扣件示意图^[14]

Fig.1 WJ-7B, WJ-8 and Vossloh 300 fasteners^[14]

由于钢轨在自由状态下的模态频率随着长度的增加而减小,为了保证在分析频段内钢轨不发生模态变形,此次钢轨选用长为 40 cm 的短钢轨。采用线路安装的标准扭矩(140~160 N·m)把钢轨扣紧在轨枕上。因为不能直接在扣件的轨下弹性垫板上安装传感器,所以在轨顶中央与轨枕上分别安装 2 个加速度传感器以得到扣件两端的加速度导纳,同时在轨顶边缘安装 1 个加速度传感器用来判断钢轨发生模态变形时的频率及振型。当钢轨可视为刚体时,钢轨顶部中间的加速度导纳可视为等于轨脚的加速度导纳。

力锤若选用金属锤头,虽然可得到更高频段的响应,但实际上分析的最高频率还受到钢轨的第 1 阶弹性模态频率的限制。通过分析得到,该短钢轨的第 1 阶弹性模态频率大约为 850 Hz,而塑料锤头在满足激发该频段要求的情况下,在低频段的效果会优于金属锤头,所以本次锤击试验选用塑料锤头。图 2 为 WJ-7B 扣件安装图。整体置于平整的混凝土地面上,即可进行常温下的锤击试验,锤击轨顶中间位置得到轨顶与轨枕上的加速度频响函数。

在考虑低温对扣件动刚度的影响时,采用液氮给扣件与轨枕快速降温。图 3 为扣件试验测点布置



图 2 WJ-7B 扣件安装图

Fig.2 Installed WJ-7B fastener

示意图。整个扣件轨枕系统由 1 个泡沫箱子包围,以盛放液氮。将接触式温度传感器放在铁垫板与弹性垫板之间,以测量弹性垫板的温度。弹性垫板为黏弹性材料,具有更显著的温度敏感性^[3]。用液氮喷淋扣件,待温度传感器的示数降至 -50°C 后,继续喷淋液氮 3 min 以确保扣件整体达到了 -50°C 以下。停止喷淋液氮后,待温度传感器示数重新上升至 -50°C 时,开始锤击试验直至温度升至常温。

试验得到轨顶中心的加速度频响函数及轨枕上方的加速度频响函数。位移导纳与加速度频响函数之间的关系为

$$\tilde{W}(\omega)/\tilde{F}(\omega) = \frac{\tilde{a}(\omega)/\tilde{F}(\omega)}{-\omega^2} \quad (1)$$

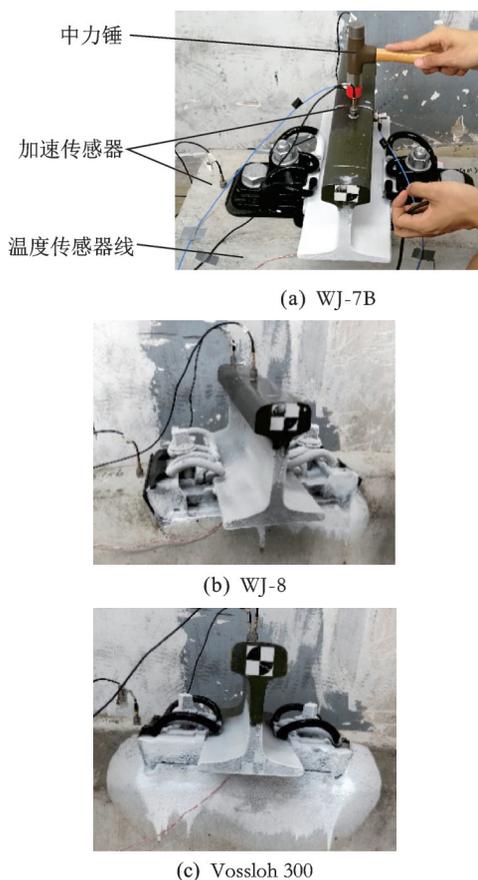


图 3 扣件试验测点布置示意图
Fig.3 Test point arrangement of fasteners

其中： $\tilde{W}(\omega)/\tilde{F}(\omega)$ 为位移导纳； $\tilde{a}(\omega)/\tilde{F}(\omega)$ 为加速度频响函数。

根据式(1)得到轨顶和轨枕的位移导纳,据此可以得到不同频率下各扣件系统的动刚度。

1.2 扣件系统动刚度的确定

图 4 为一个简化的钢轨-扣件-轨枕力学模型。钢轨和轨枕被认为是刚体,考虑到扣件质量相对于

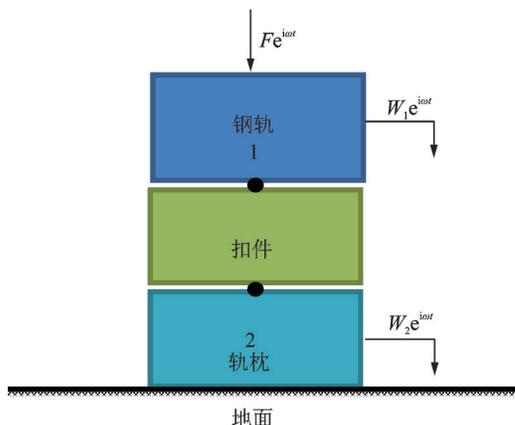


图 4 钢轨-扣件-轨枕力学模型

Fig.4 Rail-fastener-sleeper mechanical model

钢轨和轨枕较小,扣件系统被认为是一个弹簧组合系统,上下受力相等。钢轨及扣件受力模型如图 5 所示。扣件的动刚度 k 定义为

$$k(\omega) = \frac{\tilde{F}_1(\omega)}{\tilde{W}_1(\omega) - \tilde{W}_2(\omega)} \quad (2)$$

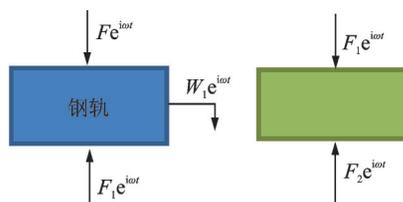


图 5 钢轨及扣件受力模型
Fig.5 The forces on rail and fastener

对钢轨进行受力分析

$$\tilde{F}(\omega) - \tilde{F}_1(\omega) = -m_1 \omega^2 \tilde{W}_1(\omega) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到

$$k(\omega) = \frac{\tilde{F}(\omega) + m_1 \omega^2 \tilde{W}_1(\omega)}{\tilde{W}_1(\omega) - \tilde{W}_2(\omega)} = \frac{1 + m_1 \omega^2 \frac{\tilde{W}_1(\omega)}{\tilde{F}(\omega)}}{\frac{\tilde{W}_1(\omega)}{\tilde{F}(\omega)} - \frac{\tilde{W}_2(\omega)}{\tilde{F}(\omega)}} \quad (4)$$

其中： \tilde{W}_1 为钢轨的位移幅值； \tilde{W}_2 为轨枕的位移幅值； \tilde{F}_1 为钢轨与扣件间的作用力幅值； \tilde{F}_2 为轨枕与扣件间的作用力幅值； \tilde{F} 为锤击力幅值； m_1 为钢轨的质量； $\tilde{W}_1(\omega)/\tilde{F}(\omega)$ 和 $\tilde{W}_2(\omega)/\tilde{F}(\omega)$ 为钢轨和轨枕的位移导纳,可通过锤击试验得到,由此得到装配条件下扣件系统的动刚度。

2 扣件动刚度结果和特性分析

以 WJ-8 在 -50°C 下的测试结果为例,图 6 为轨顶中间及轨枕的加速度信号与锤击的力信号之间的相干性。可以看出,2 个传感器的信号与力信号的相干性在 $100\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频段基本都在 0.9 以上,这证明在该频段内加速度计采集到的信号是由锤击所激发,测试数据具有较高的可信度。

锤击试验中,在一定频率之上不可避免地激发出钢轨的柔性模态,这会与式(4)中刚性钢轨的假设

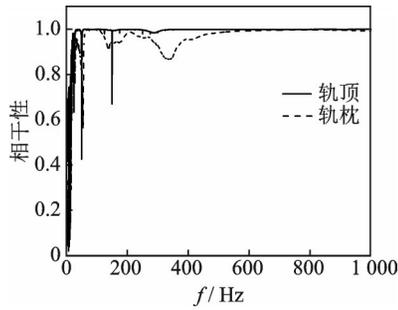


图6 轨顶中间及轨枕的加速度信号与锤击力信号之间的相干性

Fig.6 Coherence between hammering signal and rail top response and sleeper response

出现矛盾。因此,有必要确定柔性模式的激发频率,即式(4)的适用范围。

在 ANSYS 中建立和试验中短钢轨对应的钢轨三维实体有限元模型。由于真实的锤击难以敲击轨正中央,将一垂向的单位谐荷载作用在轨顶中央附近(横向偏移 5 mm)以模拟实际的锤击位置(实际偏差比这个值小)。分别考虑不约束、轨底和扣件接触区域全约束 2 种情况,得到轨脚完全约束及完全自由情况下钢轨位移频谱,如图 7 所示。可以看出,自由及轨底约束时的前 2 阶模态频率分别为 1 302 Hz, 2 045 Hz 及 366 Hz, 1 946 Hz。短钢轨前 2 阶振型如图 8 所示,分别为轨头摆动及钢轨弯曲。从图 7 可以看出,轨底约束时的首阶弹性模态频率比自由钢轨的首阶弹性模态频率要低得多,而第 2 阶弹性模态频率差别不大。实际装配情况下的钢轨轨底约束介于自由和全约束之间,故试验结果中的第 1 阶模态频率介于 366 Hz 和 1 302 Hz 之间,第 2 阶模态频率在 1 900 Hz 以上。只要通过力锤施加的垂向力足够靠近轨顶的中心,第 1 阶模态是不会激发的。

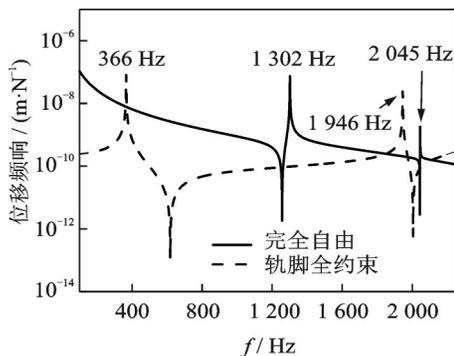
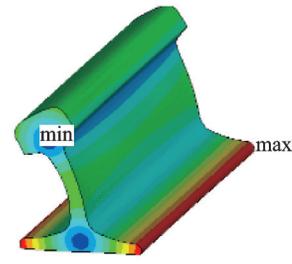
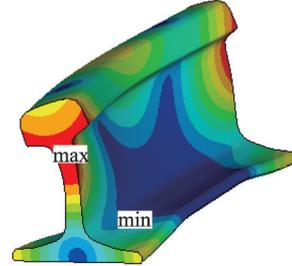


图7 轨脚完全约束及完全自由情况下钢轨位移频谱
Fig.7 Rail displacement spectrum under fully constrained and completely free rail feet



(a) 第1阶
(a) The first order



(b) 第2阶
(b) The second order

图8 短钢轨前 2 阶振型

Fig.8 First two-order mode shapes of short rails

以 WJ-8 扣件为例,由锤击试验得到不同温度下的钢轨垂向加速度导纳虚部,如图 9 所示。图中,虚部的峰值对应钢轨扣件系统的模态频率。

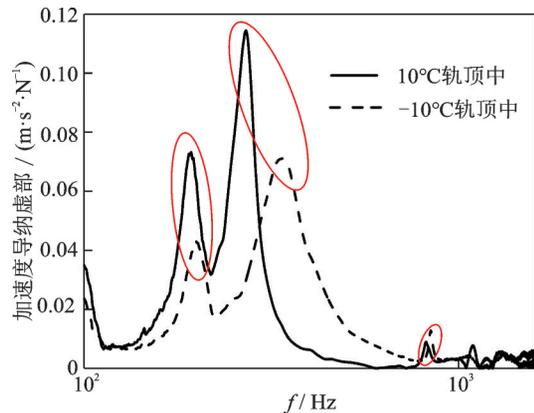


图9 WJ-8 扣件钢轨加速度导纳虚部

Fig.9 Imaginary part of WJ-8 fastener acceleration mobility

由图 9 可以看出,在 100~1 600 Hz 范围内,锤击明显激发了系统的 3 阶模态(图中已被圈出),10°C 对应的 3 阶模态频率分别为 193, 270 和 850 Hz, -30°C 对应的 3 阶模态频率分别为 205, 472 和 874 Hz。由于温度降低对钢轨本身弹性模量的影响较小^[15],温度的改变对钢轨约束条件的改变也不会很大,2 个温度下的钢轨柔性模态不会出现很大的变化,因此判断图中的第 3 阶模态频率为钢轨的柔性模态。可以看出,这个峰远低于其他 2 个峰(只要扣件系统安装得越对称、锤击力越是靠近轨顶的中

部,这个峰值将越小)。因此,笔者认为该次试验得到的动刚度上限频率至少为800 Hz。图9中的第1阶和第2阶模态为钢轨(质量)-扣件(刚度)-轨枕(质量)-大地(刚度)系统(近似为两自由度系统)的垂向振动固有模态。

不同温度下,WJ-8,Vossloh 300和WJ-7B扣件的动刚度频变曲线如图10~12所示。笔者以20°C为一个温度梯度进行分析。

从图10可以看出,温度对于WJ-8扣件的动刚度影响非常明显,整体上扣件的动刚度是随着温度的降低而增大。在10°C下的动刚度波动较大,在100~550 Hz内随着频率的增加而减少,而在550 Hz以后则随着频率增加而增大,具有明显的质量-弹簧系统的特性。温度很低时,由于固有频率和阻尼的增加,出现在10°C下动刚度的低谷逐渐变得平坦,且频率上升至800 Hz以上。温度由-10°C降到-30°C时,动刚度的增加尤为明显,这是由于扣件弹性垫板的主要材料为聚氨酯,在这个温度区间内聚氨酯进入了玻璃化转变过程^[16],故刚度明显增大。WJ-8扣件在-50°C时的动刚度比10°C时最多增加了23倍。

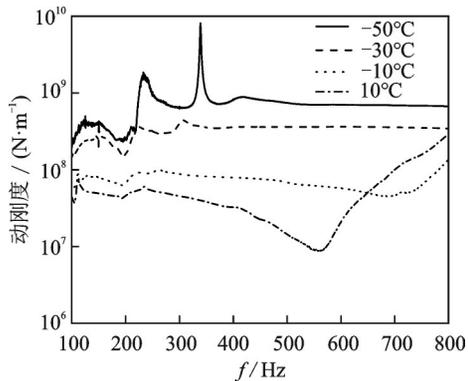


图10 不同温度下WJ-8扣件动刚度频变曲线

Fig.10 Frequency curve of dynamic stiffness of WJ-8 fasteners at different temperatures

由图11可以看出,Vossloh 300与WJ-8扣件的动刚度具有很高的相似性,这是由于2种扣件的结构相似,都为有挡肩不分开式且铁垫板下橡胶垫板的材料为聚氨酯^[16]。由于聚氨酯材料对温度敏感,故Vossloh 300扣件同样表现出了较大的温度敏感性。Vossloh 300扣件在-50°C下0~400 Hz段动刚度出现了波动,其在-50°C时的动刚度比10°C时最高增加了67倍。

由图12可知,温度对于WJ-7B扣件的动刚度影响比其他2种扣件要小得多,而频率对WJ-7B扣件

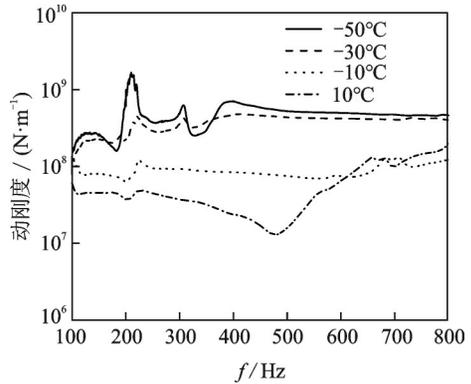


图11 不同温度下Vossloh 300动刚度频变曲线

Fig.11 Frequency curve of dynamic stiffness of Vossloh 300 fasteners at different temperatures

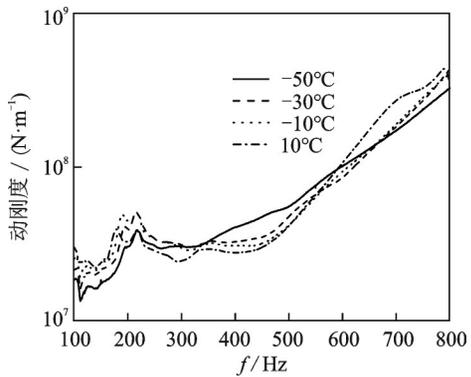


图12 不同温度下WJ-7B动刚度频变曲线

Fig.12 Frequency curve of dynamic stiffness of WJ-7B fasteners at different temperatures

动刚度的影响却很大。在800 Hz时,-50°C时的动刚度相较于10°C时增加了近2倍,这说明极端低温对WJ-7B扣件的动刚度有一定的影响。同时,800 Hz时的动刚度是50 Hz时的12~17倍,这说明WJ-7B扣件的频率对动刚度的影响远大于温度对动刚度的影响。

3 扣件阻尼结果和特性分析

本次试验使用的Brüel & Kjær系统能够利用半功率带宽法识别频响函数中峰值对应的阻尼比。由图9可知,受温度影响最大的是第2阶频率。由于扣件系统中只有弹性轨下垫板受温度影响最大,可推测该频率近似于钢轨与弹性轨下垫板所组成的质量-弹簧系统的固有频率,该峰值对应的阻尼比为轨下弹性垫板的阻尼比,故据此得到WJ-8及Vossloh 300扣件阻尼比随温度变化曲线,如图13所示。由图13可以看出,WJ-8扣件的玻璃化温度在-20°C左右,在10°C时的阻尼比约为0.084 5,其

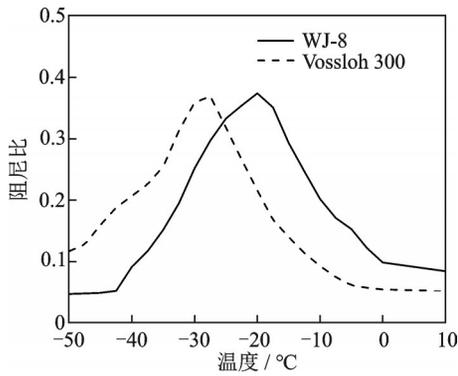


图 13 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件阻尼比随温度变化曲线
Fig.13 WJ-8 and Vossloh 300 fastener damping ratio temperature curve

阻尼比在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 内是随温度的降低而增加,最高达 0.374,之后则随着温度的降低而下降。在 -50°C 时的阻尼系数约为 0.047 4,相较于峰值时减少了约 87.33%。同样,在 Vossloh 300 扣件的频响函数中选择随温度变化最大的第 2 阶频率,识别其阻尼比。由图 13 可知, Vossloh 300 扣件弹性垫板的玻璃化温度在 -27.5°C 左右。 10°C 下的阻尼比为 0.052,在 -27.5°C 时增加了约 7.08 倍,此后随着温度的降低而下降,直至 -50°C 时降至 0.117。

WJ-7B 扣件系统峰值较少,在 105 Hz 及 800 Hz 两阶有较为明显的模态。由于 800 Hz 处的模态为钢轨的第 1 阶柔性模态,但不能判断 105 Hz 处的频率是由钢轨-扣件系统振动引起的,故笔者不对 WJ-7B 扣件的阻尼比做讨论。

4 高速铁路扣件动刚度及阻尼拟合

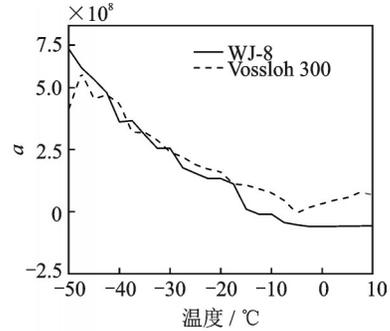
对 3 种扣件分别在 -50°C , -30°C , -10°C 及 10°C 下的 100~800 Hz 之间的动刚度进行拟合。对比多种拟合函数发现,三次函数取得较好的拟合效果。拟合函数为

$$k(f) = a + bf + cf^2 + df^3 \quad (5)$$

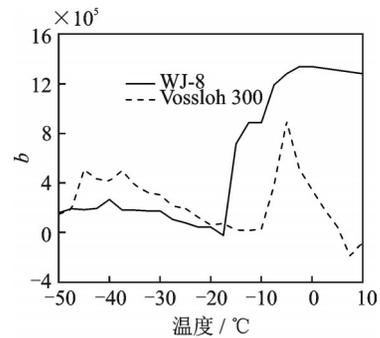
其中: f 为频率; a, b, c 及 d 为拟合参数。

由于 WJ-7B 的动刚度在 $-50\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内变化不大,故只用 1 个函数拟合其所有温度下的动刚度。WJ-8 及 Vossloh 300 扣件的动刚度在 100~350 Hz 出现的动刚度峰值是由于扣件系统在低温下的耦合共振引起的,在理论模型中未考虑扣件中零部件的谐振,且这些模态引起的动刚度起伏较大、难以拟合,故在拟合时忽略了该频段内的峰值,将其拟合成平坦的直线,其值接近于扣件中弹性垫板的动刚度。笔者采用一次函数拟合其动刚度,取参数 c 和 d

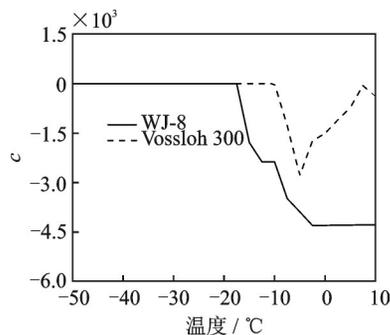
为 0。不同温度下 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件动刚度拟合函数参数如图 14 所示。WJ-7B 扣件拟合参数分别为 $a = -8.58 \times 10^5$, $b = 4.11 \times 10^5$, $c = -1.47 \times$



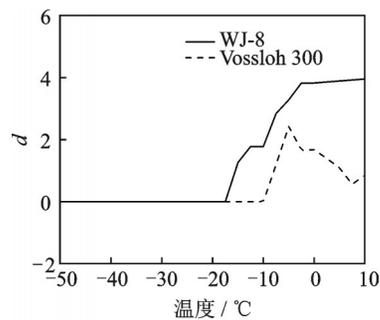
(a) 参数 a
(a) Parameter a



(b) 参数 b
(b) Parameter b



(c) 参数 c
(c) Parameter c



(d) 参数 d
(d) Parameter d

图 14 不同温度下 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件动刚度拟合函数参数

Fig.14 WJ-8 and Vossloh 300 dynamic stiffness fitting function parameters at different temperatures

$10^3, d=1.82$ 。图 15~17 为 -50°C 及 10°C 下 3 种扣件

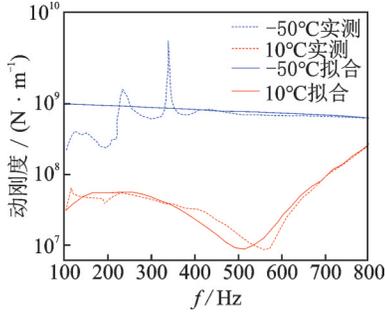


图 15 WJ-8 扣件动刚度拟合效果

Fig.15 WJ-8 dynamic stiffness fitting results

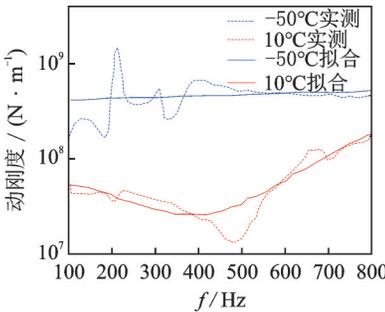


图 16 Vossloh 300 扣件动刚度拟合效果

Fig.16 Vossloh 300 dynamic stiffness fitting results

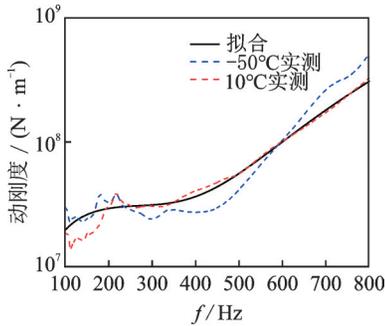


图 17 WJ-7B 扣件动刚度拟合效果

Fig.17 WJ-7B dynamic stiffness fitting results

的动刚度拟合效果。

从图 15~17 可看出,该拟合函数能够较好地描述 3 种扣件在装配情况下 100~800 Hz 之间的动刚度特性。

观察 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件的阻尼比曲线,发现其形状近似于均值不为 0 的正态分布,故用类似于正态分布概率密度函数的指数函数加上一个常数来拟合阻尼比随温度变化的规律。拟合结果为

$$\zeta_{\text{WJ-8}}(T) = 0.05 + 0.33e^{-(T+21)^2/180} \quad (6)$$

$$\zeta_{\text{Vossloh 300}}(T) = 0.052 + 0.32e^{-(T+29)^2/150} \quad (7)$$

其中: T 为温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

图 18 为 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件的阻尼比拟

合效果。可以看出,该拟合函数能够较好地描述这 2 种扣件在 $-50\sim 10^\circ\text{C}$ 内阻尼比的变化趋势。

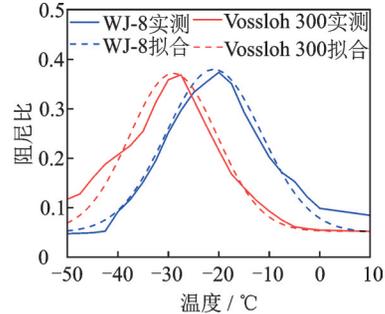


图 18 WJ-8 及 Vossloh 300 扣件的阻尼比拟合效果

Fig.18 Fitting results of WJ-8 and Vossloh 300 damping ratio

需要指出的是,这 3 种扣件的动刚度和阻尼比拟合公式仅适用于在 $-50\sim 10^\circ\text{C}$ 内描述扣件的阻尼特性,以及在 100~800 Hz, $-50\sim 10^\circ\text{C}$ 内扣件的动刚度特性,更低频率的动刚度可考虑在更软的支撑条件下,采用激振器或更大的力锤激励来获得。如果通过测试得到更高频率的扣件动刚度,则需要考虑如何排除钢轨柔性模式的干扰。为此,可通过试验结合仿真的方法得到装配条件下的钢轨柔性模式的贡献,从而推导出更高频率下的扣件动刚度特性;或以现有黏弹性本构模型为基础,通过拟合弹性垫板低频动刚度数据得到黏弹性本构模型相关参数,再对扣件高频动刚度进行预测。

5 结 论

1) 扣件系统的动刚度与弹性垫板的动刚度有较大区别,主要表现在扣件系统包含质量,动刚度曲线会出现峰值及谷值。

2) 温度对于 WJ-8 扣件的动刚度影响较大,其动刚度随着温度的降低而增大,在低于 -30°C 时弹性垫板进入玻璃态,故动刚度增加变缓,而频率对 WJ-8 扣件的动刚度影响较小。由于 Vossloh 300 扣件在结构上与 WJ-8 相似,故有着类似的特性。WJ-7B 扣件则相反,温度对其动刚度影响较小,而频率对其影响较大。

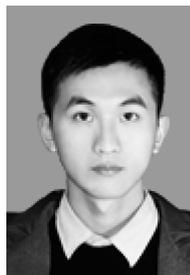
3) WJ-8 及 Vossloh 300 扣件的阻尼比均随着温度降低而增大,并在玻璃化转变温度处达到最大值,此后随着温度的降低而下降。其中:WJ-8 的玻璃化转变温度约为 -20°C ;Vossloh 300 的玻璃化转变温度在 -27.5°C 左右。

4) 采用三次函数及指数函数分别对 3 种扣件的

动刚度及阻尼比进行拟合,取得了较好效果,这为研究扣件在低温、装配情况下的动刚度特性及阻尼比提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 赵汝康. 铁路钢轨扣件[M]. 北京:中国铁道出版社, 2018:200.
- [2] 韦凯, 赵泽明, 欧灵畅, 等. WJ-8型扣件弹性垫板低温动力性能及其影响研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 31-37.
WEI Kai, ZHAO Zeming, OU Lingchang, et al. Research on the dynamic properties of rail pad for WJ-8 fastener at low temperatures and its influence on vehicle-track coupled system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3): 31-37. (in Chinese)
- [3] 韦凯, 王丰, 杨麒陆, 等. 钢轨扣件弹性垫板的宽频动力性能及其理论表征[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 130-136.
WEI Kai, WANG Feng, YANG Qilu, et al. Broad frequency-domain dynamic properties of rail pad and its theoretical model[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 130-136. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国铁路局. TB/T 3395.1—2015 高速铁路扣件 第1部分:通用技术条件[S]. 北京:中国铁道出版社, 2016.
- [5] THOMPSON D J, VAN VLIET W J, VERHEIJ J W. Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998(213):169-188.
- [6] 张攀. 高铁无砟轨道扣件系统弹性垫板温/频变动力特征及其影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [7] 杨麒陆, 王平. WJ-7型高速铁路扣件胶垫刚度温变性的测试与分析[J]. 中国铁路, 2017(8):58-63.
YANG Qilu, WANG Ping. Tests and analysts of rubber pad stiffness of WJ-7 HSR fastening against temperature changes[J]. Chinese Railways, 2017(8): 58-63. (in Chinese)
- [8] 杨麒陆, 王平. Vossloh 300扣件胶垫刚度温变性的测试与分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(8): 5-9.
YANG Qilu, WANG Ping. Testing and analysis of Vossloh 300 fastener pad stiffness and temperature changes[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(8): 5-9. (in Chinese)
- [9] 刘子焯, 葛辉, 王平, 等. 极寒状态下扣件胶垫刚度温变特性及影响研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 37-42.
LIU Zixuan, GE Hui, WANG Ping, et al. Study on temperature variant characteristics and effects of rail pad stiffness under extremely cold conditions [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 37-42. (in Chinese)
- [10] British Standards Institution. ISO 10846—1 Acoustics and vibration - laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements. part 1. principles and guidelines [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2005.
- [11] NADEAU S, CHAMPOUX Y. Application of the direct complex stiffness method to engine mounts [J]. Experimental Techniques, 2000, 24(3):21-23.
- [12] THOMPSON D J, VERHEIJ J W. The dynamic behaviour of rail fasteners at high frequencies [J]. Applied Acoustics, 1997, 52(1):1-17.
- [13] MAES J, SOL H, GUILLAUME P, et al. Measurements of the dynamic railpad properties [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5):557-565.
- [14] 中铁隆昌铁路器材有限公司-高速铁路扣件[EB/OL]. (2018-08-31)[2019-05-21]. <http://www.lc-railway.com/col/col30227/index.html>.
- [15] 裴家明. 超低温环境下钢的力学性能研究[C]// 第20届全国结构工程学术会议论文集(第I册). 宁波:中国力学学会工程力学编辑部, 2011: 397-400.
- [16] 吴义春, 李春兰, 徐志磊, 等. WJ-8型高铁用聚氨酯弹性垫板的研究[J]. 聚氨酯工业, 2011, 26(6): 31-34.
WU Yichun, LI Chunlan, XU Zhilei, et al. Research on WJ-8 type polyurethane resilient tie pad using in high speed railway track [J]. Polyurethane Industry, 2011, 26(6): 31-34. (in Chinese)



第一作者简介:陈宗平,男,1995年9月生,硕士生。主要研究方向为轨道交通减振降噪。
E-mail: czp0908@126.com

通信作者简介:圣小珍,男,1962年6月生,教授、博士生导师。主要研究方向为轨道交通减振降噪理论和应用。
E-mail: shengxiaozhen@hotmail.com