

基于道床振动加速度的地铁扣件失效判识方法^{*}

肖军华^{1,2}, 单杰^{1,2}, 吴璠杰^{1,2}, 刘孟波^{1,2}, 赵润淇^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海, 201804)

(2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室 上海, 201804)

摘要 针对地铁扣件失效检测判识难度大、效率低的问题,提出了一种基于车致振动响应的地铁扣件失效判识方法。通过建立车-轨-桥动力耦合模型,分析了扣件失效对系统振动响应特征的影响,构建了基于道床垂向振动加速度级的扣件失效判识指标和方法。研究表明:随着扣件数量的增加,钢轨垂向位移最大值逐渐增大,曲线形态由 W 形逐渐趋于近似 V 形;扣件失效对 1/3 倍频程振级的影响排序为道床>桥梁>车体;相较于道床横向振动,其垂向振动更有利于扣件失效的判识,但需要在道床左右两侧同时布置测点;提出的扣件失效判识方法与指标可用于判识不同扣件失效位置与两处扣件失效。

关键词 振动加速度;扣件;损伤诊断;车-轨-桥耦合模型
中图分类号 U216;TH131

0 引言

随着我国地铁建设规模与运营时间的增加,地铁结构的安全运行与维护管理已逐渐成为关注的焦点^[1-2]。扣件松动、断裂等失效问题加剧了车轨相互作用与结构振动响应,严重时甚至可能引发列车脱轨等重大事故,对地铁运营安全服役造成极大隐患。目前,地铁扣件失效的检测判识方法主要以人工巡检为主,检测效率较低,难以应对不断增大的运维需求。扣件失效判识方法包括基于机器视觉的方法和基于系统振动响应的方法。基于机器视觉的方法可直接观察扣件状态,但受光线、遮挡物影响较大^[3-5]。基于系统振动响应的方法物理意义明确,受环境影响相对较小,且可用于判识早期失效状态,具有广阔的应用前景。

明确扣件失效对系统车致振动响应特征的影响是实现扣件失效判识的重要前提,国内外学者已开展了丰富的研究^[6-9]。结果表明,列车速度^[10-11]、轨道线形^[12]及随机不平顺^[13]等因素均会影响扣件失效引起的系统车致振动响应特征。近年来,相关研究主要聚焦扣件非线性特性与失效模式^[14-15]的影响。袁玄成等^[16]建立了可反映弹条初始扣压力和轨下胶垫初始压缩量的车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型,分析了弹条扣压力衰减和失效对轮轨系统垂向动力

学响应的影响。孙旭等^[17]考虑了扣件弹条非线性弹性和弹性垫板动态频变特性,建立了扣件系统动力学模型和车辆-柔性轨道耦合动力学模型,对弹条失效和扣件系统失效两种模式下的车辆运行安全性、平稳性及车辆-轨道相互作用进行分析和评价。Xiao 等^[18]考虑了扣件连续单侧、交替单侧和连续双侧 3 种不同的典型扣件失效分布模式对列车运行稳定性和安全性的影响。目前,扣件失效引起的系统车致动力响应特征的变化规律较为明晰,可为基于车致力响应特征的判识方法奠定理论与数据基础。

另一方面,基于系统振动响应的轨道结构异常状态判识方法已逐渐成为研究的焦点^[19-21]。其中,基于脉冲激励的判识方法以其荷载简单明确、敏感特征易于提取的优势,得到了广泛应用^[22]。侯博文等^[23]开展场地 1:1 实尺模型试验,并基于脉冲激励下的钢轨时域振动特征,建立了扣件失效识别算法。Yuan 等^[24]结合冲击试验与数值模拟,构建了不同扣件损伤情况下的钢轨垂直加速度数值数据集,并基于一维卷积神经网络获得了扣件失效的敏感特征。然而,基于脉冲激励的判识方法存在检测效率相对较低、作业量大等问题。基于车致振动响应的判识方法直接采用运营列车引起的振动,可弥补上述不足^[25],但也存在列车荷载较为复杂、敏感特征提取困难的问题。

^{*} 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关资助项目(21DZ1203602)

收稿日期:2024-06-21;修回日期:2025-01-14

本研究采用有限元与多体动力学软件联合仿真的方法,建立地铁车辆-轨道-桥梁耦合仿真模型,分析了地铁桥梁扣件失效对该系统动力响应的影响,并基于系统振动响应构建了扣件失效判识指标,讨论了该指标在地铁桥梁中的适用性。

1 车-轨-桥耦合模型

本研究建立的地铁车辆-轨道-桥梁耦合仿真模型及其部件组成分别如图 1、2 所示。其中,轨道结构与桥梁结构采用有限元软件进行模拟,地铁车辆采用多体动力学软件 UM 进行模拟。模型包括 3 孔 30 m 跨径简支梁桥,模型长度为 90 m。3 孔简支梁在支座位置约束其位移。两系统根据轮轨接触关系进行耦合,轮轨间接触关系基于竖向 Hertz 理论和横向简化 Kalker 理论,耦合计算采用全过程迭代法。

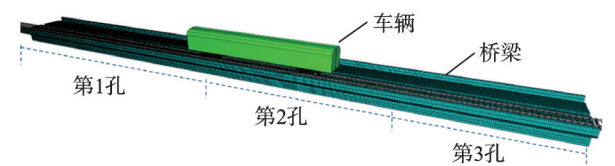


图 1 地铁车辆-轨道-桥梁耦合仿真模型
Fig.1 A vehicle-track-bridge coupling model of metro line

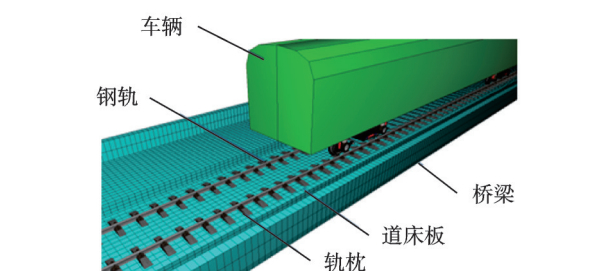


图 2 地铁车辆-轨道-桥梁耦合仿真模型部件组成
Fig.2 Components of the vehicle-track-bridge coupling model

有限元模型包括道床板与桥梁。道床板截面尺寸为 3 m×0.35 m,混凝土强度等级为 C35,弹性模量为 32.5 GPa。桥梁为双线箱梁,梁宽为 8.2 m,混凝土强度等级为 C50,弹性模量为 35.5 GPa。车辆采用地铁 A 型车,将车辆简化成由车体、转向架及轮对等构成的多刚体系统,每个刚体考虑 6 个自由度,刚体间通过弹簧、阻尼并联元件相连。地铁 A 型车参数见表 1。

轨道不平顺采用美国 6 级谱,扣件失效通过取消钢轨与道床间的弹簧、阻尼元件实现。扣件状态设置工况见表 2,均设置为左侧单侧扣件失效模式。失效扣件示意图如图 3 所示。

表 1 地铁 A 型车参数

Tab.1 Parameters of A-type metro vehicle

参数	数值
车体质量/kg	48 800
轮对质量/kg	2 080
构架质量/kg	2 310
车轮滚动圆半径/m	0.42
轴距/m	2.5

表 2 扣件状态设置工况

Tab.2 The calculation details of damage fasteners

工况	失效扣件序号
正常状态	—
1 个扣件失效	25
2 个扣件失效	25,26
3 个扣件失效	24,25,26
4 个扣件失效	24,25,26,27
5 个扣件失效	23,24,25,26,27

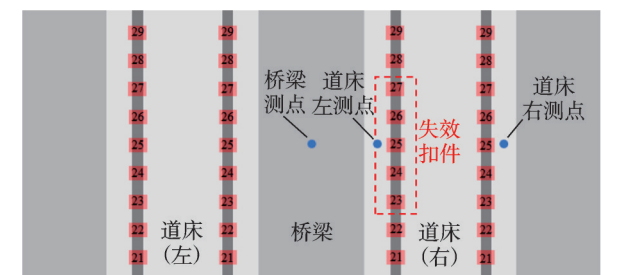


图 3 失效扣件示意图
Fig.3 Schematic diagram of damage fasteners

桥梁与道床的测点布置如图 4 所示。桥梁测点位于第 2 孔桥梁跨中的中间位置,道床测点均位于右侧道床边缘。

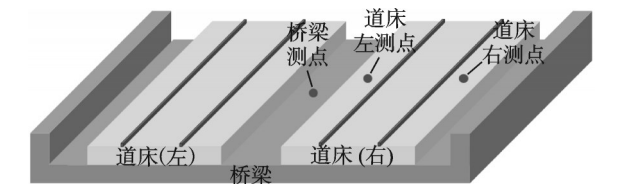


图 4 桥梁与道床的测点布置
Fig.4 Arrangement of measuring points of bridge and track bed

文献[24]基于多体动力学与有限元法建立了轨道交通高架简支箱车桥耦合振动分析模型,计算了单节地铁列车以 60 km/h 的速度运行时桥梁跨中振动响应。文献[25]结合现场实测与数值模拟获得了桥梁结构振动响应。计算结果验证见表 3。由表可知,本研究成果与文献[24-25]结果基本一

致,说明本模型计算结果具有较高的可靠性。

表3 计算结果验证

Tab.3 Validation of calculation results

结果来源	桥梁垂向振动加速度	桥梁横向振动加速度
	最大值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	最大值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
本研究	0.052	0.018
文献[24]	0.05~0.09	0.014~0.028
文献[25]	0.06	0.04

2 扣件失效对系统动力响应的影响

2.1 车辆与轨道的动态相互作用

轮轨力时程曲线如图5所示,为前转向架第1个轮对通过中间孔简支梁时的右轮轮轨垂向力时程曲线。前转向架在0.36 s进入第2孔桥梁,在2.16 s离开桥梁。图中灰色区域为轮对通过扣件失效区的轮轨垂向力,对应的时间范围为1.19~1.33 s。

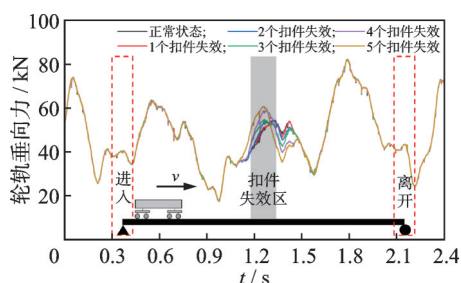


图5 轮轨力时程曲线

Fig.5 Time-history curve of wheel-rail contact force

由图5可知,扣件失效工况下,轮对进入扣件失效区时的轮轨垂向力出现增大,当到达扣件失效区中间位置时,轮轨垂向力达到局部峰值。轮轨垂向力峰值随着失效扣件个数的增大而增大,当5个扣件失效时轮轨力局部峰值达到60.7 kN,比正常状态的局部峰值54.3 kN增大了6.4 kN,约为11.8%。当轮对离开扣件失效区时,扣件失效工况下轮轨垂向力出现明显降低,轮轨垂向力谷值随着失效扣件个数的增大而减小。当5个扣件失效时,轮轨力局部谷值达到35.0 kN,比正常状态的局部谷值42.2 kN减小了7.2 kN,约为17.1%。

钢轨垂向位移如图6所示。该位移在列车通过扣件失效区时会发生明显增大,呈现W形。对于右轨垂向位移,曲线形态不会因扣件失效而改变;对于左轨垂向位移,在扣件失效数量小于等于3个时,曲线形态不会改变,而当扣件失效数量大于3个时,曲线形态逐渐趋于近似V形。

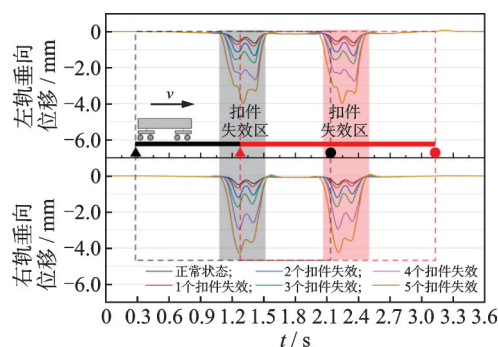


图6 钢轨垂向位移

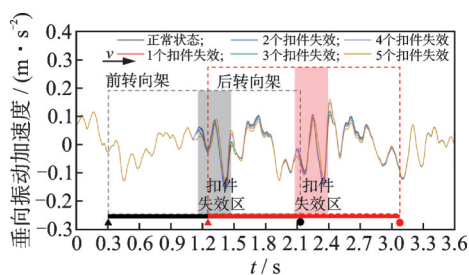
Fig.6 Vertical vibration displacements of rails

此外,左右轨垂向位移最大值随着扣件失效数量的增加而增加。正常状态下左右轨垂向位移最大值均为0.5 mm;5个扣件失效时左轨垂向位移最大值为4.0 mm,分别是扣件失效数量为1、2、3、4个时的4.9、2.9、2.2和1.4倍;5个扣件失效时右轨垂向位移最大值为4.3 mm,分别是扣件失效数量为1、2、3、4个时的6.5、3.6、2.5和1.4倍。

2.2 系统振动响应

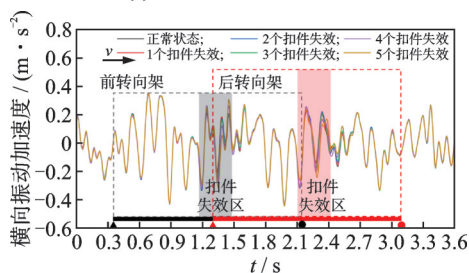
扣件失效下车体振动加速度如图7所示。列车通过扣件失效区时会导致车体振动加速度的改变。车体垂向振动加速度的影响范围在扣件失效区前0.1 s到扣件失效区后0.4 s之间;车体横向振动加速度的影响范围在扣件失效区开始到扣件失效区后0.2 s,如图7(a)、(b)所示。

图7(c)为通过扣件失效区时的车体振动加速度最大值。车体振动加速度随失效扣件数量的增大



(a) 车体垂向加速度

(a) Vehicle vertical acceleration



(b) 车体横向加速度

(b) Vehicle lateral acceleration

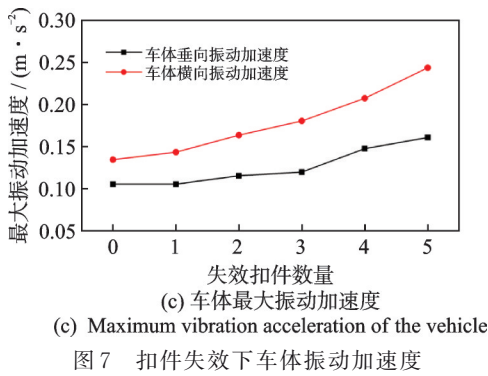


Fig.7 Vibration acceleration of metro vehicle under different quantity of damaged fasteners

而增大,当5个扣件失效时,车体垂向与横向振动加速度分别为0.16和0.24 m/s²,均小于地铁设计规范中的限值,对列车行驶舒适性无影响^[26]。

道床垂向振动加速度时程曲线与1/3倍频程曲线如图8所示。由图8(a)可知,扣件失效会导致道床垂向振动加速度的改变,正常状态下道床振动加速度最大值为0.19 m/s²,扣件失效数量为1、2、3、4、5个时的振动加速度最大值分别为0.15、0.13、0.17、0.15和0.16 m/s²。由图8(b)可知,扣件失效会导致道床垂向振动加速度级的改变,尤其是在中心频率40、80和315 Hz处;5个扣件失效与正常状态的加速

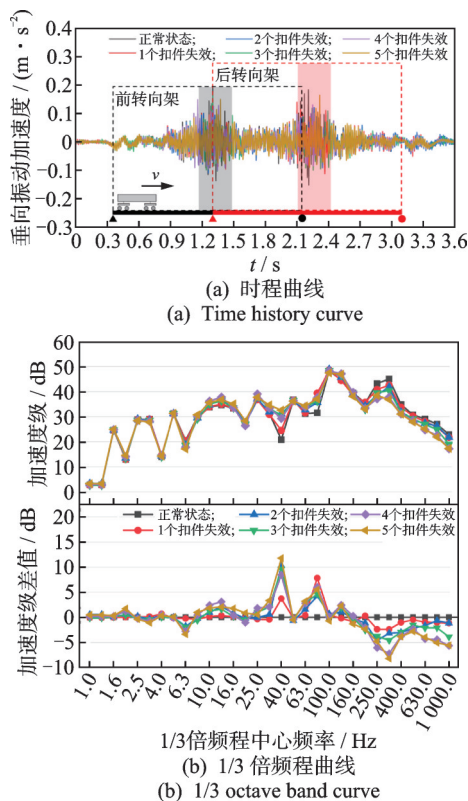


图 8 道床垂向振动加速度时程曲线与1/3 倍频程曲线
Fig.8 Time history and 1/3 octave band curve of the vertical vibration acceleration of track bed

度级差最大值为11.8 dB,发生在40 Hz处。

道床横向振动加速度时程曲线与1/3 倍频程曲线如图9所示。由图9(a)可知,扣件失效会导致道床横向振动加速度的改变,正常状态下道床振动加速度最大值为0.03 m/s²,扣件失效数量为1、2、3、4、5个时的加速度最大值分别为0.05、0.04、0.03、0.03和0.04 m/s²。由图9(b)可知,扣件失效会导致道床横向振动加速度振级的改变,尤其是在中心频率40、80和大于160 Hz处;5个扣件失效与正常状态的加速度级差最大值为11.1 dB,发生在40 Hz处。

对比图8(a)和图9(a)可知,相对于横向振动,扣件失效对道床垂向振动加速度级的影响更为集中,将更有利于扣件失效判别;当2、3、4、5个扣件失效时,两图的振动加速度1/3倍频程曲线较为接近,而1个扣件失效时的曲线差异相对较大。因此,后续主要以2个扣件失效为例进行分析讨论。

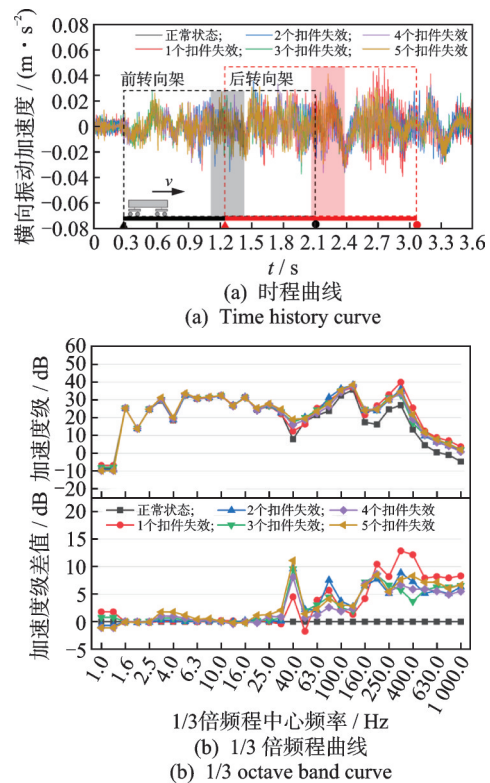


图 9 道床横向振动加速度时程曲线与1/3 倍频程曲线
Fig.9 Time history and 1/3 octave band curve of the lateral vibration acceleration of track bed

道床垂向与横向振动加速度振级差值对比如图10所示。由图可知,垂向振动加速度级差值差异较大,在40 Hz处,左右测点的加速度振级差值分别为1.3和10.3 dB,差值达到9.0 dB;而左右测点的横向振动加速度振级基本没有差异。在监测扣件状态时,垂向振动测点应包含道床左右两侧,而横向振动测点在任意一侧布置即可。

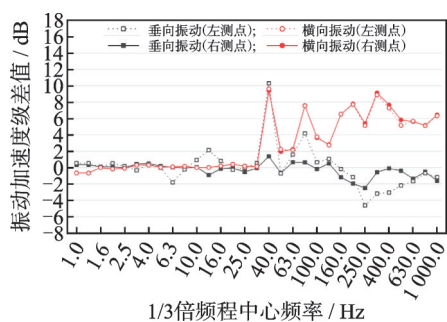


图10 道床垂向与横向振动加速度振级差值对比

Fig.10 Comparison of acceleration level differences between vertical and lateral vibration acceleration of track bed

各测点振动加速度级差值对比见图11,主要对比了扣件失效对车体、道床及桥梁振动加速度级差的影响。由图可知,车体、道床及桥梁振动加速度级差的最大值分别为1.2、10.3和3.1 dB均发生在40 Hz处。由于道床振动加速度级差显著大于车体与桥梁,故采用道床测点进行扣件失效判识。

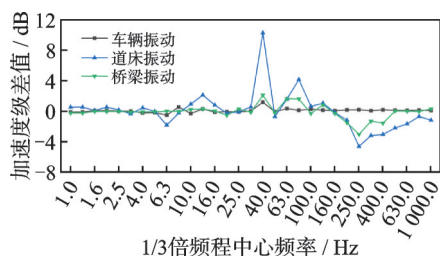


图11 各测点振动加速度级差值对比

Fig.11 Comparison of acceleration level differences

3 扣件失效判识指标研究

根据扣件失效对系统动力响应的影响,提出了基于道床垂向振动加速度级的扣件失效判识指标和方法。扣件失效判识流程如下:①获取与扣件失效相关的敏感中心频率;②计算扣件失效判识指标值;③绘制各测点判识指标图;④根据阈值获得失效扣件位置。为验证该判识方法的有效性,本研究以车速为60 km/h、跨中2个扣件失效的工况为例进行分析。

3.1 扣件失效判识指标的构建

当车速范围为30~100 km/h时,不同车速下道床加速度级差值如图12所示。由图可知:当车速在30~50 km/h之间时,加速度级最大值分别为4.2、5.1和4.1 dB,正常状态与扣件失效状态的值相对较小,这是因为当车速相对较低时,难以激发出扣件失效引起的变化;当车速为60 km/h时,加速度级差值明显增大,最大值为10.3 dB,发生在40 Hz处;当车速在70~80 km/h之间时,加速度级差值最大值分别为12.7和13.3 dB,发生在50 Hz处;当车速在

90~100 km/h之间时,加速度级差值最大值分别为15.5和12.7 dB,发生在63 Hz处。随着车速的提升,车致振动下的特征频率会受到车速的影响,使中心频率随车速的增大而增大。

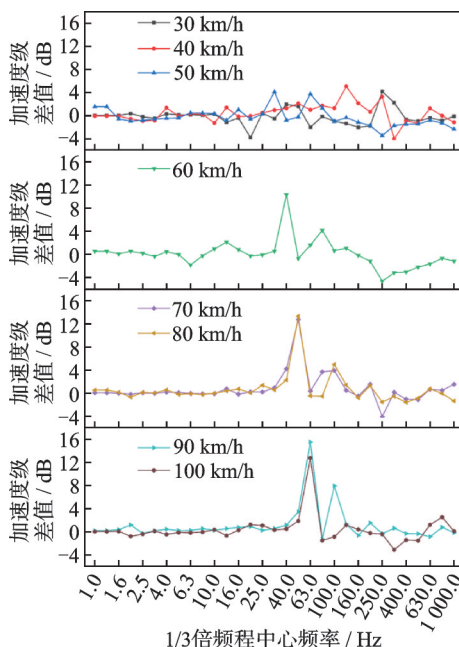


图12 不同车速下道床加速度级差值

Fig.12 Acceleration level difference of track bed under different speeds

由于车速在30~50 km/h之间时扣件失效引起的振动加速度1/3倍频程曲线变化不明显,因此本研究只针对车速在60~100 km/h范围的情况。根据相关规范要求,地铁在区间运行时车速普遍在60~80 km/h之间,以60 km/h车速情况为例进行讨论,可适应绝大部分地铁线路场景^[26]。车速在60~100 km/h之间时,扣件失效引起的振动加速度1/3倍频程曲线变化集中在中心频率40、50和63 Hz处,故首先基于道床振动加速度1/3倍频程曲线,对比40、50和63 Hz的中心频率,确定扣件失效的敏感中心频率。

车速为60 km/h时敏感中心频率加速度级差值如图13所示。由图可知,当车速为60 km/h时,中心频率为40 Hz的加速度差值在扣件失效处明显增大,而中心频率为50、63 Hz的加速度差值未出现类似的特征,故60 km/h车速的敏感中心频率为40 Hz。

不同轨道不平顺下中心频率为40 Hz时的加速度级曲线如图14所示。由图可知,不同轨道不平顺下加速度级曲线趋势相同,均呈现出中间位置和两端大、其余位置小的趋势。中间位置加速度级相对较大的原因是扣件失效引起的加速度级增大,而两端位置加速度级较大可能与接近梁端有关,故应避免梁端对扣件失效判识的影响。

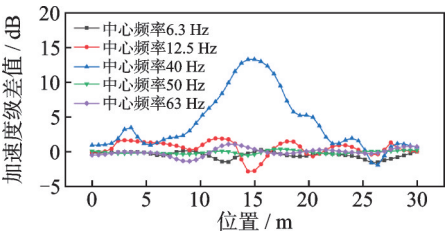


图 13 车速为 60 km/h 时敏感中心频率的加速度级差值
Fig.13 Acceleration level difference of center frequency at 60 km/h

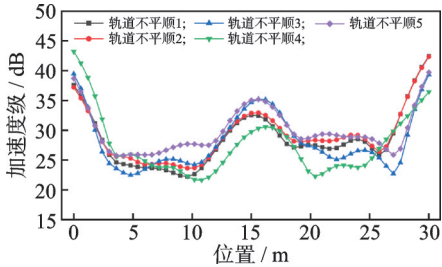


图 14 不同轨道不平顺下中心频率为 40 Hz 时的加速度级曲线
Fig.14 Acceleration levels with center frequency of 40 Hz under different track irregularities

基于上述分析,本研究构建了扣件失效判别指标 $DIFF_i$ 为

$$DIFF_i = \begin{cases} 2VL_i / (\max(A) + \min(A)) & (i=6 \sim 44) \\ DIFF_6 \left(1 + \frac{DIFF_6 - DIFF_0}{6} i \right) & (i=0 \sim 5) \\ DIFF_{50} \left(1 + \frac{DIFF_{50} - DIFF_{44}}{6} (i - 44) \right) & (i=45 \sim 50) \end{cases}$$
$$A = \{VL_{10}, VL_{11}, VL_{12}, \dots, VL_{40}\}$$

其中: VL_i 为第 i 个扣件附近道床中心频率为 40 Hz 的振动加速度级; A 为第 6~44 个扣件的振动加速度级集合。

3.2 轨道不平顺对失效判别指标的影响

不同轨道不平顺下的扣件失效指标值见图 15。由图可知, 15 与 15.6 m 处的失效扣件的判别指标均值为 1.164 和 1.173, 20%~80% 分布区间为 [1.144, 1.184] 和 [1.158, 1.192], 99% 置信区间为 [1.140, 1.189] 和 [1.149, 1.196], 将 1.14 作为失效阈值。

值得注意的是, 两处失效扣件附近的正常扣件判别指标也相对较大, 说明该指标会受到近邻扣件状态的影响, 影响范围大致为前后 3 个扣件。因此, 当指标出现异常时, 应通过人工巡查的方式, 对异常处附近前后 3 个扣件范围内进行精确定位。

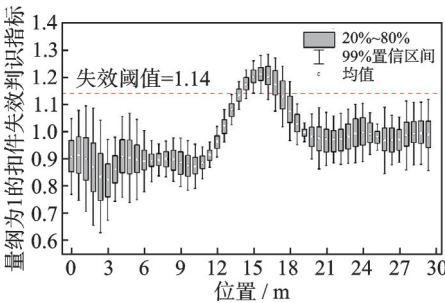


图 15 不同轨道不平顺下的扣件失效指标值
Fig.15 Damage threshold of fasteners under different track irregularities

3.3 扣件失效位置与数量对失效判别指标的影响

为确保指标的适用性, 分析在不同扣件失效位置、多处扣件失效工况下的判别指标曲线分布情况。扣件失效工况见表 4。

表 4 扣件失效工况

Tab.4 Types of damage fasteners

失效类型	工况	失效扣件序号
不同扣件失效位置	3 m 处扣件失效	15, 16
	6 m 处扣件失效	15, 16
	9 m 处扣件失效	15, 16
	12 m 处扣件失效	20, 21
	15 m 处扣件失效	25, 26
	18 m 处扣件失效	30, 31
	21 m 处扣件失效	35, 36
两处扣件失效	24 m 处扣件失效	40, 41
	27 m 处扣件失效	45, 46
	9 和 12 m 处扣件失效	15, 16, 20, 21
	9 和 15 m 处扣件失效	15, 16, 25, 26
	9 和 18 m 处扣件失效	15, 16, 30, 31
	9 和 21 m 处扣件失效	15, 16, 35, 36

不同扣件失效位置下的判别指标如图 16 所示。由图可知, 不同扣件失效位置处判别指标均出现明显超限, 说明不同位置的扣件失效均可利用该指标进行判别。

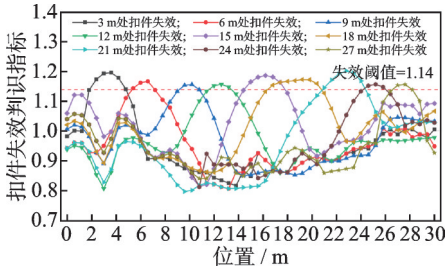


图 16 不同扣件失效位置下的判别指标
Fig.16 $DIFF_i$ under different location

两处扣件失效下的判别指标如图17所示。由图可知,9和12 m处扣件失效时,判别指标曲线出现一个超限波峰,该波峰相对较宽,覆盖范围为7.8~13.2 m,包含了两处的失效扣件。其余3组工况中,判别指标曲线均呈现2个超限波峰,包含了所有的失效扣件位置。因此,该判别方法也可应用于两处扣件失效的情况。

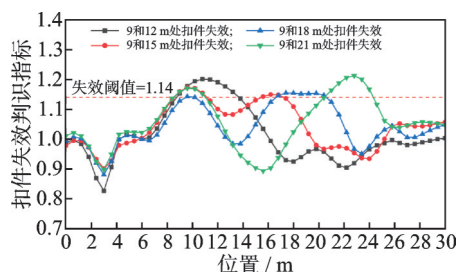


图17 两处扣件失效下的判别指标

Fig.17 DIFF_i for two damage fasteners

4 结 论

1) 钢轨垂向位移最大值随着扣件失效数量的增加而增加。当扣件失效数量大于3个时,失效扣件侧钢轨垂向位移曲线由W形逐渐趋于近似V形,故应尽量避免3个以上相邻扣件失效的发生。

2) 扣件失效会引起车体、道床及桥梁振动加速度的改变,尤其对1/3倍频程振级的影响更明显,其影响大小排序为道床>桥梁>车体。因此,道床振动加速度级在扣件失效判别中更具有潜力。

3) 相对于横向振动,扣件失效对道床垂向振动加速度级的影响更集中,更有利于扣件失效判别。由于道床左右测点横向振动较接近,垂向振动差异较大,因此在监测扣件状态时,垂向振动测点应包含道床左右两侧,而横向振动测点可布置在任意一侧。

4) 基于道床垂向振动加速度级,提出了扣件失效判别方法,所构建的扣件失效判别指标及其阈值可用于判别不同扣件失效位置与两处扣件失效。在实际选取敏感中心频率与限值时,应综合考虑扣件类型、车辆型号及轨道桥梁结构特征等影响因素。

参 考 文 献

[1] XIAO J H, SHAN J, WU N, et al. Long-term settlement of metro viaduct piers: a case study in Shanghai soft soil[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101075.
[2] DI H G, ZHOU S H, GUO P J, et al. Observed long-term differential settlement of metro structures built on soft deposits in the Yangtze river delta region of China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 57(6): 840-850.
[3] 刘俊博,黄雅平,王胜春,等.基于机器视觉的多线路

钢轨扣件缺损检测方法[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 27-35.

LIU Junbo, HUANG Yaping, WANG Shengchun, et al. Rail fastener defect detection method for multi railways based on machine vision[J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 27-35.(in Chinese)

[4] 范宏,侯云,李柏林,等.高铁扣件的自适应视觉检测算法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 896-902.

FAN Hong, HOU Yun, LI Bailin, et al. Adaptive detection algorithm for high-speed railway fasteners by vision[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 896-902.(in Chinese)

[5] 姚德臣,王琰亮,杨建伟,等.语义数据标注的轻量化轨道扣件故障检测方法[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(1): 52-59.

YAO Dechen, WANG Yanliang, YANG Jianwei, et al. Lightweight rail fastener fault detection method based on improved mobile vit and grad-cam[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 52-59.(in Chinese)

[6] 肖新标,金学松,温泽峰.钢轨扣件失效对列车动态脱轨的影响[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 10-15.

XIAO Xinbiao, JIN Xuesong, WEN Zefeng. Influence of rail fastener failure on vehicle dynamic derailment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 10-15.(in Chinese)

[7] 邵冠慧,赵晓豹,乔恒君,等.地铁扣件和钢轨对运营期列车荷载的动态响应[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1228-1234.

SHAO Guanhui, ZHAO Xiaobao, QIAO Hengjun, et al. Dynamic response of fastener and rail under the train load in operating period[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1228-1234.(in Chinese)

[8] LIANG L, WEI L, SHANG H X, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(9): 1211-1231.

[9] LIU Z F, TSANG K S, LIU Y, et al. Finite element and experimental study on multiaxial fatigue analysis of rail clip failures[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(10): 2390-2401.

[10] 詹涛,冯玉林,宋立忠,等.考虑扣件失效的地铁列车-轨道动态响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 170-173, 254.

ZHAN Tao, FENG Yulin, SONG Lizhong, et al. Dynamic response analysis of subway train-track considering fastener failure[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 170-173, 254.(in Chinese)

[11] 魏纲,董北北,蒋吉清,等.扣件失效对地铁整体道床动力性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),

- 2020, 51(4): 1154-1162.
- WEI Gang, DONG Beibei, JIANG Jiqing, et al. Influence of fastener failure on dynamic performance of metro monolithic track system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(4): 1154-1162.(in Chinese)
- [12] MORALES-IVORRA S, REAL J I, HERNÁNDEZ C, et al. Derailment risk and dynamics of railway vehicles in curved tracks: analysis of the effect of failed fasteners[J]. Journal of Modern Transportation, 2016, 24(1): 38-47.
- [13] XU L, GAO J, ZHAI W. On effects of rail fastener failure on vehicle/track interactions[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 63(5): 659-667.
- [14] 周钦悦, 刘林芽, 龚凯, 等. 扣件失效对高速列车-无砟轨道-桥梁系统垂向振动响应的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1337-1345.
- ZHOU Qinyue, LIU Linya, GONG Kai, et al. Influence of fastener failure on vertical vibration responses of the high-speed train-ballastless track-bridge coupled system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1337-1345.(in Chinese)
- [15] 陈宗平, 成功, 刘清源, 等. 高速铁路扣件动刚度频变和温变特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 495-502.
- CHEN Zongping, CHENG Gong, LIU Qingyuan, et al. A study on the frequency and temperature-dependences of the dynamic stiffness of fasteners used on high-speed railways[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 495-502.(in Chinese)
- [16] 袁玄成, 朱胜阳, 袁站东, 等. 钢轨扣件弹条扣压力对轮轨系统垂向动力学响应的影响分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 17-24.
- YUAN Xuancheng, ZHU Shengyang, YUAN Zhandong, et al. Influence of rail fastener clamping force on vertical dynamic responses of wheel/rail system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 17-24.(in Chinese)
- [17] 孙旭, 王平. 高速铁路扣件失效对车辆-轨道耦合系统动态响应的影响[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 108-116.
- SUN Xu, WANG Ping. Effect of fastener failure of high-speed railway on dynamic response of vehicle-track coupling system[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(8): 108-116.(in Chinese)
- [18] XIAO Y J, CHANG Z X, MAO J F, et al. Evaluating the effect of rail fastener failure on dynamic responses of train-ballasted track-subgrade coupling system for smart track condition assessment[J]. Materials, 2022, 15(7): 2675.
- [19] 钟阳龙, 马超智, 高亮, 等. 基于车辆响应的无砟轨道路基不均匀沉降评价指标理论研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 147-157.
- ZHONG Yanglong, MA Chaozhi, GAO Liang, et al. Theoretical research on evaluation index of uneven settlement of ballastless track subgrade based on vehicle response[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 147-157.(in Chinese)
- [20] 薛亚东, 高健, 李宜城, 等. 基于深度学习的地铁隧道衬砌病害检测模型优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(7): 137-146.
- XUE Yadong, GAO Jian, LI Yicheng, et al. Optimization of shield tunnel lining defect detection model based on deep learning[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(7): 137-146.(in Chinese)
- [21] ZHU S Y, CAI C, ZHAI W M. Interface damage assessment of railway slab track based on reliability techniques and vehicle-track interactions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(10): 04016041.
- [22] 马嘉霁, 袁笙哲, 肖军华, 等. 漏表面波 IMF₁ 能量识别无砟轨道脱空适用性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(5): 850-858.
- MA Jiapi, YUAN Shengzhe, XIAO Junhua, et al. Applicability of leaky surface wave IMF₁ energy to identify ballastless track void[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(5): 850-858.(in Chinese)
- [23] 侯博文, 李佳静, 高亮, 等. 基于脉冲激励下钢轨振动响应的扣件失效识别方法[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 122-133.
- HOU Bowen, LI Jiajing, GAO Liang, et al. Failure identification method of fastening system based on rail response under pulse excitation[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 122-133.(in Chinese)
- [24] YUAN Z D, ZHU S Y, YUAN X C, et al. Vibration-based damage detection of rail fastener clip using convolutional neural network: experiment and simulation[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104906.
- [25] ZHANG W B, PENG L L, ZHENG S B, et al. Research on the simulation of wheelset response characteristic identification of railway fastener loosening[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-15.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 建标 104—2008 城市轨道交通工程项目建设标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.



第一作者简介:肖军华,男,1980年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为轨道交通平顺性控制。

E-mail:jhxiao@tongji.edu.cn

通信作者简介:单杰,男,1996年11月生,博士生。主要研究方向为轨道交通平顺性控制与结构健康诊断。

E-mail:jieshan_tj@163.com