

文章编号:1005-0523(2013)03-0055-06

地铁弹性扣件失效对轨道结构振动特性的影响

张 斌

(华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013)

摘要:运用基于车辆单元与轨道单元的车辆-轨道系统振动分析数值方法,研究地铁弹性扣件失效对轨道结构振动特性的影响。研究结果表明,列车通过弹性扣件失效轨道时,轮轨间相互作用增大,各动力学指标值成倍增长,且随着扣件失效数量增加,动力响应增幅明显;失效扣件临近轨道结构的支承反力急剧增大,加速了线路几何形位的恶化。此外,地铁弹性扣件刚度低、橡胶垫层易老化,随着行车密度的提高,扣件失效产生的动力影响更加显著。

关键词:弹性扣件;扣件失效;轮轨相互作用;轨道结构振动

中图分类号:U213.5

文献标志码:A

地铁列车运行引发的环境振动问题一直以来都受到公众的高度关注。为了降低振动与噪声污染,各种减振器、隔振器以及减振轨道结构在地铁减振中得到广泛应用。扣件作为轨道结构弹性的主要提供元件,经历了普通扣件到高弹性扣件的发展过程,基本原理大多利用橡胶垫层作为减振手段,但随着时间延长,橡胶弹性元件的耐久性、抗老化性以及抗拉伸性有着不同程度地降低,导致扣件松脱或失效,这一问题随着地铁线路运行密度的提高更加严重。

国内外学者对轨道结构失效状态下轮轨系统动力性能问题有一些研究^[1-5],建立了各种动力学模型,取得了不少成果,但以地铁弹性扣件失效为研究对象的却不多,有待进一步深化。本文通过地铁弹性扣件结构剖析,建立扣件失效状态下列车-轨道耦合动力学有限元模型,在此基础上,运用 Matlab 编写计算程序进行轨道结构振动特性仿真分析,为地铁弹性扣件的理论计算、试验和应用方面的研究提供参考。

1 地铁弹性扣件结构

本文选取地铁线路广泛使用的弹性扣件基本型式进行结构分析,具体内容见表1。

表1 地铁弹性扣件的基本结构型式

Tab.1 Basic configurations of subway elastic fastener

扣件类型	结构型式	垂向刚度/(kN·mm ⁻¹)	性能特征
一般弹性扣件	双层橡胶垫板,在轨下和铁垫板下铺设橡胶垫层	30~50	螺栓将铁垫板固定在轨枕顶部,螺栓拧紧后,橡胶垫层受到压缩变形,使其丧失部分弹性,减振性能难以充分发挥
高弹性扣件	硫化粘接型扣件,利用橡胶将上部承轨板 and 下部底座硫化为一体	10~30	橡胶圈的剪切变形较大,横向刚度较低,寿命较短,且橡胶垫层失效后需更换整个扣件,成本高
	双层铁垫板,在轨下、铁垫板之间铺设橡胶垫层		上层铁垫板不对中间橡胶垫层产生预压力,从而保证中间橡胶垫层的弹性不损失,且可单独更换橡胶垫层,安装复杂

收稿日期:2013-04-20

基金项目:铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心资助项目(09111094);国家自然科学基金项目(51208198)

作者简介:张斌(1985—),男,讲师,博士研究生,研究方向为铁道工程教学及轨道结构动力学。

扣件的选择对地铁轨道结构整体稳定性及养护维修工作有着显著影响,过度减振或减振不当将造成设备及零部件非正常伤损,一些运营线路甚至发生异常波磨^[6-8]。由表1可见,各种型式的弹性扣件均充分利用了橡胶材料的压缩和剪切性能,降低节点刚度是扣件实现减振的关键所在,弹性扣件的节点刚度较普通扣件明显减小,对轨道结构振动特性产生显著影响。地铁弹性扣件的几种结构型式如图1所示。

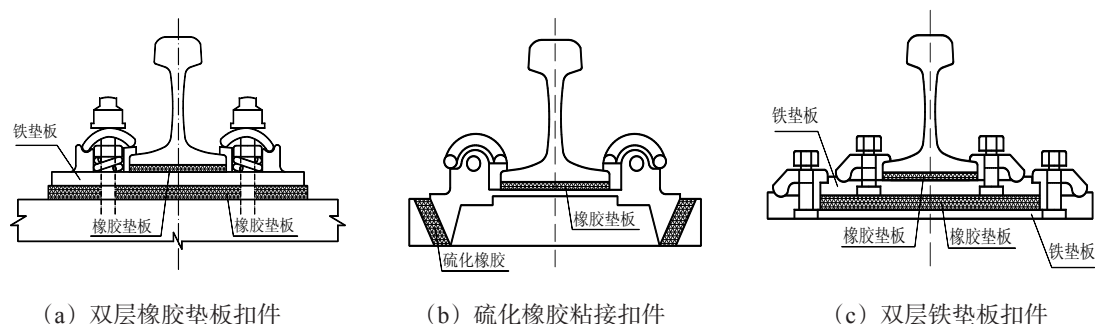


图1 几种地铁弹性扣件结构型式图
Fig.1 Several types of subway elastic fastener

2 有限元仿真计算模型

文献[9-10]提出应用车辆单元和轨道单元模型分析列车-轨道系统动力特性的数值方法,取得良好效果,本文将此方法推广到地铁弹性扣件失效状态下列车-轨道耦合动力学仿真计算中,其中车辆和轨道结构有限元模型的基本假定如下:

车辆系统为附有二系弹簧阻尼的整车模型,车体和转向架考虑沉浮振动和点头振动,轮对考虑沉浮振动,轮轨接触简化为线性接触弹簧。定义车辆单元节点位移向量,有了此位移模式,就可以推导出车辆竖向振动刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,详见文献[9]。

地铁轨道结构大多为混凝土整体道床,因此可将扣件下部轨道支承体系视为刚性固定基础,着重反映各个扣件支点的局部影响。钢轨视为离散点支承上的Euler梁,考虑其位移及转角,分别用 v_1 和 θ_1 , v_2 和 θ_2 表示扣件沿纵向离散为一系列相隔的弹簧-阻尼体系,利用轨道结构纵向刚度变化模拟地铁弹性扣件失效状态。

$$\mathbf{a}_t^e = \{v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2\}^T \quad (1)$$

式中: v_1 和 v_2 分别表示Euler梁节点位移; θ_1 和 θ_2 分别表示Euler梁节点转角。

轨道结构有限元模型中单元节点位移向量可表示为轨道结构单元刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵分别用 $\mathbf{k}_t^e$, $\mathbf{m}_t^e$ 和 $\mathbf{c}_t^e$ 表示。轨道结构刚度矩阵可表示为

$$\mathbf{k}_t^e = \mathbf{k}_r^e + \mathbf{k}_1^e \quad (2)$$

其中,钢轨弯曲势能产生的刚度矩阵为

$$\mathbf{k}_r^e = \frac{E_r I_r}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & -12 & -6l \\ & 4l^2 & 6l & 2l^2 \\ & & 12 & 6l \\ \text{Symm.} & & & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

离散支承弹性产生的刚度矩阵为

$$\mathbf{k}_1^e = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ & & k_s & 0 \\ \text{Symm.} & & & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

轨道结构质量矩阵可表示为

$$\boldsymbol{m}_t^e = \boldsymbol{m}_r^e \tag{5}$$

其中,钢轨弯曲动能产生的质量矩阵为

$$\boldsymbol{m}_r^e = \frac{\rho_r l A_r}{420} \begin{bmatrix} 156 & -22l & 54 & 13l \\ & 4l^2 & -13l & -3l^2 \\ \text{Symm.} & & 156 & 22l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

轨道结构阻尼矩阵可表示为

$$\boldsymbol{c}_t^e = \boldsymbol{c}_b^e + \boldsymbol{c}_1^e \tag{7}$$

其中,与系统固有频率有关的比例阻尼矩阵为

$$\boldsymbol{c}_b^e = \alpha_r \boldsymbol{m}_r^e + \beta_r \boldsymbol{k}_r^e \tag{8}$$

离散支承弹性产生的阻尼矩阵为

$$\boldsymbol{c}_1^e = \begin{bmatrix} c_s & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ & & c_s & 0 \\ \text{Symm.} & & & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: $E_r I_r$ 为钢轨抗弯刚度; l 为相邻扣件间距; k_s 为扣件支承弹簧刚度系数; A_r 为钢轨横截面面积; ρ_r 为钢轨密度; α_r, β_r 为钢轨比例阻尼系数; c_s 为扣件支承弹簧阻尼系数。

运用 Lagrange 方程和标准有限元集成法则,将车辆系统和轨道系统耦合,可形成系统任意时刻 t 的总刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 、总质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 、总阻尼矩阵 $\boldsymbol{C}$ 及荷载列向量 $\boldsymbol{Q}$,从而得到系统竖向振动矩阵方程式(10),采用 Newmark 逐步积分法求解。

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{a}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{a}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{a} = \boldsymbol{Q} \tag{10}$$

式中: $\ddot{\boldsymbol{a}}, \dot{\boldsymbol{a}}$ 及 $\boldsymbol{a}$ 分别表示系统竖向振动的加速度、速度及位移向量。

3 弹性扣件失效对轨道振动的影响

应用上述模型,对地铁弹性扣件失效情况下轨道振动进行分析。地铁弹性扣件失效特征通常表现为钢轨悬空,从车辆-轨道耦合系统的激励类型而言,扣件失效本质上是轨道纵向刚度动力不平顺。本文考虑扣件完全失效,即令扣件的刚度 $k_s = 0$ 和阻尼 $c_s = 0$ 模拟失效状态,全面分析扣件失效对轨道振动的影响,具体计算工况见表2。

以上海地铁一号线车辆和轨道结构为例,A型车辆计算参数见表3。

表2 计算工况
Tab.2 Calculation conditions

工况	失效状态	失效扣件编号
工况1	无弹性扣件失效	—
工况2	单个弹性扣件失效	1
工况3	相邻两个弹性扣件失效	1-2
工况4	间隔两个弹性扣件失效	1-3

表3 地铁A型车辆计算参数(额定负载)
Tab.3 Parameters of subway A-type vehicle (AW2)

参数	量值	参数	量值	参数	量值	参数	量值
车体质量/t	46	车体点头转动惯量/(t·m ²)	1 959	转向架点头惯量/(t·m ²)	1.47	车辆定距/m	15.7
转向架质量/t	4.36	一系悬挂刚度/(kN·m ⁻¹)	2 976	二系悬挂刚度/(kN·m ⁻¹)	1 060	固定轴距/m	2.5
轮对质量/t	1.77	一系悬挂阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	15	二系悬挂阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	30	轮轨接触刚度/(kN·m ⁻¹)	1.3 × 10 ⁶

弹性扣件支承刚度变化范围 $k_s = 10 \sim 70 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。考虑到计算工况较多,限于篇幅,仅给出地铁1节车辆在速度 $V = 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、弹性扣件 $k_s = 30 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 失效情况下轨道结构动力学性能指标变化图。暂不考虑线路不平顺影响。

3.1 单个弹性扣件失效响应分析

图2所示为地铁车辆通过正常线路和单个弹性扣件1号扣件失效线路时的动力响应计算结果。

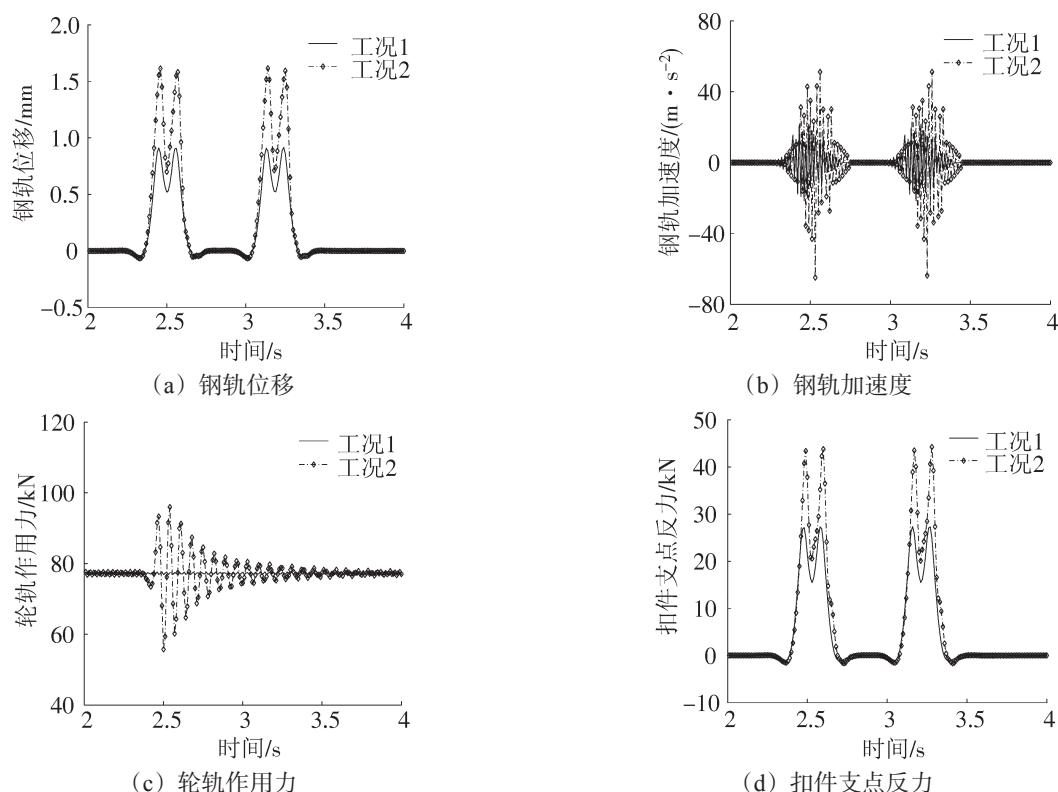


图2 单个弹性扣件失效时各指标时程曲线

Fig.2 Time history curve of dynamic indices of single elastic fastener failure

由图2可以看出,工况2与工况1相比,1号失效扣件处,钢轨位移最大值增长70%左右,钢轨加速度最大值增长105%左右,轮轨相互作用力最大值增长24%左右。图2(d)为2号扣件支点反力,由于1号扣件失效,其支点反力为零,因此考察对相邻扣件的影响,虽然2号扣件正常工作,但受1号扣件失效影响,2号扣件支点反力最大值增长61%,从而产生累积变形,加速扣件老化,极易导致2号扣件松弛。

3.2 相邻弹性扣件失效响应分析

表4所示为地铁车辆通过正常线路和相邻弹性扣件1-2号扣件失效线路时的动力响应计算结果。

表4 工况3时各扣件动力指标对比

Tab.4 Dynamic indices contrast of each fastener on condition No.3

扣件编号	钢轨位移/mm	钢轨加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	扣件支点反力/kN
1	2.56	103.17	0
2	2.97	127.72	0
3	2.13	85.43	64.33

由表4可以看出,工况3与工况1相比,由于相邻两个弹性扣件连续失效,各动力学性能指标幅值均显著增加,且2号扣件处动力响应大于1号扣件处,线路钢轨位移和钢轨加速度的最大值分别是正常工况的

3.3倍和4.1倍左右。扣件连续失效引起临近扣件支点反力急剧增大,3号扣件支点反力最大值增长135%左右,极大地加剧了轨道几何形位的恶化。此外,轮轨相互作用力最大值较正常工况增长近59%左右。

3.3 间隔弹性扣件失效响应分析

表5所示为地铁车辆通过正常线路和间隔弹性扣件1-3号扣件失效线路时的动力响应计算结果。

表5 工况4时各扣件指标幅值对比
Tab.5 Dynamic indices contrast of each fastener on condition No.4

扣件编号	钢轨位移/mm	钢轨加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	扣件支点反力/kN
1	1.70	53.87	0
2	1.79	47.16	53.74
3	1.52	100.13	0

由计算结果可以看出,工况4与工况1相比,由于两个弹性扣件间隔失效,各动力学性能指标变化复杂。虽然2号扣件正常工作,但其位置钢轨位移大于1-3号处,最大值是正常工况的2倍左右。这是由于在2号扣件位置前后,轨道结构刚度是低—高一低的变化过程,中间扣件经历了两次轮轨冲击作用。3号扣件处钢轨加速度最大,最大值是正常工况的3.2倍左右。2号扣件支点反力最大值增长97%,加速了该位置不均匀变形,良好的支承结构会很快产生病害,最终发展为连续扣件失效。此外,轮轨相互作用力最大值较正常工况增长近22%左右。

3.4 弹性扣件失效的刚度效应分析

考察地铁车辆以速度 $V=80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 通过时,4种刚度 $k_s=10,30,50,70\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 弹性扣件失效情况下轨道振动响应。

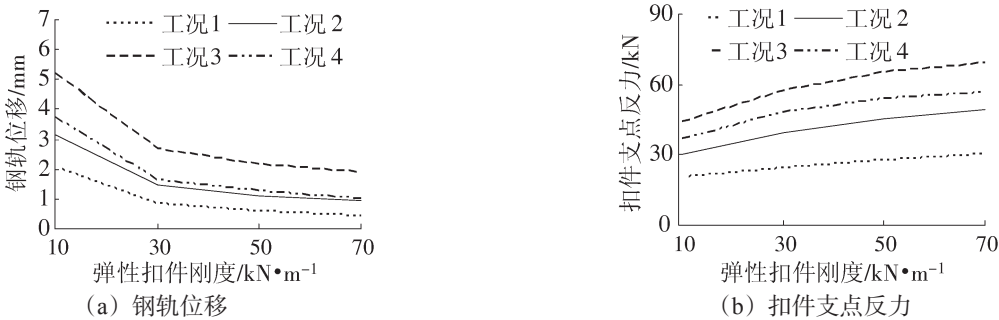


图3 各种工况下动力响应的刚度效应
Fig.3 Stiffness effect of dynamic indices under different calculation conditions

从图3(a)可以看出,工况3即相邻弹性扣件失效是最坏的情况,在不同的弹性扣件刚度下,其钢轨位移均大于其它几种工况。此外,弹性扣件刚度越低,扣件失效时钢轨位移放大效应越明显,过多降低扣件支承刚度将造成轨道零部件非正常伤损,加速几何形位的恶化,缩短使用寿命。从图3(b)可以看出,弹性扣件失效对临近轨道的支承影响显著,扣件支点反力的增大使轨道结构残余变形加大,助长了线路病害的产生和发展,使原本良好的支承结构逐渐损坏。

4 结论

- 1) 地铁弹性扣件失效引起轨道结构刚度不平顺,加剧轮轨间相互作用,对轨道结构振动特性影响较大,各动力学性能指标值成倍增长,恶化了线路几何形位状态。
- 2) 扣件失效对临近轨道结构产生显著危害,如果维修不及时,将发展成为一段连续范围内的轨道结构病害,严重时危及车辆运行安全。
- 3) 弹性扣件橡胶垫层易老化,线路养护部门应加强弹性扣件使用地段的检查与维修,严防扣件松脱或

失效,同时提高监测水平和治理手段,确保地铁车辆行车平稳。

参考文献:

- [1] KAEWUNRUEN S, REMENNIKOV A M. Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2007, 221(4): 495-507.
- [2] LUNDQVIST A, DAHLBERG T. Load impact on railway track due to unsupported sleepers[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219(2): 67-77.
- [3] 朱剑月. 轨下扣件支承失效对轨道结构动力性能的影响[J]. 振动工程学报, 2011, 24(2): 158-163.
- [4] 肖新标, 金学松, 温泽峰. 轨下支承失效对直线轨道动态响应的影响[J]. 力学学报, 2008, 40(1): 67-78.
- [5] 赵才友, 王平. 扣件弹条动力特性现场测试与研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(5): 126-132.
- [6] 孙京健, 曾向荣, 任静. 地铁减振存在的问题分析及建议[J]. 都市轨道交通, 2012, 25(4): 94-115.
- [7] 卿伟. 车-隧耦合条件下地铁隧道的动力响应分析及对周边环境影响的评估研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011: 6-19.
- [8] 姚锦宝. 考虑土-结构动力相互作用的轨道交通引起的环境振动及隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 75-86.
- [9] LEI XIAOYAN, ZHANG BIN. Analyses of dynamic behavior of track transition with finite elements[J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 17(11): 1733-1747.
- [10] 雷晓燕. 轨道动力学模型与数值方法研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(3): 1-12.

Influences of Elastic Fastener Failure on Vibration Characteristics of Subway Track Structure

Zhang Bin

(Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: By use of the numerical method of vibration analysis of vehicle and track system with the vehicle element and track element, the influences of elastic fastener failure on vibration characteristics of subway track structure are investigated. The research results show that the interaction between wheel and rail increases when a vehicle passes through the track with failure fastener, moreover, the value of each dynamic index grows rapidly. As the number of failure fastener increases, so do the system dynamic responses. The supporting force of the track structure which is near the failure fastener also grows remarkably and will speed up deterioration of the track geometry. Furthermore, for the properties of low stiffness and rubber pad easily aging of subway elastic fastener, the impact of the dynamic response generated by failure fastener will be more significant with the surge of traffic density.

Key words: elastic fastener; fastener failure; wheel-rail interaction; track structure vibration