

有轨电车扣件式无砟轨道 60R2 槽型钢轨与 60 kg/m 钢轨抗倾覆特性仿真研究

崔逸鹏 苗彩霞

(上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200135, 上海)

摘要 [目的] 为了给有轨电车不同地段的钢轨、扣件的选型和设计提供理论支撑, 须研究扣件式无砟轨道 60R2 槽型钢轨与 60 kg/m 钢轨的抗倾覆特性, 并分析影响两者抗倾覆特性的因素。[方法] 利用有限单元法建立了 60R2 槽型钢轨和 60 kg/m 钢轨分析简化模型。分析了不同轨下垫板垂向刚度、扣件横向刚度、扣件间距以及弹条松弛 2 mm 和 5 mm 对钢轨横移、弹条竖向位移、扣件承受横向力及钢轨与垫板接触长度的影响。[结果及结论] 仿真研究表明: 60 kg/m 钢轨扭转刚度约为 60R2 槽型钢轨的 1.73 倍, 60 kg/m 钢轨竖向力偏心距比 60R2 槽型钢轨大, 同等工况下, 60R2 槽型钢轨横移和弹条竖向位移大于 60 kg/m 钢轨, 但扣件承受横向力 60R2 槽型钢轨小于 60 kg/m 钢轨。轨下垫板刚度越小, 扣件间距越大, 钢轨横移和外侧弹条竖向位移越大。小半径横向力较大地段, 应适当提高轨下垫板刚度, 加密扣件间距, 并应适当提高弹条疲劳试验振幅。扣件承受横向力的影响因素主要有钢轨轨型、横向刚度、扣件间距, 而轨下垫板刚度对其影响较小。弹条松弛 2 mm 和 5 mm 在本计算工况下, 钢轨横移变化较小, 对于小半径地段不易检查的有轨电车埋入式轨道, 应定期翻挖检查并拧紧螺栓, 以保持弹条规定的离缝值。

关键词 有轨电车; 钢轨抗倾覆; 弹条松弛

中图分类号 U213.2*13:U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.007

Study on Anti-overturning Characteristics of 60R2 Groove Rail and CHN60 Rail for Fastener Type Ballastless Track of Tram

CUI Yipeng, MIAO Caixia

(Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., 200135, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to provide theoretical support for the selection and design of the tram rail and fasteners in different sections, it is necessary to study the anti-overturning characteristics of the 60R2 groove rail and the CHN60 rail for the fastener type ballastless track, and analyze the influencing factors of their anti-overturning performance. [Method] The finite element method is used to establish a simplified analysis

model for 60R2 groove rail and CHN60 rail. The effects of the vertical stiffness of different rail pads, lateral stiffness of fasteners, spacing between fasteners, and 2 mm and 5 mm looseness of fastener clips on the lateral displacement of rails, the vertical displacement of fastener clips, the lateral force borne by fasteners, and the contact length between rails and pads are analyzed. [Result & Conclusion] The simulation study shows that the torsional stiffness of CHN60 rail is about 1.73 times that of 60R2 groove rail, and the vertical force eccentricity of CHN60 rail is greater than that of the 60R2 groove rail. Under the same working conditions, the lateral displacement of 60R2 groove rail and the vertical displacement of its fastener clip are larger than those of CHN60 rail, but the fasteners of 60R2 groove rail bear less lateral force than those of CHN60. The smaller the stiffness of the rail pad, the larger the spacing between fasteners, and the greater the lateral displacement of the rail and the vertical displacement of the outer fastener clips. In areas with small radius and large lateral forces, the stiffness of the rail pad should be appropriately improved, the spacing between fasteners be increased, and the amplitude of the fastener clip in fatigue test be appropriately enlarged. The main influencing factors of the lateral force that the fasteners bear include rail type, lateral stiffness, and spacing between fasteners, while the stiffness of the rail pad has a relatively small effect on fasteners. Under the present calculation conditions, the rail lateral displacement changes relatively small with the fastener clip looseness of 2 mm and 5 mm. The embedded tram track with small radius section which is difficult to inspect should be excavated and inspected regularly, and the bolts should be tightened to maintain the specified seam value of the fastener clips.

Key words tram; rail anti-overturning; fastener clip looseness

有轨电车的钢轨在轮轨力作用下, 轨距动态扩大。动态轨距扩大量主要受钢轨倾覆扭转、横向弯曲等影响, 其中倾覆扭转为主要因素。

有轨电车以采用 60R2 槽型钢轨(以下简称

“60R2 轨”)为例,相比于 60 kg/m 钢轨(以下简称“60 轨”),60R2 轨的轨底宽 180 mm、轨腰厚 12 mm,60 轨的轨底宽 150 mm、轨腰厚 16.5 mm;根据有限元法计算,60R2 轨单位长度扭转刚度为 $99.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,60 轨单位长度扭转刚度为 $173 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,60 轨扭转刚度是 60R2 轨的 1.73 倍。60R2 轨轨距角离钢轨轨底中心线近,轮轨垂向力偏心距小于 60 轨,导致相同轮轨力下,60R2 轨承受倾覆力矩大于 60 轨。相同倾覆角下,60R2 轨弹条扣压点竖向位移大于 60 轨。

目前,我国对 60R2 轨抗倾覆性能研究较少,本文对影响扣件式轨道 60R2 轨和 60 轨抗倾覆的因素进行对比研究,为有轨电车不同地段的钢轨、扣件的选型和设计提供理论支撑。本文扣件以典型弹性不分开式结构为例,扣件弹性主要由轨下弹性垫板提供,垫板以下假定为刚性。

1 计算模型

本文利用有限单元法建立两种钢轨的简化模型,见图 1。钢轨采用实体单元,轨下弹性垫板和扣件弹条采用非线性弹簧单元,横向扣件支撑采用线性弹簧单元;钢轨长度取 11 个扣件间距长度。60R2 轨的轮轨垂向力加载在距钢轨中心线 2.5 mm 处,横向力加载在距轨顶以下 14 mm 轨距线处;60 轨的轮轨垂向力 P_v 加载在距钢轨中心线 21 mm 处,横向力 P_h 加载在距轨顶以下 16 mm 轨距线处。

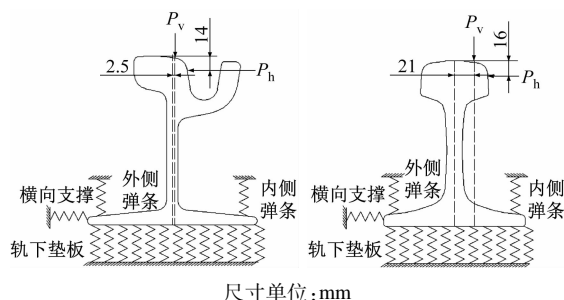


图 1 两种钢轨的简化模型图

Fig. 1 Simplified model diagrams of the two types of rails

2 主要计算参数

2.1 轮轨力

根据某有轨电车工程现场动力学测试数据,轮轨垂向力 P_v 取 75 kN,轮轨横向力 P_h 取 45 kN。

2.2 轨下垫板刚度

轨下垫板刚度取 20、40、60、80、100、120、160 kN/mm 分别计算。

2.3 扣件横向刚度

有轨电车扣件传递横向力分为有挡肩和无挡肩结构,底板分为铸铁和尼龙材质。不同结构及材质的横向支撑刚度区别大,分别以 20、40、60、80、100、200、400、1 000 kN/mm 计算。

2.4 弹条刚度

本文以 II 型弹条为例,标准状态下弹程为 10 mm,安装时弹条中肢下压 10 mm 与轨距块接触,此时初始扣压力为 10 kN;弹条弹臂向下位移的卸载刚度取为 1 kN/mm,当弹条中肢和弹臂共同向上位移时,弹条加载刚度取为 $6.89 \text{ kN/mm}^{[1]}$ 。

考虑运营中弹条松弛工况,即中肢与轨距块之间存在离缝,《普速铁路线路修理规则》规定 II 型弹条日常保持离缝不宜大于 2 mm,分别以弹条松弛 2 mm 和 5 mm 工况计算。

2.5 扣件间距

扣件间距以 500、550、600、650、700、800、900 mm 分别计算。

2.6 假定一种基准状态

为考虑不同因素的不同影响,假定一种基准状态, P_v 为 75 kN, P_h 为 45 kN,轨下垫板刚度 40 kN/mm,横向支撑刚度为 100 kN/mm,弹条无松弛,扣件间距为 600 mm。

3 计算结果分析

3.1 扣件处与扣件间加载对比

在基准状态下,以 60R2 轨计算为例,由表 1 可知,扣件间跨中处和扣件处加载,钢轨轨距线横移量差值较小;在扣件间跨中加载时扣件承受横向力和弹条竖向位移较小,因为加载处两侧扣件共同分担,故变小。因此,为更多考虑扣件对钢轨倾覆的抵抗作用,下文加载位置均设置在扣件处。

表 1 60R2 轨扣件处与扣件间加载计算结果对比

Tab. 1 Comparison of loading calculation results between 60R2 fastener and fastener mid-spans

加载位置	钢轨轨距线横移量/mm	扣件承受横向力/kN	外侧弹条位移/mm	内侧弹条位移/mm
扣件处	3.46	18.6	-1.74	0.48
扣件间跨中	3.47	16.6	-1.55	0.46

3.2 轨下垫板刚度影响

在基准状态下仅改变轨下垫板刚度,由图 2 可知,随着轨下垫板刚度越大,垫板的抵抗力矩越大,钢轨轨距线横移越小,外侧弹条竖向位移越小,而扣件所承受横向力、内侧弹条竖向位移及钢轨与垫

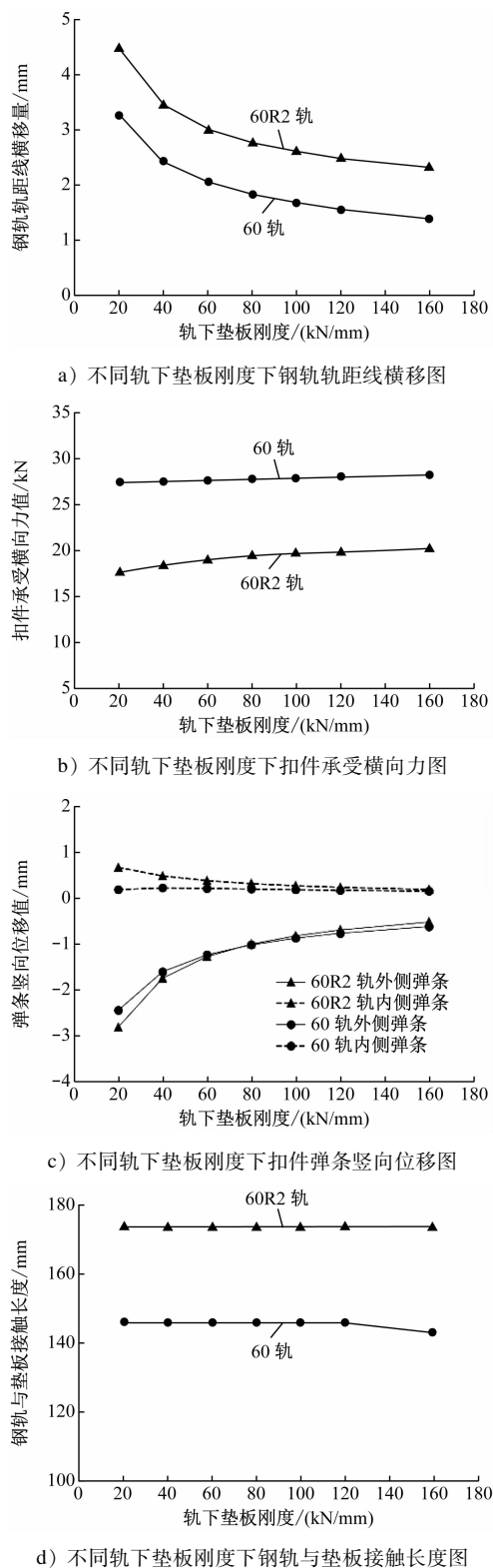


图2 轨下垫板刚度变化对钢轨和扣件的影响图

Fig. 2 Influence of stiffness variation of rail pad under track on rail and fastener

板接触长度变化均较为平缓。相同轮轨力下,60R2 轨横移大于60 轨,60R2 轨扣件承受横向力小于60

轨;外侧弹条竖向位移两种轨型较为接近,内侧弹条位移60R2 轨大于60 轨。如40 kN/mm 刚度下,60R2 轨横移3.47 mm、60 轨横移2.43 mm,60R2 轨外侧弹条向下位移1.74 mm、内侧向上位移0.48 mm,60 轨外侧弹条向下位移1.6 mm、内侧向上位移0.22 mm。

3.3 扣件横向刚度影响

在基准状态下仅改变扣件横向刚度,由图3 可知,随着扣件横向刚度越大,钢轨轨距线横移量变小,扣件承受横向力变大,但变化趋势接近平缓;弹

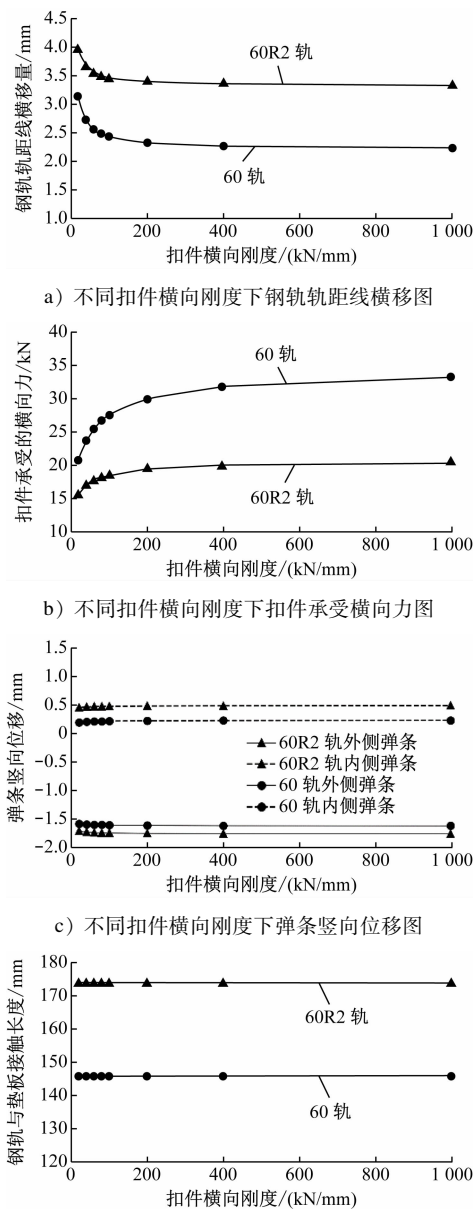


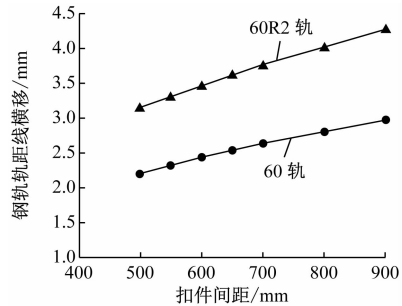
图3 扣件横向刚度变化对钢轨和扣件的影响图

Fig. 3 Influence of fastener lateral stiffness change on rails and fasteners

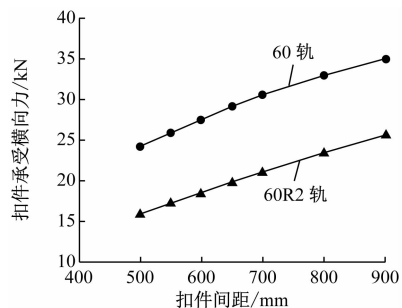
条竖向位移和钢轨与垫板接触长度变化也平缓,说明扣件横向刚度对钢轨倾覆影响较小,由扣件横移带动钢轨横移。扣件承受横向力分配系数 60R2 轨最大约为 0.45,60 轨最大约为 0.74。

3.4 扣件间距影响

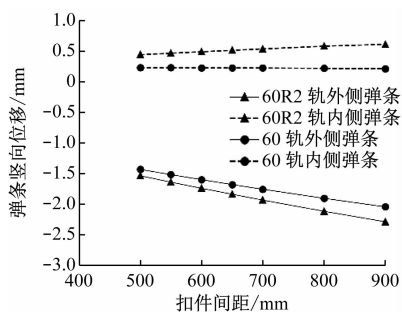
在基准状态下仅改变扣件间距,由图 4 可知,随



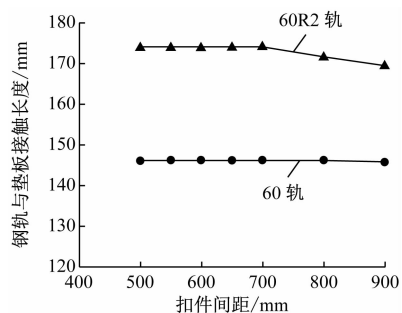
a) 不同扣件间距下钢轨轨距线横移图



b) 不同扣件间距下扣件承受横向力图



c) 不同扣件间距下弹条竖向位移图



d) 不同扣件间距下钢轨与垫板接触长度图

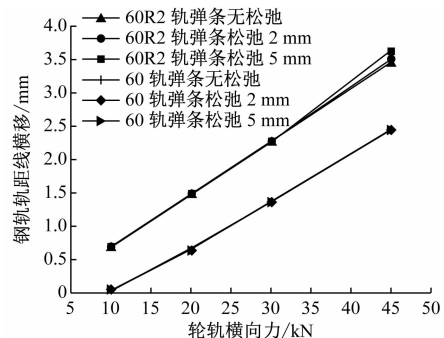
图 4 扣件间距变化对钢轨和扣件的影响图

Fig. 4 Influence of fastener spacing change on rails and fasteners

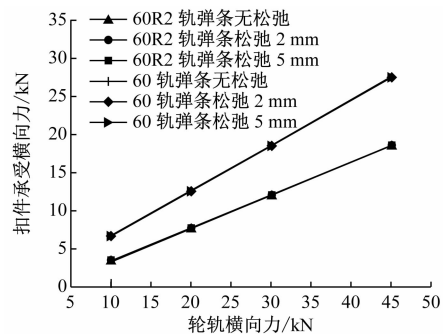
着扣件间距增大,钢轨横移量、扣件承受横向力、外侧弹条位移均变大,内侧弹条位移变化较为平缓,钢轨与垫板接触长度 60 轨变化较为平缓,60R2 轨在较大扣件间距下变小。

3.5 弹条松弛影响

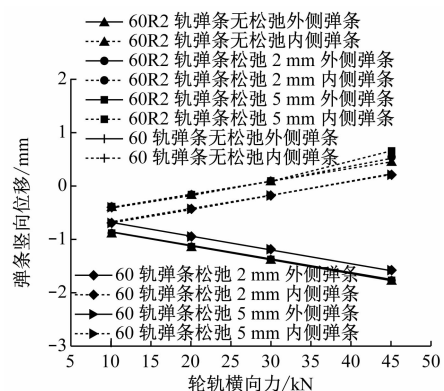
在基准状态下仅改变轮轨横向力,由图 5 可知,随着轮轨横向力变大,钢轨横移、弹条竖向位移及扣件承受横向力都变大;对比弹条无松弛工况,弹条松弛 2 mm 和 5 mm 对轨头横移量、弹条竖向位移影响较小,扣件承受横向力无影响;弹条松弛越大,扣压力变小,垫板的压缩量变小,在较大轮轨横向力作用下,钢轨与垫板的接触长度变小,从而垫板提供的抗倾覆力矩变小,钢轨轨距线横移变大,但差值较小。



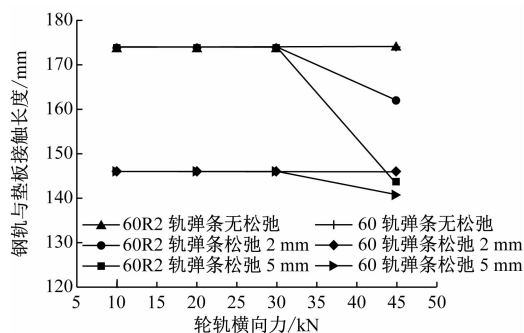
a) 不同弹条松弛量下钢轨轨距线横移图



b) 不同弹条松弛量下扣件承受横向力图



c) 不同弹条松弛量下弹条竖向位移图



d) 不同弹条松弛量下轮轨横向力同钢轨与垫板接触长度图

图5 不同弹条松弛量对钢轨和扣件的影响图

Fig. 5 Influence of different fastener clip looseness on rails and fasteners

4 结语

60 轨扭转刚度约为 60R2 轨的 1.73 倍,且 60 轨的轮轨垂向力偏心距比 60R2 大,同等工况下,60R2 轨承受倾覆力矩大,60R2 轨的横移、弹条竖向位移大于 60 轨,但扣件承受横向力 60R2 轨小于 60 轨。

轨下垫板刚度越小,扣件间距越大,钢轨横移和外侧弹条向下位移越大,尤其在有轨电车小半径横向力较大地段,应适当提高轨下垫板刚度、加密扣件间距,以控制钢轨横移和弹条竖向位移,同时

扣件弹条疲劳试验中应适当提高疲劳振幅。

扣件横向刚度越大,钢轨横移变小,扣件承受横向力变大,但变化趋势逐渐平缓,弹条竖向位移变化影响较小。扣件承受横向力影响因素主要有钢轨轨型、横向刚度、扣件间距,而轨下垫板刚度对其影响较小。

弹条松弛 2 mm 和 5 mm 在本文计算工况下,钢轨横移变化较小,对于不易检查的有轨电车埋入式轨道,在小半径曲线轮轨力较大地段,应定期翻挖检查并拧紧螺栓,以保持规定的弹条离缝值。

参考文献

- [1] 李子睿. 扣件抗钢轨倾翻性能及钢轨倾翻角计算方法的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
LI Zirui. Research on anti-rail turnover performance of fastening and rail turnover calculation method[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010.
- 收稿日期:2021-12-20 修回日期:2022-02-24 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-20 Revised:2022-02-24 Published:2024-06-10
- 通信作者:崔逸鹏,高级工程师,1027539592@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 38 页)

- [4] 王进,史其信. 短时交通预测模型综述[J]. 中国公共安全(学术版), 2005(1): 92.
WANG Jin, SHI Qixin. The summary of the short-term traffic flow predicts model[J]. China Public Security (Academy Edition), 2005(1): 92.
- [5] 黄小平,王岩. 卡尔曼滤波原理及应用: MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
HUANG Xiaoping, WANG Yan. Principle and application of Kalman filter; MATLAB simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [6] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401.
- [7] 徐利民,王锁平,徐诗帆. 一种基于 AFC 数据的短时客流预测动态模型: 202010882983.1[P]. 2021-01-05.
XU Limin, WANG Suoping, XU Shifan. Short-time passenger flow

prediction dynamic model based on AFC data: 202010882983.1 [P]. 2021-01-05.

- [8] 滕靖,王何斐,杨新征,等. 基于乘客主观感知的公交客流拥塞量化表征模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 299.
TENG Jing, WANG Hefei, YANG Xinzhen, et al. Subjective perception based passenger congestion quantification for bus operation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 299.

- 收稿日期:2023-07-15 修回日期:2023-08-11 出版日期:2024-06-10
Received:2023-07-15 Revised:2023-08-11 Published:2024-06-10
- 第一作者:王何斐,工程师,tjhtwhf@163.com
通信作者:滕靖,教授,teng.jing.chn@gmail.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license