

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.028

城市轨道交通 U 型梁运营安全性分析

侯文恒

(中铁十九局集团有限公司, 北京市 100176)

摘要:以 U 型梁为主要研究对象,建立车辆-桥梁耦合动力分析模型,研究了车速、车辆类型和钢弹簧浮置板对高架 U 型梁桥动力响应的影响,分析了车辆和桥梁结构的动力特性,并对地铁列车通过 U 型梁桥系统时的行车安全性进行了评估。计算结果表明:车辆在 50~100 km/h 速度运行时,均满足行车安全性的要求,车辆振动会随着速度的增加而增加;从 U 型梁的行车安全性角度来分析,选取 A 型车比 B 型车更为合理;加入钢弹簧浮置板后,可减小桥梁竖向位移和竖向加速度,但会增加列车振动响应,在钢弹簧浮置板设计过程中,需兼顾车辆和桥梁的运营安全性;改变钢弹簧的刚度对桥梁振动响应的影响较小。

关键词:城市轨道交通;U 型梁;行车安全性;车辆-桥梁耦合动力分析模型;车辆类型;钢弹簧浮置板

中图分类号: U447

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)12-0098-05

0 引言

近些年随着社会经济的迅猛发展,,城市轨道交通在促进城市化进程、缓解交通压力、节约土地资源、增强城市功能等方面发挥出越来越重要的作用。按照走行方式,城市轨道交通主要可分为地下线、地面线和高架线三种,其中高架线因其特有的施工便捷性和经济性等优势而得到了广泛应用。

截至目前,我国轨道交通高架线的截面型式主要包括 T 型梁、箱梁及 U 型梁等。其中 U 型梁在我国轨道交通中应用越来越广泛,也成为国内外专家学者研究的热门方向。杨文茂^[1]等建立轨-桥精细化模型,对不同跨径的 U 型梁进行了分析计算;江振国^[2]等建立了车-轨-桥耦合振动仿真模型,分别对 U 型梁支点、四分点和跨中的竖向及横向振动响应进行了分析;吴亮秦^[3]等采用实体单元进行建模,计算分析了不同编组列车和车速下 U 型梁的振动响应。

然而高架桥由于整体刚度较小,更容易出现振动过大的现象,该问题已成为阻碍高架桥制式发展的重要因素。对于高架线减振,学者们也开展了许多工作。张仁巍^[4]等使用橡胶浮置板,分析减振器刚度对桥梁的影响;Hui^[5]等研究了中、短长度浮置板的减振效果;程珊^[6]等研究了钢弹簧刚度和浮置板密度的减振特性;马龙祥^[7]等分析了预制短板和现浇长板对浮置板结构振动的影响。

收稿日期: 2020-05-20

作者简介: 侯文恒(1968—),男,本科,高级工程师,从事工程项目建设管理工作。

我国国内在地铁运营过程中,大多选用 A 型车和 B 型车,实际工程中会根据结构特点、线路条件等因素对车辆类型进行合理选型。石玉^[8]建立车辆模型,分析不同车型的动力学性能,计算结果表明在线路条件较差时,A 型车的安全性能更好。罗锟^[9]等利用多体动力学软件 UM 建立了 B 型车模型,并从时域和频域角度对梁体的振动进行了系统分析。李泽熙^[10]等采用地铁 B 型车对郑州某地铁线高架区域进行测试,并分析了钢轨和桥面的振动加速度。

综合以上研究背景可以说明,既有研究对高架线 U 型梁在车辆类型选择的对比分析上较少,同时缺乏对于钢弹簧浮置板在 U 型梁上的减振效果分析。因此本文以城市轨道交通 U 型梁为主要研究对象,建立车辆-桥梁耦合动力分析模型,研究了桥梁的动力特性,计算得到了地铁列车通过高架桥时车辆和 U 型梁的动力响应,并对列车运行安全性进行了系统评估,同时对钢弹簧浮置板对 U 型梁的减振效果进行了分析,为今后地铁高架桥的方案设计提供了理论参考和依据。

1 车-桥耦合动力分析模型

车-桥耦合动力分析模型主要包含车辆子系统和桥梁子系统两部分,两者通过轮轨相互作用关系耦合在一起,如图 1 所示。

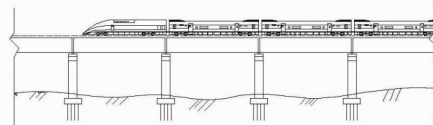


图 1 车-桥耦合动力分析模型

1.1 车辆模型

将每节地铁车辆考虑为一个车体、两个构架和四个轮对,车体与构架、构架与轮对之间由二系悬挂和一系悬挂连接,其中车体和构架均具有 5 个自由度,分别是横摆、侧滚、沉浮、点头和摇头,轮对只考虑横摆,每节车辆总计 19 个自由度。对应的车辆模型如图 2 所示。

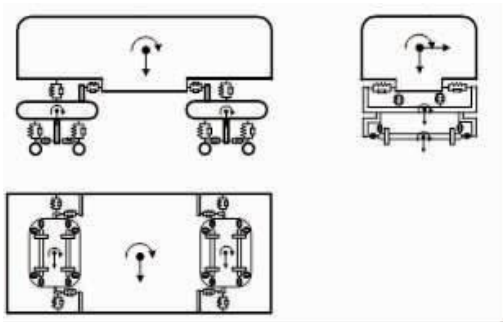


图 2 车辆模型

1.2 轮轨接触关系及轨道不平顺

轮轨相互作用关系是车-桥耦合振动计算的关键因素,在本文计算过程中,竖向采用赫兹非线性接触理论,横向采用简化的 Kalker 线性蠕滑理论^[12]。

轨道不平顺是车-桥耦合振动的主要激励。由于我国尚无专门针对地铁的不平顺谱,因此本文在计算时选取美国五级谱进行计算。高低不平顺样本如图 3 所示。

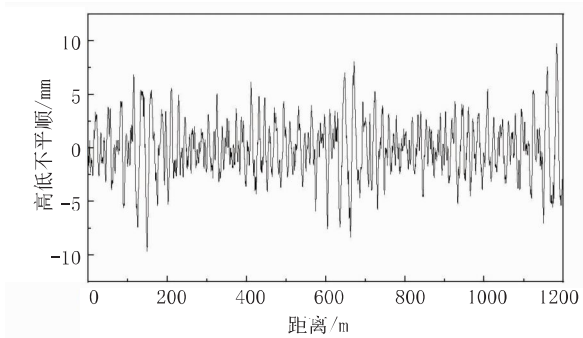


图 3 高低不平顺谱样本

1.3 车-桥耦合动力方程求解

为了得到较高的计算精度,采用直接刚度法组集车-桥耦合动力分析方程,并采用 Newmark- β 法对动力方程进行求解,对于两个子系统的相互影响,采用计算效率较高的全过程迭代法进行求解,其求解步骤如图 4 所示。

轮轨间相互作用力是表达车辆子系统和桥梁子系统之间耦合状态的指标,因此将其作为计算收敛判断的标准。在计算过程中,当第 n 迭代步的计算结果与第 $n+1$ 步的计算结果满足收敛条件时,即可完成迭代计算。

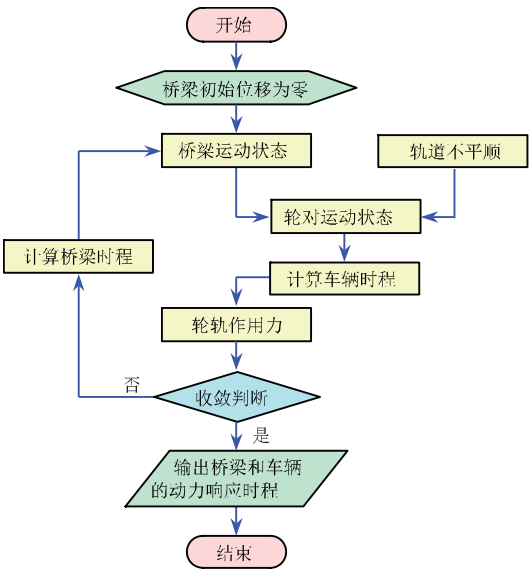


图 4 全过程迭代法流程图

2 模型参数简介

2.1 桥梁模型参数

桥梁模型采用有限元方法进行建模,U 型梁采用壳单元,跨度为 25 m,如需建立浮置板,则浮置板同样采用壳单元建模。本文选取的浮置板为 3.6 m 的预制短板,板与板之间用剪力铰连接,浮置板通过钢弹簧与桥梁进行连接,钢弹簧选用弹簧阻尼单元进行模拟;同时为了考虑列车运行的连续性,将浮置板向外桥两侧延伸一个浮置板的长度。桥梁模型详细参数见表 1,U 型梁截面有效尺寸见表 2,U 型梁和浮置板系统模型如图 5 所示。

表 1 建模参数

项目	单元类型	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 /(kN·m ⁻³)
U 型梁	壳单元	36 000	0.2	26
浮置板	壳单元	36 000	0.2	26
钢弹簧	弹簧单元	206 000	0.2	78

表 2 U 型梁截面有效尺寸 m

项目	底板	有翼缘侧腹板	无翼缘侧腹板	翼缘
厚度	0.3	0.28	0.28	0.31
宽度	4.068	2.02	1.881	0.571

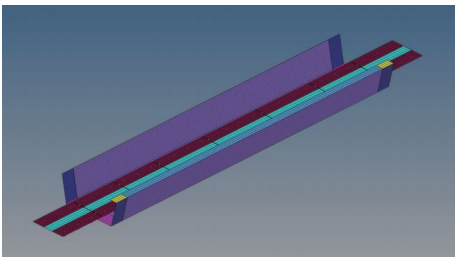


图 5 U 型梁-钢弹簧浮置板系统有限元模型

根据上述桥梁模型，可分别计算得到 U 型梁的前 5 阶频率，见表 3。

表 3 U 型梁模态频率及振型

阶数	频率 /Hz	振型描述
1	5.67	梁整体对称竖弯
2	6.14	腹板横向弯曲，底板竖桥向竖弯
3	14.98	腹板同向扭转
4	16.11	腹板对称同向扭转，底板横桥向竖弯
5	17.21	腹板同向弯曲

2.2 车辆模型参数

在本文计算过程中，地铁车辆选取 A、B 型车，且均考虑两节编组，列车部分参数见表 4。

表 4 车辆主要参数

车辆参数	A 型车	B 型车
车辆全长 /m	22.8	19
车辆定距 /m	15.7	12.6
轴距 /m	2.5	2.2
车体质量 /t	23.825	21.92
构架质量 /t	5.63	2.55
轮对质量 /t	1.654	1.42
一系竖向弹簧刚度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	1 260	1 700
二系竖向弹簧刚度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	490	275

3 数值计算及分析

为了对高架 U 型梁的行车安全性进行评估，采用轮重减载率和脱轨系数来评估车辆运行安全性，其中《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB 5599—1985)中规定轮重减载率的允许限值为 0.6，《铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准》(TB/T 2360—1993)中规定的车辆脱轨系数允许限值为 0.8；以桥梁跨中位移和桥梁跨中加速度来评估桥梁安全性，根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中对桥梁竖向挠度允许值的规定，可计算得到跨度 25 m 桥梁的跨中位移限值为 12.5 mm，《新建时速 200~250 km 客运专线铁路设计暂行规定》中规定，当列车通过时，桥跨结构垂向振动加速度不应超过 0.5g。下面基于上述模型，计算不同工况下车辆系统和桥梁系统的动力响应，并对计算结果进行分析。

3.1 车辆类型对桥梁振动响应的影响

为了分析不同车型对列车运行安全性的影响，对 A、B 型车分别以 50~100 km/h 的速度通过

U 型梁的工况进行计算，详细工况设置见表 5。

表 5 工况设置

模型	车辆	车辆速度 /($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)					
桥梁模型	A 型车	50	60	70	80	90	100
	B 型车	50	60	70	80	90	100

在上述工况下，计算结果如图 6~ 图 9 所示。其中图 8、图 9 为 A、B 型车以 100 km/h 的速度通过桥梁模型的位移和加速度时程对比图。

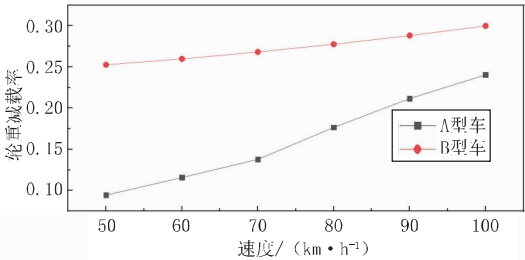


图 6 轮重减载率

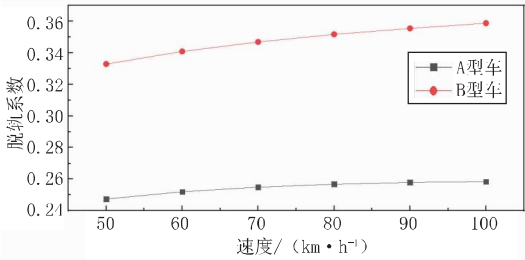


图 7 脱轨系数

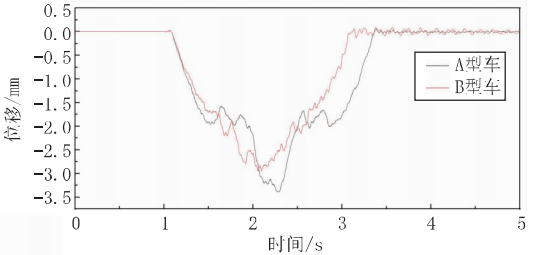


图 8 桥梁跨中竖向位移

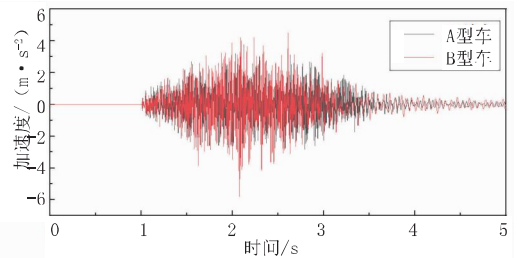


图 9 桥跨中竖向加速度

从图 6 可以看出，A、B 型车轮重减载率随着速度的提高而增加，列车以 50 km/h 运行时，A 型车轮重减载率为 0.094，B 型车为 0.253；列车以 100 km/h 运行时，A 型车轮重减载率为 0.240，B 型车为 0.30；在不同速度下 B 型车的轮重减载率

比 A 型车大,A、B 型车在以 50 km/h 运行时轮重减载率相差最大。由图 7 可见,A、B 型车以 50~100 km/h 的速度通过桥梁时,脱轨系数逐渐提高,在 50 km/h 的速度下,A 型车脱轨系数为 0.247,B 型车脱轨系数为 0.333;在 100 km/h 的速度下,A 型车脱轨系数为 0.258,B 型车脱轨系数为 0.359;在不同速度下,B 型车的脱轨系数比 A 型车大,A、B 型车在以 100 km/h 运行时轮重减载率相差最大,A 型车比 B 型车的轮重减载率降低了 0.101。综合以上分析可以说明,对于该 U 型梁来说,选用 A、B 型车均能满足车辆运行安全性的要求,其中选用 A 型车时车辆运行更加平稳。

从图 8 中可以看出,A 型车以 100 km/h 通过桥梁时,桥梁跨中最大竖向位移值为 3.34 mm,B 型车引起的桥梁跨中最大竖向位移值为 2.94 mm,均满足规范要求,说明选用不同列车通过桥梁时,桥梁均处于安全状态。从图 9 可以发现,列车在 100 km/h 的速度运行下,A 型车引起的桥梁跨中竖向加速度最大值比 B 型车减小了 2.03 m/s²,其中 A 型车引起的竖向加速度最大值为 3.76 m/s²,满足规范要求。由此说明从桥梁安全性角度分析,A 型车更适合于此结构。

3.2 浮置板对桥梁振动响应的影响

为了分析钢弹簧浮置板对车桥耦合振动响应的影响,对比 U 型梁加入钢弹簧浮置板前后桥梁的振动响应,其中钢弹簧的相关设置见表 6。

表 6 钢弹簧设置参数			
刚度 /(kN·m ⁻¹)	阻尼 /(N·s·m ⁻¹)	横向间距 /m	纵向间距 /m
6 300	100 000	1.86	1.2

当 A 型车以 100 km/h 的速度分别通过 U 型梁模型和 U 型梁-钢弹簧浮置板模型时,各部位加速度和位移时程的对比如图 10 和图 11 所示。加入浮置板前后,桥梁跨中竖向加速度和位移时程的对比如图 12 和图 13 所示,车辆响应计算结果见表 7。

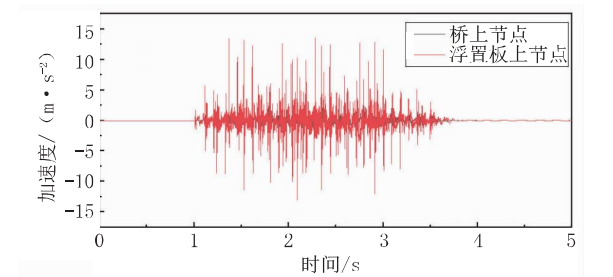


图 10 不同节点竖向加速度

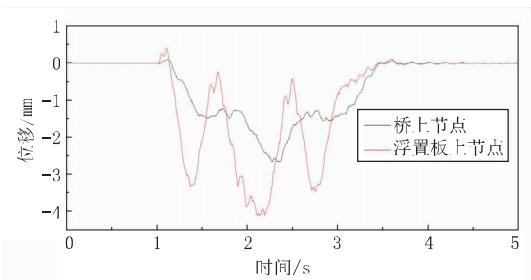


图 11 不同节点竖向位移

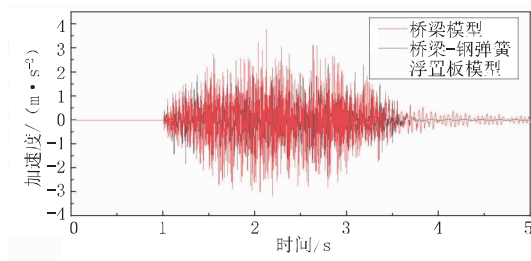


图 12 桥梁跨中节点加速度

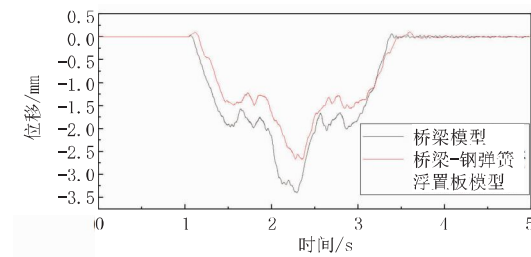


图 13 桥梁跨中竖向位移

表 7 车辆响应计算结果

模型	脱轨系数	轮重减载率
U 型梁-钢弹簧浮置板模型	0.374	0.240
U 型梁模型	0.258	0.240

从图 10 和图 11 可以看出,桥梁加速度最大值比浮置板加速度最大值降低了 11 m/s²,桥梁竖向位移最大值为 2.66 mm,比浮置板竖向位移最大值减小了 1.44 mm,说明列车引起的响应在浮置板和钢弹簧的作用下对桥梁的影响有所降低。

从图 12 可以发现,桥梁跨中加速度幅值在加入浮置板后会降低 1.31 m/s²;从图 13 也可以直观地发现,浮置板的加入减小了桥梁跨中的竖向位移。从表 7 可以发现,加入浮置板后脱轨系数增加了 0.116。由此说明,浮置板的加入可以降低 U 型梁的振动响应,但加剧了列车的振动响应,因此在钢弹簧浮置板的实际工程应用过程中,应控制合理的钢弹簧刚度和布置间距,以同时保证车辆运行安全性和桥梁运行安全性。

3.3 钢弹簧刚度对桥梁振动响应的影响

为了分析钢弹簧刚度对结构产生的影响,工况设置参数见表 8。

表8 工况设置

模型	钢弹簧刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	车辆	速度 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
U型梁-钢弹簧浮置板模型	6 300	A型车	100
	7 300	A型车	100
	8 300	A型车	100

在上述工况下,对列车引起的桥梁竖向位移、竖向速度和竖向加速度进行分析,计算结果如图14~图16所示。

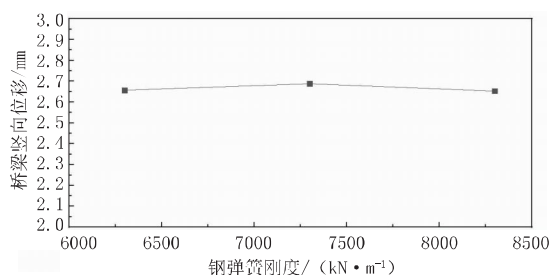


图14 桥梁跨中竖向位移

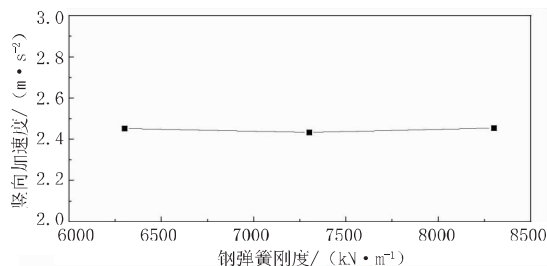


图15 桥梁跨中竖向加速度

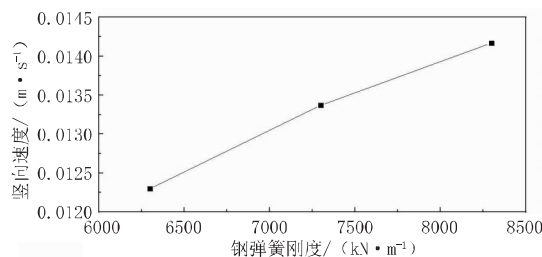


图16 桥梁跨中竖向速度

从图14~图16的计算结果发现,钢弹簧刚度对速度的影响比较明显,对比刚度为6.3 kN/mm和8.3 kN/mm钢弹簧在桥上产生的速度响应,桥梁跨中竖向速度增加了1.87 mm/s,而桥梁的位移和加速度影响不是很明显。从时域角度分析,设计在保证列车平顺的情况下,建议适当降低钢弹簧的刚度,可起到更好的减振效果。

4 结 语

本文建立了U型梁-钢弹簧浮置板模型,对车桥系统进行数值计算,研究了在高架上运行的地铁车辆运行速度、车辆类型和钢弹簧浮置板等因素对车桥振动响应的影响,得出以下结论:

(1) A、B型车以50~100 km/h的速度运行时,车辆振动会随着速度的增加而增加,脱轨系数和轮重减载率均小于允许限值,满足行车安全的要求。

(2) 对于该高架U型梁来说,选取A型车作为运行车辆更为合理。

(3) 在U型梁上增加钢弹簧浮置板后,可增大桥梁运营安全性,但降低车辆运行安全性,在钢弹簧浮置板设计过程中,需兼顾车辆和桥梁的运营安全性,使钢弹簧浮置板在工程应用中能更好地发挥其作用。

(4) 钢弹簧刚度对桥梁振动响应的影响不大,降低钢弹簧刚度可以降低桥梁的速度响应。

参考文献:

- [1] 杨文茂,辛涛,周华龙,等.U型梁上减振垫浮置板轨道系统动力分析[J].铁道工程学报,2019,36(2):44-48.
- [2] 汪振国,雷晓燕,罗锐,等.城市轨道交通高架U型梁车-轨-桥耦合振动分析[J].噪声与振动控制,2017,37(4):132-137.
- [3] 吴亮秦,吴定俊,李奇.城市轨道交通U型梁车桥动力响应分析[J].铁道科学与工程学报,2010,7(6):6-11.
- [4] 张仁巍,陈迎.橡胶浮置板轨道对城市高架箱梁减振特性数值分析[J].三明学院学报,2013,30(6):87-93.
- [5] Hui C K, Ng C F. The effects of floating slab bending resonances on the vibration isolation of rail viaduct[J]. Applied Acoustics, 2008,70(6):830-844.
- [6] 程珊,刘林芽,王少锋.高架钢弹簧浮置板轨道减振特性研究及参数优化[J].噪声与振动控制,2018,38(5):146-150.
- [7] 马龙祥,刘维宁,姜博龙.预制短型与现浇长型浮置板轨道动力特性及服役性能比较研究[J].土木工程学报,2016,49(9):117-122,128.
- [8] 石玉.地铁A、B型车动力学性能对比分析[D].大连:大连交通大学,2017.
- [9] 罗锐,张新亚,雷晓燕.城市轨道交通高架箱梁结构振动特性分析[J].铁道标准设计,2020,64(7):96-100.
- [10] 李泽熙,娄宇,吕佐超,等.高架地铁的轨道结构振动测试及对高架桥的影响分析[J].特种结构,2019,36(3):116-120.
- [11] 夏禾,张楠.车辆与结构动力相互作用[M].北京:科学出版社,2005.