

## 悬挂式个人快速捷运车辆转向架结构强度分析\*

杜子学 吴辰思 文孝霞

(重庆交通大学机电与车辆工程学院, 400074, 重庆)

**摘要** [目的] 悬挂式 PRT(个人快速捷运) 车辆是一种新型交通工具, 转向架作为其核心部件之一, 其结构强度直接影响车辆的安全运行, 因此有必要对其结构强度进行分析。

[方法] 提出了一种新型悬挂式 PRT 车辆转向架, 以其为研究对象进行受力分析, 并构建受力拓扑构型图。基于悬挂式 PRT 的特殊运营场景和走行机理, 重点分析了进弯、进弯制动、转弯、爬坡(坡度为 26%)、车辆前轴右侧轮胎失效、车辆后轴左侧轮胎失效和满载静止等 7 种工况。通过建立动力学模型并分析受力传递路径, 获得了各工况的载荷大小。构建了转向架构架的有限元模型, 计算分析了各工况下的构架强度, 并评估其设计强度是否符合要求。[结果及结论] 形成了一套适用于悬挂式 PRT 车辆转向架的结构强度计算分析方法。计算结果表明, 各工况下转向架的最大应力为 301.9 MPa, 出现在进弯工况下前右连接座与右侧主纵梁连接的焊缝处, 小于材料的许用应力, 符合强度设计要求。

**关键词** 悬挂式个人快速捷运车辆; 转向架; 结构强度

**中图分类号** U260.331

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20230466

## Structural Strength Analysis of Bogie for Suspended PRT Vehicles

DU Zixue, WU Chensi, WEN Xiaoxia

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China)

**Abstract** [Objective] Suspended PRT (personal rapid transit) vehicles represent a new type of transportation, with bogie as one of its core components. The structural strength of the bogie directly impacts the operational safety of the vehicle, making it essential to conduct analysis on structural strength.

[Method] A new type of suspended PRT vehicle bogie is proposed and taken as research object for force analysis, and a force topology configuration diagram is established. Considering the specific operational scenarios and running mechanisms of suspended PRT, seven operating conditions are analyzed in detail: entering a curve, braking while entering a curve, turning, climbing (with a gradient of 26%), vehicle front-axis right-front tire failure, vehicle back-axis left-rear tire failure,

and full-load stationary condition. A dynamics model is developed to analyze the force transmission path, thereby determining the load magnitude for each working condition. A finite element model of the bogie frame is constructed to compute and analyze the structural strength under each working condition, and to assess whether the design strength meets the required standards. [Result & Conclusion] A comprehensive structural strength calculation and analysis method applicable to the bogie of suspended PRT vehicles is established. The calculation results indicate that the maximum stress on the bogie under all condition is 301.9 MPa, occurring at the weld joint between the front right connecting seat and the right main longitudinal beam during the curve entry condition. This value is below the allowable stress of the material, indicating compliance with strength design requirements.

**Key words** suspended PRT vehicle; bogie; structural strength

目前,我国中小城市交通拥堵问题日益严重,已成为亟须解决的重大民生问题<sup>[1]</sup>。为解决该问题,一些学者提出一种从“增量扩张”转向“存量挖潜”<sup>[2]</sup>的“非扩张型”方案。传统城市轨道交通建设周期长、成本高,中小城市难以承担其建设和运营费用。PRT(个人快速捷运)系统的概念最早由美国 Donn Fichter 提出<sup>[3-5]</sup>。该系统具有智能化、小型化、建设成本低、周期短、线路设置灵活等特点<sup>[6]</sup>,已被视为解决城市交通拥堵问题的一种有效方案。因此,对传统 PRT 系统进行优化设计,以适应现代复杂城市环境和交通需求,是一项重要的研究课题。

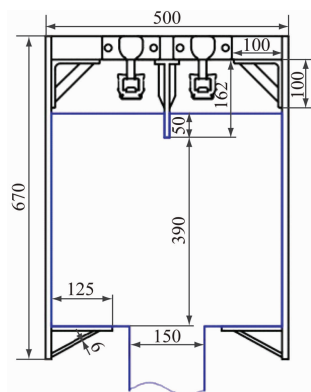
## 1 悬挂式 PRT 车辆介绍

悬挂式 PRT 车辆采用独立编组形式,由 1 组转向架、悬挂系统、控制系统和车体组成。车辆通过智能化无人驾驶实现按需点对点运输,不受地面交通影响,可显著改善中小城市的交通拥堵问题。

\* 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX1264)

### 1.1 轨道梁

悬挂式 PRT 车辆在轨道梁上运行,轨道梁的合理设计直接影响车辆的线路设计和运行安全。新型悬挂式 PRT 轨道梁断面图如图 1 所示。



尺寸单位:mm

注:蓝色线框为车辆转向架的限界。

图 1 新型悬挂式 PRT 轨道梁断面图

Fig. 1 Track beam profile of new type suspended PRT

轨道梁横截面呈倒 U 字型,内部下方两侧为车辆行走的走行轨面;上方中间安装经过专门打磨的 T 形纵梁作为导向轨面,两侧为接触网;轨道梁的两侧壁同时用作稳定轨面。

### 1.2 转向架

悬挂式 PRT 车辆转向架为低合金高强度钢焊接无摇枕转向架。该转向架总体结构(见图 2)主要由转向架构架、前后走行系统、中央悬挂系统、驱动传动系统、牵引控制系统、基础制动装置及车钩装置等组成。

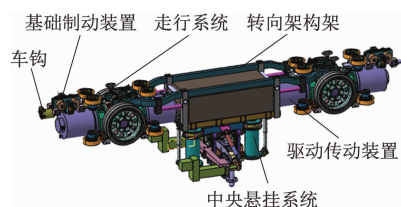


图 2 转向架总体结构

Fig. 2 Bogie overall structure

### 1.3 车辆走行机理

悬挂式 PRT 车辆具有前后两套走行系统,每套走行装置均由 2 个走行轮、4 个导向轮及 4 个稳定轮组成。其转向架被包裹在钢制的轨道梁内,车体悬挂在轨道梁下方,车辆重心在轨道梁以下,理论上不存在脱轨危险。车辆总体设计方案简图如图 3 所示。

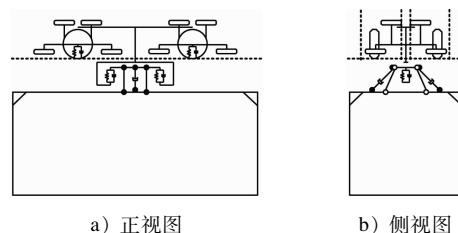


图 3 车辆总体设计方案简图

Fig. 3 Diagram of vehicle overall design scheme

理论上,导向轮与导向轨面无相互作用力。当轨道不平顺引起振动或车辆通过曲线时,导向轮会与导向轨面接触,为车辆提供导向。正常行驶时,稳定轮与稳定轨面不接触;当车辆通过曲线且摆角较大时,稳定轮会与稳定轨面接触,以确保车辆行驶稳定性。

新型悬挂式 PRT 车辆的设计速度为 80 km/h,最小转弯半径为 30 m,最大爬坡坡度为 260‰。该车辆具有转弯半径小、爬坡性能好的特点。

### 1.4 转向架构架

转向架构架是将车辆各系统汇集一起的结构件,整体结构见图 4。除枕梁外其余纵梁和横梁均为钢型材料。其中,矩形截面材料采用 Q345B,所有圆形截面梁均采用 Q235A 的无缝钢管。在运营工况下,构架最大应力需符合设计要求<sup>[7]</sup>。

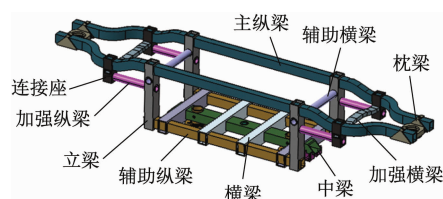


图 4 转向架构架结构

Fig. 4 Bogie frame structure

构架是转向架的核心部件<sup>[8]</sup>,直接影响整个车辆的运行安全性,故有必要对其结构强度进行分析。

## 2 转向架构架受力分析

### 2.1 车辆作用力传递分析

悬挂式 PRT 车辆结构不同于地铁车辆和跨坐式单轨车辆<sup>[9]</sup>。对悬挂式 PRT 车辆转向架构架进行强度计算时,需要进行车辆系统作用力传递分析。

对悬挂式 PRT 车辆进行了受力拓扑分析,见图 5。基于悬挂式 PRT 车辆受力拓扑构型图,对转向架构架进行受力分析。构架的主要传力路径如下。

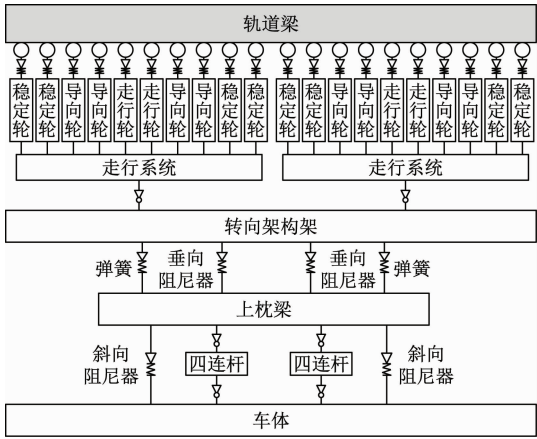


图 5 悬挂式 PRT 车辆受力拓扑构型图  
Fig. 5 Stress topological configuration diagram of suspended PRT vehicle

- 1) 走行系统传力路径:走行轨面→走行轮→齿轮箱→回转中心→枕梁→构架。
- 2) 车体传力路径:车体→悬挂装置→构架。
- 3) 控制箱重力传力路径:控制箱→横梁→构架。

因走行系统能够依靠与构架之间的相对转动(连接方式见图 6),实现车辆顺利通过曲线和道岔,故走行系统传递至转向架的力由  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴的力,以及  $X$  轴、 $Y$  轴的力矩构成。

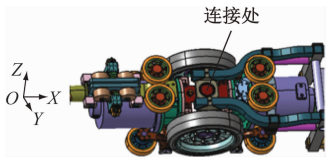


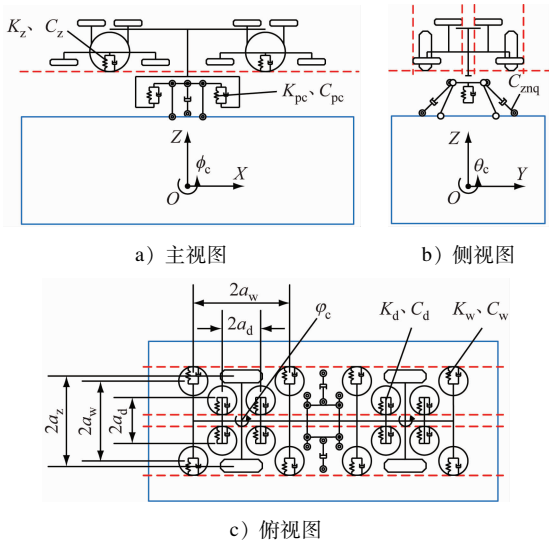
图 6 构架与走行系统连接方式  
Fig. 6 Diagram of frame and running system connection mode

2.2 不同工况下的载荷计算

计算工况包括:进弯工况、进弯制动工况、转弯工况、爬坡工况、车辆前轴右侧轮胎失效工况、车辆后轴左侧轮胎失效工况及满载静止工况等 7 种。

前后枕梁所受载荷均通过多体动力学软件 ADAMS 仿真<sup>[10-14]</sup>计算所得。PRT 车辆空间动力学模型如图 7 所示。各工况下,采用直线轨道时,模拟车辆速度为 80 km/h;车辆制动减速度为 1.25 m/s<sup>2</sup>;转弯工况下,轨道类型为 R15;爬坡工况下,轨道线路类型为直线,坡度为 26%。

通过仿真计算,得到工况 1—工况 6 前枕梁及后枕梁受力情况,如表 1 和表 2 所示。



注: $K_z$ 、 $C_z$ 分别为走行轮的垂向刚度、径向阻尼; $K_d$ 、 $C_d$ 分别为导向轮的垂向刚度和径向阻尼; $K_w$ 、 $C_w$ 分别为稳定轮的垂向刚度和径向阻尼; $K_{pc}$ 、 $C_{pc}$ 分别为弹簧的刚度和垂向阻尼器的阻尼; $C_{znq}$ 为斜向阻尼器的阻尼; $b_z$ 、 $b_d$ 、 $b_w$ 为轮胎的横向间距; $a_z$ 、 $a_d$ 、 $a_w$ 为轮胎的纵向间距; $\phi_c$ 、 $\theta_c$ 、 $\phi_c$ 分别为车体的点头角、侧滚角和摇头角。

图 7 PRT 车辆空间动力学模型  
Fig. 7 PRT vehicle spatial dynamics model

表 1 不同工况下前枕梁受力  
Tab. 1 Front tie beam load under different working conditions

工况	力/N			扭矩/(Nm)	
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴
工况 1	5 689	-1705	8 358	-2 914	-3 804
工况 2	6 375	1 596	8 563	-2 864	-2 917
工况 3	-1 648	1 975	5 272	1 799	1 009
工况 4	-930	19	4 774	49	-276
工况 5	-7 064	-652	8 340	2 301	-4 695
工况 6	3 226	-211	6 662	1 375	-2 129

注:力的正方向定义为与  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴正方向相同;扭矩顺时针方向为正;表 2 同。

表 2 不同工况下后枕梁受力  
Tab. 2 Rear tiebeam load under different working conditions

工况	力/N			扭矩/(Nm)	
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴
工况 1	5 689	-1705	8 358	-2 914	-3 804
工况 2	6 375	1 596	8 563	-2 864	-2 917
工况 3	-1 648	1 975	5 272	1 799	1 009
工况 4	-930	19	4 774	49	-276
工况 5	-7 064	-652	8 340	2 301	-4 695
工况 6	3 226	-211	6 662	1 375	-2 129

满载静止工况垂向载荷主要为车体的重力,取安全系数为 1.4,通过计算得到垂向载荷为 11 200 N。

控制箱置于构架横梁上方,其垂向载荷采用均布载荷的方式施加,取安全系数为 1.4,通过计算得到控制箱均布载荷为 6 917 N/m<sup>3</sup>。

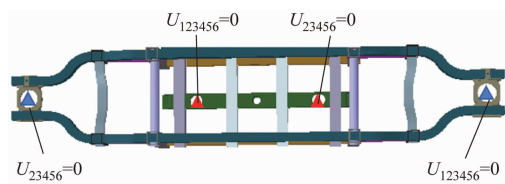
### 3 转向架强度有限元分析

#### 3.1 转向架构架有限元模型

建立转向架构架有限元模型,将建好的三维模型导入 Hyperwork 进行网格划分。枕梁部分采用四面体单元进行实体网格划分,除枕梁之外的其他构造梁均采用 2D 网格进行划分<sup>[15-16]</sup>。

不同工况下的约束条件见图 8。在满载静止工况下,约束前枕梁的 X、Y、Z 方向平移和转动,以及后枕梁的 Y、Z 方向平移和 X、Y、Z 方向转动;在其他工况下,约束横梁前悬吊处的 X、Y、Z 方向平移和转动,以及后悬吊处的 Y、Z 方向平移和 X、Y、Z 方向转动。

根据以上载荷计算及约束条件分析,本文所涉及的加载位置和约束位置主要为前枕梁、后枕梁、横梁面,以及悬吊装置的前后安装处。不同工况下转向架加载位置和约束位置见表 3。



注:U 为位移。

图 8 不同工况下的约束条件

Fig. 8 Constraints under different working conditions

表 3 不同工况下转向架加载位置和约束位置

Tab. 3 Load and constraint positions of bogie under different working conditions

工况	加载位置			约束位置	
工况 1— 工况 6	前枕梁	后枕梁	横梁面	前悬吊 安装处	后悬吊 安装处
工况 7	前悬吊处	后悬吊处	横梁面	前枕梁	后枕梁

#### 3.2 转向架构架强度计算结果

通过计算得到,各工况下转向架构架计算结果,如表 4 所示。

由表 4 可知:7 种工况下构架的最大应力为 301.9 MPa,无缝圆管的最大应力为 214.1 MPa,均

小于材料屈服极限<sup>[17]</sup>。构架的最大应力位置见图 9。

表 4 不同工况下转向架构架计算结果

Tab. 4 Calculation results of bogie frame under different working conditions

名称	工况	最大应力位置	应力/MPa
构架	工况 1	前右连接座与右侧主纵梁相连处	301.9
	工况 2	前右连接座与右侧主纵梁相连处	281.8
	工况 3	前左连接座与左侧主纵梁相连处	196.9
	工况 4	前左连接座与左侧主纵梁相连处	177.8
	工况 5	前左连接座与左侧主纵梁相连处	260.0
	工况 6	后右连接座与右侧主纵梁相连处	228.9
	工况 7	前枕梁与左侧主纵梁相连处	116.1
无缝圆管	工况 1	前右立梁与加强纵梁相连处	214.4
	工况 2	前右立梁与加强纵梁相连处	190.3
	工况 3	前右立梁与加强纵梁相连处	125.6
	工况 4	前右立梁与加强纵梁相连处	100.1
	工况 5	前右立梁与加强纵梁相连处	160.9
	工况 6	前右立梁与加强纵梁相连处	123.4
	工况 7	前右立梁与加强纵梁相连处	77.9

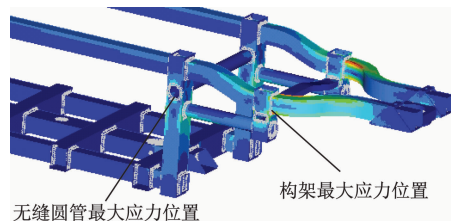


图 9 构架的最大应力位置

Fig. 9 Position of frame maximum stress

### 4 结论

1) 通过对悬挂式 PRT 车辆转向架独特的结构分析,明确了转向架载荷主要来源于走行系统通过转轴传递到枕梁的力、控制箱的重力,以及悬挂系统的力,并确定了车辆所受力的传递路径及构架的受力情况。

2) 通过分析确定了悬挂式 PRT 转向架的强度计算工况,并基于载荷分析提出了一种适用于悬挂式 PRT 车辆转向架的载荷计算方法。

3) 通过对悬挂式 PRT 车辆转向架强度计算得到:该转向架构架的最大应力为 301.9 MPa,小于材料许用应力,最大应力发生在进弯工况下前右连接座与右侧主纵梁相连的焊缝处;无缝圆管的最大应力为 214.1 MPa,小于材料许用应力,最大应力发生



在进弯工况下前右圆管与构架立梁相连的焊缝处。由此可见,构架强度符合设计要求。

## 参考文献

- [1] 沈丽娜,刘傲然,赵新正. 城市化进程中城市空间响应模式与发展策略:以关中平原城市群为例[J]. 同济大学学报(社会科学版), 2021, 32(3): 101.  
SHEN Lina, LIU Aoran, ZHAO Xinzhen. The urban spatial response modes and development strategies in the process of urbanization: based on a case of Guanzhong plain urban agglomeration [J]. Journal of Tongji University (Social Science Section), 2021, 32(3): 101.
- [2] 石爱华,范钟铭. 从“增量扩张”转向“存量挖潜”的建设用地规模调控[J]. 城市规划, 2011, 35(8): 88.  
SHI Aihua, FAN Zhongming. Regulation on construction land scale from increment-led to revitalization-oriented[J]. City Planning Review, 2011, 35(8): 88.
- [3] CLOUGHER W J, FERGIONE AJ, TAUBER R. Personal rapid transit PRT 2000TM system characteristics [C] // Proceedings of the International Conference on Automated People Movers. Las Vegas: ASCE, 1997: 488.
- [4] 俞礼军. 个人快速交通技术发展现状与应用展望[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(9): 60.  
YU Lijun. Application and prospect of personal rapid transit technologies[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(9): 60.
- [5] 袁小伟. PRT 主导的北京朝阳 CBD 交通模式研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2014.  
YUAN Xiaowei. Research on traffic model about PRT in Chaoyang CBD of Beijing [D]. Beijing: North China University of Technology, 2014.
- [6] 安沛君,胡应平. PRT 交通模式在山地的应用[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 388.  
AN Peijun, HU Yingping. Application of PRT transportation mode in mountainous areas [J]. Mountain Research, 2012, 30(4): 388.
- [7] 吴丹,李晋武. 高速转向架构架强度及模态分析研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(1): 161.  
WU Dan, LI Jinwu. Fatigue strength and modal analysis of high-speed bogie frame [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(1): 161.
- [8] 马军,孙秦. 磁悬浮列车走行机构关键部件 DFR 法疲劳寿命估算[J]. 机械设计与制造, 2008(6): 38.  
MA Jun, SUN Qin. Fatigue life estimation of the key part of the maglev running frame based on DFR method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(6): 38.
- [9] 王黎明. PRT 概念车及其附属站台设计研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2010.  
WANG Liming. Research of PRT concept vehicle and its platform architectural design [D]. Beijing: North China University of Technology, 2010.
- [10] 王成国,孟广伟,原亮明,等. 新型高速客车构架的疲劳寿命数值仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(3): 91.  
WANG Chengguo, MENG Guangwei, YUAN Liangming, et al. The analysis of fatigue life of a new type of high-speed passenger car's frame [J]. China Railway Science, 2001, 22(3): 91.
- [11] 孟广伟,王成国,刘敬辉,等. 用虚拟疲劳样机技术分析转 8A 型转向架侧架的疲劳寿命[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 8.  
MENG Guangwei, WANG Chengguo, LIU Jinghui, et al. Analysis of fatigue life of Z8A bogie sideframe with virtual prototype technology [J]. China Railway Science, 2002, 23(4): 8.
- [12] 赵思琪,徐井芒,马前涛,等. 有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 24.  
ZHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, et al. Dynamics performance analysis of tram lateral passing through No. 3 turnout [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 24.
- [13] 刁兴瑶. 转向架构架强度分析及优化[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.  
DIAO Xingfeng. Strength analysis and optimization of bogie frame [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [14] 高浩. 车辆系统刚柔耦合动力学仿真方法及仿真平台研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
GAO Hao. Study on rigid-flexible coupling dynamic simulation method and platform for railway vehicle [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [15] 李宇航,吴斌方,张贝,等. 城市轨道交通工程车转向架构架结构优化设计[J]. 湖北农机化, 2020(10): 125.  
LI Yuhang, WU Binfang, ZHANG Bei, et al. Optimization design of bogie structure for urban rail transit engineering vehicles [J]. Hubei Agricultural Mechanization, 2020(10): 125.
- [16] 张雄飞. 转向架构架强度分析与优化[J]. 交通世界, 2017(8): 150.  
ZHANG Xiongfei. Strength analysis and optimization of bogie frame [J]. Transpo World, 2017(8): 150.
- [17] 雷亚南,黄志辉,戴晓超,等. 某转向架牵引装置强度分析及结构改进[J]. 铁道车辆, 2021, 59(5): 52.  
LEI Yanan, HUANG Zhihui, DAI Xiaochao, et al. Strength analysis and structural improvement of a certain bogie traction device [J]. Rolling Stock, 2021, 59(5): 52.

· 收稿日期:2023-04-18 修回日期:2023-06-07 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-04-18 Revised:2023-06-07 Published:2025-06-10  
· 第一作者:杜子学,教授,aaadzx@163.com  
通信作者:吴辰思,硕士研究生,1340682783@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