

城市轨道交通线路曲线段钢轨磨耗预测^{*}

李书玉¹ 李 龙² 祁亚运³ 李 洁¹ 毛文慧⁴

(1. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 401120, 重庆; 2. 包头北方创业有限责任公司, 包头, 014032;

3. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 400074, 重庆; 4. 中车成都机车车辆有限公司, 610511, 成都//第一作者, 工程师)

摘 要 为了精确预测钢轨磨耗, 以及为工务部门进行钢轨打磨和线路维护提供指导, 建立了城市轨道交通车辆-轨道耦合动力学模型, 采用 Hertz-FASTRIP(FastStrip)-USFD(University of sheffield)模型对钢轨磨耗进行了计算, 对城市轨道交通线路曲线段钢轨磨耗的演变规律进行了预测。结果表明: LM型踏面与 60 kg/m 钢轨(以下简称“60 钢轨”)接触时, 其轮轨接触区域较大, 且横移量较大时轮缘接触频繁。LM型踏面与 60D 钢轨接触时, 其轮轨接触点在轨顶区域比较集中; 相较 60 钢轨接触, 其等效锥度更小, 有利于车辆稳定运行; 轮轨接触点集中在滚动圆附近, 轮对横移量小于 7 mm 时, 接触斑面积较小, 法向应力较大, 磨耗功较小。60D 钢轨减轻了曲线外侧钢轨磨耗, 且其在曲线外侧磨耗整体小于 60 钢轨。通过总重为 5 Mt 时, 缓和曲线段 60D 钢轨最大磨耗深度为 0.48 mm, 相比 60 钢轨减小 44.18%; 圆曲线段 60D 钢轨最大磨耗深度为 1.43 mm, 相比 60 钢轨减小 22.7%。60D 钢轨可以进一步改善轮轨接触关系, 并有效减小城市轨道交通线路曲线段的钢轨磨耗。

关键词 城市轨道交通线路; 曲线段; 轮轨接触; 钢轨磨耗
中图分类号 U213.42

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.010

Rail Wear Prediction of Urban Rail Transit Line Curve Section

LI Shuyu, LI Long, QI Yayun, LI Jie, MAO Wenhui

Abstract To accurately predict rail wear and provide guidance to track work department for rail grinding and line maintenance, an urban rail transit vehicle-track coupling dynamics model is established, using Hertz-FASTRIP(FastStrip)-USFD(University of sheffield) model for rail wear calculation to predict the development law of urban rail transit line curve section rail wear. Results show that: when LM tread contacts 60D rail surface, the wheel-rail contact points are relatively concentrated in rail top area. When LM tread contacts 60 kg/m rail (herein-

after referred to as 60 rail), the wheel-rail contact area is larger, and the wheel flange contact is frequent when the lateral displacement is larger. The equivalent conicity is smaller when LM tread contacts 60D rail surface, which is conducive to the stable operation of the vehicle. LM tread and 60D rail contact points is concentrated near the rolling circle, and the contact patch area is smaller when the lateral displacement is less than 7 mm, the normal stress is larger, and the wear power is smaller. 60D rail reduces the curve outer rail wear, and its overall curve outer rail wear is less than that of 60 rail. When passing the transition curve section with total gross load of 5 Mt, the 60D rail has largest wear depth of 0.48 mm, 44.18% less than that of 60 rail. The maximum wear depth of 60D rail in circular curve section is 1.43 mm, 22.7% less than that of 60 rail. 60D rail can further improve wheel-rail contact relation, effectively reducing urban rail transit line curve section rail wear.

Key words urban rail transit line; curve section; wheel-rail contact; rail wear

First-author's address Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., 401120, Chongqing, China

随着我国城市轨道交通车辆运营速度和运营里程逐年增加, 钢轨磨耗问题不断涌现, 尤其是在曲线段该问题尤为突出。钢轨磨耗引起其型面改变, 而钢轨型面的变化会引起车辆动态特性发生变化, 使得轮轨匹配关系不佳, 导致车辆安全性、平稳性和舒适度降低, 同时进一步影响钢轨疲劳寿命。通过对城市轨道交通钢轨磨耗进行预测仿真, 可为工务部门进行钢轨打磨和线路维护提供指导, 对减轻钢轨磨耗具有重要意义。

国内学者对重载铁路和高速铁路的钢轨磨耗进行了大量研究。文献[1]在 UM 仿真软件中利用

^{*} 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室开放课题(R202201); 公共交通装备设计与系统集成重庆市重点实验室开放课题(CKLPT-EDSI-KFKT-202110)

Specht 模型计算了重载铁路上钢轨磨耗的型面变化规律。文献[2]基于非 Hertz 轮轨接触模型和 Braghin 磨耗模型,计算了 CRH3 动车组经过时的钢轨磨耗。文献[3]利用神经网络算法预测了轮轨磨耗。文献[4]利用钢轨磨耗预测模型分析了考虑钢轨运维策略下货运线路的钢轨磨耗。文献[5]通过对某动车所小半径曲线跟踪测试,研究不同时段下的钢轨型面,并对其磨耗规律进行仿真分析。文献[6]采用 Achard 磨耗模型研究了不同曲线半径下城市轨道交通线路的钢轨磨耗。文献[7]分析了不同超高下的磨耗指数,但未对曲线线路钢轨磨耗型面进行仿真分析。文献[8]分析了轨侧润滑,即不同摩擦系数下小半径曲线的钢轨磨耗。文献[9]通过采用变刚度转臂节点研究了城市轨道交通车辆在小半径曲线的车轮磨耗。上述研究包含了普速铁路、高速铁路及重载铁路的钢轨磨耗,但对于城市轨道交通线路不同线型处钢轨磨耗的演变趋势,以及钢轨型面变化的钢轨磨耗研究较少。

本文采用 Simpack 软件建立了城市轨道交通车辆模型,并通过 Hertz-FASTRIP (FastStrip)-USFD (University of Sheffield) 模型计算了钢轨磨耗,分析了两种钢轨型面在直线、缓和曲线及圆曲线上的磨耗演变规律。

1 城市轨道交通车辆动力学模型

1.1 车辆动力学模型

建立城市轨道交通 A 型车辆动力学模型,如图 1 所示。该模型考虑轮对、轴箱、车体及构架等共计 11 个刚体,各个刚体之间由一系和二系悬挂连结。考虑了轮轨及悬挂元件的非线性。轨道激励采用美国五级谱。

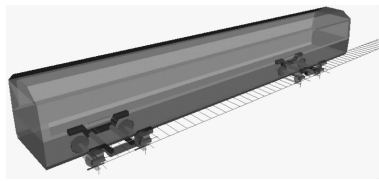
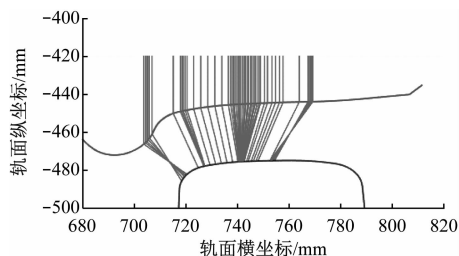


图 1 城市轨道交通 A 型车辆动力学模型

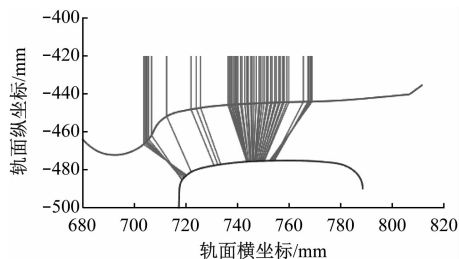
Fig. 1 Dynamics model of urban rail transit A-type vehicle

轮轨接触关系影响着车辆动力学性能,其接触关系的优劣会影响轮轨磨耗。城市轨道交通线路中小半径曲线众多,容易形成钢轨侧磨。我国城市轨道交通线路通常采用的轨面廓型是 60 kg/m 钢轨(以下简称“60 钢轨”),60D 钢轨是在 60 钢轨的

基础上减小轨距角优化而来。城市轨道交通线路通常采用 LM 型和 S1002 型踏面,本文选用 LM 型踏面,将其分别与 60 钢轨和 60D 钢轨接触,其轮轨接触点分布如图 2 所示。从图 2 可以看出:LM 型踏面与 60 钢轨接触时,其轮轨接触点比较分散;当车轮通过曲线时,轮对横移量较大容易形成两点接触,造成钢轨侧磨。LM 型踏面与 60D 钢轨接触时,其轮轨接触点在轨顶区域比较集中,该区域会发生应力集中,使得磨耗较多、侧磨减少。



a) LM 型踏面与 60 钢轨轨面



b) LM 型踏面与 60D 钢轨轨面

图 2 两种钢轨轨面与 LM 型踏面接触点分布

Fig. 2 Distribution of contact points on two rail surfaces and LM treads

1.2 轮轨接触算法

轮轨法向力计算采用 Hertz 接触算法。假设接触斑为椭圆,根据式(1)可得出接触斑法向力 $f_z(x, y)$ 为:

$$f_z(x, y) = \frac{3F_z}{2\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (1)$$

式中:

x, y ——分别为接触斑内部任意点的横、纵坐标;

F_z ——轮轨法向力;

a, b ——分别为接触斑长轴之半和短轴之半。

文献[10]在改进了 Kalker 简化理论的基础上形成了 FASTRIP 算法。该算法进一步提高了 Kalker 简化理论的计算精度,并分别修正了纵向、横向、自旋蠕滑率,以及柔度系数 L 。将该算法与 CONTACT 算法对比发现,其计算精度可以保证。钢轨

磨耗计算时切向力计算采用 FASTRIP 算法。

2 钢轨磨耗模型

钢轨磨耗计算采用 USFD 模型^[11]。该模型基于 R8T(车轮)和 UIC60 900A(钢轨)两种轮轨材料通过试验所得,其磨耗功 W_{USFD} 可以表示为:

$$W_{\text{USFD}} = K_{\text{USFD}} T_{\gamma} / A \quad (2)$$

式中:

A ——接触斑面积;

T_{γ} ——磨耗指数;

K_{USFD} ——磨耗系数。

K_{USFD} 与 T_{γ}/A 的关系可以表示为:

1) 轻微磨耗: $T_{\gamma}/A \leq 10.04 \text{ N/mm}^2$, $W_{\text{USFD}} = 5.3(T_{\gamma}/A)$;

2) 严重磨耗: $10.04 \text{ N/mm}^2 < T_{\gamma}/A \leq 77.2 \text{ N/mm}^2$, $W_{\text{USFD}} = 55 \text{ N/mm}^2$;

3) 破坏性磨耗: $W_{\text{USFD}} = 61.9(T_{\gamma}/A) - 4.7787 \text{ N/mm}^2$ 。

通过 Fastrip 计算接触斑内部的剪切应力后,利用 UDFD 模型可计算出接触斑每个网格上的 W_{USFD} ,则磨耗体积 $\delta_{p(t)}(x, y)$ 可以通过式(3)计算:

$$\delta_{p(t)}(x, y) = \frac{W_{\text{USFD}}}{\rho} \Delta x \quad (3)$$

式中:

ρ ——材料密度,取 7850 kg/m^3 ;

Δx ——网格纵向宽度。

因此,接触斑内纵向的磨耗体积表示为:

$$\int_{-a(y)}^{a(y)} \delta_{p(t)}(x, y) dx = \delta_{p(t), \text{tot}}(y) \quad (4)$$

式中:

$a(y)$ ——接触斑长轴的一半;

$\delta_{p(t), \text{tot}}$ ——1 个接触斑上总的磨耗体积。

整个过程中总的磨耗体积 $W_y(y)$ 可以表示为:

$$W_y(y) = \frac{1}{2\pi R} \int_{t_0}^{t_1} \delta_{p(t), \text{tot}}(y) v dt \quad (5)$$

式中:

R ——滚动圆半径;

t_0 ——积分开始时间;

t_1 ——积分结束时间;

v ——速度;

t ——时间。

钢轨磨耗的计算流程如下:基于车辆动力模型进行轮轨滚动接触参数计算,将所得的蠕滑力、蠕滑率、

法向力及接触斑等参数,采用 FASTRIP 重新计算蠕滑力,并采用 USFD 磨耗模型计算钢轨磨耗深度,形成 Hertz-FASTRIP-USFD 钢轨磨耗计算模型,最后进行轨面更新,并在 Matlab 软件中编写程序。

3 钢轨磨耗计算结果分析

为进一步计算分析钢轨在曲线上的磨耗情况,现设置曲线为:直线长度为 100 m,圆曲线长度为 150 m,曲线半径为 500 m,缓和曲线为 75 m,超高为 120 mm。曲线通过速度取 60 km/h,轨底坡为 1:40。仿真计算时,轨面分别采用 60 钢轨和 60D 钢轨,采用 LM 型踏面。

对缓和曲线内、外侧钢轨磨耗进行对比。图 3 和图 4 分别给出了不同通过总重下 60 钢轨和 60D 钢轨的磨耗型面和磨耗深度。从图 3 和图 4 中可以看出:缓和曲线内、外侧 60D 钢轨磨耗深度均小于 60 钢轨;当通过总重为 5 Mt 时,曲线外侧 60 钢轨磨耗为 0.860 mm,而 60D 钢轨最大磨耗为 0.480 mm,减小了 44.18%;曲线内侧 60 钢轨磨耗为 0.260 mm,而 60D 钢轨最大磨耗为 0.208 mm,减小了 18.4%。曲线外侧钢轨采用 60 钢轨时,磨耗位置在 17~28 mm 范围内,磨耗较为集中,容易形成

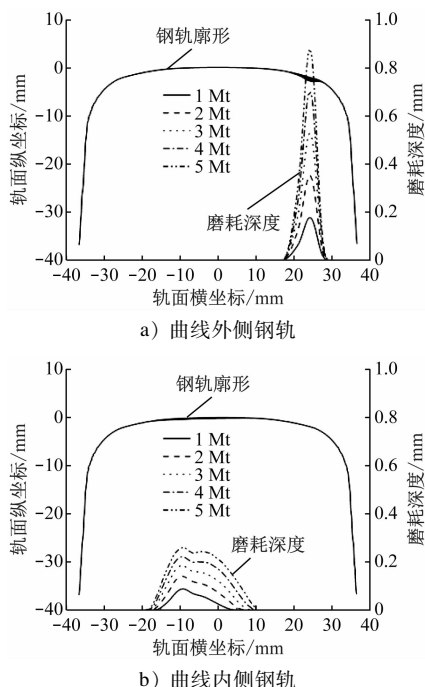


图3 不同通过总重时 60 钢轨在缓和曲线上的磨耗深度和廓形

Fig.3 Wear depth and profile of 60 rail on transition curve with different total passing gross loads

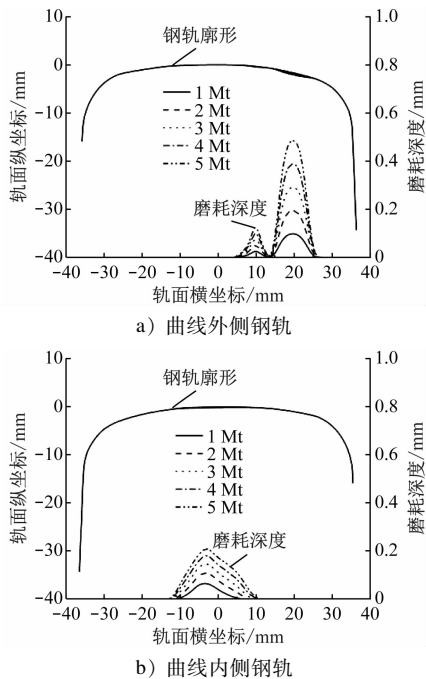


图4 不同通过总重时60D钢轨在缓和曲线上的磨损深度和廓形

Fig. 4 Wear depth and profile of 60D rail on transition curve with different total passing gross loads

侧磨和轨侧疲劳;而曲线外侧采用60D钢轨时,其与LM型踏面的接触范围增大,磨损位置在5~26 mm范围内。可见,曲线内侧60钢轨和60D钢轨与LM型踏面的接触范围相差不大。

圆曲线上钢轨内、外侧磨损如图5和图6所示。从图5和图6中可以看出:当通过总重为5 Mt时,曲线外侧60钢轨的最大磨损深度为1.85 mm,而60D钢轨的最大磨损深度为1.43 mm,减小了22.7%。由此可见,60钢轨磨损较为集中。而曲线内侧60钢轨的最大磨损深度为0.38 mm,60D钢轨的最大磨损深度为0.43 mm。这是由于在内侧曲线上,60D钢轨与LM型踏面的接触点比较集中,因此其磨损深度略大于60钢轨内侧。

曲线内、外侧两种钢轨的磨损深度如图7所示。由图7可知:通过总重为0.35~5.20 Mt时,60D钢轨在直线、圆曲线和缓和曲线工况下,其最大磨损深度整体大于60钢轨;直线工况下该差别较小。曲线内侧钢轨磨损深度整体小于曲线外侧,圆曲线上钢轨磨损深度最大,直线上钢轨磨损深度最小,60D钢轨磨损小于60钢轨。缓和曲线上60D钢轨的磨损略大于60钢轨。

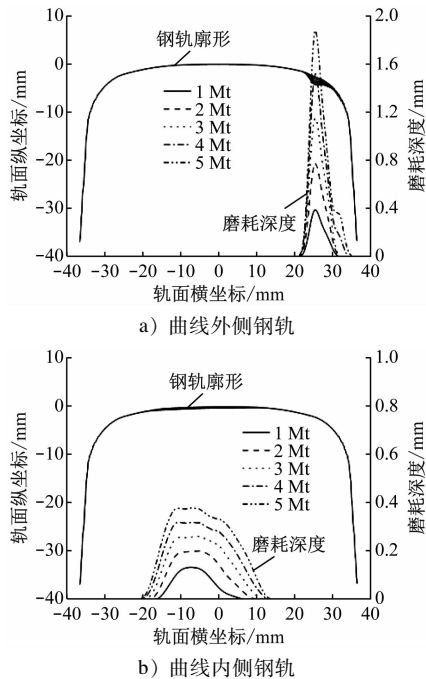


图5 不同通过总重时60钢轨在圆曲线上的磨损深度和廓形

Fig. 5 Wear of depth and profile 60 rail on circular curve with different total passing gross loads

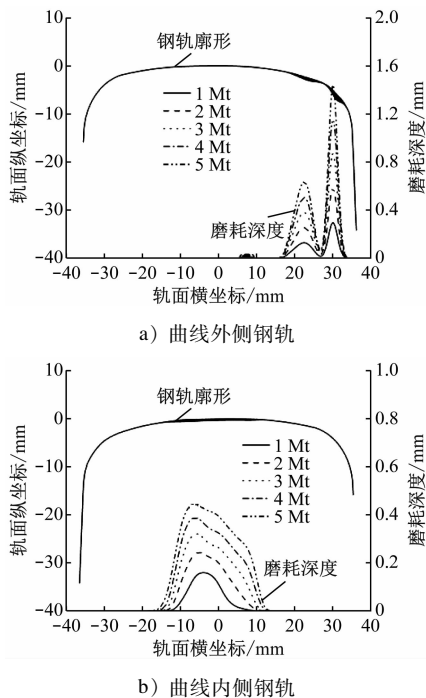
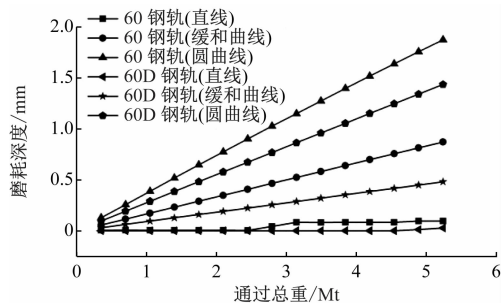
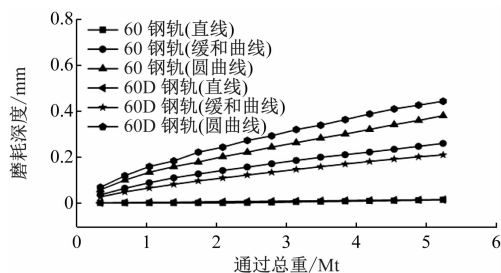


图6 不同通过总重时60D钢轨在圆曲线上的磨损深度和廓形

Fig. 6 Wear depth and profile of 60D rail on circular curve with different total passing gross loads



a) 曲线外侧钢轨最大磨损深度



b) 曲线内侧钢轨最大磨损深度

图7 曲线内、外侧两种钢轨的磨损深度与通过总重关系曲线

Fig.7 Relation curve of curve inner and outer rail wear depth and total passing gross load

4 结论

1) LM 型踏面与 60D 轨面接触时,其轮轨接触点在轨顶区域比较集中。LM 型踏面与 60 钢轨接触时,其轮轨接触区域分布较大,且横移量较大时轮缘接触频繁。同时 LM 型踏面与 60D 轨面接触时等效锥度更小,有利于车辆稳定运行。

2) 当 LM 型踏面与 60D 钢轨接触时,在直线、圆曲线和缓和曲线上钢轨磨损均小于 LM 型踏面与 60 钢轨接触时,减轻了圆曲线和缓和曲线外侧钢轨磨损。通过总重为 5 Mt 时,缓和曲线上钢轨的最大磨损深度为 0.48 mm,相比 60 钢轨减小了 44.18%;圆曲线上钢轨的最大磨损深度为 1.43 mm,相比 60 钢轨减小了 22.7%。

参考文献

[1] 王璞,高亮,蔡小培.重载铁路钢轨磨损演变过程的数值模拟[J].铁道学报,2014,36(10):70.

WANG Pu, GAO Liang, CAI Xiaopei. Numerical simulation of

rail wear evolution of heavy-hual railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10): 70.

[2] 孙宇,翟婉明.钢轨磨损演变预测模型研究[J].铁道学报,2017,39(8):1.

SUN Yu, ZHAI Wanming. A prediction model for rail wear evolution[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 1.

[3] SHEBANI A, IWICKI S. Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks[J]. Wear, 2018, 406: 173.

[4] KRISHNA V V, HOSSEIN-NIA S, CASANUEVA C, et al. Long term rail surface damage considering maintenance interventions[J]. Wear, 2020, 460/461: 203462.

[5] 侯茂锐,王卫东,常崇义,等.动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究[J].铁道学报,2018,40(3):45.

HOU Maorui, WANG Weidong, CHANG Chongyi, et al. A study of rail wear on sharp curves in EMU maintenance depot[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 45.

[6] 王志强,雷震宇.地铁不同曲线半径下钢轨磨耗发展特性[J].铁道建筑,2020,60(10):134.

WANG Zhiqiang, LEI Zhenyu. Development characteristics of rail wear under different curve radius of metro[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 134.

[7] 周素霞,薛蕊.地铁线路超高对轮轨磨耗的影响[J].北京交通大学学报,2015,39(1):101.

ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(1): 101.

[8] 谢晨希,陶功权,陆文教,等.地铁小半径曲线轨侧润滑对钢轨的减磨效果研究[J].润滑与密封,2019,44(6):60.

XIE Chenxi, TAO Gongquan, LU Wenjiao, et al. Effect of lubrication on high rail side wear of metro sharp curves[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(6): 60.

[9] 祁亚运,戴焕云,魏来,等.变刚度转臂定位节点对地铁车辆车轮磨耗的影响[J].振动与冲击,2019,38(6):100.

QI Yayun, DAI Huanyun, WEI Lai, et al. Influence of changing the rigid arm positioning node on the wheel wear of metro vehicles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 100.

[10] SICHANI M S, ENBLOM R, BERG M. A fast wheel-rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation[J]. Wear, 2016, 366: 123.

[11] LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, OLOFSSON U, et al. Mapping railway wheel material wear mechanisms and transitions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(3): 125.

(收稿日期:2020-12-29)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com