

悬浮跨接走行模式下无轨列车的几何循迹策略<sup>\*</sup>

李霞 耿庆厚 孙健

(中车唐山机车车辆有限公司,063099,唐山//第一作者,正高级工程师)

**摘要** 针对悬浮跨接走行模式下无轨列车的循迹控制问题,提出了一种基于车辆转向运动的几何循迹控制策略,即头车前轴采用驾驶员模型控制,其余后轴采用基于几何循迹算法的跟随控制方法。推导了车辆的单轨运动学模型、稳态几何循迹算法和瞬态几何循迹算法的后轴车轮转向角表达式,并通过 Simulink 软件进行数值仿真,验证了所提几何循迹策略的准确性。研究表明:采用稳态几何循迹算法和瞬态几何循迹算法均可实现列车的循迹控制,瞬态几何循迹算法的循迹控制性能略优于稳态几何循迹算法;所提算法可以优化悬浮跨接走行模式下无轨列车的循迹控制策略,提高列车的运行稳定性。

**关键词** 无轨列车;悬浮跨接走行模式;几何循迹策略

**中图分类号** U482.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.05.003

## Geometric Tracking Strategy of ART Tram in Suspension Straddle Running Mode

LI Xia, GENG Qinghou, SUN Jian

**Abstract** Targeting the tracking control problem of ART (autonomous rapid rail transit) tram in suspension straddle running mode, a geometric tracking control strategy based on vehicle steering motion is proposed, that the front axle of the first carriage is controlled by driver's model and the other rear axles are controlled by a following control method based on geometric tracking algorithm. The vehicle monorail kinematics model, steady-state geometric tracking algorithm and transient geometric tracking algorithm of rear axle wheel steering angle expression are derived, and the accuracy of the proposed geometric tracking strategy is verified by Simulink numerical simulation. Research results show that both the steady-state geometric tracking algorithm and the transient geometric tracking algorithm can realize train tracking control, but the latter performs slightly better than the former. The proposed algorithm can optimize the tracking control strategy of ART tram in suspension straddle running mode, elevating the train operation stability.

**Key words** ART tram; suspension straddle running mode;

geometric tracking strategy

**Author's address** CRRC Tangshan Co., Ltd., 063099, Tangshan, China

无轨列车作为一种新型的城市轨道交通运输工具,近年来逐渐进入大众视野并开始成为城市轨道交通领域的热门研究方向。2017年6月2日,中国中车株洲电力机车研究所有限公司发布了全球首列虚拟轨道列车。该车型为100%低地板胶轮走行列车,一般为3节编组,长为31.60 m,宽为2.65 m,高为3.40 m,最多可容纳300多名乘客,达到了中等运量水平。无轨列车的导向系统采用机器视觉方法,对路面的白色虚拟轨道线进行图像识别,通过虚拟轨道跟随技术实现自主导向。无轨列车采用与有轨电车相似的双车头和双侧开门设计,可实现双向行驶。

悬浮跨接走行模式下的无轨列车是一种新型架构方式下的虚拟轨道列车,其采用模块化编组形式,便于根据需要进行不同数量的编组联挂。整车包括端部带有司机室的DM(车体模块)、TM(客室车体模块)和CM(车间连接模块)。CM是客室之间的贯通道,可有效降低车体地板面高度,提高曲线通过性能,便于模块化编组。相邻客室通过悬架走行部和CM实现机械连接,因此被称之为悬浮跨接走行模式。端部转向系统采用拖车转向架,悬架走行部采用动车转向架,整车采用分布式独立驱动技术。

目前,国内外针对汽车的循迹控制已有一定的研究成果。文献[1-4]利用几何模型、数值计算和解析计算的方法针对半挂汽车的转向特性、轨迹偏差和后轴转向控制提出了一些工程实用的方法。文献[5]基于运动学分析,采用最优控制理论设计了半挂车的直线和圆弧轨迹跟随控制器。本文针

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2018YFB1201604-02)

对无轨列车的公路运行环境,借鉴半挂汽车的循迹控制模式,研究了悬浮跨接架构模式的列车循迹控制方法。建立了车辆动力学模型,对比稳态几何循迹和瞬态几何循迹方法,提出了该架构模式下的列车循迹方法。本研究可为悬浮跨接架构下的无轨列车提供动力学计算依据。

## 1 车辆运动学模型

采用单铰接悬架走行部的车辆单轨运动学示意图如图1所示。轴桥中心运动速度及纵、横坐标位置可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = v_i \cos \psi_i \\ y_i = v_i \sin \psi_i \\ v_{i+1} = \frac{v_i \cos(\psi_i - \varphi_i)}{\cos(\psi_{i+1} - \varphi_i)} \end{cases} \quad (1)$$

设车体回转中心与前轴和后轴轴心的纵向距离分别为  $L_1$  和  $L_2$ , 则有:

$$\begin{cases} \varphi_i L_1 = v_i \sin(\psi_i - \varphi_i) \\ \varphi_i L_2 = v_{i+1} \sin(\psi_{i+1} - \varphi_i) \\ L = L_1 + L_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

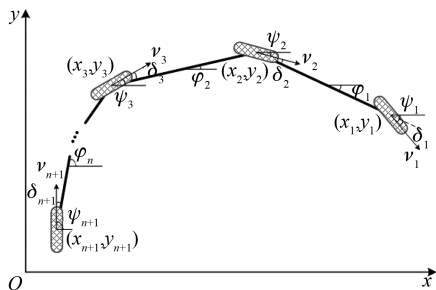
$L$ ——列车轴距。

联立式(1)和式(2)可得:

$$\varphi_i = \frac{v_i \sin(\psi_i - \psi_{i+1})}{L \cos(\psi_{i+1} - \varphi_i)} \quad (3)$$

$$\varphi_i = \psi_i - \delta_i = \psi_{i+1} - \delta_{i+1} \quad (4)$$

$$\psi_{i+1} = \psi_i - \delta_i + \delta_{i+1} \quad (5)$$



注:  $v_i$  为轴桥中心运动速度;  $x_i$  和  $y_i$  为轴桥中心的横、纵坐标;  
 $\psi_i$  为轴桥中心航向角;  $\varphi_i$  为车体质心横摆角;  $\delta_i$  为车轮等效转角。

图1 车辆单轨运动学示意图

Fig. 1 Diagram of vehicle monorail kinematics

## 2 几何循迹策略

本文提出的几何循迹策略分为头车前轴循迹控制和后轴跟随控制。其中,头车前轴循迹控制采

用驾驶员模型,后轴跟随控制采用几何循迹算法。

### 2.1 驾驶员模型

当已知前轴相对于路径的横向偏差时,可以通过不断调整前轮转角实现前轴对路径的跟随。考虑到控制系统的延迟时间,需调整车轮转角。等效转角的实时取值  $\delta_1(t)$  可以表示为:

$$\delta_1(t) = K \varepsilon_{y1}(t)(t - t_d) \quad (6)$$

式中:

$t_d$ ——转向系统的延迟时间;

$K$ ——操纵增益;

$\varepsilon_{y1}(t)$ ——横向预瞄偏差。

对式(6)进行拉氏变换后进行泰勒级数展开,取其前两项进行拉氏逆变换后可以获得关于头车前轮转向角的一阶微分方程:

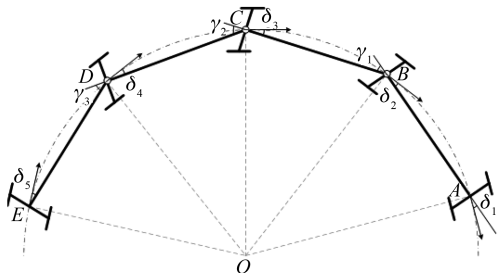
$$\delta_1(t) = -\frac{1}{t_d} \delta_1(t) + \frac{K}{t_d} \varepsilon_{y1}(t) \quad (7)$$

### 2.2 几何循迹算法

#### 2.2.1 稳态几何算法

当仅考虑列车在圆曲线上的稳态运动特性时,稳态圆周运动几何关系示意图如图2所示。在稳态条件下,稳态圆周运动几何关系满足:  $\delta_1 = \pi/2 - \angle OAB$ ;  $\delta_2 = \pi/2 - \angle OBA$ ;  $\delta_3 = \pi/2 - \angle OCB$ ;  $\delta_4 = \pi/2 - \angle ODC$ ;  $\delta_5 = \pi/2 - \angle OED$ ;  $\gamma_1 = \pi - \angle OBA - \angle OBC$ ;  $\gamma_2 = \pi - \angle OCB - \angle OCD$ ;  $\gamma_3 = \pi - \angle ODC - \angle ODE$ 。由于  $\angle OCB = \angle OBA = \angle OAB = \angle OBC = \angle ODC = \angle OED = \angle OCD = \angle ODE$ , 稳态几何算法的后轴车轮转角可以表示为:

$$\begin{cases} \delta_2 = \delta_1 \\ \delta_3 = \gamma_1/2 \\ \delta_4 = \gamma_2/2 \\ \delta_5 = \gamma_3/2 \end{cases} \quad (8)$$



注: A—E 为列车沿圆周稳态运动时车轴位置点;  
O 为轴桥中心的运动几何中心;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  为相邻车体之间的折叠角。

图2 稳态圆周运动几何关系示意图

Fig. 2 Geometric relation of steady-state circular motion

这种稳态几何算法容易在非稳态位置导致各轴桥的不充分循迹,即当列车进入圆曲线时轴桥外偏、驶出圆曲线时轴桥内偏。因此在设计控制算法时,应进一步考虑列车进出圆曲线时的瞬态运动特性。

### 2.2.2 瞬态几何算法

瞬态几何算法需要分别考虑列车在进入和驶出圆曲线时列车的转向几何关系,根据列车在曲线上的不同位置和姿态推导出所有后轴车轮转向的解析表达式。

#### 2.2.2.1 进曲线阶段

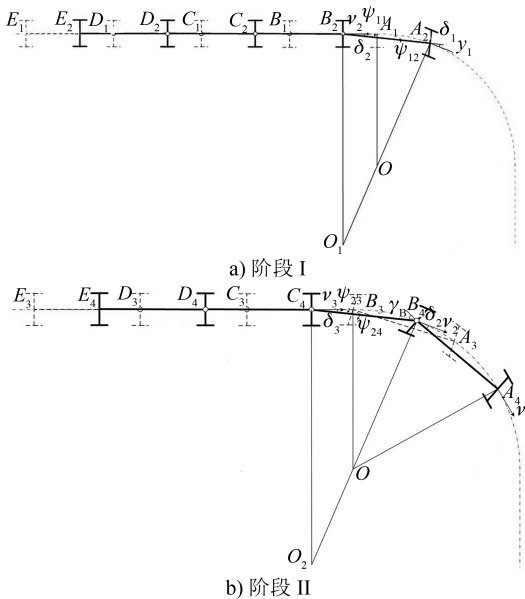
列车进入曲线时的轴桥位置示意图如图 3 所示。当 1 位轴桥在圆曲线上、2 位和 3 位轴桥在直线上时,1 位车体正在进入圆曲线。根据几何关系可知:

$$\angle B_2A_2O_1 = \frac{\pi}{2} - \delta_1 \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2} - (\pi - \angle B_2A_2O_1 - \angle A_1O_2A_2) = \int \frac{v_1}{R} dt - \delta_1 \quad (10)$$

式中:

$R$ ——曲线半径。



注:  $O_1$  为 1 位、2 位轴桥速度瞬心;  $O_2$  为 2 位、3 位轴桥速度瞬心;  $A_1-E_1$  为列车 1 位轴桥即将进入曲线时车轴位置点;  $A_2-E_2$  为列车 1 位轴桥进入曲线,但 2 位轴桥未进入曲线时车轴位置点;  $A_3-E_3$  为列车 2 位轴桥即将进入曲线时车轴位置点;  $A_4-E_4$  为列车 1 位、2 位轴桥进入曲线但 3 位轴桥未进入曲线时车轴位置点;  $\psi_{11}$ 、 $\psi_{12}$ 、 $\psi_{23}$ 、 $\psi_{24}$  为不同位置下的轴桥中心航向角。

图 3 列车进入曲线时的轴桥位置示意图

Fig. 3 Diagram of axle bridge position when train enters the curve

当 1 位和 2 位轴桥在圆曲线上、3 位轴桥在直线上时,2 位车体正在进入圆曲线。根据几何关系可知:

$$\angle A_4B_4O_2 = \frac{\pi}{2} - \delta_2 \quad (11)$$

$$\delta_3 = \frac{\pi}{2} - (\pi - \angle C_4B_4O_2 - \angle C_4O_2B_4) =$$

$$\int \frac{v_2}{R} dt + \delta_2 - \gamma_1 \quad (12)$$

当 1 位、2 位轴桥在圆曲线上处于稳态时满足:

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \\ \delta_1 = \delta_2 = \arcsin \frac{L}{2R} \end{cases} \quad (13)$$

$$\delta_3 = \int \frac{v_2}{R} dt + \arcsin \frac{L}{2R} - \gamma_1 \quad (14)$$

当 3 位、4 位轴桥在进入圆曲线阶段时, $\delta_4$  和  $\delta_5$  可以表示为:

$$\delta_i = \int \frac{v_{i-1}}{R} dt + \arcsin \frac{L}{2R} - \gamma_{i-2} \quad (15)$$

$i = 4, 5$

#### 2.2.2.2 出曲线阶段

车辆驶出曲线时的轴桥位置示意图如图 4 所示。当 1 位轴桥在直线上、2 位和 3 位轴桥在圆曲线上时,1 位车体正在驶出圆曲线。车轮的转向角可以表示为:

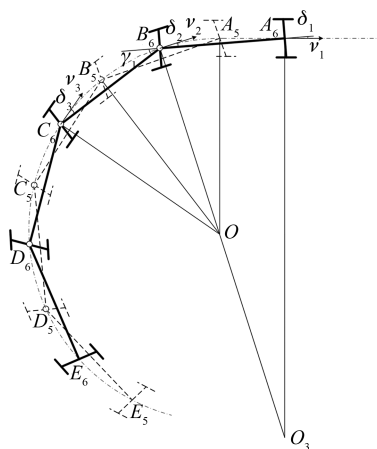
$$\angle A_5A_6B_6 = \delta_1 \quad (16)$$

$$\delta_2 = \arccos \frac{L - \int v_1 dt \cos \delta_1}{\sqrt{(\int v_1 dt)^2 + L^2 - 2L \int v_1 dt \cos \delta_1}} + \arcsin \frac{\sqrt{(\int v_1 dt)^2 + L^2 - 2L \int v_1 dt \cos \delta_1}}{2R} \quad (17)$$

同理,当 2 位、3 位、4 位车体正在驶出圆曲线时,可分别求得  $\delta_3$ 、 $\delta_4$  和  $\delta_5$  的计算公式为:

$$\delta_i = \arccos \frac{L - \int v_{i-1} dt \cos \gamma_{i-2}}{\sqrt{(\int v_{i-1} dt)^2 + L^2 - 2L \int v_{i-1} dt \cos \gamma_{i-2}}} + \arcsin \frac{\sqrt{(\int v_{i-1} dt)^2 + L^2 - 2L \int v_{i-1} dt \cos \gamma_{i-2}}}{2R} \quad (18)$$

$i = 3, 4, 5$



注:  $O_3$  为 1 位、2 位轴桥速度瞬心;  $A_6-E_6$  为列车 1 位轴桥出曲线但 2 位轴桥未进入曲线时车轴位置点。

图 4 车辆驶出曲线时的轴桥位置示意图

Fig. 4 Diagram of axle bridge position when train exits the curve

### 3 仿真结果

在仿真软件 Simulink 中搭建四模块车辆运动学模型和几何循迹算法仿真模型。设列车轴距为 7.0 m, 车体宽度为 2.6 m, 仿真工况为半径为 50 m 的圆曲线, 列车运行速度为 20 km/h。2 种控制算法下, 列车各轴桥车轮转向角的仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知, 1 位轴桥车轮与其余后位轴桥车轮在

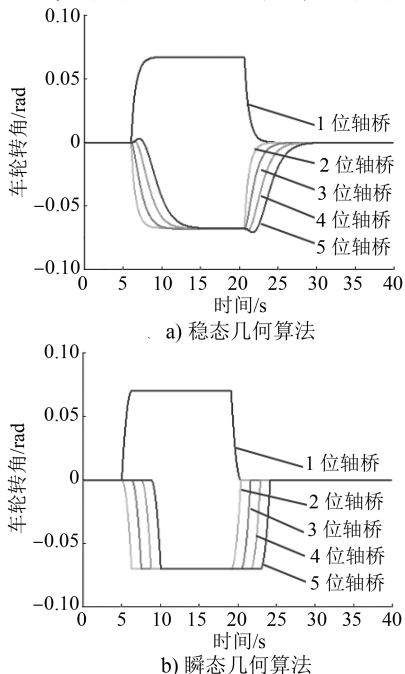


图 5 2 种控制算法下的列车各轴桥车轮转向角仿真结果  
Fig. 5 Wheel steering angle simulation results of train each axle bridge with two control algorithms

圆曲线上的稳态值大小相同、转角方向相反。相比于稳态几何算法,采用瞬态几何算法时的各车轮转角具有较好的一致性和跟随性。

2 种控制算法下,循迹点的横向偏差和航向偏差仿真结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知:采用这 2 种循迹控制算法后,列车具有较好的循迹性能;当列车进入和驶出圆曲线时,循迹点横向偏差和航向偏差出现了峰值;当列车在圆曲线上时,横向偏差和航向偏差值接近为 0。相比于稳态几何算法,采用瞬态几何算法时的各循迹点循迹偏差明显更小,这主要是由于在进出圆曲线时,瞬态几何算法弥补了列车后轴的超前转向作用,有效减小了轴桥因内偏和外偏产生的较大横向偏差和航向偏差。

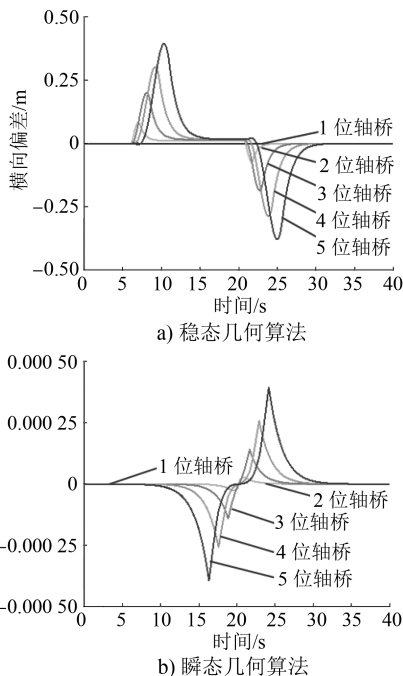


图 6 2 种控制算法下的循迹点横向偏差仿真结果

Fig. 6 Simulation results of tracking points lateral deviation with two control algorithms

2种控制算法下,车间折叠角的仿真结果如图8所示。采用稳态几何算法时,在列车进入圆曲线过程中,2位和3位车体之间、3位和4位车体之间的折叠角出现短暂的负值;在列车驶出圆曲线过程中,2位和3位车体之间、3位和4位车体之间的折叠角出现短暂的超调。这是由于后轴车轮的超前转向导致后位车体提前横摆造成的。车间折叠角的最大值出现在3位和4位车体之间,负向峰值约为 $-0.006\text{ rad}$ ,正向峰值约为 $0.142\text{ rad}$ 。采用瞬态几

何算法时,各位置的车间折叠角变化规律一致且稳态值相同,具有较好的跟随性,稳态值(即最大值)约为 0.140 rad。

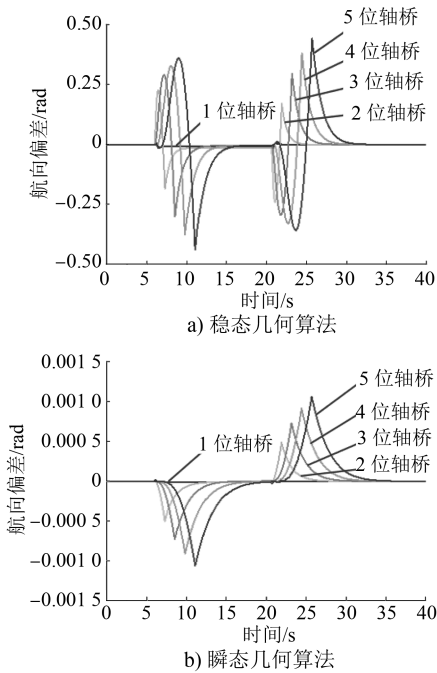


图 7 2 种控制算法下的循迹点航向偏差仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of tracking points course deviation with two control algorithms

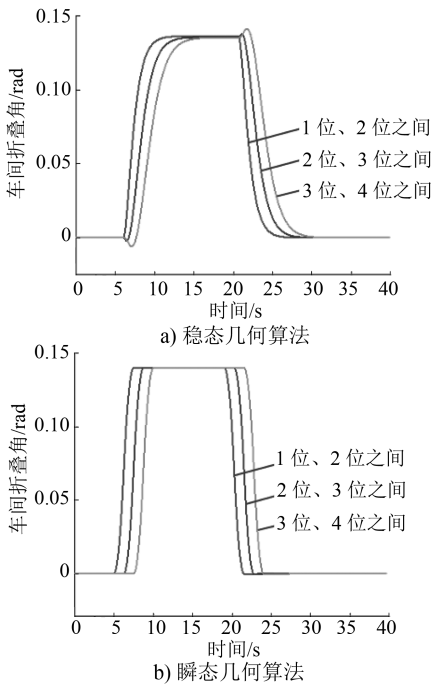


图 8 2 种控制算法下的车间折叠角仿真结果  
Fig. 8 Simulation results of inter-vehicle folding angle with two control algorithms

综上所述,瞬态几何算法可以有效减小列车曲线通过时的车间折叠角峰值,缓解因后位车体提前横摆造成的车间反向折叠和过度折叠,从而减少列车因折叠碰撞发生的失稳现象,提高了列车的运行稳定性。

2 种控制算法下,列车转向通道宽度仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知:采用稳态几何算法时,在列车进出圆曲线过程中,转向通道宽度均出现一个峰值,其中最大转向通道宽度约为 3.47 m;采用瞬态几何算法时,在列车进入圆曲线过程中,转向通道宽度逐渐增大,但在圆曲线上时通道宽度值始终稳定不变,在列车驶出圆曲线过程中转向通道宽度逐渐减小,转向通道的最小宽度约为 2.65 m,与车体最大宽度 2.60 m 较为接近。

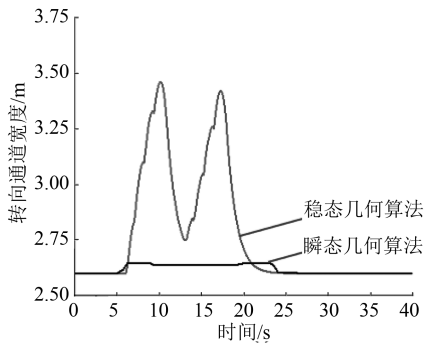


图 9 2 种控制算法下的列车转向通道宽度仿真结果  
Fig. 9 Simulation results of train steering passage width with two control algorithms

## 4 结语

本文介绍了一种悬浮跨接走行模式下的无轨列车结构,推导了车辆动力学模型,最后提出了基于车辆转向运动几何的循迹控制策略。通过 Simulink 仿真软件验证了几何循迹算法的准确性。主要获得以下结论:

- 1) 采用稳态几何算法和瞬态几何算法均可以使列车达到较好的循迹性能。
- 2) 相比于稳态几何算法,瞬态几何算法可以有效地解决列车在进出曲线时后轴的超前转向作用,从而达到最佳的循迹性能和横摆稳定性。同时,列车的转弯通道宽度也有明显的减小。

## 参考文献

[1] 王德杉,谢进荣.半挂汽车列车转向特性的计算方法[J].汽车技术,1990(10): 1.

video image processing and crowd evacuation[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2018.

- [2] 魏万旭,方勇,胡华,等. 基于视频数据挖掘的城市轨道交通车站行人交通行为特征提取系统研究[J]. 铁道运输与经济, 2021,43(8): 119.

WEI Wanxu, FANG Yong, HU Hua, et al. Study on characteristics extraction system of pedestrian traffic behavior for subway stations based on video data mining[J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(8): 119.

- [3] CONG Y, YUAN J, LIU J. Sparse reconstruction cost for abnormal event detection[C]//2011 Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Colorado Springs, CO: IEEE, 2011: 3449.

- [4] WANG C, LIU H. Unusual events detection based on multi-dictionary sparse representation using Kinect [C]//2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne, VIC: IEEE, 2014: 2968.

- [5] LI A, MIAO Z, CEN Y, et al. Abnormal event detection based on sparse reconstruction in crowded scenes[C]//2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Shanghai, China: IEEE, 2016: 1786.

- [6] ADAM A, RIVLIN E, SHIMSHONI I, et al. Robust real-time unusual event detection using multiple fixed-location monitors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008,30(3): 555.

(收稿日期:2020-11-21)

(上接第 11 页)

2) 加快现行标准的修订工作,以更好地满足科学技术发展水平和社会发展的需求。

3) 配套制定外文版标准。国家标准外文版是加强中外标准信息交流和促进对外合作高质量发展的重要支撑,因此应加快各外文版标准的编制工作。

4) 强化标准的实施应用。虽然现行的 3 个国家标准已获得了一定程度的推广应用,但实施效力仍需加强。因此,应进一步加强标准的应用示范工作,建设一些示范项目,既规范了标准的实施应用,又能在实践中进一步研究和完善标准体系,进而在落实标准的同时构建起标准验证技术支撑体系。

## 参考文献

- [1] 任海,陈燕申,秦国栋. 城市轨道交通的非传统安全威胁及技术防范[J]. 城市轨道交通研究, 2009,12(9): 1.

REN Hai, CHEN Yanshen, QIN Guodong. Non-traditional security threat and protective techniques in urban rail transit district [J]. Urban Mass Transit, 2009,12(9): 1.

- [2] 王伟奇,林鑫炜,任海. GB/T 38311—2019《城市轨道交通安全防范通信协议与接口》解读[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 84.

WANG Weiqi, LIN Xinwei, REN Hai. Interpretation of GB/T 38311—2019 communication protocols and interfaces of public security and protection system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2021,24(1): 84.

- [3] GB 51151—2016 编制组. 城市轨道交通公共安全防范系统工程技术规范 GB 51151—2016 实施指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.

Compilation Committee of GB 51151—2016. Implementation guide for the Technical Code for Engineering of Public Security and Protection System of Urban Rail Transit (GB 51151—2016) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.

(收稿日期:2022-06-10)

(上接第 16 页)

WANG Deshan, XIE Jinrong. Calculation method of semi-trailer train steering characteristics [J]. Automobile Technology, 1990(10): 1.

- [2] 裴金. 半挂车复杂路线同轨迹转向的研究[J]. 专用汽车, 1992(2): 6.

PEI Jin. Study on same-trajectory steering of semi-trailer complex route[J]. Special Purpose Vehicle, 1992(2): 6.

- [3] 郑旺辉. 后轮转向半挂汽车列车的轨迹偏差分析[J]. 系统工程与电子技术, 1994,16(6): 72.

ZHENG Wanghui. Analysis of track bias of the automobile train with rear wheel steering[J]. Systems Engineering and Electron-

ics, 1994,16(6): 72.

- [4] 林熊熊. 半挂汽车列车弯路运动轨迹计算机仿真[J]. 汽车工程, 1997,19(1): 60.

LIN Xiongxiang. Computer simulation on trajectory of semi-trailer train on turning path [J]. Automotive Engineering, 1997, 19(1): 60.

- [5] 王佳栋. 汽车列车运动轨迹跟踪控制仿真研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.

WANG Jiadong. The simulation study on the control of the moving track of truck-trailer [D]. Changchun: Jilin University, 2005.

(收稿日期:2020-11-12)