

虚拟轨道自导型运输系统的悬浮跨接走行车辆架构

李辰生^{1,2} 张蕊姣¹ 陈经纬^{1,2}

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山;

2. 河北省轨道车辆转向架技术创新中心, 063035, 唐山//第一作者, 工程师)

摘要 提出了一种虚拟轨道自导型运输系统列车新架构——悬浮跨接走行虚拟轨道列车。介绍了悬浮跨接走行模式的架构型式及关键部件的结构。通过车辆运动学分析, 以及导向力和运动自由度匹配性分析, 讨论了列车结构的循迹充分性; 利用解耦控制理论分析了列车的运动解耦性。采用悬浮跨接走行模式的虚拟轨道列车在理论上可以通过全轮转向控制实现车体各个横向自由度的充分循迹, 从而使列车在轨道上达到最佳位置和姿态; 列车各个走行部可以实现解耦运动, 这表明可以通过在每个走行部只设置一个独立的、局部的控制器即可实现列车的循迹运动。与此同时, 各个走行部之间不存在运动干涉, 有利于提高列车的整体动力学性能。

关键词 虚拟轨道自导型运输系统; 悬浮跨接走行模式; 循迹充分性; 运动解耦性

中图分类号 U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.039

Suspended Straddle Walking Vehicle Architecture for Virtual Rail Self-guided Transport System

LI Chensheng, ZHANG Ruijiao, CHEN Jingwei

Abstract A new train architecture of virtual rail self-guided transport system-suspended straddle walking virtual rail train is presented. The architecture format and key component structure of suspended straddle walking mode are introduced. By means of vehicle kinematics analysis and steering force/motion freedom degree matching analysis, the rail adequacy of train structure is discussed, and the motion decoupling of train is analyzed using decoupling control theory. Virtual rail train with suspension straddle walking mode can theoretically follow the track of each lateral degree of freedom of the train body with full wheel steering control, so that the train can reach the best position and attitude on the rail. The decoupling motion of each moving part of the train can be realized, which indicates that the tracking motion of the train can be realized by setting only an independent and local controller in each moving part. At the same time, there is no motion interference between each mov-

ing part, which is beneficial to improving the overall dynamic performance of the train.

Key words virtual rail self-guided transport system; suspended straddle walking mode; trace adequacy; motion decoupling

First-author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

城市公共交通系统作为城市交通运输的中坚力量, 对于缓解城市交通拥堵, 提高城市道路整体运输能力发挥着重要作用。以 BRT(快速公交)系统为主的较高运量道路公共交通系统, 相比于传统公交车更加高效便捷, 而且部分车型已具备自导向能力, 如荷兰 VDL 集团开发的 Phileas 导向巴士^[1]和法国鲁昂市的 TEOR 系统^[2]。近年来, 有轨电车无轨化设计也成为热门的研究方向。在保留基本的有轨电车辆配置前提下, 将钢轮转向架式走行部替换为橡胶车轮悬架式走行部。与此同时, 取消传统的钢轨, 改之为可被电子识别的虚拟轨道(如磁钉、导航带等)。目前, 典型的虚拟轨道列车系统为中国中车株洲电力机车研究有限公司研制的智能轨道快运系统(ART)。ART 的导向系统采用机器视觉技术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。列车最多可容纳 300 多名乘客, 可以达到中等运量水平^[3-4]。

1 悬浮跨接走行车辆特点分析

本文介绍的悬浮跨接走行车辆是一种新型虚拟轨道自导型运输系统车辆, 适应性较高。其主要特点为: 容易实现 100% 低地板客室, 车辆编组灵活, 运动解耦, 较接受力合理和循迹控制方案灵活多样, 能够适应多种的驱动方式和循迹方式, 技术发展潜力大。

1) 客室 100% 低地板: 悬浮跨接走行架构方案借鉴了 Translohr 有轨电车的架构方案, 可实现

100%低地板客室^[5]。Translohr 有轨电车入门高度为 220 mm,是目前国内入门高度最低的有轨电车;贯通道高度为 400 mm,贯通道设置了 10%的坡道,客室内没有台阶。由于走行部设置在车体之间,Translohr 有轨电车的客室平整,便于车内座椅布置,客室显得完整、美观^[8]。另外,采用悬浮跨接走行架构方案的车体结构可以保持相对的独立性,走行部的结构变动、驱动方式的改变及循迹控制方式的改变都不会对车体结构产生较大改动的需求,方便车体的设计和制造。

2) 编组灵活:跨接走行架构方案采用了模块化编组形式,车体结构有端车车体和中间车车体两种形式,走行部结构有端部走行部和跨接走行部两种。借鉴 Tranlohr 的车体结构,可将端车分为客室和司机室两部分,其中端车的客室结构与中间车体的结构类似,这样做简化了车体结构设计和制造。端部走行部可借鉴技术成熟的重载汽车转向驱动桥结构。中间跨接走行部可借鉴 Translohr 有轨电车中间走行部结构,并可根据循迹控制策略的需要进行结构改进。因此,车辆的整体技术比较成熟。悬浮跨接走行架构方案具有编组灵活的特点,可根据需要灵活地调整编组形式。当采用集中动力(动力集中于端部走行部)时,宜采用 3 模块或 4 模块编组;当采用分布动力时,可采用 3~6 模块编组。另外,由于车辆结构对称,适应于双向运行,循迹控制的策略在上、下行两个方向上保持一致,从而简化了循迹控制策略。

3) 运动解耦:悬浮跨接走行架构方案的最大特点是车体循迹运动的自由度与走行部数目相同,实现了循迹运动的机械解耦。运动解耦的优点是:

(1) 循迹运动可采用解耦控制,降低了循迹控

制的实现难度。解耦控制的优点是,每个走行部的循迹运动不会影响其他走行部的运动,这样每个走行部的循迹控制能够只设置一个独立的、局部的控制器即可,不需要设置一个车辆级的整车控制器;每个走行部的循迹控制器只需要本走行部的位置信息和前车的运动轨迹等局部信息,不需要关注整个车辆的所有相关信息;每个走行部只需要控制自身的运动姿态,不需要协调其他走行部,这样大大简化了循迹控制的实现难度。

(2) 铰接装置受力合理。由于各个走行部的运动是解耦的,不会产生运动干涉问题,因此铰接装置不会因为控制竞态产生附加的内力。

4) 循迹控制方案灵活多样:运动解耦的悬浮跨接走行架构方案的另一个优点是可实现灵活多样的循迹控制方案。可参考的循迹控制方法有:

(1) 转向循迹控制:几何学方法——如基于角传动比的几何循迹方法、纯追踪算法和 Stanly 方法等^[7];运动学方法——如模型预测控制(MPC)方法等^[8];运动学与动力学方法——如低速-PID 控制方法,中高速-LQR 控制方法等^[9]。

(2) 转差循迹控制:如采用非时间参考的运动学循迹控制策略^[10]、采用 Lyapunov 直接法的动力学循迹控制策略等^[11]。

2 悬浮跨接走行车辆架构及关键部件

如图 1 所示,列车采用模块化编组形式,便于根据需要进行不同形式的编组联挂。整车包括端部带有司机室的车体模块(DM)、客室车体模块(TM)和车间连接模块(CM)。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

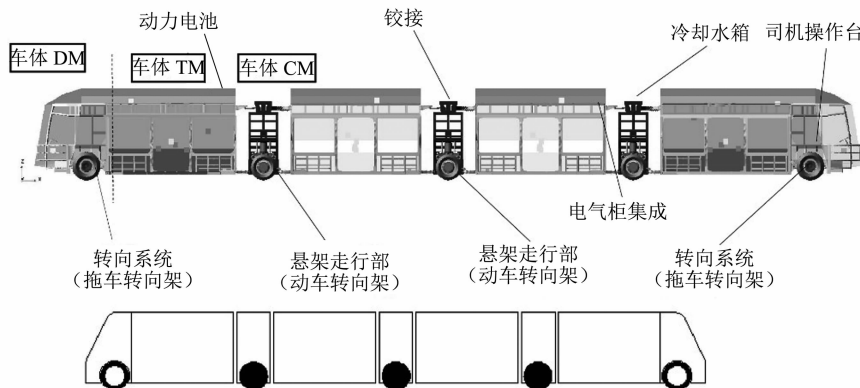


图 1 悬浮跨接走行模式虚拟轨道列车编组型式

Fig. 1 Formation of suspended straddle walking mode virtual rail vehicle

车间连接模块 CM 实现机械连接,因此被称之为悬浮跨接走行模式。端部转向系统为拖车转向架,悬架走行部为动车转向架,采用分布式独立驱动技术。

车体材料为低成本碳钢,采用框架式蒙皮结构,根据 GB 17578—2013《客车上部结构强度要求及试验方法》进行强度校核分析,在强化结构的同时降低车体质量。车体框架设计如图 2 所示。



图 2 车体框架设计

Fig. 2 Design of vehicle body frame

列车采用创新设计的门式悬架跨接走行机构,如图 3 所示。该机构主要由门式转向桥骨架、空气弹簧、垂向减振器、中摆臂、下摆臂、垂向杆、抗侧滚扭杆、制动装置、轮毂架、轮毂电机和车轮构成。采用轮毂电机直接驱动和单侧双车轮设计,提高了列车的运载能力。采用胶轮走行制式,其门架式转向桥骨架起到连接相邻车体模块的作用,并将车体载荷通过二系弹簧传递至走行部。

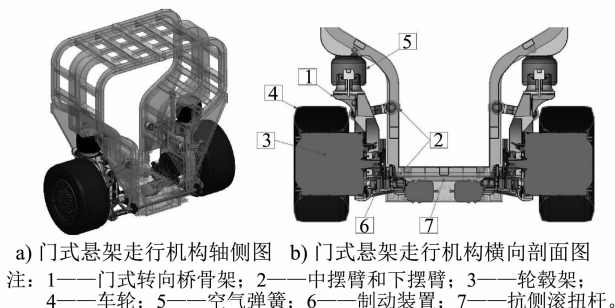


图 3 门式悬架跨接走行机构(动车转向架)

Fig. 3 Door type suspended straddle walking mechanism (motor bogie)

列车采用创新设计的虚拟轨道转向机构作为端部拖车转向架,如图 4 所示。该机构主要由轴桥、转向臂、转向拉杆、摆臂、上拉杆、下拉杆、空气弹簧、垂向减振器、轮毂架和车轮等构成,同时设有转向系,用于司机对车辆转向进行操控。转向系主要由方向盘、转向轴、转向管柱、转向机和智能电液转向系统等构成。转向极限位置的转向器摇臂最大摆角约为 $\pm 47^\circ$ 。

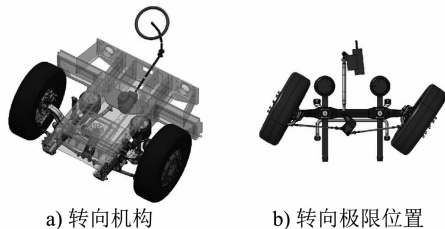


图 4 端部拖车走行部

Fig. 4 End trailer bogie

在编组过程中, TM 与门架式转向桥骨架通过上铰(自由铰和弹性铰)和下铰(固定铰)连接。端部车体前端安装有低地板车钩,用于救援工况下的牵引和推送。铰接装置如图 5 所示。除此之外, TM 与门架式转向桥骨架之间还设有车端转角液压控制装置。这种带转角控制功能的油压减振系统满足转弯时车厢之间的缓冲、转向所需的作用力需求,满足车辆位置偏差后位置调整的辅助功能要求。该转角位置由车辆控制器确定。安装长度为 625 mm,行程约为 ± 130 mm。

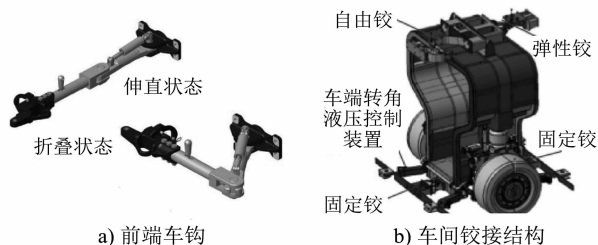


图 5 铰接装置

Fig. 5 Articulated device

列车采用轮毂电机驱动,可减少能量消耗,简化驱动结构,提高传动效率。采用分布式动力方案可以提高列车的坡道牵引能力和电机故障工况下的容错性,采用转差循迹方案可以有效简化转向机构。轮毂电机驱动结构如图 6 所示。

跨接走行虚拟轨道列车可实现双向驾驶、双侧开门,车身采用铰接式连接,具备现代有轨电车的典型特征。车辆总体技术参数如表 1 所示。



图 6 轮毂电机驱动结构
Fig. 6 Hub motor drive structure

表 1 车辆总体技术参数

Tab. 1 General technical parameters of the vehicle

项目	数值	项目	数值
总长/mm	32 000	最大竖曲线半径/m	300
DM 长度/mm	2 850	最大坡度/%	13
TM 长度/mm	5 000	最大轴重/t	11
CM 长度/mm	2 100	司机室地板高度/mm	750
车体宽度/mm	2 500	最小转弯半径/m	12.5
车辆总高(距路面)/mm	3 470	列车最大安全退行速度/(km/h)	10
车辆入口地板高度/mm	300	载客能力/(人/列)	300
CM 模块地板高/mm	450	车钩高度/mm	450
最大设计速度/(km/h)	70	车辆寿命/年	15
最大加速度/(m/s ²)	1.0	加速至 50 km/h 耗时/s	35
紧急制动减速度/(m/s ²)	5.0		

3 循迹充分性

3.1 力学解释

当列车车体运动自由度等于循迹控制输入时,列车将处于充分循迹状态,此时各车体模块处于静定受力状态,达到平衡状态的控制力输入有唯一解,因此可以实现各个自由度的完全循迹。

图 7 分析了列车横向运动自由度和控制输入的匹配性,其中 F_1 和 F_2 为端部走行部的循迹控制输入(等效侧向力), T_1-T_3 为跨接走行部的循迹控制输入(等效横摆力矩)。由图 7 可见,采用转差循迹方案时,其等效的导向控制力个数(5 个)等于车体循迹运动自由度(5 个),此时各车体模块处于静定受力状态,达到平衡状态的控制力输入有唯一解。因此,这种架构方案为充分循迹方案。通过设计合理的循迹控制算法可以实现列车各个自由度到达理想的最佳状态,从而使列车实现最佳的位置和姿态。

3.2 运动学解释

采用单铰接悬架走行部的车辆单轨运动学示意图如图 8 所示。 v_i 代表轴桥中心运动速度, x_i 和 y_i 分别为轴桥中心的纵坐标和横坐标, ψ_i 代表轴桥

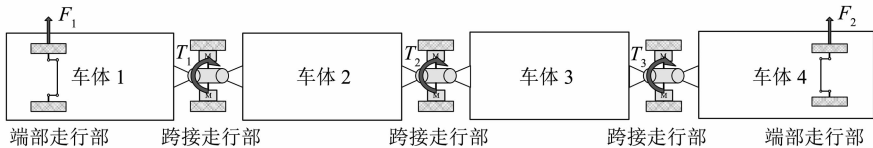


图 7 悬浮跨接走行无轨电车导向控制力示意图

Fig. 7 Schematic diagram of guiding control force of suspended straddle walking trackless vehicle

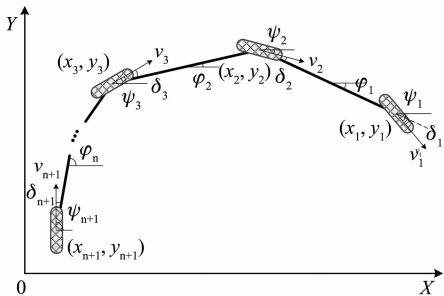


图 8 车辆单轨运动学示意图

Fig. 8 Diagram of vehicle monorail kinematics

中心的航向角, φ_i 代表车体质心的横摆角, δ_i 代表车轮的等效转角。

轴桥中心的速度可表示为:

$$v_i = x_i \cos \psi_i + y_i \sin \psi_i \quad (1)$$

轴桥中心处的横向速度约束为:

$$x_i \sin \psi_i - y_i \cos \psi_i = 0 \quad (2)$$

相邻前后两个轴桥之间的纵向速度约束为:

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

联立式(1)和式(2)可得:

$$\begin{cases} x_i = v_i \cos \psi_i \\ y_i = v_i \sin \psi_i \end{cases} \quad (4)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_i L_f = v_i \sin(\psi_i - \varphi_i) \\ \varphi_i L_r = v_{i+1} \sin(\psi_{i+1} - \varphi_i) \\ L = L_f + L_r \end{cases} \quad (5)$$

式中:

L ——车体回转中心之间长度。

联立式(3)和式(5)可得:

$$\varphi_i = \frac{v_i \sin(\psi_i - \psi_{i+1})}{L \cos(\psi_{i+1} - \varphi_i)} \quad (6)$$

$$\varphi_i = \psi_i - \delta_i = \psi_{i+1} - \delta_{i+1} \quad (7)$$

基于联立式(3)、式(4)和式(6),可根据前轴车轮转向角 δ_i 、 v_i 以及后轴车轮转向角 δ_{i+1} 求解出前轴轴桥中心航向角 ψ_i 、后轴轴桥中心速度 v_{i+1} 以及后轴轴桥中心航向角 ψ_{i+1} ,据此可以获得前后轴轴桥中心的坐标。依此类推,可以获得整列车轴桥中心的轨迹坐标。

从式(4)和式(6)可以看出,列车各个轴桥中心的横向位置 y_i 和车体横摆角 φ_i 同时由车轮转向角 δ_i 和速度 v_i 控制。当给定初始条件和车辆的目标姿态信息后,可以通过求解非线性微分方程组获得各个车轮的最佳转向角。以上分析说明,采用悬浮跨接走行模式的虚拟轨道列车,可以通过适当的车轮转向角控制率实现列车车体各个自由度达到目标状态,即充分循迹。

4 运动解耦性

以两模块列车为例,运用解耦控制理论对悬浮跨接走行虚拟轨道列车的循迹控制解耦性进行分析。由于车辆架构的对称性,以下分析结论同样适用于三模块及以上模块列车。

车体横摆角速度约束为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arcsin \frac{y_1 - y_2}{L} \\ \varphi_2 = \arcsin \frac{y_2 - y_3}{L} \end{cases} \quad (8)$$

根据前文所述 n 模块车辆运动学模型可以得到列车横向运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = v_1 \sin\left(\delta_1 + \arcsin \frac{y_1 - y_2}{L}\right) \\ \dot{y}_2 = \frac{v_1 \cos \delta_1}{\cos \delta_2} \sin\left(\delta_2 + \arcsin \frac{y_1 - y_2}{L}\right) \\ \dot{y}_3 = \frac{v_1 \cos \delta_1 \cos(\delta_1 + \varphi_2 - \varphi_1)}{\cos \delta_2 \cos \delta_3} \sin\left(\delta_3 + \arcsin \frac{y_2 - y_3}{L}\right) \end{cases} \quad (9)$$

构造车辆横向运动状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,

$$\begin{cases} \mathbf{x} = (y_1, y_2, y_3)^T \\ \mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3)^T \\ \mathbf{u} = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)^T \end{cases} \quad (11)$$

经雅可比线性化处理后的系统状态方程矩阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{x_0=0, u_0=0} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{L} & -\frac{v_1}{L} & 0 \\ \frac{v_1}{L} & -\frac{v_1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{v_1}{L} & -\frac{v_1}{L} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{x_0=0, u_0=0} = \begin{pmatrix} v_1 & 0 & 0 \\ 0 & v_1 & 0 \\ 0 & 0 & v_1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{C} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{x_0=0, u_0=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

因此,待解耦系统传递函数矩阵为:

$$\mathbf{W}_0(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{v_1(v_1 + Ls)}{Ls^2} & \frac{-v_1^2}{Ls^2} & 0 \\ \frac{v_1^2}{Ls^2} & \frac{-v_1(v_1 - Ls)}{Ls^2} & 0 \\ \frac{v_1^3}{Ls^2(v_1 + Ls)} & \frac{v_1^2(Ls - v_1)}{Ls^2(v_1 + Ls)} & \frac{v_1 L}{v_1 + Ls} \end{pmatrix} \quad (13)$$

由此(13)可知:

$$\det[\mathbf{W}_0(s)] = \frac{Lv_1^3}{s^2(v_1 + Ls)} \neq 0 \quad (14)$$

根据式(14)可知,待解耦系统可以通过串联前馈补偿器的形式实现解耦^[12]。

5 结语

本文提出了一种具有高适应性的悬浮跨接走行无轨电车架构型式,列车整体架构参考 Translohr 有轨电车。车辆采用模块化设计,编组灵活,容易实现 100% 低地板客室。车辆可以实现运动解耦,因此较接受力合理,可以采用灵活多样的循迹控制方案。

通过对列车进行导向力受力和运动学分析可知,列车全轮转向控制策略与车辆横向运动自由度具有较好的匹配关系,因此可以实现车辆对常

规参考路径的充分循迹。基于车辆运动学模型和解耦控制理论,通过对列车横向运动状态空间表达式的分析可知,列车各个走行部的横向运动之间具有解耦性。因此,在车辆循迹控制过程中相邻车体之间将不存在运动干涉,同时只需要针对每个走行部设计独立的控制器而不需要车辆级的控制器即可实现整车的路径跟随控制。

参考文献

- [1] 张雁,沈建民,袁建光,等. 智能导航自动驾驶巴士——关于斐利亚巴士快速交通车辆的考察报告[J]. 城市公共交通, 2006(2):12.
ZHANG Yan, SHEN Jianmin, YUAN Jianguang, et al. Intelligent guidance and self-driving bus[J]. Urban Public Transport, 2006(2):12.
- [2] J·毛瑞斯,V·珀耶特. 快速公交的自动引导和地理定位[J]. 现代城市轨道交通,2008(1):52.
MAURES J, PAYETTE V. Automatic guidance and geographic allocation of rapid public transport[J]. Modern Urban Rail Transit, 2008(1):52.
- [3] 李永华. 虚拟轨道、超级电容、无人驾驶“智轨列车”汇集了多少黑科技? [J]. 中国经济周刊,2017(24):39.
LI Yonghua. With virtual track, super capacitor, unmanned driving, how many cutting-edge technologies are gathered in ‘smart rail train’ [J]. China Economic Weekly, 2017(24):39.
- [4] 陈楠梓,王宇. ART:中运量城市轨道交通的新解决方案? [J]. 交通建设与管理,2017(11):72.
CHEN Nanping, WANG Yu. ART: new solution to medium capacity urban rail transit[J]. Transport Construction & Management, 2017(11):72.
- [5] 季元进,任利惠,王健. Translohr 有轨电车导向轨轮接触模型研究[J]. 机械工程学报,2016(20):111.
JI Yuanjin, REN Lihui, WANG Jian. Contact model of guiding wheel/rail of Translohr tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016(20):111.
- [6] 任利惠,胡亮亮,侯件件,等. 劳尔有轨电车的导向特性[J]. 城市轨道交通研究,2013(3):53.
REN Lihui, HU Liangliang, HOU Jianjian, et al. Steering mechanism of Translohr tram[J]. Urban Mass Transit, 2013(3):53.
- [7] 熊璐,杨兴,卓桂荣,等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报,2020(10):127.
XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Guirong, et al. Review on motion control of autonomous vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020(10):127.
- [8] BAI G, LIU L, MENG Y, et al. Path tracking of mining vehicles based on nonlinear model predictive control[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7):1372.
- [9] 聂枝根. 基于后轴主动转向与差动制动集成的重型半挂车控制策略研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
NIE Zhigen. Study on articulated heavy vehicle control strategy based on rear axle steering and differential braking integration [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [10] 孙帮成,刘志明,崔涛,等. 一种汽车列车结构及其路径跟踪控制方法[J]. 机械工程学报,2018(24):181.
SUN Bangcheng, LIU Zhiming, CUI Tao, et al. New Structure for train-like vehicle and its path tracking method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(24):181.
- [11] 孙帮成,刘志明,崔涛,等. 汽车列车多轴转向控制方法及仿真研究[J]. 机械工程学报,2019(4):154.
SUN Bangcheng, LIU Zhiming, CUI Tao, et al. Research on multi-axis steering control method and simulation of train-like vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019(4):154.
- [12] 刘豹,唐万生. 现代控制理论(第3版)[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
LIU Bao, TANG Wansheng. Modern Control Theory (3rd edition) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.

(收稿日期:2020-11-15)

(上接第199页)

基本设计原则。地铁列车一旦发生紧急情况,制定安全有效的应急疏散方案、快速合理地组织乘客疏散至安全区域是当务之急。在组织疏散过程中, OCC、站台、信号、车辆、通信和综合监控等各专业需紧密配合,以人为本,保障乘客安全。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会. 城市轨道交通车辆与信号系统接口技术要求(范本)[S]. 北京:中国城市轨道交通协会,2015:10.
- [2] 陈鼎榕. 地铁火灾事故下的安全疏散[J]. 城市轨道交通研究,2003(2):49.
CHEN Dingrong. Safe evacuation under metro conflagration [J]. Urban Mass Transit, 2003(2):49.
- [3] 何理,钟茂华,史聪灵,等. 地铁突发事件下乘客疏散行为调查研究[J]. 北京:中国安全生产科学技术,2009(1):53.
HE Li, ZHONG Maohua, SHI Congling, et al. Investigation on evacuation behavior of passengers in metro emergency [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009(1):53.

(收稿日期:2020-02-04)

Technical Equipment Professional Committee of China Associa-