

基于 Radau 伪谱法的储能式有轨电车速度优化控制^{*}

李德宏^{1,2} 朱博维^{1,2} 刘欢³

(1. 中铁建云南投资有限公司, 650220, 昆明; 2. 中国铁建昆仑投资集团有限公司, 610040, 成都;

3. 昆明理工大学, 650500, 昆明//第一作者, 正高级工程师)

摘要 优化有轨电车运行状态是一种简单、可靠、有效降低有轨电车能耗的方法。鉴于有轨电车站间红绿灯对其运行状态的影响,以及通过优化有轨电车的速度轨迹使其在不停车的前提下顺畅通过交叉口等仍缺少研究的现状,以储能式有轨电车为研究对象,建立了基于场景的环境模型和列车运动学模型。以有轨电车在行驶过程中的总能耗为优化目标,根据其出站时和到站时的状态以及红绿灯的配时信息建立模型约束,采用 Radau 伪谱法优化有轨电车的速度轨迹,实现行驶过程中的总能耗最小。仿真验证表明,该算法能使有轨电车平顺地通过信号交叉口,避免因在红灯时间窗到达停车线造成的急加速、急减速等行为,总能耗减少了 23.45%。

关键词 储能式有轨电车; 速度控制; Radau 伪谱法

中图分类号 U482.109

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.050

Optimal Control of Energy-storage Tram Speed Based on Radau Pseudo-spectral Method

LI Dehong, ZHU Bowei, LIU Huan

Abstract Optimizing the running state of tram is a simple, reliable and effective method to reduce the energy consumption of tram. However, there is still a lack of relevant research on tram passing through intersection smoothly without stopping, while considering the influence of traffic lights on the running state of tram between stations and by optimizing the speed trajectory of tram. Taking energy-storage tram as research object, the scene based environment model and train kinematics model are established. Taking the total energy consumption of tram in the running process as the optimization objective, model constraints are established according to the tram exit/entry states and the timing information of traffic lights. Radau pseudo-spectral method is adopted to optimize the speed trajectory of tram to achieve the minimum total energy consumption in the running process. Simulation results show that the algorithm en-

ables the tram to pass through the signalized intersection smoothly, rapid acceleration and deceleration caused by reaching the stop line at the red-light time window are avoided, and the total energy consumption is reduced by 23.45%.

Key words energy-storage tram; speed control; Radau pseudo-spectral method

First-author's address China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., 650220, Kunming, China

随着城市轨道交通的发展,城市轨道交通系统的能耗不断增加,因此,很有必要研究其节能减排方法。目前,轨道交通的主要节能方法有提升电机效率、降低列车阻力及优化列车速度等^[1]。其中,优化列车运行状态是一种有效、简单、可靠的方法,它不需要额外的基础设施,而是通过优化列车速度和牵引力分配来提高交通效率。通过优化列车站间速度曲线,可以降低列车的牵引能耗,从而降低轨道交通系统的总能耗。

目前,国内外学者对有轨电车站间速度的优化问题已经开展了大量的研究。文献[2]将列车的运行状态分为牵引、巡航、惰性、刹车等4个状态,采用极大值原理求解有轨电车的最优速度,取得很好的节能效果。文献[3]针对节能速度在不同运行时刻下的变化,提出了基本遗传算法的能耗优化算法,该方法能够显著降低列车运行能耗。文献[4]以节能为列车的最佳控制目标,采用基于极大值原理的间接法求解最佳控制策略,从而得到最优速度;但该方法在约束条件较多时难以实用。文献[5]采用动态规划研究了列车的最佳速度,发现该方法在路程较短的情况下才具有在线优化作用。文献[6]采用控制参数化的方法研究了列车的速度,该方法在小规模情景时可以取得较好结果。文献[7]基于移动闭塞的高速列车运行曲线,以乘客舒适度更高和

^{*} 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交教科便[2021]85号)

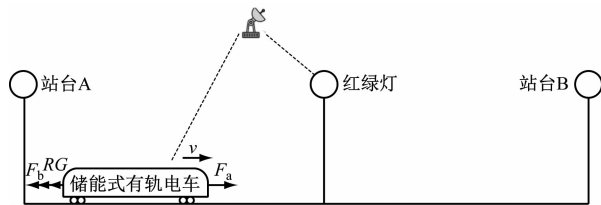
列车节能为目标,采用一种改进的多目标粒子群算法来求解最优速度。

上述研究对有轨电车的速度优化控制进行了大量研究,但城市里有轨电车往往与机动车共用红绿灯,如何考虑站台之间的红绿灯对有轨电车运行状态的影响,以及如何优化有轨电车的速度轨迹使其在不停车的前提下顺畅通过交叉口等仍缺少相关研究。为此,本文以储能式有轨电车为研究对象,考虑有轨电车的制动能量回收、限速、红绿灯、最大加速度、最大输出功率等实际约束,研究有轨电车在站间通过红绿灯的速度优化控制过程;构建以时间为自变量,以牵引力/制动力为控制变量,以运行能耗为目标函数的优化模型;采用 GPOPS (通用伪谱优化软件)求解有轨电车的的速度,为有轨电车运行提供参考速度曲线和最优控制输入,有效降低有轨电车站间运行的牵引能耗。

1 有轨电车站间速度优化控制模型

1.1 问题描述

本研究涉及的有轨电车运行场景如图 1 所示。有轨电车从 A 站台以初速度 v_0 向 B 站台行驶,行驶过程中要经过红绿灯十字路口,红灯亮时有轨电车必须停车。红绿灯到 A 站台的距离为 s_1 ,红绿灯到 B 站台的距离为 s_2 。有轨电车在行驶过程中,其路段的 ICU(交叉口控制单元)向列车发送下一个红绿灯的信号配时方案,此时有轨电车通过优化牵引力输出优化自身的速度轨迹,使其在绿灯相位下高效地通过交叉口,并实现牵引力能耗最小。



注: F_a 为有轨电车的牵引力; F_b 为有轨电车的制动力; R 为列车运行时的基本阻力; G 为列车运行时的线路附着阻力; v 为有轨电车的运行速度。

图 1 有轨电车运行场景

Fig. 1 Tram running scene

1.2 有轨电车站间速度优化控制模型的建立

为了便于描述储能式有轨电车运行的优化控制问题,本文拟对有轨电车及其运行环境作如下简化:① 有轨电车的运行轨道坡度为 0,且为直线行

驶;② 有轨列车运行过程中储能系统的充放电效率、传动系统的机电效率、制动能量回收效率等参数均为常数;③ 不考虑辅助功率对有轨电车运行能耗的影响;④ 有轨电车的牵引力和制动力满足储能式有轨电车牵引和电制动特性曲线。

为快速高效求解有轨电车运行的最优控制问题,本研究只考虑有轨电车直线行驶条件下的纵向运动学过程,忽略横向控制对能耗的影响。基于牛顿第二定律及相关微分关系,可以推导出有轨电车运行过程中位移、速度、时间、牵引力、制动力的关系:

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = (F_a - F_b - R(v) - G(s)) / ((1 + \lambda)m) \quad (2)$$

其中:

$$R(v) = \alpha + \beta v + \chi v^2 \quad (3)$$

$$G(s) = [i(s) + 600/r]mg \quad (4)$$

式中:

s ——有轨电车的运行距离, m;

v ——有轨电车运行的速度, m/s;

t ——有轨电车运行的时间, s;

m ——有轨电车的质量, t;

λ ——有轨电车回转质量系数;

F_a, F_b ——分别表示有轨电车的牵引力和制动力, N;

$R(v)$ ——列车运行时的基本阻力^[8], N;

$G(s)$ ——列车运行时的线路附着阻力^[8], 包括转弯阻力和坡道阻力等, N;

α, β, χ ——基本阻力系数, 与列车的形状和质量等有关, 可由经验公式得到;

$i(s)$ ——坡道坡度, %;

r ——轨道的转弯半径, m;

g ——重力加速度, m/s²。

有轨电车速度优化的目标为储能系统的总能耗最小:

$$E = \int_0^{t_f} (p_a - p_b) dt \quad (5)$$

其中:

$$P_a = \frac{F_a v}{\mu_g u_m u_i u_{dis} u_{dc}} \quad (6)$$

$$P_b = \varepsilon F_b v \mu_g u_m u_i u_{ch} u_{dc} \quad (7)$$

式中:

E ——储能系统的总能耗;

P_a ——储能系统为提供牵引力而放电时的输出功率;

P_b ——有轨电车制动时,储能系统能量回收的输入功率;

μ_g ——齿轮箱的传动效率;

u_m ——电机效率;

u_i ——逆变器效率;

u_{dis} ——储能系统的放电效率;

u_{dc} ——DC/DC 变换器效率;

u_{ch} ——回收能量时储能系统的充电效率;

ε ——刹车时的能量回收利用率;

t_r ——终端时刻。

考虑有轨电车的能力限制,行驶过程中的速度、加速度及最大牵引力和制动力需满足如下约束:

$$0 \leq v(t) \leq v_{\max} \quad (8)$$

$$a_{\min} \leq a(t) \leq a_{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq F_a \leq F_{a,\max} \quad (10)$$

$$F_{b,\min} \leq F_b \leq 0 \quad (11)$$

式中:

v_{\max} ——有轨电车的最高车速;

a_{\min} ——有轨电车的最小加速度;

a_{\max} ——有轨电车的最大加速度;

$F_{b,\min}$ ——有轨电车的最小制动力;

$F_{a,\max}$ ——有轨电车的最大牵引力。

由于有轨电车在通过交叉路口时可能加/减速等待红绿灯,这样会消耗过多的能量。为了降低有

轨电车的能耗,有必要优化有轨电车通过红绿灯的速度,使有轨电车在不停车的情况下通过红绿灯。为此,需添加红绿灯相位配时有对轨电车速度的约束:

$$\{v_{\text{low}}, v_{\text{high}}\} = \left\{ \frac{D}{t_r}, \frac{D}{t_g} \right\} \cap \{v_{\min}, v_{\max}\} \quad (12)$$

式中:

v_{\min} ——有轨电车的最低车速;

$v_{\text{low}}, v_{\text{high}}$ ——分别为有轨电压在绿灯相位下不停车通过交叉口的最小和最大速度;

D ——出发点到红绿灯的距离;

t_g ——当前时刻距下一个绿灯开始的时间;

t_r ——当前时刻距下一个绿灯结束的时间。

2 有轨电车速度优化求解算法

储能式有轨电车运行情况复杂,且相邻步长的牵引力/制动力可能发生突变。Radau 伪谱法对于在相邻步长内容易发生突变的最优控制问题能更精确和高效地求解^[9]。Radau 伪谱法结构简单,且呈指数收敛。因此,本文采用自适应 Radau 伪谱法(以下简称“伪谱法”)进行求解,并通过求解器 GPOPS 实现^[10]。

GPOPS 是基于伪谱法的采用 Matlab 软件求最优解的工具。其有固定的结构,主要由主函数、连接方程函数、微分代数函数及性能指标函数等构成。本文模型与 GPOPS 结构的对应关系如图 2 所示。

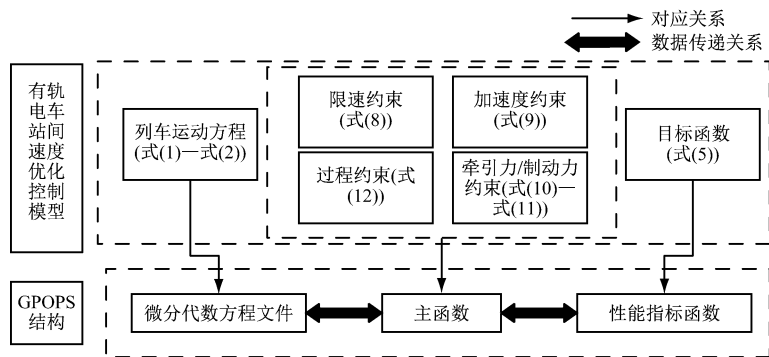


图 2 有轨电车站间速度优化控制模型与 GPOPS 结构的对应关系

Fig. 2 Corresponding relationship between the model of tram speed optimal control between stops and GPOPS structure

GPOPS 是以列向量的方式来进行计算,以提高运算速度^[11],故本文还需将模型中的约束转换为列向量形式。将式(1)与式(2)描述为:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(u(t), \mathbf{x}(t), t) = \left[\frac{dx_1}{dt} \frac{dx_2}{dt} \right]^T \quad (13)$$

式中:

$u(t)$ ——控制变量, t 为输入量(有轨电车运行的时间);

$\mathbf{x}(t)$ ——状态向量;

x_1, x_2 ——状态向量 \mathbf{x} 的两个取值,分别为 s, v 。

此外,由于限速约束、加速度约束和变量取值约束均为路径约束,则这3类约束可以合并表示为:

$$\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \leq \mathbf{q}_{\max} \quad (14)$$

其中:

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = [x_2 \quad dx_1/dx_2 \quad u_1 \quad u_2] \quad (15)$$

$$\mathbf{q}_{\min} = [0 \quad a_{\min} \quad 0 \quad 0]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{q}_{\max} = [v_{\max}(t) \quad a_{\max} \quad F_{a,\max} \quad F_{b,\max}]^T \quad (17)$$

式中:

\mathbf{q}_{\min} 、 \mathbf{q}_{\max} ——分别为3类约束合并后的最小与最大边界;

u_1 、 u_2 ——控制变量 u 的两个取值,分别为 F_a 、 F_b 。

伪谱法将连续时间最优控制问题转化为一个非线性规划问题。经离散变换得到的非线性规划问题为:寻找最优控制变量 F_a 和 F_b ,使性能指标函数(见式(5))最小,同时满足式(8)一式(12)的约束。性能指标函数中,状态函数和控制函数是使用1组正交多项式(切比雪夫或拉格朗日多项式)逼近的,其中指定的配置点可使用动力学的配置与积分拉格朗日代价项的正交近似。具体的求解流程如图3所示^[12]。

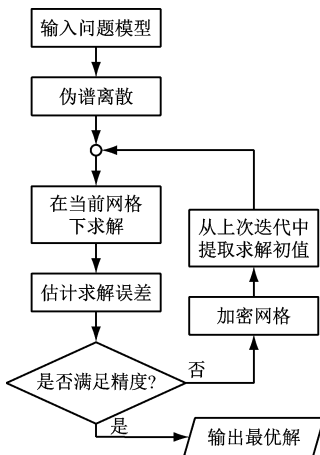


图3 有轨电车速度优化求解算法流程

Fig. 3 Process of tram speed optimal solution algorithm

3 有轨车站间速度优化控制模型仿真分析

3.1 仿真对象

对于储能式有轨电车自动驾驶算法仿真中涉及的列车相关参数进行设置。以某公司研制的超级电容储能式有轨电车作为列车对象^[13],该有轨电车编组为W-M-T-W(W为带司机室的动车,M为动车,

T为拖车),如图4所示。

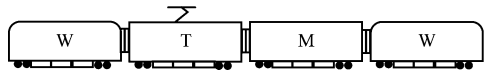


图4 超级电容储能式有轨电车编组示意图

Fig. 4 Diagram of supercapacitor energy-storage tram marshalling

3.2 仿真参数

有轨电车从A站台向B站台行驶^[14],A站台距红绿灯的距离为1 km,红绿灯距B站台的距离为1 km;红绿灯的周期为120 s,单个周期内红灯和绿灯的持续时间均为60 s;有轨电车的定员编组质量为80 t,车长为36 m,质量回转系数为0.06;有轨电车的基本运行阻力系数分别为6.891 0、0.091 2和0.004 5;坡道千分数为0,轨道为直线;重力加速度为9.81 m/s²;齿轮箱传动效率为0.9;电机效率为0.9;逆变器效率为0.9;储能系统的放电效率为0.85;DC/DC变换器效率为0.9;制动回收能量时储能系统的充电效率为0.8;有轨电车刹车时能量回收利用率0.74;有轨电车行驶过程中最大速度为20 m/s,最大加速度为1.2 m/s²,最小加速度为-1 m/s²;有轨电车最大牵引力为94 kN,最大制动力为-110 kN。

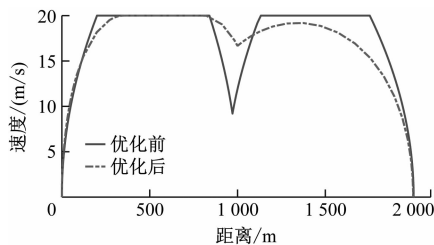
3.3 仿真结果分析

为验证该算法的有效性,设置了对照组。对照组采用常加速度行驶,即加速度在其最大值范围内随机生成。根据式(1)、式(2)和式(5)分别计算出对照组中有轨电车的行驶轨迹、行驶速度及能耗,用以验证该算法的有效性。有轨电车的最优速度通过Matlab软件中的GPOPS进行求解^[15]。

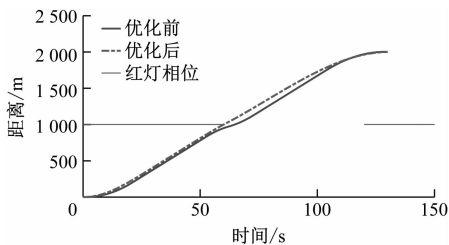
图5为有轨电车优化前后速度与距离对比。由图5可见,储能式有轨电车从站台A以0的初速度行驶,在未采取优化的情况下,采用常加速度行驶,在距离红绿灯较远时以最高速度行驶,牵引力较大(见图6);当有轨电车行驶到822 m时急减速,其速度在11 s内从20 m/s降到9.2 m/s,在通过红绿灯后又急加速运行,加速幅度大且过于频繁,乘客舒适度较差且能量损耗较为严重。有轨电车速度被优化后,其从站台A出发时,全程能接收到下一个红绿灯的信号配时信息,此时开始进行速度轨迹优化。相比于优化前,优化后有轨电车速度变化较为缓慢。特别是接近红绿灯时,其速度在11 s内仅降

低了 3.33 m/s , 并以 16.67 m/s 的速度快速通过红绿灯。通过红绿灯后缓慢加速行驶, 整个运行过程中加减速幅度较小, 即加速度与减速度都较小, 避

免了因在红灯时间窗到达红绿灯停车线而造成的急减速、急加速和停车行为, 牵引力和制动力的变化幅度亦较小, 乘客几乎无明显感觉。



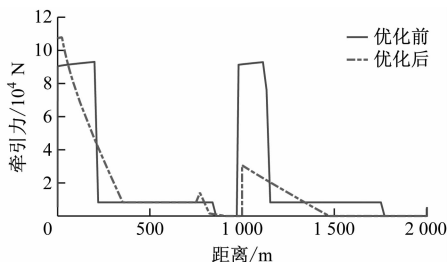
a) 速度



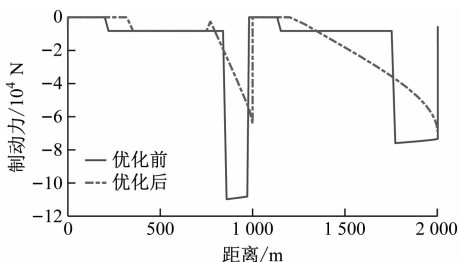
b) 距离

图5 有轨电车优化前后速度与距离对比

Fig. 5 Comparison of tram speed and distance before and after optimization



a) 牵引力



b) 制动力

图6 有轨电车优化前后牵引力与制动力对比

Fig. 6 Comparison of traction and braking force before and after tram optimization

图7对比了有轨电车优化前后的行驶能耗, 能耗公式具体见式(5)。由图7可见, 优化前有轨电车在通过红绿灯时的急加速行为极大地增加了列车的能耗; 优化后有轨电车的能耗轨迹较平缓, 未出现能耗剧变, 说明本文提出的优化算法可以明显降低列车行驶过程中的能耗; 有轨电车优化后较优化前能耗降低了 23.45% , 在保证列车准时到站的情况下, 可避免列车在红绿灯交叉口的急减速、急加速和停车行为, 保证乘客乘车的舒适度和安全性。

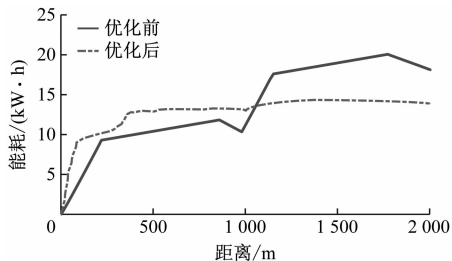


图7 有轨电车优化前后动态能耗对比

Fig. 7 Comparison of dynamic energy consumption before and after tram optimization

4 结语

本文以储能式有轨电车的能耗优化为目标, 建

立了带有信号交叉口的环境模型和有轨电车的运动学模型。在满足有轨电车的速度、牵引力/制动力、加速度和到站时间等约束, 以及起始和终止条件下, 采用伪谱法对自动驾驶的储能式有轨电车速度轨迹优化问题求解, 实现了有轨电车在全局求解性能上的最优, 有轨电车优化前较优化后能耗降低了 23.45% 。本文只考虑了自动驾驶的储能式有轨电车在两站台且仅含单个红绿灯的轨道上行驶的情况, 后续将进一步研究在多站台且含多个红绿灯的轨道上行驶的情况。

参考文献

- [1] 李盛, 杨晓光. 现代有轨电车与道路协调控制方法[J]. 城市轨道交通研究, 2005(4): 43.
LI Sheng, YANG Xiaoguang. Harmonious control of modern tramway and road system[J]. Urban Mass Transit, 2005(4): 43.
- [2] 黎冬平. 苏州市现代有轨电车线网规划(评审稿)[R]. 上海: 上海市城市建设设计研究总院, 2014.
LI Dongping. Suzhou modern tram line network planning[R]. Shanghai: Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, 2014.
- [3] 李元坤, 苗彦英. 国外现代有轨电车建设发展的启示[J]. 城

- 市轨道交通研究,2013(6):29.
- LI Yuankun, MIAO Yanying. Enlightenment of modern tram construction and development in foreign countries[J]. Urban Mass Transit, 2013(6):29.
- [4] 卫超. 现代有轨电车的适应性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- WEI Chao. Research on the adaptability of modern tram[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [5] 陆锡明, 李娜. 科学理性地发展有轨电车[J]. 城市交通, 2013(6):19.
- LU Ximing, LI Na. Rational and sustainable development of streetcars[J]. Urban Transport of China, 2013(6):19.
- [6] CORNET N, 李依庆, 华凌晨. 现代化有轨电车系统在中国城市的发展前景[J]. 现代城市轨道交通, 2008(6):60.
- CORNET N, LI Yiqing, HUA Lingchen. Development prospects of modern tram systems in Chinese cities[J]. Modern Urban Rail Transit, 2008(6):60.
- [7] 胡婷婷. 现代有轨电车与常规公交线路协调方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- HU Tingting. Research on the method of line coordination between modern tram and bus[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [8] 彭庆艳, 余欢, 王斌, 等. 嘉兴市综合交通规划[R]. 上海: 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 2021.
- PENG Qingyan, YU Huan, WANG Bin, et al. Jiaxing comprehensive transportation planning[R]. Shanghai: Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, 2021.
- [9] 周小华, 路静, 王敏. 武汉光谷现代有轨电车与其他交通方式的一体化衔接[J]. 都市快轨交通, 2016(5):116.
- ZHOU Xiaohua, LU Jing, WANG Min. Research on the integrated connection between modern tram of Wuhan Optic Valley and other transportation modes[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016(5):116.
- [10] 黎冬平. 提高现代有轨电车发展适应性的对策分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(增刊1):1.
- LI Dongping. Countermeasures for the improvement of modern tram development adaptability[J]. Urban Mass Transit, 2019(S1):1.
- [11] 张国华, 欧心泉, 周乐, 等. 有轨电车系统规划设计思考[J]. 城市交通, 2013(4):24.
- ZHANG Guohua, OU Xinquan, ZHOU Le, et al. Thoughts on streetcar system planning and design[J]. Urban Transport of China, 2013(4):24.
- [12] JEONG Y, KIM Y. Tram passive signal priority strategy based on the MAXBAND model[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014(5):1516.
- [13] 张海军. 对我国现代有轨电车发展应用的思考[J]. 城市轨道交通研究, 2015(7):119.
- ZHANG Haijun. Prospect of modern tram application in China[J]. Urban Mass Transit, 2015(7):119.
- [14] 中华人民共和国交通部. 公路交通安全设施设计细则: JTG/TD 81—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design guidelines for highway safety facilities: JTG/TD 81—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [15] 张子栋. 有轨电车系统规划设计研究[J]. 城市交通, 2013(4):30.
- ZHANG Zidong. Streetcar system planning and design[J]. Urban Transport of China, 2013(4):30.

(收稿日期:2022-07-09)

“洞见”行业未来 数字赋能智慧轨道交通

2022年9月1日至3日,第五届世界人工智能大会以“智联世界,元生无界”为主题在上海隆重召开。世界人工智能大会由国家发展和改革委员会、工信部、科技部等官方机构共同主办,是一场全球瞩目的科技盛会,今年已至第五届。五年来,全球顶级智库齐聚申城,为人工智能产业的高质量发展提供了有力的价值引领。今年,大会围绕人工智能引发的行业变革推出了多场高端论坛活动,覆盖金融、科技、通信、制造、出行等多个领域。作为大会重要的分论坛活动之一,“数字化轨道交通创新论坛”于9月2日在张江科学会堂成功举办。本次论坛也是唯一聚焦轨道交通领域的行业高峰论坛,轨道交通行业近百位专家和技术领袖出席,围绕人工智能赋能轨道交通数字化和智慧化转型的新成果、新趋势展开深入探讨。

人工智能等前沿数字化技术的应用,已成为解决轨道交通行业诸多复杂问题的重要抓手,特别是在城市轨道交通线网规模不断扩大、乘运安全和运营管理压力与日俱增的背景下,唯有借数字化之东风实现智慧转型,才是城市轨道交通未来的发展方向。

(本刊报道)