

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.03

用于城市地下管道物流的载货车辆设计方法研究

刘志明^{1,2}, 周浩¹, 黄胜¹, 马保松¹

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 广州 510000)

摘要: 城市地下物流系统是现代物流、交通、车辆、地下工程多学科、新技术交叉融合发展起来的一项复杂技术与工程系统。基于地下物流系统-管道-车辆协同设计理念, 建立了一套用于城市地下管道物流的载货车辆设计方法, 包括车辆方案研究、车辆结构与新能源功能设计、车辆自动驾驶技术设计等。设计了一种用于圆形管道内径3 800 mm、车辆外观尺寸长度5 000 mm、宽度1 500 mm、高度2 200 mm的地下管道物流厢式载货专用车辆, 车辆具有自动驾驶、大功率、长距离自动运输货物和管道内行驶无线充电功能。车辆设计采用了绿色、低碳、节能、多项新技术创新集成应用的设计理念。研究成果可为商业化城市地下物流提供一套新的载货车辆试验样车设计方案。

关键词: 地下物流系统; 地下管道物流; 自动驾驶; 载货车辆; 厢式货车

中图分类号: U121; TU94 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2026)02-0401-11

Research and Design of Cargo Vehicle Technology for Urban Underground Pipeline Logistics

Liu Zhiming^{1,2}, Zhou Hao¹, Huang Sheng¹, Ma Baosong¹

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, P. R. China;

2. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou 510000, P. R. China)

Abstract: Urban underground logistics system is a complex technology and engineering system developed by the cross integration of modern logistics, transportation, vehicle and underground engineering. Based on the concept of the underground logistics system-pipeline-vehicle collaborative design, a set of cargo vehicle design methods for urban underground pipeline logistics is established. Vehicle technology research and design include vehicle scheme research, vehicle structure and new energy function design, vehicle autonomous driving technology design. This paper designs a special cargo vehicle for pipeline logistics, which is a pipe with inner diameter of 3 800 mm and van with exterior dimension length of 5 000 mm, width of 1 500 mm and height of 2 200 mm. The vehicle has automatic driving, high power, long-distance automatic transportation of goods and wireless charging function when the vehicle is driving in the pipeline. The vehicle design adopts the design concept of green, low-carbon, energy saving and integrated application of more new technological innovations. The technical research and design of cargo vehicle conducted in this paper provides a design scheme of cargo vehicle test sample vehicle and a new vehicle design method of underground pipeline logistics for the implementation of commercial urban underground logistics project.

Keywords: underground logistics system; underground pipeline logistics; automatic drive; cargo vehicle; van

收稿日期: 2025-01-16(修改稿)

作者简介: 刘志明(1976—), 男, 河南遂平人, 博士生, 高级工程师, 主要从事地下空间开发与新技术研究。

E-mail: liuzhiming37@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 马保松(1968—), 男, 河南唐河人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下空间开发与利用研究。

E-mail: mabaos@mail.sysu.edu.cn

0 引言

近现代交通运输包括铁路、公路、水路、航空、管道 5 种基本运输方式。钱七虎院士、陈志龙、郭东军、马保松等学者^[1-5]提出地下管道物流运输作为第五类运输与供应系统,在替代地面部分货物交通运输上具有减少地面交通拥堵、减少环境污染、提高综合运输效率等方面有着不容忽视的作用。建立自动化、高效便捷的地下物流系统是契合实际的可行解决方案。发展地下物流系统符合国家重大战略需求和“创新、协调、绿色、开放、共享”的治国发展新理念。

城市地下物流系统(Underground Logistics System, ULS)是物流、交通、车辆、地下工程多学科新技术交叉融合发展起来的一项复杂技术与工程系统,是通过在城市地下空间内的管道作为运输通道,由管道内专用载货工具实现自动化货物运输的一种新型运输方式和供应系统^[1-3, 6-8]。目前,城市地下物流系统研究从理论到实践都处于探索阶段,传统城市物流与货运交通方式亟需改进,城市地下物流系统提供了一种新的改进思路,对城市物流设施布局、地面交通、城市地下空间开发与利用都将产生重大影响^[3-5]。

本论文所提到的地下物流系统内涵及其涉及的地下管道物流、地下隧道物流、载货车辆技术,国内外仍无较为统一的定义和标准。管道与隧道是地下物流系统的货物运输通道,管道与隧道从工程定义上在功能、用途、结构特点、施工方法等方面有显著的区别。论文所研究的地下物流系统通道兼具了管道和隧道的属性,具有如下几点特征:尺寸为中小截面圆形预制钢筋混凝土管道;通道又具有隧道的交通属性,运输的是带包装固体货物;更多学者采用第五类交通运输方式的“管道”概念,管道采用顶管法施工;基于如上特征分析,作者更赞同用“地下管道物流”来用作地下物流系统载货车辆及通道的特征定义。

1 城市地下管道物流车辆方案研究

1.1 地下管道物流载货车辆研究综述

各国提出了不同类型的地下物流系统概念和载货工具模型,国际上代表性研究有:美国以气力舱体运输管道(Pneumatic Capsule Pipeline)和水力舱体运输管道(Hydraulic Capsule Pipeline)为核心技术的 PCP 和 HCP^[9],荷兰以自动导向车(Automated Guided Vehicle, AGV)^[10]技术路线开

发,德国以 CargoCap 的地下物流系统载货工具车^[11],意大利以 Pipe & net^[12]胶囊形式的单个货运包裹进行运输,日本载货车辆是两用卡车 Dual Mode Truck(DMT)的形式。各国近 20 年在城市地下物流系统内涵和载货车辆技术研究中采取了不同的技术路线,各国均处于理论和试验阶段。

中国从 2000 年开始,以钱七虎院士、陈志龙教授团队^[1, 3-4, 6-7],马保松教授团队^[2],东南大学^[5]、同济大学^[7]及其他多个高校研究团队开展了持续研发工作。在地下物流系统的顶层战略设计、节点-通道网络布局规划理论、技术经济可行性等方面开展了系列研究,并取得了一系列成果^[3-4, 7, 13-14]。由于缺少商业化开发项目的技术研发实践,而在地下物流系统实施层面的车辆装备技术、管道隧道建造技术、运营技术的研发成果较少。基于此背景,本论文开展了城市地下管道物流载货车辆的技术研究,开展了无轨式管道内道路结构面上具有自动驾驶功能的厢式载货专用车辆设计工作。

1.2 载货车辆方案研究

本论文提出的城市地下管道物流载货车辆技术(Cargo vehicle technology of Urban underground pipeline logistics)研究思路是:结合地下物流系统的网络布局规划、管道设计、运营设计各子系统设计目标和要求,遵循智能化、自动化、信息化的地下管道物流运输管理规则,以动力载运工具(车辆)的载货单元(厢体)运输有包装的固体货物、实现货物在地下管道内空间位移为运输目的,研发一种新型专用载货车辆技术。

地下管道物流运输的设计目标是在满足目标城市日均货运量需求、车辆-管道投资造价最优、运输效率最优下,选择什么类型的车辆-管道模式作为地下物流系统的运输模式,是一个多目标、多因素决策模型。地下管道物流载货车辆方案选择可以从车辆交通运输方式、载货单元、载货量、管道尺寸、车辆动力方式、车辆在管道内导航技术、车辆控制技术、车辆速度共 8 个设计指标来确定车辆设计方案技术指标。

表 1 对比分析了美国 Henry Liu 提出的 PCP 动力车模型^[9],德国 Stein 提出的地下物流系统 CargoCap 模型^[11],日本的 DMT 两用卡车运输车^[1]的车辆技术特征和优劣势。调研和对比国内城市道路货运汽车的厢式货车车型、轨道交通运输地铁机车车辆模式(机车车辆对管道空间要求更大、车辆技术复杂性更高,适用于大直径、大运量的地下

隧道形式的集装箱式地下物流运输)。由表 1 和如上分析可知:车辆截面积(车辆的宽度和高度)占据管道内的面积是设计优化重点,直接影响载货单元尺寸设计(载货量)和车辆模式选型;在同等设计目标的载货量和管道空间内,结合车辆技术性能指标,经过上述对比分析可以得出结论:中小规模载货运量(5~10 t)和中小直径管道物流运输(管道直径小于 4.8 m,国内已知最大的预制混凝土顶管施工),选择厢式载货专用货车方案在技术经济性、技术实施可靠性上更有优势。

表 1 车辆方案对比分析

Table 1 Comparative analysis of vehicle schemes

车辆模型	对比分析
CargoCap 车辆 ^[11] 	德国 Stein ^[11] 提出的地下物流系统 CargoCap 管道直径为 1.6 m, 利用欧洲标准托盘(pallet)作为运输载货单元,每个 Cap 单元能运输 2 个标准欧洲货盘,载货量不超过 2 t,速度不超过 36 km/h。车辆与管道之间间隙小,出现故障人员无法进入检修。
PCP 胶囊动力车 ^[9] 	美国 Henry Liu ^[9] 提出了两种不同尺寸 PCP 系统:(1)用于运输矿物、固体废物、邮件和包裹等的横截面为 1 m×1 m 的 PCP;(2)用于运输箱子、托盘的横截面为 1.7 m×1.7 m 的 PCP。车辆与管道壁间隙小,出现故障人员无法进入检修。
日本提出的两用卡车 Dual Mode Truck (DMT) 技术 ^[1]	2000 年日本东京研究团队提出的地下物流系统 Dual Mode Truck (DMT) 载货车辆,利用两用卡车为运输工具;该卡车以电为动力,在地面通过人的驾驶,地下无人驾驶,载重不超过 2 t。
本论文以载货厢式专用货车车型作为地下管道物流车辆模型,作为载货车辆研发技术路线 	车辆技术:厢式货车、新能源技术、自动驾驶 设计速度:80 km/h 车体重量 3 t,载货量 7 t(单车运量与普通地面货车相当) 配套管道内径:3 800 mm 优缺点:速度快,车辆出现故障人员可进入管道检修;技术可实现性强,车辆-管道开发投资造价适中。

基于表 1 对国外地下物流车辆技术方案的对比较分析,可总结为如下两点:(1)国外已有的载货车辆概念设计,更多集中在车辆模式所代表的地下

物流系统内涵设计,以载货单元、动力方式为设计重点^[9-12];(2)较少体现车辆与管道协同设计,车辆出现故障后是否通过人员进入管道检修和排除故障没有体现。如上各国提出的地下物流系统车辆技术研发路线时间处于 1994—2008 年期间,当前适用于地下管道物流车辆的新技术应用还未涉及。如上国家提出的代表性地下物流系统及载货车辆设计概念,未得到大规模商业化开发和应用。分析其原因:项目系统复杂,该项技术国内外多个研发团队经过 20 多年的持续研发,其技术可行性学术界普遍认同具备了商业化开发技术支撑,但是项目经济可行性仍需要较为匹配的商业模式和政府政策支持^[13-15]。

随着未来城市发展趋势和城市物流及交通运输新质生产力发展的推动,本论文提出的地下管道物流载货车辆技术方案借鉴吸收如上车辆设计的优点、完善以往设计未考虑因素,提升车辆性能设计标准,选用当前先进技术的车辆新能源技术和自动驾驶技术作为地下管道物流载货车辆技术开发路线,车辆性能指标设计采用了绿色、低碳、节能、新技术创新集成应用的设计思路。本论文提出的载货车辆设计指标相较于 PCP、Cargocap、DMT 技术,车辆模式选择厢式货车作为车身结构。相较于有轨式轨道机车车辆结构、技术实现性更简单,车辆-管道建造成本更低,车辆设计速度 80 km/h,车辆载货量提高至 7 t。开发的厢式货车专用于地下管道物流运输,车辆不用于地面行驶,与 DMT 不同。车辆的载货单元厢体设计考虑了与地面普通货车厢体设计的通用性,可实现地上、地下厢式货车载货单元换装的运输连续性和通用性。

1.3 载货车辆设计技术路线

城市地下物流系统设计是基于载货车辆设计为核心的研发设计,载货车辆设计是建立在对目标城市地下物流系统网络布局规划设计、节点-通道设施(管道)协同设计基础上开展的车辆技术研究和设计工作。按照地下管道直径优化设计,车辆-管道-地下物流系统投资造价低,车辆速度快及地下物流系统运行效率高,具有自动驾驶、大功率、载货单元单次运力与普通厢式货车相当、长距离高效运输功能,车辆在管道内出现故障人员可进入检修的五个原则作为地下物流载货车辆方案的决策标准;确定以厢式货车为基础架构的地下管道物流自

动驾驶载货车辆作为研发技术路线开展车辆总体设计。载货车辆设计包括了车辆方案设计、载货车辆与地下管道协同设计、车身结构设计、车辆功能设计、车辆在管道内自动驾驶技术设计等内容^[16-17]。载货车辆技术研发技术路线如图 1。

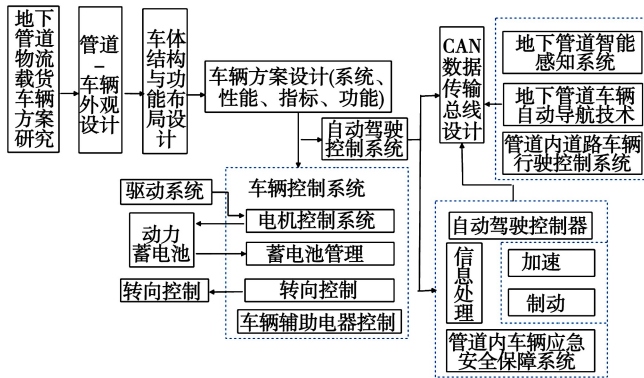


图 1 城市地下管道物流载货车辆技术研发路线

Fig. 1 Research and development of urban underground pipeline logistics vehicle technology

2 车辆-管道协同设计

依据地下物流系统需求按照经济合理、技术可行原则,车辆尺寸与管道内径匹配性设计是城市地下物流载货车辆总体设计中首要的车辆-管道协同设计中需要确定的基本参数,其是决定管道内交通运输工具、管道截面尺寸的基础性参数设计。归纳其设计原则如下:

- (1) 以地下物流管道运输特殊性,满足管道中载货车辆运输功能、安全性开展设计。
- (2) 车辆-管道尺寸需结合地下物流系统设计目标、投资造价与货物运输效率及覆盖率最优、场地工程地质条件、管道施工方法综合分析。
- (3) 车辆宽度、高度,车辆限界,管道内救援通道宽度,管道内附属管线最小要求净空尺寸。
- (4) 车辆宽度、高度设计需兼顾地下管道物流中货物尺寸覆盖度,如常用大型家具、家电(床、沙发、电视、冰箱等)及散装货物尺寸;按照国际、国内标准托盘尺寸 1 200 mm×1 000 mm、1 100 mm×1 100 mm,在车厢内组装装载量最大化等因素。
- (5) 车辆高度、宽度决定了管道内径;车辆形式及车辆长度影响管道内径及线形几何尺寸(最小曲线曲率、半径)。

基于如上分析的车辆-管道尺寸匹配性设计原则,本论文设计了一种管道-厢式载货车辆的基础几何尺寸,如表 2。

表 2 管道-厢式载货车辆几何尺寸设计
Table 2 Geometric dimension design of pipe-van cargo vehicle

指标	设计依据及说明
管道截面形式	圆形受力合理、便于顶管或盾构施工
内径	依据车辆功能和外轮廓尺寸,满足车辆安全运行条件设计,内径 3 800 mm
外径	满足管道内外复杂工况下的结构强度及变形要求,外径设计为 4 400 mm
管材	管道壁厚 300 mm,预制钢筋混凝土管
车辆外轮廓尺寸	长×宽×高(mm):5 000×1 500×2 200 车头长度 1 400 mm,货厢长度 3 600 mm
车辆限界尺寸	车辆顶部限界 200 mm,车辆左右侧限界 150 mm(包含管道曲线预留加宽)
管道内路	车辆行驶的道路混凝土结构层厚度(包含充面结构层)600 mm
人员救援	管道内车辆发生故障,人员可进入检修,救援通道宽度
管道内设备	管道内设备安装空间层作为供电、通风、排水、通信、视频监控等设备管线安装区;顶部设备空间层
间层	层 800 mm,左右侧设备空间层 350 mm

上述车辆-管道尺寸匹配性设计参考了厢式货车设计标准、地铁设计规范的车辆限界标准;车辆尺寸设计以标准托盘组合模数为基础的载货单元设计为主线,该载货单元尺寸为标准集装箱载货单元容量尺寸的 1/2 进行设计(具备与集装箱式载货车辆的载货单元换装互换通用)。经过多方案比选,确定地下管道内径/外径为 3 800 mm/4 400 mm,载货车辆外轮廓尺寸长×宽×高为 5 000 mm×1 500 mm×2 200 mm。车辆外观尺寸、管道及管道内尺寸设计如图 2。

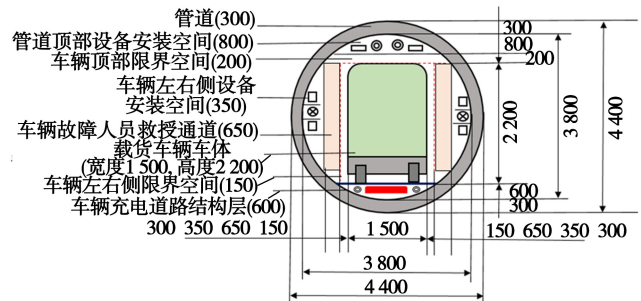


图 2 管道-车辆外观尺寸剖面图(单位:mm)

Fig. 2 Exterior dimension sectional view of pipe-vehicle (unit: mm)

车辆外观尺寸-管道直径设计成果可作为管道试验段、车辆试验样车的设计方案测试控制依据。

在既定载货量和车辆结构布局设计限定条件下,此车辆-管道尺寸是厢式货车较优的匹配尺寸。该车辆-管道尺寸设计适用于城市单独建设开发的单通道、轴辐式或环状网状布局的地下管道物流单向运输通道的车辆方案。地下物流系统项目投资大,车辆-管道外观尺寸直接影响项目投资总造价,也决定了地下管道物流车辆运营方式。车辆动力系统中采用新能源大功率动力电池储能设计,管道内道路充电技术作为车辆动力来源,可满足车辆在封闭管道内单向运输行驶一圈的动力供电保障。

3 地下管道物流载货车辆总体设计

地下管道物流载货车辆总体设计以技术先进、创新、绿色、节能作为设计目标,提出一种融合当前正在快速发展和多项新技术创新集成应用的车辆-管道设计思路:(1)车体结构以厢式货车汽车结构设计为基础;(2)车辆采用具有自动驾驶功能的新能源纯电动汽车技术设计路线;(3)地下管道路面结构层设计中引入充电公路新技术^[18],车辆在管道内行驶可实现自动充电功能。

3.1 车辆主要参数设计

车辆总体设计包括:车辆外轮廓尺寸设计、车辆质量参数设计、车辆性能指标设计,车辆动力性、安全性、车辆几何通过性参数设计,封闭地下管道环境和充电道路结构的特殊性进行车辆性能参数设计。根据国家标准 GB/T3730.1—2001《汽车和挂车类型的术语和定义》中货车分为普通货车、专用货车^[16],车辆设计按照专用厢式货车设计原理进行设计,车辆参数设计主要引用和参考了如下国家和行业标准:GB/T31152—2014《汽车物流术语》、GB/T18354—2021《物流术语》、GB/T3716—2000《托盘术语》、GB/T17271—1998《集装箱运输术语》、GB50157—2013《地铁设计规范》、GB/T7928-2003《地铁车辆通用技术条件》等。车辆外观和结构布局设计见表 3、图 3。

表 3 地下管道物流载货车辆设计参数及技术要求^[16-17]

Table 3 Design parameters and technical requirements of underground pipeline logistics cargo vehicle^[16-17]

指标	设计依据及参数
车轴布局	采用国标货车 3 类 2 轴整体式货车车轴布局(12 型货车)
轮胎组数	2 组,6 个(前轮 2 个导向轮,后轮 4 个)
车身布局	车头与车体设计在整体式车架上,车辆总长、轴距尺寸须满足地下管道最小转弯直径 $R < 80$ m 的要求

续表 3

指标	设计依据及参数
车辆外轮廓尺寸	长×宽×高:5 000×1 500×2 200 mm 车头长度 1 400 mm、货厢长度 3 600 mm
车厢设计	车厢设计容纳 3 个国际标准托盘 1 200 mm×1 000 mm、1 100 mm×1 100 mm;车厢两侧各预留 100 mm,车厢长度 3 600 mm
车辆高度及分解尺寸	高度 2 200 mm;车轮高度 400 mm,车厢高度 1 800 mm(含车辆底架 200 mm);车厢结构厚度 100 mm,厢体内净空 1 500 mm
车宽	车辆宽度 1 500 mm;按标准托盘车内净宽 1 200 mm,预留尺寸包括左侧预留 100 mm、右侧预留 100 mm、车厢结构厚度 100 mm
车辆其他参数	轴距:3 200 mm,前悬:800 mm,后悬:1 000 mm 轮距:1 000 mm
车辆质量	≤3 000 kg,轻量化设计
车辆载货质量	≤7 000 kg,车厢净空间 3 500×1 400×1 500 mm,净空间体积 7.35 m ³ ,货物密度<1 000 kg·m ⁻³
车辆速度	质量系数 $m_s < 1.8$,最大时速限制 80 km·h ⁻¹
最大爬坡能力	<10°
驱动方式	管道内车辆自动驾驶横向、纵向控制精度要求高,采用轮边电机-四轮驱动方式
制动器	四轮电控式制动器
转向器	电动循环助力转向方式
电池系统	车辆在管道内行驶一圈,按 600 km 续航动力电池储能配置,选择锂离子电池 60 Ah/384 V

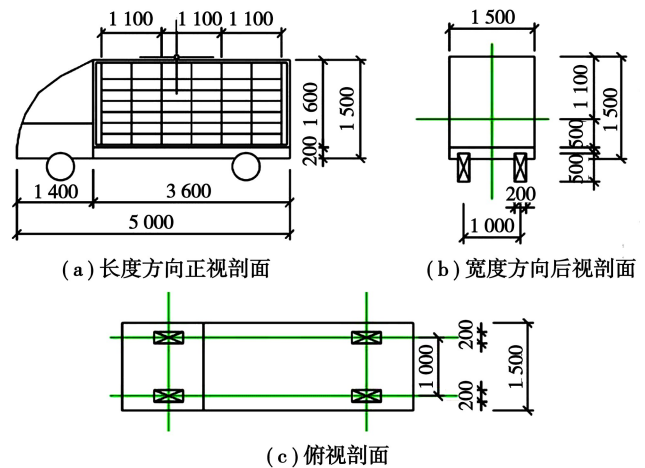


图 3 车辆剖面设计

Fig. 3 Vehicle profile design

3.2 车辆部件布局和功能设计

地下管道物流载货车辆车体部件布局及功能设计包括车辆基本功能设计、新能源动力系统设计、管道内接收道路充电技术设计、车辆电池及储能系统设计、自动驾驶技术设计 4 个部分。车辆本体功能设计以经典厢式货车功能设计为基础,车辆

新能源动力系统设计以新能源储能、直流无刷电机能源动力系统设计为主^[16-18]。自动驾驶技术设计建立车辆设计-智能传感器识别-算法-数据库-管道场景 AI 深度学习的地下物流自动驾驶载货车辆功能设计方案^[19]。车辆功能设计要点见表 4。车辆功能布局方案设计如图 4、图 5。

表 4 地下管道物流载货车辆功能设计要点^[16-17,19-20]

Table 4 Key points of functional design of underground pipeline logistics cargo vehicles

车辆系统	功能设计内容
车头功能设计	车辆控制系统, 自动导航, 自动驾驶系统, 动力电池及新能源动力系统, 充电接收器、变压器、逆变器及充电道路电能接收端系统设计
车架和车厢设计	厢式货车按专用载货交通工具设计, 车头与车身(载货厢体与车架)、厢体与车架按照分离式模块设计; 厢体顶部设计有自动起吊装置, 便于园区货场和竖向管道内可实现自动化提升和吊装
管道充电-车体新能源技术设计	车辆采用纯电动汽车 Battery Electric Vehicle (BEV) 技术路线; 车体主要部件包括底盘、离合器、变速器、万向传动、驱动桥、悬架、转向系统的基础车体结构; 车体新能源系统设计包括车载电源、动力电池组、逆变器的动力系统设计, 无刷直流电动机及控制器的驱动系统设计, 制动系统设计等; 车辆底盘设计中有可接收充电道路发射端的储能充电接收装置
车辆自动驾驶技术设计	主要包括管道环境感知技术、管道内车辆惯性导航定位技术、车辆控制系统设计、V2X 通信技术设计

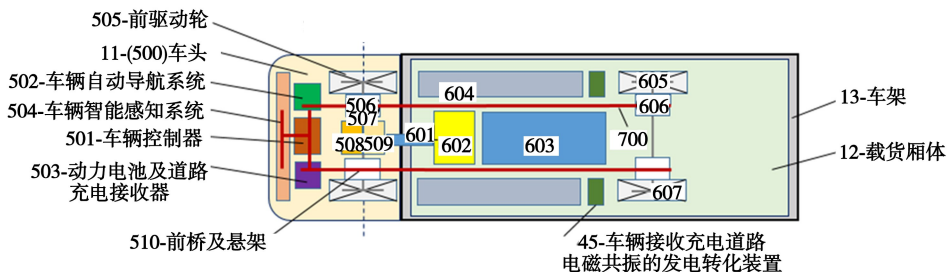


图 4 载货车辆结构布局和车载智能传感器布局设计^[20]
Fig. 4 Structure layout of cargo vehicles and layout design of vehicle intelligent sensing sensors^[20]

3.3 车辆-管道道路充电技术设计

管道内充电道路技术应用^[18]设计: 设计一种新型地下物流管道道路结构(如图 6), 道路结构中

的充电电缆 4 和无线能源传输装置 5 可对行驶中的载货车辆 1 实现动态短时间充电功能。在道路 3 中, 管道内 15% 道路路段地下铺设充电电缆线 4 及无线能源传输装置 5, 电缆线产生强大的电磁场 6, 把磁场释放的能量转化为电能, 以高频交变形式传递到载货车辆 1 的电能接收端装置 7 中, 实现车辆无线充电。该项技术是应用磁共振技术, 在车辆底部加装线圈, 在管道内车站区间及部分道路段埋设发射线圈给车辆进行充电, 当车辆进入此区域, 系统自动感应开启充电模式, 提高载货车辆的续航能力, 该项技术的应用可以优化地下管道物流的能源和供电模式。



图例中其他数字代号说明: 601-万向传动器; 602-变速器; 603-车辆底盘器; 604-储能电池及电池管理系统; 605-后轮; 606-后轮电机及变速器; 607-后桥及悬架; 45-车辆接收充电道路电磁共振的发电转化装置; 700-车辆CAN电控系统总线

图 5 载货车辆车体部件及功能设计布局

Fig. 5 Cargo vehicle body parts and function design layout

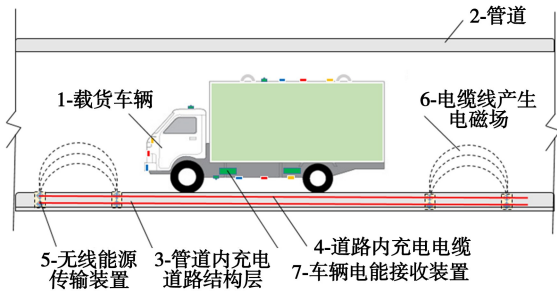


图 6 车辆-管道-充电道路结构设计示意

Fig. 6 Vehicle-pipeline-charging road structure design

4 载货车辆自动驾驶技术设计

根据《汽车驾驶自动化分级》(GB/T40429—2021),驾驶自动化等级共 6 级,0—5 级标准。管道物流车辆自动驾驶设计定义为 3 级标准,3 级定义(有条件自动驾驶)为在其设计运行条件下持续

地全部动态驾驶任务^[19]。

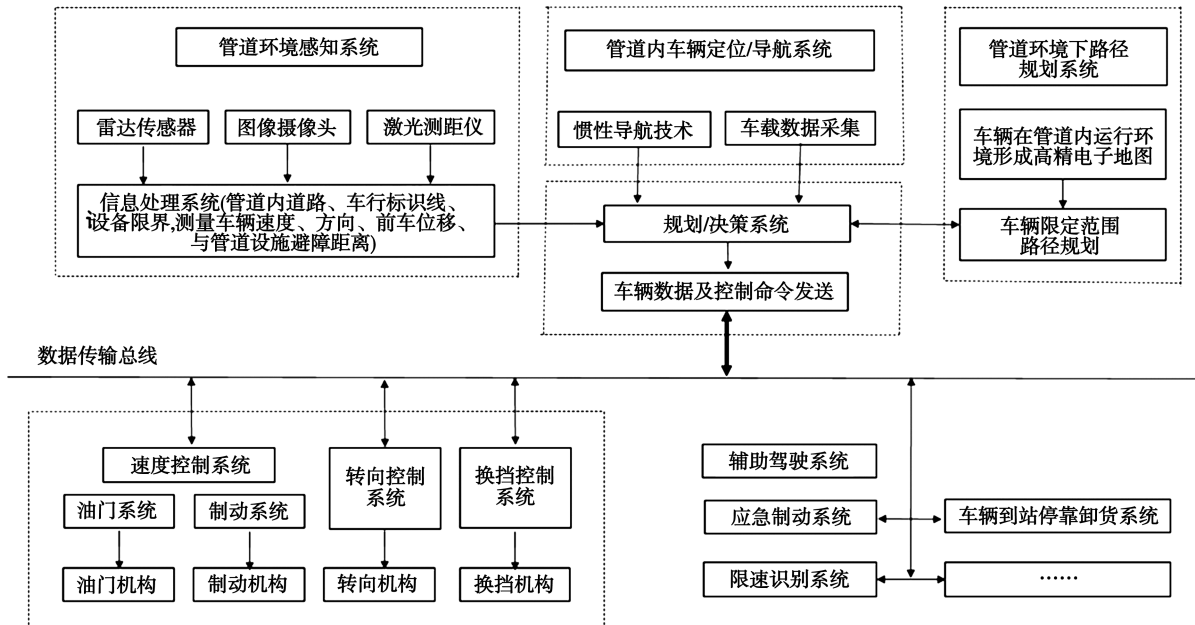
4.1 自动驾驶技术开发体系

地下物流载货车辆自动驾驶技术开发框架体系包括车辆对管道环境的智能感知技术(传感器平台)、车辆自动导航与定位技术(计算平台)、车辆线控技术(控制与通信平台)三项核心技术的软硬件系统开发组成。技术开发框架如图 7。

4.2 管道环境感知技术

地下物流管道车辆行驶场景分析:管道内径为 3 800 mm,地下无通信信号或信号弱,管道内根据车辆导航需要在车站区域和管道内设计照明;管道内自动驾驶路由管道道路结构、走向、坡度、道路宽度限定,管道内的环境与地面自动驾驶环境相比具有特殊性,需针对性选择智能感知传感器。

可用于地下物流管道运输的自动驾驶车载传

图 7 载货车辆自动驾驶技术开发框架^[19-20]Fig. 7 Development framework of autonomous driving technology for freight vehicles^[19-20]

传感器有激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、车载摄像头、车载 UWB 定位器等。车载摄像头分为单目和双目两种。单目摄像头主要基于机器学习、对图像数据进行训练和学习,用于环境感知。双目摄像头基于视差原理测量驾驶环境,测距精度较高^[20]。在车辆的前侧、后侧、左侧、右侧、顶部、底部均安装设置智能感知传感器(雷达、摄像头)对于车辆运行的管道环境以及车辆运行轨迹进行实时智能监控和信息回传。

4.3 管道环境内车辆定位及高精地图技术

地下物流管道具有“长廊效应”、无定位信号

等复杂工况环境,定位导航技术具有实施难度大、成本高、构建地图耗时长^[21]。管道内车辆自动驾驶环境较地面车辆自动驾驶环境相比,有其特殊性,车辆行驶线路以直线或弯曲线为主,车辆横向和纵向行驶精度控制要求较高,车辆前后车距纵向精度误差控制设计在 ± 10 cm 以内,车辆横向精度误差控制在 ± 3 cm 以内。自动驾驶车辆定位需要获取两种信息,车辆位置和车辆行驶速度。在地下封闭管道环境下为了实现车辆自动驾驶导航,提出一种基于超声波雷达-激光雷达-惯性导航技术融合的地下管道物流车辆自动驾驶定位导航

方法^[21]。该方法的技术原理是:

(1)此方法依赖于激光雷达传感器与惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 传感器组合定位导航,通过卡尔曼滤波技术实时融合在短时间内提供稳定的位置更新信息,该方法相较于在地下物流管道中部署 5G 基站、融合超宽带 (Ultra Wide Band, UWB) 的定位导航技术^[21],在优化设备成本上具有较大优势,是现阶段地下管道车辆自动驾驶技术较为可行的解决方案。

(2) 车辆在地下管道内的全局定位采用 Larson^[22] 提出的超声波测距仪定位算法,使用扩展卡尔曼滤波器,融合阿克曼车辆动力学与迭代最近邻点算法 (Iterative Closest Point, ICP) 与正态分布点云算法 (Normal Distribution Transform, NDT) 的点云配准特点,将超声波测距仪、激光雷达传感器与惯性测量单元传感器数据进行融合,实现一种兼顾鲁棒性与精确性的车辆导航定位技术^[21]。

(3) 采用基于自适应模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 的轨迹跟随算法,保证车辆在特定管道环境中的路径跟踪精度。

管道高精地图是对车辆行驶的管道内道路形状、车道中心线、货运站点标识,车道限速,管道内附属机电管等管道内环境信息形成精准的坐标信息并可视化表达,建立高清、属性丰富的管道环境地图,是为管道内车辆自动驾驶而建立的一种空间分析模型。管道高精地图在自动驾驶的感知、定位、路径规划、决策、控制等过程中发挥重要作用,其控制精度设计为厘米级测量误差。

4.4 规划与决策控制系统开发

地下管道中的自动驾驶规划与决策控制,其设计准则为:

- (1) 良好的系统实时性;
- (2) 最高优先级的安全性设计 (车辆具备防碰撞、紧急避障、故障检测等功能);
- (3) 车辆在管道内单向循环行驶,控制前后车距、定速行驶,紧急停车和避障等运行规则设计;
- (4) 速度控制,车道内标识限制及卸货站点标识识别。

自动驾驶须将决策控制系统与车辆基础控制系统深度集成,通过线控技术完成执行机构的电控化,达到电子制动、驱动和转向,并控制车辆响应、保障控制精度,对目标车速、路径等进行跟踪。

规划控制分为路由寻径 (Routing)、行为决策 (Behavior Decision)、动作规划 (Motion Planning)、反馈控制 (Feedback Control) 4 个部分,

前 3 个部分可统称为路径规划。车辆定位与行车路径设计采用“感知-建模-规划-执行”算法,实现车辆定位和自动控制^[19-20]。自动驾驶行为决策系统开发核心是定义基于管道环境下的车辆行驶规则和实现自动驾驶控制的机器学习算法,规划与决策模型通过设计串联式有限状态机法来实现。

对地下管道内车辆自动驾驶的行为建立行驶规则、知识、经验、交通规则等行为规则库,按照管道环境信息划分车辆状态、按照规则逻辑确定车辆行为,代表方法为有限状态机法。其是一种离散输入、输出系统的数学模型,它由有限个状态组成^[20]。状态、事件、转移、动作是有限状态机的四大要素;当前状态接收事件,并产生相应的动作,引起状态的转移。有限状态机的核心在于状态分解;状态分解的连接逻辑分为串联式、并联式、混联式 3 种体系架构。串联式体系结构适合于地下管道物流载货车辆自动驾驶应用场景设计,车辆在管道内单向循环行驶、前后车保持一定距离,限定车辆速度下的行驶、指定卸货站点停靠、车辆制动、应急避障等子状态按照串联式结构连接。地下管道车辆自动驾驶串联结构决策控制原理,见图 8。该结构模式具有逻辑明确、规划推理能力强、问题求解精度高^[20]。通过对管道环境样本进行自主学习,由数据驱动建立行为规则库,以深度学习方法、决策树机器学习算法,根据管道环境信息进行行为匹配,输出决策行为,实现管道内自动驾驶的规划与决策。

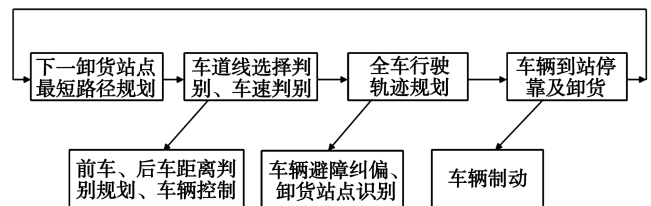


图 8 地下管道车辆自动驾驶串联结构决策控制原理
Fig. 8 Decision control schematic of underground pipeline vehicle automatic driving series structure

4.5 车辆控制系统设计

车辆控制系统设计:主要用于实现地下物流车辆的导航、计算与规划路径、车辆自动驾驶等控制。一般由主控单元、电机驱动装置、信号通讯收发系统及控制面板组成。地下管道物流车辆控制系统设计原理,见图 9。车载控制器是车载控制系统的核心,从车载操作面板上发送指令时,车载控制器对车辆进行路径选择、导航和导引的信息处理、运行用户定义的各种逻辑控制程序、利用车载或远程

设备通信进行车辆的状态监控^[23]。

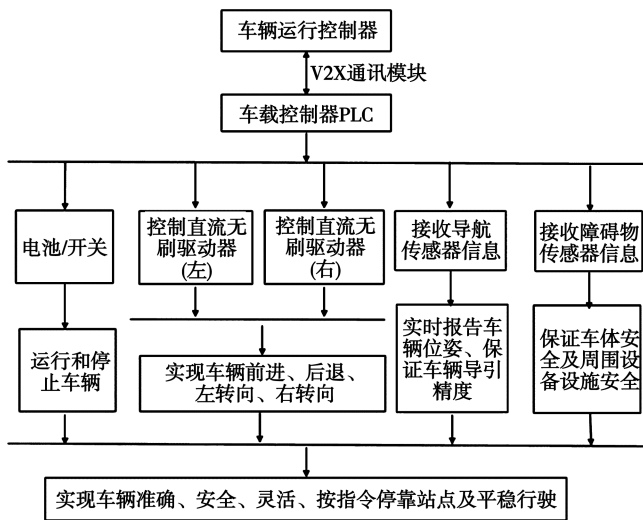


图 9 地下管道物流车辆控制系统设计原理

Fig. 9 Design principle of vehicle control system for underground pipeline logistics

4.6 管道内车辆无线通信技术 V2X 开发

管道内车载无线通信技术 (Vehicle to Everything, V2X) 是车辆在管道内车辆与其他事物相连接的信息通信技术。V 代表车辆, X 代表与车交互信息的对象, X 包括车、管道本体及管道内道路、管道内其他机电设施等。地下物流系统 V2X 交互信息模式包括: 车与车之间 (Vehicle to Vehicle, V2V), 车与管道设施之间 (Vehicle to Tube/Tunnel, V2T), 车与管道内其他机电设施之间 (如管道内车站标识, 环境感知摄像头, 管道内附属的通风、供电、消防、排水等机电系统) (Vehicle to Infrastructure, V2I) 的交互^[20]。

V2X 是一种网状网络, 网络中的节点 (载货车辆) 可以发射、捕获并转发信号。通过 V2X, 车辆可以获得周围环境的未知参数及前后车辆的运行状态, 包括速度、位置、行驶方向、制动等基本信息。通过车载主动安全算法处理所获取的信息, 并按照优先级对信息进行分类, 对可能发生的危险情景进行预警, 紧急情况下通过车辆控制器执行端对车辆进行控制从而规避风险。V2X 技术可实现对管道环境内的危险源 360° 智能感知, 在危险情况下确保车辆在管道内避免前后车辆碰撞, 避免与管道内其他设施发生碰撞等事故发生。管道内运行车辆通过定制开发的车内网, 按照约定的通信协议和数据交互标准, 在车-管道-云-网之间进行无线通信和信息交换, 在管道内建立一套独立运行的智能网联载货车辆自动驾驶系统与地下物流自动化运输模式。

5 地下管道物流自动化运输系统设计

地下管道物流载货车辆设计是城市地下物流系统设计的核心子系统, 车辆在地下管道中的自动驾驶运输货物, 是地下管道物流自动化运输系统设计的关键流程。地下管道物流自动化运输分为 3 个场景流程设计: 从园区货场吊装专用货厢至管道车辆、车辆在管道内自动驾驶运输、车辆到站后自动提升卸货 3 个自动化流程设计。地下管道物流自动化运输系统设计除了载货车辆在地下管道的水平运输之外, 载货厢体从地面的水平运输至地下管道的水平运输, 有装载、卸载载货厢体两次竖向管道垂直运输, 本论文仅提出地下管道物流的水平-垂直运输设计工艺要求, 其为车辆配套设计的相关后续研究工作。地下管道物流载货车辆自动化运输系统设计图如图 10。

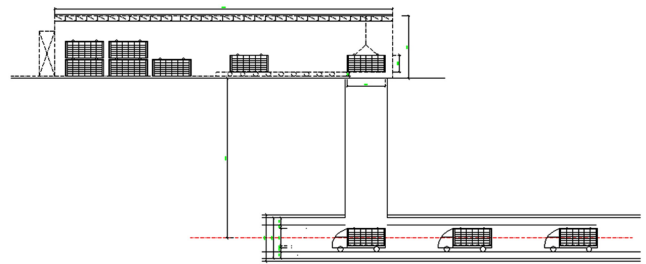


图 10 地下管道物流载货车辆自动化运输系统设计

Fig. 10 Design of automatic transport system for underground pipeline logistics vehicles

载货车辆到达管道站点自动化卸货流程设计: 车辆到达管道卸货竖井位置→管道门打开→竖井起吊设备识别载货厢体→自动吊挂厢体→竖向起吊载货厢体至地面舱门→载货厢体由地面园区水平输送带运输至指定卸货区→卸货。从园区吊运载货厢体至地下管道货车车辆, 与如上流程相反设计。

车辆在管道内自动驾驶运输, 车辆发车保持一定间隔和距离, 车辆发车间隔设计冗余度, 确保前车卸货时间与后车追赶距离控制在安全距离内。

6 结论与展望

城市地下物流系统是现代物流、交通、车辆、地下工程多学科、新技术交叉融合发展起来的一项复杂技术与工程系统; 载货车辆是实现城市地下管道物流的核心装备, 车辆的技术研究和设计是地下物流系统技术研究的核心技术之一。本论文建立了一套城市地下物流系统载货车辆设计体系, 如图 11。为商业化运营目标的地下物流-管道-车辆协

同设计提供了一套车辆设计解决方案。该方案的设计思路是车辆以厢式货车为车体结构,车辆设计具有自动驾驶、大功率、长距离、高效运输功能,车

辆在管道内行驶可实现无线充电的一种多项新技术融合创新设计的地下管道物流新能源载货车辆技术方案。

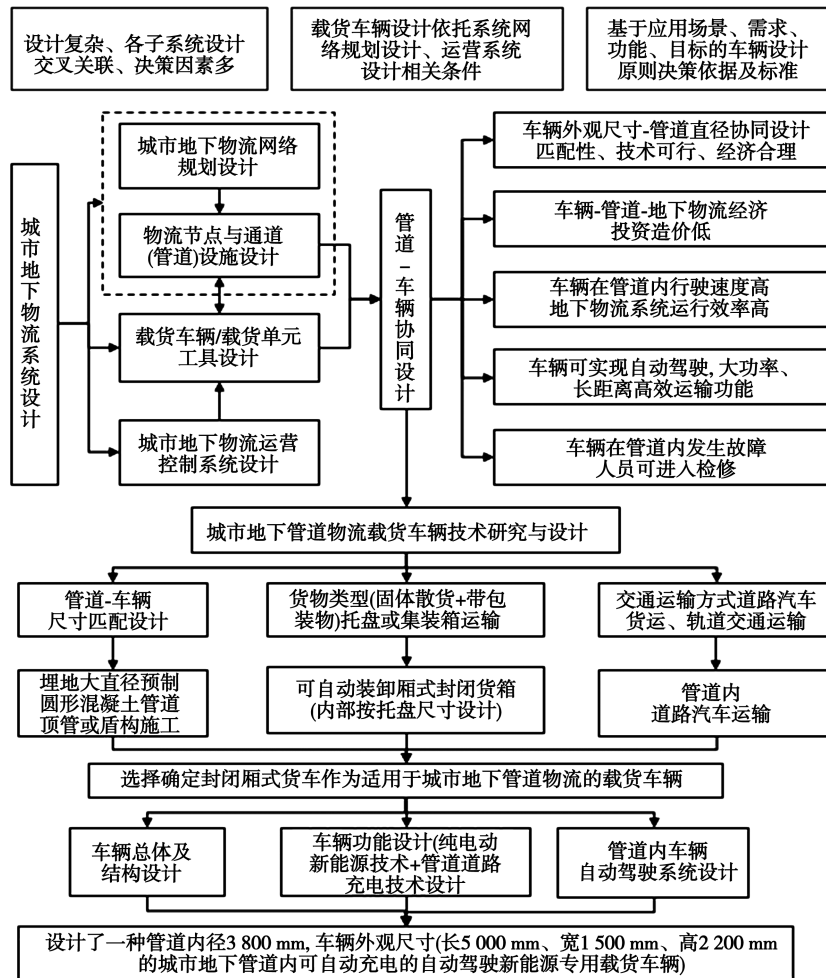


图 11 地下管道物流载货车辆设计流程

Fig. 11 Design flow of underground pipeline logistics cargo vehicle

目前,国际上对城市地下物流技术的研究正广泛深入地进行,并开展试验应用。2016年,瑞士CST项目规划了一条450 km的隧道,用于运输包裹和货运托盘,已获得第一轮融资,项目有望成为首个现代城市地下物流项目。我国该项技术也得到广泛发展,上海市连接港区与物流园区的地下集装箱物流运输专线,雄安新区综合管廊与地下物流项目,北京副中心地下货运系统项目等一批项目进入到可行性研究与初步设计方案阶段。国内适用于地下物流系统的载货车辆技术研究和设计成果还比较少,为了推动适用于商业化运营的地下物流系统早日实现。通过此文的研究工作,期待更多的科技工作者参与到此领域的研究工作中。

参考文献 (References)

[1] 钱七虎, 郭东军. 地下仓储物流设施规划与设计

[M]. 上海: 同济大学出版社, 2016. (Qian Qihu, Guo Dongjun. Planning and design of underground storage logistics facilities [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2016. (in Chinese))

[2] 马保松, 汤凤林, 曾聪. 发展城市地下管道快捷物流系统的初步构想[J]. 地下空间, 2004(1): 94-97. (Ma Baosong, Tang Fenglin, Zeng Cong. Tentative idea on development of urban underground pipeline for rapid physical distribution system [J]. Journal of Underground Space, 2004(1): 94-97. (in Chinese))

[3] Chen Z, Dong J, Ren R. Urban underground logistics system in China: Opportunities or challenges? [J]. Underground space, 2017, 2(3): 195-208.

[4] 陈一村, 董建军, 尚鹏程, 等. 城市地铁与地下物流系统协同运输方式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 637-646. (Chen Yicun, Dong Jianjun, Shang Pengcheng, et al. Research on the cooperative transportation modes between metro and

- underground logistics system in urban area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 637-646. (in Chinese))
- [5] 马成林. 我国大城市地下物流系统规划关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2011. (Ma Chenglin. Research on key technologies of urban underground logistics system plan [D]. Nanjing: Southeast University,2011. (in Chinese))
- [6] 胡万杰,董建军,任睿,等. 基于客货协同的地铁货运系统设施规划研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1351-1361. (Hu Wanjie, Dong Jianjun, Ren Rui, et al. Planning for the metro-based underground logistics system facility based on passenger-freight collaboration [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1351-1361. (in Chinese))
- [7] Guo D, Chen Y, Yang J, et al. Planning and application of underground logistics systems in new cities and districts in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103947.
- [8] 李鹏,朱合华,王璇,等. 地下物流系统对城市可持续发展的作用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 1-4. (Li Peng, Zhu Hehua, Wang Xuan, et al. Underground logistics system-towards the sustainable development of the city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1):1-4. (in Chinese))
- [9] Liu H. Feasibility of using pneumatic capsule pipelines in New York City for underground freight transport [A]//ASCE Pipeline Division Specialty Congress-Pipeline Engineering and Construction-What's on the Horizon, PIPELINES 2004 [C]. 2004: 1085-1096.
- [10] Van Der Heijden M C, Van Harten A, Ebben M J R, et al. Using simulation to design an automated underground system for transporting freight around schiphol airport [J]. INTERFACES, 2002, 32(4): 1-18.
- [11] Dietrich S. Development of capsule pipelines and tube transportation systems [A]// Proceedings of third ISUFT [C]. Bochum, 2002.
- [12] Cotana F, Rossi F, Marri A, et al. Pipe & net: Innovation in the transport through high rate small volume payloads [A]// Proceedings of the 5th ISUFT [C]. Arlington, 2008.
- [13] Li J, Dong J, Ren R, et al. Modeling resilience of metro-based urban underground logistics system based on multi-layer interdependent Network [J]. Sustainability, 2024, 16(22): 9892.
- [14] Hou L, Xu Y, Dong J, et al. Reshaping port-city relationships through underground logistics system: A mixed qualitative approach [J]. Cities, 2024, 154:105395.
- [15] Amir T, Mohammad N, Taha A. et al. Environmental impacts of pipeline construction for underground freight transportation [A]// Pipelines [C]. 2017:181-191.
- [16] 闵海涛,王建华. 汽车设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2022. (Min Haitao, Wang Jianhua. Automobile design [M]. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese))
- [17] 崔胜民,新能源汽车概论[M]. 北京:北京大学出版社,2020. (Cui Shengmin. Introduction to new energy vehicles [M]. Beijing: Peking University Press, 2020. (in Chinese))
- [18] 方蕾. 无线充电公路专利技术[J]. 科技创新与应用,2020(13):20-22. (Fang Lei. Patent technology of wireless charging highway [J]. Technology Innovation and Application, 2020(13):20-22. (in Chinese))
- [19] 王建,徐国艳,陈竞凯,等. 自动驾驶技术概论[M]. 北京:清华大学出版社, 2019. (Wang Jian, Xu Guoyan, Chen Jingkai, et al. Introduction to autonomous driving technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese))
- [20] 余贵珍,周彬,王阳,等. 自动驾驶系统设计与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2019. (Yu Guizhen, Zhou Bin, Wang Yang, et al. Design and application of autonomous driving system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese))
- [21] 刘仕杰,邹渊,张旭东. 基于局部几何-拓扑地图的地下矿自动驾驶定位导航方法[J]. 工矿自动化, 2023,49(8):70-80. (Liu Shijie, Zou Yuan, Zhang Xudong. A localization and navigation method for underground mine autonomous driving based on local geometric topology map [J]. Journal of Mine Automation, 2023,49(8):70-80. (in Chinese))
- [22] Larson E J. Vehicle Localization in an underground mine using ultrasonic sensors [D]. Golden: Colorado School of Mines, 2012.
- [23] 辛海明,刘月昊,宋鹏飞,等. 一种智能机器人AGV小车的设计[J]. 现代制造技术与装备,2019(4):25-27,30. (Xin Haiming, Liu Yuehao, Song Pengfei, et al. Design of an intelligent robot AGV car [J] Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(4):25-27,30. (in Chinese))