

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.240037

电子导向胶轮系统的建设启示与展望

张斌

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 电子导向胶轮系统是一种低运量轨道交通制式,国内已发展出智轨、超轨和数轨等不同形式,国外也有国家计划运行该系统。为研究该系统的成功要素和适用条件,根据目前宜宾、株洲、上海、盐城等地已开通线路的客流和运行情况,总结了该系统相比快速公交和有轨电车的优缺点,提出了该系统的适用条件,并展望了其在灵活解编组、与高架快速路相结合、路面强化和自动驾驶这几方面的技术发展方向。

关键词: 电子导向胶轮系统;智轨;建设;启示

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0256-04

Enlightenment and Prospect of Construction of Electronic Guide Rubber Wheel System

ZHANG Bin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co.,Ltd, Shanghai 200092,China]

Abstract: The electronic guide rubber wheel system is a kind of low-volume rail transit system. The different forms of autonomous rail rapid transit (ART), super-rail rapid transit (SRT) and digital rail rapid transit (DRT) have been developed in China, and there are also plans abroad to operate the system. In order to study the success factors and applicable conditions of this system, according to the passenger flows and operation conditions of the opened lines now in Yibin, Zhuzhou, Shanghai and Yancheng, the advantages and disadvantages of this system are summarized by comparing with the bus rapid transit and tramcar. The applicable conditions of this system are put forward, and the development direction of the technology in flexible marshaling, combination with elevated expressway, pavement strengthening and automatic driving are also prospected.

Keywords: electronic guide rubber wheel system; autonomous rail rapid transit (ART); construction; enlightenment

0 引言

电子导向胶轮系统是指沿虚拟轨道运行,以电子导向胶轮电车为运输载体,采用轨道交通运营模式的中运量公共交通系统。目前车辆主要由中车集团自主研制,属于城市轨道交通分类中的电子导向胶轮系统^[1]。随着我国高速铁路和城市轨道交通逐渐进入成熟发展期,轨道交通车辆需求增长逐渐放缓,市场增量逐渐转向中低运量轨道交通。该类工程无需敷设轨道,投资较小,以地面形式为主,可在客流和建设条件适宜的局部地区满足居民高品质中

短距离的出行需求,因而已成为轨道交通行业的关注焦点。目前中车集团共研发有3款电子导向系统车辆产品,分别是旗下株洲电力机车研究所有限公司研发的智能轨道车辆(ART,俗称“智轨”)、南京浦镇车辆有限公司研发的数字轨道车辆(DRT,俗称“数轨”)和株洲电力机车有限公司研发的超级轨道车辆(SRT,俗称“超轨”)。其中,3节编组车辆(见图1)的长度为30 m左右,超过了国内公交车对于单铰接客长度最长18 m的允许值^[2],且与国外双铰接客长度不同,它具备双向驾驶、后轮循迹跟随和高级辅助驾驶功能,因此已成为希望发展轨道交通的城市考虑的制式之一。

然而,疫情3 a来,国内电动汽车和两轮电动自行车发展非常迅速,地面公交客流持续下滑,这种轨道交通制式是否可以在地面交通出行中获得足够优

收稿日期: 2024-01-01

基金项目:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司启明星计划(K2021K106)

作者简介:张斌(1989—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通设计工作。



图1 电子导向胶轮系统3节编组列车

势,得到居民出行认可,是一个重大的挑战。在新的出行环境下,作为一种新型的轨道交通制式,其成功要素和适用条件依然未量化,选择在什么样的区域和走廊上建设这种系统才能够确保成功,成为了决策过程中争议的焦点。

1 电子导向胶轮系统运行情况

目前国内已有湖南株洲、四川宜宾、江苏苏州、陕西西安、黑龙江哈尔滨、江苏盐城、上海临港共7个城市开通了电子导向胶轮系统,其运行情况如表1所列。国外阿联酋阿布扎比项目和马来西亚古晋市也开通了智轨。

表1 国内电子导向胶轮系统运营情况^[3]

线路名称	开通日期	长度/km	日客流/万人次	日客流强度/(万人次·km ⁻¹)
株洲智轨 A2 路	2021-03	10.3	0.75(平日)/ 1.5(假日)	0.07(平日)/ 0.14(假日)
宜宾智轨 T1 线	2019-12	17.7	1.5(平日)/ 2(假日)	0.08(平日)/ 0.11(假日)
吴江智轨 T1 线	2021-11	5.1	0.1(平日)/ 0.6(假日)	0.02(平日)/ 0.12(假日)
西安智轨 1 号线	2023-03	6.5	0.1	0.02
哈尔滨智轨 1 号线	2022-02	18.2	0.2	0.01
盐城超轨 1 号线	2021-04	13	0.7	0.05
临港数轨 1 号线	2021-07	21.75	0.5	0.02

根据国家对于低运量轨交系统初期每日客流强度不得低于0.1万人次/km的要求,目前正在运行的几条线路中,除少数线路在节假日期间可达标之外,其余尚未达到该标准。但是,如果不以单条线路来考察,而是以与公交车在同一个专用道内运行相融合的客流走廊看,宜宾、株洲和盐城线路则超过了该客流强度标准,且其投资金额与快速公交系统(BRT)相近,在高峰时段具有运能优势。

2 电子导向胶轮系统优缺点分析

根据已有线路运行情况和乘客反馈意见,对电子导向胶轮系统的优缺点进行分析。

2.1 电子导向胶轮系统的优点

(1)列车相比于快速公交,具有更智能的驾驶系统、更大的运能和更高的可识别度。该车实现了自主导向、轨迹跟随、全电驱动、智能驾驶等功能,能精确控制后车跟随头车轨迹行驶。智轨3节编组额定载客达300人,是18 m铰接公交车的2倍,12 m公交车的3倍。车身现代简洁,辨识度高,车内空间大,视野开阔,便于带行李箱乘客和轮椅乘客乘坐。

(2)列车相比于有轨电车,具备较强的适应性和灵活性。系统无需铺设钢轨,建设周期短,不仅减少了钢轨投资和管线迁改量,线路走向还可根据客流情况灵活调整,可针对客流集中区域提供疏散保障方案。

(3)项目投资成本较低。有轨电车投资为1.2亿元/km,而以地面为主的智轨投资为0.3~0.5亿元/km,仅为有轨电车投资的1/3。

(4)系统运营成本与快速公交相当,比有轨电车要低。由于轨道和信号系统的维护方式比有轨电车简易,与快速公交接近,且列车容量大、司机配置相对公交少,因此具有一定的运营成本优势。

2.2 电子导向胶轮系统的缺点

(1)列车对道路车道规模和交通条件要求较高。列车制动距离较常规公交要长,转弯半径较常规公交车要大,在混行条件下需要保持足够的前车车距,需要专用路权来确保运行车速和交通安全;当专用道利用率不高时,易引发社会舆论。另外,长度为12、18 m的公交车最小转弯半径为12.5 m,而列车理论最小转弯半径是15 m,实际要保持15 km/h低速转弯时所需要的转弯半径达20 m以上,在经过路口转弯时需要尽量靠路中行驶,以避免通过路口耗时太久。

(2)列车需要高客流支撑。列车结构比较固定,难以实现高峰和平峰灵活解编组,3节编组车辆长度达30 m,满载300人左右,在高峰期可以发挥运能强的优势,平峰时段则运能过剩,成本较高。目前运行较好的智轨系统每日客流量需达到1.5万人次以上,高峰发车间隔进入8 min以内,如果在客流不足的通道采用智轨,容易进入发车间隔超过15 min和客流吸引力不足的恶性循环,需要与常规公交车搭配才

能做到供需匹配。

(3)列车运营需要单独审批。该类车辆不属于公交车,未进入国家工信部目录,车辆上路、上牌和安全事故处理均需要单独发布管理条例,驾驶员也需要参考有轨电车相关条例进行专门培训。

(4)列车需要专门的车辆基地。由于车辆双向驾驶,车辆基地参照有轨电车,占地面积较大。以长度30 m的3节编组列车为例,停车场面积平均需要1 200~1 500 m²/辆,而18 m公交车仅需要360 m²/辆。

电子导向胶轮系统与快速公交和有轨电车参数的比较见表2。

表2 电子导向胶轮系统与快速公交和有轨电车比较

制式	快速公交	电子导向胶轮系统	有轨电车
路权	独立/共享	独立/共享	独立
单向运能/(人·h ⁻¹)	5 000~10 000	5 000~12 000	5 000~12 000
最高速度/(km·h ⁻¹)	60	70	70
平均运营速度/(km·h ⁻¹)	18~30	15~30	13~23
建设投资/(亿·km ⁻¹)	0.3~0.5	0.3~0.5	1.2
车辆成本/(万元·辆 ⁻¹)	200	1 600~1 800	3 000
车辆生命周期/a	8	25	30
停车场面积/(m ² ·辆 ⁻¹)	360	1 200	1 500~1 800
工程周期/a	0.5~1	0.5~1	2~3

2.3 智轨、数轨和超轨的异同

目前三者的主要车型均为车长30 m左右的胶轮列车,技术指标较为接近。厂商正在研发更智能、更舒适、更灵活的车辆,中车青岛四方机车车辆股份有限公司研究了更轻、更智能的“快轨”用于胶州市中运量线路,目前正在建设中。

国内电子导向胶轮系统的车辆参数对比见表3。

表3 国内电子导向胶轮系统车辆参数对比

项目	智轨	数轨	超轨
长度/m	31.65	30.5	36
宽度/m	2.65	2.5	2.65
高度/m	3.4	3.6	3.6
最大速度/(km·h ⁻¹)	70	70	70
车轴数	6	8	6
3节编组	两动一拖	两动一拖	两动两拖

3种车型的主要区别如下。

(1)虚拟轨道形式不同。智轨和超轨利用车头摄像头来识别地面标线图像,车辆按车道中央标线

行驶,在雨雪天气和标线不清晰的情况下需要人工接管;数轨则将标线替换为磁钉,在沥青面层5 cm深度内每隔1 m铺设1个,利用车轴磁传感器识别磁钉坐标,车辆按磁钉循迹行驶,不受雨雪和光线影响,同时通过磁钉的编码和定位具备了定位功能。但是由于磁钉逐个安装比施划标线要复杂,后期路面养护大修时需取出回收,因此数轨的建设和运营成本约为智轨和超轨的4倍。

(2)车辆能源形式不同。智轨采用磷酸铁锂电池供电;超轨采用锰酸锂电池和超级电容相结合的形式供电;数轨有超级电容和氢能源混合动力2种车辆能源形式。其中氢能源动力的车辆续航可达150 km,其他电容和电池车辆续航在50~70 km。

3 电子导向胶轮系统适用条件

客流条件宜满足工作日客流强度大于每日0.1万人次/km,且单向高峰断面客流高于0.2万人次/h。考虑到该车型目前2节编组为2节驾驶室,性价比不如18 m公交车,因此该列车需要3节编组起步;选择客流走廊时,要确保线路覆盖主要客流走向,不能仅仅依靠节假日出行需求,而是工作日客流强度和高峰断面客流都满足条件,才能保证其发车间隔较短,服务水平较高,乘坐的舒适性和空间环境相比纯电动公交车优势较大。

道路条件宜满足地面双向4车道以上,转弯路口路中轨迹半径不低于20 m。原因是主干路和次干路级别才有双向4车道以上条件,能确保路基和路面结构较强,不至于因胶轮车辆胎压较大导致路面反复车辙;还能确保线路所经过的交叉口间距较大,红绿灯密度低且绿信比大,可实现绿波连续快速通行;同时还能保障路口转弯半径不低于20 m,因胶轮车辆没有钢轨约束,主要靠电子控制车轮循迹,若过弯半径过小有可能在通行过快时导致其侧翻,通行过慢时则会堵住路口,因此,路口转弯半径越大,车辆整体运营速度和交通安全性越高。

运营组织上需要在地面专用道上组织多条公交车支线来喂给客流,与BRT系统相融合,可针对瞬时大客流组织专线发挥运能优势。从盐城SRT、株洲ART、临港DRT等实施效果看,地面为主的系统旅行速度在17~25 km/h,其在疫情后的交通出行环境中,吸引的客流不足以支撑该车辆单线运行,需要组织公交支线进入专用道和停靠站台来提高客流走廊的吸引力。在平峰时段列车发车间隔严重不足时,可

以通过支线公交车加密发车来确保平峰时段的服务水平。另外,针对演唱会、足球赛、大型会议展览、旅游节、大学城放学等瞬时客流较高的点位,组织该列车专线进行定点疏散,是发挥列车优势的适用场景。

4 电子导向胶轮系统技术展望

优化铰接衔接构造设计,实现灵活解编组,在车辆标准化和小型化后,降低列车整体造价。由于电子导向胶轮电车难以短时间进行解编组,无法实现高峰和平峰不同编组的转换,单编组和两编组基本无法实现,这限制了其应对地面交通变化的灵活性,目前需要搭配公交车来实现大车和小车的混合运营。另外,长度为30 m的3节编组列车与2辆18 m公交车的造价差距较大,如能将车辆长度标准化为8~10 m,并能将动拖车辆实现标准化、灵活挂载和解编组,将提高车辆使用范围,降低制造成本并提高轻量化水平和灵活性^[4]。

与既有高架快速路相结合,建设电子导向胶轮电车的轨道交通线路。由于各大城市建设了成网的高架快速路,使得小汽车出行速度有较大优势,如借用高快速路系统增设车站,使得旅行速度达到30~35 km/h,则可大幅提高客流吸引力,单线客流强度可参照轻轨,达到电子导向胶轮系统3节以上编组的运行条件。例如,成都二环BRT、贵阳中环BRT和厦门BRT系统尝试通过增设和改造安全门位置来提升乘客乘坐体验^[5]。

强化路面井盖,提升路面平整度和桥台接坡平顺处理标准,提升胶轮系统运行舒适性。考虑到3节车厢为6轴甚至8轴设计,在路面存在车辙、坑槽、桥台衔接高差时,会出现连续6~8次颠簸,这是乘客不能接受的。目前路面的日常管理还达不到轨道交通钢轨的要求,因此需要进一步细化路面标准,应用半柔性路面,提高路面平整度、井盖沉降和桥台接坡处理标准,进一步提升胶轮电车乘坐舒适性。

开展车路协同的自动驾驶测试和应用。目前电子导向胶轮列车虽然可以实现循迹,即脱手驾驶,但是距离L3级自动驾驶还有较大差距。标线引导无法应对雨雪雾天气,需要高精度地图配合,车载双目摄像头也需要升级到车载多源感知解决方案,并通

过车路协同功能来减少人工干预频次,提高驾驶安全性和稳定性,降低运营的人工成本。

5 结语

目前国内正在运行的电子导向胶轮系统尚未达到每日0.1万人次/km的标准,少数城市节假日期间可达到该标准。

电子导向胶轮系统相比于快速公交,具有更智能的驾驶系统、更大的运能和更高的可识别度。相比于有轨电车,电子导向胶轮列车无需铺设钢轨,具备较强的适应性和灵活性。电子导向胶轮系统项目投资成本较低,与BRT项目相当。电子导向胶轮系统的缺点是:列车制动距离较常规公交长,转弯半径较公交车大;列车结构比较固定,难以实现高峰和平峰灵活解编组,需要高客流支撑;列车运营需要单独审批;列车需要专门的车辆基地。

综上所述,本文提出3项电子导向胶轮系统适用条件:一是客流条件宜满足工作日每日客流强度大于0.1万人次/km,且单向高峰断面客流高于0.2万人次/h;二是道路条件宜满足地面双向4车道以上,转弯路口路中轨迹半径不低于20 m;三是需要在地面专用道上组织多条公交车支线来喂给客流,与BRT系统相融合,在遇到瞬时大客流时,可组织专线发挥运能优势。另外提出4点展望:一是优化铰接衔接构造设计,实现灵活解编组,在车辆标准化和小型化后,降低列车整体造价;二是与既有高架快速路相结合,建设电子导向胶轮电车的轨道交通线路;三是强化路面井盖,提升路面平整度和桥台接坡平顺处理标准,提升胶轮系统运行舒适性;四是开展车路协同的自动驾驶测试和应用。

参考文献:

- [1] T/CAMET 00001—2020,城市轨道交通分类[S].
- [2] GB 1589—2016,汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].
- [3] 双节期间智轨出行大数据发布,全国超35万人次乘坐智轨低碳出行[EB/OL]. (2024-01-09) [2023-10-12]. <http://fgw.zhuzhou.gov.cn/e14782/20231012/i2105486.html>.
- [4] 周勇,徐吉庆,张超.低运量城市轨道交通系统发展思考[J].城市交通,2013,21(5):12-21.
- [5] 张斌.山地城市快速公交的规划建设启示[J].城市道桥与防洪,2018(12):1-9.