

智能轨道快运系统运输能力研究

雷 强¹ 谢丽平²

(1. 中铁第四勘察设计集团有限公司, 430063, 武汉;
2. 武汉地铁集团有限公司, 430030, 武汉//第一作者, 工程师)

摘 要 分析了影响智能轨道快运系统运输能力的因素,结合智能轨道快运系统的构成对运输能力进行计算分析。研究表明,智能轨道快运系统运输能力受限于线路通过能力,最大通过能力为 20 对/h,最大运输能力为 0.5 万~0.7 万人/h。

关键词 智能轨道快运系统; 运输能力; 列车通过能力

中图分类号 U292.5; U482

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.018

Research on Transportation Capacity of Autonomous-rail Rapid Transit System

LEI Qiang, XIE Liping

Abstract By analyzing from transportation capacity influencing factors, and then calculating the transportation capacity considering the composition of ART (autonomous-rail rapid transit) system. Research result shows that the transportation capacity of ART system is limited by line-passing capacity, the maximum passing capacity is 20 pairs/h and the maximum transportation capacity is 5 000~7 000 people/h.

Key words ART (autonomous-rail rapid transit) system; transportation capacity; train passing capacity

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

智能轨道快运系统(以下简称“智轨系统”)是采用虚拟轨迹跟随、全电力驱动及智能综合管理系统技术的新型胶轮运载工具^[1],为最新型的交通制式。智轨系统的列车(以下简为“智轨列车”)采用胶轮替代传统的钢轨钢轮,通过轨迹跟随控制技术对列车实行电子控制,进而实现列车在路面虚拟轨道上的运行,并采用多轴转向技术以确保每节车厢能按预设轨迹行驶。智轨系统兼具了有轨电车快速、环保、大运量的特点,以及传统公共汽车运行灵活的特点。智轨系统的运输能力是界定其运量等级及判定适用范围的基础,对智轨系统的规划设计具有重要的指导意义。

1 运输能力及其构成

1.1 运输能力的概念

运输能力是轨道交通系统基础设施及固定设备在单位时间内所能运输的乘客人数,是评判系统技术水平和服务水平的重要指标。

目前常见的公共交通系统中,地铁列车采用独立全封闭形式,运输能力可以达到 4.0 万~5.0 万人/h,有轨电车一般采用半独立路权,运输能力可以达到 0.6 万~1.0 万人/h,采用混合路权的 BRT(快速公交系统)和公交车运输能力为 0.2 万~0.4 万人/h。常见不同公共交通方式的运输能力统计如表 1 所示。

表 1 常见公共交通运输能力表

Tab.1 Transportation capacity of common public transportation means

名称	运输能力/(万人/h)	路权形式
地铁	4.0~5.0	全封闭
有轨电车	0.6~1.0	半独立
BRT	0.3~0.4	半独立、混合
公交车	0.2~0.3	混合

1.2 运输能力的构成

智轨系统运输能力是单位小时内智轨系统能够运输的乘客人数,不但与列车载客量有关,还与智轨系统的通过能力有关。运输能力等于通过能力与列车载客量的乘积。

1.2.1 通过能力

影响智轨系统整体通过能力 $N_{\text{通过}}$ 的主要因素有线路通过能力、设备服务能力和车站折返能力,即:

$$N_{\text{通过}} = \min(N_{\text{设备}}, N_{\text{折返}}, N_{\text{线路}}) \quad (1)$$

式中:

$N_{\text{设备}}$ ——信号、供电等设备的服务能力;

$N_{\text{线路}}$ ——线路通过能力;
 $N_{\text{折返}}$ ——车站折返能力。

1.2.2 列车载客量

智轨系统的列车额定载客量计算应包括坐席和站席。根据智轨列车技术标准,3 模块和 5 模块的列车额定载客量分别为 240 人/列和 360 人/列。

1.2.3 运输能力

在确定通过能力和列车载客量的条件下,系统运输能力为:

$$P = N_{\text{通过}}MC_{\text{车}} \tag{2}$$

式中:

P ——单位小时内单向最大运输能力;
 M ——列车编组数量;
 $C_{\text{车}}$ ——列车载客量。

2 智轨系统通过能力计算

2.1 智轨列车主要参数

智轨列车编组形式较为灵活,目前主要的编组形式有 3 模块和 5 模块两种。本研究以 3 模块智轨列车为例,其主要参数如表 2 所示^[1]。

表 2 3 模块智轨列车主要参数表

Tab.2 Main parameters of 3 modules ART train

项目	参数
车长/mm	约 32 000
车宽/mm	2 650
车高(含车顶外加附件)/mm	≤3 400
车辆编组	3 模块编组,2 动 1 拖
空车质量/t	≤32
最大轴重/t	≤8.5
最高运行速度/(km/h)	70
起动加速度/(m/s ²)	≥1.5
0~40 km/h 阶段的平均加速度/(m/s ²)	≥0.95
0~70 km/h 阶段的平均加速度/(m/s ²)	≥0.7
线路最大坡度/‰	100
线路最小转弯半径/m	15
供电制式	车载储能装置供电,车载储能电池电压范围标称电压 DC 600 V
充电电流/A	≤1 000
列车载客量/人	240(额定)、307(超员)

2.2 设备服务能力

与地铁相比,智轨系统的设备较为简单,主要

为通信、信号及供电等专业的设备。智轨列车的通信及信号设备只对列车运行进行监视而不控制,列车根据路面虚拟轨迹导向行驶,由司机控制列车运行速度。可见,智轨列车通过能力不受通信及信号设备的服务能力限制。

智轨列车运行动力由车载蓄电池提供。列车一般在线路首末端为蓄电池集中充电,且完成 1 次充电需要 10 min(含准备时间),即单个充电位的服务能力为 6 列/h。智轨线路的末端车站一般坐落于城市外围区域,有充裕的土地资源用于设置充电位。充电位通常采用横列式或纵列式布置,如图 1 所示。不同充电位数对应的充电服务能力见表 3。

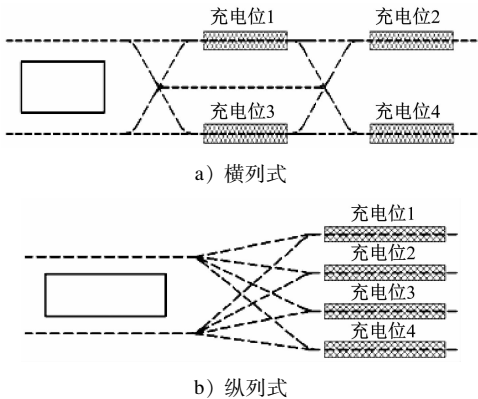


图 1 充电位布置示意图

Fig.1 Charging position layout

表 3 不同充电位数的服务能力表

Tab.3 Service capability of different charging bits

充电位数/个	最小发车间隔/min	充电服务能力(列/h)
2	5.0	12
4	2.5	24
6	1.7	35

由表 3 可见,设置多个充电位可缩短发车间隔,提升充电站的服务能力。根据工程设计经验^[2],一般设置 4 个充电位时,占地规模小,对周边道路等影响小,相应的工程投资比较经济,并能满足一般项目的充电需求。因此,项目多按 4 个充电位设计,相应充电服务能力为 24 列/h。

2.3 线路通过能力

智轨列车采用半独立路权,在道路平交路口与社会车辆混行。其运行方式类似于专用道的有轨电车或 BRT,线路通过能力受限于平交路口的通过能力,可采用道路信号控制平交路口 1 条直行车道通过能力的计算方法^[3],即:

$$N_{\text{线路}} = \frac{t_1}{T} \left(\frac{t_g - t_0}{h} + 1 \right) a \tag{3}$$

式中：

- t_1 ——统计时间,本文取 1 h;

T ——信号周期;

t_g ——智轨列车绿灯信号相位时间;

t_0 ——绿灯亮后第 1 辆智轨列车起动通过停车线的时间;

h ——智轨列车通过停车线的平均时间;

a ——折减系数。

常见的平交路口信号控制策略有定时信号控制策略、信号相对优先策略和信号绝对优先策略^[4]。为提高平交路口处通过能力,智轨列车借鉴有轨电车或 BRT 的经验,采用信号相对优先策略,即延长绿灯相位时间或缩短红灯相位来实现信号相对优先^[5]。本研究中,平交路口绿信比(1 个信号相位的有效绿灯时长与周期时长之比)取 0.25 ~ 0.30,智轨列车过路口的运行速度为 30 km/h,智轨列车通过路口清空时间为 10 s,反应时间为 5 s。经计算,最小发车间隔及通过能力如表 4 所示。

表 4 智轨列车最小发车间隔及通过能力表

Tab.4 Minimum departure interval and passing capacity of ART

绿信比	列车编组	最小发车间隔/min			通过能力(列/h)		
		路口宽 30 m (4 车道)	路口宽 48 m (6 车道)	路口宽 60 m (8 车道)	路口宽 30 m (4 车道)	路口宽 48 m (6 车道)	路口宽 60 m (8 车道)
0.30	3 模块	2.0	2.3	2.3	30.0	26.1	26.1
0.25	3 模块	2.6	2.8	2.8	23.1	21.4	21.4
0.30	5 模块	2.1	2.3	2.4	28.6	26.1	25.0
0.25	5 模块	2.6	2.8	2.9	23.1	21.4	20.7

通过理论计算可得,智轨列车通过交叉口的最小发车间隔为 2.6 ~ 2.9 min,通过能力为 23.1 ~ 20.7 列/h。综合考虑实际道路宽度、运营中司机操作等不确定因素,并考虑一定的设计余量,智轨列车线路最大通过能力按 20 对/h 考虑。

2.4 折返能力

根据车站折返线的布置形式,通常有站前折返和站后折返两种方式^[5]。列车的站后折返不影响对向运行线路,且站后折返能力较站前折返能力

大。结合智轨列车运营灵活的特点,本研究重点对智轨列车通常采用的站前折返能力进行计算。站前折返示意图及作业流程如图 2 及图 3 所示。

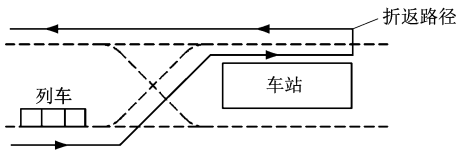


图 2 列车站前折返示意图

Fig.2 Turn-back before the station

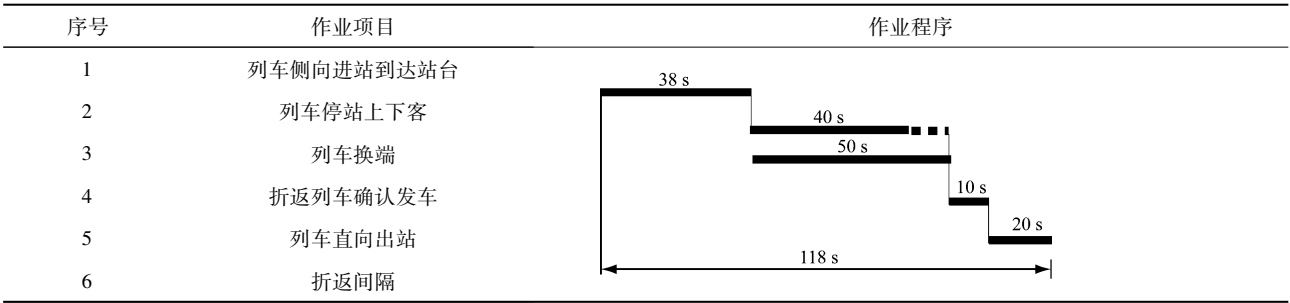


图 3 列车折返作业流程图

Fig.3 Train turn-back operation procedure

根据列车折返作业流程和智轨列车基本性能参数,智轨列车进站耗时为 38 s,出站耗时为 20 s,司机换端走行时间为 50 s,确认时间为 10 s,停站时间按 40 s 计,折返间隔时间为 118 s,折返能力为 30

列/h。

2.5 运输能力

将设备服务能力、线路通过能力、折返能力分析计算结果代入式(1)计算,则智轨列车通过能力

为不同影响因素能力的最小值,即线路通过能力决定了智轨系统的最大通过能力。采用半独立路权的智轨系统在平交路口的通过能力取决于路口信号控制方式。按常见的信号相对优先策略,智轨列车最小发车间隔基本可满足 3.0 min 要求,最大通过能力达 20 列/h。

根据上述计算分析,综合考虑现代城市道路交通组织方式和运营安全等因素,3 模块智轨系统运输能力为 0.5 万人/h,5 模块智轨系统运输能力为 0.7 万人/h。

3 结语

本文对智轨快运系统的运输能力进行研究。通过对影响运输能力因素的计算分析,确定智轨系统运输能力受限于线路通过能力。考虑实际运营场景的复杂性,确定智轨系统最大通过能力为 20 对/h,运输能力为 0.5 万~0.7 万人/h,属于低运能轨道交通系统。研究结果明确了智轨系统运输能力,对指导实际项目设计和推广系统应用具有重要意义。

参考文献

[1] 中车株洲电力机车研究所有限公司. 智能轨道快运系统车辆

(上接第 79 页)

共交通路网发展、分担投资风险的有效方式,也为城轨项目的运营管理带来了挑战。本文从项目社会资本方资质、政策环境、项目运营风险等多因素考虑,对比分析了 PPP 项目的整体委托、专业分包和团队外委等委托运营模式,并以大连地铁 5 号线为案例对委托运营模式进行选择,分析了专业分包模式该项目中的适用性及优势,并提出了委托运营管理建议。

参考文献

- [1] CHANG Z, MURAKAMI J. Transferring land-use rights with transportation infrastructure extensions: evidence on spatiotemporal price formation in Shanghai[J]. The Journal of Transport and Land Use, 2019,12(1):1.
- [2] 陈志雄. 城市轨道交通委托运营管理模式合同方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(7): 50.
- CHEN Zhixiong. Contract schemes of urban rail transit project in

技术规格书[R]. 株洲: 中车株洲电力机车研究所有限公司, 2017.

CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd. Technical specification of ART System vehicle[R]. Zhuzhou: CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd., 2017.

- [2] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 宜宾智能轨道快运系统示范线可行性研究报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2018.
- China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Study of Yibin ART System demonstration line[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2018.
- [3] 任福田, 刘小明, 荣建, 等. 交通工程学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- REN Futian, LIU Xiaoming, RONG Jian, et al. Traffic engineering[M]. 2 ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [4] 张海军, 胡红军. 现代有轨电车最小发车间隔及相关指标研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(12): 27.
- ZHANG Haijun, HU Hongjun. On the minimum departure interval of modern tram and the relevant indexes[J]. Urban Mass Transit, 2017(12): 27.
- [5] 宋嘉雯. 有轨电车运营模式与运输能力研究[J]. 都市快轨交通, 2014(2): 108.
- SONG Jiawen. Research on operation mode and capacity of tramways[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(2): 108.

(收稿日期: 2020-05-21)

delegated O&M contract model[J]. Urban Mass Transit, 2014(7): 50.

- [3] 陈民, 陈非迟. 解密轨道交通 PPP[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2016.
- CHEN Min, CHEN Feichi. Demystifying rail transit PPP[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2016.
- [4] PHANG S Y. Urban rail transit PPPs: survey and risk assessment of recent strategies[J]. Transport Policy, 2007, 14(3): 214.
- [5] 牟振英. 委托管理模式在城市轨道交通运营中的应用与探讨[J]. 地下工程与隧道, 2009(2): 31.
- MOU Zhenying. Application of entrusted management mode in rail transit operation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009(2): 31.
- [6] 张明逸. 政企合作综合开发承包城轨运营的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- ZHANG Mingyi. Research of contracting and managing transit based on cooperating with government in enterprise and exploiting synthetically[D]. Changsha: Central South University, 2008.

(收稿日期: 2020-05-25)