

中低速磁浮制式在市域(郊)线路中的适应性研究^{*}

戴能云^{1,2} 邓娟红^{1,2} 戴 珏^{1,2} 李 浩^{1,2} 侯喜快^{1,2}

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 410200, 长沙; 2. 湖南省轨道勘察设计院有限公司, 410200, 长沙)

摘 要 [目的] 针对当前市域(郊)铁路系统制式选择较为单一、工程投资较大、地下线占比较高等问题,分析中低速磁浮线在市域(郊)线路中的适应性,为市域(郊)线路发展提供多样化的系统制式选型。[方法] 介绍了市域(郊)铁路的功能定位及中低速磁浮线的技术特征,结合市域(郊)铁路技术要求,从线路适应性、最高运行速度、环境协调性、运能适应性、互联互通及资源共享、综合能耗、工程投资等方面对中低速磁浮线与轮轨线路进行了详细对比分析。[结果及结论] 研究表明:中低速磁浮线在线路适应性、环境协调性、乘坐舒适性以及工程投资等方面具有独特优势,非常适应于地形起伏较大、城区线路较长、服务范围相对独立、客流规模为中运量等级的市域线路。

关键词 中低速磁浮线;市域(郊)铁路;适应性分析

中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.032

Adaptability of Medium-low Speed Maglev System in City (Suburban) Railway

DAI Nengyun^{1,2}, DENG Juanhong^{1,2}, DAI Jue^{1,2}, LI Hao^{1,2}, HOU Xikuai^{1,2}

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 410200, Changsha, China; 2. Hunan Railway Survey and Design Co., Ltd., 410200, Changsha, China)

Abstract [Objective] Addressing the current issues of relatively limited system choices, large engineering investment, and high proportion of underground lines, the adaptability of medium-low speed maglev lines in city (suburban) railway is analyzed, and diversified system choices are provided for city (suburban) railway development. [Method] The functional positioning of city (suburban) railway and the technical characteristics of medium-low speed maglev lines are introduced. Combining with the technical requirements of city (suburban) railway, a detailed comparative analysis is conducted between medium-low speed maglev lines and wheel-rail lines from aspects including line adaptability, maximum operational speed,

environmental compatibility, transportation capacity adaptability, interoperability and resource sharing, comprehensive energy consumption, engineering investment. [Result & Conclusion] Research results show that medium-low speed maglev lines have unique advantages in adaptability, environmental compatibility, ride comfort, and engineering investment, hence highly suitable for city railway lines characterized by significant terrain variations, longer urban routes, relatively independent service areas, and moderate passenger traffic volume. **Key words** medium-low speed maglev; city (suburban) railway; adaptability analysis

近年来,随着中国城市化进程的加快以及城市群发展,市域(郊)铁路建设迎来发展新机遇。截至2019年底,全国铁路营业里程13.9万km,其中市域(郊)铁路1160km^[1]。2020年12月,国家发展改革委联合交通运输部、国家铁路局、中国铁路总公司出台了《关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展的意见》,明确指出:发展市域(郊)铁路,对优化城市功能布局、促进大中小城市和小城镇协调发展、扩大有效投资等具有一举多得之效,有利于发挥中心城市辐射带动作用,有利于扩大公共服务供给,对缓解城市交通拥堵、推动新型城镇化发展具有重要意义。目前,我国市域(郊)铁路系统制式选择较为单一,单一的轨道交通系统制式已不适应不同空间尺度的出行需求,研究中低速磁浮线在市域(郊)线路中的适应性,可为市域(郊)线路发展提供多样化的系统制式选型,推动市域(郊)线路和都市圈可持续发展。

1 市域(郊)铁路功能定位

市域(郊)铁路是连接都市圈中心城市城区和周边城镇组团,为通勤客流提供快速度、大运量、公交化运输服务的轨道交通系统。市域(郊)铁路主

^{*} 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4033);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202014);湖南省企业科技创新创业团队支持计划(2022)

要布局在经济发达、人口聚集的都市圈内的中心城区,联通城区与郊区及周边城镇组团,采取灵活编组、高密度、公交化的运输组织方式,重点满足 1 h 通勤圈快速通达出行需求。其服务功能介于城市轨道交通与城际铁路之间,服务特性更接近于城市轨道交通,可有效缓解城市交通拥堵,同时可推进新型城镇化快速发展。

《关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展的意见》明确提出:市域(郊)铁路新建线路单程通行时间宜不超过 1 h,设计速度宜为 100 ~ 160 km/h;对于敷设方式,原则上以地面建设为主,困难地段可采用高架,新建线路直接工程费用不高于轻轨工程费用的 75%。这对市域(郊)铁路在线路适应性、旅行速度、工程投资等方面提出了更高的要求。

2 中低速磁浮线技术特征

中低速磁浮线系统是一种利用电磁力使车体悬浮于轨道之上,并通过直线电机推动列车运行的轨道交通系统。其最大特点是磁浮列车实现非黏着牵引和无接触运行,具有转弯半径小、爬坡能力强、振动噪声低、安全可靠等优点。目前,已运营的有长沙磁浮快线和北京 S1 线,已开通试运行的有凤凰磁浮文化旅游项目,正在建设的有清远磁浮旅游专线、长沙磁浮东延线接入 T3 航站楼工程项目,长沙中低速磁浮线主要技术参数^[2]见表 1。

3 适应性分析

3.1 线路适应性

根据 DBJ 43/T007—2017《湖南省中低速磁浮交通设计标准》,中低速磁浮列车正线最小平面曲线半径为 100 m,车辆基地最小平面曲线半径为 50 m,圆曲线及相邻两曲线之间的夹直线最小长度为 15.6 m,车场线夹直线最小长度为 2.8 m,最大纵坡可达 70‰。已开通试运行项目中,凤凰磁浮项目最小平面曲线半径为 100 m,最大纵坡为 51‰;在建项目中,长沙磁浮东延线接入 T3 航站楼工程正线最小平面曲线半径为 200 m,最大纵坡为 50‰。为了吸引客流,保证线路的正常运营,市域(郊)铁路在城区段一般沿建成区敷设,为了减少拆迁,同时满足国家对市域(郊)铁路主要以地面敷设为主的要求,要求系统制式具有较强的线路适应性。中低速磁浮线以其振动噪声小、曲线半径小、爬坡能力强等优点,能很好地适应市域(郊)线路的要求,可高

表 1 长沙中低速磁浮主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of Changsha medium-low speed maglev

参数名称	取值
车辆长度/mm	15 600
车辆宽度/mm	2 800
客室地板距轨面高度/mm	890
轨距/mm	1 860
悬浮架模块中心距/mm	2 800
额定悬浮间隙/mm	8
供电电压/V	DC 1 500
最高运行速度/(km/h)	100 ~ 160
启动加速度/(m/s ²)	≥0.8
平均加速度/(m/s ²)	≥0.4
常用制动减速度/(m/s ²)	≥0.8
紧急制动减速度/(m/s ²)	≥1.0
正线最小曲线半径/m	100
车场线最小曲线半径/m	50
最大坡度/‰	70

架在城区穿行,减少对城市地块的切割并能减少拆迁工程量、降低工程造价。

以长沙至宁乡线为例,分别对采用磁浮制式和市域快轨制式线路方案进行了研究。采用磁浮制式,除宁乡主城区部分路段外,其余全部采用高架敷设;而采用市域快轨制式,在宁乡城区及长沙城区均需采用地下线敷设,详细数据对比见表 2。

表 2 长沙—宁乡线采用不同制式敷设方式对比

Tab.2 Comparison of different standard laying methods for Changsha-Ningxiang Line

线路制式	线路长度/km			地下线占比/%
	总长	地下线	地上线	
磁浮线	39.5	7.0	32.5	17.72
市域快轨线	39.5	11.0	28.5	27.85

综上所述,相比市域快轨线,中低速磁浮线具有更好的线路适应性。

3.2 最高运行速度

市域(郊)铁路主要解决中心城市与郊区及周边城镇组团之间的通勤需求,一般要求通勤时间控制在 1 h 以内,要求最高运行速度在 100 km/h 以上,目前已建成的市域(郊)铁路最高运行速度一般在 120 km/h 至 160 km/h 之间。中低速磁浮线最高运行速度可达 160 km/h,正在运营的长沙磁浮快

线,2021年7月最高速度已提速至140 km/h运营,并且运营状态良好。因此,中低速磁浮线完全可满足市域(郊)线路对旅行速度的要求。

3.3 环境协调性

1) 噪声。磁浮列车采用悬浮技术,无轮轨间的接触或摩擦,列车振动和噪声较轮轨制式小,对沿线环境的影响也小。根据长沙中低速磁浮工程的实际测试结果,在自由声场内,列车以73 km/h速度匀速运行时,在车外距轨道中心7.5 m处,测得的连续噪声值为70.4 dB(A)。根据上海地铁实测数据,列车以60 km/h速度匀速运行时,在车外距轨道中心7.5 m处测得的连续噪声值为90 dB(A),换算成73 km/h速度运行,距轨道中心7.5 m处对应的噪声值为91.7 dB(A)。因此,磁浮列车噪声远小于轮轨列车。

2) 振动。根据长沙中低速磁浮工程的实际测试结果:列车以73 km/h速度运行时,在车外距轨道中心7.5 m处,测得的振动源强为59.1 dB。据上海地铁实测数据:列车以60 km/h匀速运行时,在车外距轨道中心7.5 m处测得的振动源强为70.3 dB,换算成73 km/h运行,距轨道中心7.5 m处对应的振动源强为72.1 dB。因此磁浮列车振动小于轮轨列车。

3) 电磁辐射。中低速磁浮线产生的电磁辐射主要包括悬浮电磁铁产生的辐射、直线电机运行时产生的辐射和火花电弧电磁辐射三种,电磁铁及直线电机产生的辐射主要分布在列车附近,对周边几乎没有影响。电刷与供电轨之间由于不平顺等原因引起的火花电弧可以辐射出MHz级别的电磁波,电磁辐射场强值与距离和频率有关,随着距离的增加,场强值迅速衰减,对周边环境影响很小^[2]。长沙磁浮快线建设单位曾委托湖南贝可辐射环境科技有限公司对黄花机场段周边、长沙磁浮工程轨道沿线敏感点周边、长沙磁浮工程区间变电站周边外5 m和长沙磁浮工程车辆段进行了电磁辐射现场监测,监测数据均符合现行国家标准GB 8702—2014《电磁环境控制限制》的有关规定,并于2020年6月19日完成了环境保护验收工作。

4) 杂散电流影响。轮轨系统一般利用走行轨作为回流轨,由于钢轨不能完全与大地绝缘,不可避免会产生杂散电流,漏泄入地的杂散电流对沿线金属管道和钢筋将形成腐蚀。此外,杂散电流还会对沿线通信信号设备造成干扰,危及行车安

全^[3]。而中低速磁悬浮系统采用第四轨回流,不会产生杂散电流,不会对沿线金属管道和钢筋产生腐蚀危害^[4]。

综上所述,磁浮系统振动、噪声小,电磁辐射小,无杂散电流影响,与国家环保要求相吻合,是一种绿色、环保的公共交通。

3.4 运量适应性

磁浮列车运行时悬浮在空中,受列车悬浮能力限制,磁浮列车载客量比轮轨列车小,属于中运量系统。目前中低速磁浮车辆最大悬浮能力为35 t,3辆编组列车定员为350人,6辆编组列车定员为752人,9辆编组定员为1 154人,9辆编组磁浮列车最大运量约为2.5万人次/h,具体数据见表3。对于主要解决通勤需求功能为主的市域(郊)铁路,早晚高峰客流较大,可通过增发列车行车对数满足早晚高峰客流需求。但是,由于受悬浮能力限制,磁浮列车不能过载,超载能力不如轮轨系统。对于高峰小时最大断面客流超过3万人次/h的线路,需要的磁浮车辆编组数量超过10辆编组,此时车站规模过大,工程投资及运营成本大幅增加,不建议采用中低速磁浮交通。

表3 中低速磁浮列车定员及运能

Tab.3 Passenger capacity and transport volume of medium-low speed maglev vehicles

列车编组/辆	定员/人	高峰小时列车对数/(对/h)	运能/(万人次/h)
3	350	24	0.8
6	752	24	1.6
9	1 154	24	2.5

以长沙—宁乡线为例,初、近、远期全日客运量分别为8.5万人次、19.2万人次和28.8万人次,最大高峰断面分别为0.42万人次/h、0.95万人次/h、1.22万人次/h,客流数据如表4所示,磁浮列车及轮轨列车编组适应性分析如表5、6所示。

磁浮线6辆编组及市域快轨3辆编组均能满足长沙—宁乡线运量需求,且有一定富余。

3.5 互联互通及资源共享

中低速磁浮系统采用F轨行走,轨道结构与轮轨系统不同,不能与轮轨线路实现贯通运营。此外,磁浮车辆悬浮架与轮轨系统转向架结构不同,磁浮牵引车、维护工程车、轨道检测车、线路巡检车等磁浮专用检修设备不能与轮轨系统实现资源共享。

表 4 长沙—宁乡线客流数据

Tab. 4 Passenger flow data of Changsha-Ningxiang Line

目标年	年客运量/ 万人次	日均客运量/ 万人次	最大高峰断面流 量/(万人次/h)	客运强度/ (万人次/ (km·d))
初期	3 115	8.5	0.42	0.22
近期	7 013	19.2	0.95	0.49
远期	10 526	28.8	1.22	0.74

表 5 长沙—宁乡线磁浮列车编组适应性

Tab. 5 Adaptability analysis of maglev train formation on Changsha-Ningxiang Line

列车编 组/辆	最大高峰断面流 量/(万人次/h)	高峰小时列车 对数/(对/h)	设计运能/ (人次/h)	运能余 量/%
3	1.22	24	8 400	-45.4
6	1.22	24	16 800	27.3
9	1.22	24	27 696	55.9

表 6 长沙—宁乡线轮轨列车(市域 B 型)编组适应性分析

Tab. 6 Adaptability analysis of wheel-rail train formation (city railway B-type vehicle) on Changsha-Ningxiang Line

列车编 组/辆	最大高峰断面流 量/(万人次/h)	高峰小时列车 对数/(对/h)	设计运能/ (人次/h)	运能余 量/%
3	1.22	30	15 360	20.6
6	1.22	30	31 740	61.5

3.6 综合能耗

1) 牵引能耗。传统轮轨车辆能耗包括牵引能耗和辅助能耗两部分,中低速磁浮列车运行能耗除牵引和辅助能耗外,还包括悬浮能耗。磁浮车辆采用直线电机牵引,传动效率较异步电机低,磁浮牵引能耗高于轮轨列车能耗。以长沙—宁乡线为例,采用中低速磁浮列车能耗为 $15 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$,采用市域 B 型列车能耗为 $12.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ 。因此,磁浮列车能耗高于轮轨列车。

2) 车站能耗。车站中主要耗电设备为环控、照明、电扶梯、站台门等,车站能耗受敷设方式影响大,高架车站的年平均能耗约是地下站的 $1/3$,夏季高温天气高架站的能耗约为地下站的 $1/5$ 。同一线路采用磁浮制式时,地下车站数量大大低于轮轨制式。因此,磁浮车站能耗远小于轮轨车站。

综上所述,中低速磁浮线与轮轨线综合能耗相当,甚至具有一定的优势。

3.7 工程投资

磁浮线以高架敷设为主,工程投资较低,已运营

的长沙磁浮快线工程费用经济指标约为 $1.6 \text{ 亿元}/\text{km}$,综合投资指标约 $2.48 \text{ 亿元}/\text{km}$ ^[5]。正在建设的凤凰磁浮项目工程费用经济指标约为 $1.86 \text{ 亿元}/\text{km}$,综合投资指标约 $2 \text{ 亿元}/\text{km}$ 。目前市域快轨投资技术经济指标一般在 $4 \text{ 亿元}/\text{km}$ 以上,有的甚至超过 $5 \text{ 亿元}/\text{km}$ 。综上,中低速磁浮线在工程投资方面具有较大的优势,能满足国家对市域(郊)新建线路规定的直接工程费用不高于轻轨 75% 的要求。

以长沙—宁乡线为例,由于中低速磁浮线具有很强的环境适应性,可在中心城区采用高架敷设。经过初步框算,采用磁浮制式的工程总投资约 131.95 亿元 ,采用市域快轨工程总投资约 163.56 亿元 ,采用市域快轨工程投资比采用磁浮制式高 24% ,详细数据对比见表 7。采用中低速磁浮制式可大大降低工程投资。

表 7 长沙—宁乡线采用不同制式的工程投资对比

Tab. 7 Comparison of engineering investments using different standards on Changsha-Ningxiang Line

制式	列车编 组/辆	线路长 度/km	总投资/ 亿元	指标/ (亿元/km)
磁浮	6	39.5	131.95	3.34
轮轨	3	39.5	163.56	4.11

4 结语

市域(郊)铁路对优化城市功能布局、促进大中城市和小城镇协调发展等方面可发挥重要作用。中低速磁浮线,与轮轨线相比,在线路适应性、高架敷设段的环境协调性、乘坐舒适性以及工程投资等方面具有独特优势,非常适合于地形起伏较大、城区线路较长、服务范围相对独立、高峰小时断面客流小于 $3 \text{ 万人次}/\text{h}$ 的市域线路。长沙磁浮快线和北京 S1 线已运营多年,技术已经成熟,在国家严格控制地下线比例及工程投资的新要求下,中低速磁浮线将能充分发挥其独特的技术经济优势,推动市域(郊)线路多制式协调发展。

参考文献

- [1] 潘昭宇,张天齐,唐怀海,等.多层次轨道交通“四网融合”体系研究[J].交通工程,2020,20(4):1.
PAN Zhaoyu, ZHANG Tianqi, TANG Huaihai, et al. Research on the 'Four-network integration' system of multi-level rail transit [J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(4): 1.

(下转第 203 页)

- [3] NILSSON C M, JONES C J C, THOMPSON D J, et al. A waveguide finite element and boundary element approach to calculating the sound radiated by railway and tram rails[J]. Journal of Sound Vibration, 2009, 321(3/4/5): 813.
- [4] 赵悦, 何远鹏, 韩健, 等. 有轨电车曲线啸叫噪声试验分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 133.
- ZHAO Yue, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Measurements and analyses of curve squeal caused by tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 133.
- [5] 刘卫丰, 张厚贵, 孟磊, 等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 105.
- LIU Weifeng, ZHANG Hougui, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing Metro[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 105.
- [6] 孙方遒, 谷爱军, 刘维宁. 钢轨长实体模型在不同频段的振动及传递特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 81.
- SUN Fangqiu, GU Aijun, LIU Weining. Study on vibration and transmission characteristics of long solid rail models under different frequencies[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 81.
- 收稿日期:2022-02-10 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-10 Revised:2022-03-15 Published:2024-07-10
· 第一作者:杨刚,博士研究生,940780623@qq.com
通信作者:何远鹏,博士研究生,he.yuanpeng@outlook.sg
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 190 页)

- [2] 虞凯. 中低速磁浮交通电磁辐射原理研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 74.
- YU Kai. Research on the principle of electromagnetic radiation in low and medium speed maglev traffic[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 74.
- [3] 钱根, 王沛沛, 湛博. 地铁杂散电流对隧道钢筋极化电位分布影响研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 200.
- QIAN Gen, WANG Peipei, ZHAN Bo. Study on the influence of metro stray current on polarization potential distribution of tunnel reinforcement [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(11): 200.
- [4] 吴树强. 中低速磁悬浮供电系统的技术特点研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8): 87.
- WU Shuqiang. Research on the technical characteristics of power supply system for medium and low speed maglev vehicles [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(8): 87.
- [5] 王向灿, 邱冰, 戴旺, 等. 中低速磁浮交通系统工程造价优化[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 161.
- WANG Xiangcan, QIU Bing, DAI Wang, et al. Project cost optimization of medium-low speed maglev transit system [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 161.
- 收稿日期:2022-02-09 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-09 Revised:2022-03-22 Published:2024-07-10
· 通信作者:戴能云,高级工程师,155087082@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 196 页)

- [5] 张梦楠, 颜乐, 王平, 等. 长大坡道铺设无缝道岔可行性分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2): 13.
- ZHANG Mengnan, YAN Le, WANG Ping, et al. Feasibility analysis of seamless turnout on long steep grade[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2): 13.
- [6] 曾志平, 徐榕, 阮莹, 等. 地铁大坡度道岔制动工况下钢轨表面接触应力变化规律研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 243.
- ZENG Zhiping, XU Rong, RUAN Ying, et al. Research on the change law of rail surface contact stress under the braking condition of metro turnout [J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 243.
- [7] 刘伟, 刘春明. 12‰坡道上铺设 42 号道岔的理论研究与工程应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 37.
- LIU Wei, LIU Chunming. Theoretical study and engineering application of laying No. 42 turnout on a 12‰ ramp [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 37.
- [8] 张荣鹤. 高速铁路大坡道上 18 号和 42 号有砟道岔受力分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(23): 119.
- ZHANG Ronghe. Stress analysis of laying No. 18 and No. 42 ballasted turnout on large ramp of high-speed railway [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(23): 119.
- 收稿日期:2022-02-26 修回日期:2022-03-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-26 Revised:2022-03-29 Published:2024-07-10
· 第一作者:王天,高级工程师,693335166@qq.com
通信作者:徐井芒,教授,mang080887@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license