

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.03.002

世界中低运量轨道交通制式 发展及适用性分析

贺 鹏^{1,2}, 刘鹏辉¹, 李松松¹, 梁青槐¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 中低运量轨道交通作为超大或特大城市地铁网络的加密和补充、大城市乃至中等城市的骨干线路, 在解决城市交通问题方面发挥着重要作用。在对 65 个国家 496 座城市的 2 600 余条中低运量轨道交通运营线路调研的基础上, 构建世界中低运量轨道交通线路数据库。基于该数据库, 得到世界范围内运营的齿轨、有轨电车、悬挂式单轨、自动旅客捷运系统(automated people mover system, APM)、跨座式单轨、直线电机系统、中低速磁浮、电子导向胶轮系统和导轨式胶轮系统 9 种中低运量轨道交通制式, 线路里程共 18 744.84 km; 并统计中低运量轨道交通在各大洲、各国家的分布情况, 结果显示其主要分布在欧洲的德国、俄罗斯等 32 个国家, 线路里程达 13 256.0 km, 占比 70.7%; 统计各制式在不同国家/城市、不同城市特征、不同线路功能定位的分布情况, 结果显示, 中低运量轨道交通制式主要服务于人口小于 300 万的城市, 76.25%的有轨电车线路、47.82%的跨座式单轨线路和 42.11%的直线电机系统线路作为骨干线, 84.62%的齿轨线路作为旅游线, 70.73%的 APM 线路作为机场专线。同时, 梳理总结各制式的起源与发展, 并对技术特点和参数、适用性进行分析。研究成果以期为我国城市中低运量轨道交通制式的选择提供参考。

关键词: 中低运量; 轨道交通制式; 发展现状; 技术特点; 适用性

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)03-0011-12

Development and Applicability Analysis of Medium- and Low-Volume Rail Transit Systems Worldwide

HE Peng^{1,2}, LIU Penghui¹, LI Songsong¹, LIANG Qinghui¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Limited, Beijing 100037)

Abstract: Medium- and low-volume rail transit, as a supplement to metro networks in super or mega megacities and as the backbone of large and medium-sized cities, is essential for solving urban traffic problems. Based on a survey of more than 2600 medium- and low-volume rail transit operation lines in 496 cities in 65 countries, a database of medium- and low-volume rail transit lines worldwide was constructed. Based on this database, 9 types of medium- and low-volume rail transit systems (gear rail, tram, suspended monorail, automated people mover systems (APM), straddle monorails, linear motor systems, medium- and low-speed maglev, electronic guidance rubber-tired system, and beam-guiding rubber-tired system) have been obtained worldwide, with a total length of 18 744.84 km. And statistics were conducted on the distribution of medium- and low-volume rail transit in various continents and countries. The results showed that it is mainly distributed in 32 countries in

收稿日期: 2023-12-28 修回日期: 2024-03-15

第一作者: 贺鹏, 男, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通线网规划研究和总体设计工作, 512235513@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51978044)

引用格式: 贺鹏, 刘鹏辉, 李松松, 等. 世界中低运量轨道交通制式发展及适用性分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 11-22.

HE Peng, LIU Penghui, LI Songsong, et al. Development and applicability analysis of medium- and low-volume rail transit systems worldwide[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 11-22.

Europe, including Germany and Russia, with a total length of 13 256.0 km, accounting for 70.7%. Statistics show that the distribution of various rail transit systems in different countries/cities, with different urban characteristics and functional positioning of different lines shows that medium- and low-volume rail transit systems mainly serve cities with a population of less than 3 million. 76.25% of tram lines, 47.82% of straddle monorail lines, and 42.11% of linear motor system lines are backbone lines, 84.62% of gear rail lines are tourist lines, and 70.73% of APM lines are airport dedicated lines. Additionally, the origin and development of each system are summarized, and the technical characteristics, parameters, and applicability of each system are analyzed. The results provide a reference for the selection of urban medium and low-volume rail transit systems in China.

Keywords: medium- and low-volume; rail transit system; development status; technical characteristics; applicability

截至 2023 年底,我国城市轨道交通线路里程已达 11 900.29 km,其中,地铁(含市域快轨)线路 10 561.25 km,占比 88.75%;其他制式运营线路 1 339.04 km,占比 11.25%,远低于 49.93%的世界平均水平^[1]。2021 年 9 月,国家发展和改革委员会发布《关于印发十四五城市轨道交通规划建设实施方案的通知》(发改基础〔2021〕1302 号),鼓励在既有线网客流强度和人口密度较低的地区,以发展中低运能轨道交通系统为主^[2]。中低运量轨道交通在我国具有较大发展潜力,迎来了较大的发展机遇。研究和探讨中低运量轨道交通在我国城市的适用性具有重要意义。

国内学者在中低运量轨道交通在我国城市的适用性分析方面进行了大量研究。翟子奇从优化出行结构、促进城市发展、打造城市名片等方面分析了发展中低运量轨道交通系统的必要性^[3];彭飞等从系统制式、应用场景、线路指标、建设成本、建设模式、运营管理等 6 方面对国内中低运量轨道交通发展现状进行分析,并提出可持续发展建议^[4];庞登瑀等总结了现有中低运量轨道交通的分类和特征,并研究了其在河谷型城市的适用性^[5];廖向晨辰等对低运量轨道交通系统在我国发展过程中面临的困境进行了梳理,并提出应对低运量轨道交通建设困境的几点建议^[6];顾志兵从总体发展、功能定位等角度对有轨电车、自动旅客捷运系统(APM)、云巴和智轨 4 种低运量城市轨道交通发展状况进行全面审视和评估,并针对发展现状问题提出建议^[7]。

但现有研究大多是针对单一或某几种中低运量轨道交通制式进行论述,少有全面总结各种制式进行对比、分析各自适用性的文章。本文基于收集的世界范围内 65 个国家 496 座城市的 2 600 余条运营中的中低运量轨道交通线路信息(截至 2022 年底,不完全统计),总结得到齿轨、有轨电车等 9 种制式;并对中低运量轨道交通在各大洲、各国家的分布,以及各制式在不

同国家/城市、不同城市特征、不同线路功能定位进行统计分析。同时,对各制式的起源与发展历程进行探究,对各制式的技术特点和参数、适用性进行分析。可为我国中低运量轨道交通发展及制式选择提供参考。

1 中低运量轨道交通概述

1.1 定义及分类

根据《城市轨道交通分类》(TCAMET 00001—2020)标准,运输能力在 1 万~3 万人次/h 的城市轨道交通系统为中运量系统;小于 1 万人次/h 的为低运量系统^[8]。本文将二者统称为中低运量轨道交通。

世界范围内现有的 9 种中低运量轨道交通制式,按照其诞生的先后顺序,依次为:齿轨、有轨电车、悬挂式单轨、APM、跨座式单轨、直线电机系统、中低速磁浮、电子导向胶轮系统和导轨式胶轮系统(以高架为主,拥有独立路权),如图 1 所示。

1.2 发展现状

截至 2022 年底,世界中低运量轨道交通运行线路总长度为 18 744.84 km(注:考虑中低运量轨道交通线路普遍存在共线运行,因此按照线路物理长度进行统计)。

按照各大洲进行统计,欧洲共 32 个国家,运行总里程 13 256.0 km,占比 70.7%;亚洲共 16 个国家,运行总里程 2 442.44 km,占比 13.0%;北美洲共 3 个国家,运行总里程 1 980.0 km,占比 10.6%;南美洲、非洲、大洋洲共 14 个国家,运行总里程 1 066.4 km,占比 5.7%。各大洲中低运量城市轨道交通分布情况如表 1 所示。

按照国家统计,德国中低运量轨道交通运行线路总里程 3 950.22 km,排名世界第一,其次分别为俄罗斯 2 325.7 km、美国 1 732.4 km。我国共有 27 座城市运行中低运量轨道交通,线路总里程 836.1 km^[9],排名第六。运行总里程超过 400 km 的国家有 10 个,超过 300 km 的国家有 16 个,如表 2 所示。

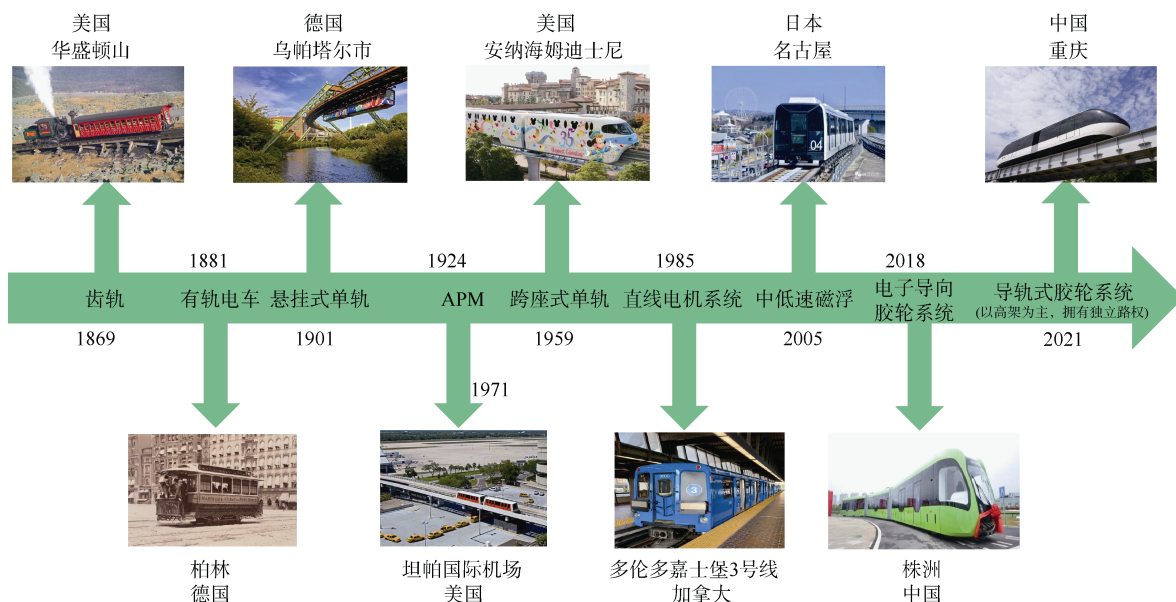


图1 世界中低运量轨道交通制式发展轴

Figure 1 Standard development axis of worldwide medium- and low-volume rail transit

表1 各大洲中低运量城市轨道交通分布情况

Table 1 Distribution of medium- and low-volume urban rail transit by continent

大洲	运行国家/个	运行城市/座	运行里程/km	里程占比/%
欧洲	32	301	13 256.0	70.7
亚洲	16	108	2 442.44	13.0
北美洲	3	51	1 980.0	10.6
南美洲	5	12	430.2	2.3
非洲	7	17	329.2	1.8
大洋洲	2	7	307.0	1.6

表2 中低运量轨道交通运行规模排名前16国家

Table 2 Operation scale of medium- and low-volume rail transit ranks among the top 16 countries

序号	国家	运行城市/座	运行里程/km	里程占比/%
1	德国	37	3 590.2	19.2
2	俄罗斯	61	2 325.7	12.4
3	美国	16	1 732.4	9.2
4	波兰	15	1 057.4	5.6
5	乌克兰	19	1 037.5	5.5
6	中国	27	836.1	4.5
7	法国	30	716.2	3.8
8	日本	27	504.8	2.7
9	罗马尼亚	11	432.7	2.3
10	捷克	7	410.1	2.2
11	意大利	13	391.6	2.1
12	瑞士	10	390.6	2.1
13	比利时	5	348.9	1.9
14	奥地利	5	338.2	1.8
15	英国	7	315.4	1.7
16	澳大利亚	4	305.5	1.6

按照9种制式统计(2021年以前,业内普遍将导轨式胶轮电车视为胶轮有轨电车,因此本文将此类“以地面为主、无独立路权”的线路归为有轨电车系统,将“以高架为主、拥有独立路权”的线路归为导轨式胶轮系统),有轨电车线路总长度为16 667.58 km,占比高达88.92%,主要分布在德国、俄罗斯等国家;齿轨线路总长度691.8 km,占比3.69%,主要分布在瑞士、匈牙利等国家;直线电机系统线路总长度467.4 km,占比2.49%,主要分布在中国、日本等国家;跨座式单轨线路总长度413.0 km,占比2.2%,主要分布在中国、日本等国家;其他制式的发展规模相对较小,线路总长度共505.06 km,占比2.69%。世界范围内,各制式运营线路总里程及其主要分布国家/城市如表3所示。各制式运行里程排名前十的城市如图2所示。

按照各制式所在城市特征及线路功能定位统计,世界齿轨线路的66.67%服务于山地城市,84.62%作为旅游线路。世界有轨电车线路的74.48%服务于人口小于300万人的城市,76.25%作为城市轨道交通骨干线,22.5%作为城市轨道交通线网补充和延伸线。世界APM系统的70%作为机场内部线路,30%服务于城市客运交通。世界跨座式单轨线路的47.83%服务于人口规模大于300万人的城市,47.83%作为城市轨道交通骨干线,43.48%作为旅游线路。世界直线电机线路的57.9%服务于人口规模大于300万人的城市,52.64%

表 3 各制式在世界范围内线路里程及占比

Table 3 Each system in the global range of line mileage and proportion

制式种类	线路里程/km	里程占比/%	主要分布国家/城市情况
齿轨	691.8	3.69	瑞士 211.9 km, 匈牙利 67.9 km, 德国 49.1 km, 印度 46 km, 澳大利亚 34.5 km 等
有轨电车	16 667.58	88.92	德国 3 210.3 km, 俄罗斯 2 300.8 km, 美国 1 591.1 km, 波兰 1 057.4 km, 乌克兰 1 037.5 km 等
悬挂式单轨	41.76	0.22	千叶 15.2 km, 乌珀塔尔 13.3 km, 镰仓和藤泽 6.6 km, 多特蒙德 3.2 km, 杜塞尔多夫 2.5 km 等
APM	283.94	1.51	悉尼 113 km, 布城 57.7 km, 新北 49.2 km, 里尔 45.5 km, 金浦 23.7 km 等
跨座式单轨	413	2.20	中国 184.8 km, 日本 92.9 km, 韩国 29.2 km, 巴西 26 km, 印度 19.5 km 等
直线电机系统	467.4	2.49	中国 171.7 km, 日本 114.4 km, 加拿大 68.3 km, 沙特阿拉伯 40.7 km, 马来西亚 36.4 km 等
中低速磁浮	62.96	0.34	长沙 18.6 km, 凤凰县 11.2 km, 北京 10.2 km, 名古屋 8.9 km, 清远 8 km 等
电子导向胶轮系统	84.4	0.45	上海 21.7 km, 哈尔滨 19.2 km, 宜宾 17.7 km, 盐城 13 km, 西安 6.5 km 等
导轨式胶轮系统	32	0.17	重庆 15.4 km, 深圳 8.5 km, 长沙 8.1 km

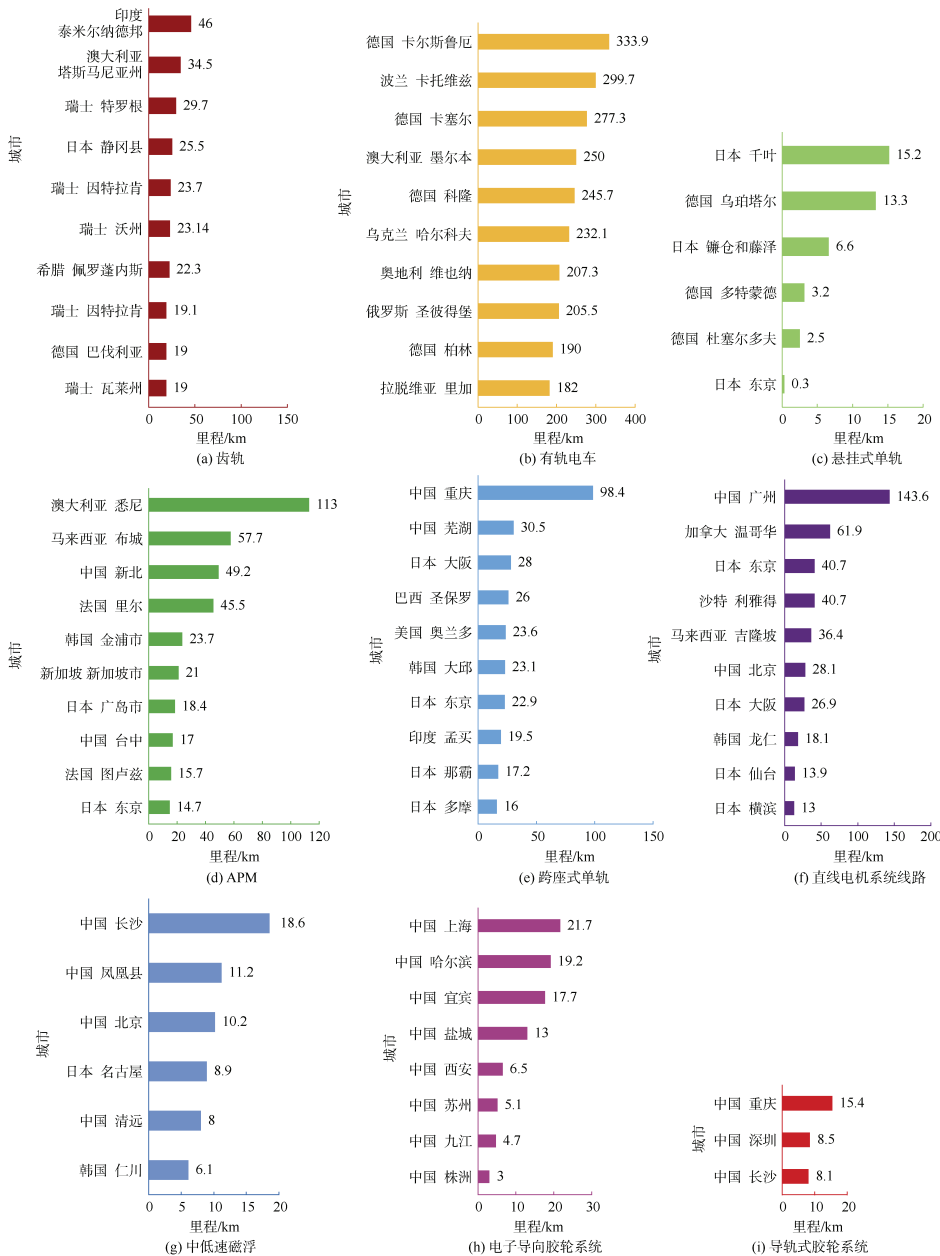


图 2 世界范围内各类制式运营里程排名前十的城市

Figure 2 Top 10 cities in the world for all types of standard operating miles

服务于山地和丘陵城市, 42.11%作为城市轨道交通骨干线, 31.58%作为补充和延伸线路。电子导向胶轮系统、中低速磁浮、悬挂式单轨、导轨式胶轮系统目前

在世界范围内应用较少, 分布特征不明显。世界各制式在不同人口、面积、地形特征的城市, 以及不同线路功能定位占比如表 4 所示。

表 4 世界范围内各制式按照城区人口、面积、地形特征、不同线路功能定位统计(按线路条数统计)
Table 4 All systems in the world are located according to urban population, area, terrain characteristics, and different line functions (According to the number of lines) %

分类指标	分类标准	齿轨	有轨电车	悬挂式单轨	APM	跨座式单轨	直线电机系统	中低速磁浮	电子导向胶轮系统	导轨式胶轮系统
城区人口	<50 万	43.59	39.75	16.67	20.00	17.39	0.00	16.67	0.00	0.00
	50 万~100 万	20.51	15.90	83.33	10.00	17.39	15.78	16.67	0.00	0.00
	100 万~300 万	17.95	18.83	0.00	16.67	17.39	26.32	33.32	37.50	0.00
	300 万~500 万	5.13	7.53	0.00	16.67	8.70	10.53	16.67	25.00	0.00
	500 万~1 000 万	2.56	10.04	0.00	23.33	13.04	21.05	0.00	25.00	33.33
	>1 000 万	10.26	7.95	0.00	13.33	26.09	26.32	16.67	12.50	66.67
	合计		100	100	100	100	100	100	100	100
城市面积	<500 km ²	48.73	55.75	100.00	47.82	34.78	47.37	50.00	12.50	0.00
	500~1 000 km ²	7.69	9.29	0.00	26.09	21.74	26.32	0.00	37.50	0.00
	1 000~2 000 km ²	2.56	16.37	0.00	0.00	21.74	0.00	33.33	12.50	33.34
	2 000~5 000 km ²	15.38	11.95	0.00	21.74	13.04	21.05	0.00	12.50	33.33
	>5 000 km ²	25.64	6.64	0.00	4.35	8.70	5.26	16.67	25.00	33.33
	合计		100	100	100	100	100	100	100	100
城市地形特征	山地	66.67	15.91	20.00	80.00	17.39	26.32	16.67	12.50	33.34
	丘陵	12.82	9.62	0.00	20.00	26.09	26.32	66.66	37.50	33.33
	盆地	0.00	4.60	0.00	0.00	8.70	0.00	0.00	0.00	0.00
	平原	20.51	69.87	80.00	0.00	47.82	47.36	16.67	50.00	33.33
	合计		100	100	100	100	100	100	100	100
线路功能定位	补充和延伸线	5.13	22.50	14.29	17.07	4.35	31.57	16.67	50.00	100.00
	骨干线	10.25	76.25	57.13	10.98	47.82	42.11	16.67	50.00	0.00
	机场专线	0.00	0.42	14.29	70.73	4.35	10.53	33.33	0.00	0.00
	旅游线路	84.62	0.83	14.29	1.22	43.48	15.79	33.33	0.00	0.00
	合计		100	100	100	100	100	100	100	100

2 各制式起源、发展及主要技术特点

2.1 齿轨

2.1.1 起源与发展

1812 年, 英国工程师为解决山区线路坡度大、列车运行困难、雨雪等极端天气条件下列车轮轨黏着力小的问题, 提出在普通铁轨一侧外部添加一条齿轨, 与列车上相对应的齿轮啮合来增加列车牵引力的设想。1869 年, 在美国费城的华盛顿山上, 建造了第一条用于客运的齿轨线路——华盛顿山齿轨铁路(见图 3)^[10], 该线路全长 4.8 km, 平均坡度大于 250%, 最大坡度为 370%。截至 2022 年底, 世界上共有 17 个国家 42 座城市的 50 条齿轨线路运营, 总里程达 691.8 km。



图 3 1869 年开通的华盛顿山齿轨铁路

Figure 3 Mount Washington toothed railroad opened in 1869

2.1.2 技术特点

齿轨系统是在普通钢轨的基础上添加一条齿轨, 通过与对应车辆上的齿轮啮合增加牵引力。世界范围内, 平地行驶时线路设计最高速度一般为 70 km/h, 最

高为 120 km/h；坡段齿轮驱动时线路设计最高速度一般为 20 km/h，上坡最高为 30 km/h，下坡最高为 25 km/h。齿轨具有很强的爬坡能力，最大限制坡度一般为 250‰，最高为 500‰^[11]。此外，齿轨列车可在普通铁路与齿轨铁路之间灵活切换，实现互联互通。

2.2 有轨电车

2.2.1 起源与发展

1881 年，柏林开通了世界首条电力牵引的有轨电车线路(见图 4)^[12]。此后，有轨电车经历了兴盛、衰落、复兴三个阶段。



图 4 1881 年德国柏林开通的第一个有轨电车系统

Figure 4 First tram system opened in Berlin, Germany, in 1881

20 世纪 20~30 年代，有轨电车成为欧美等较发达国家城市的主要公共交通工具，其运营里程一度达到数万千米^[13-14]。在第二次世界大战后的英法美等国，汽车工业对公共交通事业造成冲击，这些国家逐渐拆除了有轨电车线路。20 世纪 70 年代至今，随着城市的发展，道路交通拥堵问题日趋严重，有轨电车进行了大容量、现代化升级改造，再次适应了城市发展需求，有轨电车得以复兴。截至 2022 年底，世界上共有 62 个国家 417 座城市的 2 400 余条有轨电车线路运营，总里程达 16 667.58 km。

2.2.2 技术特点

有轨电车列车采用电力驱动、人工瞭望驾驶，轨道一般敷设于地面，与城市其他地面交通方式混行，属于低运量轨道交通系统。世界范围内，线路设计最高速度一般为 70 km/h，最高为 120 km/h，我国普遍设计最高速度为 70 km/h。线路最小曲线半径小，为 10.5 m，线路最大限制坡度大，为 60‰(部分胶轮有轨电车线路为 130‰)，能很好地适应城市地面既有道路环境，工程造价低、建设周期短、可形成网络效应^[15-17]。但受混行方式的影响，有轨电车通常受地面交通干扰大、整体运行效率较低。此外，受城市轨道交通制式技术创新的影响，有轨电车已有向采用胶轮系统发展的趋势。

2.3 悬挂式单轨

2.3.1 起源与发展

1901 年，德国乌帕塔尔市为充分利用城市河道上空资源，尽量少占用城市道路，设计了一个非对称悬挂式钢轮-钢轨系统悬挂于乌珀河河面上，这是世界第一条用于城市客运用途的悬挂式单轨线路。经过 112 年的历史，该线路仍在乌帕塔尔上空运行，成了一座闪耀着科技创新和城市先进性的地标性建筑(见图 5)^[18]。截至 2022 年底，世界上仅有德、日两国 6 座城市的 7 条悬挂式单轨线路运营，总里程 41.1 km；其中德国 3 条线路共 18.96 km，日本 4 条线路共 22.1 km。



图 5 乌帕塔尔悬挂式单轨

Figure 5 Upatar suspension monorail

2.3.2 技术特点

悬挂式单轨车体悬挂于轨道梁下方，走行和导向装置均位于车体上方的轨道梁内。由于受悬挂节点限制，单位载荷不可过大，列车车型受到限制，因此一般作为一种低运量轨道交通系统；当采用较大的列车编组或行车密度时，运输能力也可达 2 万人次/h，作为中运量系统。悬挂式单轨设计最高速度一般在 60 km/h，最高为 75 km/h；具有较强的线路适应性，最小曲线半径为 50 m，最大限制坡度为 100‰；建筑结构占地面积小、观光性能好^[19-20]。

2.4 APM

2.4.1 起源与发展

1924 年，英国伦敦温布利举办大型展览会，为满足参观者在不同展区间快速移动的需求，修建了一条全自动运行线路。该线路采用机械齿轮和链条驱动，通过改变齿轮间的齿距使车厢加速行驶或减至步行速度，是世界上首条 APM 线路。1971 年，美国将这一系统进行了升级，采用更大的车体，列车采用橡胶走行轮胎驱动，设中央导轨实现导向，通过列车自动控制系统实现全自动运行，在坦帕国际机场开通了世界第一条机场 APM 系统线路(见图 6)^[21]。该系统能在机场航站楼之间快速、高效地运输旅客。自此，APM 被广

泛应用于大型机场航站楼间的旅客运输或其他城市公共客运交通。截至 2022 年底,世界上共有 18 个国家 67 座城市的 90 条 APM 线路运营,总里程达 283.94 km。



图 6 坦帕国际机场的 APM 系统

Figure 6 APM system at Tampa International Airport

2.4.2 技术特点

APM 采用走行轮和导向轮组合的胶轮系统,通过列车自动控制系统实现在混凝土轨道上全自动运行;属于中运量轨道交通系统,最大运输能力可达 2 万人次/h。线路设计速度一般为 60~80 km/h,最高为 90 km/h;具有较小的曲线半径,可达 22 m;具有较强的爬坡能力,线路最大坡度可达 60%^[22]。

2.5 跨座式单轨

2.5.1 起源与发展

1959 年,美国加利福尼亚州安纳海姆迪士尼乐园为解决景区内部游客运输,同时提供较好的观光游览体验,建成了世界首条跨座式单轨线路(见图 7)^[23]。1961 年,日本为迎接 1964 年东京奥运会,计划修建一条机场专线,考虑跨座式单轨建设周期短、占用土地少(从而减少土地征用谈判上的时间浪费),因此选用了这种轨道交通制式。自此跨座式单轨也成为一种全新的城市公共客运交通方式。21 世纪初,我国重庆市为解决城市山地地形环境复杂带来的线路坡度大问题,首次引进跨座式单轨系统,建成了重庆轨道交通 2 号线。截至 2022 年底,世界上共有 10 个国家 22 座城市的 26 条跨座式单轨线路运营,总里程达 413.0 km。



图 7 安纳海姆迪士尼乐园的 Mark V 型列车
Figure 7 Mark V train at Disneyland in Anaheim

2.5.2 技术特点

跨座式单轨车辆采用胶轮,其走行轮运行于梁轨合一的轨道梁上,导向轮夹抱在轨道梁两侧。它是一种中运量的轨道交通系统,如果采用较大车型或列车编组,其运量也可以达到 3 万人次/h 以上;其设计最高速度为 100 km/h,爬坡能力强,最大限制坡度为 150%;占地面积少、建设周期短,采用胶轮系统使其振动和噪声也大大降低;但胶轮磨耗较大,使得列车维护成本增加,并造成粉尘污染等问题^[24-25]。

2.6 直线电机系统

2.6.1 起源与发展

直线电机系统首条线路是 1985 年通车的加拿大多伦多士嘉堡 3 号线(见图 8)^[26]。该线路全长 6.4 km,有地面和高架两种敷设方式,采用直线电机系统很好地解决了线路不同敷设方式之间过渡时的大坡度问题。同一时期,日本为降低地铁建设成本,开始研究“小型地铁”,采用直线电机驱动方式,有效减小了电机体积,从而达到减小列车断面尺寸的目的,使得线路隧道断面也因此减小。1990 年,日本大阪市开通了其第一条直线电机线路。2005 年,为解决线路下穿珠江河道后短距离内爬升的问题,广州地铁 4 号线在我国首次采用了直线电机系统。截至 2022 年底,世界上共有 7 个国家 15 座城市的 19 条直线电机系统线路运营,总里程达 467.4 km。



图 8 1985 年开通的多伦多士嘉堡 3 号线
Figure 8 Toronto Scarborough Line 3 opened in 1985

2.6.2 技术特点

直线电机系统以钢轮、钢轨为支撑和导向,列车采用直线电机牵引,既解决了普通轮轨系统受黏着限制而爬坡能力有限的问题,又由于电机不再有齿轮箱等传动装置,使得车辆转向架和车轮轮径减小,从而有效减小了区间隧道断面面积(与普通轮轨系统比降低 20%~40%),更是达到降低工程造价的目的。但同时,由于直线电机的采用,也存在牵引能耗增大(与旋

转电机相比高 10%~20%)的问题^[27-28]。线路最高设计速度一般为 90 km/h, 最高为 110 km/h; 最大限制坡度为 60‰~80‰, 最小曲线半径为 70 m, 线路运输能力可达 3 万人次/h, 属于中运量轨道交通系统。直线电机系统是一种适应复杂地形、实现较大客流长距离运输的、可采用地下敷设方式的城市轨道交通系统。

2.7 中低速磁浮

2.7.1 起源与发展

1922 年, 德国工程师赫尔曼·肯佩尔提出电磁悬浮原理, 并由其首次将磁浮技术应用到交通领域^[29-30]。20 世纪 70 年代以后, 世界工业化国家的经济实力不断增强, 为提高交通运输能力和效率以适应经济发展的需要, 德、日、美、英等发达国家相继开始了磁悬浮运输系统的研发。英国于 1984 年开通了世界首条商业运营的磁浮线路——伯明翰磁浮, 但其运行速度仅为 24 km/h 左右, 属于低速磁浮技术。而在 1972 年, 日本航空公司为了解决东京都内机场之间的快速交通问题, 开始了中低速磁浮技术的研究^[31]。2005 年, 日本名古屋开通了世界第一条真正意义上的中低速磁浮线路——东部丘陵线(见图 9)^[32]; 2016 年, 长沙开通了我国第一条自主设计、制造、施工、管理的磁浮线——长沙磁浮快线。截至 2022 年底, 世界共有中、日、韩 3 个国家 6 座城市的 6 条中低速磁浮线路运营, 总里程 62.96 km。



图 9 名古屋东部丘陵线
Figure 9 Nagoya Eastern Hill line

2.7.2 技术特点

中低速磁浮采用“同性相斥、异性相吸”的电磁悬浮原理使车辆悬浮在轨道上方, 并利用电磁力进行驱动。该系统爬坡能力强, 线路最大设计坡度可达 70‰; 线路转弯半径小, 最小曲线半径为 50 m; 线路设计最高速度为 120 km/h, 线路敷设方式以高架为主; 运输能力为 3 万人次/h, 属中运量轨道交通系统。由于列车悬浮于轨道上方, 没有轮轨间的机械接触^[33], 在实现高速运行的同时, 还能降低振动和噪声, 乘坐舒适

度高, 对周边环境影响较小。

2.8 电子导向胶轮系统

2.8.1 起源与发展

电子导向胶轮系统(又称“智轨”)起源于法国鲁昂的光电导向巴士, 通过光电导向设备实现了大巴车的无人驾驶和在车站的精准停车。德国的 Fraunhofer IVI 公司利用这一技术创造了电子导向胶轮系统的原型——Autotram 系统。

传统有轨电车系统采用钢轮钢轨, 地面需铺设轨道结构, 大大增加工程造价, 并占用道路空间。为降低工程造价, 综合利用有轨电车系统长编组、大运量的优势, 以及其具有像普通公交系统一样路面行驶灵活性强的优点, 我国中车集团引进了这一技术并对导向系统、转向架、走行部、车体外观等进行了优化调整, 研发出通过在地面铺设磁钉与车辆智控系统交互, 构建出一种“虚拟轨道”的新型城市轨道交通系统——电子导向胶轮系统(见图 10), 世界首条试验线于 2018 年在株洲开通运营。截至 2022 年底, 中国已有 7 座城市的 7 条电子导向胶轮系统线路开通运营, 总里程 84.4 km。马来西亚、阿联酋等国家的城市也均在规划建设当中。



图 10 电子导向胶轮系统列车及其“虚拟轨道”
Figure 10 Train of electronic guidance rubber-tired system and its “virtual track”

2.8.2 技术特点

电子导向胶轮系统摒弃了传统的刚性约束轨道, 通过铺设在地面的磁钉与装载在车辆上的智能控制系统进行信息交互, 实现自动循迹和轨迹跟随的“无轨化”运行, 属于低运量轨道交通系统。线路最高设计速度一般为 70 km/h; 最小转弯半径为 10 m, 最大限制坡度为 60‰, 能很好地适应城市地面有限的道路条件; 运营组织灵活, 可与常规公交共用廊道; 在实现与有轨电车相同功能的基础上, 工程造价可降低 1/3~1/2^[34]。但由于其通常采用 B 级路权运行, 所以同样存在平均旅行速度较低的问题。

2.9 导轨式胶轮系统

2.9.1 起源与发展

为解决有轨电车系统地面混行带来的运行效率低、占用城市道路资源等问题，世界首个无人驾驶的导轨式胶轮系统(又称“云巴”)于 2021 年在重庆璧山开通运营。截至 2022 年底，中国已有重庆、深圳、长沙 3 座城市的 3 条导轨式胶轮系统线路开通运营，总里程 32 km。

2.9.2 技术特点

导轨式胶轮系统列车采用橡胶轮胎、轻量化设计，走行轮走行在轨道梁内部底面上，导向轮作用于轨道梁内部两侧实现导向(见图 11~12)^[35-36]。与有轨电车、电



图 11 导轨式胶轮系统轻量化设计列车及其轨道梁示意
Figure 11 Schematic of the lightweight design train and track beams of the beam-guiding rubber-tired system

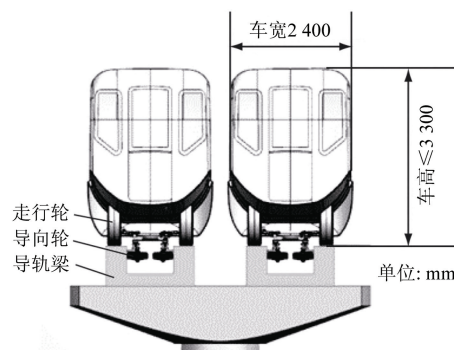


图 12 导轨式胶轮系统走行装置示意
Figure 12 Schematic of the walking device of the beam-guiding rubber-tired system

子导向胶轮系统相比，它的运输能力同样可达 0.6~1.2 万人次/h；最小曲线半径略高于有轨电车和电子导向胶轮系统，为 15 m；列车采用胶轮、轻量化设计使其爬坡能力很强，线路最大设计坡度为 120‰。线路一般采用高架敷设方式，具有独立路权，因此其平均旅行速度优于有轨电车和电子导向胶轮系统，但由于线路采用高架敷设方式，使得工程造价增高，经济性降低^[37-38]。

3 各制式主要设计技术参数及适用性分析

世界范围内 9 种中低运量轨道交通系统制式主要设计技术参数如表 5 所示。

表 5 世界范围内 9 种中低运量轨道交通系统主要设计技术参数

Table 5 Main design technical parameters of nine types of medium- and low-volume rail transit systems in the world

系统制式	运输能力/(万人次/h)	设计最高速度/(km/h)	旅行速度/(km/h)	工程造价/亿元	最小曲线半径/m	最大限制坡度/‰	轮轨类型	敷设方式	振动和噪声
齿轨	—	120(齿轮驱动时 30)	15~25	1.9~2.7	25.0	500	钢轮钢轨	高架为主	大(齿轨啮合作用大)
有轨电车	0.6~1.2	70	18~25	0.6~1.5	10.5	60(胶轮有轨电车可达 130)	钢轮钢轨(胶轮混凝土轨)	地面为主	较大(轮轨作用大)
悬挂式单轨	0.5~2.0	75	30~40	1.5~2.0	50.0	100	橡胶轮胎钢梁轨道	高架为主	小(胶轮系统减振降噪效果好；轮轨位于轨道梁内部，有隔声效果)
APM	0.8~2.0	90	30~50	1.2~1.8	22.0	60	橡胶轮胎混凝土轨	地面 高架 地下	小(胶轮系统减振降噪效果好)
跨座式单轨	2.0~3.0	100	26~46	2.0~3.0	25.0	150	橡胶轮胎混凝土轨	高架为主	小(胶轮系统减振降噪效果好)
直线电机系统	1.0~3.0	110	30~45	5.0~6.0	70.0	80	钢轮钢轨	地下 地面 高架	较小(轮轨间作用小)
中低速磁浮	1.5~3.0	120	50~60	2.5~3.5	50.0	70	无轮、钢轨	高架为主	小(无轮轨接触)
电子导向胶轮系统	0.6~1.2	70	15~25	0.4~0.6	10.0	60	橡胶轮胎混凝土路面(虚拟轨道)	地面为主	小(胶轮系统减振降噪效果好)
导轨式胶轮系统	0.6~1.2	80	20~30	1.0~2.0	15.0	120	橡胶轮胎钢梁轨道	高架为主	小(胶轮系统减振降噪效果好)

根据各制式在世界范围内的应用情况、技术特点和参数,结合我国城市特点和城市轨道交通发展现状,总结各制式的适用性如下:

1) 齿轨可作为山地旅游景区内的登山、观光线路,也可作为快速连接城市中心区与城市外围山区景点的线路,靠近城市中心路段,按照普通铁路模式运行,进入山区景区后路段按照齿轨模式运行登山,这样还可以减少游客的换乘。

2) 有轨电车可应用于中等城市乃至Ⅱ型大城市,作为城市骨干线路并成网运营,也可作为大城市地铁网络的补充、延伸和加密线,大城市卫星城、新城内部的骨干线路并成网运营,以及旅游景区或大型企业园区内部的特色功能线路。

3) 悬挂式单轨可用于中等城市乃至Ⅱ型大城市的客流运输,也适用于大城市道路条件受限的街区,解决乘客出行“最后一公里”问题,提升城市轨道交通可达性和服务水平,也可作为城市或景区内的旅游观光线。

4) APM系统特别适用于小区域范围内大客流的短距离运输,常用于机场内部旅客运输,实现旅客在不同航站楼间的快速通达,还可以作为城市CBD内部乘客短距离运输线路,以及相邻且换乘量大的地铁线路间的联络线。部分城市地铁线路也可采用APM制式实现列车高效运行,如里尔地铁1号线和2号线、澳门氹仔线等。

5) 跨座式单轨交通特别适用于地形复杂、线路起伏大的山地城市。可作为超大或特大城市轨道交通网的辅助线路、大型和中等城市的骨干线路。跨座式单轨高架敷设的特点,使其观光性得以彰显,因此特别适用于旅游城市或旅游景区。此外,由于线路占用土地少、轨道梁可实现预制拼装,因此在道路条件、工期等条件受限情况下也可考虑该制式。

6) 直线电机系统主要适用于下穿大河大江、既有城市轨道交通地下线路等存在大坡度的线路,可作为大城市骨干线路或超特大城市补充线路。此外,由于直线电机可有效减小列车尺寸,在隧道开挖断面受限的条件下也可使用。

7) 中低速磁浮拥有较高运行速度,适用于城市机场专线、市域(郊)快速轨道交通等站间距较大、具有较高旅行速度要求的线路。此外,由于中低速磁浮观光性能好、乘坐舒适度高的特点,也适用于特色旅游线路。

8) 电子导向胶轮系统可作为中等城市乃至Ⅱ型大城市轨道交通骨干线路成网运营,并与常规公交无缝接驳形成网络效应,有效缓解城市建设轨道交通的经济压力。此外,还可作为大城市地铁网络的补充、延伸和加密线,大城市卫星城、新城内部的骨干线路成网运营,旅游景区或大型企业园区内部的特色功能线路。

9) 导轨式胶轮系统同样可用于中等城市乃至Ⅱ型大城市的骨干线、大城市地铁网络的补充延伸和加密、大城市卫星城和新城内部的骨干线、旅游景区或大型企业园区内部的特色功能线路。此外,导轨式胶轮系统与悬挂式单轨一样,占地面积较小,使其可深入城市次干道和社区,解决乘客出行“最后一公里”问题。

4 结语

本文对世界65个国家496座城市的2600余条中低运量轨道交通线路进行了调研,总结了9种制式的发展历程和现状,并探讨了各制式的起源与发展、技术特点及适用性。研究表明:

1) 中低运量轨道交通在作为大城市地铁网络的补充、中等城市乃至Ⅱ型大城市骨干交通、旅游等特色功能方面具有重要作用,9种不同制式为我国城市的轨道交通发展提供了多样化选择。

2) 随着中等城市乃至Ⅱ型大城市的发展,我国的中低运量轨道交通发展迅速,尤其是低运量轨道交通的几种制式如电子导向胶轮系统、导轨式胶轮系统、悬挂式单轨在近几年均是国内首次应用。可以看出,低运量轨道交通有向胶轮系统、独立路权发展的趋势。

3) 9种制式均为解决某一问题而生,各自拥有其独特的优势,例如:齿轨具有最强的爬坡能力;有轨电车可作为中等城市乃至Ⅱ型大城市骨干轨道交通网;悬挂式单轨适用于城市道路条件受限的城市建设和旅游观光;APM适用于短距离内高爆发客流运输;跨座式单轨具有较大爬坡能力和运输能力,占地少;直线电机系统隧道断面小,爬坡能力强;中低速磁浮系统实现高速度的同时振动和噪声低,能保证较好的舒适性;电子导向胶轮系统运营灵活,可与常规公交共用廊道实现网络化运营;导轨式胶轮系统占地面积小、与有轨电车和电子导向胶轮系统相比,运行效率高。各城市在选择轨道交通制式时,可结合各制式技术特点、城市需求、工程条件进行综合比选,选择出最适合的中低运量轨道交通制式。

参考文献

- [1] 韩宝明, 余怡然, 习喆, 等. 2023 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 1-9.
HAN Baoming, YU Yiran, XI Zhe, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2023: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 1-9.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[EB/OL]. (2023-03-31)[2024-03-12]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/11944>.
- [3] 翟子奇. 中小城市发展中低运量轨道交通系统研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(10): 13-19.
ZHAI Ziqi. Research on development of rail transit system with low and medium traffic volume in small and medium cities[J]. Modern urban transit, 2020(10): 13-19.
- [4] 鹏飞, 杨柳燕. 我国中低运量城市轨道交通发展现状分析及可持续发展建议[J]. 现代城市轨道交通, 2023(5): 14-17.
PENG Fei, YANG Liuyan. Analysis on the development status of medium and low traffic volume urban rail transit in China and suggestions for sustainable development[J]. Modern urban transit, 2023(5): 14-17.
- [5] 庞登瑀, 杨懿轩. 河谷型城市中低运量轨道交通制式选择研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 20-26.
PANG Dengyu, YANG Yixuan. Study on system mode selection of medium and low capacity rail transit in valley cities[J]. Railway standard design, 2024, 68(4): 20-26.
- [6] 廖向晨, 向红. 低运量城市轨道交通建设的困境与对策[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 11-15.
LIAO X, XIANG Hong. Challenges and opportunities for low-volume urban rail transit construction[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 11-15.
- [7] 顾志兵. 低运量城市轨道交通发展研判及建议[J]. 城市轨道交通, 2023, 21(5): 22-29.
GU Zhibing. Research and suggestions on the development of low-capacity urban rail transit in China[J]. Urban transport of China, 2023, 21(5): 22-29.
- [8] 城市轨道交通分类: TCAMET 00001-2020[S]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.
- [9] 中国城市轨道交通协会. 2022 年度中国内地城轨交通线路概况[EB/OL]. (2023-01-03)[2024-03-12]. <https://www.camet.org.cn/xxfb/11509>.
- [10] Technology Energy. Knowledge Map: Rack and Pinion Railway. [EB/OL]. (2014-10-14)[2024-03-12]. <https://pansci.asia/archives/68966>.
- [11] 张卓杰, 李梁, 马喜成, 等. 齿轨车辆在山地旅游轨道交通中的应用分析[J]. 轨道交通装备与技术, 2022(4): 61-64.
ZHANG Zhuojie, LI Liang, MA Xicheng, et al. Application of rack rail vehicles in rail transit for mountain tourism[J]. Rail transportation equipment and technology, 2022(4): 61-64.
- [12] Wikipedia. File: First electric tram- Siemens 1881 in Lichterfelde.jpg. [EB/OL]. (2009-11-9)[2024-03-12]. https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:First_electric_tram-Siemens_1881_in_Lichterfelde.jpg.
- [13] 王忠强. 有轨电车的发展浅谈[J]. 交通与港航, 2014, 1(2): 7-9.
WANG Zhongqiang. On the development of trams[J]. Communication & shipping, 2014, 1(2): 7-9.
- [14] 叶芹祿. 有轨电车的现状与未来[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(5): 1-5.
YE Qinlu. Present situation and prospect of city trams[J]. Urban rapid rail transit, 2013, 26(5): 1-5.
- [15] 龚诚. 现代有轨电车在老城区的适应性研究[J]. 交通与运输, 2020, 33(增刊 1): 120-125.
GONG Cheng. Study on the adaptability of modern trams in the old city[J]. Traffic & transportation, 2020, 33(S1): 120-125.
- [16] 王小娟, 马娜, 曲秋蔚, 等. 现代有轨电车规划和建设适应性分析[J]. 交通世界, 2021(8): 3-5.
WANG Xiaojuan, MA Na, QU Qiushi, et al. Adaptability analysis of modern tram planning and construction[J]. TranspoWorld, 2021(8): 3-5.
- [17] 张静. 有轨电车线路及站点布设研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
ZHANG Jing. Study on the layout of tram lines and stations[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [18] 南昌铁路. 乌帕塔尔“千足虫”——百年传奇的悬挂列车. [EB/OL]. (2017-12-19)[2024-03-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/J-ysYVUN5vC8irbBueGZGQ>.
- [19] 蔡明. 悬挂式单轨在山地城市的适应性研究[J]. 交通工程, 2022, 22(6): 61-66.
CAI Ming. Study on adaptability of suspended monorail in mountainous cities[J]. Journal of transportation engineering, 2022, 22(6): 61-66.
- [20] 张华龙. 悬挂式单轨线路设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 7-13.
ZHANG Hualong. Research on the design of suspended monorail systems[J]. Modern urban transit, 2022(5): 7-13.
- [21] 中国经济网. 盘点美国 10 大效率最快的国际机场. [EB/OL]. (2013-12-03)[2024-03-12]. <http://www.ce.cn/>

- aero/201312/03/t20131203_1843343.shtml.
- [22] 曲婉, 孙帅. 自动导向轨道系统车辆及其走行部分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(9): 6-12.
QU Wan, SUN Shuai. Analysis on vehicle and running parts of AGTS[J]. Modern urban transit, 2020(9): 6-12.
- [23] Wikipedia. monorail system. [EB/OL]. (2024-03-12) [2024-03-12]. <https://zh.m.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%95%E8%BD%A8%E7%B3%BB%E7%BB%9F>.
- [24] 周琪, 毛保华, 黄俊生, 等. 不同功能定位的跨座式单轨建设运营特征研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 73-78.
ZHOU Qi, MAO Baohua, HUANG Junsheng, et al. Construction and operation characteristics of straddle monorail with different functional types[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 73-78.
- [25] 李靖, 彭华春, 李积栋. 柳州跨座式单轨桥梁结构体系研究比选[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(5): 57-61.
LI Jing, PENG Huachun, LI Jidong. Study on comparison and selection of structural system of Liuzhou straddle-type monorail bridge[J]. Railway standard design, 2023, 67(5): 57-61.
- [26] Wikipedia. Scarborough Line. [EB/OL]. (2023-12-24) [2024-03-12]. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A3%AB%E5%98%89%E5%A0%A1%E8%BC%95%E9%90%B5>.
- [27] 张鹏, 张佩竹, 李晓飞. 城市轨道交通直线电机系统工程适应性综述[J/OL]. 铁道勘察: 1-7[2023-04-26]. <https://doi.org/10.19630/j.cnki.tdkc.202211100001>.
- [28] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665-5675.
LYU Gang. Review of the application and key technology in the linear motor for the rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5665-5675.
- [29] 朱莉莉. 中低速磁浮列车的发展与应用[J]. 科技视界, 2013(30): 5.
- [30] 庞富恒, 魏厥灵, 闫晓言. 我国中低速磁浮交通发展综述[J]. 人民公交, 2019(5): 65-68.
- [31] 杨新斌. 中低速磁浮技术在中国城市轨道交通中的应用[J]. 铁道车辆, 2015, 53(4): 30-32.
YANG Xinbin. Application of maglev technology for middle and low speed in urban rail traffic[J]. Rolling stock, 2015, 53(4): 30-32.
- [32] Wikipedia. Maglev. [EB/OL]. (2024-02-14)[2024-03-12]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>.
- [33] 于青松. 中低速磁浮列车牵引性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 74-76.
YU Qingsong. Study on traction performance of medium-low speed maglev vehicles[J]. Urban mass transit, 2022, 25(2): 74-76.
- [34] 贺捷. 智能轨道快运系统株洲智轨体验线项目特点及适用性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 27-30.
HE Jie. Characteristics of Zhuzhou intelligent rail express line project and feasibility analysis[J]. Urban mass transit, 2020, 23(1): 27-30.
- [35] 王楚骄. 关于云巴的几个线路参数探讨[J]. 山西建筑, 2021, 47(8): 124-126.
WANG Chujiao. Discussion on several line parameters of Yunba[J]. Shanxi architecture, 2021, 47(8): 124-126.
- [36] 李远安, 陈海伟, 贾幼帅, 等. 导轨式胶轮运营研究: 以增城云巴示范线为例[C]//绿色·智慧·融合: 2021/2022年中国城市轨道交通规划年会论文集. 上海, 2022: 1086-1097.
- [37] 封面新闻. 重庆轨道交通家族添新成员, 璧山“云巴”预计年内开通运营[EB/OL]. (2020-10-21)[2024-03-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681152937761264407&wfr=spider&for=pc>.
- [38] 庞雪峰. 云巴胶轮导轨电车系统车辆基地工艺设计[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 159-162.

(编辑: 王艳菊)

中国轨道交通领域首个国家级产业计量测试中心正式成立

近日,“国家高速列车产业计量测试中心”正式成立,该中心依托中国中车集团旗下中车四方股份公司筹建,是我国轨道交通领域的首个国家级产业计量测试中心。

计量是工业制造中的“标尺”,精准、稳定、可溯源的计量控制是高速列车制造的重要基础保障。

新成立的国家高速列车产业计量测试中心是高速列车产业计量测试领域的国家级创新平台,是高速列车制造过程的“火眼金睛”,为国家高速列车产业发展提供“全产业链、全溯源链、全生命周期”并具有前瞻性的计量测试技术服务。

摘编自 <https://www.chinametro.net/index.php?m=newscon&id=539&aid=59763>