

国外百万级人口城市快速轨道交通系统分析与启示

赵墨林^{1,2} 顾保南^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 博士研究生)

摘要 目的:用实证分析探讨当前国内城市轨道交通建设申报政策中“城区人口必须达到150万人才能申报轻轨建设规划”的合理性,以便从中得到启示。方法:对国外运营地铁和轻轨的百万级人口城市进行了轨道交通供给统计,并在线网层面对轨道交通线网规模、辐射范围、线网形态结构、站间距、旅行速度等进行了详细的统计分析;同时,采用车辆宽度分级策略,将各个城市不同标准下的车辆宽度和编组形式按照国内的城市轨道交通分类标准作对应比较,进行线路运输能力的估算,明确其对应的国内轨道交通制式;针对轨道交通建设需求中最关注的客流效果,利用2018年或2019年的我国各城市线网总客运量数据和各城市轨道交通车站1.5 km半径圈内的常住人口密度进行了统计和分析。结果及结论:国外百万级人口城市中,已有相当数量城市运营地铁和轻轨系统,其轨道交通供给具有辐射圈半径<10 km,平均站间距较短等特征;其轨道交通客流效果比较理想,有沿线人口密度越高,则客流强度越高的总体趋势。

关键词 城市快速轨道交通;百万人口城市;轨道交通线网;轨道交通车辆;轨道交通客运量;轨道交通制式

中图分类号 F530.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.003

Analysis and Insights into Rapid Rail Transit Systems in Foreign Cities with Million-level Population

ZHAO Molin, GU Baonan

Abstract Objective: Empirical analysis is adopted to explore the rationality of the current Chinese policy in urban rail transit construction application, which stipulates that 'urban rail transit construction planning can only be applied for when urban population reaches 1.5 million', aiming for gaining insights. Method: Statistics on rail transit supply in foreign cities with million-level population that operate both metro and light rail systems is counted, and detailed statistical analysis on various aspects of rail transit line network including scale, radial coverage, structural morphology, station spacing, travel speed is performed. At the same time, adopting a vehicle width grading strategy, comparison of vehicle width and marshalling form

under different standards of each city is made according to Chinese urban rail transit classification standards. The transportation capacity of the line is estimated to identify the corresponding Chinese rail transit system. Focusing on the most critical aspect of rail transit construction needs, passenger flow effects are statistically counted and analyzed using 2018 or 2019 total passenger volume data for rail transit line networks in various Chinese cities and the residential population density within a 1.5 km radius of the urban rail transit station. Result & Conclusion: In foreign cities with million-level population, a considerable number of cities are operating metro and light rail systems, with their rail transit system supply characterized by features such as a radiation radius of less than 10 km and relatively short average station spacing. The rail transit passenger flow effect in these cities is relatively ideal, showing a general trend of higher passenger flow intensity in areas with higher population density along the lines.

Key words urban rapid rail transit; city with million-level population; rail transit line network; rail transit vehicle; rail transit passenger volume; rail transit format

First-author's address The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

城市快速轨道交通是指城市轨道交通系统制式分类中的地铁、轻轨和市域快轨系统^[1]。2020年底,我国已有41座城市开通城市快速轨道交通系统^[2]。依据我国现行的城市轨道交通建设管理规定,城区人口必须达到150万人才能申报轻轨建设规划,超过300万人才能申报地铁建设规划。然而,目前国内一些人口指标不满足地铁和轻轨建设的城市,由于汽车拥有量提升迅速,道路系统供给有限等原因,确实存在高峰拥堵和出行困难问题^[3-4]。在无法新建地铁、轻轨的情况下,一些城市着手建设有轨电车,但有轨电车对解决城市交通拥堵的效果有限,同时还带来了一些社会问题,使得许多城

市的管理者十分困扰。

为了探索国内百万级人口城市建设地铁和轻轨的需求,目前已有一些文献展开了研究。文献[5]和文献[6]提出国内城市建设轻轨具有较大空间,并对比分析了国内轻轨系统的各类制式选择方案;文献[7]提出了国内新三线城市的半小时轨道交通圈概念。本研究将欧亚发达国家主城人口规模在 50 万~150 万人的城市纳入研究范围,以开通并运营中的快速轨道交通系统中的地铁与轻轨为研究对象,从快速轨道交通系统规模、系统供给、车辆与系统制式、出行时效、客流效果的角度进行数

据分析和规律探究,为国内百万级人口城市发展快速轨道交通系统提供借鉴和启示。

1 欧亚百万级人口城市快速轨道交通系统发展情况与规模

1.1 发展情况

至 2020 年底,欧亚发达国家已有 17 座百万级人口城市运营地铁与轻轨。表 1 为欧亚百万人口城市快速轨道交通系统发展情况、线网规模与辐射范围。

表 1 欧亚百万人口城市快速轨道交通系统发展情况、线网规模与辐射范围

Tab.1 Development status, network size, and radiation range of urban rapid rail transit systems in cities of million-level population in Eurasia

城市	国家	主城人口/ 万人	快速轨道交通 英文名称	开通年份	线网规模/ km	线路数/ 条	车站数/ 个	辐射范围/ km
热那亚	意大利	58	Metro	1990	7	1	8	≤10
埃森	德国	58	Sdadtbahn	1977	20	3	27	≤10
多特蒙德	德国	59	Sdadtbahn	1976	75	8	123	≤15
杜塞尔多夫	德国	62	Sdadtbahn	1988	86	11	166	≤15
斯图加特	德国	64	Sdadtbahn	1985	135	15	201	≤15
汉诺威	德国	76	Sdadtbahn	1975	121	12	197	>15
纽伦堡	德国	80	U-Bahn	1972	38	3	49	≤10
毕尔巴鄂	西班牙	87	Metro	1995	43	2	43	>15
那不勒斯	意大利	97	Metro	1993	18	1	19	≤10
格拉斯哥	英国	99	Subway	1896	11	1	15	≤10
奥斯陆	挪威	104	T-bane	1966	85	5	101	≤15
仙台	日本	109	Subway	1987	29	2	29	≤10
科隆	德国	109	Sdadtbahn	1968	198	12	233	≤15
布鲁塞尔	比利时	119	Metro	1976	40	4	59	≤10
赫尔辛基	芬兰	127	Metro	1982	35	2	25	≤15
哥本哈根	丹麦	132	Metro	2002	38	4	39	≤10
京都	日本	147	Subway	1981	31	2	31	≤10

注:表 1 中“Sdadtbahn”为德语,可翻译为“轻轨”,其余英文名称均翻译为“地铁”。

1.2 系统规模与辐射范围

从线网规模来看,一类是覆盖广、延伸远、支线线路多的系统,此类系统线网规模在 43~198 km,如奥斯陆和汉诺威;另一类为覆盖主城区为主、支线数量少或没有支线线路的系统,线网规模在 7~38 km,如哥本哈根和京都。

对表 1 所列欧亚各城市轨道交通线网中周向放射线路的端点车站与城市 CBD(中央商务区)邻近

车站的直线距离范围进行统计(不含城际轻轨线),可得到表 1 给出的各城市轨道交通辐射范围。将各城市总计 73 条放射线路按端点车站距离 CBD 车站的直线距离最大值 L 划分为 $L \leq 10$ km、 $10 \text{ km} < L \leq 15$ km、 $L > 15$ km 共 3 组,则 $L \leq 10$ km 的线路占 73%, $10 \text{ km} < L \leq 15$ km 的线路占 25%, $L > 15$ km 的线路仅占 2%。由表 1 的分析可知,案例城市的轨道辐射范围一般不超过以城市 CBD 为中心的 15

km 半径圈,且重点服务范围在 10 km 半径圈内。

2 欧亚百万级人口城市快速轨道交通系统技术特征分析

2.1 线网供给特征分析

统计分析了表 1 中 17 座城市快速轨道交通线网车站间距及其 88 条线路及车站的特征与指标,以探究线网中线路、车站间距特点与相关技术指标之间的关系。

2.1.1 线网形态

以城市 CBD 向四周放射的结构为该人口级别的典型轨道交通线网结构。根据线路是否经过城市 CBD 和起终点车站的位置,将线网中的线路分为直径线、半径线、环线和切向线。由表 2 可知,直径线和半径线的数量占总线路数的 90%。这表明城市快速轨道交通线路主要分布在城市中心与中心外围间的放射性廊道上。开通环线的城市共有 4 座,环线均位于城市主城区内,并与直径线、半径线实现换乘,总长度在 10.4~13.5 km 之间。这表明快速轨道交通线路可用于百万人口城市主城区的

表 2 城市快速轨道交通线网中各类线路的数量
Tab.2 The number of various types of lines in urban rapid rail transit network

城市名称	不同类型线路的数量/条			
	直径线	半径线	环线	切向线
热那亚		1		
格拉斯哥			1	
那不勒斯		1		
赫尔辛基	2			
仙台	2			
京都	2			
埃森	2	1		
纽伦堡	3			
毕尔巴鄂	2			
哥本哈根	2	1	1	
布鲁塞尔	1	2	1	
奥斯陆	4		1	
多特蒙德	8			
杜塞尔多夫	8	3		
汉诺威	9	3		
科隆	9	2		1
斯图加特	10	1		4
合计	64	15	4	5

小半径环形客运廊道。此外,线路数量较多的快速轨道交通系统包含切向线,加强了射线之间的联系。

2.1.2 站间距与旅行速度分析

88 条线路平均站间距在 0.8 km 以上、>0.5~0.8 km、0.5 km 以内的线路分别占线路总数的 27%、66%、7%;平均旅行速度为 28.1 km/h,旅行速度在 40 km/h 以上、30~40 km/h、≥25~<30 km/h、25 km/h 以内的线路比例分别为 3%、35%、36%、26%。将 88 条线路按旅行速度 40 km/h 以上、30~40 km/h、≥25~<30 km/h、25 km/h 以内进行划分,对应分组的线路站间距平均值分别为 1.42 km、0.87 km、0.67 km、0.57 km,可见,较小的站间距使得平均旅行速度降低,但增加车站供给量的同时能够满足一定的通勤时效需求(见表 3)。

表 3 各城市快速轨道交通系统车站间距与旅行速度
Tab.3 Station spacing and travel speed of rapid rail transit in different cities

城市名称	各线路站间距/km	站间距平均值/km	各条线路平均旅行速度/(km/h)
多特蒙德	0.45~0.72	0.57	26.9
布鲁塞尔	0.57~0.64	0.61	29.9
汉诺威	0.51~0.72	0.61	24.4
斯图加特	0.45~0.80	0.64	27.0
杜塞尔多夫	0.45~1.32	0.65	25.4
埃森	0.66~0.68	0.66	29.4
格拉斯哥	0.70	0.70	26.2
纽伦堡	0.71~0.88	0.77	31.0
科隆	0.65~1.01	0.78	26.9
奥斯陆	0.73~0.97	0.87	29.8
哥本哈根	0.91~0.95	0.93	34.2
热那亚	1.00	1.00	26.6
那不勒斯	1.00	1.00	32.7
仙台	0.93~1.16	1.03	31.9
京都	0.98~1.09	1.04	30.2
毕尔巴鄂	0.96~1.19	1.04	36.6
赫尔辛基	1.43	1.45	44.0

旅行速度与列车最高运营速度亦呈正相关^[8],格拉斯哥地铁最大运行速度仅为 54 km/h,即使是全封闭系统,旅行速度也较低。

2.2 车辆运用特征

对表 1 的 17 座城市快速轨道交通系统中最新型号车辆的主要指标进行统计,参照国内车辆技术

标准,依据表 4 的分类原则将国外城市快速轨道交通车辆进行宽度分级。

表 4 国外城市轨道交通车辆分类原则
Tab.4 Principles for classification of urban rail transit vehicles in foreign countries

车型级别	车辆宽度/m	对应国内地铁或轻轨车型
2.2 m 级	<2.3	无
2.4 m 级	2.3 ~ <2.5	无
2.6 m 级	2.5 ~ <2.7	C 型、L _C 型
2.8 m 级	2.7 ~ <2.9	B 型、L _B 型
3.0 m 级	≥2.9	A 型

表 5 欧亚百万级人口城市快速轨道交通系统车辆指标统计
Tab.5 Vehicle indicator statistics of urban rapicl rail transit systems in cities of million tevel population in Eurasia

城市名称	列车型号	车辆长度/ m	车辆宽度/ m	车型级别	编组或模块数/ 辆	列车最大运行 速度/(km/h)	列车定员/ (人/列)
热那亚	30 系(铰接车)	9.78	2.20	2.2 m 级	4	80	290
格拉斯哥		12.81	2.34	2.4 m 级	3	54	332
埃森	P89(铰接车)	14.00	2.65	2.6 m 级	4	80	284
哥本哈根	Driverless Metro(铰接车)	13.00	2.65	2.6 m 级	3	90	300
多特蒙德	B80C(铰接车)	14.00	2.65	2.6 m 级	4	80	366
杜塞尔多夫	B80(铰接车)	14.00	2.65	2.6 m 级	4	80	366
汉诺威	TW3000	12.50	2.65	2.6 m 级	4	80	334
斯图加特	DT8(铰接车)	19.50	2.65	2.6 m 级	4	80	250
科隆	K5200(铰接车)	14.20	2.65	2.6 m 级	4	80	212
布鲁塞尔	M6	15.70	2.70	2.8 m 级	6	72	774
毕尔巴鄂	UT500	18.03	2.80	2.8 m 级	4	80	570
那不勒斯	M1	17.84	2.85	2.8 m 级	4	80	442
京都	10 系	20.00	2.87	2.8 m 级	6	105	836
京都	50 系	16.00	2.42	2.4 m 级	6	75	600
仙台	1 000 系	20.00	2.89	2.8 m 级	4	75	576
仙台	2000 系	16.50	2.49	2.4 m 级	4	70	388
纽伦堡	Class G1	19.50	2.90	3.0 m 级	4	80	604
奥斯陆	MX3000	18.00	3.16	3.0 m 级	3	70	493
赫尔辛基	M300	22.50	3.20	3.0 m 级	4	90	800

定员(人/m) × 车辆长度(m) × 编组数 × 30(车次/h),保留 2 位有效数字。

由表 6 可知,案例城市的快速轨道交通系统在我国相当于轻轨的城市有 10 座,占城市总数的 59%,车型以 B 型和 C 型车为主。其中,6 座城市(均为德国城市)为部分封闭系统;另外 4 座为全封闭系统。案例城市快速轨道交通相当于我国地铁

由表 5 可知,运用 2.6 m、2.8 m、3.0 m 级车型的城市占比分别为 41%、29%、18%,占 88 条运营线路的比例分别为 74%、10%、11%。编组(模块)数量方面,各城市车辆编组在 3~6 辆,运用 3 辆、4 辆、6 辆编组的城市分别占 18%、71%、12%。

2.3 系统运输能力与敷设方式分析

表 6 为欧亚百万人口城市快速轨道交通系统运输能与敷设方式。国外计算列车载客能力采用的站立密度标准与我国不同。根据车辆参数,参照我国 CJJ/T 114—2007《城市公共交通分类标准》换算,可估算各案例城市快速轨道交通系统的运输能力。换算方法为:线路运输能力 = 国内该级别制式每米

的城市有 5 座,占总数的 29%,车型包括 A 型和 B 型同级车,均采用全封闭线路。另有 2 座城市的系统运能与车辆选型低于我国轻轨标准,采用了全封闭系统。

案例城市的轻轨系统地下敷设占比相对较低,因此,具有建设运营成本低的优势;地铁系统地下敷设比例高,均采用全封闭模式,与我国地铁的制

表 6 欧亚百万人口城市快速轨道交通系统运能与敷设方式

Tab.6 Capacity and laying methods of urban rapid rail transit systems in cities of million-level poputation in Eurasia					
城市	线路运输能力估算/ (人次/h)	按运输能力划分国内 快速轨道交通制式	车型分级对应国内 快速轨道交通车型	路权形式	地下敷设线路占 总长度比例/%
热那亚		无对应制式	无对应车型	全封闭	88
格拉斯哥		无对应制式	无对应车型	全封闭	100
哥本哈根	12 000	轻轨	C 型	全封闭	69
汉诺威	16 000	轻轨	C 型	部分封闭	13
埃森	18 000	轻轨	C 型	部分封闭	45
多特蒙德	18 000	轻轨	C 型	部分封闭	29
杜塞尔多夫	18 000	轻轨	C 型	部分封闭	11
科隆	18 000	轻轨	C 型	部分封闭	18
斯图加特	25 000	轻轨	C 型	部分封闭	19
奥斯陆	23 000	轻轨	A 型	全封闭	30
那不勒斯	28 000	轻轨	B 型	全封闭	73
毕尔巴鄂	28 000	轻轨	B 型	全封闭	54
仙台(南北线为例)	32 000	地铁	B 型	全封闭	85
纽伦堡	33 000	地铁	A 型	全封闭	85
布鲁塞尔	37 000	地铁	B 型	全封闭	86
赫尔辛基	38 000	地铁	A 型	全封闭	64
京都(乌丸线为例)	47 000	地铁	B 型	全封闭	95

式特征相近。

3 欧亚百万级人口城市快速轨道交通系统运营效果分析

3.1 系统旅行时间

先将各案例城市线网中的直、半径线按照端点车站距 CBD 车站的直线距离 D 划分为 2 组,即 $D \leq 10$ km 组和 $10\text{ km} < D \leq 15$ km 组,再统计各线路端点车站至 CBD 车站的旅行时间 t (见表 7)。

$D \leq 10$ km 中仅 2 条线路 t 高于 30 min; $10\text{ km} < D \leq 15$ km 中 t 均低于 40 min。因此,案例城市的 10 km、15 km 轨道交通辐射范围内车站至 CBD 车站的旅行时间分别控制在 30 min、40 min 以内。

3.2 系统客流分析

3.2.1 系统客运量

本研究统计 15 座案例城市快速轨道交通系统的年客运量数据,均已经度过客流培育期,客运量趋于稳定(见表 8)。

3.2.2 系统负荷强度分析

由表 8 可知,各案例城市的线网(线路)负荷强度范围在 0.32 万~1.29 万人次/(d·km)。地铁系统(参照表 6)客流负荷强度普遍较高,达到 0.82

表 7 各城市快速轨道交通线路端点车站至 CBD 车站的旅行时间

Tab.7 Travel time from termiral station of urbam rapid rail transit line to CBD station		
城市名称	t/min	
	$D \leq 10\text{ km}$	$10\text{ km} < D \leq 15\text{ km}$
汉诺威	7 ~ 24	25 ~ 33
杜塞尔多夫	12 ~ 28	26 ~ 30
格拉斯哥		
热亚那	16	
多特蒙德	5 ~ 25	35
科隆	12 ~ 36	31 ~ 36
斯图加特	5 ~ 29	27
埃森	8 ~ 22	
奥斯陆	13 ~ 38	29 ~ 33
布鲁塞尔	19 ~ 26	
京都	8 ~ 26	
纽伦堡	16 ~ 20	
仙台	12 ~ 16	
那不勒斯	33	
哥本哈根	7 ~ 12	
毕尔巴鄂	13	28
赫尔辛基		19 ~ 21

表 8 各案例城市轨道交通系统客运量与负荷强度统计

Tab.8 Statistics of urban rail transit system passenger volume and load intensity in each case city

城市名称	2018 或 2019 年 客运量/ 10 ⁶ 人次	负荷强度/ (万人次/ (d·km))	快速轨道交通车站 1.5 km 覆盖范围人口 密度/(万人/km ²)
格拉斯哥	12.7	0.32	0.50
斯图加特	175.0	0.36	0.31
奥斯陆	119.0	0.38	0.36
汉诺威	172.0	0.39	0.26
科隆	286.0	0.40	0.33
多特蒙德	130.0	0.47	0.27
毕尔巴鄂	89.9	0.57	0.61
热那亚	15.3	0.61	0.94
那不勒斯	46.0	0.70	0.94
赫尔辛基	104.7	0.82	0.31
纽伦堡	122.2	0.88	0.41
仙台	91.7	0.89	0.56
哥本哈根	64.8	0.90	0.75
布鲁塞尔	165.3	1.13	1.02
京都	146.4	1.29	0.87

万~1.29 万人次/(d·km);轻轨系统的负荷强度在 0.36 万~0.90 万人次/(d·km)。轻轨系统中,部分封闭路权的轻轨系统客流强度在 0.36 万~0.47 万人次/(d·km),全封闭的轻轨系统客流强度在 0.38 万~0.90 万人次/(d·km)。综合轨道交通的制式与客流负荷强度来看,主城人口低于 150 万人的城市,开通快速轨道交通系统后客流效益良好。

城市轨道交通出行需求与沿线人口密度关系密切^[9],因此对各案例城市快速轨道交通系统车站 1.5 km 覆盖范围内的人口密度进行了统计。由表 8 可知:随着覆盖范围内人口密度增加,系统负荷强度有明显的增加趋势,负荷强度较高的城市,其轨道交通系统车站 1.5 km 覆盖范围人口密度能达到或接近 1 万人/km²。因此,在城市人口密度高、人口分布集中的情况下,即使城市总人口不足 150 万人,城市快速轨道交通系统仍会有较好的客流效果。

4 结语

本研究对欧亚地区百万级人口城市快速轨道交通进行了系统性分析,结合国内快速轨道交通发展的现状,可以得到以下结论与启示:

1) 按国内标准估算了欧亚发达国家 17 座城市

快速轨道交通系统的运输能力,其结果表明:其中 10 座城市轨道交通相当于我国轻轨,5 座城市相当于我国地铁。由此可见,国外有相当数量的低于 150 万人口的城市开通了地铁和轻轨系统。

2) 各案例城市轨道交通系统的客流情况比较理想。轨道交通沿线人口分布集中、人口密度大的城市其客流效益更佳,因而城市人口总数并不是影响轨道交通系统运输效益的本质因素。因此,我国轨道交通建设审批的部分标准还需要作进一步细化,需要对审批城市的人口分布、人口密度和实际交通出行需求进行具体分析和判定。

3) 国外人口 150 万人以内城市的既有快速轨道交通系统有以下技术特征:①重点服务范围在城市以 CBD 为中心的 10 km 辐射圈内,对应旅行时间低于 30 min;②典型线网结构为向周向放射型,并且相当数量的线网系统包含环线;③相比国内的地铁系统,线路设站密度偏高,旅行速度偏低;④地下敷设线路的里程比例较低。

上述主要特征对我国百万级人口城市建设快速轨道交通系统具有一定参考意义。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通分类: T/CAMET 00001—2020 [S]. 北京:中国城市轨道交通协会,2021.
China Association of Metros. Classification of urban rail transit: T/CAMET 00001—2020 [S]. Beijing: China Association of Metros, 2021.

[2] 中国城市轨道交通协会年鉴编纂委员会. 中国城市轨道交通年鉴(2021)[M]. 上海:上海书店出版社,2021.
Yearbook Compilation Committee of China Association of metros. China urban rail transit yearbook (2021) [M]. Shanghai: Shanghai Bookstore Publishing House, 2021.

[3] 辛欣. 供需视角下的三线城市市区交通问题研究:以泰安市泰山区为例[D]. 济南:山东大学,2021.
XIN Xin. Study on the urban traffic problem of third-tier cities from the perspective of supply and demand[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.

[4] 杨永强. 中小城市核心区道路交通综合治理关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2018.
YANG Yongqiang. Research on key technologies of comprehensive treatment of road traffic in small and medium city[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[5] 王汉军,于松伟,周敏. 轻轨的可持续发展:轻轨之势[J]. 都市快轨交通,2019,32(2):12.
WANG Hanjun, YU Songwei, ZHOU Min. On the sustainable development of light rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(2): 12.

(下转第 23 页)

- WANG Weifu, MEI Zhu. Study of application of bench method to shallow-buried asymmetrically-pressured railway tunnel of super-large cross-section [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1578.
- [2] BOBET A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(12): 1258.
- [3] 张俊儒, 吴洁, 王圣涛, 等. 钢架岩墙组合支撑施工方法动态施工力学特性及其应用[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 132.
- ZHANG Junru, WU Jie, WANG Shengtao, et al. Dynamic construction mechanical characteristics and application of combination support method of steel frame and rock wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 132.
- [4] 张军伟, 曹祥渊, 陈拓, 等. 浅埋隧道围岩压力计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 28.
- ZHANG Junwei, CAO Xiangyuan, CHEN Tuo, et al. Calculation method of surrounding rock pressure in shallow tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 28.
- [5] 张建国, 王明年, 俞尚宇. 厦门东通道CRD法施工段中隔壁安全性分析[J]. 公路, 2008, 53(3): 207.
- ZHANG Jianguo, WANG Mingnian, YU Shangyu. Analysis of security of temporary supports by CRD method in Xiamen east passageway[J]. Highway, 2008, 53(3): 207.
- [6] 王璐, 许霞, 李红英. 地铁隧道穿越厚碎裂岩层的支护优化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 132.
- WANG Lu, XU Xia, LI Hongying. Supporting optimization analysis of subway tunnel crossing the thick cataclastic stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 132.
- [7] 李杰, 司君岭, 仲恒. 基于强度折减法的双孔大跨隧道围岩稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 198.
- LI Jie, SI Junling, ZHONG Heng. Study on the stability of surrounding rock of double hole large span tunnel based on strength reduction method [J]. Journal of Civil Engineering, 2017, 50(S2): 198.
- [8] 李晓红, 李登新, 靳晓光, 等. 初期支护对软岩隧道围岩稳定性和位移影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1207.
- LI Xiaohong, LI Dengxin, JIN Xiaoguang, et al. Analysis of the influence of initial support on the stability and displacement of soft rock tunnel surrounding rock [J]. Geotechnical Mechanics, 2005, 26(8): 1207.
- [9] 韦京, 王芳, 孙明志. PBA施工方法地铁车站下穿桥梁方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 101.
- WEI Jing, WANG Fang, SUN Mingzhi. On scheme optimization of the PBA subway station underneath a bridge[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(6): 101.
- [10] 张新亮. 大断面隧道CD法施工围岩应力行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- ZHANG Xinliang. Research on the stress behavior of surrounding rock during construction adopting CD method of large cross-section tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

(收稿日期:2021-06-09)

(上接第16页)

- [6] 李猛, 周敏, 于松伟. 轻轨车辆特征与适应性研究: 轻轨之术[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(1): 21.
- LI Meng, ZHOU Min, YU Songwei. Multimodal characteristics of light rail transit: the characteristics of LRT[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(1): 21.
- [7] 邱品茗, 杨其新, 张海波. 新三线城市轨道交通线网规模控制研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 8.
- QIU Pinming, YANG Qixin, ZHANG Haibo. Elementary analysis of rail transit network scale of new third-tier cities[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 8.
- [8] 何肖, 顾保南. 我国大陆各城市轨道交通线路旅行速度统计
- 分析: 基于中国城市轨道交通协会数据分析的研究报告之七[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 1.
- HE Xiao, GU Baonan. Statistical analysis of travel speed of urban rail transit lines in China's mainland—report 7: analysis of data from China Association of Metros [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 1.
- [9] 李元坤, 叶霞飞. 城市轨道交通线网规模与人口和岗位密度之间的关系[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 1.
- LI Yuankun, YE Xiafei. Relationship between urban rail transit network scale and population/job density[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 1.

(收稿日期:2021-06-27)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com