

# 突破折返能力制约实现客流精准匹配的 运营组织方案优化研究

葛世平

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海//正高级工程师)

**摘要** 传统运营组织模式下,城市轨道交通长大线路运能不能满足高峰时段超高峰客流需求,需要通过优化运营组织方案提升长大线路运能。分析了上海轨道交通长大线路客流特征,以及传统运营组织模式下长大线路运能供给与客流需求之间的主要矛盾;介绍了以客流为核心的长大线路运能精准匹配策略;以上海某轨道交通线路为例,分析了突破折返能力制约的极限运能运营组织方案。研究结果表明:传统运营组织模式下,高峰时段断面运能受线路折返能力制约,采用存车线插车方式增加运能,也只能做到少量非连续增能;长大线路的高峰时段高断面客流区间相对固定、超高峰持续时间较短,可通过停车场ATC(列车自动控制)改造、优选插车地点、缩短行车间隔、不对称运行交路、远端停车场收车等综合策略,形成以单向运营为特征的运营方式,突破线路折返能力制约,实现高峰时段局部区段、连续超高密度的行车组织方案,进而实现线路运能精准匹配高峰期超高峰客流需求。

**关键词** 城市轨道交通;长大线路;运营组织方案;折返能力;超高峰客流;不对称交路

**中图分类号** U292.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.06.001

## Operation Organization Scheme Optimization for Breaking through Turn-back Capacity Constraints and Achieving Precise Passenger Flow Matching

GE Shipping

**Abstract** Under conventional operation organization mode, the transportation capacity of urban rail transit long-large lines can't meet the passenger flow demand during peak and super peak hours. It is necessary to improve long-large line transportation capacity by optimizing operation organization scheme. The passenger flow characteristics of Shanghai rail transit long-large lines are analyzed, as well as the main contradiction between the supply of long-large line transportation capacity and the demand of passenger flow under conventional operation organization mode. A precise matching strategy for the long-

large line transportation capacity centered on passenger flow is introduced. Taking a certain line of Shanghai rail transit as example, the operation organization scheme of extreme transportation capacity that breaks through turn-back capacity constraints is analyzed. Research results show that under conventional operation organization mode, the sectional transportation capacity during peak hours is limited by turn-back capacity while adopting storage track insertion method can only increase little capacity discontinuously. The long-large line interval of high sectional passenger flow during peak hours is relatively fixed, and the duration of super peak hours is short. Comprehensive strategies can be adopted, such as depot ATC (automatic train control) transformation, train insertion location optimization, train headway reduction, asymmetric routing operation, and train collection at remote depots, to form a one-way operation mode and break through the line turn-back capacity constraints, constituting an operation organization scheme for peak hour segments and continuous super-high density. This enables precise matching of line transportation capacity with passenger flow demands during peak and super peak hours.

**Key words** urban rail transit; long-large line; operation organization scheme; turn-back capacity; super-peak hour passenger flow; asymmetric routing

**Author's address** Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

随着我国城市化进程的高速推进,城市建设面积快速扩展,许多城市在极短的时间内完成了蔓延式扩张,城市中心区面积越来越大且出现圈层化特点。中心城区与近郊的界限不甚清晰,传统中心城区与毗邻新建区之间的联系较为紧密,实际城区面积不断扩大。为了适应这种城市发展特征,城市轨道交通线路不断向外延伸,出现了许多长度达40 km及以上的长大线路。在上海轨道交通线网的21条线路中,长度超过30 km的线路占比超过80%。

以上海轨道交通 1 号线为例,该线先后经历了南延伸、北延伸和北北延伸。

在高峰时段,这些长大线路更容易在中心城区大型换乘枢纽、商圈集中区或商务办公区所在车站的前一个区间,形成全线的高峰时段高断面客流量。一般而言,传统行车组织应对高峰时段高断面客流量的方案是通过开行大小交路、配合存车线加车等方式增加行车密度。然而受折返能力、可上线车辆数量及插车点车站配线等条件制约,使行车密度超过 30 对/h 的难度极大。本文针对该问题,结合上海轨道交通实际案例,研究通过配置 ATC(列车自动控制)停车场、车站多点发车,以及优选插车地点、缩短追踪间隔、优化停站时分、远端车场收车等综合措施,形成以上、下行单侧运营为特征的运营方案,可精准匹配高峰时段高断面客流量的运能需求。

## 1 上海轨道交通线网特点及其客流特征

上海轨道交通线网中的长大线路占比较高,除环线之外,这些长大线路基本属于穿越市中心、连接近郊的穿心线,还有一些是连接城市中心和远郊的放射线。从客流角度来看,具有以下特征:

1) 放射线越远离市中心,线网密度越低。放射线是城市外围客流进入市区的主通道,客流积聚效应明显。线路沿线的一些超大型住宅区也是流动人口的集聚地,在这些区域的车站,通勤客流是客流的绝对主体。在早高峰时段,放射线的高峰客流相较普通线路能更快达到极值(一般 1 h 之内客流快速达峰登顶),其中的极端超高峰客流(2 min 行车间隔运能都不能满足需求的客流)会持续一段时间,往往持续 30 min 左右。

2) 上下行线路客流量差异大。在早高峰时段,往中心城区方向的客流量大,往城市郊区方向的客流量小;在晚高峰时段,客流流向则与早高峰时段的相反。部分远郊线路客流的高峰和非高峰差异明显,峰值回落速度快。高峰时段客流量较大,随着高峰极值时段的过去,客流往往在 1 h 之内快速回落,非高峰时段客流量会降至极低水平。

## 2 传统运营组织模式下长大线路运能供给与客流需求的矛盾

一般来说,长大线路往往设置有两个以上车场,并分设于线路两端。传统的运营方案是:在早

高峰到达前,线路两端车场连续双向发车,列车运行到线路另一端再折返,并通过陆续出库列车加车,形成线路的高峰列车运行图。常规 6 节编组列车很难突破 2 min 行车间隔,运营阶段采用如增加编组(如日本)、停车线插车等提高运能的措施,其效果是有限的,运能增加量不大。因此,传统运营组织模式主要存在如下问题:

1) 极限运能与极端高峰客流不匹配。受制于折返能力的限制,大部分有人驾驶线路的折返时间往往在 2 min 甚至更长,而折返能力制约了正线列车运行密度,造成车站限流、列车超载、早高峰运行时段长等问题。在极端高峰客流的冲击下,运能不能很好满足客流需求,部分区段列车满载率超过 130%,对乘客的出行造成较大影响。

2) 运能增减与客流增减不匹配。传统的运营组织模式受线路长度和停车场入出库能力制约,通常需要停车场提前发车,在早高峰到达前达到高运能状态,在此过程中运能浪费较大。且受制于折返站折返能力,行车密度极难提高,难以应对陡增的极端超高峰客流。

3) 运能均衡与客流不均衡不匹配。采用交路折返的运营方式,只有在低密度运行时有条件形成存车线插车的零星上下行不对称运行方案;但在高峰期,由于列车行车间隔小,再加之折返能力的制约,难以实现稳定的上下行不对称运行方案。上、下行运能相同,而上、下行客流存在明显差异,导致一侧运能浪费,另一侧运能不足,且上线运用车数较高。

## 3 以客流为核心的长大线路运能精准匹配策略

运能精准匹配运输组织,就是聚焦超高峰客流,以使直接体现乘客乘坐舒适度水平的列车满载率指标达到最优为目标,最大程度实现客流需求与运能供给的精准匹配,满足客流需求的同时减少运能浪费,达到运能的高效利用。

运能精准匹配策略的核心在于针对超高峰客流,以上、下行线单侧运营为特征,不受折返能力极限制约,形成小间隔、高密度、大运量的极端不对称交路运输组织方案。实现这一方式的瓶颈在于如何突破两个极值,即运能极值和运能增减极值。

一般来说,国内大部分新建线路均采用 CBTC(基于通信的列车控制)信号系统,列车追踪间隔理

论上能够达到 90 s,但该运能极值要充分发挥出来,还与其他各专业设施设备的能力有关。传统运营组织模式下要实现 90 s 的行车间隔,对折返能力、配属车辆数等要求更高,运能浪费会更大,因此还要实现运能增减极值。

运能增加及能力极值的形成受制于折返能力和停车场出入库能力。折返能力受制于信号系统、配线及管理模式约束。停车场出入库能力受制于其信号系统控制能力:普通停车场出入库能力为 6~8 min/列;ATC 停车场出入库能力为 3 min/列,如果采用双线出车,出入库能力可以提升至 2 min/列。

突破折返能力约束的核心在于将折返能力+出库能力提高到极致,通过在折返间隔插入 1 列出库列车的方式,实现 90 s 或更低的行车间隔,以及在线路另一端通过快速收车的方式实现运能增减极值。

综上所述,在运能极值和运能增减极值实现的前提下,可在超高峰客流时段前的高峰客流时段内,形成以客流需求为导向的上、下行不对称(行车间隔为 3~4 min)行车方案,再以“折返+出库”方式形成单向超高密度(行车间隔为 90~120 s)行车方案,以应对超高峰时段客流。高峰客流时段运营

组织模式为:当列车运行至线路另一端,部分列车折返,部分列车直接入库,将线路的行车间隔调整到 2~3 min。

另外,相较普通线路,列车运用计划也存在较大不同。以 1 条长度为 40 km 的线路为例,按照 35 km/h 的旅行速度,全程单向运行时长超过 1 h,而此时段已经涵盖了线路的超高峰客流时段。列车运行到终点站时,整条线路客流已呈现高峰客流态势。因此,并不要求所有列车折返后持续运行,可以选择运行至终点后回库退出正线运营。

#### 4 上海某轨道交通线路极限运能运输组织方案研究

##### 4.1 线路基本情况及运营现状

上海某轨道交通线路是 1 条穿越市中心向近郊延伸的长大线路,全长 37 km。目前,该线路采用大小交路运行模式,最小行车间隔为 2 min 15 s。早高峰时段,该线路下行方向部分区段 5 min 断面满载率超过 130%,列车拥挤度极高,既有运能已无法满足客流需求;而上行方向的 5 min 最大断面满载率不足 85%,列车拥挤情况相对平稳。该线路核心区段早高峰时段下行方向 5 min 断面客流量和 5 min 断面满载率分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 上海某轨道交通线路早高峰时段下行方向核心区段 5 min 断面客流量

Tab. 1 5-min sectional passenger flow of downward direction focal segment of a Shanghai rail transit line during morning peak hours

时段	不同区间 5 min 断面客流量/人次										
	区间 1	区间 2	区间 3	区间 4	区间 5	区间 6	区间 7	区间 8	区间 9	区间 10	区间 11
07:55—07:59	1 913	2 494	2 565	2 207	2 495	2 613	2 389	2 201	1 885	1 738	1 210
08:00—08:04	2 123	2 506	2 625	2 347	2 628	2 726	2 631	2 533	2 241	2 116	1 440
08:05—08:09	2 057	2 664	2 664	2 414	2 709	2 987	2 741	2 699	2 468	2 475	1 823
08:10—08:14	2 222	2 541	2 834	2 583	2 796	2 921	2 700	2 725	2 597	2 621	1 748
08:15—08:19	2 620	3 131	2 705	2 529	2 932	3 207	2 945	2 775	2 528	2 675	2 003
08:20—08:24	2 309	3 340	3 509	2 531	2 752	3 064	3 078	3 034	2 825	2 723	1 885
08:25—08:29	2 107	2 872	3 334	3 228	3 313	3 300	2 769	2 794	2 808	3 020	2 177
08:30—08:34	1 972	2 694	3 148	2 901	3 572	3 960	3 710	3 281	2 685	2 702	2 030
08:35—08:39	2 081	2 532	2 713	2 702	3 118	3 306	3 316	3 585	3 521	3 224	2 009
08:40—08:44	1 960	2 545	2 761	2 324	2 734	3 258	3 171	3 022	3 068	3 399	2 657
08:45—08:49	1 840	2 506	2 613	2 219	2 517	2 756	2 678	2 715	2 813	2 913	2 100
08:50—08:54	1 522	2 387	2 621	2 132	2 374	2 592	2 455	2 425	2 442	2 654	2 052
08:55—08:59	1 325	1 748	2 460	2 111	2 391	2 547	2 426	2 331	2 194	2 312	1 822
09:00—09:04	1 713	1 870	1 681	1 902	2 288	2 506	2 352	2 359	2 273	2 287	1 605

表 2 上海某轨道交通线路早高峰时段下行方向核心区段 5 min 断面满载率

Tab.2 5-min sectional load factor of downward direction focal segment of a Shanghai rail transit line during morning peak hours

时段	不同区间 5 min 断面满载率/%										
	区间 1	区间 2	区间 3	区间 4	区间 5	区间 6	区间 7	区间 8	区间 9	区间 10	区间 11
07:55—07:59	63.07	82.20	84.57	72.77	82.26	86.15	78.76	72.57	62.16	57.30	39.90
08:00—08:04	69.98	82.62	86.55	77.38	86.62	89.87	86.73	83.49	73.89	69.76	47.48
08:05—08:09	67.82	87.83	87.83	79.57	89.29	98.48	90.37	88.97	81.37	81.60	60.10
08:10—08:14	73.26	83.75	93.42	85.15	92.17	96.31	89.02	89.85	85.60	86.42	57.64
08:15—08:19	86.38	103.21	89.18	83.38	96.65	105.74	97.08	91.49	83.35	88.18	66.04
08:20—08:24	76.11	110.10	115.67	83.43	90.71	101.00	101.46	100.03	93.13	89.77	62.13
08:25—08:29	69.48	94.70	109.90	106.43	109.22	108.78	91.28	92.10	92.56	99.58	71.76
08:30—08:34	64.99	88.82	103.80	95.63	117.74	130.54	122.29	108.16	88.51	89.09	66.91
08:35—08:39	68.61	83.46	89.45	89.09	102.78	109.00	109.33	118.17	116.06	106.29	66.24
08:40—08:44	64.61	83.90	91.01	76.60	90.13	107.42	104.55	99.63	101.16	112.06	87.59
08:45—08:49	60.65	82.63	86.13	73.14	82.99	90.87	88.27	89.51	92.73	96.05	69.22
08:50—08:54	50.17	78.69	86.41	70.27	78.25	85.45	80.92	79.94	80.50	87.49	67.66
08:55—08:59	43.69	57.61	81.10	69.60	78.84	83.97	79.96	76.84	72.33	76.22	60.06
09:00—09:04	56.49	61.66	55.43	62.69	75.42	82.62	77.55	77.78	74.94	75.40	52.92

4.2 线路运能提升方案

该线路的两个停车场分别设置在线路两端,连接两端终点站。该线路两端终点部分区段配线如图 1 和图 2 所示。A 端终点甲停车场由于站场信号

没进行过 ATC 改造,可利用缩小信号分区方式达到每列列车 4 min 30 s 的出库能力;B 端终点乙停车场由于已完成了 ATC 改造,其出库能力已提升至每列列车 3 min,可将行车间隔提升至 1 min 30 s。

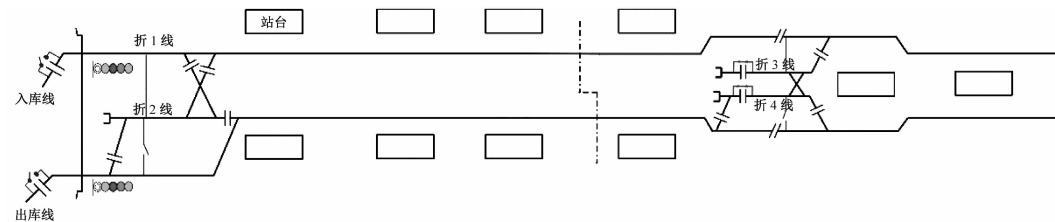


图 1 线路 A 端终点部分区段配线示意图  
Fig.1 Auxiliary line diagram of partial segments at line A terminal

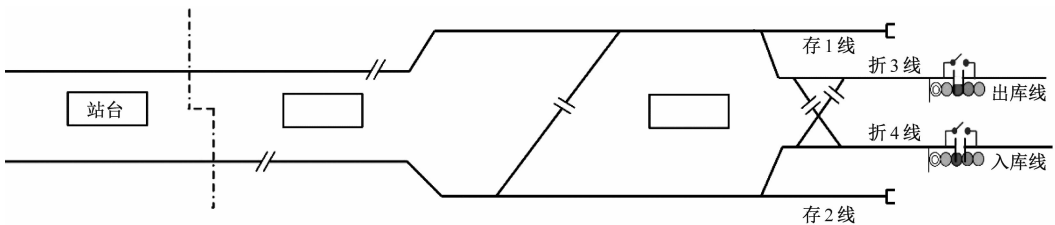


图 2 线路 B 端终点部分区段配线示意图  
Fig.2 Auxiliary line diagram of partial segments at line B terminal

在超高峰客流时段,以客流为导向,下行出发端停车场采用 1 列隔 1 列“折返 + 出库”的方式,将行车间隔提升至 1 min 30 s,列车运行至线路另一端,部分列车入库,部分列车折返,形成 3 min 间隔

超高峰客流时段运行图;上行出发端采用 1 列隔 1 列“折返 + 出库”的方式形成 2 min 15 s 的行车间隔,列车运行至上行线路另一端,采用部分列车入库、部分列车折返的方式形成等间隔 3 min 超高峰

客流时段运行图。为了实现该运营组织方案,下行方向需增加 7 列列车,待列车运行至线路另一端,安排 9 列列车回库。这样,既可规避折返能力不足,又可避免运能浪费。该线路超高峰时段列车运行交路如图 3 所示。列车运行图调整前后参数变化如表 3 所示。

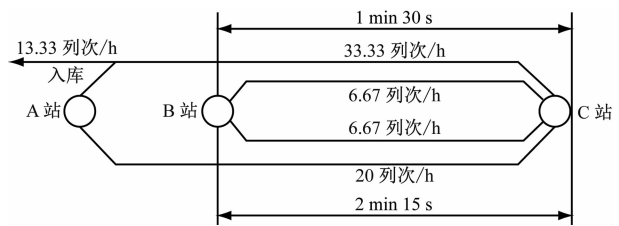


图 3 超高峰客流时段行车交路图

Fig. 3 Operation routing diagram of passenger flow during super-peak hours

列车运行图调整后,该线路上行方向运能保持不变,5 min 最大断面满载率不高于 85% ,其中早高

峰时段初期 3 min 行车间隔条件下,5 min 最大断面满载率不高于 50% ;下行方向通过出库列车集中出车方式,实现覆盖 30 min 的单向增能,行车间隔由 2 min 15 s 缩短至 1 min 30 s,运能提升 33% ,下行方向 5 min 最大断面满载率下降 44%。该线路列车运行图调整后早高峰时段下行方向核心区段 5 min 断面满载率如表 4 所示。

表 3 列车运行图调整前后参数变化

Tab. 3 Situation of parameter changes before and after train diagram adjustment

项目	最大用车数/列	出车分配/列	最小行车间隔
调整前	63	26(甲停车场), 37(乙停车场)	2 min 15 s
调整后	70	27(甲停车场), 43(乙停车场)	1 min 30 s (覆盖 30 min)
变化量	7	+ 1(甲停车场), + 6(乙停车场)	缩短 33%

表 4 上海某轨道交通线路列车运行图调整后早高峰时段下行方向核心区段 5 min 断面满载率

Tab.4 5-min sectional load factor of downward direction focal segment of a Shanghai rail transit line during morning peak hours after train diagram adjustment

时段	不同区间 5 min 断面满载率/%										
	区间 1	区间 2	区间 3	区间 4	区间 5	区间 6	区间 7	区间 8	区间 9	区间 10	区间 11
07:55—07:59	42.04	54.80	56.38	48.51	54.84	57.43	52.51	48.38	41.44	38.20	26.60
08:00—08:04	46.65	55.08	57.70	51.59	57.75	59.91	57.82	55.66	49.26	46.51	31.65
08:05—08:09	45.21	58.55	58.55	53.05	59.53	65.65	60.24	59.31	54.25	54.40	40.07
08:10—08:14	48.84	55.84	62.28	56.76	61.45	64.21	59.35	59.90	57.07	57.61	38.43
08:15—08:19	57.59	68.81	59.45	55.59	64.44	70.49	64.72	60.99	55.57	58.79	44.03
08:20—08:24	50.74	73.40	77.12	55.62	60.48	67.33	67.64	66.69	62.08	59.85	41.42
08:25—08:29	46.32	63.13	73.27	70.96	72.81	72.52	60.85	61.40	61.71	66.38	47.84
08:30—08:34	43.33	59.22	69.20	63.75	78.50	87.03	81.53	72.10	59.00	59.39	44.61
08:35—08:39	45.74	55.64	59.63	59.39	68.52	72.67	72.89	78.78	77.38	70.86	44.16
08:40—08:44	43.07	55.93	60.67	51.07	60.09	71.61	69.70	66.42	67.44	74.71	58.39
08:45—08:49	40.43	55.09	57.42	48.76	55.33	60.58	58.85	59.67	61.82	64.03	46.15
08:50—08:54	33.44	52.46	57.61	46.85	52.17	56.97	53.95	53.30	53.67	58.32	45.11
08:55—08:59	29.13	38.41	54.07	46.40	52.56	55.98	53.31	51.23	48.22	50.82	40.04
09:00—09:04	37.66	41.11	36.95	41.79	50.28	55.08	51.70	51.85	49.96	50.26	35.28

5 需要注意的几个问题

1) 由于正线折返和停车场发车的联动要求极高,如实现超高密度发车,需要在停车场和正线信号系统的 ATS(列车自动监控)一体化设计下,利用

系统能力的联动效率提升系统的安全防护能力。ATS 要具备上、下行线路分设运营模式的功能。

2) 停车场的位置最好设置在线路端头,或停车场位置覆盖线路客流高峰侧的超高峰客流车站,以便于收车。

3) 线路运能增大后,车站客流增加,车站进出站能力必须与之相呼应。

4) 出入库能力的提升涉及到配线条件、供电能力及区间消防等,需要在线路设计时考虑多重因素的影响,只有多专业系统进行联动设计,才能保证目标方案的实现。

## 6 结语

突破折返能力的运营组织优化模式,是对目前运营模式的突破,是针对客流形成及时空分布的特征,以上下行分别考虑的单向线路运输组织为指导,以突破折返限制快速形成运能为基础,做到运能变化曲线最大程度贴合大客流变化曲线,形成持续不间断的高密度行车能力,实现运能对客流的精准服务,降低列车周转(特别是长大线路列车周转)过程中的运能浪费。本文所述 90 s 行车间隔方案是基于正线行车信号系统能够保障行车安全的最小列车间隔,不代表此种发车模式的极限。如基于信号系统的停车场发车能力及线路折返能力若要得到提升,发车间隔须进一步压缩空间,这样既有运能还可大幅提高。另外,针对较短线路,还可以通过在停车场设置折返线的方式,通过车站与停车场形成双折返以提升折返能力。

据此建议,未来应进一步加大对新建线路设计的总体思考,加强对早高峰客流特点的细化分析,并由关注准点率转变为关注运能供给与客流需求的匹配,以运营需求为目标开展线路总体设计,以提升线路对客流变化的适应能力。

## 参考文献

[1] 施仲衡. 城市轨道交通客流预测相关问题分析[J]. 城市轨道交通, 2009, 7(1): 45.

SHI Zhongheng. Analysis of related problems in passenger flow forecast of urban rail transit[J]. Urban Transport of China, 2009, 7(1): 45.

[2] 毛保华, 张政, 陈志杰, 等. 城市轨道交通网络化运营组织技术研究评述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(6): 155.

MAO Baohua, ZHANG Zheng, CHEN Zhijie, et al. A review on operational technologies of urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(6): 155.

[3] 葛世平. 从运营角度谈城市轨道交通的总体设计[J]. 城市轨道交通研究, 2004, 7(2): 13.

GE Shiping. General design of UMT from the angle of operation [J]. Urban Mass Transit, 2004, 7(2): 13.

(收稿日期:2023-04-10)

# 上海地铁“三十而立正青春”

5月28日,庆祝上海地铁运营30周年系列活动相继举行。上海地铁从无到有,由线成网,“三十而立正青春”,在跨越800 km的新征程中,上海地铁正以担当与实干践行着三十年不变的初心使命。

上海地铁从1960年在浦东塘桥一块用芦苇棚搭建的试验场里进行的盾构法隧道试验性工程开始,到1993年5月28日1号线首段线路通车,一路上不断攻坚克难,打破了“上海的地质条件不可能造地铁的”断言,并得到了快速发展。用已故中国工程院院士刘建航的话来说,“上海地铁的发展是不断克服各种困难的过程”。上海地铁用30年走过了从6.6 km(徐家汇站至锦江乐园站)到831 km、从5个车站到508座车站的发展历程,形成了四通八达的交通动脉,每天服务乘客超1 000万人次。“十四五”期间,上海地铁正陆续启动248 km、超过130座车站的新一轮建设,建设规模及强度将再次超越历史。全部项目建成通车后,上海地铁将形成运营里程超过1 000 km、拥有640余座车站的庞大轨道交通网络。

在庆祝上海地铁运营30周年主题系列活动中,以文化为载体,以“跨越800,一起向未来”为主题的照片展中,从“豆腐里打洞”到“螺蛳壳里做道场”、从“1列车”到“7 000辆”、从“地铁车站”到“站城一体”……13组今昔对比系列组图展现了上海地铁历经30年实现“国内领先、国际一流”的发展。同时,经过数月筹备与施工,位于龙阳路站的“印象地铁”公共艺术装置也在当天完成更新,向来往乘客讲述上海地铁栉风沐雨砥砺前行、勇立潮头谱新篇的传奇故事。

(供稿:上海申通地铁集团有限公司)