

上海轨道交通1号线富锦路站折返能力分析

项仲强¹ 施莉娟²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 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, 工程师)

摘要 目的:终端折返站的折返能力是决定整条城市轨道交通线路运输能力的关键因素,因此有必要对既有线路终端折返站的折返能力进行研究,分析提升其折返能力的主要限制条件,优化运营组织模式。方法:以上海轨道交通1号线富锦路站为例,分析富锦路站的折返模式。首先,介绍了富锦路车站站场,并定义了折返运行关键点;然后,计算了各关键点间列车的运行时间;接着,分析了富锦路车站站前折返、站后折返和前后交替折返3种折返模式,并计算了3种折返模式下,各列车在不同关键点所需的折返时间;最后,对前后交替折返模式进行优化,人为延长列车在站后折返线的停车时间,将所有列车的接车间隔和发车间隔调整为相同时间间隔。结果及结论:单一的站前折返效率较低,列车折返时间间隔与中间站台停站时间线性相关;相比于单一的站前折返,单一站后折返的折返效率较高,列车折返间隔与列车折返线停留时间线性相关;前后交替折返模式中,站后折返列车的运行时间较为充裕,导致站后折返列车需要在折返线上停留较长的时间;优化后的前后交替折返时间间隔为110.28 s。

关键词 城市轨道交通;富锦路站;折返能力

中图分类号 U284.48+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.038

Analysis of Shanghai Rail Transit Line 1 Turn-back Capacity at Fujin Road Station

XIANG Zhongqiang, SHI Lijuan

Abstract Objective: Terminal station turn-back capacity is a critical factor determining the overall transportation capacity of urban rail transit lines. Therefore, it is necessary to study the turn-back capacity of existing terminal stations, analyze the main factors limiting the turn-back capacity, and optimize the operation organization mode. Method: Taking Shanghai Rail Transit Line 1 Fujin Road Station as an example, its turn-back mode is analyzed. First, the station layout and key turn-back points are introduced. The time interval between each key point is calculated. Then, the pre-station turn-back, post-station turn-back and alternate turn-back three modes are analyzed, the time interval data required at each key point of the above three

is calculated. Finally, the alternate turn-back mode is optimized by artificially extending the train dwell time on post-station turn-back track, adjusting the arrival and departure intervals of all trains to the same duration. Result & Conclusion: The efficiency of single pre-station turn-back is relatively low, and the turn-back time interval is linearly related to the dwell time at intermediate platforms on turn-back track. Compared to single pre-station turn-back, single post-station turn-back has higher turn-back efficiency, while there exists the same linear correlation. In the alternate turn-back mode, the running time for post-station turn-back train is relatively ample, resulting in its longer dwell time on turn-back track. The optimized interval for the alternate turn-back mode is 110.28 seconds.

Key words urban rail transit; Fujin Road Station; turn-back capacity

First-author's address CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China

地铁线路的行车密度在很大程度上由终端折返站的折返能力决定。随着经济的不断发展及人口密度的不断上升,越来越多的市民选择地铁作为出行工具,而由此带来的对于上海轨道交通1号线(以下简称“1号线”)的行车密度要求也在不断提高。1号线采用固定闭塞制式,富锦路站为线路北端终端折返车站。本文以富锦路站为例,对其站前、站后及交替折返能力进行了分析,计算了折返间隔的实际数据,总结了类似站形车站列车折返能力的一般特点及其规律。本文研究可为富锦路站折返能力的提升提供理论指导,对实际的运营组织有指导意义。

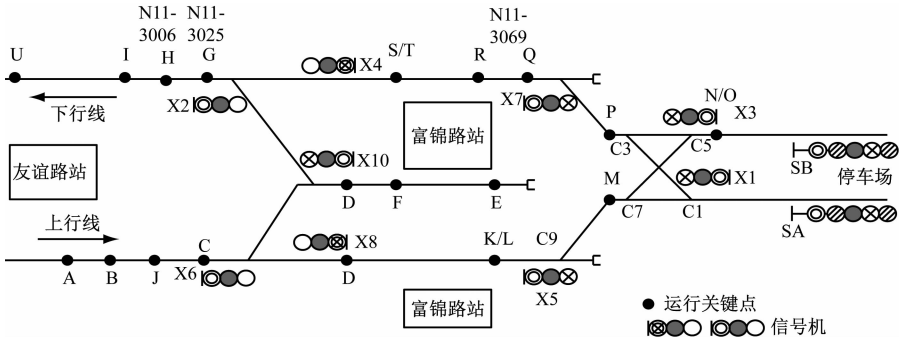
1 富锦路车站站场说明

富锦路站有3个站台,上行站台和下行站台用于列车的站后折返,而中间站台用于列车的站前折返。站后有两条折返线,其也是停车场的出入库

线。信号系统设计中考虑了信号机 X5—X1 的防护进路,当进路 X5—X3 暂时无法排列时,系统触发该防护进路,为上行进站列车提供速度码,确保列车在停车点停车。

为了说明列车折返运行中前车对后车的限制

关系,即联锁关系及 ATP(列车自动防护)发码条件对列车运行的影响,需要在特定的位置定义列车运行的关键点。富锦路站站型图如图 1 所示,其中列车运行的关键点定义如表 1 所示。



注:X、SA、SB 为信号机;C 为道岔;N11 为下行轨道区段;S/T 表示关键点 S 和关键点 T 均在该位置,其余同理。

图 1 富锦路站站型图

Fig. 1 Diagram of Fujin Road Station layout

表 1 列车运行关键点定义

Tab. 1 Definition of train operation key points

关键点	前后轴	里程	说明
A	前轴	K29 + 616	列车从友谊路上行站台出发
B	前轴	K30 + 190	列车到达信号机 X6 的干扰点
C	前轴	K30 + 637	列车进入站前道岔区段
D	后轴	K30 + 698	列车出清站前道岔区段
E	前轴	K30 + 909	列车到达中间站台停车点停车
F	前轴	K30 + 712	列车在中间站台换端, 停站结束
G	后轴	K30 + 527	列车出发出清站前道岔区段
H	后轴	K30 + 248	列车出发出清 N11-3025 区段
I	后轴	K30 + 055	列车出发出清 N11-3006 区段
J	前轴	K30 + 528	列车到达信号机 X5 干扰点
K	前轴	K30 + 890	列车到达上行站台停车点停车
L	前轴	K30 + 890	列车在上行站台停站结束
M	后轴	K31 + 005	列车进入折返线出清道岔 C9 所在区段
N	后轴	K31 + 071	列车出清站后岔区, 进入折返线
O	前轴	K31 + 050	折返线停车
P	后轴	K31 + 005	列车出清站后交叉渡线区段, 驶向下行站台
Q	后轴	K30 + 952	列车出清站后道岔区段, 驶向下行站台
R	前轴	K30 + 790	列车进入下行站台 N11-3069 区段
S	前轴	K30 + 712	列车到达下行站台停车点停车
T	前轴	K30 + 712	列车在下行站台停站结束
U	前轴	K29 + 438	列车到达友谊路下行站台

通过仿真计算可以获得以上关键点之间,列车按照最高设计速度运行时的运行时间。关键点间的列车运行时间如表 2 所示。其中: $t_{1,xy}$ 为 x 点至 y 点的站前折返运行时间; $t_{2,xy}$ 为 x 点至 y 点的站后折返运行时间。除表 2 中列出的折返时间外,其他与折返分析相关的时间参数为:中间站台停站时间 t_{dw} 为 40.00 s;列车正常停站时间为 30.00 s;列车折返线停留时间 t_{ce} 为 25.00 s;列车起动反应时间 t_{rea} 为 2.00 s;进路排列时间 t_r 为 13.00 s。

表 2 关键点间列车运行时间

Tab. 2 Train operation time between key points

站前折返下的运行时间/s	站后折返下的运行时间/s
$t_{1,AB} = 42.72$	$t_{2,AB} = 42.72$
$t_{1,BC} = 39.53$	$t_{2,BJ} = 19.01$
$t_{1,CD} = 57.75$	$t_{2,JK} = 40.31$
$t_{1,DE} = 10.01$	$t_{2,LM} = 45.49$
$t_{1,FG} = 49.85$	$t_{2,MN} = 12.60$
	$t_{2,NO} = 13.45$
	$t_{2,OP} = 41.90$
	$t_{2,PR} = 3.38$
	$t_{2,RQ} = 3.15$
	$t_{2,QS} = 16.51$
	$t_{2,TG} = 31.26$
$t_{1,GH} = 23.22$	$t_{2,GH} = 16.34$
$t_{1,HI} = 10.85$	$t_{2,HI} = 10.85$
$t_{1,IU} = 38.79$	$t_{2,IU} = 38.79$

2 站前折返分析

在城市轨道交通运营中,通常用列车运行时间间隔 T 来反映列车的折返能力,列车运行时间间隔越小,表示列车的行车密度越大,即折返能力越强。在富锦路站,列车仅利用中间站台进行站前折返。对富锦路站的站前折返逻辑进行分析可以发现,信号设备间的联锁关系限制了后车与前车的折返时间间隔。当前车出发出清站前道岔区段,即列车后轴离开 G 点后,系统方可为后车排列上行进站进路 X6—X10。当信号开放时,后车刚好接近 B 点。列车在中间站台停车换端后,发车沿下行线驶向友谊路站。各列车在不同关键点的站前折返时间如表 3 所示。

表 3 各列车在不同关键点的站前折返时间
Tab.3 Pre-station turn-back time at each key point for each train

关键点	站前折返时间/s			
	列车 I	列车 II	列车 III	列车 IV
A	0	210.14	420.28	630.42
B	42.72	252.86	463.00	673.14
C	82.25	292.39	502.53	712.67
D	140.00	350.14	560.28	770.42
E	150.01	360.15	570.29	780.43
F	190.01	400.15	610.29	820.43
G	239.86	450.00	660.14	870.28
H	263.08	473.22	683.36	893.50
I	273.93	484.07	694.21	904.35
U	312.72	522.86	733.00	943.14

站前折返的列车折返时间间隔 $T_{站前}$ 可以表示为:

$$T_{站前} = t_{1,BC} + t_{1,CD} + t_{1,DE} + t_{dw} + t_{1,FG} + t_r =$$
$$39.53\text{ s} + 57.75\text{ s} + 10.01\text{ s} + 40.00\text{ s} +$$
$$49.85\text{ s} + 13.00\text{ s} = 210.14\text{ s}$$

由此可知,单一的站前折返效率是比较低的, $T_{站前}$ 与 t_{dw} 线性相关。例如,因列车换端原因需将 t_{dw} 设置为 50.00 s 时,则 $T_{站前}$ 为 220.14 s。

3 站后折返分析

列车的站后折返有 3 种方式:下行折返线折返、上行折返线折返及上下行折返线交替折返。其中,下行折返线折返方式的折返效率最高,这是由于当

下行折返线在前车占用的情况下,后车可以利用触发信号机 X5—X1 防护进路的方式,为后续上行进站列车提供所需的速度码,使得后续列车可以在上行站台进站停车。在后车上行站台停站的这一时间段内,前车已经出清折返线,此时可以排列后车进下行折返线的进路。本文以这种折返方式为例进行分析,在实际运营中,若在采用单一站后折返也是采用这种折返方式。

基于站后折返方式,根据联锁关系和 ATP 发码设计,前车对后车的运行有着一系列的限制关系。经比较发现,以下的限制关系是该折返的关键限制关系,即该关键限制关系限制了前后列车在时间上进一步靠近:前车出折返线出清 C1—C7 道岔区段(P 点),15.00 s 后(排列进路 13.00 s;列车起动反应时间 2.00 s),后车方可从上行站台起动(L 点)驶入折返线。各列车在不同关键点的站后折返时间如表 4 所示。

表 4 各列车在不同关键点的站后折返时间
Tab.4 Post-station turn-back time at each key point for each train

关键点	站后折返时间/s			
	列车 I	列车 II	列车 III	列车 IV
A	0	153.44	306.88	460.32
B	42.72	196.16	349.60	503.04
J	61.73	215.17	368.61	522.05
K	102.04	255.48	408.92	562.36
L	132.04	285.48	438.92	592.36
M	177.53	330.97	484.41	637.85
N	190.13	343.57	497.01	650.45
O	228.58	382.02	535.46	688.90
P	270.48	423.92	577.36	730.80
R	273.86	427.30	580.74	734.18
Q	277.01	430.45	583.89	737.33
S	293.52	446.96	600.40	753.84
T	323.52	476.96	630.40	783.84
G	354.78	508.22	661.66	815.10
H	371.12	524.56	678.00	831.44
I	381.97	535.41	688.85	842.29
U	420.76	574.20	727.64	881.08

站后折返的列车折返间隔 $T_{站后}$ 可以表示为:

$$T_{站后} = t_{2,LM} + t_{2,MN} + t_{2,NO} + t_{ce} + t_{2,OP} + t_r + t_{rea} =$$
$$45.49\text{ s} + 12.60\text{ s} + 13.45\text{ s} + 25.00\text{ s} +$$
$$41.90\text{ s} + 13.00\text{ s} + 2.00\text{ s} = 153.44\text{ s}$$

由此可知,单一的站后折返比单一的站前折返的折返效率高, $T_{\text{站后}}$ 与 t_{ce} 线性相关。例如,因列车换端原因需将 t_{ce} 设置为 40.00 s 时,则 $T_{\text{站后}}$ 为 168.44 s。

4 前后交替折返分析

把前后交替折返看为在两列站前折返列车的接车间隙中插入一个站后折返的接车,在两列站前折返列车的发车间隙中插入一个站后折返的发车。根据该站场的站形特点,当列车运行采用前后交替折返时,站后折返的列车和站前折返的列车在发车时的发车顺序会发生变化。例如:接车顺序为列车 I (后折返)—列车 II (前折返)—列车 III (后折返)—列车 IV (前折返)—列车 V (后折返)—列车 VI (前折返);经过折返后,发车顺序将变为列车 II (前折返)—列车 I (后折返)—列车 IV (前折返)—列车 III (后折返)—列车 VI (前折返)—列车 V (后折返),以此类推。交替折返接发车顺序变化示意图如图 2 所示。

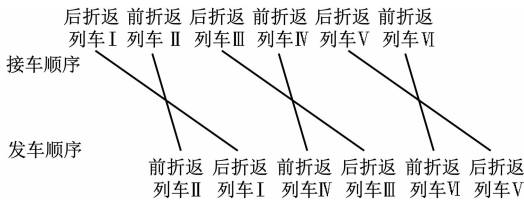


图 2 交替折返接发车顺序变化示意图
Fig. 2 Diagram of train arrival and departure sequence change in alternate turn-back

各列车在不同关键点的交替折返时间如表 5 所示。与站前折返情况类似,前后交替折返的关键限制关系依然是两列站前折返列车之间的联锁关系限制,即当站前折返前车(表 5 中的列车 II)出发出清站前道岔区段、列车后轴离开 G 点后,系统方可为站前折返后车(表 5 中的列车 IV)排列上行进站进路 X6—X10。当信号开放时,后车刚好接近 B 点。此外,另一个限制关系是:站前折返的前车(表 5 中的列车 II)出清站前岔区后,站后折返的后车(表 5 中的列车 III)方可排列进站进路。这将导致这两列列车的接车时间间隔 $T_{\text{前后}}$ 为 110.28 s,而前车为站后折返列车((表 5 中的列车 I),后车为站前折返列车(表 5 中的列车 II)的接车时间间隔 $T_{\text{前后}}$ 为 99.86 s,即接车时的列车时间间隔是不均衡的。

表 5 各列车在不同关键点的交替折返时间
Tab.5 Alternate turn-back time at each key point for each train

关键点	交替折返时间/s			
	列车 I	列车 II	列车 III	列车 IV
A	0	99.86	210.14	310.00
B	42.72	142.58	252.86	352.72
J	61.73		271.87	
C		182.11		392.25
D		239.86		450.00
E		249.87		460.01
F		289.87		500.01
K	102.04		312.18	
L	132.04		342.18	
M	177.53		387.67	
N	190.13		400.27	
O	307.44		517.58	
P	349.34		559.48	
R	352.72		562.86	
Q	355.87		566.01	
S	372.38		582.52	
T	402.38		612.52	
G	433.64	339.72	643.78	549.86
H	449.98	362.94	660.12	573.08
I	460.83	373.79	670.97	583.93
U	499.62	412.58	709.76	622.72

前后交替折返的列车折返时间间隔 $T_{\text{交替}}$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} T_{\text{前后}} &= t_{1,BC} + t_{1,CD} + t_r = \\ &39.53 \text{ s} + 57.75 \text{ s} + 13 \text{ s} = 110.28 \text{ s} \\ T_{\text{前后}} &= T_{\text{站前}} - T_{\text{站后}} = \\ &210.14 \text{ s} - 110.28 \text{ s} = 99.86 \text{ s} \\ T_{\text{交替}} &= (T_{\text{前后}} + T_{\text{站后}}) \times 0.5 = \\ &(110.28 + 99.86) \times 0.5 = 105.07 \text{ s} \end{aligned}$$

式中:

$T_{\text{前后}}$ ——站前折返列车和后续站后折返列车之间的折返时间间隔,单位 s;

$T_{\text{站后}}$ ——站后折返列车和后续站前折返列车之间的折返时间间隔,单位 s。

由此可知, $T_{\text{交替}}$ 实际为 $T_{\text{站前}}$ 的二分之一。由表 4 可知,站后折返列车的运行时间是非常充裕的,这导致站后折返列车需要在折返线上停留较长的时

间,而这些多余的时间也可分配给上下行站台的停站时间,保证其线路折返能力不受影响。

为了便于列车运营调度,对上述前后交替折返分析结果进行调整优化,即人为延长列车在站后折返线的停车时间,将所有列车接车间隔和发车间隔调整为相同时间间隔,但这需要牺牲线路部分的折返能力。优化后各列车在不同关键点的交替折返时间如表 6 所示。

表 6 优化后各列车在不同关键点的交替折返时间

Tab.6 Alternate turn-back time at each key point for each train after optimization

关键点	优化后的交替折返时间/s			
	列车 I	列车 II	列车 III	列车 IV
A	0	110.28	220.56	330.84
B	42.72	153.00	263.28	373.56
J	61.73		282.29	
C		192.53		413.09
D		250.28		470.84
E		260.29		480.85
F		300.29		520.85
K	102.04		322.60	
L	132.04		352.60	
M	177.53		398.09	
N	190.13		410.69	
O	341.10		561.66	
P	383.00		603.56	
R	386.38		606.94	
Q	389.53		610.09	
S	406.04		626.60	
T	436.04		656.60	
G	467.30	350.14	687.86	570.70
H	483.64	373.36	704.20	593.92
I	494.49	384.21	715.05	604.77
U	533.28	423.00	753.84	643.56

对接发车时间间隔进行调整优化后,前后交替折返时间间隔 $T_{优化}$ 取 $T_{前后}$ 和 $T_{后前}$ 中数值较大者。

$$T_{优化} = \max(T_{前后}, T_{后前}) = \max(110.28\text{ s}, 99.86\text{ s}) = 110.28\text{ s}$$

5 结语

由于折返效率低,富锦路站单一站前折返模式并不适合在日常运营中使用;而单一站后折返模式由于其运营组织简单、折返效率尚可,成为了目前 1 号线使用的折返模式。但随着 1 号线列车运行密度的不断增加,启用前后交替折返模式势在必行。富锦路站启用前后交替折返模式后的折返效率高于线路另一端的折返站——莘庄站的折返效率,富锦路站折返效率已不再是 1 号线提升运营效率的瓶颈。

类似富锦路站这种类型的折返站,其前后交替折返的效率取决于站前折返效率,且两者之间存在线性关系。站前折返列车的运行延误将直接导致整个车站的折返延误;而站后折返列车相对来说有充裕的运行时间,较小的站后折返运行延误并不会直接导致整个车站的运行延误,这也为后续进一步提升富锦路站折返效率提供了研究思路和研究方向。

参考文献

[1] 王俊锋,孙旺,郜洪民.城市轨道交通车站站前折返间隔分析[J].城市轨道交通研究,2013,16(4):69.
WANG Junfeng, SUN Wang, GAO Hongmin. Analysis of pre-station turn-back headway in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(4): 69.

[2] 徐意.城市轨道交通折返时间与折返间隔相互关系分析[J].铁道运输与经济,2019,41(2):123.
XU Yi. An analysis of the relationship between turn-back time and turn-back headway for metro system[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(2): 123.

[3] 郑承鑫.城市轨道交通列车折返效率相干因素的分析[J].现代信息科技,2019,3(18):16.
ZHENG Chengxin. Analysis of coherent factors of train return efficiency in urban rail transit[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(18): 16.

(收稿日期:2021-03-29)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821