

## 常导高速磁浮列车折返间隔时间研究

姜 西 邓志翔 陈 光

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

**摘 要** [目的] 列车折返间隔时间作为影响常导高速磁浮线路通过能力的重要因素之一, 由于其列车运行控制原理与传统轨道交通系统存在较大差异, 传统轮轨交通的列车折返间隔研究难以直接应用, 需结合常导高速磁浮运行控制特点开展针对性研究。[方法] 以高速磁浮列车交通系统典型的单渡线折返方式为研究对象, 通过分析其折返作业流程, 建立了一种列车折返间隔时间计算模型, 得到其解析算法。结合列车折返方式、列车编组、列车停站作业时间、牵引供电分区划分等多种影响因素, 参考上海磁浮列车示范运营线的线路情况进行仿真计算分析。[结果及结论] 结果表明, 车站按单分区划分时, 站前折返间隔时间小于站后折返, 车站按双分区或四分区划分时, 则反之; 牵引分区划分对站前折返间隔时间基本无影响, 而对站后折返间隔时间缩短明显, 且四分区下的折返间隔时间一般小于双分区, 但对于上客作业时间明显大于下客作业时间的折返站, 两者折返间隔相近。

**关键词** 高速磁浮列车; 折返间隔时间; 站前折返; 站后折返

中图分类号 U292.91+7; U269.2+1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.043

## Turn-back Interval Time of Normal Conducting High-speed Maglev Trains

JIANG Xi, DENG Zhixiang, CHEN Guang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] Train turn-back interval time is a critical factor influencing the throughput capacity of normal conducting high-speed maglev lines. Due to the significant differences in train operation control principles between maglev and traditional rail transit systems, the findings about train turn-back interval from conventional wheel-rail transportation studies are not directly applicable. It is aimed to conduct targeted research based on the operational control characteristics of normal conducting high-speed maglev systems. [Method] Focusing on the typical single crossover turn-back mode of high-speed maglev train systems, through analyzing the turn-back operation process, a calculation model for train turn-back interval time is established, deriving its analytical algorithm. Various influencing factors, such as train turn-back method, train

formation, station dwell time, and traction power supply zoning, are considered. Simulation calculation analysis is conducted with reference to the operational conditions of Shanghai Maglev Demonstration Line. [Result & Conclusion] The results indicate that when stations are divided into single sections, the turn-back interval time before station is shorter than after station, while it is converse when stations are divided into double or quadruple sections. The division of traction power zoning has little impact on the turn-back interval time before station, but significantly shortens the turn-back interval time after station. Additionally, the turn-back interval time under quadruple sections is generally less than that under double sections. However, for turn-back stations where the boarding operation time significantly exceeds the alighting operation time, the turn-back intervals are similar between the two division cases.

**Key words** high-speed maglev train; turn-back interval time; turn-back before station; turn-back after station

追踪间隔是高速磁浮线路通过能力及列车运行图编制的基础, 对高速磁浮交通系统的建设、运营具有十分重要的意义。文献[1-2]在研究高速磁浮辅助停车区设置过程中均对列车追踪间隔进行一定深度的分析研究; 文献[3]基于列车分区运行、车站作业时间固定, 以发车间隔及列车数均最小为目标构建了一种高速磁浮运行图编辑模型; 文献[4]定性地阐述了磁浮车站布局与运控系统及牵引供电系统间的关系, 给出了利于提高行车效率的车站设计方案。上述研究为高速磁浮线在工程应用中的通过能力计算提供了一定的理论基础。折返间隔时间作为影响高速磁浮线路追踪间隔的重要因素却鲜有相关研究。传统轮轨交通中常用的图解法和解析法在相对确定的工况下同样适用于计算高速磁浮列车折返间隔时间, 但在牵引供电分区划分方式未明确的场景下需进行多次分析与计算, 其设计使用过程相对繁杂。本文根据常导高速磁浮列车运行特点, 对磁浮列车折返间隔时间进行了

研究。

## 1 高速磁浮列车折返站站型及折返能力影响因素分析

### 1.1 折返站基本站型

根据常导高速磁浮列车的抱轨式结构,结合上海磁浮列车示范运营线(简称“上海线”)的配线情况及文献[5-6]对高速磁浮车站布置的研究成果分析,磁浮列车交通系统正线一般按双线设计考虑,站前、站后折返一般利用正线间单渡线进行,典型的站前、站后折返站型如图1所示。

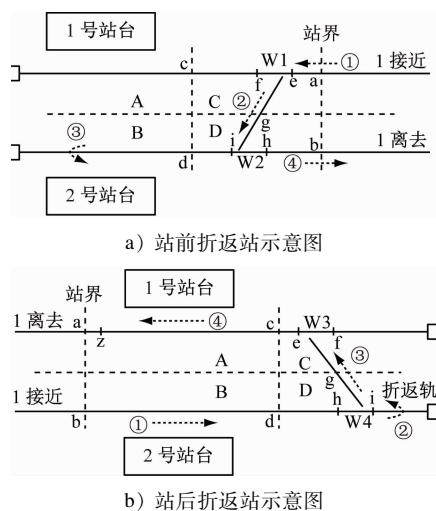


图1 典型的高速磁浮折返站型

Fig. 1 Typical high-speed maglev turn-back station forms

### 1.2 高速磁浮列车折返能力的影响因素

结合上海线及传统轨道交通运营的经验分析,可知影响磁浮列车折返能力的主要影响因素如下。

1) 折返方式:高速磁浮交通系统按折返渡线设置位置可分为站前折返与站后折返。站前折返,前车发车进路与后车接车进路间存在交叉,影响两车间平行作业效率;站后折返,前后车的折返运行行为平行作业,但列车站内走行距离相对大,折返过程相对繁琐。

2) 列车编组及车辆性能:不同编组方式下的列车长度不同,不同车辆的加/减速性能存在差异,均会对列车出清区段及到站停车运行等时间存在影响。

3) 列车车站作业时间:一般情况下,除必要的列车作业时间外,客流量越大的车站列车停站时间越长,以满足客运需求。

4) 牵引供电分区划分:受高速磁浮交通系统在

同一牵引供电分区内只能有1列车运行的条件限制,同一牵引供电分区内无法办理列车平行作业。

5) 车站及道岔限速:其决定了列车过岔及进站停车的速度,影响列车运行时间,从而对列车折返运行存在一定影响。

## 2 列车折返间隔时间计算

### 2.1 折返能力计算原理

一般可用列车折返间隔时间计算折返站折返能力,具体如式(1)所示。

$$\eta_{zf} = 3600/T_{zf} \quad (1)$$

式中:

$\eta_{zf}$ ——1 h内所能通过的最大列车数量,单位列;

$T_{zf}$ ——列车折返间隔时间,单位s。

### 2.2 折返站作业流程分析

如图1a)所示,站前折返作业主要流程为:办理列车接车进路→列车由站界运行至2号站台停车→列车站台办理客运作业(含换端、办理发车进路)→列车发车离站。对于后行列车而言,办理其接车进路的时机为前车发车离站并出清岔区;办理列车发车进路的时机由运控系统安全机制确定,因列车总是以辅助停车区为目标点进行步进<sup>[1-2,7]</sup>,故后行列车办理发车进路的前置条件至少为前行列车出清1离去区间的第一个辅助停车区。

如图1b)所示,站后折返作业主要流程为:办理列车接车进路→列车由站界运行至2号站台停车→列车站台客运作业(同时办理进折返线进路)→列车驶离2号站台运行至折返线停车→折返线停车作业(含换端、办理出折返线进路)→列车驶离折返线至1号站台停车→列车站台客运作业(含办理发车进路)→列车发车离站。对于后行列车而言,办理列车接车进路的时机为前行列车驶离站台并出清站台停车安全点(保护区段);列车办理进折返线进路时机为前行车已出清道岔区段;办理出折返线进路时机为前行车发车驶离站台并出清站台停车安全点;办理列车发车进路的时机与站前折返相似。

### 2.3 计算模型

根据对列车作业流程分析,可将任一列车折返过程视作连续的 $n$ 个阶段。设任一列车 $j$ (为整数)在其折返的任一阶段 $i$ ( $0 < i \leq n$ ,为整数)的必要作业时长(不考虑前车制约条件的最小作业时长)为 $T_{j0}$ ,实际作业时长为 $T_{j,i}$ ,的开始时刻为 $t_{j,i_s}$ , $T_{j,i}$

的终止时刻为  $t_{j,i_e}$ , 则存在式(2)、(3)、(4)中的基本关系。

$$T_{j,i} = t_{j,i_e} - t_{j,i_s} \quad (0 < i < n) \quad (2)$$

$$T_{j,i} \geq T_{j,i0} \quad (0 < i < n) \quad (3)$$

$$t_{j,i_e} = t_{j,(i+1)s} \quad (0 < i < n) \quad (4)$$

分析可知, 后行列车  $j+1$  的运行阶段  $i$  的开始时间  $t_{j+1,i_s}$  受前行列车及牵引分区状态等条件约束, 记约束条件为  $f_{j+1}(i)$ , 在  $f_{j+1}(i)$  及式(3)条件同时满足时才可进入阶段  $i$ 。当  $f_{j+1}(i)$  不满足时, 需在阶段  $i$  之前加入延迟时长的来推迟  $t_{j+1,i_s}$  以满足条件, 此时前后行列车  $j$  与  $j+1$  的折返间隔  $T_{zf}$  为式(5)。

$$T_{zf} = \max(t_{j+1,i_s} - t_{j,i_s}) \quad (0 < i \leq n) \quad (5)$$

记恰好满足  $f_{j+1}(1)$  条件时的  $t_{j+1,i_s}$  为  $t_{j+1,1s}$ , 以  $t_{j+1,1s}$  为折返过程起始时刻, 各阶段按  $T_{j+1,i0}$  执行, 得到的各阶段起始时刻为  $t_{j+1,i_s}$ , 此时若因  $f_{j+1}(i)$  条件不满足而为阶段  $i$  加入的延时时长  $T_{j+1,i_w}$  可用式(6)表示。

$$T_{j+1,i_w} = t_{j+1,i_s} - t_{j+1,i_s'} \quad (6)$$

从折返间隔计算的角度来看, 任一阶段加入等待时长  $T_{j+1,i_w}$  等效于将  $t_{j+1,1s}$  时刻延时  $\max T_{j+1,i_w}$  后, 各阶段仍按  $T_{j+1,i0}$  执行, 此时  $t_{j+1,1s}$  为式(7), 折返间隔时间  $T_{zf}$  为式(8)。

$$t_{j+1,1s} = t_{j+1,1s'} + \max T_{j+1,i_w} \quad (7)$$

$$T_{zf} = t_{j+1,i_s} - t_{j,i_s} \quad (8)$$

### 3 案例分析

以上海线龙阳路站前端单渡线及浦东机场站后单渡线为案例, 对不同牵引供电分区划分方式下的不同列车编组的列车折返间隔时间进行分析。

#### 3.1 基本计算参数

根据文献[4]对高速磁浮站场形式与供电分区划分关系的研究, 将图 1 a)、1 b) 中所示的站前、站后折返站均按照单分区、双分区(AC、BD 两个分区)及四分区(A、B、C、D 四个分区)设置, 列车编组按照 3、5、8 辆编组方式分别进行列车折返间隔时间计算。

列车端车长度取 27.5 m, 中车长度取 24.5 m, 道岔动作时间为 28 s, 岔区限速 98 km/h, 列车牵引加速度及制动减速度平均标准值参照文献[8]。图 1a)、1b) 中所示车站站台长度均为 210 m, g 均位于单渡线中点位置, 图 1 中相关计算参数分别如表 1

和表 2 所示; 折返轨作业时长为 15 s。设无道岔动作的进路办理时间为 5 s(含延时)。

表 1 站前折返站区段参数表

Tab.1 Section parameters of turn-back before station

区段	长度/m	区段	长度/m
站界至 e 点	173	h 点至 i 点	79
e 点至 f 点	79	i 点至 2 号站台(右端)	215
e 点至 i 点	210	i 点至 d 点	155
站界至 h 点	303	d 点至 2 号站台(右端)	60

表 2 站后折返站区段参数表

Tab.2 Section parameters of turn-back after station

区段	长度/m	区段	长度/m
站界至站台(左端)	502	e 点至 f 点	79
2 号站台(右端)至 h 点	274	e 点至 2 号站台(右端)	197
h 点至 i 点	79	z 点至 2 号站台(右端)	60
e 点至 i 点	210	c/d 点至站台(右端)	60

结合折返作业流程分析, 针对车站在不同牵引供电分区划分方式下, 站前折返和站后折返的所有列车可参照表 3 与表 4 中所示的各阶段顺序进行。

表 3 站前折返各运行阶段划分表

Tab.3 Operation stage division for turn-back before station

阶段 $i$	阶段描述	约束条件 $f_{j+1}(i)$		
		单分区	双分区	四分区
1	办理列车接车进路	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,5s}$ $t_{j+1,1s} \geq t_{j,5s}$ $t_{j+1,1s} \geq t_{j,5s}$		
2	列车(车头)由站界运行至 g 点	$t_{j+1,2s} \geq t_{j,6s}$		
3	列车(车头)由 g 点运行至 2 号站台停车并办理客运作业			
4	办理列车发车进路(继续办理客运作业)	约束 I	约束 I	约束 I
5	列车发车并出清 h 点	区间追踪	区间追踪	区间追踪
6	列车出清 b 点	区间追踪	区间追踪	区间追踪

理想情况下, 有  $T_{j+1,i0} = T_{j,i0}$ 。设车站办理客运作业时间(含开关车门等)为下客时长  $T_x$  和上客时长  $T_s$ , 列车停站位置为站台中部位置, 根据以上参数可计算得不同编组列车的站前、站后折返各阶段的必要时间。表 3、表 4 中的约束 I 均为前行列车出

表 4 站后折返各运行阶段划分表

Tab. 4 Operation stage division for turn-back after station

阶段 $i$	阶段描述	约束条件 $f_{j+1}(i)$		
		单分区	双分区	四分区
1	办理列车接车进路	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,4s}$	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,4s}$	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,4s}$
2	列车由站界运行至 2 号站台停车并办理客运作业	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,15s}$	$t_{j+1,1s} \geq t_{j,8s}$	
3	办理列车进折返线进路(继续办理客运作业)		$t_{j+1,3s} \geq t_{j,10s}$	$t_{j+1,3s} \geq t_{j,10s}$
4	列车 2 号站台发车至出清 d 点			
5	列车运行至折返轨停车并办理折返作业			
6	办理出折返线进路(继续办理折返作业)		$t_{j+1,6s} \geq t_{j,14s}$	$t_{j+1,6s} \geq t_{j,14s}$
7	列车折返轨发车至到达 g 点		$t_{j+1,7s} \geq t_{j,15s}$	
8	列车出清 g 点			
9	列车到达 c 点/出清 e 点			$t_{j+1,9s} \geq t_{j,15s}$
10	列车出清 e 点/到达 c 点			
11	列车出清 c 点			
12	列车运行至 1 号站台停车并办理客运作业			
13	办理列车发车进路(继续办理客运作业)	约束 I	约束 I	约束 I
14	列车运行至出清 z 点	区间追踪	区间追踪	区间追踪
15	列车出清 a 点	区间追踪	区间追踪	区间追踪

清 1 离去区间的第一个辅助停车区外的安全点,设列车出清站界至满足约束 I 的时长为  $T_{\Pi}$ 。对于站前折返,约束 I( $f_{j+1}(4)$ )为  $t_{j+1,4s} \geq t_{j,6e} + T_{\Pi}$ ;对于站后折返,约束 I( $f_{j+1}(13)$ )为  $t_{j+1,13s} \geq t_{j,15e} + T_{\Pi}$ 。1 离去的第一个辅助停车区的安全点在至车站中心 4 km 内时的  $T_{\Pi}$  值均小于 63 s。

### 3.2 折返间隔时间计算及结果分析

根据上述模型计算得站前折返方式下,相同编组列车在不同牵引供电分区划分情景下的折返间隔时间相同。在  $T_x$ 、 $T_s$  取值均为 45 s、60 s、90 s 时,

不同编组列车的折返间隔时间如表 5 所示。

表 5 不同编组列车的站前折返间隔时间

Tab. 5 Interval time of turn-back before station for different formation trains

列车编组/辆	$T_{2f}/s$		
	$T_x = T_s = 45$ s 时	$T_x = T_s = 60$ s 时	$T_x = T_s = 90$ s 时
3	197.3	227.3	287.3
5	199.0	229.0	289.0
8	201.1	231.1	291.1

根据计算结果及折返过程分析可知,对于站前折返而言,列车编组数对折返间隔时间影响相对较小;列车折返间隔时间主要受前车发车进路与后车接车进路间交叉区段影响,采用划分牵引供电分区的方式难以优化列车折返间隔时间;可通过优化客运作业时间、提高道岔动作效率或系统反应时间等方式适当降低折返间隔时间,但优化空间较小。

同理,计算得站后折返方式下,在  $T_x$ 、 $T_s$  取值均为 45 s、60 s、90 s 时,不同编组列车在不同牵引供电分区划分情景下的折返间隔时间,如表 6 所示。

表 6 不同编组列车的站后折返间隔时间

Tab. 6 Interval time of turn-back after station for different formation trains

$T_x, T_s$ /s	列车编组/ 辆	$T_{2f}/s$		
		单分区	双分区	四分区
45	3	310.0	187.0	144.7
	5	310.1	191.6	153.2
	8	315.0	197.7	156.1
60	3	340.0	202.0	159.7
	5	340.1	206.6	168.2
	8	345.0	212.7	171.1
90	3	400.0	232.0	189.7
	5	400.1	236.6	198.2
	8	405.0	242.7	201.1

结合计算结果及折返过程的分析可知,对站后折返而言,列车编组数对折返间隔时间影响仍相对较小。单分区方式下列车折返间隔时间主要受后行列车进站时机影响,采用双分区的方式可显著减少列车折返间隔时间。根据表 6 中内容分析,上客作业时间较下客作业时间短或差异不大时,双分区的方式下列车折返间隔时间仍主要受后行列车进站时机影响,采用四分区的方式可进一步减少该时间间隔而缩短折返间隔;上客作业时间较下客作业

时间长出一定值的情况下(如:3 辆编组情况下  $T_s - T_x \geq 42.3$  s 时),双分区与四分区方式下列车折返间隔时间均受办理列车出折返线进路影响,导致两者折返间隔时间相近。

## 4 结论

折返是限制常导高速磁浮线路通过能力的要因素之一,本文建立了一种磁浮列车折返间隔时间的计算模型,借鉴上海线的基本参数进行了案例分析计算,并得出以下结论:列车加/减速性能相同情况下,列车不同编组方式对折返间隔时间影响相对较小;站前、站后单渡线折返方式折返间隔时间差异较大,在牵引供电分区按单分区划分时,站前折返的间隔时间小于站后折返,按双分区或四分区划分时则反之;不同牵引供电分区划分对站前折返间隔时间基本无影响,而对站后折返间隔时间影响十分显著,车站双分区、四分区方式下的站后折返间隔时间明显小于单分区,四分区方式下的折返间隔时间一般情况下更优于双分区方式;但对于上客作业时间明显大于下客作业时间的折返站,列车折返间隔时间相近。相关成果及结论对常导高速磁浮交通系统工程具有一定的参考价值,尤其是对车站设计、运营方案及运行模式的选择方面。

## 参考文献

- [1] 姜西,虞翊,邓志翔,等.考虑追踪运行的高速磁浮辅助停车区设置优化[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):325.  
JIANG Xi, YU Yi, DENG Zhixiang, et al. Setting optimization of auxiliary stopping area for high-speed maglev considering train tracking operation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 325.
- [2] 楚彭子,虞翊,董丹阳,等.考虑复杂场景的常导高速磁浮辅助停车区优化布置[J].同济大学学报:自然科学版,2021,49(8):1144.

- CHU Pengzi, YU Yi, DONG Danyang, et al. Layout optimization of auxiliary stopping areas for normal high-speed maglev considering complex scenarios[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 1144.
- [3] 张其亮,陈永生,杜磊.基于编织算法的复线高速磁浮列车运行图铺画方法[J].计算机应用,2011,31(12):3434.  
ZHANG Qiliang, CHEN Yongsheng, DU Lei. Method for drawing double-rack high-speed maglev train diagram based on knitting algorithm[J]. Computer Application, 2011, 31(12): 3434.
  - [4] 邓志翔.基于运控分区与供电分区划分的高速磁浮项目站场设计[J].城市轨道交通研究,2020,23(11):118.  
DENG Zhixiang. Design of high-speed electromagnetic station and yard based on operation control and power supply zone division[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 118.
  - [5] 晏仁先.高速磁悬浮铁路车站站型研究[J].铁道建筑技术,2021(6):23.  
YAN Renxian. A study of station types of high-speed maglev railways[J]. Railway Construction Technology, 2021(6): 23.
  - [6] 张炳民.高速磁悬浮铁路车站布置图型研究[J].高速铁路技术,2020(增刊2):36.  
ZHANG Bingmin. Study on layout pattern of high-speed maglev railway station[J]. High Speed Railway Technology, 2020 (S2): 36.
  - [7] 虞翊,姜西,林辉,等.基于防护速度的高速磁浮辅助停车区设置[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(9):1310.  
YU Yi, JIANG Xi, LIN Hui, et al. Research on setting method of auxiliary stopping area for high-speed maglev based on protection speed curve[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(9): 1310.
  - [8] 吴祥明.磁浮列车[M].上海:上海科学技术出版社,2003.  
WU Xiangming. Maglev train[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.

· 收稿日期:2022-07-11 修回日期:2022-09-14 出版日期:2024-10-10  
Received:2022-07-11 Revised:2022-09-14 Published:2024-10-10  
· 通信作者:姜西,工程师,jiangxi729@foxmail.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

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

