

基于长大干线的常导高速磁浮列车追踪间隔与 控制系统的匹配性研究^{*}

陈 光 邓志翔 姜 西 刘 涛 徐 楠

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 工程师)

摘 要 上海磁浮列车示范运营线已开通运行多年, 运营情况良好。但由于该线路较短, 针对长大干线的追踪间隔和控制系统的匹配性研究仍较为缺乏。讨论了基于长大干线和常导高速磁浮列车在区间运行、出站运行、进站运行的追踪原理; 结合追踪间隔模型, 对常导高速磁浮追踪间隔和控制系统能力的匹配性进行分析, 在追踪间隔一定的条件下, 明确控制系统的管辖范围, 为后续长大干线工程研究提供一定的参考。

关键词 高速磁浮长大干线; 列车追踪间隔; 控制系统

中图分类号 U292.91⁺7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.019

Research on Compatibility Between Tracking Interval and Control System of Normal Conducting Maglev Train Based on Long Trunk Line

CHEN Guang, DENG Zhixiang, JIANG Xi, LIU Tao, XU Nan

Abstract Shanghai high-speed Maglev Demonstration Line has been put into operation for many years and operated well. However, due to the short route of demonstration line, there is still a lack of research on the matching of tracking interval and control system for long trunk lines. The tracking principle of long trunk line and normal conducting high-speed maglev train in interval operation, outbound operation and inbound operation is discussed. Combined with the tracking interval model, the matching between the normal guide high-speed maglev tracking interval and control system capability is analyzed. The jurisdiction of the control system under the condition of a certain tracking interval is clarified, providing reference for the follow-up study of long trunk line projects.

Key words high-speed maglev long trunk line; train tracking interval; control system

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

常导高速磁浮系统与轮轨交通系统有着较大的区别, 常导高速磁浮系统之间的耦合程度较高, 同时由于磁浮系统悬浮、牵引原理的独特性, 常导高速磁浮的运输能力和追踪间隔与控制系统(含运控系统和供电系统)的关系更为紧密。在长大干线的常导高速磁浮线路中, 追踪间隔、运输能力和经济性是评价磁浮系统的重要因素。本文结合常导高速磁浮系统原理、追踪模型以及计算方法, 提出长大干线常导高速磁浮系统追踪间隔与控制系统之间的匹配性关系。

1 磁浮系统追踪原理

已有多位学者对常导高速磁浮系统的制式原理、运营流程及运营场景进行了研究。文献[1]研究了常导高速磁浮的运营场景, 详细描述了由于系统特性带来的运营差别。文献[2]讨论了常导高速磁浮辅助停车区及速度防护等相关内容。文献[3-4]阐述了常导高速磁浮系统的主要原理。

高速磁浮列车运行采用“目标-距离”追踪模式的准移动闭塞制式, 磁浮列车的移动授权需满足如下两个基本条件:

- 1) 每个牵引供电分区(以下简称“供电分区”)内, 只能有一列磁浮列车运行;
- 2) 列车采用步进方式前行, 每次前进的移动授权终点均为下一个辅助停车区/车站^[5]。

列车追踪示意图如图 1 所示。因受牵引供电系统功率模块配置原则的限制, 同一供电分区内只能有一列列车获得牵引供电条件, 所以前后列车至少要间隔一个供电分区, 如果列车 1 没有出清供电分区 M, 列车 2 的移动授权步进点就不能进入供电分

^{*} 中国铁建股份有限公司科技重大专项计划项目(2019-A06)

区 M。只有当列车 1 离开供电分区 M 后,列车 2 的移动授权步进点才能进入供电分区 M。

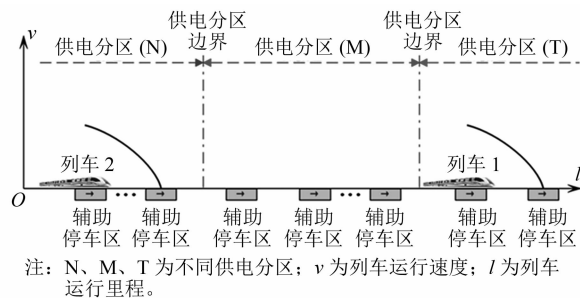


图 1 列车追踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train tracking

当列车在区间进行紧追踪时,即列车 1 车尾恰好进入供电分区 T,列车 2 的移动授权正好可以从供电分区 N 中末尾辅助停车区步进到供电分区 M 中第一个辅助停车区。此时,列车 1 和列车 2 之间的间距,即是满足列车在不降速条件下的最小追踪间隔,如图 2 所示。为了提高运行效率,减少供电分区与信号控车之间的耦合性,供电分区边界应设置于两个相邻辅助停车区之间的区间,因此当前分区末端辅助停车区至下一供电分区边界距离 l_b 小于等于辅助停车区的间距(如果区间全线都设置动力轨,则相当于 $l_b = 0$)。

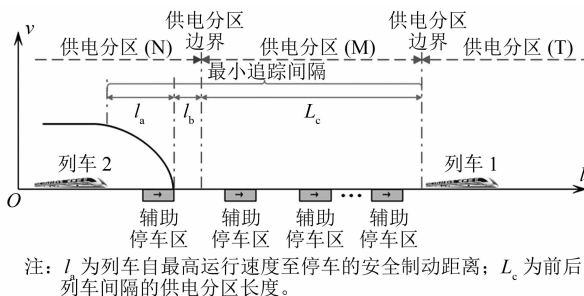


图 2 列车追踪间隔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of train tracking interval

2 磁浮系统追踪间隔计算研究

长大干线常导高速磁浮系统追踪间隔计算研究可分为区间追踪间隔、车站到达间隔和车站出发间隔计算研究。

2.1 区间追踪间隔计算分析

前后列车间隔包括一个供电分区长度、列车安全制动距离、当前分区末端辅助停车区至下一供电分区边界最近距离、列车总长及空走距离等。

列车区间追踪间隔 $t_{\text{追}}$ 为:

$$t_{\text{追}} = \frac{l_a + L_{\text{列}} + l_{\text{空}} + L_c + l_b}{v} \quad (1)$$

式中:

$L_{\text{列}}$ ——列车总长;

l_a ——安全制动距离;

L_c ——供电分区长度;

v ——列车速度;

$l_{\text{空}}$ ——系统反应空走距离。

根据目前掌握的列车技术参数,列车自最高运行速度 600 km/h 开始制动停车,采用三步法供电的 l_a 为 13.9 km,采用两步法供电的 l_a 为 15.4 km;追踪间隔以实现最小 5 min 为目标,用以反算供电分区的长度,当不同供电模式导致列车制动距离不同时,相应的供电分区长度也不同,需要具体项目具体分析。 $L_{\text{列}}$ 考虑理论上最大编组为 10 辆,最长为 255 m。系统反应空走距离 $l_{\text{空}}$ 按系统时间 5 s 计算,列车以 600 km/h 运行时空走距离约为 834 m。当已知供电分区长度 L_c 时,可测算列车追踪间隔时间。反之,可以由一定的追踪间隔时间目标,反推获得需要设置的供电分区长度。

考虑到实际设计时,辅助停车区与供电分区可综合考虑,为尽量缩短区间追踪间隔, l_b 的长度可尽量缩短,此处暂按一个列车长为 255 m 考虑。最不利情况是下一供电分区的边界恰好位于下一个辅助停车区的入口端,此时 l_b 最大,等于相邻两个辅助停车区的间隔距离。实际计算列车追踪间隔时, l_b 的取值依据设计的辅助停车区间距、供电分区分布等确定。

综上所述,列车区间追踪间隔主要受供电分区长度和制动距离的控制,在列车技术参数和制动距离一定的情况下,供电分区长度越短,区间追踪间隔越小,高速磁浮线路的通过能力越大。

2.2 车站到达间隔计算分析

为满足列车办理能力需求,车站正线及所有到发线应划分为不同供电分区,当前行列车尾部越过车站咽喉区所在供电分区后,后行列车即可打靶至下一供电分区的第一个辅助停车区;前行列车择一到发线停车,后行列车前方有多个供电分区空闲,可直接进站停车^[6-7]。与区间追踪间隔计算公式相比,列车在车站的到达间隔时间多出自尾部通过车站咽喉区供电分区至站中心停车的走行时间。

车站列车到达间隔 $t_{\text{到}}$ 为:

$$t_{\text{到}} = \frac{l_a + L_{\text{列}} + l_{\text{空}} + L_{\text{接近分区}} + l_b}{v} + t_{\text{走行}} + t_{\text{进路}} \quad (2)$$

式中:

$L_{\text{接近分区}}$ ——与车站到达咽喉供电分区相邻的接近供电分区长度;

$L_{\text{走行}}$ ——列车自尾部通过车站咽喉区供电分区至站中心停车的走行长度;

$t_{\text{走行}}$ ——列车自尾部通过车站咽喉区供电分区至站中心停车的走行时间;

$t_{\text{进路}}$ ——办理进路时间,按 5 s 计算。

列车到达间隔示意图如图 3 所示。

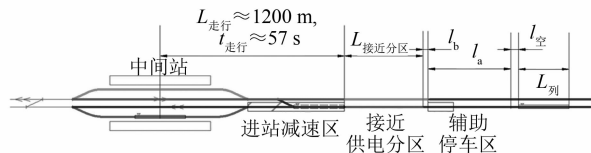


图 3 列车到达间隔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of train arrival interval

为尽量缩短车站到达间隔时间,接近供电分区长度 $L_{\text{接近分区}}$ 可在辅助停车区与供电分区布置时进行综合考虑,在此暂按 15 m 安全距离考虑。同区间追踪间隔计算分析一样,最不利情况是下一供电分区的边界恰好位于下一个辅助停车区的入口端^[8],此时 l_b 最大,等于相邻两个辅助停车区的间隔距离。实际计算列车追踪间隔时, l_b 的取值依据设计的辅助停车区间距、供电分区分布等确定。

参照高速磁浮车站布置研究成果, $L_{\text{走行}}$ 按 1.2 km 计算,侧向道岔限速按 98 km/h 计算时,该区间走行时间 $t_{\text{走行}}$ 约为 57 s。

2.3 车站出发间隔计算分析

列车自车站中心出发,第一个打靶点按车站出发端带动力轨的加速区远端考虑,该打靶点距下一辅助停车区近点距离需小于列车自 100 km/h 惰行至停车的走行距离减半个列车长。辅助停车区按设置平坡,长度为列车长加 180 m,总长 435 m 考虑。辅助停车区与列车 1 离去供电分区的间距 l_b 可尽量缩短,暂按 15 m 安全距离考虑;实际具体设计值不同时可依公式单独计算。高速磁浮列车在出站端带动力轨的加速度区需将速度提升至 100 km/h, $L_{\text{加速}}$ 为该加速区间长度, $t_{\text{加速}}$ 为该加速区间的走行时间。

列车车站出发间隔 $t_{\text{发}}$ 为:

$$t_{\text{发}} = \frac{0.5L_{\text{列}} + L_{\text{1离去分区}} + l_b + 435 + L_{\text{惰行}}}{v_{\text{发}}} + t_{\text{加速}} \quad (3)$$

式中:

$L_{\text{1离去分区}}$ ——车站出发端咽喉供电分区外方相邻的列车 1 离去供电分区长度,m;

$L_{\text{惰行}}$ ——列车自 100 km/h 惰行至停车的走行距离减半个列车长的长度,m;

$v_{\text{发}}$ ——列车出发运行速度,km/h。

列车出发间隔示意图如图 4 所示。

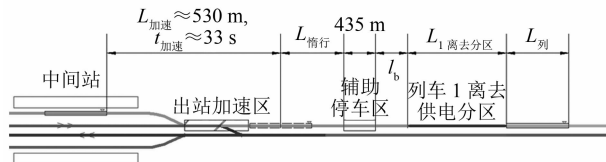


图 4 列车出发间隔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of train departure interval

列车自车站发车至速度提升至 100 km/h 的加速度按 1.0 m/s^2 考虑,列车加速距离约 400 m,考虑半个列车长 130 m,则加速区间长度 $L_{\text{加速}}$ 约为 530 m,走行时间 $t_{\text{发}}$ 约为 33 s。停站办理旅客乘降的列车,其出发进路办理时间可与列车停站时间统筹,因此,列车出发间隔暂不考虑出发进路办理时间。

l_b 为车站出发端第 1 个辅助停车区与列车 1 离去供电分区的间距,为尽量缩短车站发车间隔, l_b 的长度应尽量缩短,在此暂按 15 m 考虑。实际具体设计值不同时可依公式单独计算。

列车自 100 km/h 惰行至停车的走行距离减半个列车长,应保证列车在出站打靶点以 100 km/h 的速度非正常停车时可停在第 1 个辅助停车区。该距离内列车在无制动力情况下运行,仅靠基本阻力列车自然降速至停车。根据目前掌握的高速磁浮列车阻力计算公式及主要技术参数,计算得到高速磁浮列车惰行距离为 4 110 m。故本次研究 $L_{\text{惰行}}$ 取值 4 110 m。正常运行情况下,列车加速通过该区段。

3 追踪间隔与控制分区匹配分析

3.1 区间控制分区长度

以实现 5 min 追踪间隔为目标,列车区间运行根据区间追踪间隔计算公式,反算出当高速磁浮系统的运营速度目标设定为 600 km/h 时,线路区间控制分区长度不宜大于 34.8 km。控制分区实际布设长度受列车实际运行速度、 l_b 及线路平纵断面条件

影响。

3.2 车站到达端接近控制分区长度

根据列车到达间隔计算方法,以实现到达间隔5 min为目标,扣除57 s的咽喉至站中心走行时间,反算车站到达端与咽喉供电分区相邻的接近控制分区长度不宜大于25.5 km。车站到达端接近控制分区长度受列车实际运行速度及列车接近制动距离的影响。

3.3 车站出发端列车1离去控制分区长度

根据列车出发间隔计算方法,以实现出发间隔5 min为目标,扣除33 s的出发时间,反算列车1离去供电分区长度。列车自100 km/h提速至600 km/h的运行时间为199 s,提速距离为13.8 km;出发间隔时间剩余的68 s内,列车将以600 km/h的速度运行11.3 km。因此列车1离去控制分区的长度不应大于19.9 km。车站出发端列车1离去控制分区长度受列车加速过程影响。

4 结语

常导高速磁浮线控制系统的独特性决定了一个控制分区只允许一列车运行,其控制分区间管辖长度与追踪间隔密切相关,同时也影响着工程造价。针对长大干线磁浮线路,此部分工作需在工程可行性阶段或初步设计阶段开展总体性研究设计,对列车追踪间隔能力与控制分区控制能力进行精确匹配,以达到最优设计水平。本文通过基于长大干线的常导高速磁浮追踪间隔与控制系统的匹配关系和模型,提出追踪间隔计算方法和控制分区长度匹配分析,为后续相关研究和系统工程提供一定的参考。

参考文献

- [1] 陈光,楚彭子,朱忠英,等. 常导高速磁浮交通运营场景文本研究[J]. 城市轨道交通研究,2021(9):55.

(上接第95页)

- HE Shan, RUAN Dawei, SHI Lei. Urban traffic engineering risk grading control and hidden danger investigation and management double prevention mechanism implementation guide [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2019: 1.
- [15] 解东升,钱七虎,戎晓力. 地铁工程建设安全风险管理研究[J]. 土木工程与管理学报,2012(1):61.
- XIE Dongsheng, QIAN Qihu, RONG Xiaoli. Risk management in rail transit construction[J]. Journal of Civil Engineering and

CHEN Guang, CHU Pengzi, ZHU Zhongying, et al. Contextual study on operation scenarios of normal conducting high-speed maglev[J]. Urban Mass Transit, 2021(9):55.

- [2] 姜西,虞翔,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(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(2):325.
- [3] 陈光. 常导高速磁浮铁路运营场景分析探讨[J]. 机车电传动,2020(6):56.
- CHEN Guang. Analysis and discussion on operation scene of high-speed EMS maglev railway [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(6):56.
- [4] 刘涛,陈光,楚彭子,等. 高速磁浮交通与城市轨道交通运营场景差异性分析[J]. 城市轨道交通研究,2021(10):119.
- LIU Tao, CHEN Guang, CHU Pengzi, et al. Analysis on differences between high-speed maglev and urban rail transit operating scenarios[J]. Urban Mass Transit, 2021(10):119.
- [5] 屈胤达. 高速磁浮列控系统运行场景构建与形式化验证[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- QU Yinda. The design and verification of high-speed maglev train control system's operation scenarios[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [6] 吴建伟. 高速磁浮车载设备测试方法研究与实践[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- WU Jianwei. Research and practice on test method for high speed maglev on-board equipment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [7] 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.
- [8] 吴卫平,胡剑,高原. 高速磁浮运行控制系统与城轨信号系统CBTC的对比分析[J]. 控制与信息技术,2018(3):56.
- WU Weiping, HU Jian, GAO Yuan. Comparative analysis of the operation control system for high-speed maglev and the CBTC signal system for metro [J]. Control and Information Technology, 2018(3):56.

(收稿日期:2022-01-20)

Management, 2012(1):61.

- [16] 李解. 城市轨道交通施工安全风险知识支持机制及方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- LI Jie. Research on the mechanism and method of knowledge support for construction safety risk management of urban rail transit [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

(收稿日期:2020-07-02)