



常导高速磁浮列车追踪间隔研究

姜 西

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 常导高速磁浮是当前国内最成熟的磁浮技术, 适用于中长距离、大运量快速客运, 列车追踪间隔是编制和调整运营计划的基础, 在保证列车运行安全前提下缩短列车追踪间隔是提高运营效率的关键。为缩短列车追踪间隔, 文章研究了高速磁浮列车运行安全防护原理, 分析了现行准移动闭塞追踪运行方式的局限性, 建立了基于列车安全距离和间隔分区运行要求的追踪运行间隔模型, 结合磁浮列车停车点步进控制的特点提出了一种用于列车追踪运行间距求解的离散表达式, 并综合考虑正常和异常情况下的追踪运行场景建立了满足列车追踪运行间距的计算模型, 得到了高速磁浮列车追踪间隔计算方法。在一定的追踪运行场景下的仿真计算结果表明, 该方法对高速磁浮列车追踪间隔时间的优化效果十分明显, 相较于现行的列车追踪间隔控制方法, 在相同的工况下更有利于开展运营组织。

关键词: 高速磁浮; 追踪间隔; 停车点步进; 运行控制; 仿真

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0175-07

0 引言

常导高速磁浮列车的追踪间隔是指同一线路上同向运行的两列相邻列车, 在后车不受前车状态影响的情况下, 先后通过同一位置的间隔时间^[1-4]。该间隔时间通常为两列车通过全线最受限制位置时的间隔时间, 取决于前后列车的追踪距离和速度, 是衡量系统运营效率的重要指标, 也是制定运行图和运营计划的基础, 直接影响列车运行的安全性和效率^[5-6]。

与传统轨道交通不同, 高速磁浮列车的牵引完全由地面设备控制, 包括常规的加速、减速、巡航和惰行过程, 而紧急制动则由车载设备完成^[7-8]。此外, 磁浮列车的测速定位主要依赖车载设备, 车载设备通过无线通信周期性报告自身位置、速度信息^[9], 地面设备结合这些信息以及线路条件等参数控制列车按照推荐速度曲线运行。目前, 常导高速磁浮车地通信主要采用38 GHz无线通信技术^[10], 该技术已在上海高速磁浮商业示范运营线上应用近20年, 技术相对成熟。同时, 学者们也在研究LTE、5G、交叉感应环线等通信技术

在高速磁浮系统中的应用^[11-12]。本文的磁浮列车追踪间隔控制策略研究是在地面设备能够实时获取列车位置和速度信息的前提下开展的。

1 安全运行原理分析

常导高速磁浮列车的运行原理与传统轮轨列车不同。为确保特殊情况下能够实施救援疏散, 列车的运行速度不仅不能超过最大允许速度曲线要求, 还必须高于安全悬浮速度, 以保证列车能够依靠自身惯性运行至辅助停车区或车站进行救援。为此, 高速磁浮列车运行控制系统采用“双速度曲线”防护机制, 将列车实际运行速度限制在安全制动速度曲线和安全悬浮速度曲线之间, 从而保障列车的安全运行^[13]。

磁浮列车运行控制系统通过停车点步进的方式实现列车运行控制^[2,10,13]。每次步进的移动授权目标为下一个辅助停车区或车站停车区域, 步进的前提条件如下^[14]:

①列车当前速度高于下一停车点的最低速度防护触发曲线, 且低于当前停车点的最高速度防护触发

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB4302504)

通信作者: 姜 西, 男, 硕士, 主要从事轨道交通信号、磁浮运控系统方面的研究; E-mail: jiangxi729@foxmail.com

引用格式: 姜西. 常导高速磁浮列车追踪间隔研究[J]. 机车电传动, 2025(1): 175-181.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.110.

Citation: JIANG Xi. Study on tracking interval of normal-conducting high-speed maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 175-181.

DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.110.

曲线;

②能够计算出到下一停车点的安全制动顶篷速度曲线;

③安全制动顶篷速度曲线与安全悬浮速度曲线无冲突;

④列车至下一停车点之间的轨道进路连续且已预定。

为便于叙述,文中假定列车运行方向为从小里程端指向大里程端。列车步进运行示意图如图1所示。

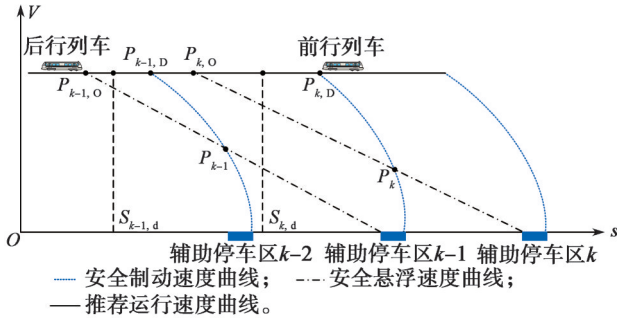


图1 列车步进运行示意

Fig. 1 Schematic of train operation under stepping control

由图1可知,基于辅助停车区 k 作列车安全悬浮速度曲线,基于辅助停车区 $k-1$ 作列车安全制动速度曲线,分别得到两条曲线与列车推荐运行速度曲线的位置速度交点 $P_{k,O}(S_{k,O}, V_{k,O})$ 和 $P_{k,D}(S_{k,D}, V_{k,D})$,以及两条曲线之间的交点 P_k 。定义列车 j 当前的位置速度点(列车中心)为 $P_j(s_j, v_j)$,则在上述条件①、条件②和条件③约束下,基于推荐速度曲线运行的列车步进条件可表示为

$$S_{k,O} \leq s_j \leq S_{k,D} \quad (1)$$

列车移动授权的终点始终为下一停车区。 $[S_{k,O}, S_{k,D}]$ 为列车可从停车区 $k-1$ 步进至停车区 k 的位置范围,在条件(4)约束下,后行列车的步进条件可表示为

$$s_{j+1} \geq S_{k,D} \quad (2)$$

前行列车正常行驶并越过由停车区 $k-1$ 至 k 步进的临界点 $S_{k,D}$ 时,至停车区 $k-1$ 的轨道可被预定,后行列车具备向 $k-1$ 步进的条件。此时,为确保后行列车的步进控制可靠进行,需满足约束

$$s_j \leq S_{k-1,D} - \Delta s \quad (3)$$

式中: Δs 为列车步进最小时长 Δt 时间内的列车位移。

为便于叙述,令 $S_{k-1,d} = S_{k-1,D} - \Delta s$,式(3)等效为

$$s_j \leq S_{k-1,d} \quad (4)$$

2 问题描述

列车追踪间隔时间是位移与速度的比值。当前车位置固定时,两车间距越小,追踪间隔时间越短。因此,通过求解列车运行间距即可间接得到列车追踪间隔。

受高速磁浮列车牵引系统能力限制,任一牵引分区内仅允许一列车运行^[10]。现行的高速磁浮列车追踪间隔控制方法与轮轨交通中的准移动闭塞方式类似^[2,15],准移动闭塞方式下的列车追踪间隔示意图2所示。

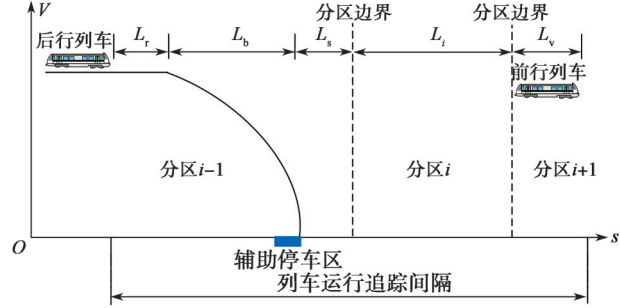


图2 准移动闭塞方式下的列车追踪间隔示意

Fig. 2 Schematic of train tracking interval under quasi-moving block mode

该方法不考虑前行列车的运行状态。在前行列车完全出清当前牵引分区之前,后行列车的移动授权不允许进入该分区。后行列车最多只能以前行列车的牵引分区的边界作为追踪运行的目标点。列车的追踪运行间距 Δs 通常表示为

$$\Delta s \geq L_r + L_b + L_s + L_v + L_i \quad (5)$$

式中: L_r 为系统制动反应时间内列车走行距离; L_b 为追踪列车最小有效制动距离; L_s 为保护区段长度; L_v 为列车长度; L_i 为分区 i 长度。

分析可知,轮轨交通系统受条件限制,通常无法确定前行列车在分区内的具体位置,因此在式(5)右侧增加了分区长度 L_i 以包容前车位置的不确定性,从而确保行车安全。然而,对于高速磁浮交通系统,其运行控制系统的特点决定了列车的位置和速度信息可实时监控,即列车位置已知。因此,两车安全距离只需满足式(6)的约束,即可避免前后列车碰撞的风险。

$$\Delta s \geq L_r + L_b + L_s + L_v \quad (6)$$

式(6)描述的两车间距未考虑前行列车的速度。基于磁浮交通运行控制系统的特点,后行列车追踪运行过程中的部分制动距离虽被前车占用,但由于前行列车的速度信息已知,随着前行列车的运行,占用部分可在后行列车到达前逐渐出清。因此,列车间隔可进一步表示为

$$\Delta s \geq L_r + L_b + L_s + L_v + L_i - L_f \quad (7)$$

式中: L_f 为前行列车制动走行距离。

前后运行的两列磁浮列车受牵引系统能力限制必须间隔分区运行。设分区 i 的里程范围 S_i 为 $[S_{i,O}, S_{i,D}]$,且有 $S_{i,D} = S_{i+1,O}$,则前后两列磁浮列车的位置关系需满足的约束为

$$s_j - L_v/2 \leq S_{i,O} \quad (8)$$

可行的列车追踪间隔如图3所示。对于追踪运行的

磁浮列车,同时满足式(7)安全距离约束和式(8)间隔分区运行要求的两车距离为可行的追踪运行间距,其中最小追踪运行间距即为求解目标。显然,式(5)是追踪运行安全距离和间隔分区运行两项要求的叠加约束,通过式(5)可得到可行的列车追踪运行间距,但并非最小值。若能求得最小追踪运行间距,结合列车运行速度曲线,并根据位移时间公式即可得到前行列车在任意位置时两车的追踪时间间隔,进而得到最小列车追踪间隔。由于列车追踪运行是一个连续过程,直接用式(7)和式(8)求解最小追踪间隔较为复杂。

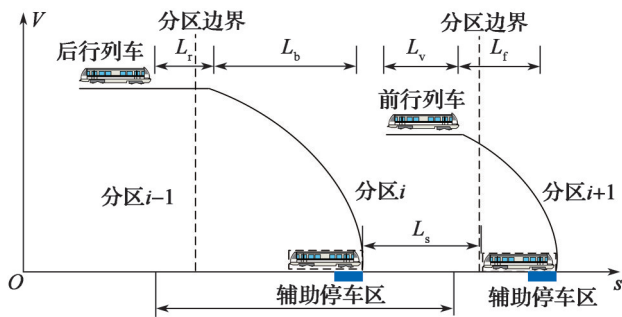


图3 可行的列车追踪间隔示意

Fig. 3 Schematic of feasible train tracking interval

3 追踪间隔计算研究

3.1 基于安全距离的追踪运行间距模型

结合磁浮列车采用停车点步进控制运行的方式,式(7)约束的列车安全间隔可间接通过关于 ΔS_k 的离散关系式表示,具体为

$$\Delta S_k \geq S_{k,D} - S_{k-1,d} + L_s + L_v |s_{j+1}| = S_{k,D} \quad (9)$$

式中: ΔS_k 为前行列车由停车区 $k-1$ 步进至 k 瞬间的两车间距。

简要分析如下:设辅助停车区 k 的里程范围为 $[S_{k,S}, S_{k,E}]$,在正常追踪运行场景下,前行列车越过 $S_{k,D}$ 位置后,将以辅助停车区 k 为目标点运行,此时后行列车最多以停车区 $k-1$ 为目标点运行,后行列车步进需满足式(4)约束,考虑列车长度及两车间必要的安全防护间距,两车追踪间距需满足式(9)要求。若出现异常,按照最不利情况考虑,前行列车越过 $S_{k,D}$ 位置后开始制动,其速度曲线将贴近由 $P_{k,D}$ 、 P_k 、 $(S_{k,S}-L_v/2, 0)$ 组成的曲线运行。运控系统最多允许后行列车从当前位置速度点运行至 $P_{k,D}$ 点后实施制动,经过时间 t_k ,后行列车的速度曲线也只能贴近由 $P_{k,D}$ 、 P_k 、 $(S_{k-1,E}-L_v/2, 0)$ 组成的曲线运行。即使 t_k 值很小,两车速度曲线在 $P_{k,D}$ 、 P_k 段近似重叠,由于增加了 L_s 、 L_v 间距,仍能确保两车之间的安全距离。当后行列车运行于速度曲线 P_k 、 $(S_{k-1,E}-L_v/2, 0)$ 段时,因前行列车的速度高于后行列车,可以满足安全距离的要求。在系统控制

下,如果前行列车发生异常,系统会对后行列车实施制动,且制动时机通常早于列车到达 $P_{k,D}$ 点的时间。因此,式(9)约束下的列车间距能满足追踪运行场景下的安全间距防护要求。

上述分析是基于两车制动性能相同开展的。在实际运行中,列车牵引制动性能可能存在偏差,因此需进一步验证两列车在最不利情况下是否存在碰撞风险。假设前行列车越过 $S_{k,D}$ 位置后开始制动,需要基于各自的牵引制动性能分别绘制前行列车运行至 k 的速度曲线和后行列车运行至 $k-1$ 的速度曲线,检验在 $[S_{k,D}, S_{k-1,E}]$ 位置范围内两列车运行是否存在冲突。

3.2 基于间隔分区运行的追踪运行间距模型

通过对列车追踪运行过程的分析可知,在式(8)约束下,列车运行间距 ΔS_i 可用式(10)这一离散关系式表示,即前行列车出清分区 i 后,后行列车才被允许进入该分区。

$$\Delta S_i \geq S_{i,D} - S_{i,O} + L_v |s_{j+1}| - L_v/2 = S_{i,D} \quad (10)$$

在正常追踪运行时,式(10)约束下的列车间距可根据列车运行速度曲线确定,而异常情况下列车追踪间距的求解才是问题的关键。

如图4所示,前行列车在分区 i 内的运行分为两种连续工况。设 i_1 、 i_E 分别为分区 i 中第1个和最后一个停车区编号,且有 $(i+1)_1 = i_E + 1$ 。工况1是前车以分区 i 内的停车区为目标停车区,在 $[S_{i,O}, S_{(i+1)_1,D}]$ 位置范围内的运行过程。考虑到列车运行中出现异常的随机性,前车可能在该分区内制动停车,此时后车的移动授权不允许其进入该分区。即使前行列车出现异常,系统也可控制后行列车在分区 $i-1$ 制动,从而满足间隔分区运行要求。根据式(2)和式(4),两车间距需满足离散关系式(11),即当前行列车未完成向分区 $i+1$ 的步进时,后行列车不允许向分区 i 步进。

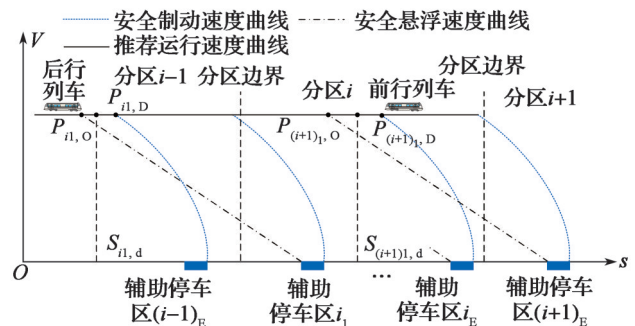


图4 间隔分区运行的列车追踪间隔示意

Fig. 4 Schematic of train tracking interval for spaced operation in blocking sections

$$\Delta S_i \geq S_{(i+1)_1,D} - S_{i_1,d} + L_v |s_{j+1}| = S_{(i+1)_1,D} \quad (11)$$

在工况1结束瞬间进入工况2,此时前车以分区 $i+1$ 中的停车区为目标停车区。若能确保前车在出清分区 i 时后车不进入该分区,则允许后车的移动授权进入

分区 i , 即对应前行列车在 $[S_{(i+1),D}, S_{i,D}]$ 范围内的运行过程。根据式(11), 当前行列车越过 $S_{(i+1),D}$ 位置时, 后车的头部最多可运行至 $S_{i,d}$ 位置。考虑到异常情况的随机性, 假设前行列车在 $S_{(i+1),D}$ 位置经过 t_y 时间后发生异常并开始制动, 在最不利条件下, 前行列车以最大制动率减速至贴近安全悬浮速度曲线, 然后依靠惯性运行, 经过 t_{j+1} 时间后出清分区 i , 制动前列车走行距离为 ΔS_{j+1} 。考虑到控制延时 t_r (系统参数), 经过 $t_r + t_y$ 时间后, 系统根据前行列车的运行状态对后行列车进行调整, 后行列车按照最大制动率减速至贴近安全悬浮速度曲线, 然后依靠惯性运行, 经过 t_j 时间后恰好到达分区 i , 调整运行状态前的后行列车走行距离为 ΔS_j 。记前行列车从位置 $S_{(i+1),D}$ 至 $S_{i,D}$ 的正常运行时长为 t_m , 采用如下方法可得到满足要求的列车间距:

①取 t_y 的计算步长为 Δt_y , 令 $t_y = 0$, 前行列车与后行列车间距调整参数 $\Delta S_i = 0$, 设前行列车的初始位置为 $S'_{j+1} = S_{(i+1),D} + L_v/2$, 后行列车的初始位置为 $S'_j = S_{i,d} - L_v/2$, 然后执行②。

②若式(12)成立, 则系统可以停止后行列车的步进, 后行列车不会进入分区 i , 两车间距满足式(10)的约束条件, 此时执行⑤; 否则, 执行③。

$$\Delta t > t_r + t_y \quad (12)$$

③采用式(13)~式(16)分别计算 ΔS_{j+1} 、 ΔS_j 、 t_{j+1} 和 t_j 。若式(17)成立, 则两车间距满足式(10)约束条件, 此时执行⑤; 否则, 执行④。

$$\Delta S_{j+1} = \bar{v}_{j+1} \times t_y \quad (13)$$

$$\Delta S_j = \bar{v}_{j+1} \times (t_r + t_y) \quad (14)$$

$$t_{j+1} = (S_{i,D} - S_{j+1} - \Delta S_{j+1}) / \bar{v}_{j+1,b} \quad (15)$$

$$t_j = (S_{i,D} - S_j - \Delta S_j) / \bar{v}_{j,b} \quad (16)$$

$$t_{j+1} \leq t_j + t_y \quad (17)$$

式中: $\bar{v}_j$ 和 $\bar{v}_{j,b}$ 分别为列车 j 正常运行和制动运行时的平均速度, 可结合列车位置、线路及列车参数确定。

④由式(18)可知, 后行列车的初始位置至少需向远离前行列车方向平移 ΔS_m 的距离, 若式(19)成立, 则令 $\Delta S_i = \Delta S_m$, 然后执行⑤; 否则, 直接执行⑤。

$$\Delta S_m = \bar{v}_j \times (t_{j+1} - t_j - t_y) \quad (18)$$

$$\Delta S_i \leq \Delta S_m \quad (19)$$

⑤若式(20)成立, 则令 $S'_j = S_{i,d} - L_v/2 - \Delta S_m$, 并采用式(21)计算得到两车间距 ΔS_i ; 否则, 令 $t_y = t_y + \Delta t_y$, 执行②。

$$t_m \leq t_y \quad (20)$$

$$\Delta S_i \geq S'_{j+1} - S'_j + \Delta S_i \quad (21)$$

3.3 列车追踪间隔计算

沿列车运行方向, 将顺序分布的列车停车区依次编号为 0、1、2、 $\dots$ 、 m , 其中停车区 0 和 m 分别表示

起点车站和终点车站的停车区域; 同时, 将顺序分布的分区依次编号为 0、1、2、 $\dots$ 、 n , 其中分区 0 和 n 分别表示起点车站和终点车站停车区域所在的分区。

结合 3.1 节的分析可知, 当前行列车向任意停车区 $k(k > 1)$ 步进完成时, 后行列车可向 $k-1$ 步进, 此时两车间距均应满足式(9)约束要求, 基于位移时间公式得出的列车追踪间隔时间 ΔT_k 如式(22)所示。由于式(22)中的 $\bar{v}_j$ 已知, 根据式(9)取 ΔS_k 的最小值即可求得 ΔT_k 。

$$\Delta T_k = \min(\Delta S_k / \bar{v}_j) \quad 1 < k \leq m \quad (22)$$

满足沿线所有停车区追踪安全距离要求的列车追踪间隔时间 T_s 可表示为

$$T_s = \max(\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_m) \quad (23)$$

同理, 根据式(10)、式(11)、式(21)及位移时间公式, 可得到前行列车运行于任意分区 $i(i > 0)$ 时两车的追踪间隔时间 ΔT_i , 具体如式(24)所示。由式(24)可得到满足所有分区间距运行要求的列车追踪间隔时间 T_f 如式(25)所示。

$$\Delta T_i = \min(\Delta S_i / \bar{v}_j) \quad 0 < i < n \quad (24)$$

$$T_f = \max(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{n-1}) \quad (25)$$

如果将同时满足列车安全距离和间隔分区运行要求的列车追踪间隔时间用 ΔT 表示, 那么期望得到的最小列车追踪间隔时间 $\min(\Delta T)$ 可表示为

$$\min(\Delta T) = \max(T_s, T_f) \quad (26)$$

需要说明的是, 当前行列车运行至其所在的分区 n 后, 追踪运行过程为列车到站追踪运行, 此时的列车追踪运行需要结合车站内牵引分区划分方式具体分析, 但列车追踪运行的约束条件仍然与上文所述相同, 即在考虑前行列车停站办理列车和客运相关作业时间影响的前提下, 以满足安全间隔和分区间隔的约束来求解两车间最小时间间隔。本文不再对此进行具体分析。

4 仿真计算及分析

本文选取文献[2]中已完成辅助停车区两站一区间仿真的线路开展相关计算。线路起点为车站 O (中心里程 0), 终点为车站 D (中心里程 85 730 m), 线路坡度条件、最不利条件下的列车加速度取值等参数均参考文献[2]中基础数据取值。列车推荐运行速度曲线如图 5 所示, 列车实际运行最高速度为 450 km/h, 线路最高限速 500 km/h, 存在部分区段限速; 列车采用 3 辆编组, 列车长度 80 m; Δt 和 t_r 分别取值为 10 s 和 2 s。

仿真线路沿线停车区分布如表 1 所示, 牵引分区划分情况以及列车按推荐速度曲线运行时到达和出清分区的时刻如表 2 所示, 发车时刻即为 0。

基于辅助停车区位置、列车推荐运行速度曲线、线路相关参数及 Δt 计算得到的列车步进控制临界区域如表 3 所示。

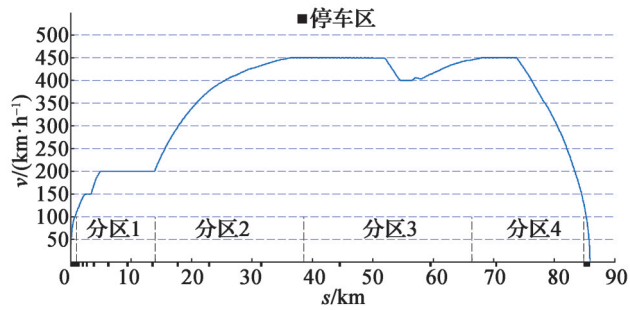


图5 列车推荐运行速度曲线
Fig. 5 Curve of recommended speeds for train operation

表1 仿真线路停车区里程分布

Table 1 Mileage distribution of stopping areas on simulated line
m

停车区(k)	起点 $S_{k,S}$	终点 $S_{k,E}$	停车区(k)	起点 $S_{k,S}$	终点 $S_{k,E}$
0	0	1 000	8	13 405	13 735
1	1 000	1 151	9	17 594	17 924
2	1 192	1 522	10	22 742	23 072
3	1 904	2 234	11	31 339	31 669
4	2 591	2 921	12	44 302	44 632
5	3 737	4 067	13	59 319	59 649
6	6 121	6 451	14	70 133	70 463
7	9 275	9 605	15	84 730	85 730

表2 仿真线路分区里程及列车运行时间

Table 2 Mileage of blocking sections and train operation
timing on simulated line

分区(i)	起点 $S_{i,O}/m$	终点 $S_{i,D}/m$	到达时刻/s	出清时刻/s
0	0	1 000	—	55
1	1 000	13 962	52	310
2	13 962	38 505	308	551
3	38 505	66 238	549	780
4	66 238	84 730	779	979
5	84 730	85 730	977	—

表3 列车步进控制临界区域范围

Table 3 Range of critical area for train stepping control m

停车区(k)	起点 $S_{k,d}$	终点 $S_{k,D}$	停车区(k)	起点 $S_{k,d}$	终点 $S_{k,D}$
1	355	629	9	11 740	12 335
2	474	760	10	14 996	15 736
3	741	1 050	11	18 501	19 423
4	1 258	1 627	12	25 095	26 323
5	1 824	2 259	13	36 755	38 077
6	2 675	3 112	14	53 331	54 481
7	4 473	5 061	15	63 052	64 338
8	7 685	8 241			

前行列车以停车区 k 为目标运行时，根据式(9)和式(22)求得基于安全距离的列车追踪间隔时间 ΔT_k 如表4所示。

表4 基于安全距离的列车追踪间隔时间

Table 4 Train tracking interval based on safety distance

停车区(k)	列车追踪间隔 $\Delta T_k/s$	停车区(k)	列车追踪间隔 $\Delta T_k/s$
2	19	9	86
3	22	10	70
4	30	11	58
5	30	12	79
6	33	13	110
7	53	14	145
8	72	15	97

根据式(10)和式(24)可以得到正常追踪运行时基于间隔分区运行的列车追踪间隔时间 Δt_i ，具体如表5第2列所示。根据式(11)、式(21)和本文所述方法，针对前行列车在 $[S_{i,O}, S_{(i+1),D}]$ 区段和 $[S_{(i+1),D}, S_{i,D}]$ 区段运行时在最不利情况下随机异常发生的场景，对该场景下的列车追踪间隔时间进行仿真计算，得到 Δt_i 如表5第3列所示。

表5 基于间隔分区运行的列车追踪间隔时间

Table 5 Train tracking interval based on spaced operation
in blocking sections s

间隔分区(i)	正常追踪间隔 Δt_i	随机异常下的追踪间隔 Δt_i
1	258	264
2	243	251
3	231	232
4	200	204

根据式(23)、式(25)和式(26)，结合表4和表5的计算结果，可得到本文所提出的列车追踪间隔控制模型中的追踪间隔时间为264 s。

另外，基于式(5)、列车运行速度曲线以及表1~表3中的参数，按现行的磁浮列车追踪运行间隔控制方法计算，可得到4个间隔分区的追踪间隔分别为274 s、274 s、334 s和303 s，进而得出现行磁浮列车追踪间隔时间为334 s。

在不考虑沿线辅助停车区布置数量的前提下，高速磁浮列车追踪运行间隔控制也可采用与传统轨道交通准移动闭塞完全相同的方法。在这种情况下，任意分区 i 内的最后一个停车区 i_E 恰好位于距分区边界最小安全距离 $L_{s,min}$ 的位置，此时前后车运行间距满足式(27)要求。仍基于本文相同条件计算4个间隔分区的追踪间隔， $L_{s,min}$ 取理想值为0，根据式(27)、列车运行速度曲线以及表2中的参数，可得到列车追踪间隔时间分别为274 s、270 s、282 s和249 s，因此采用与传统轨道交通准移动闭塞相同的方法时列车追踪间隔时间为282 s。

$$\Delta S \geq L_r + L_b + L_{s,min} + L_v + L_i \tag{27}$$

综合以上仿真结果可知，采用本文所述的列车间

隔控制方法可将高速磁浮列车追踪间隔时间从现有的334 s缩短至264 s, 优化效果明显, 这使得在相同的线路条件下更有利于开展运营组织。采用传统准移动闭塞方案也可以优化局部牵引分区的列车追踪间隔, 尤其是分区内末端停车区距分区边界较远的场景, 例如算例中的间隔分区3和分区4的列车追踪间隔分别缩短52 s和54 s, 但是这种方案会导致辅助停车区数量增加, 提高建设成本, 因此在工程实践中可考虑同时借鉴两种方法以进一步提高列车追踪运行效率。另外, 根据仿真数据可以看出, 磁浮列车追踪间隔受分区间距影响更加明显, 如果要进一步优化列车追踪间隔, 需尽可能缩短分区长度。

5 结论

常导高速磁浮列车的牵引控制主要依靠地面设备实现, 车地通信是列车运行控制的基础。基于这一特点, 本文分析了列车追踪运行过程中运行控制系统的安全防护原理, 结合现行的列车追踪间隔控制方式, 根据列车安全防护距离和间隔分区运行的需求, 提出了缩短列车追踪间隔的控制模型及计算方法, 并在一定工况下进行了仿真计算, 仿真结果显示该方法将列车追踪间隔时间从334 s缩短为264 s, 相较于现行的磁浮列车追踪间隔控制方法, 优化效果明显。本文研究对常导高速磁浮交通系统工程化应用具有较大的参考价值, 尤其是在运控系统设计、运营方案及运行模式选择等方面具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 张海, 倪少权, 陈韬, 等. 轨道交通列车追踪运行模型及追踪间隔研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 172-176.
ZHANG Hai, NI Shaoquan, CHEN Tao, et al. Study on tracking operation model and tracking interval of rail transit trains[J]. Computer simulation, 2022, 39(9): 172-176.
- [2] 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): 325-333.
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): 325-333.
- [3] 丁文亮. 中速磁浮列车追踪间隔时间计算方法及供电分区划分优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
DING Wenliang. Study on calculation method of train tracking interval and optimization of power supply partition of medium speed maglev[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [4] WANG Ning, TANG Yuefeng, LIU Xiangqian. Calculation method on tracking interval of magnetic levitation train[C]// IEEE. 2018 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: IEEE, 2018: 332-336.
- [5] 闫丽霞, 高云波, 李云鹏. 城市轨道交通移动闭塞列控系统列车追踪间隔研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 34-37.
YAN Lixia, GAO Yunbo, LI Yuncong. Train tracking interval of moving block train control system in urban rail transit [J]. Urban mass transit, 2020, 23(3): 34-37.
- [6] 陈荣武, 诸昌铃, 刘莉. CBTC系统列车追踪间隔计算及优化[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(4): 579-585.
CHEN Rongwu, ZHU Changqian, LIU Li. Calculation and optimization of train headway in CBTC system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2011, 46(4): 579-585.
- [7] 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): 56-59.
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): 56-59.
- [8] 王志伟, 李靖兰, 戚媛婧, 等. 高速磁浮交通运行控制系统综合仿真试验平台[J]. 机车电传动, 2023(1): 144-149.
WANG Zhiwei, LI Jinglan, QI Yuanjing, et al. Integrated simulation test platform of operation control system for high-speed maglev transport[J]. Electric drive for locomotives, 2023(1): 144-149.
- [9] 方凯, 张家欢, 石阳阳, 等. 常导长定子高速磁浮运行控制系统研究[J]. 控制与信息技术, 2022(1): 7-13.
FANG Kai, ZHANG Jiahuan, SHI Yangyang, et al. Research on operation control system for high speed maglev with long stator and normal conducting[J]. Control and information technology, 2022(1): 7-13.
- [10] 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 Scientific & Technical Publishers, 2003.
- [11] 田恺, 晏锐, 万鹏. 高速磁浮无线通信技术研究现状及发展[J]. 机车电传动, 2020(6): 25-29.
TIAN Kai, YAN Rui, WAN Peng. Research status and development of high-speed maglev wireless communication technology[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 25-29.
- [12] 谢联莲, 虞凯, 刘孜学, 等. 长大干线高速磁浮无线通信系统工程方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(6): 20-25.
XIE Lianlian, YU Kai, LIU Zixue, et al. Research on engineering scheme of radio communication system for long main line with high speed maglev[J]. Railway signalling & communication engineering, 2023, 20(6): 20-25.
- [13] 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): 1310-1316.

YU Yi, JIANG Xi, LIN Hui, et al. Setting method of auxiliary stopping area for high-speed maglev based on protection speed[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2019, 47(9): 1310-1316.

[14] 姚媛. 高速磁浮列车速度曲线监控功能安全分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

YAO Yuan. Safety analysis of high-speed maglev train speed curve monitoring function[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[15] 陈光, 邓志翔, 姜西, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 96-99.

CHEN Guang, DENG Zhixiang, JIANG Xi, et al. Research on compatibility between tracking interval and control system of normal conducting maglev train based on long trunk line[J]. Urban mass transit, 2022, 25(9): 96-99.

Study on tracking interval of normal-conducting high-speed maglev trains

JIANG Xi

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

Abstract: Normal-conducting high-speed maglev technology represents the most mature maglev system currently available in China, suitable for medium- to long-distance, large-capacity and rapid passenger transportation. Since train tracking interval serves as a basis for preparing and adjusting operation plans, reducing train tracking interval is considered crucial to improving operational efficiency on the premise of ensuring the safety of train operation. Focusing on this topic, this study began with a research of the safety protection principles for the operation of high-speed maglev trains, and analyzed the limitations of train tracking operation in the current quasi-moving block mode. A tracking interval model was then established, taking into account safety distances for trains and the requirements for interval operation in blocking sections. Subsequently, a discrete expression for solving train tracking operation interval distance was proposed, which incorporates the stepping control characteristics of maglev trains at stopping points. Furthermore, a model for calculating train tracking operation distance was established, which considers train tracking scenarios in both normal and abnormal scenarios, thereby developing a calculation method for train tracking interval. The results of simulations conducted under specific train tracking scenarios show that the proposed method is highly effective in optimizing tracking interval for high-speed maglev trains. Compared to the current train tracking interval control methods, it offers more favorable conditions for organizing train operation under identical conditions.

Keywords: high-speed maglev; tracking interval; stepping at stopping point; operational control; simulation