

基于防护速度的高速磁浮辅助停车区设置

虞 翊¹, 姜 西², 林 辉¹, 赵华华¹

(1. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为了在满足高速磁浮列车安全连续运行需求的前提下节约建设成本,提出了一种基于速度防护曲线的辅助停车区设置算法。在此基础上给出了一种基于基准运行速度曲线的辅助停车区算法,同时能满足多目标速度曲线并存的线路上列车安全连续运行的要求。考虑了列车运行控制系统安全性的要求,给出了工程应用中相应的辅助停车区调整方法,并在一定工况条件下进行了仿真计算,结果表明该辅助停车区算法能在一定程度上降低高速磁浮交通系统的建设成本。

关键词: 高速磁浮; 辅助停车区; 防护速度曲线; 停车点步进

中图分类号: U237

文献标志码: A

Setting Method of Auxiliary Stopping Area for High-Speed Maglev Based on Protection Speed

YU Yi¹, JIANG Xi², LIN Hui¹, ZHAO Huahua¹

(1. The Cooperative Center of Rail and Maglev Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to save construction costs on the premise of the needs of high-speed maglev trains for safe and continuous operation. A setting method of auxiliary stopping area for high-speed maglev based on protection speed curve is proposed. Based on this, an auxiliary stopping area method based on the benchmark running speed curve is presented, which can meet the requirements of safe and continuous operation of the train where multiple target speed curve coexist on the line. The corresponding auxiliary stopping area adjustment method, which has considered the safety requirements of the train operation control system, in engineering application is given, and the simulation calculation is carried out under certain working conditions, the results show that the auxiliary stopping area method can reduce the construction cost of high-speed maglev transportation system to a certain extent.

Key words: high-speed maglev; auxiliary stopping area; protection speed curve; stopping point step

高速磁浮交通系统是 21 世纪具有竞争力的现代化大容量高速客运交通系统,磁浮列车超高的运行速度要求其运行控制系统具有完备的安全防护功能,保证列车在任何情况下都能处于安全状态。高速磁浮列车正常运行在安全的速度范围内,遇到运行干扰、故障和紧急情况时,保证列车安全停到指定的辅助停车区,疏散车上的乘客并进行列车自身的维护^[1-2]。刘进、吴汶麒^[2]结合常导高速磁浮列车的运行特点,提出了高速磁浮二维速度防护曲线的概念,并给出了一种二维速度防护的算法;江亚^[3]在刘进、吴汶麒的基础上进一步分析了高速磁浮二维速度防护曲线的原理,对高速磁浮列车在强制制动条件和惰性条件下的二维防护速度曲线进行了仿真计算;陈飞等^[4]分析了高速磁浮系统安全速度防护需求及速度曲线防护原理,给出了一种安全制动速度曲线、安全悬浮速度曲线的理论计算公式,并给出了最大、最小速度曲线的算法;姚媛^[5]对高速磁浮列车正常运行过程中的停车点步进过程进行了分析,指出磁浮列车运行时,是将进路中的辅助停车区逐一设为目标点,计算相应的速度防护曲线,并以此监控列车安全运行。这些研究都是基于高速磁浮辅助停车区位置已知的前提下,为列车正常运行的速度防护提供一定的理论基础。辅助停车区造价较高,从建设成本的角度考虑不宜过多铺设,卞建光^[6]总结了可能影响高速磁浮辅助停车区设置的因素,以列车悬浮距离为基础,给出了各速度段对应的辅助停车区设置间隔参考值,并在此基础上优化了高低速混行情况下的辅助停车区设置方案。陈峙^[7]总结了高速磁浮列车运控系统安全性需求,结合上海示范运营线

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200602-02);上海市磁浮与轨道交通协同创新中心基金(20132223)

第一作者: 虞 翊(1962—),男,研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为轨道交通信号安全与控制。

E-mail: 12164@tongji.edu.cn

工程经验,以上海线辅助停车区设置间距名义值为基础,设计开发了高速磁浮辅助停车区自动生成软件。目前,关于高速磁浮辅助停车区的设置方法研究较少,且已有研究或是参考上海高速磁浮商业示范运营线的辅助停车区间距名义值或是针对特定运行工况进行估算,不具备普遍通用性。本文结合高速磁浮列车安全速度防护的要求,提出了一种基于速度防护曲线的具有普遍适用性的辅助停车区设置方法。

1 辅助停车区概述

1.1 辅助停车介绍

常导高速磁浮列车为电磁式悬浮,没有支撑和导向轮,在列车启动及低速运行时车载蓄电池为车载供电系统;车速大于 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车载线性发电机电为车载供电系统,同时车载蓄电池被充电。在异常情况下,若牵引系统的电源被切断,列车需依靠车载蓄电池的能量进行悬浮及制动。车载蓄电池的能量耗尽后,列车如果不重新充电,将无法进行再次悬浮,列车降落后不能实施牵引和行驶^[4,6]。在此情况下列车若停在辅助停车区以外,那么即使故障或异常被排除,列车也将因供电不足而无法悬浮和启动,严重影响整体线路的运行计划。如图1所示,由于造价较高的原因,除了车站停车区外,系统只在区间部分区域设置若干辅助停车区。这些停车区内设置有动力轨,可给列车充电;此外,只有在必要的停车区才向旅客提供安全、快捷的疏散通道,以确保人员安全。因此,辅助停车区是在当前技术条件下确保列车正常情况下可以连续运行、故障情况下可以安全停车而采取的必要技术手段。

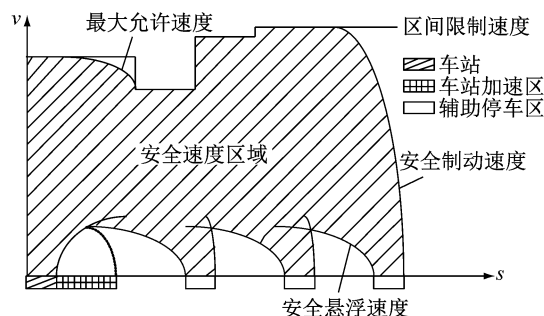


图1 辅助停车区分布示意

Fig.1 Schematic of the auxiliary stopping area distribution

如图2所示,列车运行过程中以当前辅助停车区作为运行的目标区域,运行控制系统会对列车的

运行速度进行监控,保证列车当前速度不能超过安全制动速度且不低于安全悬浮速度曲线,从而确保故障或异常情况下,列车依靠紧急制动力或自身动能和势能也能可靠停至该辅助停车区。高速磁浮列车运行控制系统的速度防护曲线与辅助停车区位置息息相关。辅助停车区主要实现的功能包括:

(1) 避免列车停在线路上不利于运营管理或不符合安全原则的区段,如河流上、坡道上等。

(2) 与速度防护曲线相配合实现列车的安全停车区域防护。

(3) 实现列车紧急停车时的车载电池的充电。

(4) 通过速度防护曲线步进的方式,实现对列车的运行防护。

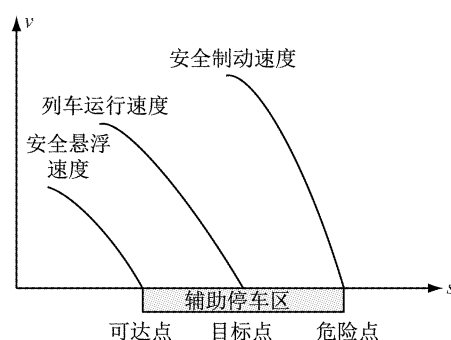


图2 辅助停车区位置

Fig.2 The position of auxiliary stopping area

1.2 磁浮列车运行方式

如图3所示,正常情况下,列车会按计划的目标运行速度曲线运行,运控系统通过对速度防护曲线的监控来保证列车不会停到停车区之外,整个运行过程通过停车点步进的方式来实现,即列车运行过程中总是以当前停车区为运行的目标点,符合列车步进条件时,列车进行步进,步进完成后列车以下一

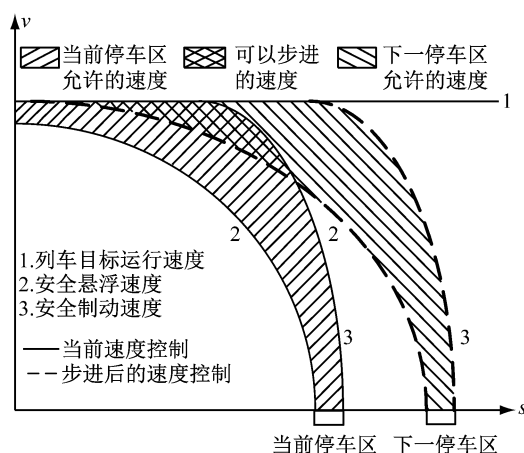


图3 停车点步进示意

Fig.3 Schematic of stopping point step

停车区为运行目标点,依此类推,最终到达列车实际运行的终点^[5].

2 辅助停车区设置的理想模型

2.1 高速磁浮列车基本受力特性

高速磁浮列车运行过程中运行方向的受力主要包括:列车的牵引力或制动力 F_p 、空气阻力 F_a 、轨道两侧的导向轨引发的磁化涡流阻力 F_c 、直线电机引起的悬浮阻力 F_m 、线路坡道附加阻力 f 、滑撬落下后的摩擦力 F_f . F_a 、 F_c 、 F_m 、 F_f 、 f ,可分别用式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)表示^[8].

$$F_a = 2.8 \left(0.53 \frac{N}{2} + 0.3 \right) \left(\frac{V}{3.6} \right)^2 \quad (1)$$

$$F_c = 1\,000 N (0.1V^{0.5} + 0.02V^{0.7}) \quad (2)$$

$$F_m = \begin{cases} 0 & (0 \leq V < 20) \\ 7\,300 N & (20 \leq V < 70) \\ N \left(3.6 \frac{146\,000}{V} - 200 \right) & (V \geq 70) \end{cases} \quad (3)$$

$$F_f = MgI \times 10^{-3} \times 1\,000 \quad (4)$$

$$f = 1\,000 \mu Mg \sqrt{1 - (I \times 10^{-3})^2} \quad (5)$$

式中: N 为车辆编组数; V 为列车运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; M 为车辆质量, t ; I 为线路坡道坡度, 10^{-3} ; μ 为车辆与轨道面间摩擦系数.

高速磁浮列车的制动主要分为常规制动和紧急制动 2 种情况. 列车正常运行过程中,通过常规制动的方式对列车运行速度进行控制;故障或异常情况下,紧急制动才会被激活. 因此,列车的安全制动速度曲线是根据最不利条件下的紧急制动力进行计算的. 列车安全制动时运行方向所受合力 F_b 如式(6)所示,列车安全悬浮时运行方向所受合力 F_s 如式(7)所示.

$$F_b = F_p + F_a + F_c + F_m + F_f + f \quad (6)$$

$$F_s = F_p + F_a + F_c + F_m + F_f + f \quad (7)$$

根据动力学分析可得,磁浮列车的制动与悬浮过程满足式(8).

$$\begin{cases} a = F/M \\ V_{i+1} = V_i + a\Delta T \\ S_{i+1} = S_i + V_i\Delta T + 0.5a\Delta T^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: a 为列车当前加速度; F 为列车当前所受合力; V_i 为列车当前速度; ΔT 为计算时间步长; S_{i+1} 为列车下一时刻里程; S_i 为列车当前里程.

结合线路和车辆相关参数,即可根据式(1)~(8)得到任一已知位置速度点随时间推移的列车安全制动和安全悬浮 V - S 关系曲线.

2.2 基于防护速度曲线的辅助停车区设置方法

如图 4 所示,列车运行的理想情况可描述为:列车从车站 A 出发,按正常运行的目标速度曲线运行,首先将辅助停车区 1 作为当前停车点,计算相应的速度防护曲线,并以此监控列车运行,列车运行至 P_1 点完成步进,依此类推,在 P_n 点完成步进后,运行至车站 B. 图中 R_{P_i} 表示停车区 i 的可达点, H_{P_i} 表示停车区 i 的危险点. 分析可知,辅助停车区理论上即为安全制动曲线与安全悬浮曲线之间的线路轨道区段,因此本研究是基于磁浮列车防护速度曲线对辅助停车区进行设置.

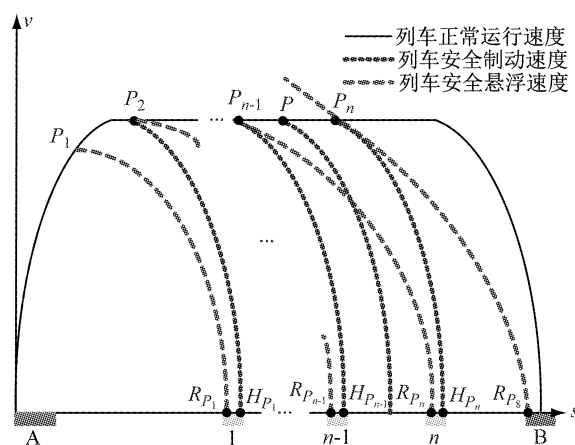


图 4 辅助停车区设置过程

Fig. 4 Auxiliary stopping area setting process

基于防护速度曲线的辅助停车区设置基本步骤如下:① 将终点站设为基准停车区;② 基于基准停车区可达点作列车安全悬浮曲线,交列车牵引的目标运行速度曲线于 P_n 点;③ 由交点 P_n 作列车安全制动曲线得到辅助停车区 n 的危险点,并由此计算得辅助停车区 n 的位置;④ 若所计算的新辅助停车区危险点不在起点站加速区内,则以计算所得的新辅助停车区为基准停车区,重复步骤②、③,直到计算出线路上所有辅助停车区 $n-1, \dots, 1$ 的位置.

通过上述方法计算所得的两站之间的辅助停车区数量为能保证列车安全连续运行的辅助停车区数的最小值,即各次计算得到的辅助停车区是距基准停车区间隔最远的能保证列车安全连续运行的辅助停车区. 现以辅助停车区 n 的计算过程(以车站 B 为基准停车区)为例简要说明. 假定有离基准停车区更远的辅助停车区,则其对应的制动曲线与正常运行曲线相交于 P 点. 按照步进原则,车辆应在减速前步进到下一停车区,则在 P 点车辆必须完成步进,但如图 4 所示, P 点的运行速度低于最小速度曲线,列车

无法步进,只能停车.因此可说明辅助停车区 n 对应的是距离基准停车区最远的辅助停车区.同理,辅助停车区 $n-1, \dots, 1$ 对应的是距离基准停车区最近的辅助停车区.

2.3 基于基准运行速度曲线的辅助停车区算法

通过对传统轨道交通运营情况和上海磁浮线实际运营情况的总结可知,一条线路上实际运行的列车目标速度曲线可以是多样化的.如,出行高峰时段为了缓解交通压力,列车运行的目标速度曲线是以单程运行时间短为主要目标,平峰时段的目标速度曲线则是以运行能耗少为主要目标,综合安全性、乘客舒适度等诸多因素使得一条运营线路上存在多种列车运行的目标速度曲线.

如图5所示,列车从车站A到车站B,存在 a 、 b 、 c 3条可供列车正常运行的目标运行速度曲线,采用辅助停车区设置方法设置A、B两站之间的辅助停车区,即可得到满足 a 、 b 、 c 3条目标运行速度曲线所必须的辅助停车区分布.通过这种方式设置辅助停车区虽然可以满足磁浮列车步进的基本条件,但是所设置的辅助停车区明显偏多.例如,利用目标运行速度曲线 c ,以车站B作基准停车区,计算得到的辅助停车区 c_1 ,不仅能满足目标速度曲线 c 以 c_1 为当前停车区步进到车站B的基本条件,同时也能满足目标速度曲线 a 和 b 以 c_1 为当前停车区步进到车站B的基本条件.因此,若将 c_1 作为目标运行速度曲线 a 、 b 、 c 共用的基准停车区并继续计算得到它们的下一停车区,将有效减少整条线路上辅助停车区的铺设数量,从而降低整体建设成本.

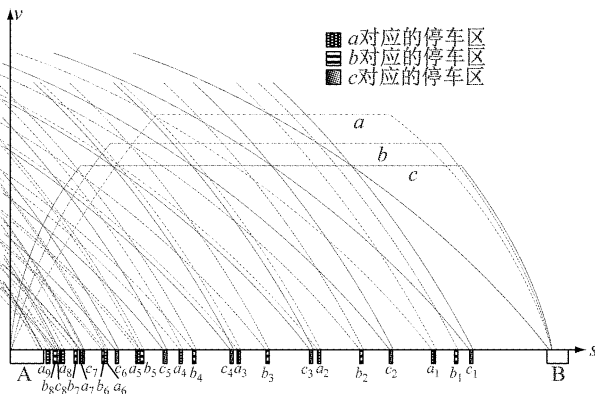


图5 多条目标速度曲线的辅助停车区设置过程
Fig.5 Auxiliary stopping area setting process for multiple target speed curve

如图6所示,在一条存在 m 种用于运行的列车目标运行速度曲线的线路上,以辅助停车区 a_i 为基准停车区分别基于不同的目标速度曲线可计算出

同的辅助停车区分布.当以运行速度较低的曲线计算得到的停车区可以作为该运行速度曲线与速度较高的运行速度曲线的共用停车区,例如基于运行速度曲线1计算得到运行辅助停车区 b_i ,列车以目标运行速度曲线 m 运行时,以辅助停车区 b_i 作为当前步进点,能满足列车步进到停车区 a_i 的要求;而以运行速度较高的曲线计算得到的停车区却不能作为该目标速度曲线与速度较低的目标速度曲线的共用停车区,例如基于运行速度曲线 m 计算得到运行辅助停车区 c_i ,列车以目标运行速度曲线1运行时,以辅助停车区 c_i 作为当前步进点,在列车运行至 P 点时,因不能满足步进条件而无法步进到停车区 a_i .假设辅助停车区 a_i 为 s_i 至 s_{i+1} 区段右侧最近的辅助停车区,以 a_i 为基准辅助停车区,基于 s_i 至 s_{i+1} 区段内的这 m 条目标速度曲线可计算出的辅助停车区数量分别为 n_1, n_2, \dots, n_m ,则 s_i 至 s_{i+1} 区段内能满足所有目标速度曲线连续安全运行的辅助停车区数 n 应满足式(9)要求.其中速度最低的速度曲线所得的辅助停车区数量可以作为 s_i 至 s_{i+1} 区段其他速度曲线的共用停车区,且满足其他各速度曲线步进的要求.若将列车运行起止点划分为 k 个区段,记采用速度曲线 l 在第 h 个区段内计算得到辅助停车区数为 n_{lh} ,则利用数学归纳法可知,基于最低速度曲线集合计算得到的辅助停车区数即为能满足所有目标速度曲线连续安全运行的最小值,最小值为 $\sum_{h=1}^k \max(n_{1h}, n_{2h}, \dots, n_{mh})$.

$$\max(n_1, n_2, \dots, n_m) \leq n \leq \sum_{i=1}^m n_i \quad (9)$$

式中: n_i 表示基于目标速度曲线 i 计算得到的 s_i 至 s_{i+1} 区段中的辅助停车区数.

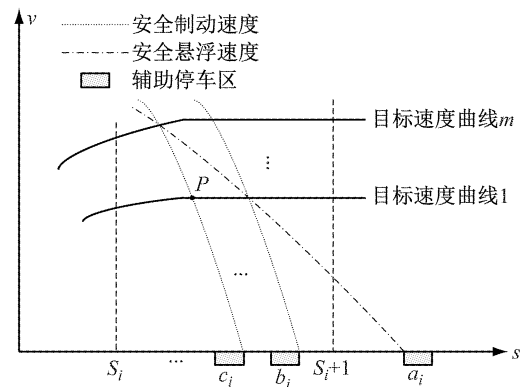


图6 多条目标速度曲线的共用辅助停车区设置过程
Fig.6 Shared auxiliary stopping area setting process for multiple target speed curve

将 m 条目标运行速度曲线中速度最低的速度曲

线段所组成的一条曲线集合定义为基准运行速度曲线,即在线路区间中任意小的 ΔS 长度区段内基准运行速度曲线的速度 v 满足式(10)要求,式中 v_i 为目标速度曲线 i 在 ΔS 区段内的速度。

$$v \leq v_i, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

图 5 所示案例的基准速度曲线如图 7 所示,为速度曲线 P_1P_2 (目标速度曲线 a 的部分)、 P_2P_3 (目标速度曲线 c 的部分)、 P_3P_4 (目标速度曲线 a 的部分)组成的集合。基于基准速度曲线计算得到的辅助停车区总数为 10 个。其中,基于车站 B 和速度曲线 P_2P_3 计算得到的最少辅助停车区数为 3 个,即辅助停车区 8、9、10(对应为图 5 所示的辅助停车区 c_3 、 c_2 、 c_1)。速度曲线 P_2P_3 计算得到的辅助停车区数为局部最小值;基于辅助停车区 8 和速度曲线 P_1P_2 计算得到的最少辅助停车区数为 7 个,即辅助停车区 1 至辅助停车区 7,而图 5 中所对应速度曲线 P_1P_2 部分却只有 6 个辅助停车区,即辅助停车区 a_9 至辅助停车区 a_4 ,故速度曲线 P_1P_2 计算得到的辅助停车区数并没有达到局部最小值。分析可知,图 5 中辅助停车区 a_9 至辅助停车区 a_4 是基于辅助停车区 a_3 计算得到的,若要速度曲线 P_1P_2 计算得到的辅助停车区数达到局部最小值则需要在辅助停车 7、8 之间加入一个辅助停车区,从而重新计算这个新的辅助停车区左侧对应的辅助停车区位置。这里以插入 a_3 为例说明,若在辅助停车 7、8 之间加入辅助停车区 a_3 ,则速度曲线 P_1P_2 部分对应计算出图 5 中辅助停车区 a_9 至辅助停车区 a_4 这样的 6 个辅助停车区,辅助停车区总数仍然为 10 个。因此,基于基准速度曲线的辅助停车区设置方法计算所得辅助停车区可以使辅助停车区整体达到最小值,从而最大程度降低辅助停车区建造的成本。

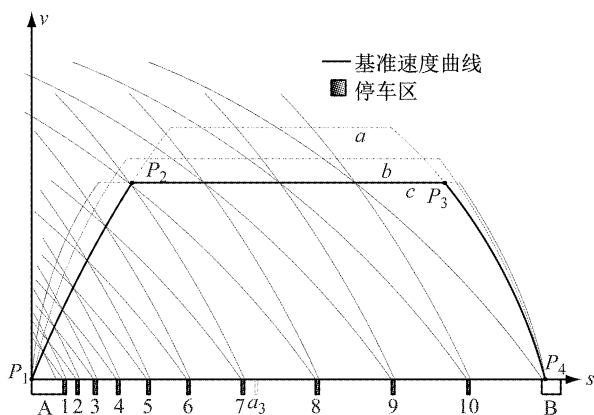


图 7 基于基准速度曲线的辅助停车区设置方法

Fig.7 Auxiliary stopping area setting method based on reference speed curve

3 辅助停车区设置的工程计算模型

3.1 考虑列车运行控制系统安全性要求的辅助停车区计算模型

磁浮列车运行控制系统采用停车点步进的方法管理列车运行,采用第 2 节的方法设置辅助停车区,理论上能满足列车安全连续运行的基本条件,但是要求列车必须在特定的位置瞬时完成列车步进的过程,在实际工程中难以实现。另外,考虑到目前对列车步进的管理是允许列车有 2 次步进机会的实际情况,需要为列车运行控制系统完成步进过程留有充足的步进控制管理时间。

如图 8 所示,磁浮列车是以目标运行速度曲线为目标运行的,实际运行过程中列车运行控制系统通过对最大、最小速度曲线的监控来保证列车速度在允许的速度范围内运行,即列车速度既不会高于安全制动速度曲线也不会低于安全悬浮速度曲线,最大、最小速度曲线分别由安全制动速度曲线和安全悬浮速度曲线计算得到^[4,9]。

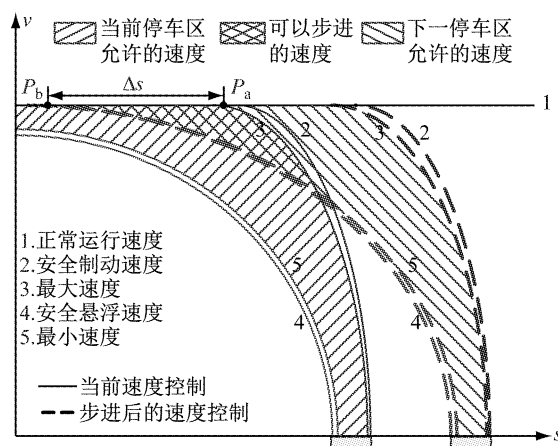


图 8 列车进行安全步进的速度范围

Fig.8 Speed range of the train for safe stepping

只有列车速度在可以进行步进的速度范围内才能完成步进。因此,在实际工程中设置辅助停车区可依据辅助停车区设置的理想模型,加入一定的列车步进时间 Δt (包括一定的安全冗余时间)的方式来计算辅助停车区的位置。具体方法如下:

(1) 基于基准辅助停车区可达点作安全悬浮速度曲线及其对应的最小速度曲线,获得最小速度曲线与目标速度曲线的交点 P_a 。

(2) 计算 Δt 时间内列车以目标运行速度曲线行走的距离 Δs 。

(3) 以 P_a 点与 Δs 值计算出最大速度曲线与目标运行速度曲线的交点 P_b .

(4) 以 P_b 作列车最大速度曲线及其最大安全速度曲线得到下一停车区危险点.

将步进时间设置为 2 s、4 s、8 s 的情况下计算列车在不同线路坡度、不同运行速度状况下高速磁浮列车辅助停车区的间隔如表 1 所示. 其中列车编组为 5 节(首尾车最大质量按 67.0 t 计算、最小质量按 52.9 t 计算;中间车最大质量按 69.5 t 计算、最小质量按 50.3 t 计算^[1])、列车制动力为 $F_p=200\ 000\text{ N}$.

表 1 不同步进允许时间的辅助停车区间隔

Tab.1 Auxiliary stopping area interval with different stepping time

时间/		间隔			单位:m
s	停车区之间的 坡度/%	200 km · h ⁻¹	300 km · h ⁻¹	400 km · h ⁻¹	
2	5.0	969	2 780	5 335	
	3.5	1 446	3 868	7 091	
	2.0	2 300	5 714	9 952	
	1.0	3 344	7 851	13 123	
	0	5 347	11 730	18 597	
4	5.0	858	2 613	5 113	
	3.5	1 335	3 701	6 869	
	2.0	2 189	5 547	9 729	
	1.0	3 233	7 684	12 901	
	0	5 236	11 564	18 375	
8	5.0	636	2 280	4 668	
	3.5	1 112	3 368	6 424	
	2.0	1 967	5 214	9 285	
	1.0	3 011	7 351	12 457	
	0	5 014	11 230	17 930	

上海磁浮示范线辅助停车区的参考值和卞建光基于列车悬浮距离估算的 5 节编组列车、线路坡度为零条件下不同速度列车的辅助停车区间隔参考值分别见表 2 和表 3^[6].

表 2 上海磁浮示范线辅助停车区的参考值

Tab.2 Reference values of the auxiliary stopping area of Shanghai maglev demonstration line

		间隔			单位:km
停车区之间的 平均坡度/%		200 km · h ⁻¹	300 km · h ⁻¹	400 km · h ⁻¹	
5.0		1	2	3	
3.5		1	3	4	
2.0		1	4	6	
1.0		3	6	8	
0		4	8	11	

通过对数据的分析对比,本研究计算所得辅助停车区的位置满足速度越高停车区越稀疏、速度越低停车区越密集的一般性规律. 上海磁浮示范线停车区设置参考间距以及卞建光提供的停车区设置参考值与本研究所提出的设置方法的计算结果相比,

表 3 不同速度下辅助停车区间隔的选择

Tab.3 Reference values of the auxiliary stopping area for different speeds

速度/(km · h ⁻¹)	停车区间隔/m
200	4 500
250	7 000
300	8 500
400	11 500
450	14 000

辅助停车区设置间距普遍偏小,则沿线辅助停车区数量必然偏多. 辅助停车区铺设间距较小,则列车步进安全冗余时间更充足,理论上可以更高效地保证列车安全连续运行. 上海磁浮示范线是全世界第一条商业运营的磁浮线路,出于安全性的考虑,所设置的辅助停车区间距较小. 若其他磁浮线路均直接采纳这些参考值进行辅助停车区的设置,不仅会加大建设成本,还可能因所设辅助停车区与本线路实际运营工况不符而严重影响行车安全与效率. 本研究的辅助停车区设置方法是以运控系统的防护性能为基础进行的,即从运行控制的角度以列车安全连续运行为前提,研究如何最大化辅助停车区之间的间隔. 因此,为高速磁浮辅助停车区设置提供了一种能有效降低建造成本的辅助停车区设置方法.

3.2 辅助停车区位置修正方法

在列车需要一定安全冗余时间进行停车点步进时,辅助停车区位置一定的情况下,速度越高的速度曲线步进的距离一般也越长,但是所能用于步进的时间却不一定越长,即基于基准速度曲线所设置的辅助停车区并不一定能满足所有目标速度曲线的步进条件,因此设置辅助停车区之前必须对其进行一定的修正,以满足所有目标运行速度曲线安全连续运行的要求.

如图 9 所示,某线路上存在 m 种可能的列车目标运行速度曲线,在一定的安全步进冗余时间 Δt 要求的条件下,列车可完成步进的距离 Δs_i 可用式(11)计算,式中 t_i 表示列车以目标运行速度 i 运行刚好达到满足步进条件的时刻, v_i 为列车瞬时速度.

$$\Delta s_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} v_i dt (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

采用基于基准运行速度曲线设置高速磁浮交通系统沿线的辅助停车区,可分别计算得到列车的最大、最小速度曲线以及辅助停车区 j 对应的新辅助停车区 $j-1$. 列车采取目标速度曲线 i 运行,恰好达到辅助停车区 j 最小速度曲线的位置为 s_{i1} ,恰好超过辅助停车区 $j-1$ 最大速度曲线的位置为 s'_{i2} ,则列

车可完成步进的距离为 $s'_{i2} - s_{i1}$, 则可能存在 $s'_{i2} - s_{i1} \leq \Delta s_i$ 的情况。

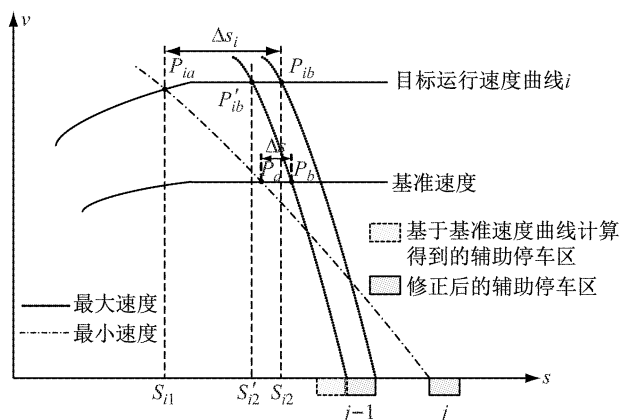


图 9 辅助停车区设置修正过程

Fig. 9 Auxiliary stopping area setting correction process

本研究在基于基准运行速度曲线设置辅助停车区方法的基础上,加入阈值判定的方式对计算所得的新辅助停车区进行修正,修正步骤如下:① 基于辅助停车区 j 的位置计算得到最小速度曲线,并得到点 P_a 的位置;② 根据 P_a 点、 Δt 、基准速度曲线,计算得到 P_b 点,并计算得到最大速度曲线,令 $i=1$;③ 计算最小速度曲线与目标速度曲线 i 的交点 P_{ia} (对应的位置为 s_{i1})、最大速度曲线与目标速度曲线 i 的交点 P'_{ib} (对应的位置为 s'_{i2});④ 若 $s'_{i2} - s_{i1} \leq \Delta s_i$, 则 $s_{i2} = s_{i1} + \Delta s_i$, 并依据 s_{i2} 、目标速度曲线 i 得到点 P_{ib} , 计算新的最大速度曲线;否则 $s_{i2} = s'_{i2}$;⑤ 若 $i=m$, 则用最大速度曲线计算得辅助停车区 $j-1$ 的位置;否则令 $i=i+1$, 重复步骤③、④、⑤。

对高速磁浮线路上的所有辅助停车通过上述方法进行校验修正后,即能满足采用任一目标运行速度曲线安全连续运行的要求。

4 结论

总结分析了常导高速磁浮安全防护的基本要求,提出了一种基于安全防护速度曲线的辅助停车区基本计算方法,结合高速磁浮交通系统运营及列车运行控制系统的实际情况,给出了一种基于基准运行速度曲线的辅助停车区设置方法,并针对存在多种目标运行速度曲线的磁浮线路给出了辅助停车

区设置进行修正的方法,为高速磁浮交通系统辅助停车区设置提供了一种工程设计的参考计算方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘进, 吴汶麒. 高速磁悬浮交通二维速度防护曲线及其算法研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 106.
LIU Jin, WU Wenqi. Research on 2-D speed protection curve and its algorithm of high-speed maglev transportation[J]. China Railway Science, 2002, 23(4): 106.
- [3] 江亚, 吴汶麒, 刘进. 磁浮列车运行控制系统二维速度防护曲线仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 122.
JIANG Ya, WU Wenxi, LIU Jin. Simulation of high-speed maglev train 2-D speed protection curve [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(3): 122.
- [4] 陈飞, 徐洪泽. 德国高速磁浮列车安全防护速度曲线研究[J]. 中国科技信息, 2006, 18(17): 248.
CHEN Fei, XU Hongze. Research on speed protection curve of german high-speed maglev transportation [J]. Science China Information, 2006(17): 248.
- [5] 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.
- [6] 卞建光. 磁浮列车运行控制系统相关性性质及辅助停车区特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
BIAN Jianguang. Research on the related nature of maglev train operation control system and characteristics of auxiliary parking area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] 陈峙. 高速磁悬浮列车的停车区域数学模型及原理研究[M]. 上海: 同济大学, 2009.
CHEN Zhi. Mathematic model and principle research of safe stopping area for high speed maglev train methods research[M]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [8] 赖纳·沙赫, 彼得·耶勒, 勒内·瑞曼. 高速磁浮与高速轮轨交通系统比较[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
SCHACH R, JEHLE P, NAUMANN R. Comparison of high-speed maglev and high-speed wheel-rail transportation systems [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008.
- [9] 杨光. 高速磁浮列车最优速度曲线及其跟踪控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
YANG Guang. Study on high speed maglev train optimum speed curve and its tracking control [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.