



考虑追踪约束的分区与辅助 停车区协同布置

王新栋^{1,2}, 田 毅^{1,2}, 李明伟^{1,2}, 郑景文^{1,2}

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室, 山东 青岛 266111)

摘 要: 针对高速磁浮线路集成设计中分区划分、辅助停车区 (auxiliary stopping area, ASA) 布置与列车追踪间隔三者强耦合却长期采用串行设计、难以实现全局最优的工程难题, 文章通过系统阐释三要素的闭环耦合约束机理, 构建了一套多约束条件下的协同优化设计方法, 在满足运营安全与效率指标的前提下实现分区与 ASA 数量的最优控制。文章首先分析了“分区参数影响追踪间隔、ASA 布置约束分区边界、追踪间隔需求反推优化”三者的耦合关系, 建立“区间匀速”“车站接近减速”“车站出发加速”3种工况的追踪间隔计算模型, 并量化安全裕量; 然后, 以建设成本最小化、运营效率最优化为双目标, 采用层次分析法确定权重并转化为单目标优化问题, 将供电能力、安全制动等设计准则转化为数学约束, 通过多轮迭代求解并设定收敛判据; 最后, 以300 km干支分离型中间站长大干线为场景, 设置无约束、轻度约束与重度约束3种工况进行仿真验证。结果表明: 无约束工况下, 全线最小区间追踪间隔为271.82 s, 满足300 s设计限值; 轻度约束下无须增加设施, 效率损失控制在4%以内; 在重度约束下, 通过自适应增加分区与 ASA 数量, 仍保持基准追踪间隔, 并完全避让禁设区段。该方法突破了传统串行设计的局限, 对复杂线路地理约束具有良好适应性, 可为长大干线高速磁浮运行控制系统集成设计与工程化应用提供技术支撑。

关键词: 高速磁浮列车; 追踪间隔时间; 分区划分; 辅助停车区设置

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0207-09

0 引言

高速磁浮交通作为当前地面速度等级最高的轨道交通制式, 兼具运行速度快、无机械接触摩擦、能耗与噪声水平低等技术优势^[1-2], 已成为全球轨道交通领域的研发热点与未来干线交通的重要发展方向^[3]。随着技术体系的逐步成熟, 高速磁浮交通已从技术验证阶段迈入工程化应用阶段, 而运行控制系统 (operation control system, OCS) 的集成优化水平直接决定了线路的运营效率与安全防护能力^[4]。

与传统轮轨交通相比, 高速磁浮交通在牵引供电

模式、运行控制逻辑及线路拓扑等方面存在本质差异, 轮轨领域的既有研究成果无法直接复用, 亟须针对磁浮系统特性开展 OCS 关键技术研究^[5]。为保障多车追踪运行的安全隔离, 需将高速磁浮线路划分为若干个兼具追踪隔离与供电隔离功能的独立分区; 同时, 采用基于 ASA 的步进式运行控制模式, 列车的安全制动、异常工况防护与乘客疏散均高度依赖 ASA 的空间分布。这两项核心设计要素直接决定了线路建设成本、OCS 控制性能与全线通行能力^[6], 因此, 线路分区与 ASA 的协同设计已成为高速磁浮系统集成的核心技术问题之一。

在分区划分领域, 学者丁文亮^[7]指出中速磁浮系统

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFB4302506)

通信作者: 田 毅, 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事高速磁浮运控通信系统集成研究; E-mail: tianyi@cqsf.com

引用格式: 王新栋, 田毅, 李明伟, 等. 考虑追踪约束的分区与辅助停车区协同布置[J]. 机车电传动, 2026(2): 207-215.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.023.

Citation: WANG Xindong, TIAN Yi, LI Mingwei, et al. Coordinated layout of block sections and auxiliary stopping areas considering tracking constraints[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 207-215.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.023.

以供电分区作为闭塞分区运行, 供电分区的划分直接影响列车追踪间隔, 需兼顾线路造价与运营效率; 学者吴冬华^[8]进一步提出分区划分需与线路拓扑、站型结构及追踪间隔形成耦合约束, 单维度的分区设计难以满足系统整体优化需求。在 ASA 布置优化领域, 楚彭子等^[9]学者提出基于复杂场景划分的 ASA 布置方法, 通过遗传算法解决了陡坡、道岔等复杂线路条件下的 ASA 优化难题; 吴冬华等^[8]学者基于列车停车点步进控制特性, 提出了分段优化的 ASA 位置设置方法, 分别采用加速度算法与位置平均法适配不同运行阶段需求; 学者卞建光^[10]研究了不同运行速度及坡道条件对 ASA 布置间隔与长度的影响规律; LAI Qingying 等^[11]学者以 ASA 长度为核心约束, 基于安全速度曲线包络范围完成了 ASA 位置优化; 虞翊等^[12]学者建立了一种基于速度防护的 ASA 设置方法, 以基准运行曲线与步进控制要求为约束, 实现了 ASA 数量的最小化设计; 田毅等^[13-14]学者进一步探究了运行方向、蓄电池对 ASA 布置方案的影响。在追踪间隔优化领域, 列车追踪间隔作为衡量线路运营效率的核心指标, 与分区、ASA 布置存在强耦合关系。学者姜西^[15]建立了基于安全距离与分区约束的追踪间隔计算模型, 通过离散表达式优化了追踪间隔求解方法, 有效提升了常导高速磁浮系统的运营组织效率; 陈光等^[5]学者针对长大干线场景, 明确了高速磁浮不同运行阶段的追踪运行原理, 提出追踪间隔与控制系统能力的匹配性需结合分区管辖范围协同设计。

综上所述, 现有研究多针对分区划分、ASA 布置或追踪间隔优化开展单维度分析, 未能充分揭示三者间的闭环耦合约束机理, 缺乏可同时满足追踪间隔要求、线路地理约束的多要素协同优化方法, 难以支撑长大干线高速磁浮线路的工程化集成设计。针对上述研究缺口, 本文首先阐释了分区、ASA 与追踪间隔的耦合约束机理, 进而提出一套协同优化设计方法, 最终通过多场景仿真试验验证了该方法的有效性与适应性。

1 分区、辅助停车区、追踪间隔时间耦合关系分析

分区划分、ASA 布置与列车追踪间隔是保障高速磁浮多车追踪运行安全、提升线路通行效率的三大核心技术要素, 三者间存在显著的强耦合关联, 共同构成了系统集成设计的关键约束体系, 具体分析如下: ①追踪间隔作为衡量线路运行效率的核心指标, 其计算逻辑虽参考轮轨交通固定闭塞模式, 但需结合高速磁浮特有的停车点步进控制要求构建, 其数值直接受分区长度与 ASA 布置位置的动态影响, 是三者耦合关系的核心输出变量。②ASA 作为列车异常工况下的紧急停车与乘客疏散载体, 其布置需满足“单分区内至

少设置 1 处”“不跨越分区布置”的硬性约束, 同时需适配线路条件、地理环境与危险点位防护需求, 其空间分布与布置密度直接限定了分区划分的可行边界, 是分区方案设计的前置约束。分区作为实现列车追踪隔离、供电隔离的基础单元, 其划分需满足牵引供电能力、车站运行特性、列车运行需求、安全制动距离等多重约束, 分区长度的取值既受牵引高功率标准模块能力的上限约束, 又需满足大于列车最大安全制动距离的下限要求, 其长度参数设计又反向作用于追踪间隔的计算结果, 最终形成“分区参数影响追踪间隔”“ASA 布置约束分区划分边界”“追踪间隔需求反推分区与 ASA 优化”的闭环耦合关系。

1.1 追踪间隔计算模型

高速磁浮的追踪间隔是决定线路通行能力的核心指标, 参考高铁列控系统, 为充分发挥系统性能和降低追踪间隔时间, 高速磁浮系统采用前行列车所在分区入口为目标点的速度-距离模型, 即固定闭塞。结合高速磁浮系统特有的辅助停车区设计, 形成“固定闭塞分区+ASA 步进式安全控制”耦合的闭塞控制方式, 该方式与传统轮轨固定闭塞存在本质差异, 核心特征如下:

①具有功能耦合性。“分区”即为高速磁浮的闭塞分区, 同时承担多车追踪运行的空间安全隔离、牵引供电系统的分段供电, 以及电气隔离与运控通信系统的区间功能交接。分区边界同时是供电分段边界、运控管辖边界与闭塞隔离边界。

②具有安全约束性。与轮轨列车可在闭塞分区内任意位置安全停车不同, 高速磁浮列车无接触网持续供电, 仅能依靠车载蓄电池完成紧急制动, 且必须在预设的 ASA 内完成停车, 非 ASA 区段无乘客疏散条件与安全防护设施, 因此列车的行车许可、安全制动曲线均与 ASA 位置强绑定, 形成分区隔离与 ASA 步进的双层闭塞控制逻辑。

1.1.1 高速磁浮闭塞控制

基于上述闭塞控制方式, 构建量化的高速磁浮固定闭塞控制模型, 具体如下:

1) 模型基础假设

对模型基础假设做如下建设:

①将线路划分为 N 个连续、非重叠的闭塞分区 $B_i (i=1, 2, \dots, N)$, 每个分区 B_i 的起终点里程为 $[X_{i,s}, X_{i,e}]$, 分区长度 $L_i = X_{i,e} - X_{i,s}$ 。

②每个闭塞分区 B_i 内至少布置 1 个 ASA, 记为 $A_{i,j} (j=1, 2, \dots, M_i)$, $A_{i,j}$ 的起终点里程为 $[Y_{i,j,s}, Y_{i,j,e}]$, 且 ASA 不得跨越分区边界, 即 $Y_{i,j,s} \geq X_{i,s}$, $Y_{i,j,e} \leq X_{i,e}$ 。

③闭塞分区状态分为 3 类: 空闲、占用、故障, 同一时间仅允许 1 列列车占用 1 个闭塞分区。

④列车紧急制动过程满足预设的减速度特性, 制动终点必须落在有效ASA范围内。

2) 模型核心约束

对模型核心约束如下:

①分区占用排他性约束。对于任意时刻 t , 若列车 T_k 占用分区 B_i , 则其余列车不得进入 B_i , 即后行列车 T_{k+1} 的行车许可终点不得超过 $X_{i,s}$ 。

②ASA安全绑定约束。对于列车 T_k 在分区 B_i 内的运行, 其任意时刻的安全制动终点必须落在本分区或前方分区的有效ASA范围内, 即对于列车当前位置 $x(t)$ 、当前速度 $v(t)$, 紧急制动距离 $S_{\text{brake}}(v(t))$ 应满足

$x(t) + S_{\text{brake}}(v(t)) \leq Y_{i,j,e}$, 其中 $Y_{i,j,e}$ 为前方最近的有效ASA终点。

③模型状态转移规则。闭塞分区状态遵循“空闲→列车进入→占用状态→列车完全驶出→释放为空闲状态”的单向转移逻辑, 故障分区永久锁定, 禁止列车进入, 确保追踪运行的安全隔离。

1.1.2 列车追踪时间间隔

结合磁浮系统固定闭塞分区的划分逻辑与停车点步进式运行控制特性, 参考轮轨交通列车追踪间隔的计算方法, 构建高速磁浮列车追踪间隔计算模型, 列车追踪运行工况如图1所示^[16]。

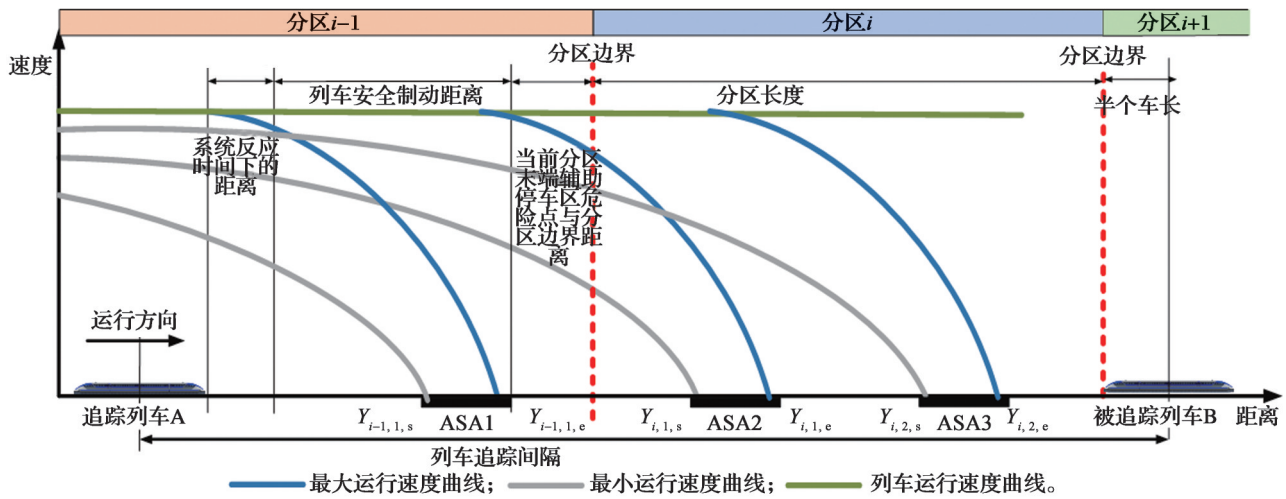


图1 追踪运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train tracking

线路上设有 k 个ASA, 后行列车可将本分区某个ASA作为停车目标区, 同时需要满足双重速度曲线约束, 即当前的最大运行速度不超过ASA1末端 $Y_{i-1,1,e}$ 对应的最大速度曲线, 最小不低于ASA1始端 $Y_{i-1,1,s}$ 对应的最小速度曲线, 若超出速度安全区域的边界, 车辆会停靠在非防护区段, 带来运营中断等影响。在站间运行过程中, 若列车当前速度满足上述条件的同时, 又位于 $Y_{i,1,s}$ 和 $Y_{i,1,e}$ 对应速度曲线所围成的安全区域内, 则列车执行步进控制, 更换ASA2为目标点继续行进, 实现列车在站间的连续运行。高速磁浮列车在ASA的约束下通过停车点步进的形式实现列车安全运行, 列车以步进目标的ASA作为移动授权点。

高速磁浮列车的追踪间隔随运行阶段的动力学特性变化而显著不同, 针对区间正常匀速、车站接近减速、车站出发加速3种核心工况分别构建计算模型, 并量化安全裕量的构成。

1) 分工况追踪间隔计算模型

基于高速磁浮“固定闭塞+ASA步进控制”的核心逻辑, 结合列车牵引制动动力学特性, 推导不同运行阶段的追踪间隔计算公式, 具体如下:

①区间正常匀速工况下的计算公式。该工况下列车以最高设计速度 v_{max} 匀速运行, 是全线最小追踪间隔

的决定因素, 计算公式为

$$\tau_{\text{uni}}^i = \frac{S_{\text{brake}} + S_{\text{margin}} + L_i + L_{\text{train}}}{v_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中, S_{brake} 为列车最大安全制动的制动距离; L_i 为分区长度; S_{margin} 为系统响应时间带来的安全防护距离裕量; L_{train} 为列车长度; τ_{uni}^i 为第 i 个区间追踪间隔时间。

②车站接近减速工况下的计算公式。列车从区间最高速度减速至车站停车速度的过程中, 平均运行速度显著降低, 追踪间隔增大, 是全线追踪间隔的瓶颈区段。基于列车减速动力学曲线, 推导计算公式为

$$\tau_{\text{appro}}^j = \frac{\int_{v_{\text{max}}}^{v_{\text{stop}}} \frac{v}{a_{\text{brake_service}}} dv + S_{\text{margin}} + L_j + L_{\text{train}}}{v_{\text{avg_appro}}} \quad (2)$$

式中: $a_{\text{brake_service}}$ 为列车常用制动减速度; v_{stop} 为车站停车速度 (一般取0 km/h); L_j 为车站接近段的分区长度; $v_{\text{avg_appro}}$ 为减速过程的平均运行速度, 由列车牵引制动仿真计算得到。

③车站出发加速工况下的计算公式。列车从车站静止状态加速至区间最高速度的过程中, 平均运行速度低于匀速工况的速度, 追踪间隔同样增大, 计算公式为

$$\tau_{\text{depart}}^k = \frac{\int_0^{v_{\text{max}}} \frac{v}{a_{\text{traction}}} dv + S_{\text{margin}} + L_k + L_{\text{train}}}{v_{\text{avg_depart}}} \quad (3)$$

式中: a_{traction} 为列车常用牵引加速度; $v_{\text{avg_depart}}$ 为加速过程平均运行速度。

全线最终设计追踪间隔取上述 3 种工况的最大值, 即

$$\tau_q = \max(\tau_{\text{uni}}^i, \tau_{\text{appro}}^j, \tau_{\text{depart}}^k) \quad (4)$$

2) 安全裕量的量化分解与计算

系统响应时间带来的安全防护距离裕量涉及多因素, 主要包括运控系统指令响应时间、制动系统响应时间、速度测量误差和列车定位误差。将其分解为 4 个可量化的独立分量, 即 S_{margin} 的分解计算公式为

$$S_{\text{margin}} = S_{\text{ocs_resp}} + S_{\text{brake_resp}} + S_{\text{measure_err}} + S_{\text{position_err}} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{ocs_resp}}$ 为运控系统指令响应时间对应的运行距离, $S_{\text{ocs_resp}} = v \cdot t_{\text{ocs_resp}}$, $t_{\text{ocs_resp}}$ 取 0.2 s (运控系统按 200 ms 运行周期计算); $S_{\text{brake_resp}}$ 为制动系统响应时间对应的运行距离, $S_{\text{brake_resp}} = v \cdot t_{\text{brake_resp}}$, $t_{\text{brake_resp}}$ 取 0.2 s (制动系统按 200 ms 运行周期计算); $S_{\text{measure_err}}$ 为速度测量误差对应的距离, 取最高运行速度下制动距离的 1%; $S_{\text{position_err}}$ 为列车定位误差对应的距离, 取一个常导长定子齿槽长度, 即 0.086 m。

1.2 ASA 设置的核心约束

ASA 的核心功能是为列车异常运行工况提供紧急停车载体与乘客疏散通道, 其布置需要满足以下硬性约束与适配性要求:

①功能约束。每个独立分区内必须至少设置 1 处 ASA, 无法布置 ASA 的区段不得单独划分为一个分区, 且 ASA 不得跨越分区边界设置。

②风险防控约束。车站、道岔、折返点、分区交接处等天然风险点位必须设置 ASA; 大坡道的坡顶与坡底附近需要增设 ASA。

③工程适配约束。ASA 需要选址于具备乘客疏散条件与安全停留条件的地面或高架平台区域, 需避让地质不良、环境受限等无法布置的区段。

1.3 分区划分的核心准则

高速磁浮分区是实现多车追踪安全隔离、牵引供电独立管控的基础单元, 其划分需要遵循以下核心准则:

①供电能力约束。单分区长度不得超过牵引高功率标准模块的最大供电距离, 常规工况下不大于 50 km。

②安全制动约束。单分区长度必须大于列车的最大安全制动距离。

③站场适配约束。车站进出段列车运行速度较低, 车站前后分区长度可适当缩短; 具备列车越行、交会功能的车站, 其侧线需要划分为独立分区。

④效率约束。分区划分方案需要满足全线追踪间隔的设计要求, 以保障线路通行能力。

由上述分析可知, 分区长度约束、ASA 布置与追踪间隔三者相互制约、相互关联, 单一要素的优化调整将引发另外两个要素的参数适配变化。现有设计方法多采用“先分区划分、后 ASA 布置”的串行设计模式, 无法兼顾三者的耦合约束, 易出现追踪间隔不达标、ASA 布置无法适配地理环境、分区划分不满足供电要求等问题。因此, 如何实现多约束条件下三者的协同优化, 已成为高速磁浮线路集成设计领域亟待解决的核心技术难题。

2 分区划分与 ASA 协同优化设计方法

为实现“满足追踪间隔、供电能力、线路约束要求的前提下, 分区与 ASA 数量最小化”的设计目标, 本文提出一套分区与 ASA 协同优化设计方法, 通过多轮迭代实现多约束条件下的全局最优设计。

2.1 模型搭建

分区划分与 ASA 协同优化问题, 本质是带强约束的多目标组合优化问题, 核心是在满足所有工程约束的前提下, 实现线路全生命周期成本最低、运营效率最高的双目标平衡。

1) 决策变量

将协同优化的核心决策变量量化为 3 组:

①分区数量 N , 以及每个分区的边界里程集合 $X = \{X_0, X_1, \dots, X_N\}$, 其中 X_0 为线路起点, X_N 为线路终点, 满足 $X_0 < X_1 < \dots < X_N$ 。

②每个分区内的 ASA 数量 $M_i (i=1, 2, \dots, N)$, 以及每个 ASA 的边界里程集合 $Y_i = \{Y_{i,1,s}, Y_{i,1,e}, \dots, Y_{i,M_i,s}, Y_{i,M_i,e}\}$, 满足 $X_{i-1} \leq Y_{i,1,s} < Y_{i,1,e} < \dots < Y_{i,M_i,s} < Y_{i,M_i,e} \leq X_i$ 。

③每个分区内列车的平均运行速度 $v_{\text{avg},i}$, 由线路条件与列车牵引制动特性决定。

2) 目标函数

构建以“建设成本最小化、运营效率最高化”为核心的双目标优化函数, 采用线性加权法将其转化为单目标优化问题, 便于工程化求解, 具体如下:

$$\min(F) = \omega_1 \cdot \left(N + \sum_{i=1}^N M_i \right) + \omega_2 \cdot \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{limit}}} \quad (6)$$

式中: $N + \sum_{i=1}^N M_i$ 为全线分区与 ASA 的总数量, 表征线路建设与设备集成成本; I_{max} 为全线最大区间追踪间隔; I_{limit} 为追踪间隔设计限值; $\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{limit}}}$ 表征运营效率的达标程度, 比值越小效率越高; ω_1 和 ω_2 为权重系数, $\omega_1 + \omega_2 = 1$, 可根据工程需求进行调整。

本文采用层次分析法(AHP)结合工程实践调研的方法确定权重系数 ω_1 和 ω_2 , 具体过程如下:

①基于层次分析法确定权重。邀请5~7位高速磁浮领域专家(含线路设计、运控系统、运营组织方向), 采用1~9标度法对“建设成本最小化”与“运营效率最大化”进行两两重要性比较, 构建判断矩阵 Q , 如式(7)。

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{2}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

②权重计算与一致性检验。采用和积法计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=2$, 对应的特征向量 $U=[u_1, u_2]^T$, 经归一化得到权重为

$$\omega_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^2 u_i} \quad (8)$$

由于其为二阶判断矩阵, 无须一致性检验, 最终得到权重系数: $\omega_1=0.6$, $\omega_2=0.4$ 。

③不同工程场景的权重取值建议。根据线路功能定位与建设需求的不同, 权重系数可按以下原则调整: 对于经济敏感型线路, 如市域磁浮、旅游专线等, 需要优先控制建设成本, 建议 ω_1 取0.7~0.8, ω_2 取0.2~0.3; 对于效率敏感型线路, 如干线城际磁浮、京沪磁浮通道等, 需要优先保障运营效率, 建议 ω_1 取0.4~0.5, ω_2 取0.5~0.6; 对于均衡型线路, 如本文研究对象, 兼顾建设成本与运营效率, 可采用 ω_1 取0.6, ω_2 取0.4。

3) 约束条件

将所有设计原则转化为严格的数学约束, 分为以下4类核心约束:

①追踪间隔约束。全线所有区间的追踪间隔 $I_i \leq I_{\lim it}$, 其中 I_i 由式(1)~式(5)计算, 即 $I_i = \frac{S_{\text{brake}} + L_i + S_{\text{margin}} + L_{\text{train}}}{v_{\text{avg}, i}} \leq I_{\lim it}$ 。

②分区划分约束。每个分区长度 $L_i = X_i - X_{i-1} \leq L_{\text{power_max}}$ (牵引模块最大供电距离), 每个分区长度 $L_i > S_{\text{brake_max}}$ (列车最大安全制动距离), 车站位置、干支衔接点必须为分区边界, 车站侧线需要划分为独立分区。

③ASA布置约束。每个分区内至少有1个ASA, 即 $M_i \geq 1$, $\forall i \in [1, N]$; ASA不跨越分区边界, 即 $Y_{i, M_i, e} \leq X_i$, $Y_{i, 1, s} \leq X_{i-1}$; 车站、道岔、分区边界、大坡道坡顶/坡底必须布置ASA。

④步进控制约束。分区内任意位置 x , 列车以当前速度 $v(x)$ 进行紧急制动的距离 $S_{\text{brake}}(v(x))$, 满足 $x + S_{\text{brake}}(v(x)) \leq Y_{i, j, e}$, 其中 $Y_{i, j, e}$ 为 x 前方最近的ASA终点, 确保全区间制动安全。

2.2 模型求解

基于上述模型, 方法流程如图2所示, 核心实施步

骤如下:

①分区划分优化。以车站、干支衔接点为分界点, 将全线划分为 K 个宏观区段, 对每个区段, 以追踪间隔限值 $I_{\lim it}$ 为约束, 计算分区的最大允许运行时长 $t_{\text{block_max}} = \frac{I_{\lim it}}{2}$ 。基于列车牵引制动特性, 计算对应运行时长的分区长度 L_{block}^0 , 完成初始分区划分, 确保每个分区运行时长均衡。区段衔接处的分区运行时长取 $\frac{t_{\text{block_max}}}{2}$, 与相邻区段分区合并, 形成初始分区方案 X^0 。

②约束适配ASA优化。对每个分区, 在分区边界处布置初始ASA, 形成初始ASA方案 Y^0 。对每个ASA进行线路约束校核, 若ASA落入禁设区段, 则采用带约束的序列二次规划算法, 在禁设区段附近搜索最优ASA位置, 目标函数为ASA位置偏离初始位置的距离最小, 约束条件为位置不落入禁设区段、不跨越分区边界。基于调整后的ASA位置, 重新计算区间追踪间隔 I^1 。若 $I^1 > I_{\lim it}$, 则增加分区数量 N , 返回外层循环重新划分分区; 若 $I^1 \leq I_{\lim it}$, 则输出 X^1 、 Y^1 。

③步进控制ASA优化。对每个分区, 基于列车运行速度曲线, 进行全区间步进控制安全校核, 离散取点计算每个位置的紧急制动距离, 判断是否满足制动终点落在前方ASA内。若存在不满足的位置, 则在该位置与前方ASA之间增设新的ASA, 采用动态规划算法确定新增ASA的最优位置, 确保步进控制约束满足, 同时ASA数量增量最小。对新增ASA进行线路约束校核, 若不满足则调整位置, 直至所有约束满足。最后输出最终的分区分方案 X^* 与ASA方案 Y^* , 具体流程如图2。

2.3 收敛判定

在迭代前后, 同时满足以下3个条件时, 算法收敛, 输出全局最优解:

- ①全线分区与ASA总数量的变化率不大于5%;
- ②迭代前后, 全线最大追踪间隔的变化量不大于5s;
- ③所有约束条件均满足, 无违规项。

3 仿真实验与结果分析

由于高速磁浮车站站内分区长度短、数量少, 且列车站内运行速度低, ASA原则上需要全覆盖铺设, 对全线运营效率的影响有限; 对于长大干线, 其区间分区数量多, 是决定全线OCS建设成本与通行效率的核心环节。因此, 本文仿真模型聚焦干线区间的协同设计问题, 选用通行效率要求高、分区划分难度大的干支分离型中间站作为试验场景, 对所提协同优化方

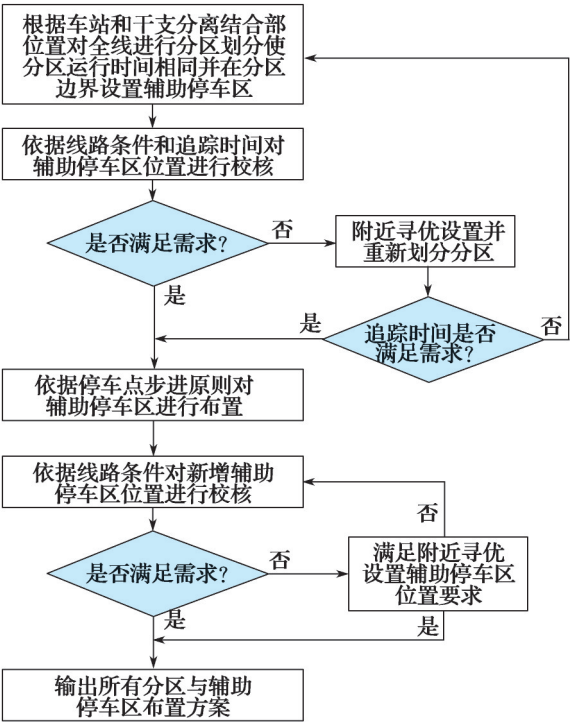


图2 协同优化步骤流程图

Fig. 2 Flow chart of collaborative optimization procedure

法的有效性与适应性进行验证。

3.1 仿真参数与工况设置

预设线路全长 300 km，全线区间追踪间隔设计限值为 5 min；全线共设置 A、B、C 3 座车站，其中车站 B 为干支分离型中间站，位于车站 A 到车站 C 干线 136 km 里程处，干支衔接段分区长度 15 km，里程范围 136 ~151 km；列车最低运行速度为 120 km/h，线路拓扑如图 3 所示。

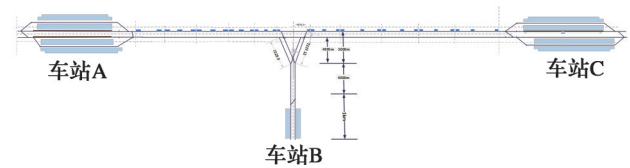


图3 线路拓扑图

Fig. 3 Line topology

为验证方法对复杂线路约束的适应性，设置 3 种试验工况：

- ①工况 1：无线路地理约束，将该工况作为基准对照工况。
- ②工况 2：里程 112 000~114 000 m 区段无法布置 ASA，为轻度约束工况。
- ③工况 3：里程 109 000~114 000 m 区段无法布置 ASA，为重度约束工况。

3.2 仿真结果与分析

3.2.1 工况 1(无线路条件约束的基准方案)

无线路约束条件下，优化后全线理论最小区间追

踪间隔为 271.82 s，满足 300 s 的设计限值要求；单线分区数量为 13 个，单线 ASA 数量为 35 个，分区划分方案与 ASA 布置方案分别如表 1、表 2 所示。

表 1 无线路约束条件下的优化分区划分方案

Table 1 Optimized block section division for constraint-free case m

分区编号	分区长度	分区起点里程	分区终点里程
1	2 000	0	2 000
2	23 160	2 000	25 160
3	27 680	25 160	52 840
4	27 680	52 840	80 520
5	27 680	80 520	108 200
6	27 680	108 200	135 880
7	27 680	135 880	163 560
8	27 680	163 560	191 240
9	27 680	191 240	218 920
10	27 680	218 920	246 600
11	27 680	246 600	274 280
12	23 720	274 280	298 000
13	2 000	298 000	300 000

表 2 无线路约束条件下的 ASA 布置方案

Table 2 ASA layout for constraint-free case m

编号	ASA 起点	ASA 终点	编号	ASA 起点	ASA 终点
1	0	2 000	19	162 900	163 560
2	2 000	2 660	20	163 560	164 220
3	13 180	13 840	21	177 400	178 060
4	24 500	25 160	22	190 580	191 240
5	25 160	25 820	23	191 240	191 900
6	38 500	39 160	24	204 760	205 420
7	52 180	52 840	25	218 260	218 920
8	52 840	53 500	26	218 920	219 580
9	65 860	66 520	27	232 440	233 100
10	79 860	80 520	28	245 940	246 600
11	80 520	81 180	29	246 600	247 260
12	94 200	94 860	30	260 120	260 780
13	107 540	108 200	31	273 620	274 280
14	108 200	108 860	32	274 280	274 940
15	121 880	122 540	33	285 670	286 330
16	135 220	135 880	34	297 340	298 000
17	135 880	136 540	35	298 000	300 000
18	149 560	150 220			

该基准方案验证了所提方法可在无约束条件下，实现追踪间隔、分区数量、ASA 数量的全局最优设计，为后续约束工况提供了对照基准。

3.2.2 工况 2(轻度线路约束的优化方案)

112 000~114 000 m 区段无法布置 ASA 的约束条件下，优化后全线区间追踪间隔为 281.54 s，仍满足 300 s 的设计限值要求；单线分区数量保持 13 个不变，单线 ASA 数量保持 35 个不变，成功避让约束区段，分区划分方案与核心 ASA 调整结果如表 3~表 5 所示。

表 3 轻度线路约束条件下的优化分区划分方案

Table 3 Optimized block section division for mild-constraint case m

分区编号	分区长度	分区起点里程	分区终点里程
1	2 000	0	2 000
2	23 160	2 000	25 160
3	27 680	25 160	52 840
4	27 680	52 840	80 520
5	30 680	80 520	111 200
6	24 680	111 200	135 880
7	27 680	135 880	163 560
8	27 680	163 560	191 240
9	27 680	191 240	218 920
10	27 680	218 920	246 600
11	27 680	246 600	274 280
12	23 719	274 280	297 999
13	2 000	298 000	300 000

表 4 轻度线路约束条件下的 ASA 配置方案

Table 4 ASA layout for mild-constraint case m

编号	ASA 起点	ASA 终点	编号	ASA 起点	ASA 终点
1	0	2 000	19	162 900	163 560
2	2 000	2 660	20	163 560	164 220
3	13 180	13 840	21	177 400	178 060
4	24 500	25 160	22	190 580	191 240
5	25 160	25 820	23	191 240	191 900
6	38 500	39 160	24	204 760	205 420
7	52 180	52 840	25	218 260	218 920
8	52 840	53 500	26	218 920	219 580
9	64 360	65 020	27	232 440	233 100
10	79 860	80 520	28	245 940	246 600
11	80 520	81 180	29	246 600	247 260
12	92 700	93 360	30	260 120	260 780
13	110 540	111 200	31	273 620	274 280
14	114 000	114 660	32	274 280	274 940
15	120 380	121 040	33	285 670	286 330
16	135 220	135 880	34	297 340	298 000
17	135 880	136 540	35	298 000	300 000
18	149 560	150 220			

表 5 轻度线路约束条件下的核心 ASA 调整方案

Table 5 Key ASA adjustments for mild-constraint case m

调整前 ASA 编号	调整前 里程范围	调整后 ASA 编号	调整后 里程范围	所属 分区
9	65 860~66 520	9	64 360~65 020	4
12	94 200~94 860	12	92 700~93 360	5
13	107 540~108 200	13	110 540~111 200	5
14	108 200~108 860	14	114 000~11 4660	6
15	121 880~122 540	15	120 380~121 040	6

结果表明, 针对轻度线路约束, 所提方法可通过调整分区边界与 ASA 位置, 在不增加分区与 ASA 数量的前提下, 满足线路约束与追踪间隔要求, 仅使追踪

间隔较基准方案增加 9.72 s, 对全线运营效率的影响控制在 3.57% 以内, 验证了方法的灵活性与适应性。

3.2.3 工况 3(重度线路约束的优化方案)

109 000~114 000 m 区段无法布置 ASA 的约束条件下, 仅通过调整 ASA 位置与分区边界已无法满足追踪间隔要求, 因此优化后分区数量从 13 个增加至 14 个, 单线 ASA 数量从 35 个增加至 38 个, 全线最小区间追踪间隔为 271.82 s, 与基准方案一致, 完全满足设计限值要求, 同时成功避让了约束区段, 分区划分及辅助停车区布置方案如表 6、表 7 所示。

表 6 重度线路约束条件下的优化分区划分方案

Table 6 Optimized block section division for severe-constraint case m

分区编号	分区长度	分区起点里程	分区终点里程
1	2 000	0	2 000
2	20 580	2 000	22 580
3	23 090	22 580	45 670
4	23 090	45 670	68 760
5	23 090	68 760	91 850
6	23 090	91 850	114 940
7	23 090	114 940	138 030
8	25 831	138 030	163 861
9	27 723	163 861	191 584
10	27 723	191 584	219 307
11	27 723	219 308	247 031
12	27 723	247 031	274 755
13	23 245	274 755	298 000
14	2 000	298 000	300 000

表 7 重度线路约束条件下的辅助停车区配置方案

Table 7 ASA layout for severe-constraint case m

编号	ASA 起点	ASA 终点	编号	ASA 起点	ASA 终点
1	0	2 000	20	138 030	138 690
2	2 000	2 660	21	150 812	151 472
3	11 990	12 650	22	163 201	163 861
4	21 920	22 580	23	163 861	164 521
5	22 580	23 240	24	177 393	178 053
6	33 885	34 545	25	190 924	191 584
7	45 010	45 670	26	191 584	192 244
8	45 670	46 330	27	205 116	205 776
9	57 055	57 715	28	218 648	219 308
10	68 100	68 760	29	219 308	219 968
11	68 760	69 420	30	232 839	233 499
12	80 205	80 865	31	246 371	247 031
13	91 850	92 510	32	247 031	247 691
14	102 395	103 055	33	260 563	261 223
15	114 000	114 660	34	274 095	274 755
16	114 940	115 600	35	274 755	275 415
17	126 485	127 145	36	286 047	286 707
18	137 370	138 030	37	297 340	298 000
19	138 030	138 690	38	298 000	300 000

该方案通过将原分区 5 (80 520~108 200 m) 和分区 6 (108 200~135 880 m) 拆分为 3 个长度均衡的分区 (分区 5、分区 6、分区 7), 这样完全避开了 109 000~114 000 m 的禁设区段。新增的 3 个 ASA 分别布设在分区 6 的起点 (91 850~92 510 m)、禁设区段终点 (114 000~114 660 m) 和分区 7 的中间 (126 485~127 145 m), 确保步进控制约束满足。结果表明, 针对重度线路约束, 本文所提方法可通过分区数量自适应调整, 在完全避让约束区段的同时, 保持基准方案的追踪间隔水平, 实现了运营效率、工程约束与建设成本的最优平衡, 验证了方法对复杂工程场景的适应性。

4 结论

本文针对高速磁浮分区划分、ASA 布置与追踪间隔的协同设计难题, 系统阐释了三者间的强耦合约束机理, 提出了一套多约束条件下的分区与 ASA 协同优化设计方法, 并通过多场景仿真试验完成了方法验证, 得出以下结论:

①本文所提协同优化方法可有效解决无约束条件下高速磁浮分区与 ASA 的全局最优设计问题, 在 300 km 长大干线场景下, 可实现 271.82 s 的最小区间追踪间隔, 满足干线运营的效率要求。

②针对轻度线路地理约束, 该方法可通过分区边界与 ASA 位置的协同调整, 在不增加分区与 ASA 数量的前提下, 完成约束避让与追踪间隔控制, 对运营效率的影响可控制在约 3.6%。

③针对重度线路地理约束, 该方法可通过分区数量的自适应优化, 在完全避让约束区段的同时, 保持基准方案的追踪间隔水平, 实现运营效率、工程约束与建设成本的平衡。

④该方法充分考虑了分区、ASA 布置与追踪间隔的闭环耦合约束, 突破了传统串行设计方法的局限性, 可为长大干线高速磁浮线路的 OCS 集成设计与工程化应用提供技术支撑。

本文研究聚焦于当前工程化研究最成熟的固定闭塞控制模式, 该模式是国内已运营高速磁浮线路的主流制式。未来研究将进一步引入列车运行图、客流量波动、故障场景下的运营组织等因素, 完善多目标协同优化模型, 提升方法对复杂运营场景的适应性。对于未来可能探索的准移动闭塞、移动闭塞等控制制式, 由于闭塞逻辑、安全防护机制与固定闭塞存在本质差异, 本文提出的“多约束耦合-多目标协同”的优化思路具有一定的参考价值, 但需要针对不同制式的控制特性重构约束条件、目标函数与求解算法, 相关研究将在后续工作中系统开展。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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 and Technical Publishers, 2003.

[3] 邵丙衡, 陶生桂, 庄红元. 轮轨系统高速列车与磁悬浮列车的主要技术经济比较[J]. 机车电传动, 1997(2): 1-4.

SHAO Bingheng, TAO Shenggui, ZHUANG Hongyuan. The main technical and economic comparison between wheel-rail high-speed train and maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 1997(2): 1-4.

[4] 汤力成. 磁浮交通运营场景差异性分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22(11): 7-13.

TANG Licheng. Difference analysis on operation scenarios of maglev transportation[J]. Railway signalling & communication engineering, 2025, 22(11): 7-13.

[5] 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.

[6] 宁滨. 高速列车运行控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

NING Bin. High speed train operation control system[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[7] 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.

[8] 吴冬华. 高速磁浮列车运行控制系统集成关键问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.

WU Donghua. Research on key issues of integration of high-speed maglev train operation control system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[9] 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): 1144-1151.

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), 2021, 49(8): 1144-1151.

[10] 卞建光. 磁浮列车运行控制系统相关性质及辅助停车区特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

BIAN Jianguang. Study on the correlative properties of maglev train operation control system and the characteristics of

- auxiliary parking area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [11] LAI Q Y, LIU J, MENG L Y, et al. Optimization of the auxiliary stopping area planning in the middle-to-high speed maglev[J]. Transportation systems and technology, 2018, 42: 141.
- [12] 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.
- [13] 田毅, 吴冬华, 耿书恒, 等. 计及蓄电池的高速磁浮辅助停车区位置研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 193-196.
- TIAN Yi, WU Donghua, GENG Shuheng, et al. High speed maglev assist stop area position research considering of battery[J]. Machine building & automation, 2021, 50(3): 193-196.
- [14] 吴冬华, 田毅, 耿书恒, 等. 基于分段优化的高速磁浮辅助停车区位置设置方法研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(9): 86-92.
- WU Donghua, TIAN Yi, GENG Shuheng, et al. Assistant stop area configuration method for high-speed maglev system based on segmented optimization[J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(9): 86-92.
- [15] 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.
- JIANG Xi. Study on tracking interval of normal-conducting high-speed maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 175-181.
- [16] ZHOU H R, MENG L Y, LAI Q Y, et al. Optimization of power supply section planning in medium-speed maglev system[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1746: 012077.

Coordinated layout of block sections and auxiliary stopping areas considering tracking constraints

WANG Xindong^{1,2}, TIAN Yi^{1,2}, LI Mingwei^{1,2}, ZHENG Jingwen^{1,2}

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266111, China;

2. State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology, Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: The division of block sections, the layout of auxiliary stopping areas (ASA), and tracking train headways are tightly coupled factors in the integration design of high-speed maglev lines. However, the conventional sequential design practice has become an engineering bottleneck that hinders global optimization. To solve this, this paper systematically expounds the closed-loop coupling among these three factors, and proposes a collaborative optimization design methodology that accounts for multiple constraints, aimed at optimal selection of block section and ASA numbers while satisfying operational safety and efficiency requirements. Firstly, a tracking headway computation model with quantified safety margins was developed, from an analysis of the mutual coupling relations: how block section division parameters affect tracking headways; how ASA layout constrains block section boundaries; and how tracking headway requirements can be used to infer optimization measures. This model covers three operating conditions: constant-speed cruising within sections, deceleration for station approach, and acceleration after station departure. Next, the double objectives of minimizing construction cost and optimizing operational efficiency were combined into a single objective through weighting determined by the analytic hierarchy process. Design requirements, including power supply capacities and safety braking requirements, were expressed as mathematical constraints, for iterative solution with given convergence criteria. Simulation verification was finally conducted in a 300 km main-line scenario with intermediate stations to connect branch lines, for constraint-free, mild-constraint, and severe-constraint cases. Key results are as follows: the minimum tracking headway along the entire line in the constraint-free case was 271.82 s, falling within the design limit of 300 s; efficiency loss was kept below 4% in the mild-constraint case without additional facilities; in the severe-constraint case, the reference tracking headway was maintained by adaptively increasing the number of block sections and ASAs while fully avoiding prohibited setting zones. By overcoming the limits of conventional sequential design, the proposed approach adapts well to geographical constraints along complex lines and offers a technical support for integration design and engineering application of operational control systems for long high-speed maglev main lines.

Keywords: high-speed maglev train; tracking train headways; block section division; layout of auxiliary stopping areas