



基于双层优化的虚拟编组高效节能协同控制策略研究

蒋思盾¹, 冯江华^{1,2}, 张征方², 史可², 罗钦洋²

(1. 湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412007;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 虚拟编组是轨道交通领域研究的前沿技术之一, 为提升虚拟编组的运行效率、降低运行能耗, 文章提出了一种基于双层优化的高效节能协同控制策略。其中, 上层为高效优化策略层, 负责构建高效起车和停车目标函数, 设计多目标遗传算法, 从而得到关键决策信息, 并将关键决策信息作为双层模型的中间传递量; 下层为节能优化策略层, 负责构建节能目标函数, 通过多目标粒子群算法优化巡航曲线, 实现虚拟编组在起车、巡航和停车三阶段协同控制多目标运行。仿真结果表明, 当速度在0~70 km/h时, 虚拟编组起车或停车协同控制时间间隔均控制在5 s以内; 同时, 虚拟编组可在巡航阶段保证运行时间的条件下, 使节能指标提高5.8%, 有效提高了虚拟编组全阶段的运行效率和能量利用。

关键词: 虚拟编组; 协同控制; 双层优化; 多目标; 优化算法

中图分类号: U268.6; U292.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0122-09

0 引言

轨道交通不但能缓解城市道路交通拥堵问题, 还因其具有运量大、安全舒适等优点, 成为我国交通网络最重要的组成部分^[1], 但也面临着诸多挑战, 如潮汐运输需求的适应性、运输系统的能效利用率等^[2], 其中固定编组的运营组织方式难以实现“按需运输”^[3], 而虚拟编组 (Virtual Coupling, VC) 具有编组灵活、跟车间距短和运输效率高等优点, 受到广泛关注^[4]。

目前, 国内外一些相关学者对虚拟编组技术进行了深入研究。文献[5]针对虚拟编组技术在铁路岔道口可能引入额外安全约束从而影响线路实际容量的问题, 提出了一种能够实时捕获虚拟编组列车单元运行状态并响应转换的列车跟随模型。文献[6]在固定闭塞系统的基础上构建虚拟编组列车跟驰模型的状态流程图, 验证了新运营模式能够提高铁路的运载能力与运行效

率。文献[7]针对虚拟编组在双线交汇区段上面面临的冲突与通过效率问题, 提出了一种双层优化模型, 该编组模型不但可以确保编组结构的稳定性和均衡性, 还能提高既有线路通过率。在安全防护方面, 文献[8]针对虚拟编组控制系统中列车跟踪和避碰问题进行了研究, 采用基于广义模型预测和混合人工势场的控制器来实现虚拟编组的防碰撞控制和协同运行。文献[9]提出了一种基于拓扑流形的列车保护逻辑, 提高了虚拟编组运行的安全性和稳定性。文献[10]提出一种基于能量转换的虚拟编组安全防护方法, 说明了跟随车的紧急制动率差异是决定安全间隔的关键因素。在列车控制方面, 文献[11]提出一种基于模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 的列车虚拟编组技术方法, 旨在通过优化列车之间的耦合过程, 提高虚拟编组的运行效率和稳定性。文献[12]提出了一种基于双层优化的地铁列车控制方法, 上层设计轨迹规划, 下层采用MPC, 从而缩短地铁列车的跟踪间距。文献[13]提出了

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4301200)

通信作者: 冯江华, 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事牵引传动与控制的研究; E-mail: fengjh@csrzc.com

引用格式: 蒋思盾, 冯江华, 张征方, 等. 基于双层优化的虚拟编组高效节能协同控制策略研究[J]. 机车电传动, 2025(1): 122-130.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.103.

Citation: JIANG Sidun, FENG Jianghua, ZHANG Zhengfang, et al. Research on cooperative control strategy for high efficiency and energy saving in virtually coupled train sets based on two-layer optimization[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 122-130.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.103.

一种基于多车协同的制动控制算法, 通过分析虚拟编组的紧急停车场景定义了用于评价安全风险的总风险系数, 设计了制动力计算方法并验证了其正确性和有效性。

综上所述, 目前对于虚拟编组技术的研究主要集中在虚拟编组应用场景分析、安全防护模型的计算和编组运行过程中速度曲线优化, 没有对虚拟编组全阶段的高效节能协同控制目标进行研究, 存在以下问题: ①在起车阶段, 编组起车时间过长或跟踪间距过大, 影响整个编组运行效率; ②在巡航阶段, 编组需要保证每列车及其整体的能耗达到最优, 确保节能效果; ③在停车阶段, 编组需要保证列车单元在站台停车时的同步性, 降低停车阶段所需时间间隔, 提高编组运输效率。

为了实现虚拟编组的高效节能协同控制, 本文提出一种基于双层优化的虚拟编组协同控制策略。需要说明的是, 本文所提虚拟编组只针对2列车单元编组, 应用场景为城轨列车。首先, 搭建虚拟编组数学模型, 并对约束条件(如安全约束等)进行分析; 接着, 在

上层优化策略中构建虚拟编组高效起车、停车目标函数, 通过在优化约束条件下设计和优化控制器, 实现高效目标函数的求解, 得到起车和停车阶段的虚拟编组关键决策信息, 并传输给下层优化策略; 然后, 在下层优化策略中构建虚拟编组巡航阶段的节能目标函数, 通过在优化约束条件下设计和优化控制器, 实现节能目标函数的求解; 最后, 在满足高效、节能的目标下, 通过对虚拟编组的协同控制, 完成对虚拟编组全阶段的速度曲线规划。

1 虚拟编组协同控制拓扑构建与性能指标分析

1.1 协同控制拓扑构建

虚拟编组由地面、编组列车单元和车载通信等模块组成, 协同控制拓扑结构如图1所示。其中, 地面负责实时监控和调度虚拟编组, 提供运营信息; 车载通信模块实现编组列车单元之间的信息交换, 包括实时信息、位置共享和运行状态监测, 支持协同控制的数据需求。

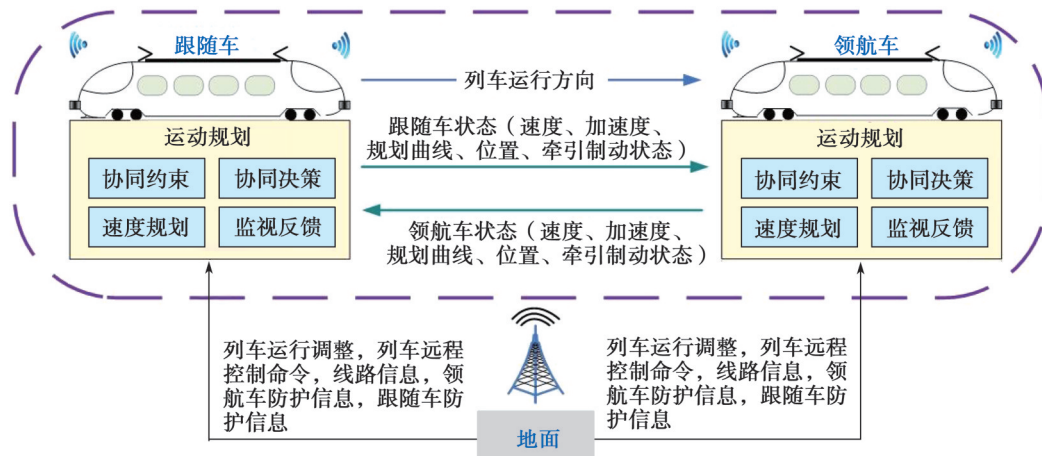


图1 虚拟编组协同控制拓扑结构

Fig. 1 Topology of cooperative control for virtually coupled train sets

态, 并根据反馈信息进行调整。

1.2 编组列车单元的运动规划

编组列车单元的运动规划由协同约束、协同决策、速度规划和监视反馈4个模块组成, 具体分析如下:

①协同约束模块。在运营过程中该模块负责对虚拟编组进行约束, 以确保编组安全和稳定运行, 包括线路运行信息、编组停车到站精准度、编组列车单元之间安全距离与停车时间差等。

②协同决策模块。该模块基于协同约束模块提供的约束信息, 确定状态变量和控制变量, 通过所需优化指标, 如编组运行效率和运行能耗, 来设计目标函数。

③速度规划模块。该模块根据协同约束和协同目标, 通过智能算法得到编组整个运行过程的最优操作序列, 动态生成最优速度规划曲线。

④监视反馈模块。该模块实时监测编组的运行状

2 协同控制模型与约束条件分析

2.1 列车动力学和运动学模型

对于城轨列车动力学模型, 通常将整辆列车简化成一个质点进行分析。列车在运行过程中受到各种外力作用, 主要有列车牵引力、制动力和运行阻力。运行阻力可以分为基本阻力、坡道附加阻力和弯道附加阻力。城轨列车的动力学数学模型可表示为:

$$\left. \begin{aligned} f_i &= f_{si}(s) + f_{ci}(s) + f_{bi}(s) + f_{ei}(s) + f_{pi}(s) \\ f_{si}(s) &= m \cdot g \cdot \sin \alpha \\ f_{ci}(s) &= \frac{K}{R(x)} \cdot m \cdot g \\ f_{bi}(s) &= \frac{m \cdot g \cdot (c_0 + c_1 v + c_2 v^2)}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: s 为列车位置; v 为列车速度; $f_{si}(s)$ 为坡道附加阻力; α 为坡道千分度; $f_{ci}(s)$ 为弯道附加阻力; $R(x)$ 为曲线半径; K 为常数, 取值为 600~700; $f_{bi}(s)$ 为基本阻力; m 为列车质量; g 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$; c_0 、 c_1 、 c_2 为列车的运行阻力系数; $f_{ei}(s)$ 为列车牵引力; $f_{pi}(s)$ 为空气制动力; i 为编组内领航车或跟随车, 其中“ $i=1$ ”代表领航车, “ $i=f$ ”代表跟随车。

根据牛顿第二定律, 城轨列车运动学模型可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) &= a_i(t) \\ \dot{a}_i(t) &= j_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: t 为时间; $v_i(t)$ 为列车速度; $s_i(t)$ 为列车位移; $a_i(t)$ 为列车加速度; $j_i(t)$ 为列车冲击率

2.2 约束条件分析

2.2.1 安全约束

相比于固定闭塞的固定距离安全约束, 虚拟编组采用基于相对距离的安全约束^[3]。图2为基于相对制动的安全跟踪距离计算原理示意图。

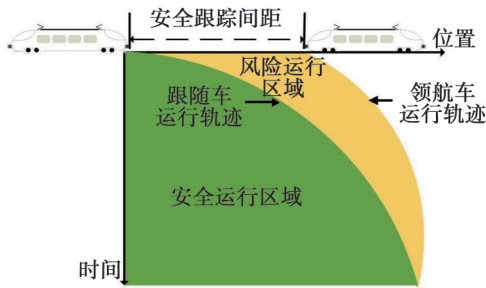


图2 基于相对制动的安全跟踪距离计算原理

Fig. 2 Principle of calculating safe tracking distance based on relative braking

该安全约束不但能够缩短编组列车单元之间的防护间距, 提高运行效率, 而且能适用于不同类型的铁路线路和编组列车单元组合, 增加运力调整的灵活性。其安全约束方程为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta s &= s_{l \text{ ini}} - s_{f \text{ ini}} \\ s_r &= s_l - s_f = \frac{v_{l \text{ ini}}^2 - v_{l \text{ end}}^2}{2a_l} - \frac{v_{f \text{ ini}}^2 - v_{f \text{ end}}^2}{2a_f} \\ s_r - L_l - s_{\min} &> \Delta s \\ 0 < v_{l \text{ ini}} &< v_{\text{ebi}} \\ 0 < v_{f \text{ end}} &< v_{\text{ebi}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Δs 为领航车和跟随车预备起车阶段两车静止距离 (编组列车单元的车头之间); s_r 为领航车和跟随车运行距离差; $v_{l \text{ ini}}$ 、 $v_{f \text{ ini}}$ 分别为领航车和跟随车初速度; $v_{l \text{ end}}$ 、 $v_{f \text{ end}}$ 分别为领航车和跟随车末速度; v_{ebi} 为线路限制速度; L_l 为领航车车长; $s_{\min}$ 为固定最小安全跟踪距离。

2.2.2 动力学特性约束

城轨列车特性约束主要是动力学约束, 对于编组内的每列列车而言, 具有综合牵引/制动特性动力学约束、坡道和基本阻力约束, 可以得到动力学特性约束为

$$f_{i \min}(x_i, v_i) \leq f_{ei}(u_e, v_i) \leq f_{i \max}(x_i, v_i) \quad (4)$$

式中: u_e 为单位操纵级位; x_i 为列车单元位置; $f_{i \min}(x_i, v_i)$ 为列车单元最小牵引/制动力; $f_{i \max}(x_i, v_i)$ 为列车单元最大牵引力/制动力。

为保证操纵平稳性, 牵引/制动级位变化斜率约束需满足

$$\Delta f_{i \min}(x_i, v_i) \leq \Delta f_{ei}(u_e, v_i) \leq \Delta f_{i \max}(x_i, v_i) \quad (5)$$

式中: Δ 为采样状态的差值。

2.2.3 时延特性约束

虚拟编组时延特性主要受编组列车单元相互作用的影响, 具有以下时延特性约束: 编组列车单元的通信延迟、响应时间和系统的处理时间。其时延约束特性为

$$T_d = T_r + T_c + T_{d \text{ int}} \quad (6)$$

式中: T_d 为总时延; T_r 为响应时延 (列车单元接收到指令到开始响应的的时间); T_c 为控制时延; $T_{d \text{ int}}$ 为列车单元的相互作用时延 (由列车单元之间的通信和调度引起的延迟)。

2.2.4 性能指标约束

1) 停车位置约束

虚拟编组列车到站停车位置超过或不及规定的停车点过多将导致列车出现停车但屏蔽门无法开启的情况发生, 导致乘客对列车运营系统可靠性产生怀疑。因此, 在虚拟编组列车停车过程中, 虚拟编组列车的停车误差应该不超过设定的停车规定点误差, 其位置约束为

$$|s_i - s_{\text{end}}| < s_{\text{error}}, \quad i=1 \text{ or } f \quad (7)$$

式中: s_i 为虚拟编组列车实时停车点; s_{end} 为规定的停车点; s_{error} 为停车规定点误差, 一般要求 $s_{\text{error}} = \pm 30 \text{ cm}$ ^[14]。

2) 乘坐舒适性约束

在编组列车运行过程中, 必须保证乘客舒适性。为衡量乘客舒适性, 采用舒适度进行表征, 舒适度定义为单位时间里加速度的累加和, 其数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} C &= \int \left| \frac{da}{dt} \right| dt \\ J_{\text{erk}} &= \frac{da}{dt} \\ |J_{\text{erk}}| &\leq J_{\text{erk max}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: C 为舒适度指标; t 为运行时间; a 为此运行时间段内的停车制动减 (加) 速度值; J_{erk} 为冲击率, J_{erk} 越小, 乘客舒适性越好, 一般要求 $J_{\text{erk}} = 0.75 \text{ m/s}^3$ ^[15]。

3) 时间约束

虚拟编组列车协同控制过程受到的时间约束为编

组列车运营时间, 时间约束为

$$|t_r - t_i| < t_{\text{error max}}, \quad i=1 \text{ or } f \quad (9)$$

式中: t_i 为列车运行时间; t_r 为两站之间固定的运营时间; $t_{\text{error max}}$ 为设定的最大误差值。

3 基于双层优化的高效节能协同控制策略

虚拟编组列车运行过程中的起车、停车和巡航阶段的目标和优化控制量相互影响, 优化控制量之间也相互耦合约束。为了使本文所设计的双层优化策略具有领先性、适应性和全局优化等优势, 通过以下三个方面进行提升: ①双层优化模型在面对复杂运行环境时, 通过跨

阶段信息传递和优化协调, 使得各个阶段之间的优化决策更加一致和协调, 提升虚拟编组协同控制系统的效率。②采用多目标遗传算法处理虚拟编组在起车和停车阶段的多约束多目标效率优化问题。该算法能够充分利用其全局搜索能力和多目标优化特性, 实现起车和停车阶段的效率最大化。③采用多目标粒子群算法处理虚拟编组在巡航阶段的多约束多目标能耗优化问题。该算法通过粒子之间的协同作用, 不仅可以使虚拟编组列车在巡航阶段能耗降低, 还能保证虚拟编组列车运行的安全性和平稳性。本文所提的基于双层优化的虚拟编组高效节能协同控制策略控制框图如图3所示。

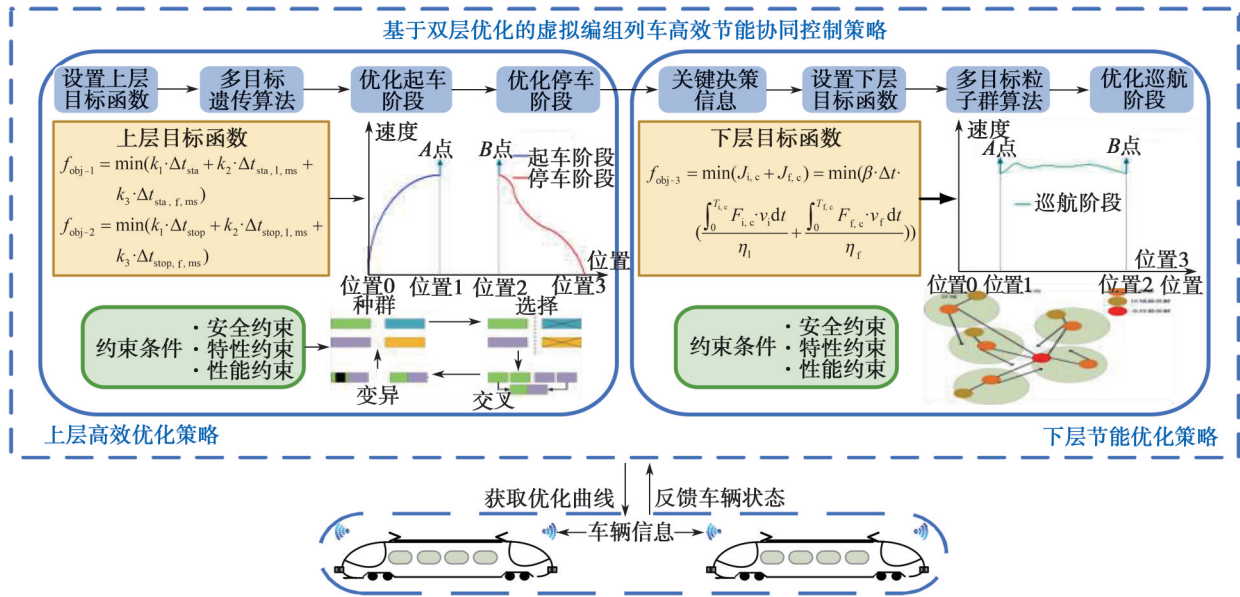


图3 基于双层优化的虚拟编组列车高效节能协同控制策略控制框图

Fig. 3 Block diagram of cooperative control strategy for high efficiency and energy saving in virtually coupled train sets based on two-layer optimization

3.1 上层高效优化策略

为了减少虚拟编组列车在起车和停车阶段的运行时间, 提升运输效率, 通过求解最优时间目标下虚拟编组列车的起车和停车状态, 包括速度和位置, 从而实现高效起车和精准停车的目标。由于起车阶段和停车阶段的逻辑大体一致, 本文以起车阶段为例构造目标函数。

3.1.1 目标函数构造

虚拟编组列车在起车阶段的时间 T_{sta} 为

$$T_{\text{sta}} = |t_{\text{sta l}} - t_{\text{sta f}}| = \left| \frac{v_{\text{sta l end}}}{a_{\text{sta l}}} - \frac{v_{\text{sta f end}}}{a_{\text{sta f}}} \right| \quad (10)$$

式中: $v_{\text{sta l end}}$ 为领航车在起车阶段的末速度; $v_{\text{sta f end}}$ 为跟随车在起车阶段的末速度; $a_{\text{sta l}}$ 为领航车在起车阶段的实际加速度; $a_{\text{sta f}}$ 为跟随车在起车阶段的实际加速度。

领航车起车阶段的最优时间 $T_{\text{sta l ms}}$ 为

$$T_{\text{sta l ms}} = t_{\text{sta l}} - t_{\text{sta l ms}} = \frac{v_{\text{sta l end}}}{a_{\text{sta l}}} - \frac{v_{\text{sta l ms}}}{a_{\text{sta l opt}}} \quad (11)$$

式中: $v_{\text{sta l ms}}$ 为领航车在起车阶段最优位置的末速度; $a_{\text{sta l opt}}$ 为虚拟编组列车在起车阶段用时间最短时的领航车加速度。

跟随车起车阶段的最优时间 $T_{\text{sta f ms}}$ 为

$$T_{\text{sta f ms}} = t_{\text{sta f}} - t_{\text{sta f ms}} = \frac{v_{\text{sta f end}}}{a_{\text{sta f}}} - \frac{v_{\text{sta f ms}}}{a_{\text{sta f opt}}} \quad (12)$$

式中: $v_{\text{sta f ms}}$ 为跟随车起车阶段最优位置的末速度; $a_{\text{sta f opt}}$ 为虚拟编组列车在起车阶段用时间最短时的跟随车加速度。

综上所述, 包含优化状态量的起车阶段目标函数设计为

$$f_{\text{obj1}} = \min(k_1 T_{\text{sta}} + k_2 T_{\text{sta l ms}} + k_3 T_{\text{sta f ms}}) = \min[k_1 |t_{\text{sta l}} - t_{\text{sta f}}| + k_2 (t_{\text{sta l}} - t_{\text{sta l ms}}) + k_3 (t_{\text{sta f}} - t_{\text{sta f ms}})] \quad (13)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 为相关目标的权重系数。

根据设计的优化控制量 a_{sta1} 、 $a_{sta f}$ 和式(12), 可以得到包含优化控制量的起车阶段目标函数展开式为

$$f_{obj1} = \min \left[k_1 \left| \frac{v_{sta1end}}{a_{sta1}} - \frac{v_{sta fend}}{a_{sta f}} \right| + k_2 \left(\frac{v_{sta1end}}{a_{sta1}} - \frac{v_{sta1ms}}{a_{sta1opt}} \right) + k_3 \left(\frac{v_{sta fend}}{a_{sta f}} - \frac{v_{sta fms}}{a_{sta fopt}} \right) \right] \quad (14)$$

通常, $a_{sta1opt}$ 、 $a_{sta fopt}$ 和 $v_{sta1end}$ 为已知变量, a_{sta1} 、 $a_{sta f}$ 和 $v_{sta fend}$ 为未知变量, k_1 、 k_2 和 k_3 分别为目标 T_{sta} 、 T_{sta1ms} 和 $T_{sta fms}$ 的权重系数, 一般认为 k_1 、 k_2 和 k_3 均为 1。

同理, 停车阶段的目标函数展开式为

$$f_{obj2} = \min (k_4 T_{sto} + k_5 T_{sto1ms} + k_6 T_{sto fms}) = \min \left[k_4 \left| \frac{-v_{sto1ini}}{a_{sto1}} - \frac{-v_{sto fini}}{a_{sto f}} \right| + k_5 \left(\frac{-v_{sto1ini}}{a_{sto1}} - \frac{-v_{sto1ms}}{a_{sto1opt}} \right) + k_6 \left(\frac{-v_{sto fini}}{a_{sto f}} - \frac{-v_{sto fms}}{a_{sto fopt}} \right) \right] \quad (15)$$

式中: $v_{sto1ini}$ 为停车阶段领航车的初始速度; $v_{sto fini}$ 为停车阶段跟随车的初始速度; k_4 、 k_5 和 k_6 为相关目标的权重系数。

通过目标函数可知, 对于虚拟编组的目标加速度优化是 Pareto 最优问题, 因此需要对该目标函数进行多目标遗传算法寻优求解。

3.1.2 多目标遗传算法与求解

根据式(14)和式(15)设计多目标遗传算法^[16], 其框架如图 4 所示, 所设计的多目标遗传算法执行步骤如下:

步骤 1: 将式(14)和式(15)作为多目标遗传算法的适应度函数, 即求 f_{obj1} 和 f_{obj2} 的最小值。

步骤 2: 初始化程序参数, 随机生成初始种群 (种群数设置为 100)。

步骤 3: 根据种群中个体的适应度大小, 通过轮盘赌等方式将适应度高的个体从当前种群中选择出来。

步骤 4: 在上一个步骤中, 已经选择出了可以产生后代的亲本染色体, 现在对染色体 (在上一个步骤中选出来的) 进行交叉。

步骤 5: 变异概率设置为 0.05。

步骤 6: 得到多目标优化函数的 Pareto 解集, 得到优化控制变量 $u_{sta} = [a_{sta1}, a_{sta f}, v_{sta fend}]$ 和 $u_{sto} = [a_{sto1}, a_{sto f}, v_{sto fini}]$ 的值。

3.2 下层节能优化策略

为了在巡航阶段实现节能目标, 虚拟编组通过上层优化策略传递的关键决策信息, 用以确定编组的巡航区间和初始参数, 并采用多目标粒子群算法进行优化, 从而达到对巡航阶段的节能需求。

3.2.1 目标函数构造

在巡航阶段, 编组列车单元为牵引工况, 其牵引能耗为

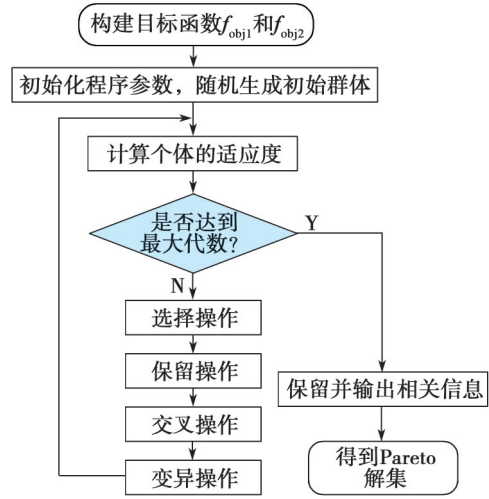


图 4 多目标遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of multi-objective genetic algorithm

$$J_c = \int_0^{T_c} P_c dt = \int_0^{T_c} F_c \cdot \frac{s_c}{t_c} dt = \int_0^{T_c} F_c v_c dt \quad (16)$$

式中: J_c 为巡航时牵引能耗; P_c 为巡航时功率; F_c 为巡航时列车牵引力; v_c 为列车速度; s_c 为巡航距离; T_c 为计算时长; t_c 为巡航时长。

领航车和跟随车在巡航阶段的能耗模型分别为:

$$\left. \begin{aligned} J_{lc} &= \frac{\beta}{\eta_l} \int_0^{T_{lc}} F_{lc} \cdot v_{lc} dt \\ J_{fc} &= \frac{\beta}{\eta_f} \int_0^{T_{fc}} F_{fc} \cdot v_{fc} dt \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: β 为系统请求的牵引力百分比; η 为牵引传动总效率。

根据上述分析确定虚拟编组列车巡航阶段能耗模型为

$$f_{obj3} = \min J = \min (J_{lc} + J_{fc}) \quad (18)$$

由目标函数可知, 对虚拟编组的能耗模型进行优化, 需对该目标函数进行多目标粒子群算法寻优求解。

3.2.2 多目标粒子群算法与求解

根据目标函数表达式(18)设计多目标粒子群算法^[17], 其框架如图 5 所示。所设计的多目标遗传算法执行步骤如下:

步骤 1: 将式(18)作为多目标粒子群算法的适应度函数, 即求 f_{obj3} 最小值。

步骤 2: 粒子各参数初始化。

步骤 3: 计算粒子的初始适应度值。

步骤 4: 让所有粒子更新自己所经过的个体最优位置 p_{best} 。

步骤 5: 根据“步骤 3”的结果, 通过粒子间的信息交流更新粒子群体所经历的最佳位置 g_{best} 。

步骤 6: 根据粒子速度和位置公式, 更新粒子速度和位置, 计算各粒子适应度值, 并比较粒子当前适应度和历史最优解。

步骤 7: 当搜索结果满足终止条件, 则输出求解结果; 否则跳转至“步骤 2”, 继续迭代寻优, 直至满足终止条件, 算法结束。

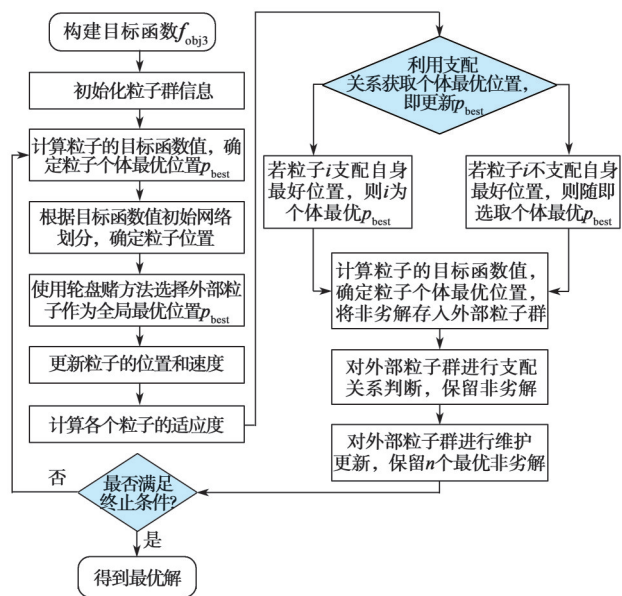


图 5 多目标粒子群算法流程图

Fig. 5 Flow chart of multi-objective particle swarm algorithm

4 仿真分析

本章运用仿真软件对本文提出的基于双层优化的虚拟编组列车协同控制策略进行验证, 仿真结果主要根据前文所提的约束条件进行评估, 如虚拟编组协同控制过程中的时间应不超过编组运营时间、停车精准

度一般为±30 cm(根据现场试验情况, 本文采用更宽泛的精度±50 cm), 以及列车单元之间距离应满足最小安全跟车间距等。

4.1 仿真环境和参数设计

仿真系统采用 MATLAB R2021a 软件搭建, 计算机 CPU 型号为 Intel(R) Xeon(R) W-3223, 处理速度为 3.5 GHz, RAM 为 64.0 GiB。

对实际运行数据(长沙轨道交通 4 号线的线路数据和列车数据)进行分析, 在两站之间对基于双层优化的虚拟编组列车协同控制策略进行仿真, 其中仿真方案的参数设计如表 1 所示, 仿真控制器参数设计如表 2 所示。在仿真方案中, 领航车和跟随车的固定安全跟踪距离为 1 m, 目标停车距离为 5.92 m。在领航车初始速度已知的情况下, 在控制量约束区域内对不同目标函数进行寻优计算, 得到最优控制量(领航车停车加速度、跟随车停车加速度和跟随车最优初始速度)。该仿真方案以如下设定作为前提条件:

- ①通信延时时间为固定值(即系统处理周期设置为 0.1 s), 后续根据通信模型动态计算。
- ②领航车在起车、停车阶段的初始速度寻优范围为 0~50 km/h, 领航车在巡航阶段的初始速度寻优范围为 0~70 km/h, 步长都为 0.2 km/h。
- ③上层协同控制目标函数: $f_{obj1} = \min(k_1 T_{sta} + k_2 T_{sta1ms} + k_3 T_{sta fms})$ 和 $f_{obj2} = \min(k_4 T_{sto} + k_5 T_{sto1ms} + k_6 T_{sto fms})$ 。
- ④下层协同控制目标函数: $f_{obj3} = \min J = \min(J_{lc} + J_{fc})$ 。

表 1 仿真方案参数设计表

Table 1 Parameters for simulation scheme

参数名称	参数值	参数类别	参数名称	参数值	参数类别
编组列车起车位置(领航车)/m	490	状态变量	编组列车通信延时/s	0.5	状态变量
编组列车停车位置(领航车)/m	1 380	状态变量	编组固定安全跟踪距离/m	1	约束变量
编组列车速度迭代步长/(m·s ⁻¹)	0.06	控制变量	编组列车单元车长/m	118.79	状态变量
编组列车加速度优化区域/(m·s ⁻²)	[0.1, 1]	控制变量	编组列车单元载质量/t	223	状态变量
上层编组速度寻优范围/(km·h ⁻¹)	[0,50]	控制变量	编组列车单元制动力范围/kN	[240,-240]	状态变量
下层编组速度寻优范围/(km·h ⁻¹)	[0,70]	控制变量	牵引力百分比/%	90	状态变量
编组列车目标起车距离/m	5.92	状态变量	牵引传动总效率/%	90	状态变量
编组列车目标停车距离/m	5.92	状态变量	系统控制周期/s	0.1	状态变量

表 2 仿真方案控制器参数设计表

Table 2 Controller parameters for simulation scheme

参数名称	参数值	参数类别	参数名称	参数值	参数类别
MOGA 最优个体系数	0.3	上层控制器参数	MOPSO 粒子群大小	10	下层控制器参数
MOGA 种群大小	100	上层控制器参数	MOPSO 最大进化代数	50	下层控制器参数
MOGA 最大进化代数	200	上层控制器参数	MOPSO 个体学习因子	2	下层控制器参数
MOGA 停止代数	200	上层控制器参数	MOPSO 社会学习因子	2	下层控制器参数
MOGA 交叉概率	0.9	上层控制器参数	MOPSO 权重变化范围	[0.2,1.2]	下层控制器参数
MOGA 变异概率	0.05	上层控制器参数	MOPSO 函数容忍度	1E-8	下层控制器参数
MOGA 适应度函数偏差	1×1 ⁻¹⁰	上层控制器参数			

4.2 仿真结果分析

4.2.1 上层高效优化分析

在上层协同控制优化中通过多目标遗传算法得到最优控制量（领航车停车加速度、跟随车停车加速度

和跟随车最优初始速度）的数据（如图6所示），并根据列车运动学模型，得到剩余的状态量，如领航车初始位置、跟随车初始位置、领航车停车时间、跟随车停车时间等（如图7所示）。

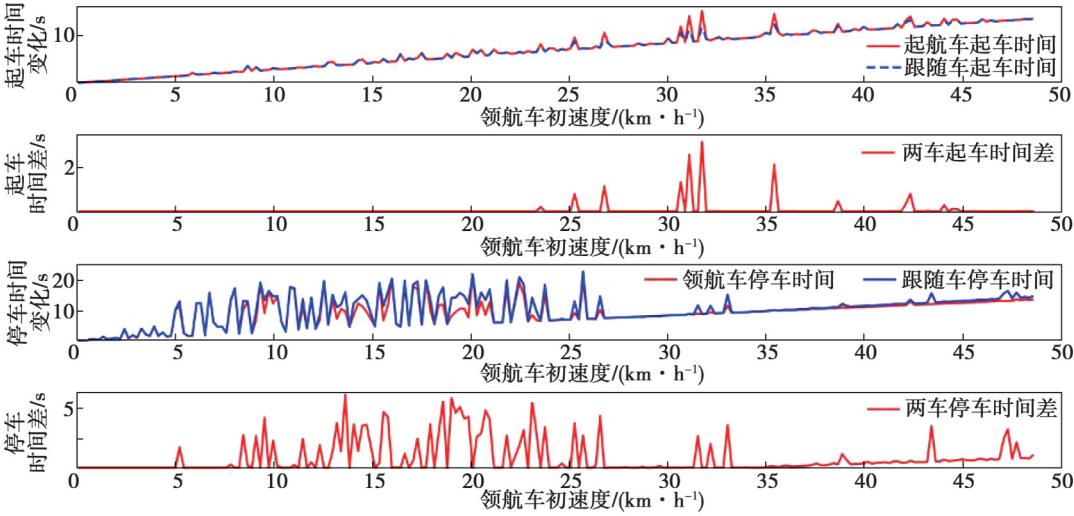


图6 最优控制目标(时间)
Fig. 6 Optimal control objective (time)

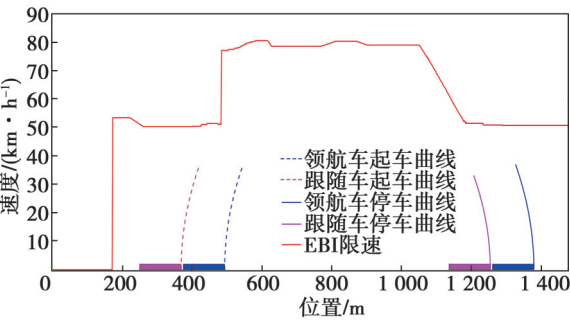


图7 起车和停车阶段速度曲线规划
Fig. 7 Speed curve planning during departing and stopping phases

由图6可知，在起车阶段，编组列车单元的起车时间差能被控制在3 s以内；在停车阶段，编组列车单元的停车时间差也被控制在5 s以内。这不仅缩减了列车单元在起车和停车阶段协同控制所需的时间，而且有效提升了整个编组列车的运行效率。但在上层协同控制优化过程中，由于受到相对安全距离模型等约束条件限制，导致遭遇更多的局部最优解，这无疑提升了搜索过程的复杂性，并增加了结果的波动性。

由图7可知，在编组起车阶段，编组列车单元之间成功维持了预定的最终起车距离，即5.92 m，这展现了本文所提策略在起车过程中的精确控制能力；在编组停车阶段，领航车停车终点为1 380.04 m，而跟随车停车终点为1 254.99 m。两者在停车阶段的最终间距为6.26 m，与设定的目标停车距离5.92 m相比，误差值为0.34 m，小于阈值0.50 m。这一结果不仅证实了本文所提策略能够提高虚拟编组列车起车和停车效率，而且能达到较高的精度要求，体现了本策略在实现虚拟编

组列车起停过程中的可靠性和稳定性。

4.2.2 下层节能优化分析

在下层协同控制优化中，通过上层协同控制优化传递的关键决策信息（即起车阶段终点、停车阶段起点的位置和速度等信息），采用多目标粒子群算法对虚拟编组的能耗模型进行协同控制优化，得到编组列车单元各自的最优能耗操作序列，其中优化巡航数据如表3所示。

表3 优化巡航数据结果

Table 3 Results of optimized cruising data

方案	巡航时间/s	牵引能耗/(kW·h)	节能率/%
恒速	24.749	12 472.06	
MOPSO	24.744	11 749.09	5.8

由表3可知，在线路限速、坡度变化和冲击率等多约束条件下，得到虚拟编组最优能耗操作序列，MOPSO方案相比于恒速方案在坡道路段上减少了约5.8%的能耗；同时，编组列车巡航时间误差为0.005 s，保证了虚拟编组列车巡航阶段的安全性。

通过采用双层优化策略，本文实现了城轨列车虚拟编组列车在起车、巡航和停车的高效节能协同控制，在保障编组列车安全的前提下（如图8所示），完成了全阶段的速度曲线规划（如图9所示）。

由图8和图9可知，在任何位置，编组列车单元的实时位置距离差都大于最低安全跟车间距1 m，满足安全约束要求。图9中“红色”标记点为巡航阶段的关键决策信息，“黑色”标记点为节能优化阶段的关键决策信息。领航车和跟随车根据不同的牵引力得到其理想

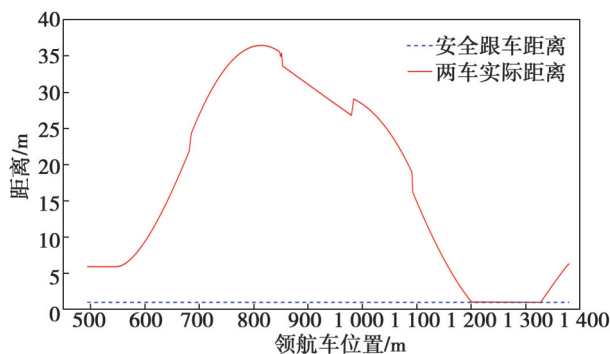


图8 虚拟编组列车三阶段安全距离

Fig. 8 Safe distances within virtually coupled train sets in three phases

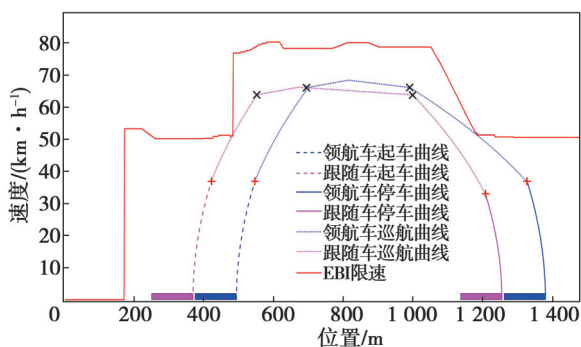


图9 虚拟编组列车三阶段速度曲线规划

Fig. 9 Speed curve planning for virtually coupled train sets in three phases

加速度, 获得各自最优速度曲线; 同时, 编组列车单元在整个阶段的速度均处于EBI曲线之下, 证明了该系统的可靠性。

5 结束语

本文提出了一种基于双层优化的虚拟编组列车高效节能协同控制策略, 设计多目标遗传算法和多目标粒子群算法, 分别解决虚拟编组列车起车停车阶段效率优化问题和巡航阶段的节能优化问题。仿真结果表明, 在速度0~70 km/h内, 虚拟编组起车或停车协同控制时间间隔均控制在5 s以内; 同时, 虚拟编组列车可在巡航阶段保证运行时间的条件下, 使节能指标提高5.8%, 有效提高了虚拟编组列车全阶段的运行效率和能量利用, 对虚拟编组列车在既有线路的运能提升和灵活运输具有工程应用价值。后续将考虑基于不同列车单元数量、不同列车单元类型等场景下的虚拟编组列车协同控制策略, 提升该策略的通用性。

参考文献:

[1] 冯江华, 肖磊, 胡云卿. 智能轨道快运系统[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 1-12.
FENG Jianghua, XIAO Lei, HU Yunqing. Autonomous-rail rapid transit[J]. Control and information technology, 2020 (1): 1-12.

[2] 冯江华. 轨道交通装备技术演进与智能化发展[J]. 控制与信息技术, 2019(1): 1-6.
FENG Jianghua. Technical evolution and intelligent development of rail transit equipments[J]. Control and information technology, 2019(1): 1-6.

[3] 刘宏杰, 唐涛, 张艳兵, 等. 城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 28-35.
LIU Hongjie, TANG Tao, ZHANG Yanbing, et al. Discussion on the key performance indicators and technologies of virtual coupling in metros[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 28-35.

[4] 游婷, 马法运, 苗峰, 等. 城市轨道交通虚拟编组列车优化运行方案研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 36-42.
YOU Ting, MA Fayun, MIAO Feng, et al. Optimal operation plan design for virtually coupled trains in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 36-42.

[5] QUAGLIETTA E, WANG Meng, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of rail transport planning & management, 2020, 15: 100195.

[6] DUAN Haixiao, YANG Yunan, DUAN Yi, et al. Research on virtual coupling train operations based on moving-block and vehicle-to-vehicle communication[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1631(1): 012004.

[7] 宁正, 张雷, 何积丰. 面向冲突化解的双线交汇区段列车编队双层优化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 18-26.
NING Zheng, ZHANG Lei, HE Jifeng. Virtual coupling train marshaling bi-level optimization model for conflict resolution at junctions[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2024, 52(1): 18-26.

[8] CAO Yuan, WEN Jiakun, MA Lianchuan. Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system[J]. Future generation computer systems, 2021, 120: 76-90.

[9] ZHANG Yong, WANG Haifeng, JAMES P, et al. A train protection logic based on topological manifolds for virtual coupling[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(8): 11930-11945.

[10] 常鸣, 崔科, 王维旸, 等. 基于动势能转换的虚拟编组列车动态最小安全间隔[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 41-48.
CHANG Ming, CUI Ke, WANG Weiyang, et al. Dynamic minimum safety distance of virtual coupled trains based on kinetic-potential energy conversion[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2024, 52(1): 41-48.

[11] FELEZ J, KIM Y, BORRELLI F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2728-2739.

[12] LIU Hongjie, LUO Xiaolin, TANG Tao, et al. A hierarchical control approach for virtual coupling in metro trains[J].

- Computer-aided civil and infrastructure engineering, 2024, 39(9): 1318-1336.
- [13] 张蕾, 李子牧, 鄢永耀, 等. 面向虚拟编组的多列车协同制动控制算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(10): 3027-3036.
- ZHANG Lei, LI Zimu, YAN Yongyao, et al. Brake control algorithm for virtually coupled trains based on multi vehicle cooperation[J]. Journal of Jilin university(engineering and technology edition), 2024, 54(10): 3027-3036.
- [14] 高翔. 城市轨道交通列车停站定位精度随机误差研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(增刊2): 14-17.
- GAO Xiang. On random error of trains stopping at urban rail transit station[J]. Urban mass transit, 2014, 17(Suppl 2): 14-17.
- [15] 张安. 北京昌平线地铁车辆[J]. 机车电传动, 2011(3): 56-60.
- ZHANG An. Metro vehicle of Beijing Changping Line[J]. Electric drive for locomotives, 2011(3): 56-60.
- [16] 华润恺, 李杰. 基于遗传算法的城轨列车自动驾驶规划速度曲线生成研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2024, 32(3): 1-5.
- HUA Runkai, LI Jie. Research on the generation of urban rail train automatic operation planning speed curve based on genetic algorithm[J]. Rail transportation equipment and technology, 2024, 32(3): 1-5.
- [17] 黄友能, 宫少丰, 曹源, 等. 基于粒子群算法的城轨列车节能驾驶优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 118-124.
- HUANG Youneng, GONG Shaofeng, CAO Yuan, et al. Optimization model of energy-efficient driving for train in urban rail transit based on particle swarm algorithm[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2016, 16(2): 118-124.

Research on cooperative control strategy for high efficiency and energy saving in virtually coupled train sets based on two-layer optimization

JIANG Sidun¹, FENG Jianghua^{1,2}, ZHANG Zhengfang², SHI Ke², LUO Qinyang²

(1. College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Virtual coupling is one of the cutting-edge technologies under research in the field of rail transportation. In order to improve operational efficiency and reduce operational energy consumption for virtually coupled train sets, this paper proposes a cooperative control strategy based on a two-layer optimization approach. The upper layer focuses on efficiency optimization, establishing an objective function aimed at facilitating efficient departures and stops, and employing a multi-objective genetic algorithm to generate key information for decision-making. This key information serves as intermediate transfer variables within this two-layer model. The lower layer concentrates on energy-saving optimization, establishing an objective function for energy saving and utilizing a multi-objective particle swarm algorithm to optimize cruising curves. These configurations enable the operation of virtually coupled train sets under multi-objective cooperative control across the three phases of departing, cruising, and stopping. Simulation results show that, within the speed range of 0 to 70 km/h, the cooperative control strategy achieves a time interval of less than 5 seconds within the virtually coupled train sets for both departing and stopping. Furthermore, the energy-saving index of these train sets is improved by 5.8% under the condition of guaranteeing the operation duration of the cruising phase. These results demonstrate effective improvements in both operational efficiency and energy utilization for virtually coupled train sets across all the phases.

Keywords: virtually coupled train sets; cooperative control; two-layer optimization; multi-objective; optimization algorithm