文章编号：1003-1421(2026)02-0088-11
引用格式：王泓钰，李一楠，陈佩耀，等. 基于改进MPC的重载列车虚拟编组协同运行控制方法研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(2)：88-98.
WANG Hongyu，LI Yinan，CHEN Peiyao，et al. Research on Cooperative Operation Control Methods of Virtual Coupling for Heavy-Haul Trains Based on Improved MPC[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：88-98.

基于改进MPC的重载列车虚拟编组协同运行控制方法研究

王泓钰[1]，李一楠[2]，陈佩耀[3]，易海旺[2]，侯大山[2]

(1.中国铁道科学研究院 研究生部，北京 100081；2.中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所，北京 100081；3.中国铁路西安局集团有限公司 新丰镇车站，陕西 西安 710608)

摘 要：重载铁路虚拟编组运行追踪间隔存在一定优化空间，因而提出基于模型预测控制(MPC)的协同控制方法。首先建立重载列车多质点动力学模型及“撞软墙”动态间隔控制模型，并对模型进行离散化处理；在此基础上，设计适配重载虚拟编组运行控制的MPC优化算法，结合卡尔曼滤波进行状态估计，以速度跟踪误差、车间距误差为多目标函数，求解牵引/制动力最优序列。最后，基于某铁路局集团公司管内线路参数构建双编组列车闭环仿真系统，针对编组建立、协同运行及解编阶段的场景，分析列车编组动态特性。仿真结果表明，在编组建立阶段，后车速度跟踪误差逐步收敛至0.4 km/h，车间距维持在预设安全阈值附近；在协同运行阶段，车间距误差≤20 m；在解编阶段，安全间隔全程满足动态约束。验证了MPC在重载虚拟编组协同优化中的有效性，为重载列车虚拟编组实现小间隔追踪提供参考。

关键词：重载铁路；虚拟编组；模型预测控制；卡尔曼滤波；协同运行
中图分类号：U284 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250530003

Research on Cooperative Operation Control Methods of Virtual Coupling for Heavy-Haul Trains Based on Improved MPC

WANG Hongyu[1]，LI Yinan[2]，CHEN Peiyao[3]，YI Haiwang[2]，HOU Dashan[2]

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3. Xinfengzhen Railway Station, China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710608, Shaanxi, China)

Abstract: To optimize tracking intervals in virtual coupling operations of heavy-haul railways, a model predictive control (MPC)-based cooperative control method was developed. A multi-mass-point dynamic model and a “soft wall” collision dynamic spacing control model were established for heavy-haul trains, with subsequent model discretization. A MPC optimization algorithm suitable for virtual coupling operation control of heavy-haul railways was then designed and combined with a Kalman filter for state estimation. This algorithm utilized a multi-objective function based on speed

收稿日期：2025-05-30 **修订日期**：2025-12-24
通信作者：李一楠(1981—)，男，北京人，中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所研究员。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(L2023G004)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023YJ312)；中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所科研项目(2024TH02)

tracking error and train interval error to generate optimal traction/braking force sequences. A dual virtual-coupled train closed-loop simulation system was constructed using railway line parameters of a railway group company. Dynamic coupling characteristics were analyzed across dynamic coupling, cooperative operation, and decoupling scenarios. Results demonstrate that during dynamic coupling, the following train's speed tracking error converges to 0.4 km/h with train interval error maintaining near safety thresholds. In the cooperative operation phase, train interval errors do not exceed 20 meters, while during decoupling, dynamic safety constraints are satisfied. The MPC effectiveness in virtual coupling coordination is verified. This study provides references for achieving reduced tracking intervals in virtual coupling for heavy-haul trains.

Keywords: Heavy-Haul Railway; Virtual Coupling; Model Predictive Control; Kalman Filter; Cooperative Operation

0　引言

重载铁路作为现代铁路运输的重要组成部分，在煤炭、矿石等大宗货物运输中发挥着关键作用。然而，随着运输需求不断攀升，重点线路运能紧张加剧。《“十四五”铁路科技创新规划》明确指出，要推动重载列车与货运装备的成熟运用，并开展3万吨级重载列车等技术的储备研发。当前提升运行速度、提高运输密度、提升列车载重是解决运能紧张的有效办法，但也面临诸多挑战。重载列车牵引质量和速度的提升将导致纵向冲动增加，进而车钩断裂风险增大，影响列车运行的稳定性和安全性。与此同时，长大编组列车的编组、解编等技术作业时间较长，受到发线长度、线路坡度等因素制约，运输密度难以进一步提高[1-2]。从列车运行控制角度研究小间隔追踪运行技术，可突破重载列车与线路条件等制约因素，是提升线路运输能力、降低安全隐患的重要方向。

虚拟编组的概念由德国学者Bock于1999年首次提出[3-4]，虚拟编组技术通过车车通信构建动态列车单元集群，突破了传统闭塞制式的物理限制，理论上可以实现“小间隔、同速度、群联控”的安全追踪运行。因此，以减小追踪间隔为导向的重载列车虚拟重联运行模式，是重载列车的发展方向，也是提升运行效率、缓解当前运能紧张的必要手段，国内外针对虚拟编组技术开展了前瞻性研究。

国外方面，欧洲Shift2Rail计划通过Moving Rail项目，从原理、技术及经济方面研究虚拟编组技术的可行性[5]。Flammin等[6]和Di Meo等[7]在欧洲铁路交通管理系统/欧洲列车控制系统(ERTMS/ETCS)标准规范中引入虚拟重联列车控制模式，使用有色Petri网模拟列车控制模式的转换过程，验证虚拟重联能够有效缩短列车运行时间间隔。Felez等[8]基于虚拟编组使用分散模型预测控制框架对每列车进行编队，设计并优化前行列车和跟随列车的控制器，证明与移动闭塞系统相比虚拟重联系统具备的优越性，显著降低了列车间的距离。西班牙铁路建设与辅助设备(CAF)公司和俄罗斯AVP科技(AVP Technology)公司分别在有轨电车和重载列车上成功验证了虚拟编组技术的可行性，展示了其在缩短追踪间隔和提升运输效率方面的潜力。国内方面，白金磊等[9]建立基于多质点模型的重载列车动力学模型，为虚拟编组列车的安全制动提供了理论支持。林正南等[10]提出基于自适应反馈的模型预测控制方法，有效提高了控制精度和稳定性。多智能体理论也被应用于虚拟编组列车的协同巡航控制中，何晖等[11]通过改进的势能函数，实现列车的稳定运行和安全间距控制。此外，我国也进行了系统性设备研发工作，包神铁路(万水泉—神东)北线的现场试验表明，虚拟编组下单线通过能力提升达55%[1]，预计可将万吨列车发车间隔压缩至5 min以内[12]。

综合国内外研究现状可以看出，重载铁路虚拟编组技术的研究处于基础理论与系统设备研发同步快速发展的时期。在基础理论方面，重点从系统运行机理、列车间隔控制、列车协同运行等方面开展研究，这些研究为重载列车虚拟编组技术应用提供了理论基础；在系统设备研发方面，目前主要是基于既有列控系统进行升级改造实现车车通信下的列车小间隔追踪，由于不同重载线路在通信条件、线路条件、机车车辆等方面存在显著差异，现有的基础理论与设备研发难以满足现场复杂的实际需求[13-14]，因此目前在虚拟编组体系架构与多车协同

控制等方面的研究还存在不足之处。

有鉴于此，面向更普适性的重载虚拟编组的实际需求，系统研究重载铁路虚拟编组方案及其控制方法。首先，针对单列车与编组运行模式分别建立重载列车多质点模型与运行控制模型，分析编组内“撞硬墙”与“撞软墙”间隔控制模型并对列车动力学模型进行离散化处理；最后基于模型预测控制，结合卡尔曼滤波估计，设计三级优化控制方法，并对编组建立、协同运行、编组解编3个阶段跟传统的比例–积分–微分控制(PID控制)进行对比仿真验证分析。

1　重载列车运行模型

1.1　多质点动力学模型

列车的动力学行为是列车运行控制的基础，其运动遵循牛顿第二定律。列车纵向动力学模型如图1所示，列车由多个车辆组成，每个车辆可以视为一个质点，整个列车系统可视为一个多质点系统。

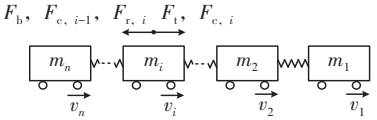


图1　纵向动力学模型

Fig.1　Longitudinal dynamics model

每个质点的运动状态由其位置和速度描述，其动力学方程可表示为

$$m_i\dot{v}_i = F_t - F_b + F_{c,i} - F_{c,i-1} - F_{r,i} \tag{1}$$

式中：m_i为第i个质点(车辆)的质量，t；$\dot{v}_i$为第i个质点的速度变化率，m/s^2；F_t为机车的牵引力，kN，仅作用于机车质点；F_b为第i个质点的制动力，kN，分为电制动力及空气制动力，电制动力仅作用于机车质点；$F_{c,i}$为第i个质点受到的后车钩的推拉力，kN，末质点没有此项；$F_{c,i-1}$为第i个质点受到的前车钩的推拉力，kN，首个质点没有此项；$F_{r,i}$为第i个质点受到的阻力，kN。

根据《列车牵引计算第1部分：机车牵引式列车》(TB/T 1407.1—2018)[15]，HXD_1型机车最大牵引/制动特性曲线如图2所示，可以近似表示为

$$F_{t,\max} = \begin{cases} 760 & v \in (0,\ 5] \\ 779 - 3.8v & v \in (5,\ 65] \\ 34\,560/v & v \in (65,\ 120] \end{cases} \tag{2}$$

$$F_{b,\max} = \begin{cases} 153.7v & v \in (0,\ 3] \\ 461 & v \in (3,\ 75] \\ 34\,560/v & v \in (75,\ 120] \end{cases} \tag{3}$$

式中：$F_{t,\max}$为最大牵引力，kN；$F_{b,\max}$为最大制动力，kN；v为机车当前运行速度，km/h。

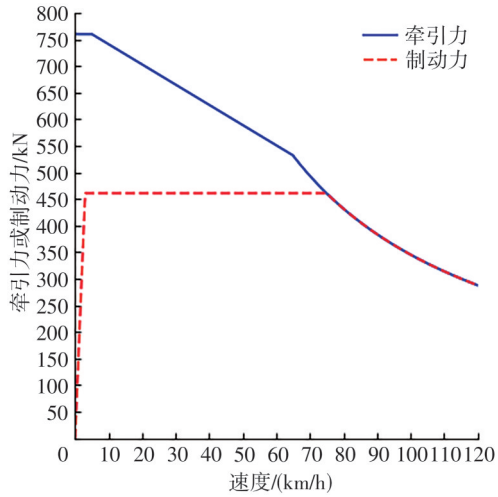


图2　最大牵引/制动特性曲线

Fig.2　Maximum traction/braking characteristic curve

考虑空气制动作用模型，具体空气制动计算如图3所示，重载列车闸瓦压力随时间变化趋势如图3中曲线$OAEF$所示，大致可用折线$OBDF$来表示，分为空走阶段(OB)和实制动阶段(DF)。空走阶段列车的空气制动力为0。实制动阶段闸瓦压力达到最大值，产生空气制动力。

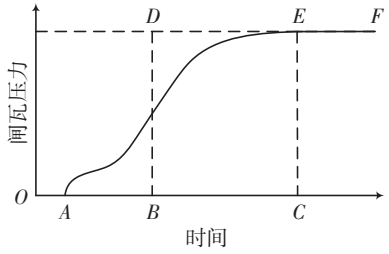


图3　空气制动计算

Fig.3　Calculation of air brake

OB段的时间称为空走时间t_k，货物列车常用制动的空走时间计算公式为

$$t_k = (3.6 + 0.001\,76r \cdot n)(1 - 0.032i_c) \tag{4}$$

式中：t_k为空走时间，s；r为列车管减压量，kPa；n为机车牵引辆数，辆；i_c为线路加权坡度，下坡为负，上坡取0。

紧急空气制动力B_{ba}可由换算式(5)得出，计算

公式为

$$B_{ba}=\varphi_h\cdot\sum K_h \tag{5}$$

式中：B_{ba}为紧急空气制动力，kN；φ_h为换算摩擦系数，$\varphi_h=0.378\dfrac{2v+150}{3v+150}$；$K_h$为换算闸瓦压力，kN。

列车常用制动时，空气制动力可以表示为

$$F_{ba}=\beta_c\cdot B_{ba} \tag{6}$$

式中：F_{ba}为列车常用制动时空气制动力，kN；β_c为常用制动系数，与减压量有关，常用制动系数取值如表1所示(列车管定压600 kPa)。

表1　常用制动系数取值

Tab.1　Common brake coefficient values

减压量/kPa	50	60	70	80	90	100	110	120	140	170
β_c	0.17	0.28	0.37	0.46	0.53	0.60	0.67	0.73	0.83	0.96

列车运行时受到多种阻力的影响，包括基本阻力、坡度附加阻力、曲线附加阻力和隧道空气附加阻力等，可以表示为

$$F_{r,i}=F_{g,i}+F_{p,i}+F_{q,i}+F_{s,i} \tag{7}$$

$$\begin{cases}F_{g,i}=(c_0+c_1v_i+c_2v_i^2)m_ig\\F_{p,i}=I_im_ig\sin(\theta_i)\\F_{q,i}=\dfrac{K_{r,i}}{R_i}m_ig\\F_{s,i}=\dfrac{1}{2}\rho C_{t,i}A_iv_i^2\end{cases} \tag{8}$$

式中：$F_{r,i}$为第i个质点受到的总阻力，kN；$F_{g,i}$，$F_{p,i}$，$F_{q,i}$，$F_{s,i}$分别为第i个质点受到的基本阻力、坡度附加阻力、曲线附加阻力和隧道空气附加阻力，kN；c_0，c_1，c_2为与车辆设计和运行条件相关的经验系数；v_i为第i个质点的速度，km/h；g为重力加速度，m/s^2；I_i为第i个质点处的坡度千分数；θ_i为坡度角，°；$K_{r,i}$为曲线阻力系数；R_i为第i个质点处的曲线半径，m；ρ为空气密度，kg/m^3；$C_{t,i}$为第i个质点的隧道空气阻力系数；A_i为第i个质点的迎风面积，m^2。

列车内部车辆之间通过车钩连接，车钩力对列车的纵向动力学行为有重要影响。车钩力可表示为相邻车辆的相对位移和相对速度的函数[16]，计算公式为

$$F_{c,i}=c_d(v_{i+1}-v_i)+c_k(s_{i+1}-s_i) \tag{9}$$

式中：c_d为车钩阻尼系数；c_k为车钩刚度系数；v_{i+1}为第$i+1$个质点的速度，km/h；s_{i+1}，s_i分别为第$i+1$个、第i个质点的位移，m。

当质点i减速运行时，后车钩弹簧被压缩，$F_{c,i}>0$，产生推力阻止后一节车接近，同时质点i受到后车钩的推力，车间距先减小后趋于平衡。质点i加速运行时，后车钩弹簧被拉伸，$F_{c,i}<0$，产生拉力牵引后一节车加速，同时质点i受到后车钩的拉力，车间距先增大后趋于平衡。

1.2　列车群组模型

在列车群组运行中，多列列车通过通信和控制技术实现协同运行，以提高线路的运输能力。列车群组模型考虑了列车之间的相对位置、速度和控制输入，以及列车内部的耦合关系。

对于一个由N列列车组成的群组，每列列车可以视为一个独立的多质点系统。群组的动力学方程可以表示为

$$\begin{cases}\dot{x}_{i,j}=v_{i,j}\\m_{i,j}\dot{v}_{i,j}=F_{t,i,j}-F_{b,i,j}+F_{c,i-1,j}-F_{c,i,j}-F_{r,i,j}\\F_{b,i,j}=F_{be,i,j}+F_{ba,i,j}\end{cases} \tag{10}$$

式中：$\dot{x}_{i,j}$和$v_{i,j}$分别为第j列列车中第i个质点的位置变化率和速度，km/h；$m_{i,j}$为第j列列车中第i个质点的质量，t；$\dot{v}_{i,j}$为第j列列车中第i个质点的速度变化率，m/s^2；$F_{t,i,j}$，$F_{b,i,j}$，$F_{c,i-1,j}$，$F_{c,i,j}$，$F_{r,i,j}$分别为第j列列车中第i个质点受到的牵引力、制动力、前车钩推拉力、后车钩推拉力及总阻力，kN；$F_{be,i,j}$，$F_{ba,i,j}$分别为第j列列车中第i个质点的电制动力和空气制动力，kN。

1.3　动态间隔控制模型

为了确保列车群组的安全运行，需要建立动态间隔控制模型。动态间隔控制模型考虑了列车的制动能力和线路条件，以确保在紧急情况下列车能够安全停车。重载列车虚拟编组系统采用“撞软墙”的制动模式，通过车载设备和车车通信网络，实时收集前方列车的位置和速度信息，并结合自身的运行状态，计算出最合适的间隔。撞硬墙和撞软墙示意如图4所示，在“撞软墙”模式下，后车基于实时车车无线传输，获取前车位置、速度、加速度、制动性能等信息，提前将后车制动过程中前车继续运行而动态释放的线路资源纳入后车防护速度计算，行车许可终点随着前车的速度、位置的变化而变化，从而缩短列车追踪间隔[17]。

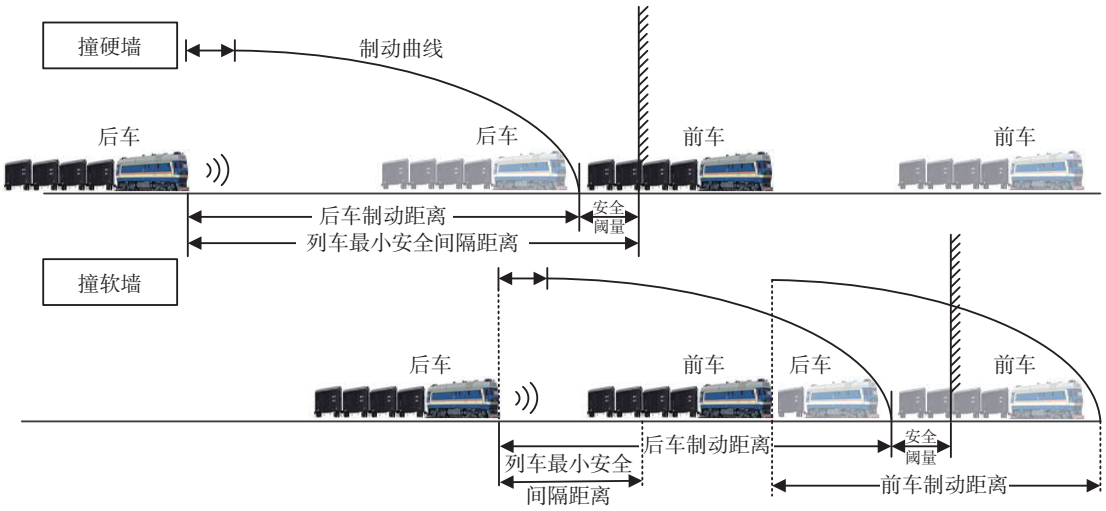


图4　撞硬墙和撞软墙示意

Fig.4　Illustration of "hard wall" and "soft wall" collisions

假设$t=0$时刻前车紧急制动，设$a_1(t)$，$a_2(t)$分别为前车、后车的加速度随时间变化的函数，则制动距离可以表示为

$$\begin{cases} d_1 = v_1 t_1 + \int_0^{t_1}\int_0^{t_1} a_1(t)\mathrm{d}t\,\mathrm{d}t \\ d_2 = v_2 t_2 + \int_0^{t_2}\int_0^{t_2} a_2(t)\mathrm{d}t\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{11}$$

式中：d_1为前车制动距离，m；d_2为后车制动距离，m；v_1为前车制动的初始速度，km/h；v_2为后车制动的初始速度，km/h；t_1为前车制动过程走行时间，s；t_2为后车制动过程走行时间，s。

前车考虑最佳制动性能，后车考虑最不利制动，则撞软墙模式下列车最小安全间隔距离L_{base}可以表示为

$$L_{\mathrm{base}} = d_2 - d_1 + d_0 \tag{12}$$

式中：d_0为安全阈量，m。

考虑通信时延及空气制动的空走时间，假设后车收到的前车信息为τ_0之前的信息，则在时延期间需考虑最不利的情况，即前车以最佳制动性能减速，后车以最大牵引力加速，则通信时延补偿L_{delay}可以表示为

$$\begin{cases} L_{\mathrm{delay}} = v_2\tau + \int_0^{\tau}\int_0^{\tau} a_2(t)\mathrm{d}t\,\mathrm{d}t - v_1\tau - \int_0^{\tau}\int_0^{\tau} a_1(t)\mathrm{d}t\,\mathrm{d}t \\ \tau = \tau_0 + t_{\mathrm{k}} \end{cases} \tag{13}$$

式中：τ为总时延，s；τ_0为通信时延，s；t_{k}为实施空气制动过程中列车空走时间，s。

而通信时延对列车接收的位置、速度信息的影响，在2.3节详细叙述。

则最小安全距离L_{safe}可以表示为

$$L_{\mathrm{safe}} = L_{\mathrm{base}} + L_{\mathrm{delay}} \tag{14}$$

与"撞硬墙"相比，"撞软墙"模式考虑了制动过程中前、后列车的相对关系，因此"撞软墙"模式下列车运行安全间隔可远小于后车的最小制动距离，从而缩短群组中相邻列车追踪间隔，实现紧密追踪运行，提高列车运行效率和线路通过能力[18]。

1.4　模型离散化

为了便于控制方法的设计和优化问题的求解，需要对列车动力学模型进行离散化处理。

设第j列列车($j=1,2,\cdots,N$)第i节($i=1,2,\cdots,n$)车辆的状态向量$\boldsymbol{X}_{i,j}(k)$为

$$\boldsymbol{X}_{i,j}(k) = \begin{bmatrix} x_{i,j}(k) & v_{i,j}(k) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

式中：$x_{i,j}(k)$为位移，m；$v_{i,j}(k)$为速度，km/h；k为离散时间步。

全局状态向量$\boldsymbol{X}(k)$由所有列车状态按列拼接构成，可以表示为

$$\boldsymbol{X}(k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{1,1}(k) & \boldsymbol{X}_{2,1}(k) & \cdots & \boldsymbol{X}_{n,N}(k) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{2Nn} \tag{16}$$

将电制动力与空气制动力区分开，则每列车输入向量$\boldsymbol{U}_j(k)$可以表示为

$$\boldsymbol{U}_j(k) = \begin{bmatrix} F_{\mathrm{t},j}(k) & F_{\mathrm{be},j}(k) & F_{\mathrm{ba},j}(k) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

全局输入向量$\boldsymbol{U}(k)$可以表示为

$$\boldsymbol{U}(k)=\left[\boldsymbol{U}_1(k)\quad \boldsymbol{U}_2(k)\quad \cdots\quad \boldsymbol{U}_N(k)\right]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^{3N} \tag{18}$$

对第j列第i节车辆，离散动力学方程可以表示为

$$\begin{cases} x_{i,j}(k+1)=x_{i,j}(k)+v_{i,j}(k)T_{\mathrm{s}} \\ v_{i,j}(k+1)=v_{i,j}(k)+\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{m_{i,j}}\left[\delta_{ij}(F_{\mathrm{t},i,j}-F_{\mathrm{be},i,j})-\right. \\ \qquad \left. F_{\mathrm{ba},i,j}+F_{\mathrm{c},i,j}-F_{\mathrm{c},i-1,j}-F_{\mathrm{r},i,j}\right] \end{cases} \tag{19}$$

式中：T_{s}为采样时间，s；δ_{ij}为Kronecker delta函数，$i=1$时为1，对应机车质点受力情况。

每个质点对应的线路参数影响项(包含线路坡度、曲率等)$\boldsymbol{W}_{i,j}$可以表示为

$$\boldsymbol{W}_{i,j}=\left[0\quad -T_{\mathrm{s}}\mathrm{g}\left(\sin\theta_{i,j}+\frac{K_{\mathrm{r},i,j}}{R_{i,j}}\right)\right]^{\mathrm{T}} \tag{20}$$

式中：$\theta_{i,j}$为第j列列车中第i个质点处的坡度角，°；$K_{\mathrm{r},i,j}$为第j列列车中第i个质点处的曲线阻力系数；$R_{i,j}$为第j列列车中第i个质点处的曲线半径，m。

则全局常数向量$\boldsymbol{W}$可以表示为

$$\boldsymbol{W}=\left[\boldsymbol{W}_{1,1}\quad \boldsymbol{W}_{2,1}\quad \cdots\quad \boldsymbol{W}_{n,N}\right]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^{2Nn} \tag{21}$$

由于空气制动力的时滞效应，加速度计算失准引起动力学偏差，位置及速度状态累积误差放大。为精准补偿时滞扰动，需引入空气制动扰动补偿项$\boldsymbol{d}_j(k)$表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{d}_j(k)=\left[0\quad -\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{m_{1,j}}\Delta F_{\mathrm{ba},1,j}(k),\quad 0\quad -\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{m_{2,j}}\right. \\ \qquad \left.\Delta F_{\mathrm{ba},2,j}(k),\ \cdots,\ 0\quad -\dfrac{T_{\mathrm{s}}}{m_{n,j}}\Delta F_{\mathrm{ba},n,j}(k)\right]^{\mathrm{T}} \\ \Delta F_{\mathrm{ba},i,j}(k)=F_{\mathrm{ba},i,j}(k-\tau_{\mathrm{b}})-F_{\mathrm{ba},i,j}(k) \end{cases} \tag{22}$$

式中：$\Delta F_{\mathrm{ba},i,j}(k)$表示第$j$列车第$i$节车辆的空气制动力时滞偏差；$\tau_{\mathrm{b}}$为实施空气制动过程中列车空走时间$t_{\mathrm{k}}$对应的延迟步数。

则系统动力学方程可以表示为

$$\boldsymbol{X}(k+1)=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{W}+\boldsymbol{d}(k) \tag{23}$$

式中：状态转移矩阵$\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{\Phi}_1\quad \boldsymbol{\Phi}_2\quad \cdots\quad \boldsymbol{\Phi}_N\right]$；控制输入矩阵$\boldsymbol{B}=\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{B}_1\quad \boldsymbol{B}_2\quad \cdots\quad \boldsymbol{B}_N\right]$。

重载列车运行过程中的扰动包括线路环境扰动、车钩耦合扰动等，由于空气制动扰动补偿项相对线路环境扰动和车钩耦合扰动对系统模型的影响突出，因此，当前将空气制动补偿作为模型重点项来研究，后续将结合线路环境扰动和车钩耦合扰动及多种其他扰动因素来综合建模。

通过对重载列车群组动力学模型的精确离散化处理，该模型表现出状态可预测性、控制可优化性，可通过状态转移矩阵精确推算未来状态演变，控制输入矩阵的块对角结构将牵引/制动力分配转化为凸优化问题。这些特性使模型预测控制(MPC)成为虚拟编组协同运行的理想解决方案，因其能基于离散模型在每个采样周期实现3步核心操作：预测未来p步内的列车状态演变、求解满足多目标约束的最优控制序列，并通过滚动优化机制动态补偿模型适配与外部扰动[19]。基于此离散化基础，后续章节将设计适配重载虚拟编组的MPC优化算法，重点解决速度跟踪与安全间距协同控制的核心挑战。

2　控制方法设计

2.1　列车群组描述

列车群组控制的目标是在满足安全和效率的前提下，优化列车的运行性能，包括速度跟踪、车间距控制等。考虑一个多列重载列车组成的群组，群组头部的第一列列车称为首车。假设在群组运行过程中，前车和后车之间存在通信链路，前车以一定的随机通信延迟将本车的速度v和位置x等信息传递给后车。在群组运行中，首车按照既有线路闭塞方式等信息生成参考速度曲线追踪运行。

群组运行的控制目标可以描述为

$$\begin{cases} |v_{\mathrm{f}}-v_{\mathrm{ref}}| & \to\ 0 \\ |v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{f}}| & \to\ 0 \\ |s_{\mathrm{r}}+L_{\mathrm{safe}}-s_{\mathrm{f}}| & \to\ 0 \end{cases} \tag{24}$$

式中：v_{f}和v_{r}分别为前车和后车的速度，km/h；v_{ref}为前车的参考速度，km/h；s_{r}和s_{f}分别为后车和前车的位移，m。

在保持群组运行的前提下，首车的目标是尽可能追踪既有的目标速度曲线。后车的目标是尽可能追踪前车的速度曲线，使得相对速度差最小，同时必须保持和前车的安全距离，对于群组中任意相邻的两列车，在任意时刻都必须大于最小安全距离L_{safe}。

2.2　优化问题设计

首车的责任是带领列车群组跟踪既定的目标速度曲线，因此首车的控制目标是在满足约束的情况

下，尽可能跟踪参考曲线，最小化控制误差。

首车跟踪参考速度，后续列车同步前车速度，代价函数J_{vel}可以表示为

$$J_{\mathrm{vel}}=\sum_{j=1}^{N}\alpha_j\left\|v_{1,\,j}(k)-v_{\mathrm{ref}}^{(j)}(k)\right\|^2 \tag{25}$$

式中：α_j为速度追踪的权重系数；$v_{1,\,j}(k)$为第j列列车中首个质点的速度，km/h；$j=1$时，$v_{\mathrm{ref}}^{(1)}(k)$为首车按照既有线路闭塞方式等信息生成的参考速度，km/h；$j>1$时，$v_{\mathrm{ref}}^{(j)}(k)=v_{1,\,j-1}(k)$，以实现后车追踪前车速度运行。

所有相邻列车保持动态安全距离时的代价函数J_{spc}可以表示为

$$J_{\mathrm{spc}}=\sum_{j=2}^{N}\beta_j\left\|\Delta s_j(k)-L_{\mathrm{safe}}^{(j)}(k)\right\|^2 \tag{26}$$

式中：β_j为运行间隔的权重系数；$\Delta s_j=s_{n,\,j-1}-s_{1,\,j}$，为前车末节车与后车首节车的位移间隔，m；$L_{\mathrm{safe}}^{(j)}$为第$j$列车与第$j-1$列车的动态安全距离，m。

群组所有列车需最小化控制误差及扰动补偿，此时代价函数$J_{\mathrm{t/b}}$可以表示为

$$J_{\mathrm{t/b}}=\sum_{j=1}^{N}\gamma_j\left\|\boldsymbol{U}_j(k)\right\|^2+\sum_{j=1}^{N}\eta_j\left\|\hat{\boldsymbol{d}}_j(k)\right\|^2 \tag{27}$$

式中：γ_j为控制量的惩罚系数；η_j为扰动补偿的惩罚系数；$\boldsymbol{U}_j(k)$为第j列列车的输入向量；$\hat{\boldsymbol{d}}_j(k)$为系统扰动补偿的估计值。

因此，得到最终代价函数J为

$$\min J=J_{\mathrm{vel}}+J_{\mathrm{spc}}+J_{\mathrm{t/b}} \tag{28}$$

代价函数中所有物理量均已归一化处理。除此之外，群组运行需满足以下几类约束。

（1）动力学约束。

$$\boldsymbol{X}_j(k+1)=\boldsymbol{\Phi}_j\boldsymbol{X}_j(k)+\boldsymbol{B}_j\boldsymbol{U}_j(k)+\boldsymbol{W}_j+\boldsymbol{d}_j(k) \tag{29}$$

（2）安全距离约束。

$$s_{n,\,j-1}(k)-s_{1,\,j}(k)\geqslant L_{\mathrm{safe}}^{(j)}(k) \tag{30}$$

（3）状态约束。

$$0\leqslant v_{i,\,j}(k)\leqslant v_{\max} \tag{31}$$

式中：$v_{\max}$为线路允许的最大速度，km/h。

（4）控制约束。

$$\begin{cases}0\leqslant F_{\mathrm{t},\,i,\,j}\leqslant F_{\mathrm{t},\,\max}\\0\leqslant F_{\mathrm{be},\,1,\,j}\leqslant F_{\mathrm{b},\,\max}\\F_{\mathrm{t},\,i,\,j}\cdot F_{\mathrm{be},\,i,\,j}=0\end{cases} \tag{32}$$

式中：$F_{\mathrm{t},\,\max}$，$F_{\mathrm{b},\,\max}$分别为机车最大牵引力和制动力，kN。

（5）变化率约束。

$$\left|\boldsymbol{U}_j(k+1)-\boldsymbol{U}_j(k)\right|\leqslant\dot{\boldsymbol{U}}_{\max}\cdot T_{\mathrm{s}} \tag{33}$$

式中：$\dot{\boldsymbol{U}}_{\max}$为允许的最大变化率。

2.3　改进MPC方法设计

在实时通信系统中，数据包因随机延迟而到达时间不可预测，对控制系统构成重大挑战。为解决此问题，系统采用三级处理架构，控制方法框架如图5所示。首先，基于卡尔曼滤波对延迟状态进行动态估计与修正，处理范围覆盖0.5~1.0 s延迟，对应0.1 s采样间隔下的5~10步延迟；随后，将修正后的前车状态与后车实时状态输入分布式MPC控制器；最终，MPC控制器融合修正状态结合扰动补偿模块生成最优控制指令，有效解决随机延迟导致的状态观测失真问题，为通信受限场景下的实时控制提供确定性保障。

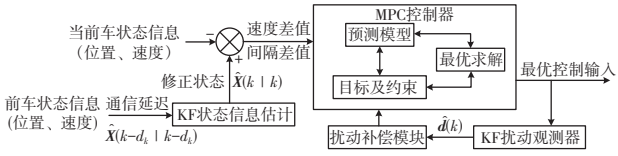


图5　控制方法框架

Fig.5　Control method framework

状态$\boldsymbol{X}(k)$在第k步的测量$\boldsymbol{Z}(k)$对应第$k-d_k$步的状态，其中d_k是一个随机变量，表示测量的延迟步数。测量方程可以表示为

$$\boldsymbol{Z}(k)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}(k-d_k)+\boldsymbol{v}(k) \tag{34}$$

式中：$\boldsymbol{Z}(k)$为在时间k的测量向量；$\boldsymbol{H}$为观测矩阵；d_k为从状态生成到接收测量的延迟步数；$\boldsymbol{v}(k)$为观测噪声。

需要从最后已知的有效状态$\hat{\boldsymbol{X}}(k-d_k|k-d_k)$进行多步预测直到$d_k$步，对于每个$i$从1到$d_k$，得到预测方程，可以表示为

$$\hat{\boldsymbol{X}}(k-i+1|k-d_k)=\boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{X}}(k-i|k-d_k)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(k-i) \tag{35}$$

$$\boldsymbol{P}(k-i+1|k-d_k)=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{P}(k-i|k-d_k)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q} \tag{36}$$

使用在k时刻的测量更新$k-d_k$时刻的状态估计，可以表示为

$$K_k=\boldsymbol{P}(k|k-d_k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}(k|k-d_k)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}]^{-1} \tag{37}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}(k|k)=\hat{\boldsymbol{X}}(k|k-d_k)+K_k[\boldsymbol{Z}(k)-\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{X}}(k|k-d_k)] \tag{38}$$

$$\boldsymbol{P}(k|k)=[\boldsymbol{I}-K_k\boldsymbol{H}]\boldsymbol{P}(k|k-d_k) \tag{39}$$

式中：$\boldsymbol{P}(k|k-d_k)$为预测d_k步后的协方差；$\boldsymbol{P}(k|k)$为在k时刻考虑测量后的协方差；K_k为在k时刻的卡尔曼增益。

式(22)空气制动扰动补偿项$\boldsymbol{d}_j(k)$的估计值$\hat{\boldsymbol{d}}_j(k)$处理思路类似，用$\tau_{\mathrm{b}}$取代$d_k$计算，$\tau_{\mathrm{b}}$为空气制动过程中列车空走时间$t_{\mathrm{k}}$对应的延迟步数。

当前MPC控制器通过结合测量数据与动态模型预测，在周期性优化中实现复杂系统的精准控制。其核心机制在于利用处理完通信延迟的修正状态值，构建未来预测时域内的系统行为轨迹，并通过在线求解带约束的优化问题生成控制序列。

基于离散化状态方程式(23)，建立预测时域内的状态递推关系。设当前时刻为k，预测时域为p步，递推公式构建为

$$\boldsymbol{\mathcal{X}}(k)=\boldsymbol{\Psi}\hat{\boldsymbol{X}}(k|k)+\mathcal{B}\boldsymbol{\mathcal{U}}(k)+\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{W}+\hat{\boldsymbol{\mathcal{D}}}(k) \tag{40}$$

式中：$\boldsymbol{\mathcal{X}}(k)$为$k$时刻经预测时域$p$内的全部状态量集合；$\hat{\boldsymbol{X}}(k|k)$为处理通信时延后$k$时刻的测量对$k$时刻状态的预测；$\boldsymbol{\mathcal{U}}(k)$为$k$时刻经预测时域$p$内的全部控制量集合；$\boldsymbol{W}$为全局常数向量；$\hat{\boldsymbol{\mathcal{D}}}(k)$为$k$时刻经预测时域$p$内的全部扰动估计值集合；$\boldsymbol{\Psi}$，$\mathcal{B}$，$\boldsymbol{\Gamma}$分别为状态转移矩阵$\boldsymbol{\Phi}$、控制输入矩阵$\boldsymbol{B}$及常数项矩阵经预测时域$p$得到的系数矩阵。

基于卡尔曼滤波改进MPC方法，应用于重载列车虚拟编组控制设计，虽在理论上实现了对随机通信延迟的高效补偿与多目标协同优化，但实际工程应用中存在严峻的计算瓶颈：一方面，卡尔曼滤波需实时维护高达$2nN$维的状态向量，其协方差矩阵$\boldsymbol{P}$单步更新涉及$4n^2N^2$次运算及$8n^3N^3$次矩阵求逆，显著超出车载控制器算力；另一方面，MPC预测时域步长取值较高会导致QP问题规模进一步膨胀。重载列车虚拟编组的动态控制对实时性要求高，而高精度状态估计与复杂模型预测计算量大，导致其计算耗时难以满足该要求。后续研究将聚焦分布式MPC架构设计，通过分层解耦控制任务(群组级MPC负责全局速度规划、车载级MPC处理局部车间距协调)，结合模型降阶与硬件加速技术，突破实时性瓶颈。

3　仿真验证

为验证所提控制方法的有效性，基于某铁路局集团公司管内线路参数构建双编组列车闭环仿真系统，针对编组建立、协同运行及解编阶段的场景[20]，并与传统PID控制进行对比，分析列车编组动态特性。

3.1　参数配置

搭建的闭环仿真系统参数配置如表2所示。系统通过导入真实线路数据生成首车参考速度曲线，初始速度为33 km/h，初始列车间隔满足安全追踪距离，仿真时长200 s，仿真步长0.1 s。

表2　参数配置

Tab.2　Parameter configuration

参数	数值
每节车厢质量m/t	80
每列车车厢数n/节	10
安全阈量d_0/m	50
车厢长度L/m	30
通信时延τ/s	1
坡度千分数I	≤20
曲线半径R/m	≤2 000
预测时域步p	5
基本阻力常数项经验系数c_0	1.2
基本阻力一次项经验系数c_1	0.006 5
基本阻力二次项经验系数c_2	0.000 279
车钩阻尼系数c_{d}	1×10^4
车钩刚度系数c_{k}	5×10^3
首车速度追踪权重系数α_1	1.0
后车速度追踪权重系数α_2	1.0
安全间隔权重系数β	1.5
首车控制量惩罚系数γ_1	0.05
后车控制量惩罚系数γ_2	0.05
首车扰动补偿惩罚系数η_1	0.05
后车扰动补偿惩罚系数η_2	0.05

在MPC控制器的目标函数中，α_1，α_2，β，γ_1，γ_2，η_1和η_2是用于平衡不同控制目标的权重系数。$\alpha_1=1.0$是实现首车速度跟踪这一基础控制目标而设定的参考性取值；$\alpha_2=1.0$是考虑后车速度与前车同步性给出的参考性取值；$\beta=1.5$是强调后车与前车之间保持安全间距的优先级更高给出的取值，因此权重更大；$\gamma_1=0.05$和$\eta_1=0.05$是考虑到首车控制输入的变化幅度给出的取值，来保持一定的控制平滑性；$\gamma_2=0.05$和$\eta_2=0.05$是为了避免剧烈变化考虑适度约束后车的控制动作给出的取值。

根据上述初值设置及参数配置，以代价函数式(28)作为追踪目标，在满足所有的约束条件下通

过求解优化问题生成控制序列。

3.2　仿真结果分析

将仿真结果分为编组建立0~70 s、协同运行70~165 s、解编165~200 s 3个阶段进行分析。其中，速度误差为后车速度与首车速度的差值，间隔误差为实际间隔与安全间隔的差值。

（1）编组建立阶段。编组建立阶段仿真结果如图6所示，MPC控制下，首车速度逐步上升，后车速度通过动态调整逐渐逼近首车，跟踪误差逐步收敛至0.4 km/h，间隔误差相对稳定，而PID控制下速度跟踪误差更大。相比之下，MPC通过实时预测前车速度变化并动态调整车间距，将速度/间距误差控制在更小范围内。

（2）协同运行阶段。协同运行阶段仿真结果如图7所示，列车群组的协同运行进入了相对稳定的状态。MPC控制下首车速度与参考速度曲线基本保持一致，后车速度也逐渐稳定，并与首车速度保持同步，车间距误差≤20 m，表明列车群组内的速度协调性显著提高，而PID控制下存在更多的振荡。充分体现了MPC控制器在协同运行阶段对速度、间隔的精确控制，确保了列车群组的高效、稳定运行。

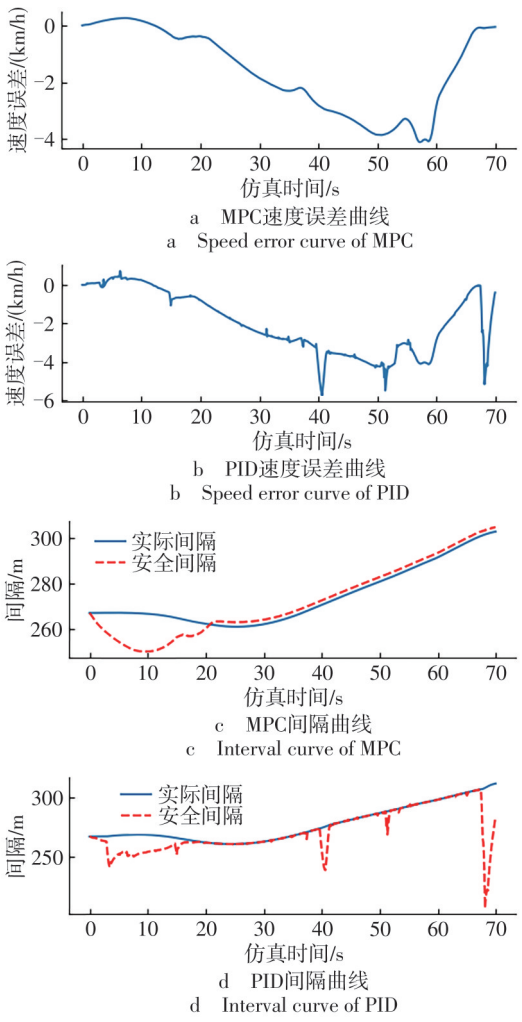


图6　编组建立阶段仿真结果

Fig.6　Simulation results of dynamic coupling stage

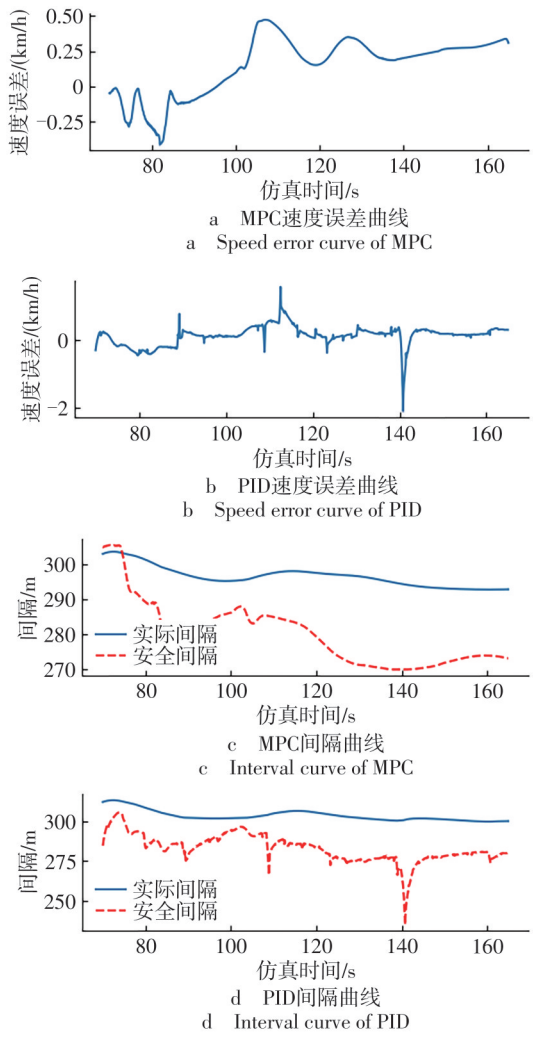
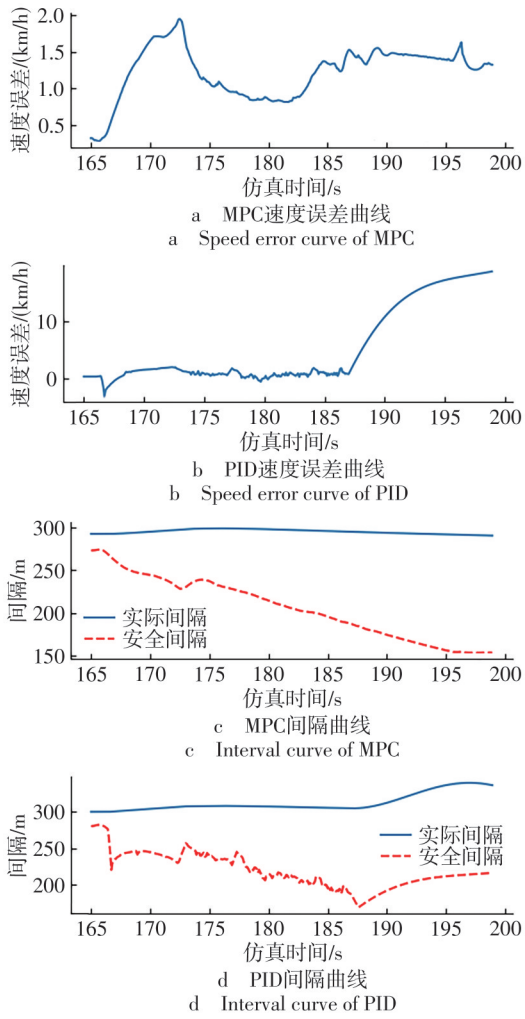


图7　协同运行阶段仿真结果

Fig.7　Simulation results of cooperative operation stage

（3）解编阶段。解编阶段仿真结果如图8所示，MPC控制下首车开始逐渐减速，后车速度也随之下降，但下降速率略低于首车，导致二者之间的速度差距有所扩大，对列车群组的协同控制提出了新的挑战。尽管间隔误差开始逐渐增大，但后车与首车之间的实际距离始终大于计算得到的最小安全距离，确保了列车群组的运行安全，体现了MPC控制器在处理列车减速过程中，能够有效地保持列



a　MPC速度误差曲线
a　Speed error curve of MPC

b　PID速度误差曲线
b　Speed error curve of PID

c　MPC间隔曲线
c　Interval curve of MPC

d　PID间隔曲线
d　Interval curve of PID

图8　解编阶段仿真结果

Fig.8　Simulation results of decoupling stage

车群组的安全距离。而PID控制下速度误差累积增大，无法适应速度变化，最终求解出现偏差。

4　结束语

针对重载铁路虚拟编组运行控制问题，建立重载列车多质点模型与运行控制模型，结合卡尔曼滤波设计改进MPC控制方法，并通过构建闭环仿真系统对比传统PID控制，验证方法的可行性。仿真结果表明，在编组建立阶段，MPC方法可以逐渐缩小虚拟编组列车追踪间隔，间隔误差逐步稳定并维持在一定范围内。MPC控制器通过调控前后车速度，对列车间隔具备调控作用，可协助实现编队建立。在协同运行阶段，经过调整后车速度与首车速度保持同步，列车间距误差稳定在较小范围内，体现了MPC控制器在协同运行阶段对速度、间隔的精确控制，可以确保列车群组的高效、稳定运行。在解编阶段，MPC控制器可有效控制后车减速，并保持列车群组的安全距离。基于改进MPC的控制方法在不同运行阶段均表现出良好的控制效果，为重载铁路虚拟编组的实际应用提供了可靠的技术支持。未来，将集中于优化控制算法，提升系统对突变情况的响应能力，提升运行控制的实时性，具体包括改进预测模型[21-22]、优化控制参数和增强系统的鲁棒性等，提升重载铁路虚拟编组运行控制的整体效能。

参考文献：

[1] 陈永明，崔佳诺. 基于虚拟编组技术的重载铁路列控系统研究[J]. 铁道标准设计，2023，67(9)：176-181.
CHEN Yongming，CUI Jianuo. Research on Train Control System of Heavy-Haul Railway Based on Virtual Grouping Technology[J]. Railway Standard Design，2023，67(9)：176-181.

[2] 宋宗莹，丁　辉，王兴中，等. 基于列车群组运行的重载铁路运输组织研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：73-81，97.
SONG Zongying，DING Hui，WANG Xingzhong，et al. Review of Heavy Haul Railway Transportation Organization Based on Group Train Operation[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：73-81，97.

[3] BOCK U，VARCHMIN J. Varchmin. Enhancement of the Occupancy of Railroads Using “Virtually Coupled Train Formations”[EB/OL]. (1999-12-31)[2024-12-20]. https：//www. rssb. co. uk/spark/sparkitem/pb011401.

[4] BOCK U，BIKKER G. Design and Development of a Future Freight Train Concept：“Virtually Coupled Train Formations”[J]. IFAC Proceedings Volumes，2000，33(9)：395-400.

[5] Shift2Rail. Moving Rail[EB/OL]. (2025-02-21)[2025-03-31]. https：//projects. shift2rail. org/s2r_ip2_n. aspx？p=MOVINGRAIL.

[6] FLAMMINI F，MARRONE S，NARDONE R，et al. Towards Railway Virtual Coupling[EB/OL]. (2018-12-31)[2024-12-31]. https：//ieeexplore. ieee. org/abstract/document/8607523.

[7] DI MEO C，DI VAIO M，FLAMMINI F，et al. ERTMS/ETCS Virtual Coupling：Proof of Concept and Numerical Analysis[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2020，21(6)：2545-2556.

[8] 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.

[9] 白金磊，王　跃，江　帆，等. 基于参数随机分布特性的多质点重载列车安全制动模型研究[J]. 控制与信息技术，2024(4)：44-52.
BAI Jinlei，WANG Yue，JIANG Fan，et al. Research on Multi-Mass Safety Braking Model for Heavy-Haul Trains Based on Random Distribution of Parameters[J]. Control and Information Technology，2024(4)：44-52.

[10] 林正南，俞花珍，郜国璇，等. 基于改进MPC的重载铁路移动闭塞系统下列车编队控制方法研究[J]. 铁道学报，2024，46(2)：74-81.
LIN Zhengnan，YU Huazhen，TAI Guoxuan，et al. Research on Virtually Coupled Train Formation Control of Heavy-Haul Train Based on Improved MPC under Moving Block System[J]. Journal of the China Railway Society，2024，46(2)：74-81.

[11] 何　晖，代　萌，陶维杰，等. 基于多智能体的重载列车虚拟编组协同巡航控制[J]. 中国铁道科学，2023，44(6)：196-205.
HE Hui，DAI Meng，TAO Weijie，et al. Cooperative Cruise Control of Heavy-Haul Train under VCTF Based on Multi-Agent[J]. China Railway Science，2023，44(6)：196-205.

[12] 张辰东，王文斌. 重载列车群组运行控制系统研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2024，21(7)：1-6.
ZHANG Chendong，WANG Wenbin. Research on Heavy Haul Group Train Operation Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2024，21(7)：1-6.

[13] 贺昌寿. 高速铁路列控系统地面设备技术发展及展望[J]. 铁道通信信号，2024，60(12)：1-11.
HE Changshou. Technology Development and Prospect of Ground Equipment of Train Control System of High Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication，2024，60(12)：1-11.

[14] 刘雅晴，王文龙，侯卓璞，等. 新型列控系统ATP车载设备开发过程安全控制措施研究[J]. 铁道通信信号，2024，60(5)：1-8.
LIU Yaqing，WANG Wenlong，HOU Zhuopu，et al. Research on Safety Control Measures in Onboard ATP Equipment Development Process of New Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication，2024，60(5)：1-8.

[15] 国家铁路局. 列车牵引计算 第1部分：机车牵引式列车：TB/T 1407.1—2018[S]. 北京：中国铁道出版社，2018：16.

[16] SPIRYAGIN M，WOLFS P，COLE C，et al. Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains[M]. Boca Raton：CRC Press，2016.

[17] 唐　涛，罗啸林，刘宏杰，等. 城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J]. 科技导报，2023，41(10)：31-42.
TANG Tao，LUO Xiaolin，LIU Hongjie，et al. Research Review of the Protection and Operation Technology for Virtually Coupled Train Sets in Metros[J]. Science & Technology Review，2023，41(10)：31-42.

[18] 刘骥阳，张进川，宋宗莹. 基于移动闭塞的重载列车追踪间隔模型研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：12-21，30.
LIU Jiyang，ZHANG Jinchuan，SONG Zongying. Tracking Interval Model of Heavy-Haul Trains Based on Moving Block System[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(5)：12-21，30.

[19] 杨中平，游　婷，束天成，等. 列车虚拟编组技术的研究现状及发展[J]. 都市快轨交通，2023，36(1)：14-21.
YANG Zhongping，YOU Ting，SHU Tiancheng，et al. Research Status and Development of Virtual Coupling Technology[J]. Urban Rapid Rail Transit，2023，36(1)：14-21.

[20] 杨晓明，杨在旭，宋宗莹. 基于虚拟编组技术的单线重载铁路通过能力计算方法研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(6)：17-26，41.
YANG Xiaoming，YANG Zaixu，SONG Zongying. Calculation Method for the Capacity of Single-Track Heavy-Haul Railway Line Based on Virtual-Coupling Technology[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(6)：17-26，41.

[21] 江路路，高天泽. 基于组合模型的黄大铁路货运量预测研究[J]. 铁路物流，2025，43(9)：58-64.
JIANG Lulu，GAO Tianze. Research on Freight Volume Forecasting of Huanghua-Dajiawa Railway Based on a Combined Model[J]. Railway Logistics，2025，43(9)：58-64.

[22] 柳佳音，王　龙，徐雪艺，等. 唐包线运输需求分析及预测研究[J]. 铁路物流，2025，43(3)：43-48.
LIU Jiayin，WANG Long，XU Xueyi，et al. Research on Analysis and Prediction of Transportation Demand on Tangshan-Baotou Railway[J]. Railway Logistics，2025，43(3)：43-48.

(责任编辑　李丹丹)