DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.109

神朔铁路万吨重载列车涌动有限集预测控制研究

张全明[1]，钟谱华[2]，朱　龙[2]
（1.国能包神铁路集团有限责任公司，陕西 榆林 719316；
2.中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲 412001）

摘　要：神朔铁路是我国重要的重载货运线路，重载列车运行环境恶劣，操纵困难，列车涌动严重影响运行平稳性和行车安全。针对神朔铁路行车过程中的涌动问题，文章分析了重载列车涌动发生时的信号特征，搭建了基于弹性阻尼车钩的列车多质点动力学模型，通过仿真分析了重载列车无涌动和有涌动时的运行状态，针对重载列车的涌动问题提出了一种有限集预测控制方法，仿真验证了该预测控制能够减小列车涌动时的速度波动和最大车钩力。

关键词：重载列车；平稳性；涌动；多质点模型；有限集预测控制

中图分类号：U292.92+1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0093-08

0　引言

神朔铁路是中国西煤东运的大通道之一，主要承担神府东胜煤田的煤炭外运任务，近几年煤炭年运量超过2亿吨，经济效益和社会效益明显。2009年，神朔铁路成功开行万吨组合列车。随着神朔铁路信息化水平的提高，煤炭运输机车牵引方式逐渐向“3+0”编组交流传动机车牵引过渡，开行重载列车成为运输能力提升的强力推手。

神朔铁路线路复杂，最小曲线半径为400 m，最大限制坡度为12‰，线路坡道此起彼伏。神朔铁路既是重载列车货运线路的标杆，也是重载列车平稳操纵的重大挑战。重载列车载重大，列车长度超过1 000 m，车辆运行惯性大，为了保证货运过程的安全，必须确保列车全程平稳运行。通过合理地操纵重载列车，避免列车涌动现象的产生，实现运输过程的安全性和平稳性并降低运输成本，是重载列车操纵策略研究的重要课题。

目前，现有的研究集中于列车运行平稳性、列车动力学仿真和列车平稳操纵等方面。罗世豪通过仿真研究了线路参数对重载列车运行安全性的影响，结果表明缓和曲线长度以及线路超高对列车运行安全性影响明显[1]。曹震针对现有牵引计算适配重载列车欠佳的问题，从列车编组、列车过分相和列车制动3个方面分析了影响重载列车牵引计算的因素，结合重载列车同步操纵系统、纵向力模型、长大下坡循环控制以及操纵策略4个方面建立了牵引计算模型[2]。文献[3]针对重载列车的技术特点，从理论方面分析了列车操纵难点，提出了重载列车平稳操纵的基本原则和方法。杨敏等人研究了车钩间隙大小、不同大小车钩间隙在列车中的分布对重载列车纵向涌动的影响，结果表明减小车钩间隙可以显著降低制动过程中列车车钩力最大值，有效减小列车纵向涌动，同时对于大间隙车钩数量一定时，在列车中呈凸形分布可以使得列车纵向涌动最小[4]。张志超等人介绍了国内外纵向动力学仿真计算程序的发展概况，并对纵向动力学研究中的纵向模型、空气制动模型、数值积分计算3个关键问题进行了较为详细的梳理，并在此基础上编制了相应的纵向动力学仿真程序[5]。辛民以神朔铁路的“3+0”编组万吨重载

通信作者：钟谱华（1994—），男，硕士，主要从事重载列车自动驾驶规划和控制方面的研究；E-mail: 735872957@qq.com
引用格式：张全明, 钟谱华, 朱龙. 神朔铁路万吨重载列车涌动有限集预测控制研究[J]. 机车电传动, 2024(1): 93-100.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.109.
Citation：ZHANG Quanming, ZHONG Puhua, ZHU Long. Research on finite set predictive control for surge of 10,000-ton heavy haul trains on Shenmu-Shuozhou railway[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 93-100.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.109.

列车为研究对象，对列车运行过程中的各测试车辆的车钩力进行测试，评估了神朔铁路重载列车纵向动力学性能总体水平[6]。杨亮亮从几何特征和作用原理的角度，建立了详细的缓冲器理论模型，利用C80型货车冲击试验数据对该模型进行了验证[7]。周黄标搭建了神朔铁路“3+0”编组牵引万吨重载列车的多质点动力学模型，研究了起车场景和鱼背场景下牵引力变化对列车涌动的影响[8]。孙树磊通过建立多组冲击模型、车体刚度串联模型以及车体–钩缓–车体串联模型等，系统研究了不同编组形式、制动状态、车钩间隙、空重车状态、车体刚度以及不同阻抗特性缓冲器组合对车辆纵向涌动的影响[9]。段振枢分析了两万吨重载列车纵向涌动产生的原因和评判标准，搭建了两万吨重载列车的三维模型并进行了仿真，研究了不同操纵方式对纵向涌动的影响[10]。吕胜强基于列车纵向动力学原理，分析了列车的受力，总结了列车在不同场景下的纵向涌动规律，通过仿真分析了典型涌动情况[11]。宁侨研究了包含重载列车多质点模型、空气制动模型和车钩缓冲器模型的重载列车纵向动力学相关内容，并在此基础上开发了面向列车自动驾驶的纵向动力学仿真软件，对重载列车平稳操纵具有重要的指导作用[12]。杨兴光分析了朔黄铁路2万吨重载组合列车制动缓解特性，仿真分析计算了2万吨列车制动后缓解工况改变机车电制动力、不同缓解初速度、不同制动初速度和不同列车管减压量对列车纵向涌动的影响[13]。王帅根据万吨重载列车试验数据和实际操纵经验，在理论和实际相结合的基础上探讨万吨重载列车的平稳操纵方法[14]。张小维将货运列车运行过程分为几个典型场景，讨论不同场景下的节能操纵策略和平稳操纵策略，结合典型场景下货运列车的平稳操纵策略，将平稳操纵约束条件加入到粒子群优化算法中，采用平稳节能操纵方式对该算法进行了验证[15]。

国内外对重载货运列车涌动现象的研究较少，涌动现象主要发生在重载货运列车的运输过程中，难以引起关注，但其对货运安全有恶劣影响。本文结合司机的操纵经验分析神朔铁路涌动发生时的信号特征，搭建了基于弹性阻尼车钩的列车多质点模型，通过仿真分析了神朔铁路重载列车的涌动现象。针对传统预测控制计算量大，在复杂约束条件下求解困难的问题，提出了一种有限集预测控制方法，通过仿真验证了该方法能减小列车涌动时的速度波动和车钩力波动，缩短涌动的持续时间，对涌动现象有抑制效果。

1 神朔铁路万吨重载列车涌动分析

当列车所处区段为大上坡时，列车抢速所需的牵引力较大，车钩处于拉伸状态，但各节车辆车钩受力存在差异。由于车钩缓冲器工作原理的影响，车钩力波动时存在不稳定性，主要表现为承受相同的冲击而其位移及阻抗力会有较大的差异[7]。多趟神朔铁路“3+0”编组重载列车试验数据表明，列车保持大牵引并持续加载的过程中，相邻车之间相连接的车钩可能发生滑移，导致车钩的相对位置发生突变，阻抗力也随之发生突变，从而打破列车车钩原本的平衡状态，引起列车内部发生振动，振动力通过车钩逐节传递至机车，导致涌动现象的产生。

神朔重载铁路上行的保德—王家寨区段是列车涌动现象高发区段之一。保德出站后到王家寨进站前均为超过11‰的连续长大上坡，在1106信号机至1124信号机区间存在一个分相，列车经过分相时没有牵引力，导致列车速度迅速下降，等到列车主断路器重新闭合后，速度区间大致在35~45 km/h。为了提高运行效率，尽快达速运行，司机在后续运行过程中需抢速运行。1124信号机至1160信号机区间还存在连续小半径S形的曲线区段，极易发生涌动现象。图1表示涌动发生时的实际速度信号，列车的速度在涌动区域发生波动，从52 km/h波动至57 km/h，随后又骤降至53 km/h，振幅逐渐减小，逐渐恢复正常。

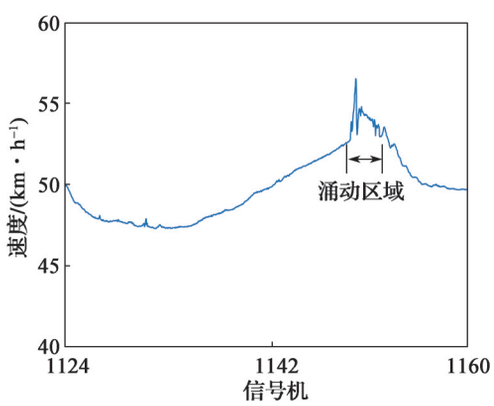


图1 涌动时的实际速度

Fig. 1 Actual speed during surge

涌动发生时，机车车体严重振荡，列车黏着力下降，操纵输出的牵引力和实际发挥的反馈力差异巨大，反馈力剧烈波动，给乘务员的操纵带来了极大困难，严重影响行车安全；机车受到后方货车车钩带来的巨大振动力影响，车轮与钢轨发生相对滑动，导致监控速度突变，容易触发紧急制动，带来意外的停车风险；涌动发生的区段，列车正常操纵所需的牵引力本身较大，加上涌动现象带来的额外振动力，车钩受力极大，增加了断钩和列车脱轨的风险。

2 万吨重载列车多质点模型

为了分析神朔铁路的涌动现象，参考神朔铁路“3+0”编组牵引万吨重载列车运行状况，搭建万吨重载列车多质点模型。车钩模型考虑弹性阻尼模型，列

车受力考虑机车本身的牵引力、列车所受的基本阻力、坡道阻力和弯道阻力。

涌动发生时列车往往处于非空气制动状态。非空气制动状态下的列车多质点模型如图2所示，对于第i节车，受力方程如下：

$$m_i a_i = u_i + F_{\mathrm{D},i-1} - F_{\mathrm{D},i} - F_{\mathrm{R},i} - F_{\mathrm{C},i} - F_{\mathrm{B},i} \tag{1}$$

式中：m_i表示第i节车辆的质量；a_i表示第i节车辆的加速度；u_i表示第i节车辆的输出力；$F_{\mathrm{D},i-1}$和$F_{\mathrm{D},i}$分别表示第$i-1$节和第i节车辆的车钩力；$F_{\mathrm{R},i}$表示第i节车辆的坡道阻力，$F_{\mathrm{R},i}=R_i m_i g$（单位为kN，$R_i$表示第$i$节车辆所处的坡道坡度）；$F_{\mathrm{C},i}$表示第$i$节车辆的弯道阻力，$F_{\mathrm{C},i}=\dfrac{600}{C_i}m_i g$（单位为kN，$C_i$表示第$i$节车辆所处弯道的曲线半径）；$F_{\mathrm{B},i}$表示第$i$节车辆的基本阻力，$F_{\mathrm{B},i}=0.001\left(a+bv_i+cv_i^2\right)m_i g$（单位为kN，$a$、$b$、$c$分别为基本阻力计算的3个基本参数）。

车钩力采用弹性阻尼模型为

$$F_{\mathrm{D},i} = Kx_i + Cv_i \tag{2}$$

式中：K表示弹性系数；x_i表示车钩振动的位移；C表示阻尼系数；v_i表示车钩振动的速度。

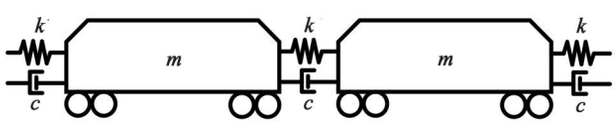


图2　列车多质点模型

Fig. 2　Multi-particle dynamic model

图3为仿真无控制条件下设置的牵引力加载情况，在1124信号机处初始牵引力为1 450 kN，均匀加载，最大牵引力限幅1 550 kN。

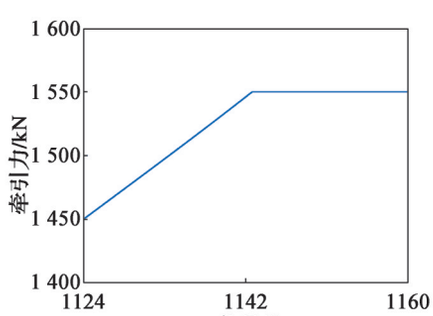


图3　仿真牵引力

Fig. 3　Simulation traction force

图4和图5分别为仿真无涌动、无控制条件下的速度和车钩力变化曲线。仿真了“3+0”编组牵引万吨重载列车在神朔铁路保德—王家寨区段1124~1160信号机区段的运行情况，其中坡道为大于10‰的大上坡，同时包含诸多曲线半径小于1 000 m的S形曲线区段。列车从1124信号机运行至1160信号机，速度从50 km/h平稳增加至57 km/h，速度曲线光滑且无突变；4节（第3节、第30节、第57节、第84节）车辆的车钩力分别在1 400 kN、1 050 kN、700 kN、350 kN附近稳态波动，运行过程相对平稳。

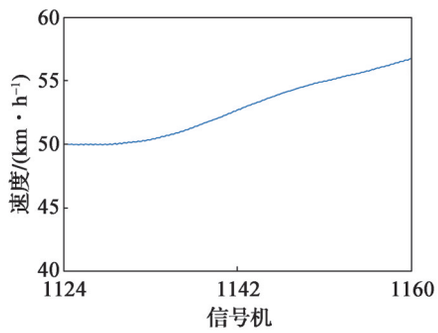


图4　无涌动和无控制时的速度

Fig. 4　Speed without surge and control

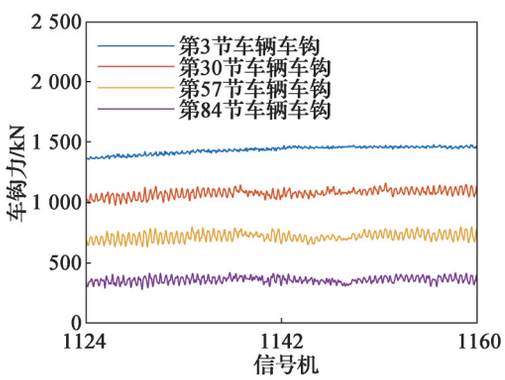


图5　无涌动和无控制时的车钩力

Fig. 5　Coupler force without surge and control

3　万吨重载列车涌动仿真

为了仿真分析万吨重载列车涌动的情况，需要在稳态的列车多质点模型中加入涌动的因素。前文提及，涌动产生于大牵引力状态下，车钩力达到阈值时产生车钩间相对位置滑移，导致车钩力突变，影响整列车的稳态运行。因此，考虑在列车多质点模型中第i节车辆的车钩加入一个与位置相关的车钩位移突变信号$\theta(x,i)$，具体见式（3）。

$$\theta(x,i)=\begin{cases}\Delta x, x=x_{\mathrm{tar}}, i=i_{\mathrm{tar}}\\ 0, \text{otherwise}\end{cases} \tag{3}$$

$\theta(x,i)$表示当列车位置到达x_{tar}时，第i_{tar}节车辆的车钩位移瞬间减小Δx，整列车的受力情况发生改变，加入突变信号后的列车多质点动力学模型见式（4）。

$$m_i a_i = u_i + F_{\mathrm{D},i-1} - F_{\mathrm{D},i} - F_{\mathrm{R},i} - F_{\mathrm{C},i} - F_{\mathrm{B},i} - K\theta(x,i) \tag{4}$$

仿真的加载过程仍如图3所示，图6和图7分别为涌动发生时的车辆速度和车钩力变化曲线。图6表明在信号机1142~1160区间，列车速度由平稳增速转为剧烈波动，在波动的时刻，速度范围在54~55 km/h，该波动范围和弹性阻尼车钩模型的阻尼系数有关，阻尼越小，速度波动范围越大。图7为有涌动、无控制条件下的车钩力变化曲线，分析受力最大的第3节车辆车钩，

车钩力最大值达 1 761 kN，最小值为 1 150 kN，波动幅度为 611 kN。车钩力从起振到逐渐收敛过程中，列车运行大约500 m。

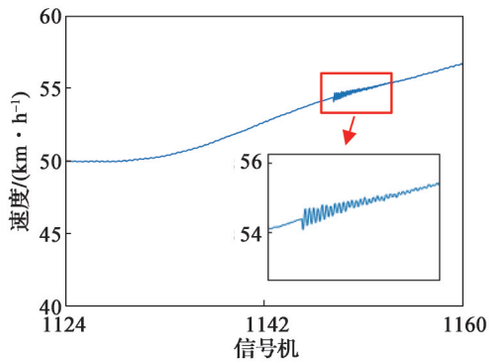


图6　涌动时的速度

Fig. 6　Speed during surge

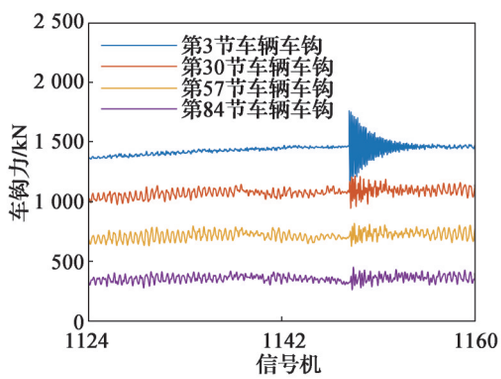


图7　涌动时的车钩力

Fig. 7　Coupler force during surge

通过仿真结果可知，在原本平稳的列车多质点模型中加入车钩相对位置滑移的激励，会导致多质点模型在特定位置出现速度和加速度突变、车钩力迅速增大的现象，与列车实际运行采集的信号吻合。由于车钩缓冲器的影响，车钩在承受相同的冲击而其位移及阻抗力会有较大的差异[6]。当车钩载荷达到一定阈值时，车钩相对位置可能发生滑移，最终导致了涌动发生。

4　神朔铁路万吨重载列车涌动有限集预测策略

前文提及涌动的发生原因为车钩相对位置滑移，车钩在承受相同的冲击而其位移及阻抗力会有较大的差异[6]，本质还是由于车钩力的波动。因此，考虑在列车控制过程中利用有限集预测控制，加入对车钩力因素的考虑，减小列车运行过程中的最大车钩力，从而减小涌动现象的产生。

列车自动驾驶所采用的硬件计算能力有限，且列车操纵所受的约束众多，直接利用预测控制求解器求解存在困难，约束条件可能导致所求的最优解不存在。因此，考虑生成满足操纵约束的牵引力有限集，预测有限集中各牵引力序列操纵的操纵曲线，计算各操纵曲线的性能指标，选择最优的进行操纵。

令列车当前位置为s_0，速度为v_0，牵引力为u_0，预测步长为s_p，将预测步长等分为n个小区间，第i个区间起始位置为$s_0+(i-1)s_\mathrm{p}/n$，长度为s_p/n，牵引力为u_{i-1}，预测步长s_p内采取的牵引力操纵序列为$(u_0,u_1,\cdots,u_{n-1})$。

每个操纵所采取的牵引力需满足以下约束：

1）机车牵引/制动能力约束

列车运行过程中所能发挥的最大牵引力/电制力与列车速度等因素相关，表示为：

$$\left.\begin{aligned}u_i\leqslant u_{\mathrm{T,max}}\\u_i\geqslant u_{\mathrm{E,max}}\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式中：$u_{\mathrm{T,max}}$为机车能力允许的最大牵引力，$u_{\mathrm{E,max}}$为机车能力允许的最大电制动力。

2）加速度最大最小约束

为保证运行过程的安全，列车加速过程的最大加速度和最大减速度均有限制，具体表示为

$$a_{\min}\leqslant a_i\leqslant a_{\max}\tag{6}$$

式中：$a_{\min}$表示允许的最小加速度；$a_{\max}$表示允许的最大加速度。

3）牵引手柄操纵约束

为保证重载列车的操纵平稳性，牵引手柄不能变化太频繁，具体见式（7）。

$$\left.\begin{aligned}u_i\leqslant u_{i-1}+\Delta u_{i-1}\\u_i\geqslant u_{i-1}-\Delta u_{i-1}\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

式中：Δu_{i-1}表示经过第i个区间允许的最大牵引力/电制动力调节量。

上一区间采用的牵引力为u_{i-1}，本区间操纵允许的牵引力范围为$[u_{i-1}-\Delta u_{i-1},u_{i-1}+\Delta u_{i-1}]$。将该范围离散为$l$个分支区间，第$j$个分支区间操纵采取的牵引力为$u_{i-1}-\Delta u_{i-1}+2\Delta u_{i-1}\cdot(j-1)/(l-1)$。

对预测步长s_p内采取的牵引力操纵序列为$(u_0,u_1,\cdots,u_{n-1})$，每个u_i有l个分支区间，能获得的所有牵引力序列组合即为有限集Ω，见式（8）。

$$\left.\begin{aligned}\Omega=\left\{U\left(u_0,u_1,\cdots,u_{n-1}\right),u_i\in\Omega_i\right\}\\\Omega_i=\left\{u_{\Omega,i}\middle|\,u_{\Omega,i}=u_{i-1}-\Delta u_{i-1}+2\Delta u_{i-1}\cdot(j-1)/(l-1),\ j=1,2,\cdots,l\right\}\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

有限集的生成如图8所示。

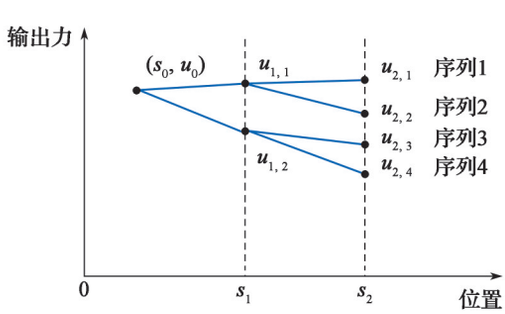


图8　有限集生成示意图

Fig. 8　Generating finite set

对于万吨重载列车的涌动问题，一方面，需要保证列车运行过程足够平稳，尽量避免列车涌动的产生；另一方面，列车运行效率需要得到保证，当列车运行速度较低时需要抢速以尽快实现达速运行。因此，考虑设置目标函数J如下：

$$J=k_1\cdot F_{\mathrm{D,max}}+k_2\cdot\left|v_t-v_1\right| \tag{9}$$

式中：$F_{\mathrm{D,max}}$表示运行过程中的最大车钩力；v_t表示目标速度；k_1、k_2分别表示平稳和跟速的权重系数。

计算有限集中所有操纵序列的目标函数值，选取使目标函数值最小的操纵序列$\left(u_0^*,u_1^*,\cdots,u_{n-1}^*\right)$，以$u_0^*$作为当前操纵的牵引力。

目标速度$v_t=55$ km/h，牵引力最大幅值限制1 550 kN，随着选取k_1、k_2的不同，控制效果也不同，得到的仿真结果如下。

1）$k_2=0$

图9~图11分别表示$k_2=0$条件下的速度、车钩力和操纵采用的牵引力。$k_2=0$时，预测控制仅以列车运行平稳为目标，运行速度保持在50 km/h左右，涌动时的速度波动范围限制在0.5 km/h。车钩力最大值为1 639 kN，最小值为1 181 kN，波动幅度为458 kN，涌动幅值达到最大后，列车运行150 m左右后振幅收敛，相较于有涌动无控制时车钩力的波动幅度611 kN和运行500 m左右振幅收敛，对涌动情况有较大改善，但运行速度偏低。

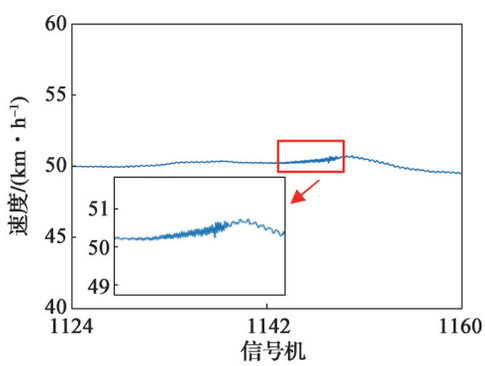


图9　$k_2=0$条件下的速度

Fig. 9　Speed when $k_2=0$

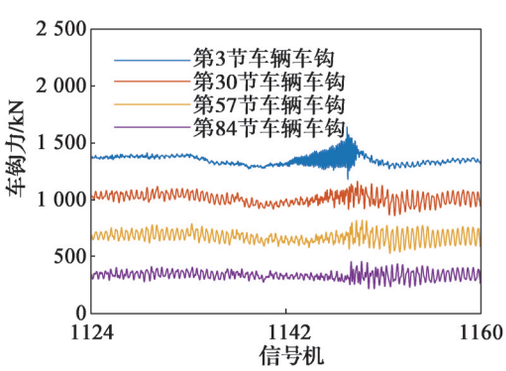


图10　$k_2=0$条件下的车钩力

Fig. 10　Coupler force when $k_2=0$

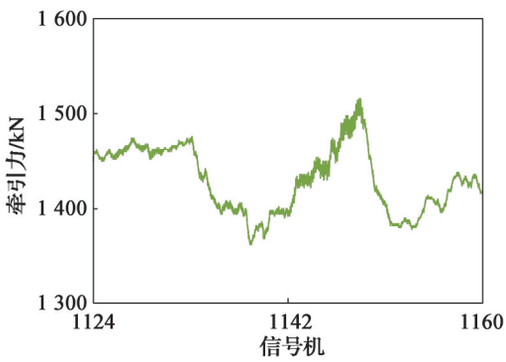


图11　$k_2=0$条件下的牵引力

Fig. 11　Traction force when $k_2=0$

2）$k_1=0$

图12~图14分别表示$k_1=0$条件下的速度、车钩力和操纵采用的牵引力。$k_1=0$时，预测控制使列车运行

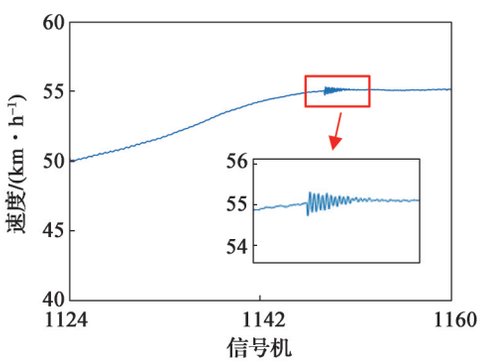


图12　$k_1=0$时的速度

Fig. 12　Speed when $k_1=0$

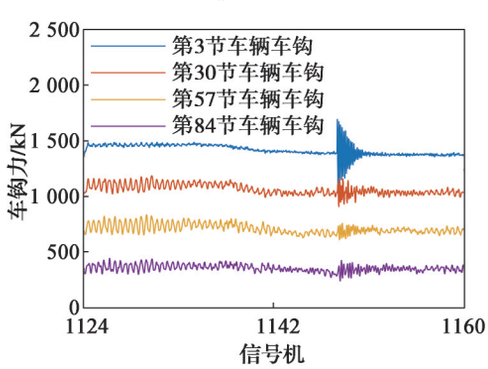


图13　$k_1=0$时的车钩力

Fig. 13　Coupler force when $k_1=0$

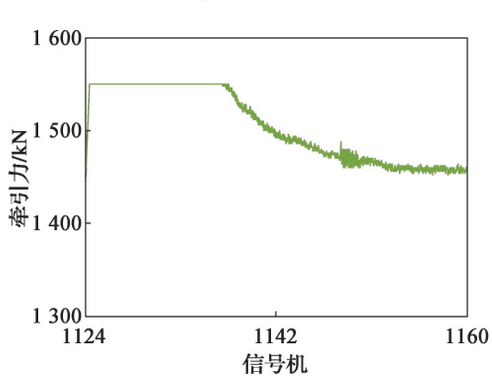


图14　$k_1=0$时的牵引力

Fig. 14　Traction force when $k_1=0$

状态尽快达到目标速度。运行速度从 50 km/h 涨速至 55 km/h 后保持稳定，涌动时的速度波动范围限制在 0.6 km/h。车钩力最大值为 1 692 kN，最小值为 1 084 kN，波动幅度为 608 kN，涌动幅值达到最大后，列车运行 250 m 左右振幅收敛，相较于有涌动无控制时车钩力的波动幅度 611 kN 和运行 500 m 左右振幅收敛，对涌动幅值改善较小，运行速度达标。

3）$k_1/k_2=0.1$

图 15~图 17 分别表示 $k_1/k_2=0.1$ 条件下的速度、车钩力和操纵采用的牵引力。运行速度从 50 km/h 涨速至 55 km/h 后保持稳定，涌动时的速度波动范围限制在 0.5 km/h。车钩力最大值为 1 677 kN，最小值为 1 237 kN，波动幅度为 440 kN，涌动幅值达到最大后，列车运行 120 m 左右振幅收敛，相较于有涌动无控制时车钩力的波动幅度 611 kN 和运行 500 m 左右振幅收敛的情况，对涌动幅值和收敛幅度改善较大，运行速度达标。

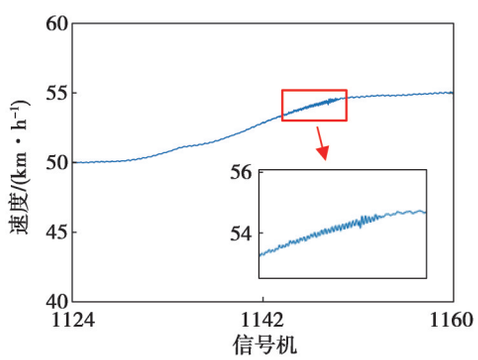


图 15　$k_1/k_2=0.1$ 时的速度

Fig. 15　Speed when $k_1/k_2=0.1$

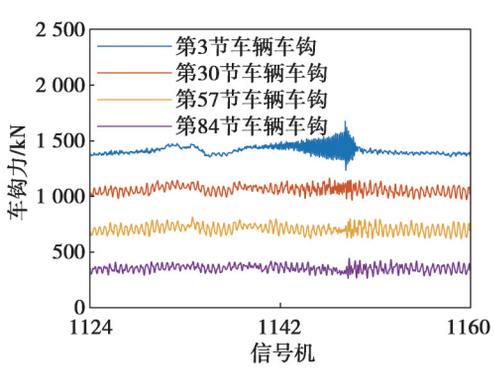


图 16　$k_1/k_2=0.1$ 时的车钩力

Fig. 16　Coupler force when $k_1/k_2=0.1$

对比无控制、$k_1/k_2=0.1$ 和 $k_2=0$ 控制条件下的运行情况。速度方面，无控制和 $k_1/k_2=0.1$ 时的速度都能至少达到 55 km/h（见图 18）。$k_2=0$ 条件下的预测控制速度在 50 km/h 左右，见图 9；车钩力方面，分析图 19，仅以平稳为目标的预测控制车钩力数值最小，$k_1/k_2=0.1$ 预测控制的车钩力次之，无控制下车钩力最大，无论权重系数怎样取值，预测控制条件下的车钩力收敛远快于无控制条件下的车钩力收敛。图 20 表示 3 种情况下的牵引力。

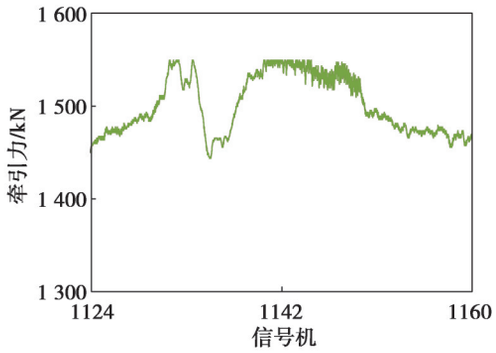


图 17　$k_1/k_2=0.1$ 时的牵引力

Fig. 17　Traction force when $k_1/k_2=0.1$

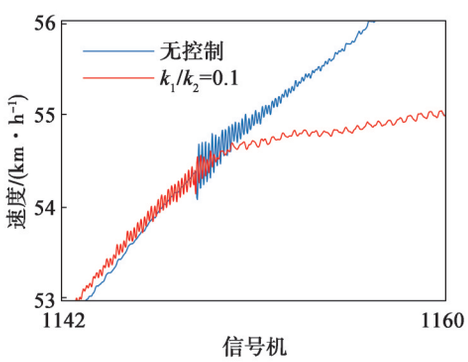


图 18　无控制和预测控制条件下的速度

Fig. 18　Speed without control and with predictive control

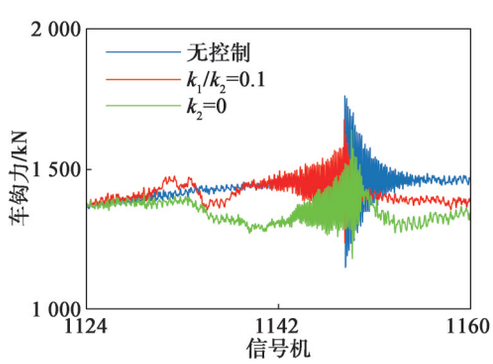


图 19　无控制和预测控制条件下的车钩力

Fig. 19　Coupler force without control and with predictive control

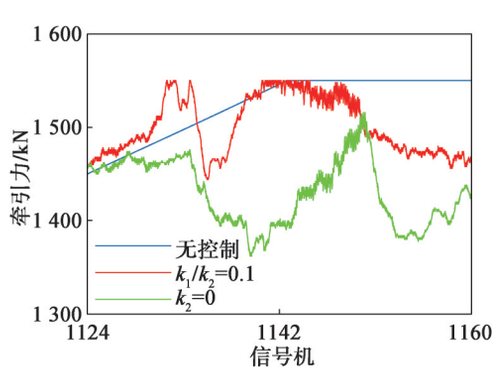


图 20　无控制和预测控制条件下的牵引力

Fig. 20　Traction force without control and with predictive control

通过对比有涌动、无控制和预测控制条件下的速度、车钩力信号可以得知，施加预测控制后，列车运行的速度波动范围有小幅度衰减，衰减幅度为0.5 km/h左右；车钩力最大值上有小幅度减小，减小范围为70~120 kN；车钩力波动范围明显减小，减小幅度为160 kN左右；车钩力收敛过程对应运行距离明显缩短，缩短距离大约为250~380 m。

5　结论

本文基于神朔铁路现场运行数据，分析了涌动发生时的信号特征，搭建了基于弹性阻尼车钩的列车多质点模型，仿真了“3+0”编组牵引万吨列车在保德—王家寨1124~1160信号机区间不发生涌动和发生涌动的速度和车钩力，针对涌动问题提出了一种有限集预测控制方法，仿真表明该控制方法对速度波动范围、最大车钩力、车钩力波动范围和车钩力收敛过程对应运行距离都有改善效果，最大车钩力减小了100 kN左右，车钩力波动范围减小了160 kN左右，车钩力收敛对应运行距离减小了大约300 m，列车能更快回到稳定运行状态，验证了该方法的有效性。

参考文献：

[1] 罗世豪. 线路参数对紧急制动重载列车动力性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LUO Shihao. Influence of alignment parameters on dynamic performance of heavy haul train with emergency braking [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[2] 曹震. 重载列车牵引计算研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
CAO Zhen. Research on traction calculation of heavy haul train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[3] 黄文. 重载列车平稳操纵的基本原则和方法[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(2): 59-62.
HUANG Wen. Ultimate principles and countermeasures of stable operation for heavy haul trains[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2011, 34(2): 59-62.

[4] 杨敏, 王开云, 纪天成. 车钩间隙对重载列车纵向冲击动力学的影响[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(2): 80-85.
YANG Min, WANG Kaiyun, JI Tiancheng. Effects of coupler slack on the longitudinal impulse of heavy haul train[J]. Journal of transportation engineering and information, 2018, 16(2): 80-85.

[5] 张志超, 李谷, 储高峰. 重载列车纵向动力学计算程序综述和研制[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(6): 1-7.
ZHANG Zhichao, LI Gu, CHU Gaofeng. Summary and development of the longitudinal dynamic calculation program for heavy haul trains[J]. Railway locomotive & car, 2014, 34 (6): 1-7.

[6] 辛民, 胡杨, 魏伟, 等. 神朔铁路重载列车纵向动力学性能试验研究[J]. 自动化应用, 2016(12): 165-166.
XIN Min, HU Yang, WEI Wei, et al. Experimental research on longitudinal dynamics performance of heavy haul train on Shenshuo railway[J]. Automation application, 2016(12): 165-166.

[7] 杨亮亮, 罗世辉, 马卫华, 等. 重载货车摩擦缓冲器阻抗特性的数值模拟[J]. 铁道学报, 2020, 42(1): 46-51.
YANG Liangliang, LUO Shihui, MA Weihua, et al. Numerical simulation on resistance characteristics of friction draft gear for heavy haul freight car[J]. Journal of the China railway society, 2020, 42(1): 46-51.

[8] 周黄标, 杜凯冰, 罗源, 等. 基于多质点模型的重载列车平稳操纵仿真研究[J]. 控制与信息技术, 2021(2): 8-17.
ZHOU Huangbiao, DU Kaibing, LUO Yuan, et al. Research on the smooth operation of heavy-haul train based on multi-particle model[J]. Control and information technology, 2021(2): 8-17.

[9] 孙树磊. 重载列车纵向冲动动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
SUN Shulei. Research on heavy haul train longitudinal impulse dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[10] 段振枢. 操纵方式对重载列车纵向冲动的影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
DUAN Zhenshu. Study on the effect of operating mode on longitudinal impulse of heavy haul train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.

[11] 吕胜强. 旅客列车纵向冲动与操纵关系的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LYU Shengqiang. Research on the relationship between the longitudinal impulse and the operation of passenger trains [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[12] 宁侨, 李铁兵, 霍晟, 等. 重载列车自动驾驶纵向动力学仿真技术研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 58-64.
NING Qiao, LI Tiebing, HUO Sheng, et al. Research on longitudinal dynamics simulation technology of automatic driving of heavy hual train[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 58-64.

[13] 杨兴光. 2万吨重载列车纵向动力学仿真研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
YANG Xingguang. The longitudinal dynamics simulation of 20000-ton heavy haul train[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.

[14] 王帅, 安中正, 白晶, 等. 万吨重载列车的平稳操纵[J]. 机车电传动, 2005(6): 60-61.
WANG Shuai, AN Zhongzheng, BAI Jing, et al. Stable operation of 10k ton heavy load train[J]. Electric drive for locomotives, 2005(6): 60-61.

[15] 张小维. 货运列车平稳节能操纵优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

ZHANG Xiaowei. Research on optimization of stable and energy-efficient operation for freight train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

Research on finite set predictive control for surge of 10,000-ton heavy haul trains on Shenmu-Shuozhou railway

ZHANG Quanming[1], ZHONG Puhua[2], ZHU Long[2]

(1. CHN ENERGY Baoshen Railway Group Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719316, China;
2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Shenmu-Shuozhou railway is an important heavy haul freight railway line in China. Heavy haul trains run in harsh environments with great difficulties in operation. Train surge seriously affects train operation smoothness and safety. To address the surge of trains running on Shenmu-Shuozhou railway, the signal characteristics when surge occurs on heavy duty trains were analyzed, and a train multi-particle dynamic model based on elastic damping couplers was established. In addition, the running state of heavy haul trains with and without surge was simulated. A finite set predictive control method was proposed to eliminate the surge of heavy haul trains. The simulation verifies that the predictive control can reduce the speed fluctuation and the maximum coupler force during the surge of trains.

Keywords: heavy haul train; smoothness; surge; multi-particle model; finite set predictive control

收稿日期：2022-06-27；修回日期：2024-01-01