

重载列车平稳运行的空电联合 制动匹配控制

马志强¹, 王竣渝², 魏 咪², 王青元²

(1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 重载列车在连续长大下坡道运行时需进行循环制动, 导致司机驾驶困难, 对列车安全平稳运行造成了极大的影响。为此, 文章考虑空气制动力发挥动态过程, 以列车运行环境和车辆机械特性为约束, 建立重载列车多目标优化操纵模型, 并采用二次规划算法进行求解。针对空气制动模型难以线性近似化, 利用模式化速度曲线的主体特征一致性, 将空气制动力作为一类列车已知控制力引入优化模型, 实现空电制动控制在时间与空间上的解耦, 并设计迭代算法解决了空气制动力与优化速度曲线的适配问题。最后将重载列车长大下坡道操纵准则量化为具体约束参数加入到模型中进行仿真, 并与重载列车实际运行数据进行对比, 结果表明, 该算法能够有效减小车钩力, 实现列车安全平稳运行。

关键词: 重载列车; 模式化操纵; 二次规划; 迭代算法; 纵向冲动

中图分类号: U292.92⁺¹

文献标识码: A

Combined electro-pneumatic braking matching control for smooth operation of the heavy-haul train

MA Zhiqiang¹, WANG Junyu², WEI Mi², WANG Qingyuan²

(1. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning, Hebei 062350, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: Heavy-haul trains need to be braked in cycles when running on long and steep downslopes, which causes great challenges for drivers and brings huge influences to the safe and smooth operation of the trains. In the current study, a multi-objective optimal operation model was established for heavy-haul trains firstly, considering the dynamic process in the application of air braking force, and the constraints due to the train operation environment and vehicle mechanical characteristics, and then was solved by the quadratic programming algorithm. Since the air braking model can hardly be linearly approximated, the air braking force was incorporated into the optimization model as a kind of train known control force, taking advantage of the consistent main characteristics of the modeled speed curve, resulting in the electro-pneumatic braking control decoupled spatially and temporally. Moreover, an iterative algorithm was designed to fit the air braking force with the optimized speed curve. Finally, the operation criteria for heavy-haul trains on long and steep downslopes were quantified and incorporated into the model as the specific constraints parameters for simulative study, and the results were compared with the measured operation data. The comparison results demonstrate that the proposed algorithm can achieve safe and steady operation of heavy haul trains by reducing coupler force.

Keywords: heavy-haul train; model-based operation; quadratic programming; iterative algorithm; longitudinal impulse

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021TFB2601504)

通信作者: 王青元 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事轨道交通电气化与自动化方面的研究; E-mail: wangqy@swjtu.edu.cn

引用格式: 马志强, 王竣渝, 魏咪, 等. 重载列车平稳运行的空电联合制动匹配控制[J]. 机车电传动, 2023(4): 71-76.

Citation: MA Zhiqiang, WANG Junyu, WEI Mi, et al. Combined electro-pneumatic braking matching control for smooth operation of the heavy-haul train[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 71-76.

0 引言

随着我国列车货运量需求提升,重载列车的牵引重量、开行密度也在逐步增加。结合我国特有的地势条件,重载列车在满载运行时受连续长大下坡道影响导致操纵困难。同时,司机仅凭经验难以实现空电联合制动的精准配合,电制动力施加不当容易造成列车纵向冲动,严重危害行车安全。因此,开展列车长大下坡空电联合制动匹配控制策略研究,优化行车指导操纵序列,对提高司机操纵水平和保证列车安全、平稳运行具有重要意义。

文献[1]通过考虑缓解再充风、低速慢行等问题提出了长大下坡周期性制动的验算评价方法并总结出定性操纵规则。文献[2]比较了长大下坡区段列车“惰行+空气制动”和“电制动+空气制动”两种操纵策略,并证明采用空电联合操纵的周期性制动方式可以减少空气制动次数,减小闸瓦温升,保证行车安全。文献[3-4]对大秦线2万吨重载列车在长大下坡道的操纵进行了仿真和现场试验,表明小减压量制动和全电制动配合使用可延长列车再充风时间,减少列车空气制动次数。

早年间重载列车运行于长大下坡道的研究主要基于现场经验,针对列车循环制动的最优操纵策略缺乏理论支撑。近年来,关于长大下坡道的重载列车运行优化的相关研究取得了一定的成果,如文献[5-7]。文献[8]采用随机动态规划模型,通过近似动态规划算法优化重载列车操纵策略。文献[9]将专家知识和机器学习方法融合,考虑长大下坡区段的循环制动情况,将该过程中的空气制动/缓解等操作问题表述为多级分类模型。文献[10]采用T-S模糊模型近似空气制动系统的制动缸充气模型,并通过滚动优化来抑制列车系统的不确定性干扰。但该文献并没有遵循基本的操作规则限制控制量的输入,得出的控制方式可能会带来纵向冲动过大的问题。文献[11]使用列车空气制动与纵向动力学联合仿真系统,通过优化分配长大下坡区段的空气制动次数,避免产生较大车钩力的地点,减小列车纵向冲动。

1 重载列车多目标优化模型

1.1 列车运动学方程

重载列车运行过程中主要受机车牵引力、电制动力、空气制动力、基本运行阻力、坡道附加阻力等力的影响,而列车的运动状态取决于列车所受合力。列车运动学方程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{ds} &= \frac{F_t(v) - F_{cb}(v) - B_c(v) - W_0(v) - W_j(s)}{(1+\gamma) \cdot M \cdot v} \\ \frac{dt}{ds} &= \frac{1}{v} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $F_t(v)$ 为列车牵引力; $F_{cb}(v)$ 为列车电制动力; $B_c(v)$ 为列车空气制动力; $W_0(v)$ 为列车基本运行阻力; $W_j(s)$ 为列车附加阻力; s 为列车运行距离; γ 为列车回转质量系数; v 为列车运行速度; M 为全列车总质量。

为精确表征长编组列车在长大下坡运行环境下的空气制动力发挥过程,本文采用文献[11]中提出的空气制动精细化模型如下:

$$B_c(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_{d,i} \\ C_\beta \cdot \beta_c \cdot \phi_h \cdot \left(P_N \cdot K_h + \sum_{i=1}^N G_N \cdot K_{z,i}(t) \cdot P_s(t) \right), & t_{d,i} < t \leq t_{m,i} \\ C_\beta \cdot \beta_c \cdot \phi_h \cdot \left(P_N \cdot K_h + \sum_{i=1}^N G_N \cdot K_h \cdot P_s(t) \right), & t > t_{m,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_β 表示常用制动对应减压量制动性能修正系数; β_c 表示“牵规”常用制动系数; ϕ_h 表示闸瓦的换算摩擦因数; P_N 表示机车闸瓦总个数; K_h 表示闸瓦的换算闸瓦压力; G_N 表示单个车辆的闸瓦个数; $K_{z,i}(t)$ 表示暂态过程中第*i*辆车实时闸瓦压力函数; $P_s(t)$ 表示历史操纵对制动性能的修正函数; $t_{d,i}$ 表示第*i*辆车制动缸充气开始时间; $t_{m,i}$ 表示第*i*辆车制动缸充气结束时间。

1.2 目标函数

为了便于使用计算机矩阵求解,将模型在里程范围 $[S_{start}, S_{end}]$ 内离散化为*N*个离散点,每单位离散间隔 $[S_{i-1}, S_i]$ 步长为 ΔS 。假设单个离散间隔内列车控制量不会突变。以平稳性、节能性和跟随性为目标,建立优化目标函数如式(3)所示。

$$J = w_f \sum_{i=1}^N \left[(F_{t,i} - F_{cb,i}) - (F_{t,i-1} - F_{cb,i-1}) \right]^2 + w_e \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_{t,i}}{\eta_t} - a\eta_{eb} F_{cb,i} \right) \cdot \Delta S + w_v \cdot \sum_{i=1}^N (E_i - E_{t,i})^2 \quad (3)$$

式中: J 为目标函数值; w_f 为列车运行平稳性权重; w_e 为列车运行能耗权重; w_v 为列车速度追踪权重; $F_{t,i}$ 为第*i*个离散点的机车牵引力; $F_{cb,i}$ 为第*i*个离散点的机车电制动力; η_t 为牵引传动系统机电效率; η_{eb} 为再生制动系统机电效率; E_i 为当前速度对应动能; $E_{t,i}$ 为第*i*个离散点目标速度对应的动能。

1.3 模型约束

列车运行依附于实际物理模型,因此模型中需要考虑列车的能力边界和运行边界等。其中,列车能力边界主要考虑列车牵引/电制动特性、列车控制力变化率等约束,如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq F_{t,i} \leq F_{t,\max}(v) \\ 0 &\leq F_{eb,i} \leq F_{eb,\max}(v) \\ 0 &\leq B_{c,i} \leq B_{c,\max}(v) \\ |F_{t,i} - F_{t,i-1}| &\leq \Delta F_t \\ |F_{eb,i} - F_{eb,i-1}| &\leq \Delta F_{eb} \\ F_{t,i} \cdot F_{eb,i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $F_{t,\max}$ 为满级位列车牵引力; $F_{eb,\max}$ 为满级位列车电制动力; $B_{c,i}$ 为第 i 离散点的车辆空气制动力; $B_{c,\max}$ 为最大常用制动空气制动力; ΔF_t 为机车牵引力变化率; ΔF_{eb} 为机车电制动力变化率。

运行边界主要考虑环境约束, 如线路限速、电分相约束等, 如式(5)所示。

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq v_i \leq v_{\lim,i}(s) \\ F_{t,ne} = F_{eb,ne} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $v_{\lim,i}(s)$ 为线路限速; $F_{t,ne}$ 为分相区机车牵引力; $F_{eb,ne}$ 为分相区机车电制动力。

重载列车在长大下坡道区段采用空电联合制动, 空气制动的施加和缓解由模式化操纵规则提供。由于空气制动模型的非线性程度大, 分段线性化会丢失原模型的重要信息, 同时分段点不固定、分段数众多等问题也表明了分段线性化方法并不适用于空气制动模型。由于空气制动力受时间、空间、运行速度的影响, 不同于基本运行阻力和附加运行阻力。因此, 将空电制动控制在时间和空间上进行解耦, 将空气制动力按照模式化操纵规则, 转化为随空间分布的已知控制力, 则长大下坡的列车运行优化问题转化为基于模式化空气制动的电制动操纵优化问题。

对列车基本运行阻力和牵引、电制动特性进行分段线性化, 根据文献[12]可将等式条件式(1)~式(2)、目标函数式(3)、约束式(4)~式(5)所表示的列车多目标优化问题转化为标准二次规划形式, 如式(6)所示。

$$\left. \begin{aligned} \min_x \quad & \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} A x = b \\ C x \leq d \\ l_b \leq x \leq u_b \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: x 为决策变量, H 为 $n \times n$ 的对称方阵 (n 为变量个数); f 为 $n \times 1$ 的列向量; A, b 分别为 $k \times n$ 的矩阵和 $k \times 1$ 的列向量 (k 为等式约束个数); C, d 分别为 $m \times n$ 的矩阵和 $m \times 1$ 的列向量 (m 为不等式约束个数); l_b, u_b 均为 $n \times 1$ 的列向量。

2 优化迭代算法设计

上述1.3节采用标准二次型求解列车多目标优化问题时, 需将列车运动学模型进行线性化, 针对空

气制动力无法转化为式(6)中的线性约束难题, 提出以下解决思路: 用优化目标速度 v_r 计算空气制动力初始值, 此时空气制动力为已知的常值向量, 可将它划归为一类附加阻力并完成优化计算, 但采用该方法会使优化结果的速度曲线分布和设定速度有偏差, 即当前设定的空气制动力分布与优化曲线速度分布不匹配, 导致优化操纵序列无实际指导价值。因此, 通过设计迭代算法使空气制动力逐渐与优化速度曲线相匹配。

由于既有操纵规则下空气制动和缓解的位置与初始速度固定, 此时基于机理模型空气制动力大小分布仅与列车运行速度相关, 基于优化速度曲线分布的空气制动力修正算法(单次空气制动)流程图如图1所示, 具体步骤如下:

Step1: 数据初始化, 设置目标速度 v_r , 并根据空气制动模型以恒定速度值 v_r 计算空气制动力序列 B_{c0} ; 进入Step2。

Step2: 将 B_{c0} 作为按位置分布的列车阻力代入式(6)进行求解。当 B_{c0} 为初始量有可行解时, 进入Step3; 若无解则更正目标速度 v_r 并依次执行Step1和Step2; 若目标速度 v_r 在合法范围内 ($0 \leq v_r \leq v_{\lim}$) 均无解, 则该问题无解。

Step3: 用优化计算结果的速度曲线重新计算空气制动力, 空气制动力修正后继续优化计算, 即迭代计算。判断相邻两次迭代计算中空气制动力或优化速度曲线的偏差是否在允许范围内, 若满足则停止迭代; 不满足则继续迭代; 若迭代过程中偏差值不往无差方向收敛, 则及时停止迭代计算并尝试修正优化计算目标权重并重新计算。

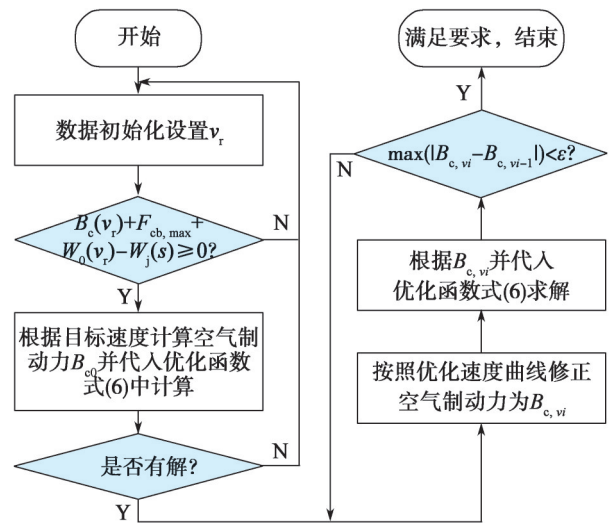


图1 优化迭代算法流程图

Fig. 1 Flow chart of iterative algorithm for optimization

上述算法需要通过多次迭代计算才能得出正确结果, 并且计算前未判断迭代算法的敛散性, 无疑降低

了解效率。基于上述情况,定义式(7)为迭代收敛性判据用于判定迭代算法是否收敛。

$$\left. \begin{aligned} B_c(v_r) + F_{eb, \max} + W_0(v_r) - W_j(s) &\geq 0 \\ B_c(v_r) + F_{eb, \min} + W_0(v_r) - W_j(s) &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $W_0(v_r)$ 为当前速度下的列车基本运行阻力; $W_j(s)$ 为当前位置下的线路附加阻力。

由式(7)可知,重载列车在长大下坡区段使用空电联合制动时,列车运行速度全程可由电制动力调控,且仅有唯一电制动控制序列 F_{eb} 使得列车运行速度恒定于目标速度 v_r 。

3 仿真实验

3.1 仿真方案

长大下坡道区段内重载列车采用空电联合制动操纵,两者共同作用决定列车运行平稳性。列车运行平稳性是评估重载列车长大下坡道优化效果的重要指标,由于空气制动力难以精确施加控制,因此优化电制动操纵以提高重载列车运行平稳性。本文采用由纵向动力学模型计算的车钩力分布作为列车运行平稳性指标。首先通过对实车运行状态复现验证本文模型的正确性,在此基础上,对基于操纵规则的列车电制动操纵进行优化仿真,并与实车运行数据对比。

对单一机车或车辆进行受力分析,每节车所受纵向力包括:前/后车的车钩力、基本运行阻力、机车牵引/电制动力、空气制动力。全列车纵向动力学可表示为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \dot{v}_1 &= F_{t,1} + F_{co,1} - F_{eb,1} - B_{c,1} - W_{0,1} - W_{j,1} \\ m_2 \dot{v}_2 &= F_{co,2} - F_{co,1} - F_{eb,2} - B_{c,2} - W_{0,2} - W_{j,2} \\ &\vdots \\ m_n \dot{v}_n &= F_{co,n} - F_{co,n-1} - F_{eb,n} - B_{c,n} - W_{0,n} - W_{j,n} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: m_n 为第 n 辆机车或车辆的质量; $\dot{v}_n$ 为第 n 辆机车或车辆的加速度; $F_{co,n}$ 为第 n 个车钩的车钩力。

3.2 实车运行状态复现

选取近期国内某铁路货运专线列车运行数据并截取出长大下坡区段连续3次长距离空气制动操纵序列用于分析。基于纵向动力学模型,按照司机的电制动操纵序列进行解算,并统计列车车辆车钩力的分布情况。图2是基于国内某货运专线列车实车数据的解算结果。

由图2可知,列车在空气制动缓解点和坡度值变化较大的位置上容易出现纵向冲动,其中在下坡道-平缓坡道变坡点附近产生较大的压钩力,在平缓坡道-下坡道变坡点附近产生较大的拉钩力。文献[13-15]提出重载列车在凹形坡道线路上制动会产生较大的压钩力,在凸形坡道上制动会产生较大的拉钩力,与本文解算

的车钩力分布情况一致。

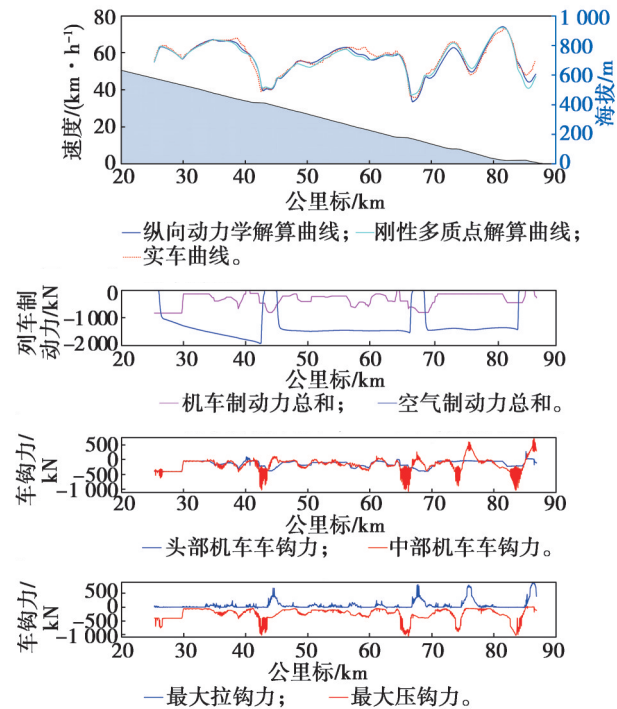


图2 实车纵向动力学解算结果

Fig. 2 Solving results of longitudinal dynamics for real train

统计实车纵向动力学解算结果中车钩力较大的路段,并作为实车运行车钩力分布参考,以便与列车电制动操纵优化后的车钩力分布进行对比,统计结果如表1所示。

表1 实车运行车钩力分布统计表

Table 1 Statistics of coupler force distribution in real train operation

起点公里标/km	25.93	42.3	64.9	73.1	82.5
终点公里标/km	28.16	45.6	69.3	77.7	88.1
最大拉钩力/kN	48.3	692.8	824.6	806.2	931.2
最大压钩力/kN	755.9	1 028.5	1 195.8	892.4	1 028.9

3.3 基于操纵规则的列车电制动操纵优化

根据朔黄铁路重载列车长大下坡区段安全操纵准则,在操纵优化模型中电制动增加以下约束条件:

①空电联合制动时,若列车实际速度与目标速度偏差过大,仅调整列车电制动力保证列车速度跟踪性;

②列车循环制动时,若列车开始缓解,则维持恒定电制动力 50 s。

将上述规则量化指标加入算法中,并结合纵向动力学模型进行仿真优化,计算优化电制动序列下列列车车钩力分布。纵向动力学解算结果如图3所示,车钩力分布数据统计如表2所示。

对比图2与图3可知,列车仍然在与实车相同的变坡区段存在最大拉钩力与压钩力,但通过加入操纵规则约束进行优化,列车运行曲线更加平滑,减少了列

表2 优化操纵序列车钩力分布统计

Table 2 Statistics of coupler force distribution with optimized operation sequence

数据来源对应的超始公里标	起点公里标/km	25.93	42.3	64.9	73.1	82.5
	终点公里标/km	28.16	45.6	69.3	77.7	88.1
基于规则约束的优化结果	最大拉钩力/kN	44.9	714.8	697.8	806.8	903.3
	(较实车变化)	(-7.04%)	(3.17%)	(-15.38%)	(0.07%)	(-3.0%)
	最大压钩力/kN	680.8	902.7	1 020.3	813.8	681.7
	(较实车变化)	(-9.94%)	(-12.23%)	(-14.68%)	(-8.81%)	(-33.74%)

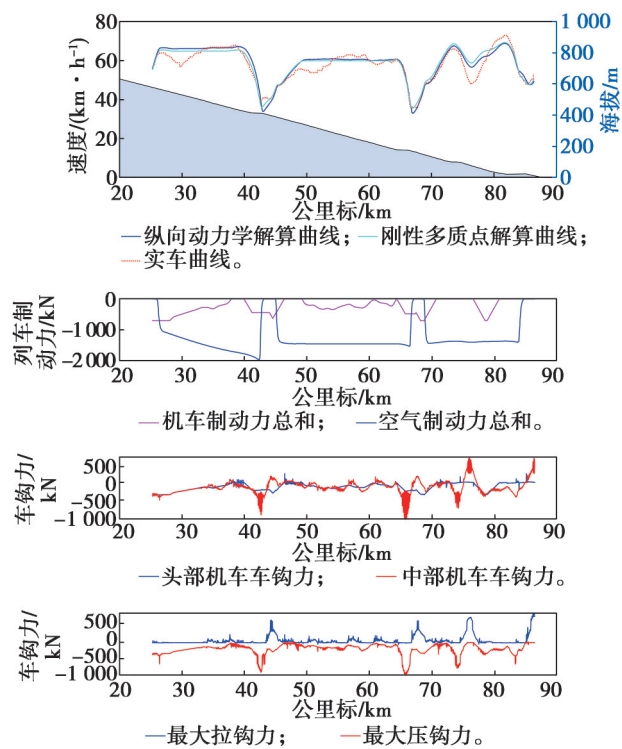


图3 优化操纵纵向动力学解算结果

Fig. 3 Calculation results of optimization vehicle longitudinal dynamics

车制动力变化频率,电制动力操纵序列相较司机控制更加平滑,降低了空电配合关键节点的操纵复杂度。由表2可知,列车电制动操纵优化明显降低了列车在变坡点的纵向冲动,压钩力最多同比下降33.74%,拉钩力最多同比下降15.38%。通过加入合理的操纵规则约束能够有效地降低列车纵向冲动,显著提升列车运行平稳性。

4 结论

本文以2万吨重载列车在长大下坡道循环制动过程为背景,开展重载列车平稳运行的空电联合制动匹配控制研究。针对列车运行特点,以平稳、达速、节能为目标构建列车多目标优化模型,并转化为二次规划问题进行求解。针对空气制动过程难以近似线性化的问题,设计了迭代算法,以解决空气制动力分布与优化速度曲线不匹配的问题。最后将重载列车长大下坡道操纵准则量化为具体约束参数加入到优化模型中。

优化结果显示,列车纵向冲动降低,并且电制动序列更加平滑,关键节点操纵复杂度大幅下降,优化后操纵序列具有实际指导意义。

参考文献:

[1] 孙中央,王长明.长大下坡道区段开行重载列车的安全问题[J].铁道机车车辆,2009,29(1):4-7.
SUN Zhongyang, WANG Changming. Security problems of operation heavy haul trains on the long heavy down grade [J]. Railway locomotive & car, 2009, 29(1): 4-7.

[2] 陈清.5 000 t级重载列车的合理操纵方法[J].西南交通大学学报,1994,7(3):281-285.
CHEN Qing. A study on rational operating methods of 5 000 t heavy-haul trains[J]. Journal of southwest jiaotong university, 1994, 7(3): 281-285.

[3] 耿志修,李学峰,张波.大秦线重载列车运行仿真计算研究[J].中国铁道科学,2008(2):88-93.
GENG Zhixiu, LI Xuefeng, ZHANG Bo. Simulation study of heavy haul train operation on Datong-Qinhuangdao railway[J]. China railway science, 2008(2): 88-93.

[4] 张波.重载组合列车牵引及制动系统的试验与仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.
ZHANG Bo. Test and simulation study on traction and brake system of combined heavy haul train[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009.

[5] 黄宇澄.重载列车在长大下坡区段的运行曲线优化方法研究[D].北京:北京交通大学,2021.
HUANG Yucheng. Research on the optimization method of operating curve of heavy-haul train on the long steep downward slope sections[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[6] 马红萍.重载列车长大下坡制动过程优化控制研究[D].南昌:华东交通大学,2019.
MA Hongping. Research on optimal braking process control of heavy-haul train on long steep down grade[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019.

[7] 张益铭.2万t列车通过朔黄铁路长大坡道优化研究[D].大连:大连交通大学,2020.
ZHANG Yiming. The optimization study of 20 000-ton train passing long and slope rampway of Shuohuang railway [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.

[8] WANG Xi, TANG Tao, HE Hui. Optimal control of heavy

- haul train based on approximate dynamic programming[J]. Advances in mechanical engineering, 2017, 9(4): 1-15.
- [9] WANG Xi, LI Shukai, TANG Tao, et al. Intelligent operation of heavy haul train with data imbalance: a machine learning method[J]. Knowledge-based systems, 2019, 163: 36-50.
- [10] LIU Jianfeng, LIU Youmei, HUANG Zhiwu, et al. Modeling and control design for an electro-pneumatic braking system in trains with multiple locomotives[J]. International Journal of modelling, identification and control, 2012, 17 (2): 99-108.
- [11] 王青元, 赵紫宁, 刘强强, 等. 两万 t 重载列车空气制动过程建模[J]. 机车电传动, 2022(4): 70-76.
- WANG Qingyuan, ZHAO Zining, LIU Qiangqiang, et al. Modeling of air braking process of 20 000 ton heavy haul train[J]. Electric drive for locomotives, 2022(4): 70-76.
- [12] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN Baolin. Optimization theory and algorithm[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [13] 魏伟, 张益铭. 2 万吨重载组合列车操纵优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(4): 35-40.
- WEI Wei, ZHANG Yiming. Operating optimization study of 20,000-ton heavy haul combined train[J]. Railway locomotive & car, 2021, 41(4): 35-40.
- [14] 高胜利. 影响 2 万 t 重载组合列车车钩力的因素分析[J]. 运输经理世界, 2021(14): 76-80.
- GAO Shengli. Analysis of factors affecting coupler force for 20 000 ton heavy haul train[J]. Transport business China, 2021(14): 76-80.
- [15] 吴萌岭, 祝露, 田春. 重载列车电控空气制动系统纵向冲动影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 964-971.
- WU Mengling, ZHU Lu, TIAN Chun. Analysis of factor influence for longitudinal impulse of heavy-haul train with electronically controlled pneumatic braking system[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2018, 46(7): 964-971.

收稿日期: 2022-09-07

修回日期: 2022-10-26