



重载列车在长大坡道时变环境下的安全调控技术研究

江帆, 李凯, 刘颖南

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 重载列车空气制动特性复杂、机车车辆耦合受力多变, 且列车状态感知能力有限, 导致其在长大坡道运行时控制难度较大。针对该问题, 文章开展了长大坡道时变环境下的安全调控技术研究。首先, 研究建立了面向长大坡道关键场景的列车纵向动力学模型、空气制动物理模型及安全平稳评价方法, 其中采用车钩疲劳指标表征列车全局运行安全性, 基于Sperling指标评价列车车辆平稳性; 然后, 结合提出的安全平稳评价方法, 制定了重载列车在长大坡道下的安全平稳操纵策略, 并开发了融入该策略的自动驾驶系统规划与控制算法; 最后, 在某重载铁路线上开展策略验证, 结果表明, 文章提出的相关技术可有效提升重载列车在长大坡道运行的安全性与平稳性。

关键词: 重载列车; 长大坡道; 安全调控; 纵向动力学; 自动驾驶; 运行平稳性; 重载铁路; 仿真

中图分类号: U292.92⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)05-0041-11

0 引言

我国作为资源型大国, 铁路运输是资源运输的重要方式, 普通货运列车已难以满足资源密集型产业的大规模运输需求, 因此发展重载列车运输技术具有重要意义。重载列车具有编组更长、载重更大的特点, 显著提高了铁路运输效率, 我国的大秦线、朔黄线和包神线等均为典型的重载运输线路^[1]。与此同时, 将自动驾驶技术应用于重载列车, 是探索提升其运行安全性与效率的新途径, 对推动重载列车智能化发展具有重要意义^[2]。

由于重载列车自重较大, 而且我国地理走势西高东低, 在长大坡道区段实现安全、平稳的自动驾驶面临严峻挑战^[3-4]。在长大上坡道, 许多线路在此区段设有分相区, 为保障列车安全通过分相无电区, 需维持较高速度运行。此时在大牵引力作用下的列车车钩将承受较高应力, 增加断钩风险^[5]。在长大下坡道, 满载

列车的重力势能转化为动能, 若操纵不当可能导致重载列车超速甚至脱线; 采用循环空气制动控制速度时, 若操纵不当产生的过大车钩力可能造成轨排横移等安全事故^[6]。

基于上述分析, 研究重载列车在长大坡道的安全调控技术至关重要。文献[7]以降低重载列车运行时的最大纵向车钩力为目标, 通过减少制动闸次优化了列车通过长大下坡道的操纵策略; 文献[8]通过纵向动力学仿真软件计算了大秦重载列车的最大车钩力, 探讨了不同坡度区段下重载列车的操纵策略优化问题。可见, 过往研究多从最大纵向车钩力层面探究长大下坡道的列车操纵策略, 而综合考虑车钩疲劳损伤和机车车辆平稳性、针对长大坡道(尤其是上坡道)开展重载列车操纵策略优化的研究较少。因此, 本文以某线路重载列车为例, 研究自动驾驶模式下重载列车在长大上、下坡道的安全调控技术, 设计安全调控策略及规划与控制算法。

基金项目: 中国中车科技研究开发计划重点项目(2022CTB143); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重大课题(SY2023J002)

通信作者: 江帆, 男, 高级工程师, 主要从事列车自动驾驶和网络控制技术研究; E-mail: jiangfan@csrzc.com

引用格式: 江帆, 李凯, 刘颖南. 重载列车在长大坡道时变环境下的安全调控技术研究[J]. 机车电传动, 2025(5): 41-51. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.005.

Citation: JIANG Fan, LI Kai, LIU Yingnan. Research on safety-oriented regulation and control techniques for heavy-duty train operation in time-varying environments on long and steep slopes[J]. Electric drive for locomotives, 2025(5): 41-51. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.005.

1 长大重载列车纵向动力学建模

1.1 机车车辆钩缓模型

列车钩缓系统模型的构建属于长大重载列车纵向动力学建模的关键子问题。本文以国内重载货运列车广泛装备的 MT-2 型摩擦式缓冲器为研究对象,以钩缓装置内部从板与动板是否接触为分界点,将缓冲器由压缩到释放的过程划分为 4 个工作阶段,同时考虑其楔块几何角度、摩擦副系数及动板上下间隙,形成缓冲器阻抗力建模方法,表达式如下^[9]:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \frac{1 + \tan(\beta + \arctan \mu_3) \tan(\gamma + \arctan \mu_1)}{1 - \tan(\alpha + \arctan \mu_2) \tan(\gamma + \arctan \mu_1)} \\ \psi_2 &= \psi_1 + \frac{2(1 - \mu_1 \tan \gamma) \mu_4 (\psi_1 - 1)}{\mu_1 + \tan \gamma} \\ \psi_3 &= \frac{1 + \tan(\beta - \arctan \mu_3) \tan(\gamma - \arctan \mu_1)}{1 - \tan(\alpha - \arctan \mu_2) \tan(\gamma + \arctan \mu_1)} \\ \psi_4 &= \frac{(\tan \gamma - \mu_1) \psi_3}{\tan \gamma (1 - 2\mu_1 \mu_4 + 2\mu_1 \mu_2 \psi_3) + 2\mu_4 \psi_3 - 2\mu_4 - \mu_1} \end{aligned} \right\} (1)$$

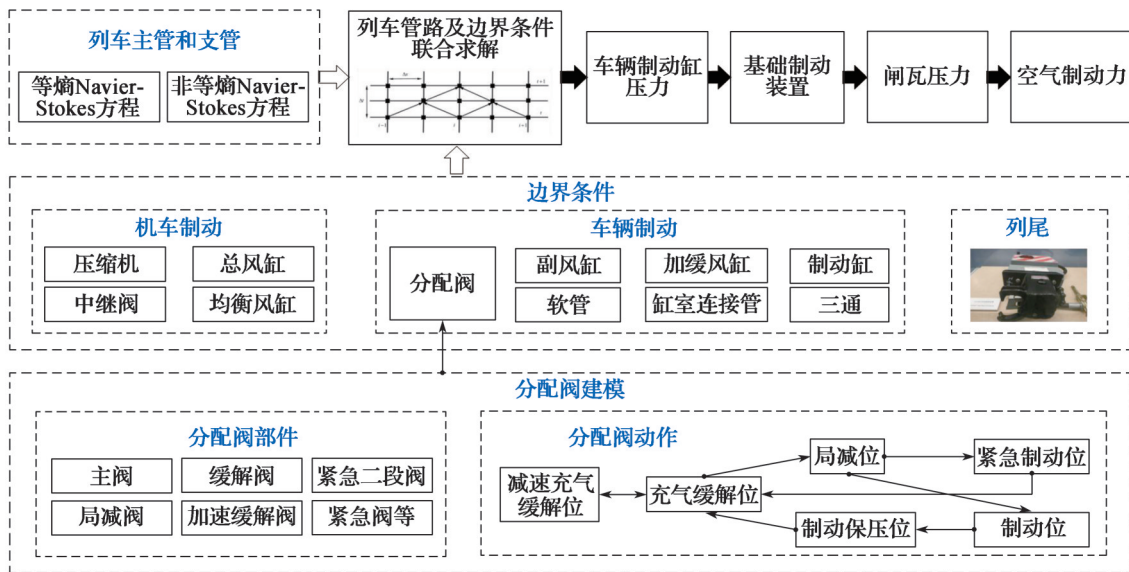


图1 空气制动系统物理模型建模框架

Fig. 1 Physical modeling framework of air brake system

1.3 动力学联合求解

将列车每节机车车辆简化为一维多质点分布式弹簧阻尼系统,系统仅在纵向产生位移,由牛顿第二定律得到单节车辆的纵向运动微分方程为

$$m_i \ddot{x}_i = F_{\text{TDB}i} + F_{\text{B}i} + F_{\text{R}i} + F_{\text{C}i} \quad (4)$$

式中: i 为第 i 节车辆; m 为单节车辆的质量; $\ddot{x}$ 为列车的加速度; F_{TDB} 为机车牵引力或电制动力,仅由机车提供; F_{B} 为空气制动力,仅由货车部分提供; F_{R} 为阻力合力项,包括基本运行阻力、坡道阻力和曲线阻力; F_{C} 为车钩力合力。

采用 4 阶显式 Runge-Kutta 方法求解公式(4),可实

$$\mu_i = \mu_s + (\mu_s - \mu_k) \exp(-\sigma |v_i|), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$F_j = \psi_j F_{\text{sm}} - (\psi_j - 1) F_{\text{sr}}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中: j 为缓冲器的工作阶段; ψ 为主弹簧力 F_{sm} 和回复弹簧力 F_{sr} 的系数; μ_s 和 μ_k 分别为动态和静态摩擦因数; α 、 β 和 γ 为摩擦斜楔角; v_i 为缓冲器楔块间的相对速度; σ 为摩擦因数 μ 的调整参数。

1.2 时变环境空气制动系统物理模型

对于重载列车,空气制动系统直接关系列车的运行安全,本文采用物理模型对空气制动系统进行建模,建模框架如图 1 所示。首先,对空气主管和支管建立基于质量、动量和能量守恒的 Navier-Stokes 方程,将与管道两端相连接的三通、分配阀、连接软管和缸室等视为边界;其次,利用特征线法对方程组进行离散,联立边界方程求解某一时刻制动缸压力的唯一解,并在时间维度上进行迭代计算,得到任意时刻的制动缸压力;最后,通过对基础制动装置和闸瓦进行建模,求解得到空气制动力。

现列车纵向动力学仿真。

2 长大坡道运行安全平稳评价

2.1 机车车辆车钩疲劳损伤

由美国铁路协会制定的 AAR 标准^[10]提出一种疲劳分析方法,该方法结合雨流计数法和 Miner 线性累积损伤理论^[11]计算疲劳损伤,其累积损伤值表达式为

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

式中: N_i 为对应的疲劳损伤循环次数; n_i 为 σ_i 级应力循环次数, $n_i = \alpha_i N_i$, α_i 为每级应力施加的循环次数占总次数

的比例, N_T 为载荷谱下车钩达到损伤的总循环次数。

当累积损伤值 D 达到1时, 车钩发生疲劳破坏, 疲劳损伤循环次数 N_i 为

$$N_i = \frac{N_e}{\left(S_{\max}/S_e\right)^{1/k}} \tag{6}$$

式中: S_e 和 N_e 分别为材料的疲劳极限应力和疲劳循环次数; k 为应力水平和疲劳循环次数的对数曲线斜率; $S_{\max}$ 为最大疲劳失效应力。

最后, 确定疲劳寿命 $L_f=N_T/\beta$, 其中 β 为每千米载荷谱中载荷的总循环次数。

2.2 机车车辆平稳性评价

通常采用平稳性指标和舒适度指标^[12]来评价机车车辆的平稳性, 但舒适度指标的计算需获取三向加速度(纵向、横向和垂向), 不适用于单独纵向的平稳性评价。本文基于Sperling指标, 提出一种引入纵向修正系数的计算方法, 用于评价机车车辆纵向平稳性。

平稳性指标 W 为Sperling指标中的乘坐舒适度指标, 计算公式为

$$W = 3.57 \times \sqrt{\frac{A^3}{f} F(f)} \tag{7}$$

式中: A 为振动加速度; f 为振动频率; $F(f)$ 为频率修正系数。

由于GB/T 5599—2019标准中^[13]仅给出了横向和垂向的频率修正系数, 对于纵向修正系数, 参考国际上ISO 2631和UIC 513标准对舒适度的处理方式, 将横向加权系数应用于纵向的计算, 并按照横向平稳性等级划分标准进行评价。首先, 分段记录振动加速度时域响应; 其次, 对时域响应进行傅里叶变换后再进行频率加权, 按频率分类计算各频段的平稳性指标 W_i ; 最后, 根据式(8)求出全频段的平稳性指标 W , 并按照表1完成机车和货车的平稳性等级划分与评价。

$$W = \sqrt[10]{W_1^{10} + W_2^{10} + \cdots + W_n^{10}} = \sqrt[10]{\sum_{i=1}^n W_i^{10}} \tag{8}$$

表1 机车与车辆的运行平稳性评价等级

Table 1 Evaluation ratings for operating stability of locomotives and wagons

平稳性等级	平稳性指标 W		评定
	机车	货车	
1级	$W \leq 2.75$	$W \leq 3.50$	优
2级	$2.75 < W \leq 3.10$	$3.50 < W \leq 4.00$	良好
3级	$3.10 < W \leq 3.45$	$4.00 < W \leq 4.25$	合格

3 自动驾驶安全调控策略研究与实现

3.1 长大上坡道牵引操纵策略研究

重载铁路长大上坡道属于列车自动驾驶控制的难

点区段, 其牵引操纵策略涉及牵引力加载/卸载时机与幅值等。现有自动驾驶规划与控制算法多围绕机车局部约束和评价指标(如限速约束、减压量约束、能耗评价等), 对列车级相关安全约束和评价指标考虑较少, 本文基于机车车辆车钩疲劳损伤计算方法, 研究长大上坡道牵引操纵策略, 以提升列车运行安全性。

以万吨重载列车在12‰上坡道运行的自动驾驶场景为例, 利用列车纵向动力学软件进行仿真, 得到机车/车辆的时间-车钩力序列; 选取机车后钩处的时间-车钩力序列, 采用雨流计数法^[14]进行计数并计算疲劳损伤。疲劳损伤关键参数如表2所示, 车钩力峰-谷值循环次数与车钩疲劳损伤如图2所示。由图2(a)可知, 车钩力序列经雨流计数后, 绝大部分载荷位于峰-谷二维平面对角线处, 即载荷峰-谷值相等的循环次数 n_i 较多。由图2(b)可知, 大部分载荷造成的疲劳损伤 D 较小, 较大疲劳损伤主要由较大循环载荷 $S_{\max}$ 引发; 在长大上坡重载场景下, 较大的平均载荷幅值会加速钩缓装置已有裂纹的扩展。

表2 车钩疲劳计算参数

Table 2 Parameters for coupler fatigue calculation

序号	参数名称	参数符号	数值
1	理想S-N曲线拐点处的循环次数	N_e	2 000 000
2	理想S-N曲线的斜率	k	0.35

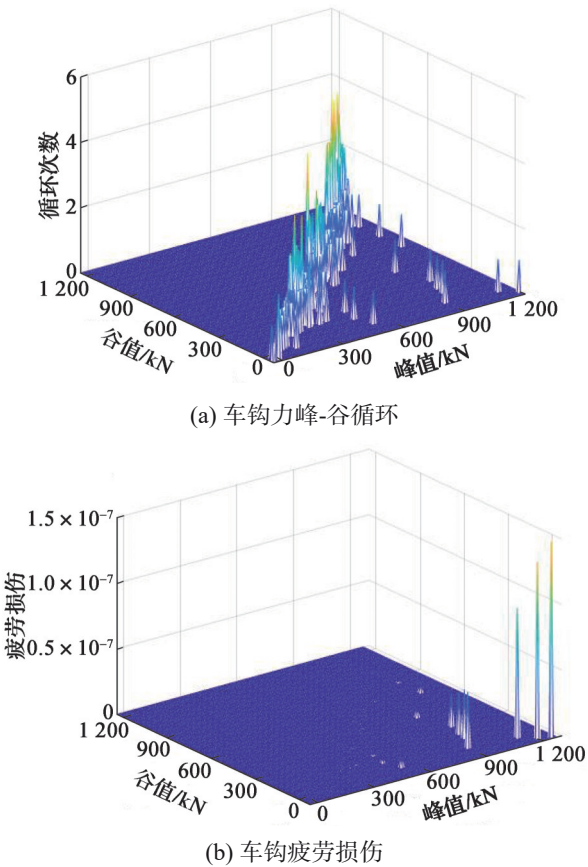


图2 车钩力峰-谷值循环次数与车钩疲劳损伤

Fig. 2 Coupler force peak-valley cycle times and corresponding coupler fatigue damage

在给定疲劳损伤参数的条件下,由式(5)可知:若要减小疲劳损伤,则一方面可减小 σ_i 级应力循环次数,另一方面可增大 σ_i 级应力对应车钩失效时的总循环次数 N_i ,其中减小 σ_i 可直接通过降低牵引力调节次数实现。式(6)为 N_i 计算方程,可见增大 N_i 可通过降低最大循环载荷 $S_{\max}$ 即降低车钩力峰值实现;而在长大上坡牵引工况下,降低车钩力峰值仅需约束最大牵引力。

由以上分析可知,在自动驾驶规划与控制算法中,通过降低牵引力调节频次并考虑最大牵引力约束,能在保证运行效率的同时降低列车车钩疲劳损伤,从而提升列车运行安全性。

3.2 长大下坡道缓解操纵策略研究

重载列车空气制动缓解阶段受缓解延迟与坡度差等因素影响,易产生较大冲动,从而影响机车车辆的安全性和平稳性。目前,分析缓解延迟最有效的手段是集成空气制动系统物理模型与列车纵向动力学仿真^[15],结合机车车辆纵向平稳性评价指标和车钩力变化规律研究缓解操纵策略。由式(7)可知,纵向平稳性直接与纵向加速度(由机车车辆合力产生)相关,而车钩力作为影响机车车辆纵向运动的主要力,直接影响机车车辆加速度。在长大下坡道缓解过程中,电制动力、空气制动力和坡道力等耦合叠加,易产生较大

车钩力。

根据空气制动系统物理模型分析缓解动态特性,缓解压力波的传递时间随列车编组增加大幅延长,且各车辆阀体内孔口开闭、活塞运动等瞬态变化,进一步使重载列车缓解态势呈现非线性、强时变等特点。重载列车长大下坡道缓解过程如图3所示,缓解后各车辆制动缸压力均以一定斜率滞后下降,受制动缸鞣鞣回复作用,制动缸压力缓慢降至0 kPa,导致缓解后制动缸压力呈现强非线性特性,且缓解速度越低、空气制动力越大,易使机车车辆产生较大纵向加速度,影响列车运行平稳性。

基于上述对空气制动缓解工况平稳性问题发生过程的分析,可通过以下较优操纵策略提升制动缓解过程中的列车平稳性:

①约束缓解速度。在满足再充风时间约束的前提下,尽量提高缓解速度。分析表明,列车速度越低,空气制动力越大,加之缓解过程中各车辆空气制动力消散不同步,易导致车辆间受力不均。此时若空气制动力过大,不仅会引发较大拉钩力,还会因缓解瞬时车钩力的剧烈变化引起加速度突变,从而产生较大冲动。

②约束缓解位置。缓解时应避开变坡点,以改变机车车辆坡道力分布特征,降低因坡度差产生的较大车钩力,同时避免变坡点处线路条件对加速度变化的

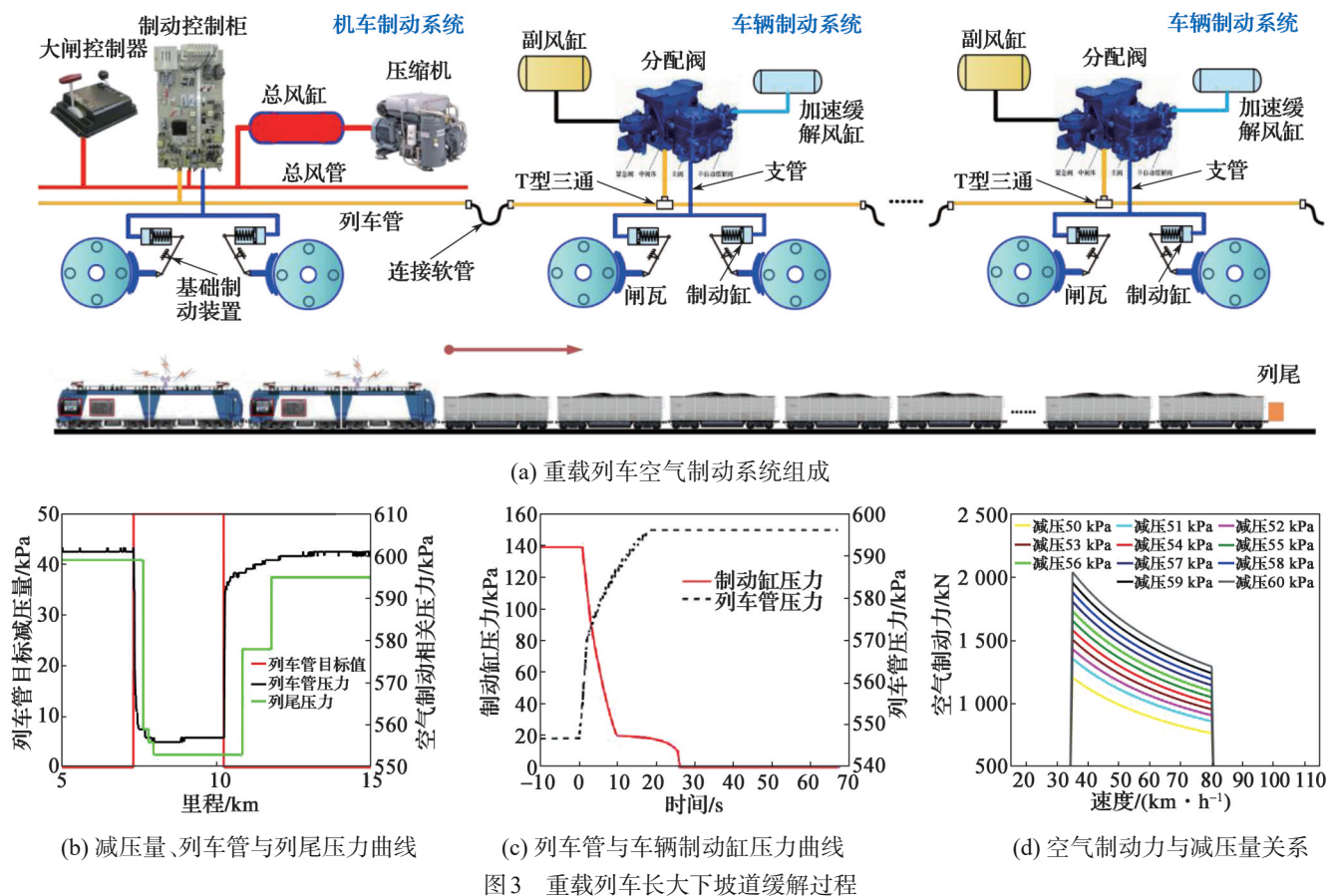


Fig. 3 Brake release process of heavy-duty trains on long and steep downgrades

放大效应, 从而减少缓解带来的纵向冲动。

③维持电制动力。缓解开始后, 应维持电制动力一段时间, 使车钩力在传递过程中自然衰减, 同时避免因电制动力调节过快加剧车钩力与加速度的波动, 有利于抑制机车车辆冲动。

综上, 为实现长大下坡道运行的安全平稳调控, 在设计自动驾驶规划与控制算法时, 需在空气制动缓解过程中考虑目标缓解速度/位置约束及缓解过程电制

动平稳约束 (即电制动力维持)。

3.3 长大坡道安全平稳调控策略实现

为保障重载列车在长大坡道场景下的运行安全与平稳性, 需设计并实现融合长大上坡道和长大下坡道平稳操纵策略的重载列车自动驾驶系统曲线规划与跟踪控制算法。如图4所示为重载列车自动驾驶系统曲线规划与跟踪控制算法技术框架。

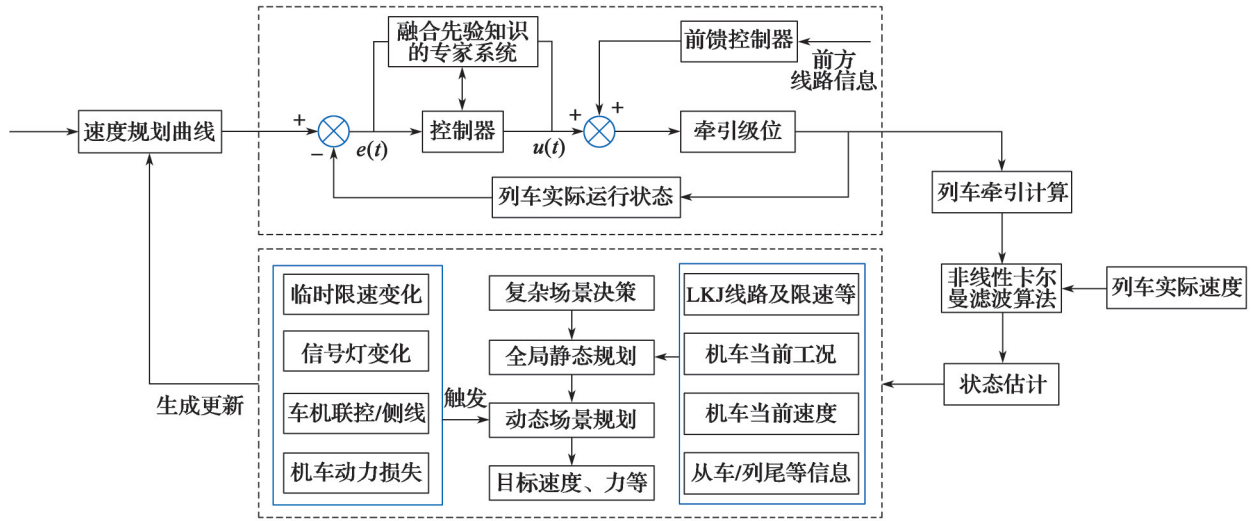


图4 重载列车自动驾驶系统曲线规划与跟踪控制算法技术框架

Fig. 4 Technical framework of curve planning and tracking control algorithm for automatic operation system of heavy-duty trains

该自动驾驶系统从列车运行监控记录装置和网络控制系统等车载关联设备中获取前方线路信息与列车状态数据。当满足自动驾驶规划条件时, 通过复杂场景决策、全局静态规划和动态场景规划等方法, 生成从当前列车状态至目标区域的速度曲线。其中, 复杂场景决策结合前方线路/信号等与当前列车状态进行分析判断, 通过场景特征与关键操纵映射关系确定规划与控制目标及约束; 采用全局静态规划与动态场景规划方法分别满足默认运行场景和各种临时变化场景的运行速度曲线规划需求。将长大坡道牵引/缓解工况的安全平稳约束参数融入自动驾驶专家系统, 自动驾驶控制器以规划的速度曲线为目标, 融合先验知识的专家系统与控制器结合, 实现控制目标并输出控制指令, 完成列车从启动至停车的自动驾驶运行; 同时, 将列车实际运行速度和列车牵引计算模块输出的速度作为非线性卡尔曼滤波算法的输入数据, 实现空气制动强弱系数等关键参数的在线辨识, 并将辨识结果发送至规划模块, 规划模块根据这些关键参数动态调整规划曲线。

为实现自动驾驶系统对重载列车在长大坡道的安全平稳控制, 基于长大坡道操纵策略和图4所示的技术框架, 设计了一种融合长大坡道操纵策略的列车速度规划曲线计算方法, 算法参数如表3所示, 算法流程如图5所示。

如图5所示, 列车的速度规划曲线采用动态规划算法进行求解。该算法基于Bellman最优性原理, 通过将问题分解为多个阶段, 能够保证求解此类多阶段决策问题的全局最优解。为降低搜索空间范围, 由限速曲线生成最大允许速度离散轨迹; 设定里程/速度步长 $(\Delta x/\Delta v)$ 及规划里程与速度范围, 得到二维 $x-v$ 离散空间; 将列车速度规划问题分解为可递归求解的最小化问题, 并初始化目标函数 J 及历史状态索引PreS等。

对离散里程子空间逐一向前迭代, 计算每个里程子节点 pos_1 下一步可到达的速度子节点 pos_2 ; 通过列车状态转移方程及约束条件, 可计算得到速度子节点搜索范围 $[\text{pos}_l, \text{pos}_u]$, 约束条件既包括限速约束、牵引电制动力约束和加载/卸载斜率等一般约束, 还包括3.1节和3.2节形成的长大坡道安全平稳调控约束, 列车状态转移方程与长大坡道安全调控约束分别为:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= (F_i - f_r - f_g - f_c - f_b) / M \\ V_{i+1} &= \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a_i \cdot \Delta x} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} F_i &\leq F_{\max} \\ 0 &< K_F < \zeta \\ V_L^R &\leq V^R \leq V_U^R \\ X_L^R &\leq X^R \leq X_U^R \\ |F_{i+1}^b - F_i^b| &< \varepsilon, \text{ if } t \in [t^R - T_{\text{hold}}, t^R + T_{\text{hold}}] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $F_i \leq F_{\max}$ 与 $0 < K_F < \zeta$ 为长大上坡安全平稳调控约

表3 动态规划算法参数

Table 3 Parameters of dynamic programming algorithm

序号	参数名称	参数符号	序号	参数名称	参数符号
1	里程子空间	N_1	20	里程子节点	pos1
2	速度子空间	N_2	21	速度子节点	pos2
3	性能指标	q	22	速度子节点搜索上限	pos_u
4	历史状态索引	PreS	23	速度子节点搜索下限	pos_l
5	第 <i>i</i> 时刻牵引力/电制动力变化量	ΔF_i	24	列车加速度	a
6	列车位移	S_i	25	列车总质量	M
7	第 <i>i</i> 时刻牵引力/电制动力	F_i	26	列车基本阻力	f_r
8	列车速度	V_i	27	列车坡道阻力	f_g
9	第 <i>i</i> 时刻累计牵引调节次数	C_i	28	列车曲线阻力	f_c
10	多目标权重	w_1, w_2, w_3	29	列车空气制动力	f_b
11	列车限速	V_{lim}	30	最大牵引力约束	F_{max}
12	牵引电制动力上限	F_i^U	31	缓解速度	V^R
13	牵引电制动力下限	F_i^L	32	缓解速度约束上限	V_U^R
14	里程单步搜索步长	Δx	33	缓解速度约束下限	V_L^R
15	速度单步搜索步长	Δv	34	缓解位置	X^R
16	缓解位置约束上限	X_U^R	35	缓解位置约束下限	X_L^R
17	电制动力维持约束	ε	36	电制动力	F^b
18	牵引力/电制动力调节频次	K_f	37	牵引调节频次约束	ζ
19	缓解时刻	t^R	38	维持时间	T_{hold}

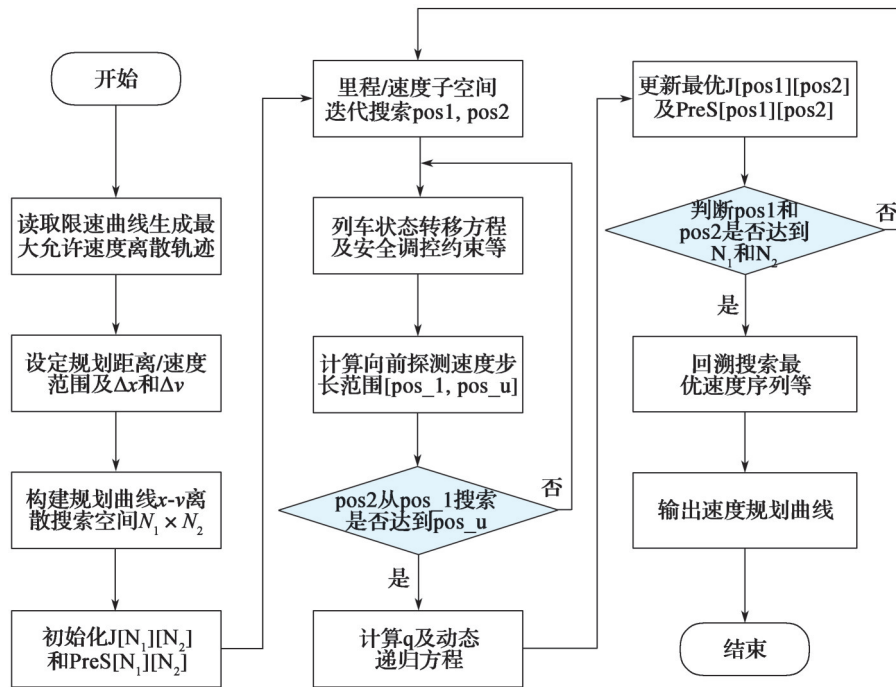


图5 融合长大坡道操纵策略的列车速度规划曲线求解算法流程

Fig. 5 Flowchart of train speed planning curve solving algorithm integrating control strategy for long and steep slopes

束，即最大牵引力约束与牵引力调节频次约束； $V_L^R \leq V^R \leq V_U^R$ 、 $X_L^R \leq X^R \leq X_U^R$ 和 $|F_{i+1}^b - F_i^b| < \varepsilon$ 为长大下坡道安全平稳调控约束，即缓解速度约束、缓解位置约束和缓解电制动力维持约束。

采用里程子空间单步搜索和速度子空间递归搜索相结合的方式定位子节点，从阶段*i*转移至阶段*i+1*，计算性能指标 q_i ，并动态递归求解初始状态至第*i*阶段状态的最优目标函数 J^* ，具体如下：

$$q_i = \begin{cases} \min \left(w_1 |\Delta F_i| + w_2 |F_i S_i| + w_3 \frac{2S_i}{V_i + V_{i+1}} + w_4 C_i \right) \\ \infty, \text{ if } V_i > V_{lim} \text{ or } F_i > F_i^U \text{ or } F_i < F_i^L \end{cases} \quad (11)$$

$$J_i^*(V_i, S_i) = \min \left[q_i + \sum J_{i+1}^*(V_{i+1}, S_{i+1}) \right] \quad (12)$$

式中： $|\Delta F_i|$ 可限制长大上坡道场景牵引力调节幅值； $F_i S_i$ 为*i*时刻能耗； $\frac{2S_i}{V_i + V_{i+1}}$ 为运行效率指标； C_i 可限制牵引力调节次数（该指标影响车钩疲劳），从而同时

实现牵引力调节幅值与频次的优化; 每一步均更新存储历史状态索引 PreS, 里程子空间与速度子空间遍历完毕, 即可通过 PreS 回溯得到完整目标速度序列。

通过图5所示的求解算法, 可在长大下坡道生成满足目标缓解速度和缓解位置双重约束的列车速度规划曲线, 控制器可直接采用速度跟踪模式, 通过跟踪该曲线确保缓解操纵符合终端约束。但对于长大下坡道缓解工况的电制动力维持约束, 若控制器仅基于速度跟踪模式, 则无法保证满足该约束。因此, 本文设计了一种控制器跟踪模式切换方法, 并将其集成至如图4

所示的规划与控制算法技术框架中, 以提升自动驾驶列车在长大下坡道空气制动区段缓解工况的运行平稳性。重载列车自动驾驶长大下坡道缓解电制动力维持约束实现方法如图6所示, 该切换方法适用于列车空气制动工况, 通过实时监测列车当前位置与目标缓解位置, 计算列车缓解前 T_{hold} 时刻对应的空间位置 X_{hold} ; 列车到达 X_{hold} 后启动缓解计时, 同时控制器由速度跟踪模式切换至电制动力跟踪模式 (自动驾驶规划模块已生成平稳电制动力序列); 当缓解计时达到电制动力维持约束时间时, 控制器重新切换到速度跟踪模式。

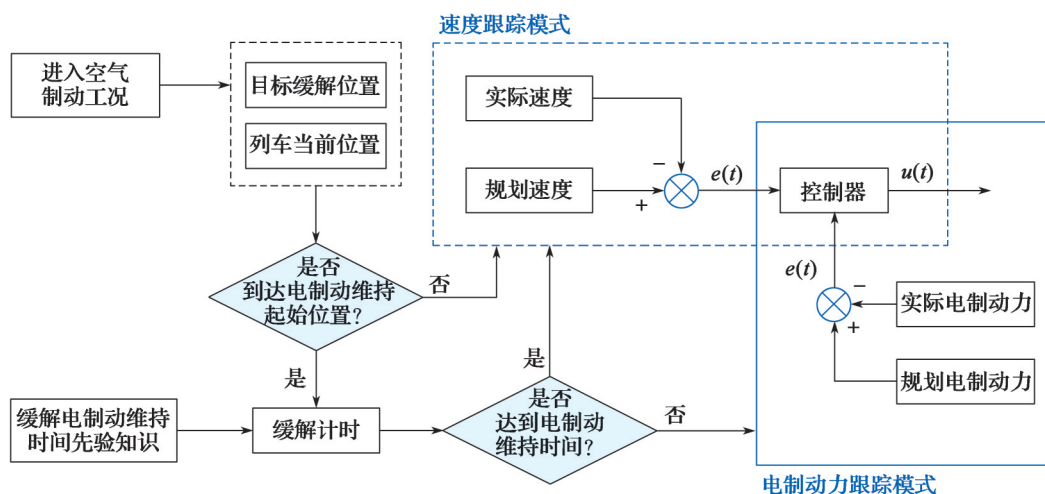


图6 重载列车自动驾驶长大下坡道缓解电制动力维持约束实现方法

Fig. 6 Implementation method for automatic operation of heavy-duty trains on long and steep downhill to alleviate constraints on maintaining electric braking force

4 策略验证

以国内某重载线路为研究对象, 该线路采用3台八轴9 600 kW电力机车集中式牵引万吨货物列车, 其中重车方向需通过连续50 km的长大上坡区段 (最大坡度12‰, 平均坡度10‰), 是重载列车长大上坡道控制的典型线路; 同时, 需通过连续40 km的长大下坡区段 (平均坡度为-10‰), 是重载列车长大下坡道空电联合控制的典型场景。本文将上述策略融入重载列车自动驾驶系统, 并基于该线路运行自动驾驶系统; 再结合自动驾驶运行数据, 通过多质点列车纵向动力学仿真、车钩疲劳损伤计算和机车车辆平稳性评价方法, 验证本文提出的长大坡道安全平稳控制策略的应用效果。

4.1 长大上坡道验证

依据上述线路K100~K150长大上坡区段的自动驾驶操纵数据与列车运行速度等数据, 分析长大上坡道操纵策略优化前后的车钩疲劳损伤和列车平稳性指标。首先验证列车纵向动力学模型在长大上坡场景的计算精度, 列车仿真速度与实际速度对比如图7所示, 速度最大误差为1.15 km/h, 平均误差为0.72 km/h, 计算结

果较准确, 表明本文构建的纵向动力学模型满足长大上坡道仿真应用要求。在此基础上, 基于自动驾驶记录数据对优化前后的自动驾驶操纵进行车钩疲劳损伤及机车平稳性计算分析, 结果分别如图8和图9所示, 优化后列车整体车钩疲劳损伤值下降, 机车产生的较大冲动减少。

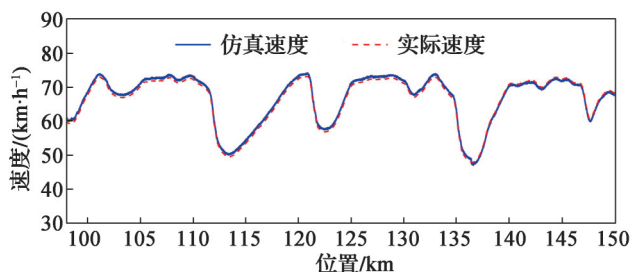


图7 长大上坡列车纵向动力学仿真速度与实际速度对比

Fig. 7 Comparison of longitudinal dynamics simulation speed and measured speed on long and steep uphill

车钩疲劳损伤指标和纵向平稳性指标计算结果如表4所示, 对比优化前后指标可知: 优化后, 长大上坡区段最大车钩力有所减小; 所有车钩最大疲劳损伤值降低13.00%, 平均疲劳损伤值降低28.40%; 机车最大平稳性指标改善2.86%, 平均平稳性指标改善2.61%。上述结果表明, 本文提出的自动驾驶长大上坡道控制

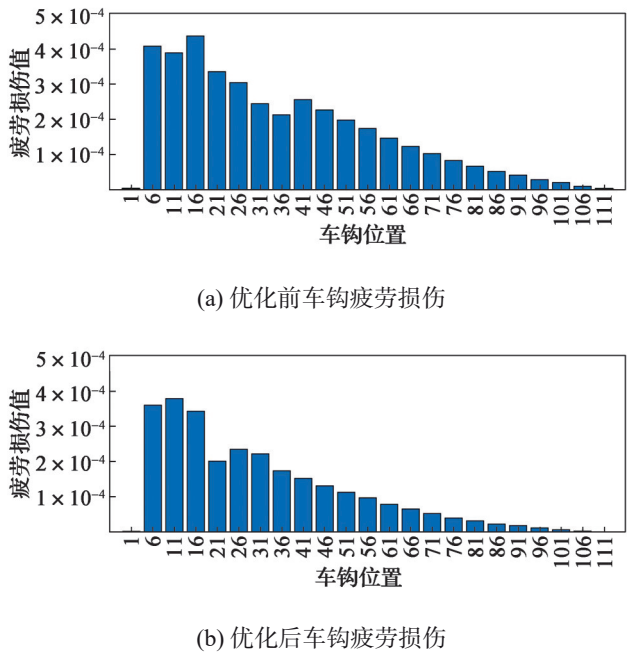


图 8 优化前后车钩疲劳指标对比
Fig. 8 Comparison of coupler fatigue index before and after optimization

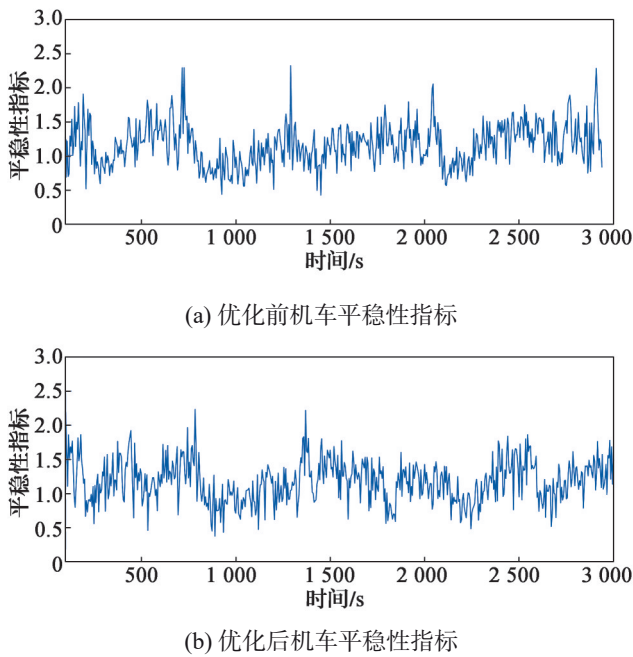


图 9 优化前后机车平稳性指标对比
Fig. 9 Comparison of locomotive Sperling index before and after optimization

表 4 优化前后指标量化对比

Table 4 Quantitative comparison of indexes before and after optimization

对比项	最大车钩力/kN	车钩疲劳损伤指标		纵向机车平稳性指标	
		最大损伤	平均损伤	最大值	平均值
优化前	1 442.37	$4.352\ 5\times 10^{-4}$	$1.660\ 7\times 10^{-4}$	2.385 1	1.180 2
优化后	1 440.68	$3.786\ 6\times 10^{-4}$	$1.189\ 0\times 10^{-4}$	2.316 8	1.149 4

策略，可有效降低车钩疲劳损伤，显著提升列车在长大上坡道的运行安全性和平稳性。

4.2 长大下坡道验证

本节依据上述线路长大下坡区段的自动驾驶操纵与列车运行速度等数据，分析长大下坡道电制动维持策略优化前后的车钩疲劳损伤和列车平稳性指标。首先验证列车纵向动力学模型在长大下坡场景的计算精度，列车仿真速度和实际速度对比如图 10 所示，速度最大误差为 1.21 km/h，平均误差为 0.44 km/h，计算结果较准确，表明本文构建的纵向动力学模型满足长大下坡道仿真应用要求。在此基础上，基于自动驾驶记录数据对优化前后的自动驾驶操纵进行车钩疲劳损伤及机车平稳性计算分析。

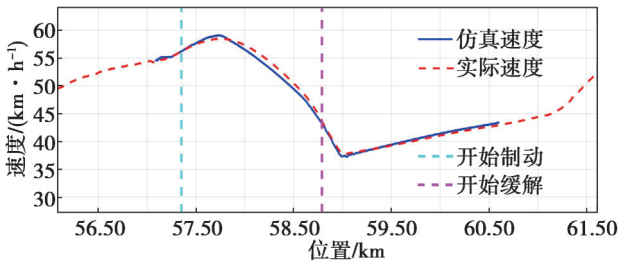


图 10 长大下坡道列车纵向动力学仿真速度与实际速度对比
Fig. 10 Comparison of longitudinal dynamics simulation speed and measured speed on long and steep downhill

优化前后的自动驾驶系统操纵序列如图 11 所示。优化前，操纵序列为缓解后先增加电制动力→短暂维持→减小→再维持；优化后，操纵序列为缓解后电制动力稳定维持在约 600 kN，维持时间约为 60 s。

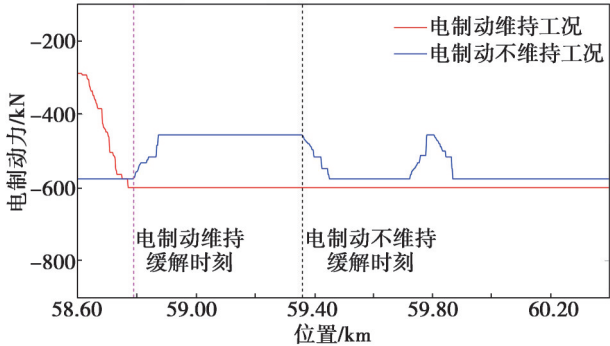


图 11 优化前后电制动力操纵序列
Fig. 11 Electric braking force control sequence before and after optimization

对比优化前后空气制动缓解后的车钩力仿真结果如图 12 所示。电制动不维持操纵时，缓解后车钩力振荡幅度大且持续时间长；电制动维持操纵时，缓解后车钩力振荡幅度小且快速进入稳定状态，表明缓解后电制动力的调节易引发车钩力振荡。

优化前后不同操纵下车钩疲劳损伤值与机车平稳性指标计算结果分别如图 13、图 14 所示。从图 13、图 14 可以看出，优化后列车车钩整体疲劳损伤值下降，机车

产生的最大冲动减小。

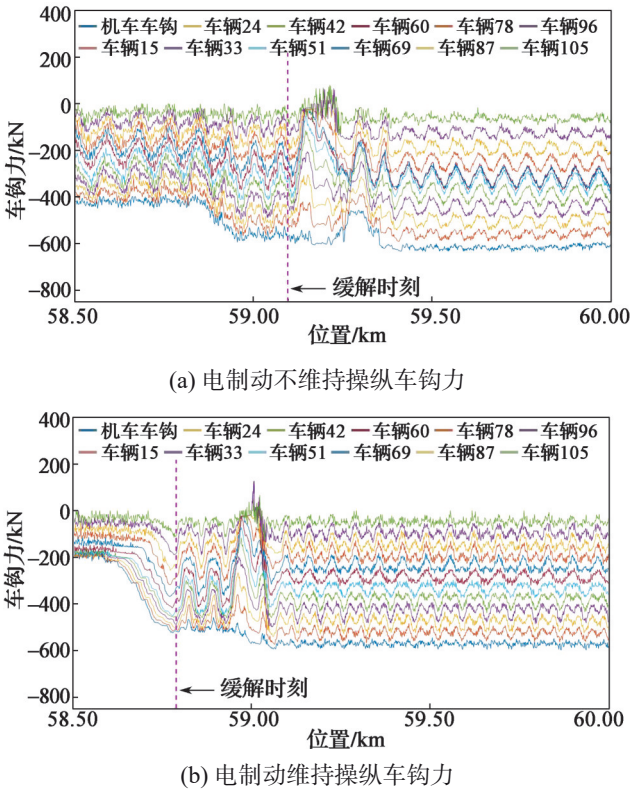


图 12 两种操纵模式下车钩力对比

Fig. 12 Comparison of coupler forces under two operating modes

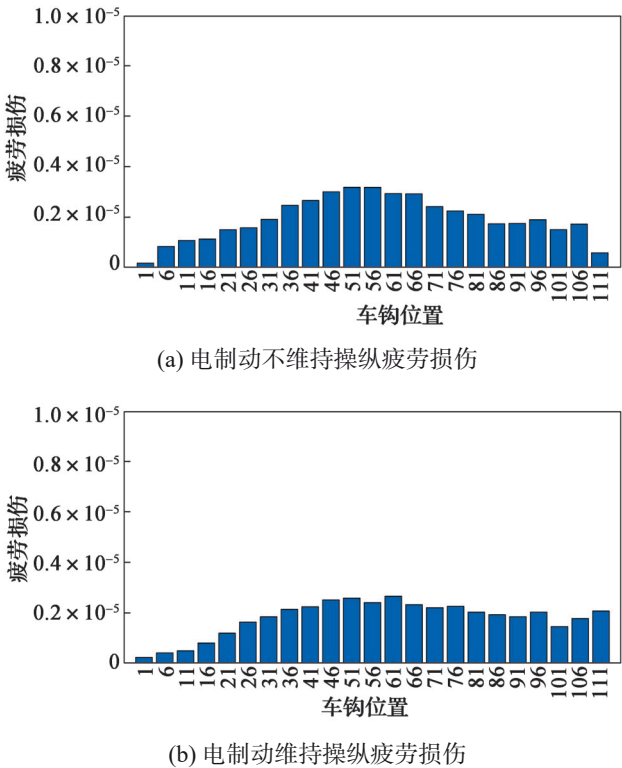


图 13 电制动维持操纵前后车钩疲劳损伤对比

Fig. 13 Comparison of coupler fatigue damage before and after operation to maintain electric braking

车钩疲劳损伤指标和纵向平稳性指标计算结果汇总如表 5 所示。对比优化前后的指标可知：优化后，长

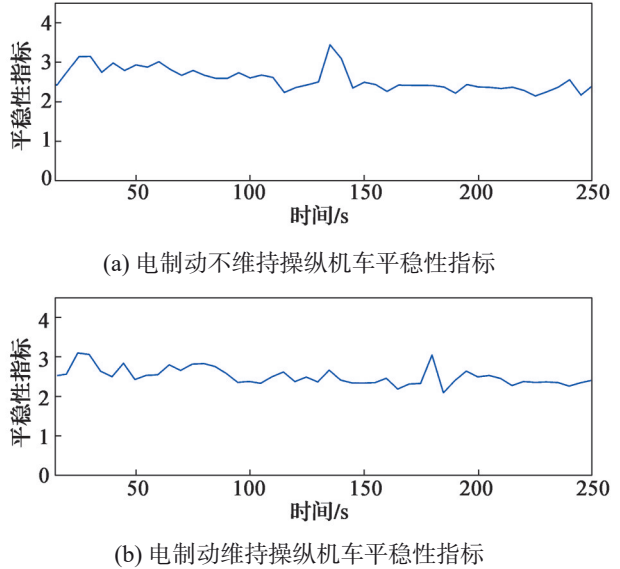


图 14 电制动维持操纵前后机车平稳性指标对比

Fig. 14 Comparison of locomotive Sperling index before and after operation to maintain electric braking

大下坡区段的最大车钩力降低 6.10%；所有车钩最大疲劳损伤值降低 16.40%，平均疲劳损伤值降低 7.77%；机车最大平稳性指标改善 4.07%，平均平稳性指标改善 2.82%。上述结果表明，本文提出的长大下坡道缓解后电制动维持控制策略可降低车钩疲劳损伤，有效提高自动驾驶列车在长大下坡道的运行安全性和平稳性。

表 5 电制动维持操纵前后指标量化对比

Table 5 Quantitative comparison of indexes before and after operation to maintain electric braking

对比项	最大车钩力/kN	车钩疲劳损伤指标		纵向机车平稳性指标	
		最大损伤	平均损伤	最大值	平均值
优化前	640.97	3.17×10^{-6}	1.93×10^{-6}	3.44	2.48
优化后	601.90	2.65×10^{-6}	1.78×10^{-6}	3.30	2.41

5 结束语

本文面向重载列车在长大坡道场景下的运行控制难题，构建了重载列车纵向动力学模型、基于车钩力信息和车钩疲劳计算的安全评价体系，以及基于加速度与 Sperling 指标的平稳性评价方法，并在此基础上提出了长大坡道安全平稳操纵策略，进而设计了融合该策略的自动驾驶系统规划与控制方法。验证结果表明，本文所提出的安全调控技术能有效提升列车在长大坡道运行中的安全性与平稳性。相比于既有研究，本文创新性地提出的长大坡道安全平稳操纵策略融合进了重载列车自动驾驶系统，提升了系统运行品质。后续研究中，可在本文研究基础上，结合实时的机车车钩力等更多列车本体感知信息，以及气象等外部环境感知信息，进一步提升自动驾驶列车在长大坡道的运行品质。

参考文献:

- [1] 尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应[J]. 机车电传动, 2023(1): 1-12.
SHANG Jing, LIU Yong, JIANG Fan. Research and application of locomotive automatic operation technology[J]. Electric drive for locomotives, 2023(1): 1-12.
- [2] 胡云卿, 江帆, 张征方. 机车自动驾驶关键技术与问题研究[J]. 控制与信息技术, 2024(4): 1-10.
HU Yunqing, JIANG Fan, ZHANG Zhengfang. Research on key technologies and issues of locomotive automatic operation[J]. Control and information technology, 2024(4): 1-10.
- [3] 高士根, 董海荣, 朱海楠. 面向操纵优化的智能列车辅助驾驶系统[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 88-94.
GAO Shigen, DONG Hairong, ZHU Hainan. Intelligent driver advisory system for improving manual train driving performance[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(11): 88-94.
- [4] 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.
- [5] 金辉. 超长重载列车易发生冲钩问题的原因和对策[J]. 机车电传动, 2010(1): 75-78.
JIN Hui. Causes and countermeasures of the problems of prone reactor for super long heavy haul train[J]. Electric drive for locomotives, 2010(1): 75-78.
- [6] 王建华, 王春毅, 曾周, 等. 基于强化学习的重载组合列车长大下坡操纵优化研究[J]. 机车电传动, 2023(6): 139-146.
WANG Jianhua, WANG Chunyi, ZENG Zhou, et al. Research on operation optimization of heavy-haul combined trains in long and steep downhill sections based on reinforcement learning[J]. Electric drive for locomotives, 2023 (6): 139-146.
- [7] 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.
- [8] 宋宇磐. 大秦线重载组合列车长大坡道优化操纵研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
SONG Yupan. Research on optimal handling of long slopes for heavy-haul combined trains on the Daqin line[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2023.
- [9] QING W, MAKSYM S, COLIN C. Advanced dynamic modelling for friction draft gears[J]. Vehicle system dynamics, 2015, 53(4): 475-492.
- [10] Association of American Railroads. Manual of standards and recommended practices section C-part 2: design, fabrication, and construction of freight cars[Z]. Washington, DC: Association of American Railroads, 2007.
- [11] 贾璐. 轨道车辆典型结构随机载荷识别方法及其振动疲劳寿命研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
JIA Lu. Research on random load identification methods for typical structures of rail vehicles and their vibration fatigue life[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [12] 石怀龙, 罗仁, 曾京. 国内外高速列车动力学评价标准综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 36-58.
SHI Huailong, LUO Ren, ZENG Jing. Review on domestic and foreign dynamics evaluation criteria of high-speed train [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 36-58.
- [13] 国家铁路局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Railway Administration. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [14] AMZALLAG C, GEREY J P, ROBERT J L, et al. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis [J]. International journal of fatigue, 1994, 16(4): 287-293.
- [15] 樊运新, 陈哲, 林润泽, 等. 编组方式对3万吨重载列车循环制动工况纵向冲动的影响[J]. 电力机车与城轨车辆, 2024, 47(4): 1-7.
FAN Yunxin, CHEN Zhe, LIN Runze, et al. Influence of formation method on longitudinal impulse of 30 000-ton heavy-haul train during cyclic braking conditions[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2024, 47(4): 1-7.

Research on safety-oriented regulation and control techniques for heavy-duty train operation in time-varying environments on long and steep slopes

JIANG Fan, LI Kai, LIU Yingnan

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

Abstract: Complex air-braking characteristics of heavy-duty trains, stress variations arising from interactions between coupled locomotive and wagons, and limited train state perception capabilities together create considerable control challenges during train operation on long and steep gradients. To address these challenges, this paper explores safety-oriented regulation and control techniques for time-varying environments on such slopes. Firstly, a longitudinal train dynamics model and a physical model of air braking were established for key scenarios related to long and steep slopes, along with a safety and stability evaluation framework that utilizes the coupler fatigue index to represent the global train operation safety and the Sperling index to evaluate operating stability. Secondly, based on this evaluation approach, a control strategy for safety and stability of heavy-haul trains on long and steep slopes was formulated, and an automatic operation system planning and control algorithm implementing this strategy was developed. Finally, the strategy was verified on a heavy-haul railway. Results show that the proposed techniques effectively improve the safety and stability of heavy-duty trains operating on long and steep slopes.

Keywords: heavy-duty train; long and steep slope; safety-oriented regulation and control; longitudinal dynamics; automatic operation; operating stability; heavy-haul railway; simulation