

基于钩缓约束的重载列车驾驶过程优化

付雅婷^{1,2} 原俊荣^{1,2} 李中奇^{1,2} 杨辉^{1,2}

摘要 重载列车是一种由上百甚至几百节车厢组成的动力集中式大载重系统,其牵引力/制动力需通过车钩相继传递给车厢,存在明显的非线性和大滞后性. 现有的人工驾驶模式,司机难以考虑车厢之间的钩缓约束,易引起车钩断裂和脱轨;且运行性能与司机的操纵经验密切相关,存在耗电大,无法按照列车运行图正点运行等问题. 本文针对此关键问题,以实现重载列车安全、正点、节能运行为目标,开展其驾驶过程运行优化研究. 分析列车钩缓系统受力原理,基于其特性曲线,采用翟方法构造重载列车钩缓模型及整车纵向动力学模型;据此,考虑钩缓约束运用多目标自适应遗传算法,结合实际运行线路(限速、坡道、曲线率等)约束条件设定列车理想的运行速度目标曲线;最后,采用改进广义预测控制器设计重载列车驾驶过程优化控制方法,跟踪理想速度目标曲线安全、正点、低能耗运行. 基于大秦线上 HXD1 型重载列车实际数据的仿真结果表明本文所设计的理想目标速度曲线优化方法可以较好地改善列车运行中的安全,正点和节能等关键性指标,运行优化控制能保证列车精确跟踪理想速度目标曲线,实现其驾驶过程优化运行.

关键词 重载列车, 钩缓约束, 多目标优化, 自适应遗传算法, 改进预测控制

引用格式 付雅婷, 原俊荣, 李中奇, 杨辉. 基于钩缓约束的重载列车驾驶过程优化. 自动化学报, 2019, 45(12): 2355-2365

DOI 10.16383/j.aas.c190223

Optimization of Heavy Haul Train Operation Process Based on Coupler Constraints

FU Ya-Ting^{1,2} YUAN Jun-Rong^{1,2} LI Zhong-Qi^{1,2} YANG Hui^{1,2}

Abstract Heavy haul train (HHT) equipped with concentrated power is a complicated heavy-load system that consists of several hundred carriages. The traction/braking force is transferred to carriages with couplers, which results in nonlinearity and hysteresis quality. The existing HHT is provided with manual operation mode and the driver cannot consider coupler constraints between carriages, which may lead to coupler broken and derailment. In addition, the running performance of HHT depends mainly on the drivers' manipulation experiences, which may result in large power consumption and unpunctuality. To address this issue, this paper conducts optimization research of HHT operation process to improve the operational performance of HHT in terms of safety, punctuality and energy saving. Firstly, with analyzing the mechanical principle and characteristic curves of coupler device, the coupler force model and vehicle longitudinal dynamic model can be figured out based on the "Zhai" numerical integration method. Secondly, considering coupler constraints, the multi-objective adaptive genetic algorithm is used to establish the ideal train speed curve by combining the constraints of actual railway routes (speed limit, ramps, curve rates, etc.). Finally, an operation optimizing controller is designed to implement the safe, punctual and energy-saving operation by tracking the ideal train speed curve based on the improved generalized predictive control method. The simulation results on the actual type-HXD1 HHT of the Daqin line show that the presented ideal train speed curve can better guarantee the safety, punctuality and energy saving of HHT, the operational optimization control method can ensure the excellent tracking performance of ideal train speed curve, which realizes the optimized operation of HHT.

Key words Heavy haul train (HHT), coupler constraints, multi-objective optimization, adaptive genetic algorithm, improved generalized predictive control

Citation Fu Ya-Ting, Yuan Jun-Rong, Li Zhong-Qi, Yang Hui. Optimization of heavy haul train operation process based on coupler constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2355-2365

收稿日期 2019-03-22 录用日期 2019-06-02
Manuscript received March 22, 2019; accepted June 2, 2019
国家自然科学基金 (61673172, 51565012, 61733005, 61803155, 61663013) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61673172, 51565012, 61733005, 61803155, 61663013)
本文责任编辑 董海荣
Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong
1. 华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013 2. 江西省先进控制与优化重点实验室 南昌 330013

重载列车是采用单机或多机牵引开行的一种轴重大、运量大 (高于 8 000 吨甚至几万吨)、编组超长 (上百乃至几百节车厢) 的货运列车. 重载铁路以

1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, Nanchang 330013

其运量大、速度快、能耗小、成本低、全天候的优势, 在一些煤炭和矿石等大型原材料货物运量较多的国家, 如美国、巴西、澳大利亚、南非等发展迅速, 目前已被国际公认为铁路货运发展的方向, 成为世界铁路发展的重要方向之一^[1-2]. 然而随着牵引重量的不断增加, 现有的人工操纵模式问题逐渐凸显, 车辆断钩、脱轨等现象时有发生; 列车经常无法按照运行图正点运行; 对电能的需求非常庞大等, 这些问题都严重制约着重载铁路运输的发展^[3-5]. 为了解决这些问题, 重载列车的自动驾驶成为重载铁路的发展趋势. 列车的自动驾驶需要解决的核心问题是优化设定理想的运行速度目标曲线, 并设计相应的跟踪控制器对列车运行过程进行优化控制, 实现重载列车安全、正点、节能运行^[6].

针对列车运行过程优化问题, 从上世纪 60 年代众多学者就开始研究. Erofeyev^[7] 最早开始以动态规划法优化列车在平直道运行的速度曲线, Howlett 等^[8-9] 将列车运行优化问题转化成工况变换点优化问题, 研究了列车在平直道与坡道上节能运行时的工况转换点, 建立了节能驾驶模型. Wang 等^[10-11] 将目标曲线优化问题描述成一个多相位的最优控制模型, 并采用伪谱法进行求解, 以正点、节能为设计目标, 优化获得一条满足约束条件的目标曲线, Scown 等^[12] 对货物列车在起伏线路上列车的运行状态进行了研究, 并根据研究结果进行了驾驶策略的动态研究. Zhang 等^[13] 以优化空电联合制动重载列车的运行为目标, 考虑列车安全、速率和节能因素, 建立并优化了列车多质点模型, 提出了长运距离运输的预测控制模型. 陈荣武等^[14] 以降低能耗为目标, 对列车在区间的运行控制进行优化组合, 提出了基于遗传算法的能耗优化算法. 上述研究从诸多角度研究了重载列车的运行优化控制, 但列车运行的安全性均只考虑了速度的限制, 没有研究车钩缓冲装置是否超过受力限制. 车钩缓冲装置作为传递和缓和列车运行过程中或在调车时所产生的纵向力和冲击力的装置, 在列车的运行过程中发挥着极其重要的作用^[15-16], 车钩力超限易造成断钩脱轨等安全事故, 无法保障列车运行安全. 同时已有研究也没有结合实际运行线路中存在的分相点问题, 其获得的列车运行速度目标曲线对于列车的实际运行缺少指导性.

本文针对上述问题, 研究重载列车钩缓装置特性并构建列车纵向动力学模型; 考虑钩缓约束和实际操作等限制, 基于重载列车实际运行线路条件, 采用多目标自适应遗传算法研究运行最优工况序列, 优化获得列车理想运行速度目标曲线. 并据此设计相应的重载列车运行跟踪控制策略, 保障列车

跟踪理想速度目标曲线安全、正点、节能运行.

1 重载列车纵向动力学模型

1.1 重载列车多质点受力分析

重载列车多质点纵向动力学建模是针对列车由多个车厢链接的特点, 将每一节车辆都看作是一个刚性质点, 整列列车视为由钩缓装置将多个质点链接而成的“质点链”来研究分析, 其每节车辆在运行过程受到前后车辆的车钩力, 基本阻力, 附加阻力等多种力的作用, 如图 1 所示.

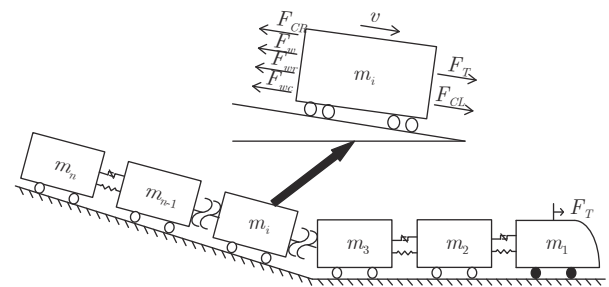


图 1 重载列车纵向动力学模型

Fig. 1 Longitudinal dynamic model of heavy haul train

以第 i 节车辆为例, 其纵向动力学受力方程可以写为

$$m_i \ddot{x}_i = F_T + F_{CL} - F_{CR} - F_D - F_W - F_{Wc} - F_{Wr} \quad (1)$$

其中, m_i 为车辆的质量; \ddot{x}_i 为车辆的加速度; F_T 为牵引力, F_D 为制动力; F_{CL} 为前车钩力; F_{CR} 为后车钩力; F_W 为车辆运行基本阻力; F_{Wc} 为曲线阻力; F_{Wr} 为坡道阻力.

1.2 钩缓装置模型

车钩缓冲器连接着相邻的列车车辆, 是列车的重要组成部分, 起到传递并缓和纵向力的作用, 钩缓结构建模的准确程度对于列车纵向动力学的仿真结果有着决定性的作用.

缓冲器在不同工况下有着不同的特性曲线, 各种工况下的车钩缓冲器模型无法精确获得. 在动力学仿真中常用缓冲器落锤与冲车实验所得特性曲线来进行计算. 将试验过程中所采集的同一时刻缓冲器的位移与车钩力的数值绘制在一张图表上, 即得到钩缓装置的特性曲线如图 2 所示.

利用特性曲线, 同时通过研究 QKX100 缓冲器的结构特性, 发现 QKX100 缓冲器的车钩力计算不仅与缓冲器的位移有关, 还受到缓冲器的切换速度的影响, 因此车钩力可以描述为

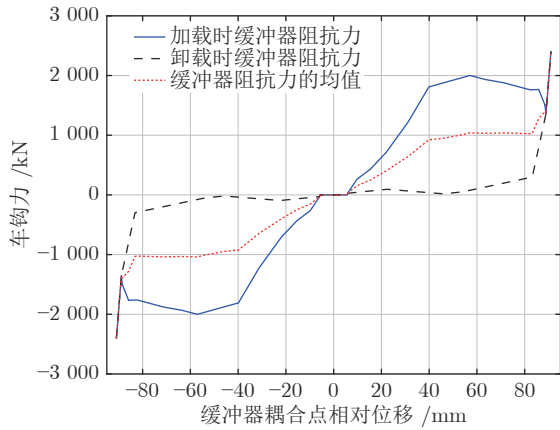


图 2 弹性胶泥缓冲器特性曲线

Fig. 2 Elastic clay buffer characteristic curves

$$F_C = \begin{cases} f_u, & (\Delta x \times \Delta v \geq 0) \cap (|\Delta v| \geq v_e) \\ f_3 + (f_u - f_3) \frac{\Delta v}{v_e} \text{sign}(\Delta v), & -v_e < \Delta v < v_e \\ f_l, & (\Delta x \times \Delta v < 0) \cap (|\Delta v| \geq v_e) \end{cases}$$

$$f_3 = \frac{f_u + f_l}{2} \quad (2)$$

其中, F_C 为车钩力; f_u 为加载时缓冲器的阻抗力; f_l 为卸载时缓冲器的阻抗力; f_3 为缓冲器阻抗力的均值; Δv 为相邻两车的速度之差; Δx 为相邻两车的运行距离之差; v_e 为缓冲器转换速度.

1.3 列车纵向动力学模型

列车的运行状态由其运行的加速度、速度以及所处的路况决定. 建立好列车纵向动力学方程, 通过对非线性动力学方程的进行数值积分求解, 可以求得列车的加速度、速度、位移等状态量. 本文采用数值积分翟方法对每节车辆的状态量进行迭代求解, 构建纵向动力学模型, 其流程如图 3 所示.

每个质点的翟方法积分格式可表示为^[17]

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n + V_n \Delta t + \left(\frac{1}{2} + \psi\right) A_n \Delta t^2 - \psi A_{n-1} \Delta t^2 \\ V_{n+1} = V_n + (1 + \varphi) A_n \Delta t - \varphi A_{n-1} \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

其中, X_{n+1} 为车辆下一时刻位移量, X_n 为车辆当前时刻位移量, V_{n+1} 为车辆下一时刻速度量, V_n 为车辆当前时刻速度量, A_n 为车辆当前时刻加速度量, A_{n-1} 为车辆上一时刻加速度量, Δt 为时间积分步长; 下标 $n-1, n, n+1$ 分别代表上一步 $t = (n-1)\Delta t$ 时刻、当前步 $t = n\Delta t$ 时刻、下一步 $t = (n+1)\Delta t$ 时刻; ψ, φ 是控制积分方法特性的独立参数, 本文取其值为 0.5.

2 列车运行曲线优化

2.1 列车运行多目标优化模型

在大秦线运行列车平稳操纵难度很大, 运行过程较为复杂, 多工况间的转换也较为频繁. 频繁的工况转化, 既增加了列车运行的能量消耗, 且对列车运行的平稳与安全性有较大影响.

重载列车的运行操纵是一个多目标、有约束、非线性的复杂时变控制过程, 重载列车在运行过程中主要存在车钩断钩、列车运行时间与列车运行图不一致, 列车运行过程中牵引/制动工况之间频繁转换引起的能量消耗较多等问题, 对于重载列车运行速度曲线的优化也主要从以上几个问题展开, 其优化目标主要为安全、正点与节能.

列车的安全运行评价指标主要是由列车的运行速度与车钩力值来评价, 列车的运行速度应小于线路限速. 重载列车运行过程中的车钩力分为拉钩力与压钩力两种, 当前车的速度大于后车的速度, 缓冲器处于拉伸状态, 此时两车之间就存在拉钩力;

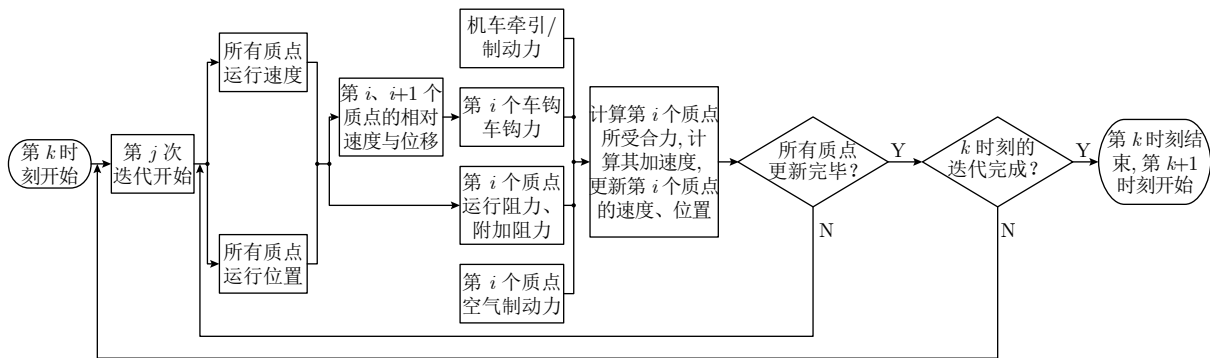


图 3 重载列车多质点模型运行计算流程图

Fig. 3 Flow charts of multi-particle model operation calculation for heavy haul train

当前车的速度小于后车的速度, 缓冲器处于压缩状态, 此时两车之间就存在压钩力. 列车运行过程中的车钩力值应小于铁道科学研究院建议值: 最大车钩力 $\leq 1\ 000\ \text{kN}$ (列车正常运行工况), 最大车钩力 $\leq 2\ 250\ \text{kN}$ (列车紧急制动工况). 列车的安全运行评价模型为

$$F_{\text{NUM}} = \sum_{i=1}^m (\beta_i); \beta_i = \begin{cases} 1, & \frac{F_{i\text{coupler}}}{F_{\text{UMAX}}} > \gamma \\ 0, & \frac{F_{i\text{coupler}}}{F_{\text{UMAX}}} \leq \gamma \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{F}_{\text{NUM}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{NUM}j}}{N} \quad (5)$$

$$\bar{F}_{\text{MAX}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{MAX}j}}{N} \quad (6)$$

$$\bar{F}_{\text{MIN}} = \frac{\sum_{j=1}^N F_{\text{MIN}j}}{N} \quad (7)$$

$$f_s = k_1 \times \left(\frac{F_{\text{MAX}}}{\bar{F}_{\text{MAX}}} \right) + k_2 \times \left(\frac{F_{\text{MIN}}}{\bar{F}_{\text{MIN}}} \right) + k_3 \times \left(\frac{F_{\text{NUM}}}{\bar{F}_{\text{NUM}}} \right) \quad (8)$$

其中, $F_{i\text{coupler}}$ 为列车第 i 时刻运行的车钩力值, F_{UMAX} 为列车运行时车钩力额定最大值, γ 为比例系数, 取值范围为 $0.75 \sim 1$; 列车第 j 次运行过程中一共有 m 个时刻, 若第 i 时刻 $F_{i\text{coupler}}$ 与 $F_{i\text{UMAX}}$ 的比值大于 γ , 则第 i 时刻 β_i 值为 1, 否则值为 0. F_{NUM} 为列车第 j 次运行过程中车钩力值大于车钩力额定最大值 γ 系数的次数, F_{MAX} 为列车第 j 次运行过程中出现的最大拉钩力值, F_{MIN} 为列车第 j 次运行过程中出现的最大压钩力值的绝对值, \bar{F}_{MAX} 为种群中列车运行最大拉钩力的平均值, \bar{F}_{MIN} 为种群中列车运行最大压钩力的平均值, \bar{F}_{NUM} 为种群中列车运行过程中车钩力值较大次数的平均值, N 为种群规模, k_1, k_2, k_3 是权重系数, 满足 $k_1 + k_2 + k_3 = 1$.

列车的节能运行评价指标要求列车在安全运行、正点的情况下, 以能耗最少或较少的操纵方法运行. 参照《列车牵引计算规程》, 建立列车的节能运行评价模型为^[6]

$$Q = Q_y + Q_0 \quad (9)$$

其中, 牵引运行耗电量按式 (10) 计算

$$Q_y = \frac{U_w \sum (I_p \times t_y)}{60} \quad (10)$$

惰行、制动及停站耗电量按式 (11) 计算

$$Q_0 = \frac{U_w \sum (I_{p0} \times t_0)}{60} \quad (11)$$

其中, U_w 为机车受电弓处网压, t_y 为机车牵引运行时间, t_0 为机车惰行、空气制动及停站时间, I_p 为机车牵引用电有功电流, I_{p0} 为机车惰行、制动及停站时用电有功电流.

列车的正点运行评价指标是指列车的运行时间与列车运行图规定的时间之差, 在一定范围内越小越好. 列车的正点运行评价模型为

$$T = \sum_{i=1}^n T_i - T_U \quad (12)$$

其中, T_U 为列车运行图的规定时间, T_i 为列车每个区间的运行时间, 一共有 n 个区间.

在列车的运行过程中, 列车的安全优化目标要求列车运行速度小于线路限制速度, 同时要求列车运行过程中工况变化少, 保证列车的车钩力处于较稳定状态; 列车的正点优化目标则是要求列车的运行时间与列车运行图规定的时间保存一致, 在此情况下, 列车运行过程中可能会出现较为频繁的工况变化; 列车的节能优化目标则是要求列车运行过程中工况变化少, 较少的使用牵引与制动工况, 让列车多处于惰行状态运行. 在这三个优化目标中, 正点与安全, 正点与节能之间均存在一定的冲突, 难以保证这些目标同时达到最优实现.

根据以上分析, 考虑安全、正点与节能对列车运行过程重要性的占比, 设计列车多目标优化模型为

$$f = w_1 \times f_s + w_2 \times \frac{Q_j}{\bar{Q}} + w_3 \times \frac{T_j}{\bar{T}} \quad (13)$$

其中, $\bar{Q} = \sum_{j=1}^N Q_j / N$, $\bar{T} = \sum_{j=1}^N T_j / N$, N 为种群规模, w_1, w_2, w_3 是权重系数, 满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, 安全权值系数 w_1 取值 0.5, 正点权值系数 w_2 取值 0.3, 节能权值系数 w_3 取值 0.2.

2.2 列车运行过程的多目标自适应遗传算法

遗传算法实质上是一种搜索寻优算法, 在种群中进行大规模进化寻优. 它是从某一问题随机产生的可能解中, 随机地选取一定数量的种群, 借助于自然遗传学的选择、交叉和变异等, 逐渐迭代产生出越来越好的近似解. 在每一次迭代中, 根据个体的适应度的大小, 自适应地调整遗传算法的选择、交叉和变异参数, 保留最优解淘汰最差解, 最终产生出最优解^[18-19].

列车运行过程的多目标自适应遗传算法计算流

程图如图 4 所示, 具体步骤如下:

1) 定义列车运行速度曲线的编码与染色体, 将列车的运行线路按照线路坡道变化, 分为 N 个区间, 这 N 个区间就是列车运行速度曲线的 N 个染色体. 每个染色体中都有牵引、惰行与制动等几种工况可以选择, 同时每次染色体每次只对应一种工况, 这 N 个染色体对应的 N 个工况共同组成了列车运行速度曲线的编码; 根据列车运行优化模型定义适应度函数.

2) 随机生成 N 个满足目标适应度函数的初始种群.

3) 将初始种群代入目标函数中, 根据适应度函数计算当前群体中各个种群的适应度.

4) 按照遗传策略, 运用选择、交叉和变异算子作用于群体, 形成下一代种群.

a) 选择运算: 对初始群体执行选择操作, 优良的个体被大量复制, 劣质的个体少量复制甚至将其淘汰;

b) 交叉运算: 种群中的两个个体以一定的概率随机的在某些基因位中进行基因交换;

c) 变异运算: 某一染色体上的基因一定的概率

随机地进行突变.

5) 不断地寻优进化, 根据每一次迭代中所有个体的适应度的大小, 自适应地调整交叉和变异参数, 自适应调整公式如式 (14) 和式 (15), 最终得到目标函数中适应度最高的一个个体, 将其作为问题的最优解或满意解并输出, 终止计算.

$$p_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\min}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, f_{\max} 为群体中最大的适应值, f_{avg} 为每代群体的平均适应值, f' 为要交叉的两个个体中较大的适应值, f 为要变异个体的适应值, k_1, k_2, k_3 和 k_4 为区间 $(0, 1)$ 中某个值.

3 列车运行速度跟踪控制

广义预测控制算法具有良好的控制性能, 但由于其引入丢番图方程, 加大了求解计算量, 本文建立的纵向动力学模型每一个时刻点需要计算所有车厢所受的各项阻力, 一定程度上增加了计算量, 为加快求解速度, 本文采用一种改进的广义预测控制算法^[20-22], 既具有广义预测控制的基本特征和优点, 又舍弃了丢番图方程, 提高了计算速度. 本文基于上述建立的纵向动力学模型, 采用改进预测控制算法设计运行速度跟踪控制器, 控制重载列车跟踪获得的理想运行速度目标曲线安全、正点、节能运行.

列车纵向动力学模型可描述为受控自回归积分滑动平均过程模型 (Controlled autoregressive integral moving average model, CARIMA) 形式

$$a(z^{-1})y(t) = z^{-d}b(z^{-1})u(t) + c(z^{-1})\xi(t) \quad (16)$$

式中,

$$\begin{cases} a(z^{-1}) = 1 + a_{1,1}z^{-1} + a_{1,2}z^{-2} + \cdots + a_{1,n_a}z^{-n_a} \\ b(z^{-1}) = b_{1,0} + b_{1,1}z^{-1} + b_{1,2}z^{-2} + \cdots + b_{1,n_b}z^{-n_b}, b_{1,0} \neq 0 \\ c(z^{-1}) = 1 \end{cases}$$

其中, $y(\cdot)$, $u(\cdot)$ 和 $\xi(\cdot)$ 分别为模型输出、模型输入和白噪声, $d = 1$ 为时滞系数. n_a, n_b 分别为模型输出、输入的阶次.

为了得到控制律, 构造以下性能指标函数

$$J = E \left\{ (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_r)^T (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_r) + \Delta \mathbf{U}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{U} \right\} \quad (17)$$

式中,

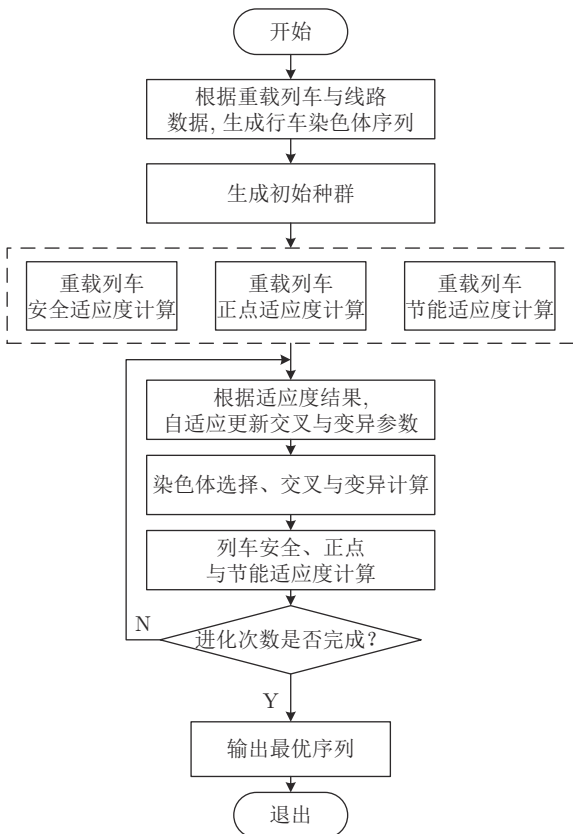


图 4 多目标自适应遗传算法计算流程图

Fig. 4 Computational flow chart of multi-objective adaptive genetic algorithms

$$\mathbf{Y} = [y(t+d|t), y(t+d+1|t), \dots, y(t+N|t)]^T$$

$$\Delta \mathbf{U} = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N-d)]^T$$

其中, \mathbf{Y}_r 为预测输出, 本文通过理想目标曲线获得; N 为预测长度; R 为控制加权矩阵, $\Delta = 1 - z^{-1}$.

定义 $y_m(t+j|t)$ 为 t 时刻预测 $t+j$ 时刻的输出, 有

$$y_m(t+j) = \sum_{i=1}^{n_a} a_{j,i} y(t+1-i) + \sum_{i=0}^{n_b} b_{j,i} u(t-d-i) + \sum_{i=0}^{j-1} b_{j-i,0} u(t-d+i|k) + \xi(t)$$
(18)

由式 (18) 可知, $y_m(t+j)$ 完全由过去已知的输入和输出量确定, 递推式 (18) 可获得

$$y(t+j|t) = \begin{cases} y_m(t+j), & j < d+1 \\ y_m(t+j) + \sum_{i=0}^{j-1} b_{j-i,0} \Delta u(t-d+i), & j \geq d+1 \end{cases}$$
(19)

从而

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_m + G \Delta \mathbf{U}$$
(20)

式中,

$$\mathbf{Y}_m = [y_m(k+d), y_m(k+d+1), \dots, y_m(k+N)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} b_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ b_{2,0} & b_{1,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N-d+1,0} & b_{N-d,0} & \dots & b_{1,0} \end{bmatrix}_{(N-d+1) \times (N-d+1)}$$
(21)

矩阵中的元素 $b_{j,0}$ 由下式递推获得

$$b_{j,0} = b_{1,j-1} + \sum_{i=1}^{j_1} a_{1,i} b_{j-i,0}, \quad j = 2, 3, \dots, N-d+1$$
(22)

式中, 当 $j > n_b + 1$ 时, $j_1 = \min\{j-1, n_a\}$; $b_{1,j-1} = 0$.

将式 (20) 代入性能指标函数 (17), 对性能指标函数进行极小化处理, 可得系统的最优控制增量为

$$\Delta \mathbf{U} = (G^T G + R)^{-1} G^T (\mathbf{Y}_r - \mathbf{Y}_m)$$
(23)

从而获得当前 t 时刻的最优控制律

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) = u(t-1) + [1, 0, \dots, 0](G^T G + R)^{-1} G^T (\mathbf{Y}_r - \mathbf{Y}_m)$$
(24)

4 实验验证

为了验证本文所提出的钩缓建模, 理想速度目标曲线优化和跟踪控制方法的有效性, 选用大秦线上 HXD1 型万吨重载列车为实验验证对象. 首先, 采集该重载列车在大秦线上的湖东二场 — 阳原的所有线路、限速和过分相等数据, 该区段部分线路数据如图 5 所示, 图 5 中, R 表示线路的弯道半径 (m), L 表示线路的弯道长度 (m); 其次基于数值积分方法和钩缓特性曲线, 建立列车钩缓模型, 并与国际上权威机构的实验结果进行对比; 接着以列车运行安全、正点、节能为目标, 基于钩缓约束采用自适应遗传算法优化获得理想运行速度目标曲线; 最后以该优化曲线为跟踪目标, 采用改进预测控制设计相应速度跟踪控制策略对重载列车进行优化控制.

4.1 列车动力学模型仿真验证

在建立了列车运行过程动态纵向动力学模型与钩缓装置模型后, 为了验证本文所建立模型的准确性, 按照澳大利亚中央昆士兰大学 Spiryagin 等^[23-24]整理的 9 个国际权威机构的重载列车纵向动力学模拟器的国际基准测试的线路条件与控制要求, 本文进行了相应的仿真测试. 文献 [24]9 个机构的最大车钩力结果如图 6 所示, 文献 [24] 选取了第 10 号车钩的车钩力变化趋势的仿真结果进行比对, 本文仿真的最大车钩力的结果如图 7 所示, 其他各软件的仿真结果如图 8 所示, 第 10 号车钩的车钩力变化趋势如图 9 所示.

从图 6 中可以看到, 9 个机构中效果较好的几

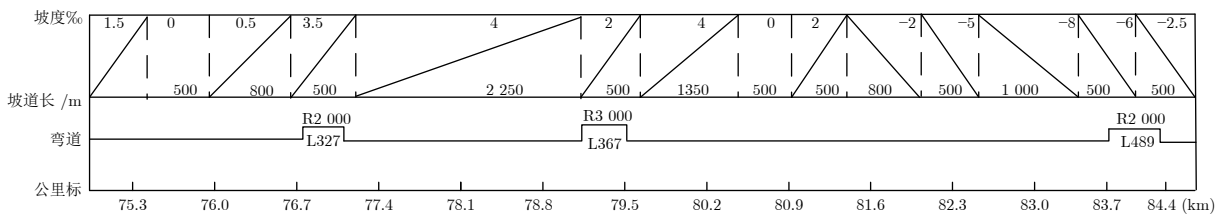


图 5 湖东二场 — 阳原区段部分线路数据

Fig. 5 Partial line data of Hudongerchang — Yangyuan section

种动力学模拟器的实验结果, 它们的最大压钩力大多集中在 350 kN, 拉钩力都为 540 kN 左右. 而本文方法的仿真结果 (图 7) 中同样显示最大压钩力为 350 kN, 拉钩力则为 530 kN, 与文献 [23] 中效果较好的实验结果非常相近. 图 8 最底部的列车空气制动和纵向动力学联合仿真系统 (Train air brake and longitudinal dynamics simulation system, TABLDSS) 仿真曲线为 TABLDSS 机构实际仿真曲线, TABLDSS 曲线上面的几条车钩力变化曲线为不同软件仿真的真实车钩力变化曲线加了 200, 400, ..., 1 600 kN 的效果, 是为了方便对不同软件的仿真结果进行比对. 图 8 表明, 前 7 种软件的仿真效果较好, 趋势与具体数值都大体一致. 通过对比图 8 和本文仿真结果图 9, 可以发现不论是车钩力变化趋势还是具体的车钩力数值, 本文仿真的效果与 9 种软件中效果较好的 7 种软件的实验结果极

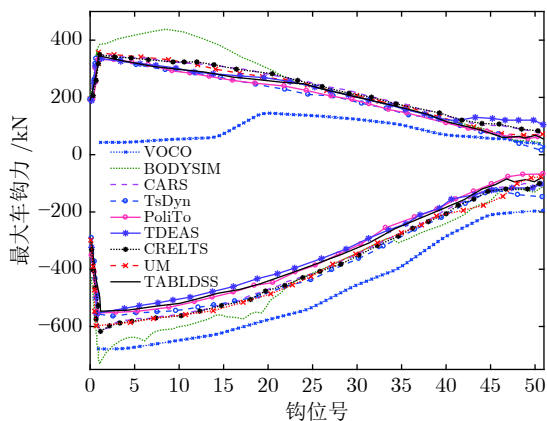


图 6 文献 [24] 中 9 个机构仿真的最大车钩力
Fig. 6 Maximum coupler force of nine mechanisms simulated in [24]

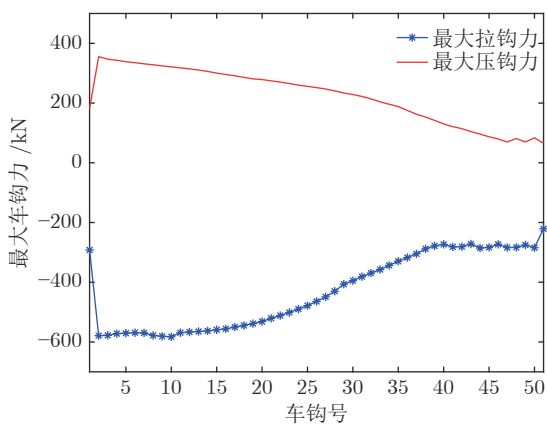


图 7 本文仿真的最大车钩力
Fig. 7 Maximum coupler force simulated in this paper

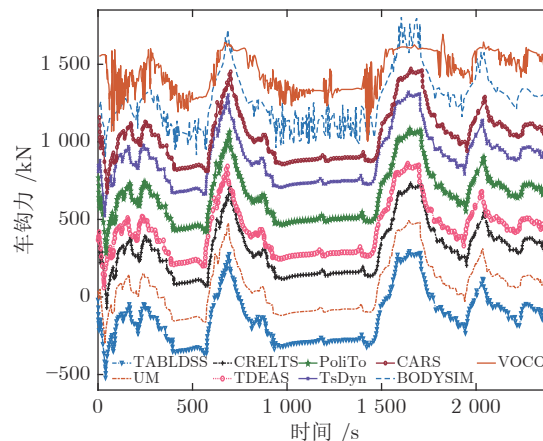


图 8 文献 [24] 中第 10 号车钩车钩力变化趋势
Fig. 8 Tendency of coupler force change of coupler No.10 in [24]

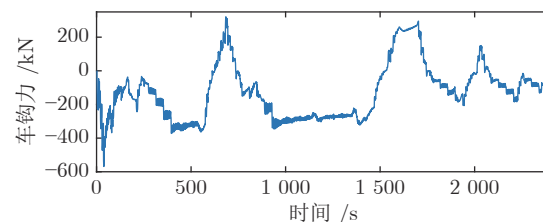


图 9 本文仿真的第 10 号车钩车钩力变化趋势
Fig. 9 Tendency of coupler force change of coupler No. 10 simulated in this paper

为相近.

通过仿真重载列车纵向列车动力学模拟器的国际基准测试, 与国内外多家机构的仿真结果进行比对, 本文仿真的效果与国内外多家机构的优秀仿真结果一样, 验证了本文所建立的动态纵向动力学模型及钩缓装置模型的准确性.

4.2 理想运行目标曲线设定

4.2.1 实际线路多目标遗传算法策略分析

重载列车在运行过程中还应注意一些驾驶约束条件, 重载列车在长距离行驶过程中, 接触网供电会来自不同的变电所. 两变电所接触网供电交接处会有一段分相区. 机车在通过分相区时, 需断电后通过, 此时机车的牵引力与电制动力都为 0. 同时重载列车运行过程中存在三种工况: 牵引工况、制动工况与惰行工况. 重载列车运行时工况转换有一定的规则限制, 运行时牵引工况与制动工况间不能直接切换, 需要通过惰行工况进行过渡. 本文均考虑了这些约束条件, 并基于钩缓受力约束, 采用自适应遗传算法优化获得理想运行速度目标曲线.

多目标优化策略即是在列车运行时, 综合考虑安全、正点与节能运行优化目标的目标函数的适应度达到最高. 其中, 安全最优策略需要综合考虑以下三个因素: 最大拉钩力、最大压钩力以及列车每次运行过程中车钩力值较大的次数, 这三个因素在列车的安全运行评价指标各有一定的权重系数. 节能最优策略即是在列车运行速度在限制速度、最大车钩力在额定最大值范围内、运行时间在列车运行图规定范围内, 列车的节能运行评价模型达到最优的策略. 正点最优策略即是在列车运行速度在限制速度、最大车钩力在额定最大值范围内, 列车的正点运行评价模型达到最优的策略.

4.2.2 多目标优化结果

基于上述设计的多目标优化策略, 将湖东二场到阳原区段 (公里标为 25~83 km, 运行图规定运行时间 3 360 s) 作为实验线路, 按照实际线路坡道、曲线等变化, 将其划分为 0.5~0.6 km 长度不一的 110 个区段, 列车在每一区段运行的时候只存在一个运行工况. 将工况转换点的位置和相应的工况作为一个染色体, 采用实数编码方式, 染色体长度为 110, 种群规模为 50 组. 再根据实际线路情况与列车运行操纵约束条件选取 50 × 110 组满足约束条件运行速度曲线分别进行 100 代进化, 并根据式 (13) 设定的目标函数选出最优的一条. 为了体现所设计方法的优越性, 本文与文献 [14] 的目标曲线优化方法, 实际司机驾驶的速度曲线进行对比, 速度目标曲线、最大车钩力对比和相关数据的比较如图 10、图 11 和表 1 所示; 本文方法的遗传算法适应度曲线如图 12 所示.

从图 10 中可以看出, 多目标优化的驾驶策略是在公里标 25~28 km 的上坡阶段, 采用牵引工况将列车速度提升到 60 km/h; 在 31~40 km 的上坡

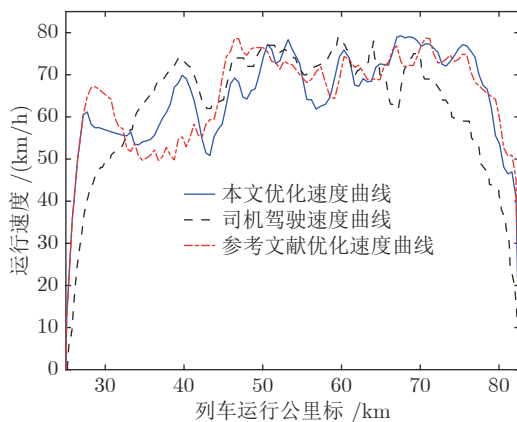


图 10 重载列车理想运行目标曲线

Fig. 10 Ideal train operation curve of heavy haul train

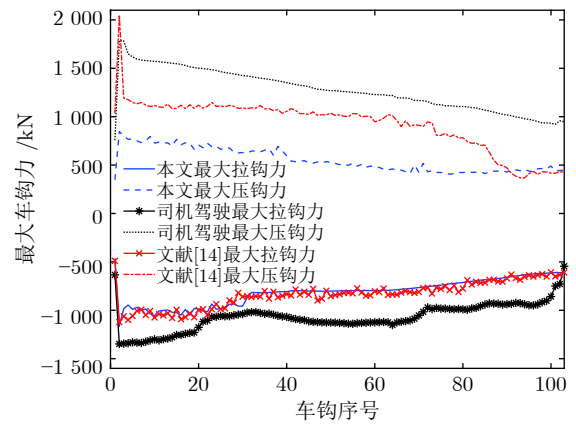


图 11 本文方法、文献 [14] 方法优化后运行与实际驾驶最大车钩力

Fig. 11 Maximum coupler forces of optimized operation in this paper, [14] and actual operation

表 1 本文方法、文献 [14] 方法优化后多目标数据与实际驾驶数据对比

Table 1 Data comparison among multiple target optimal policy in this paper, [14] and actual operation

| | 时间 (s) | 能耗 (kW) | 安全系数最大拉钩 (kN) | 最大压钩 (kN) |
|---------|---------|---------|---------------|-----------|
| 本文 | 3 383.1 | 3 505.3 | -821.9 | 1 160.7 |
| 司机驾驶 | 3 510 | 4 200 | -1 347.7 | 1 787.6 |
| 文献 [14] | 3 379 | 3 929 | -1 170.3 | 2 009 |

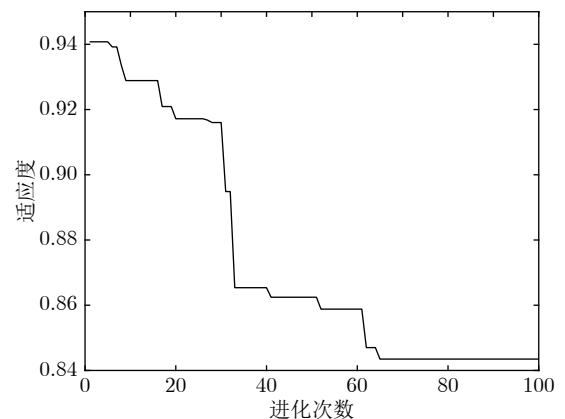


图 12 多目标优化策略遗传算法适应度

Fig. 12 Multiple target optimal policy genetic algorithm fitness

阶段, 采用牵引与惰行工况交替, 牵引工况为主的操纵方式, 使列车的运行速度保持在 60~70 km/h 之间; 而在 40~43 km 的上坡阶段, 采用牵引与惰行工况交替, 惰行工况为主的操纵方式, 降低列车运行速度到 50 km/h; 在 43~53 km 的下坡阶段 (此阶段的 43.3 km 处有一个过分相, 经过时需要转换为惰行工况), 此时坡道较多, 采用牵引、制动与惰行工况交替的操纵方式缓慢提升列车运行速度到 78 km/h 左右; 在 67~75 km 的下坡与上坡交替出现阶段 (此阶段的 67.7 km 处有一个过分相, 经过时需要转换为惰行工况), 采用牵引、制动与惰行工况交替的操纵方式维持列车运行速度到 70 km/h 以上; 在 75~81 km 的上坡阶段, 采用牵引与惰行工况交替的操纵方式逐渐降低列车的运行速度, 准备停车; 在 81 km 后采用制动工况降低列车的速度, 进行停车. 经过多次的列车操纵方式转化, 使得列车运行速度曲线达到多目标优化目标, 目标函数的适应度达到最高. 图 12 表明, 经过 100 代的进化次数, 多目标优化策略遗传算法的适应度从 0.941 进化到了 0.844.

而对于实际司机驾驶, 启动牵引力较小, 在 25~40 km 的上坡阶段, 一直采用牵引为主的操纵方式, 在这一区间运行时间较长, 消耗的能量也较多. 之后在 70 km 处就开始以惰行工况为主的方式运行, 虽然降低了能量消耗, 但运行的时间也较长, 最终导致列车司机在实验线路全程驾驶的时间超出运行图规定时间 150 s. 对于文献 [14] 方法优化的目标速度曲线, 则在 33~43 km 阶段, 以较低的速度运行, 在此区间运行的时间较长, 且速度变化较频繁致, 使列车在 43~50 km 的下坡阶段进行牵引加速行驶, 消耗过多的能量, 导致其能耗比本文多出 424 kW.

进一步, 从图 11 和表 1 中可以看出, 本文方法优化获得的目标曲线在安全系数、正点率、节能方面均优于实际司机驾驶与已有文献 [14] 的目标速度曲线优化方法, 表明本文方法的优越性与有效性.

4.3 速度跟踪控制验证

基于所建立的重载列车纵向动力学模型, 利用改进预测控制方法, 设计重载列车速度跟踪控制器对重载列车在大秦线上湖东二场—阳原站区间的运行进行控制, 使其跟踪前述获得的理想运行速度目标曲线精确运行. 速度跟踪曲线、牵引力/制动力曲线如图 13 和图 14 所示 (图中, y_r -DV (Desired value) 表示理想速度目标曲线; y -IGPC (Improved generalized predictive control) 表示改进广义预测

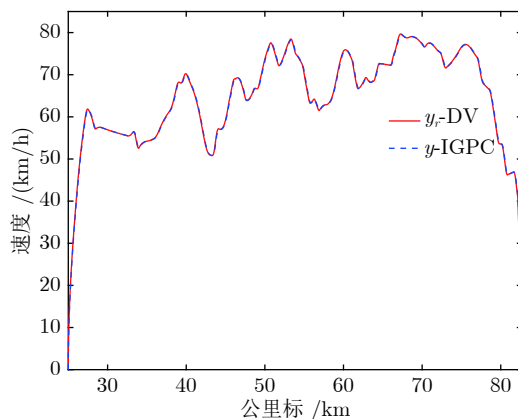


图 13 改进广义预测控制速度跟踪曲线

Fig. 13 Speed tracking of IGPC

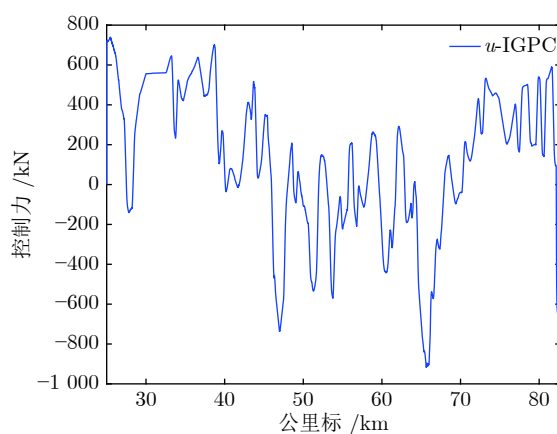


图 14 改进广义预测控制牵引/制动力曲线

Fig. 14 Control force of IGPC

控制方法下的速度曲线; u -IGPC 表示改进广义预测控制方法下的牵引/制动力曲线).

从图 13 中可以看出, 我们采用改进广义预测控制方法设计的重载列车速度跟踪控制器在整个列车运行过程跟踪效果良好, 理想运行速度目标曲线是通过前述多目标优化获得, 其满足该列车的安全、正点和节能要求, 对其高精度跟踪表明所设计控制器的有效性和准确性. 图 14 的牵引/制动力曲线在启动阶段基本保持恒牵引力, 在中途运行阶段能够通过调节牵引/制动力适应多变的线路条件; 且整个运行过程变化平缓, 工况转换平滑, 无超调现象, 满足 HXD1 型机车的牵引/制动力特性.

5 结束语

本文结合大秦线实际运行线路情况以及钩缓系统受力约束, 设计了列车动态纵向动力学模型与车钩力约束模型, 考虑钩缓受力约束, 以安全性、节能

性与正点性等多项运行优化指标为目标,通过自适应遗传算法获得重载列车理想运行速度目标曲线.与实际运行速度曲线的性能进行对比,结果表明,多目标优化运行速度曲线在保障列车运行安全性的同时,在节能性与正点性两种指标的评价都好于实际司机驾驶结果.基于所建立的纵向动力学模型,采用改进广义预测控制方法设计的运行优化控制器能够控制重载列车精确跟踪理想运行速度目标曲线,从而优化列车驾驶过程.

References

- Coleman A. *Railroads of North Carolina*. Arcadia Publishing, 2008.
- Zhai Wan-Ming, Zhao Cun-Fa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, **51**(2): 209–226
(翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战. 西南交通大学学报, 2016, **51**(2): 209–226)
- Lu Q W, He B B, Wu M Z, Zhang Z C, Luo J T, Zhang Y K. Establishment and analysis of energy consumption model of heavy-haul train on large long slope. *Energies*, 2018, **11**(4): 965
- Wei W, Zhang J, Zhao X B, Zhang Y. Heavy haul train impulse and reduction in train force method. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2018, **16**(2): 118–125
- Cherkashin U M, Zakharov S M, Semechkin A E. An overview of rolling stock and track monitoring systems and guidelines to provide safety of heavy and long train operation in the Russian railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2009, **223**(2): 199–208
- Dong H R, Ning B, Cai B G, Hou Z S. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. *IEEE Circuits and System*, 2010, **10**(2): 6–18
- Erofeyev E. Calculation of optimum train control using dynamic programming method. *Moscow Railway Engineering Institute: Moscow, Russia*, 1967, **811**: 16–30
- Howlett P. A new look at the rate of change of energy consumption with respect to journey time on an optimal train journey. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, **94**(12): 387–408
- Howlett P G, Pudney P J, Xuan V. Local energy minimization in optimal train control. *Automatica*, 2009, **45**(11): 2692–2698
- Wang P L, Goverde R M P. Multiple-phase train trajectory optimization with signalling and operational constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, **69**(8): 255–275
- Wang P L, Goverde R M P. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling. *European Journal of Operational Research*, 2018, **272**(2): 621–635
- Scown B, Roach D, Wilson P. Freight train driving strategies developed for undulating track through train dynamics research. *CORE 2000: Railway Technology for 21st Century*, 2000: 236–247
- Zhang L, Zhuan X. Optimal operation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems using model predictive control methodology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **22**(1): 13–22
- Chen Rong-Wu, Liu Li, Guo Jin. Optimization algorithm of train operation energy consumption based on genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, **12**(1): 112–118
(陈荣武, 刘莉, 郭进. 基于遗传算法的列车运行能耗优化算法. 交通运输工程学报, 2012, **12**(1): 112–118)
- Zou R, Luo S, Ma W. Simulation analysis on the coupler behaviour and its influence on the braking safety of locomotive. *Vehicle System Dynamics*, 2018, **56**(11): 1–21
- Wu G, Huang W, Yuan Y. Improvements for the stability of heavy-haul couplers with arc surface contact. *Vehicle System Dynamics*, 2018, **56**(3): 1–15
- Zhai Wan-Ming. *Vehicle-Orbit Coupling Dynamics*, Beijing: Science Press, 2007.
(翟婉明. 列车 – 轨道耦合动力学. 北京: 科学出版社, 2007.)
- Jin Di, Liu Jie, Yang Bo, He Dong-Xiao, Liu Da-You. Genetic algorithm with local search for community detection in large-scale complex networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(7): 873–882
(金弟, 刘杰, 杨博, 何东晓, 刘大有. 局部搜索与遗传算法结合的大规模复杂网络社区探测. 自动化学报, 2011, **37**(7): 873–882)
- Su Ti, Yang Ming, Wang Chun-Xiang, Tang Wei, Wang Bing. Classification and regression tree based traffic merging for method self-driving vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(1): 35–43
(苏颀, 杨明, 王春香, 唐卫, 王冰. 一种基于分类回归树的无人车汇流决策方法. 自动化学报, 2018, **44**(1): 35–43)
- Zhang Ri-Dong, Wang Shu-Qing, Li Ping. Support vector machine based predictive control for nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1066–1073
(张日东, 王树青, 李平. 基于支持向量机的非线性系统预测控制. 自动化学报, 2007, **33**(10): 1066–1073)

- 21 Xu Yang, Lu Li-Ping, Chu Duan-Feng, Huang Zi-Chao. Unified modeling of trajectory planning and tracking for unmanned vehicle. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(4): 799–806
(徐杨, 陆丽萍, 褚端峰, 黄子超. 无人车辆轨迹规划与跟踪控制的统一建模方法. *自动化学报*, 2019, **45**(4): 799–806)
- 22 Tang Xiao-Ming, Deng Li, Yu Ji-Min, Qu Hong-Chun. Output feedback model predictive control for interval type-2 T-S fuzzy networked control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(3): 604–616
(唐晓铭, 邓梨, 虞继敏, 屈洪春. 基于区间二型 T-S 模糊模型的网络控制系统的输出反馈预测控制. *自动化学报*, 2019, **45**(3): 604–616)
- 23 Spiryagin M, Wu Q, Cole C. International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: benchmarking questions. *Vehicle System Dynamics*, 2017, **55**(4): 450–463
- 24 Wu Q, Spiryagin M, Cole C, Chang C Y, Guo G, Sakalo A, et al. International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: results. *Vehicle System Dynamics*, 2018, **56**(3): 343–365



付雅婷 博士, 华东交通大学电气与自动化工程学院讲师. 主要研究方向为轨道交通运行优化控制.

E-mail: fuyating0103@163.com

(**FU Ya-Ting** Ph.D., lecturer at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. Her research interest covers operational optimization control of rail transportation.)

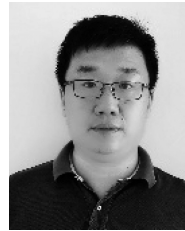
Her research interest covers operational optimization control of rail transportation.)



原俊荣 华东交通大学电气与自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为重载列车运行优化控制.

E-mail: gfnjl@163.com

(**YUAN Jun-Rong** Master student at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. His research interest covers operational optimization control of heavy haul train.)



李中奇 博士, 华东交通大学电气与自动化工程学院教授. 主要研究方向为列车运行过程建模与控制.

E-mail: lzq0828@163.com

(**LI Zhong-Qi** Ph.D., professor at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. His research interest covers modeling and control of train operation process.)



杨辉 博士, 华东交通大学电气与自动化工程学院教授. 主要研究方向为复杂系统建模, 控制与运行优化. 本文通信作者.

E-mail: yhshuo@263.net

(**YANG Hui** Ph.D., professor at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. His research interest covers modeling, control and operation optimization of complex systems. Corresponding author of this paper.)