



基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略研究

史可, 张征方, 罗源, 袁鹏, 易杰
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对既有列车在运行时未能合理实现节能和准点的问题, 文章分析列车节能运行和准点运行的耦合机理, 提出一种基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略 (multi-objective dynamic programming-based energy saving punctuality operation strategy of train, MDP-EP)。首先, 依据运行能耗和运行时间的累加特性, 根据线路特征信息将列车运行线路设计为若干个子区间, 提高对线路特征信息变化的自适应性; 然后, 通过运动学约束和动力学约束分别生成速度域可达集和牵引/制动力域可达集, 通过状态量约束和控制量约束提高对列车复杂操纵特性约束的自适应性, 接着, 结合节能准点目标的耦合机理设计最小能耗-最优运行时间目标函数, 设计多目标动态规划方法进行迭代求解; 最后, 基于MATLAB仿真环境和试验环境, 验证MDP-EP应用于高速列车的节能准点效果, 结果表明, 所提出的MDP-EP在保证运行时间的前提下使得高速列车均具有良好的节能性能, 相比准点规划, 节能指标提高10%~12%。

关键词: 高速列车; 节能目标; 准点目标; 复杂操纵特性约束; 多目标动态规划; 仿真

中图分类号: U268.6; U284.48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0183-07

0 引言

在列车运行过程中, 安全、节能、准点是重要目标, 国内外科研机构及学者对此进行了深入研究。

在列车运行节能建模方面, 文献[1]通过临界速度以及庞特里亚金 (Pontryagin) 最大值定理, 证明了列车站间最优运行曲线的存在, 并论证了列车最优运行操纵序列为最大牵引-巡航-惰行-最大制动。文献[2]在连续变化坡道和限速条件下, 建立了以列车运行动能为状态变量的节能优化模型。文献[3]以提高运行过程的自适应性为目标, 提出了5个准则对列车性能进行了建模, 并提出一种多尺度动态规划 (MDP) 方法来优化列车操纵。

基于列车运行节能优化模型, 利用动态规划、蚁群算法和遗传算法等对列车运行的目标速度曲线进行优化和分析, 利用启发式搜索算法、模糊控制算法、

神经网络算法等智能算法优化列车节能操纵, 相关研究效果良好^[4-5], 其中文献[6]提出了一种基于改进自适应遗传算法的列车节能速度曲线优化策略, 验证结果表明该方法具有较好的节能效率。文献[7]通过结合最大最小蚁群算法和模糊算法, 求解了列车在坡道和限速条件下的最优控制策略。同时, 智能搜索算法也被应用于列车节能曲线优化研究, 包括模拟退火算法 (SA)、差分进化算法 (DE)、粒子群算法 (PSO)、动态规划法 (DP) 等^[8-10]。

在实时控制方面, 文献[11]针对由天气、路线和机车运行条件引起的具有不确定性的干扰, 设计了随机节能运行控制方法, 取得显著成效。文献[12]将模糊控制算法与PID控制算法结合对列车自动运行系统 (ATO) 进行优化控制, 以弥补传统PID控制算法的不足, 实现了列车启动和运行控制。

对不同载重列车运行节能方法的研究也得到重视。针对重载货运列车的牵引优化及其在长大坡道的速度

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划 (K2023J026)

通信作者: 史可, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事列车自动驾驶运动规划与控制算法研究; E-mail: shike@csrzc.com

引用格式: 史可, 张征方, 罗源, 等. 基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 183-189. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.023.

Citation: SHI Ke, ZHANG Zhengfang, LUO Yuan, et al. Research on energy-saving and punctuality-oriented train operation strategy based on multi-objective dynamic programming[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 183-189. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.023.

控制问题,提出了电制动与空气制动相结合的节能驾驶策略^[13]。在高速动车组方面,一些学者通过构建工况转换模型,设计极小值公式对节能操纵序列进行求解^[14]。

综合分析可知,上述研究存在如下缺点:①较少考虑运行能耗和运行时间对复杂线路特征及复杂操纵约束的自适应性,导致运行能耗和运行时间计算结果不够准确,且所提方法难以实现工程应用。②传统多目标优化算法在求解非线性约束下的节能准点多目标函数时难以得到全局最优解。

鉴于上述分析,本文提出基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略。首先设计运动学约束和动力学约束,分别生成速度域可达集和牵引/制动力域可达集,提高对列车复杂操纵特性约束的自适应性;其次结合节能准点目标的耦合机理设计最小能耗-最优运行时间目标函数,设计多目标动态规划方法进行迭代求解,并计算各个子区间的最优区间加速度;最后通过仿真和线路试验对本文所提出的控制策略进行验证。

1 列车特性建模和约束

1.1 列车运动学

列车运行状态方程可以描述如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{f}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m 为列车质量; f 为列车所受的作用力; v 为列车运行速度; s 为列车运行位移; t 为列车运行时间。

为保证列车运行安全,应确保列车实际运行速度在位置域内不超过线路限速值,即

$$v(s) \leq v_{\lim}(s) \quad (2)$$

式中: $v_{\lim}(s)$ 为与位置 s 相关的线路限速值。

1.2 列车动力学

为方便描述列车运动过程及车钩连接特性等因素,把列车考虑为线条形状的单质点模型,列车纵向整车受力情况为

$$m \cdot a = F + F_b + F_r + F_c \quad (3)$$

式中: m 为列车质量; a 为加速度; F 为列车牵引/电制力; F_b 为空气制动力; F_r 为阻力合力(包括基本阻力和附加阻力); F_c 为车钩力合力。

列车最大牵引力/电制动力与列车速度等因素相关,可表示为:

$$\left. \begin{aligned} f &\leq f_{T,\max}(v) \\ f &\geq f_{E,\max}(v) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $f_{T,\max}(v)$ 为最大可用牵引力; $f_{E,\max}(v)$ 为最大可用电制动力。

为保证运行过程的安全,列车的最大加速度/减速度均有限制,表示为

$$a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max} \quad (5)$$

式中: $a_{\max}$ 为运行加速度最大值; $a_{\min}$ 为运行加速度最小值。

为保证列车操纵平稳性,牵引/电制动力在时域内变化不能太频繁,具体表示如下:

$$\left. \begin{aligned} f_i &\leq f_{M,\max}(f_{i-1}) \\ f_i &\geq f_{M,\min}(f_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: f_i 为第 i 时刻的牵引/电制动力; f_{i-1} 为第 $i-1$ 时刻的牵引/电制动力; $f_{M,\max}$ 为牵引/电制动力变化的斜率函数。

2 多目标动态规划

针对现有研究的不足^[15-19],本文从全局运行线路的角度出发,研究基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略,将线路信息按坡道及曲线的变化特征划分为若干个子区间,并计算在全线路最低运行时间约束下满足最低运行能耗的子区间加速度,所有子区间的最优操纵序列组成了全线路的最优操纵序列。本文所设计的MDP-EP的原理框架如图1所示。

与既有研究相比,本文所提出的方法在可达集中合理考虑了对列车运行能耗和运行时间影响较大的复杂线路特征和复杂操纵约束,可提高列车运行状态以及节能准点目标的计算精度;设计了多目标动态规划算法和权重系数,可通过系数调整实现节能准点多目标函数的迭代求解,进而实现全局最优解的计算。

2.1 子区间数据处理

列车运行能耗和运行时间具备累加特性,即需要列车在站-站间运行完成后才能计算得到最终的能耗和时间。同时,受目前数据处理及通信技术限制,列车在运行过程中只能接收到其相对位置的线路数据^[20],且在不同的线路特征信息下具有不同的操纵约束。

为实现准确的节能准点目标计算,需要进行线路数据处理,得到完整的坡道弯道等线路信息,其子区间线路数据处理思路如图2所示。子区间的坡道数据和弯道数据的变化点并不是同步的,其数据信息综合变化点如图2中 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_n 所示。由于动态规划是典型的双端优化问题,因此首先要明确起始点和结束点的状态(速度、位置、工况、级位)。本文针对起始点为 x_1 、结束点为 x_n 的坡道数据及弯道数据的变化区间进行分析,可得到明确的子区间加速度 a 和子区间速度 v ,基于此将站站间的距离区间划分为若干个子区间,进而可针对每个子区间的特点进行自适应最优操纵序列规划。

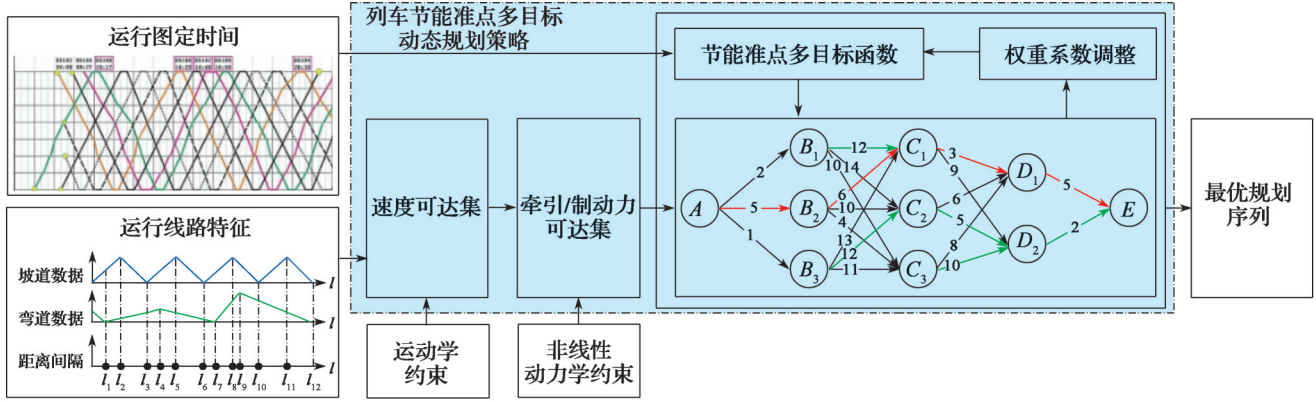


图1 基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略原理框图

Fig. 1 Schematic block diagram of MDP-EP

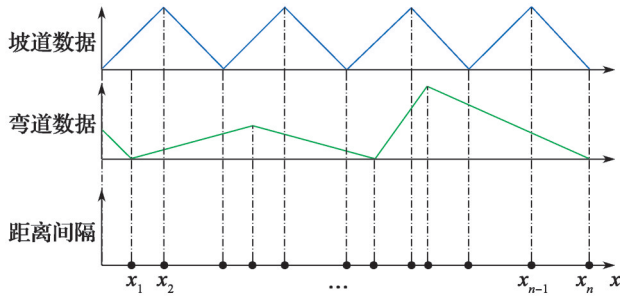


图2 站站间的子区间线路数据处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of track data processing for segments between stations

2.2 可达集生成

多目标动态规划优化过程的状态变量为子区间的加速度 a 和速度 v , 控制变量为牵引/制动力 F 。因此, 本节在运动学约束和动力学约束条件下, 分别生成起始点为 x_1 、结束点为 x_n 的速度域可达集 Ω_v 和牵引/制动力域可达集 Ω_F , 提高对列车复杂操纵特性约束的自适应性。

假设起始点 x_1 的速度为 v_1 、位置为 s_1 , 结束点 x_n 的速度为 v_n 、位置为 s_n , L 为列车运行距离, T_{up} 为列车运行时分上限, T_{down} 为列车运行时分下限, 则从起始点到结束点的最高速度 $v_{up} = L/T_{up}$, 最低速度 $v_{down} = L/T_{down}$ 。为了满足寻优要求, 设速度域可达集 Ω_v 中的每一个变量均为 Δv , Δv 为 v_1 和 v_n 的差值, 即 $\Delta v = v_n - v_1$, 则 $\Omega_v = \{\Delta v | \Delta v_1, \dots, \Delta v_n\}$ 。在得到速度域可达集 Ω_v 后, 通过运动学方程公式(1)和动力学方程公式(3), 在动力学约束式(4)、式(5)和式(6)约束下可计算得到牵引/制动力域可达集 $\Omega_F = \{\Delta F | \Delta F_1, \dots, \Delta F_n\}$ 。

将速度域可达集 Ω_v 的速度范围 $\Delta v \in [v_{down}, v_{up}]$ 作为多目标动态规划算法中子区间速度 v 的约束范围, 具体表示为

$$v \in [v_{down}, v_{up}] \quad (7)$$

子区间加速度 a 可通过子区间速度 v 计算得到。若当前子区间速度为 v , 下一个子区间的长度为 L_r , 考虑子区间终点速度约束 $v \in [v_{down}, v_{up}]$, 根据式(7)可计算得

到下一个子区间的加速度约束 $a \in [a_{min}, a_{max}]$, 具体计算为:

$$\left. \begin{aligned} a_{max} &= (v_{up} \cdot v_{up} - v \cdot v) / (2L_r) \\ a_{min} &= (v_{down} \cdot v_{down} - v \cdot v) / (2L_r) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

之后即可通过运动学模型公式(1)和动力学模型公式(3), 计算得到牵引/制动力域可达集 $\Omega_F = \{\Delta F | \Delta F_1, \dots, \Delta F_n\}$ 。

多目标动态规划算法中针对子区间的状态变量和控制变量进行的迭代计算为迭代过程的重要组成部分。列车在运行过程中的状态并不是离散的, 且当前的状态受到上一状态的约束。速度域可达集 Ω_v 和牵引/制动力域可达集 Ω_F 克服了传统优化算法处理运动学与动力学约束的不足, 保障了状态变量的连续性。

2.3 节能准点多目标函数构建

节能准点多目标函数的设计目标是在计算列车运行最低能耗目标的同时, 合理处理列车运行时间。

2.3.1 多目标函数

列车运行能耗包括牵引能耗和再生制动能耗, 本文主要研究列车运行的牵引能耗。列车牵引能耗主要指运行时的网侧电能损耗, 由于引起网侧电能损耗的一次侧电流和电压无法实时获取, 所以本文基于轮周机械功率进行网侧电能等效计算, 具体为

$$f_e = \sum_{i=1}^{i=n} F_i \cdot s_i = f(a_i, v_i) \cdot s_i \quad (9)$$

式中: f_e 为节能目标函数; F_i 为第 i 个子区间的牵引/制动力; s_i 为第 i 个子区间的运行距离; $f(a_i, v_i)$ 为牵引/制动力和速度、加速度的关系式。

列车运行时间无法直接通过函数表达式的形式展现, 因此计算时采用了列车的总体图定运行时间 T_b 和总体运行距离 s 计算得到图定平均运行速度 $\bar{v} = s/T_b$ 。列车准点目标函数 f_p 可以表示为列车实际速度 v_i 与图定平均运行速度 $\bar{v}$ 的差值, 具体表示为

$$f_p = v_i - \bar{v} \quad (10)$$

式中: v_i 为第 i 个子区间的运行速度。

因此，MDP-EP 的节能准点多目标函数 f_{obj} 表达式为

$$f_{obj} = \lambda_e \cdot f_e + \lambda_p \cdot f_p \tag{11}$$

式中： λ_e 为节能目标的权重值； λ_p 为准点目标的权重值。

式(11)通过自适应调整 λ_e 和 λ_p 来求解非线性的多目标函数。

2.3.2 权重系数

在节能准点多目标函数中，节能目标和准点目标通过调整 λ_e 和 λ_p 实现。从特征来说， λ_e 越大，节能效果越好，但运行耗时无法得到保证； λ_p 越大，运行耗时更能得到保证，但节能效果越差。节能目标权重 λ_e 和准点目标权重 λ_p 不是同时下降的，也不可能一个下降一个保持不变，只能是一增一减。多目标的求解过程是寻找节能目标权重 λ_e 和准点目标权重 λ_p 的最优平衡点，即求解 Pareto 解集的过程。

本文设计节能目标权重 λ_e 和准点目标权重 λ_p 的和为1，通过迭代方式，按照0.1的步长进行迭代计算得到每一组权重系数下的能耗，最终得到多目标函数中节能目标权重 λ_e 和准点目标权重 λ_p 的 Pareto 解集，实现多目标计算，公式表示为

$$\lambda_e + \lambda_p = 1 \tag{12}$$

2.4 多目标动态规划计算

为提高节能准点目标对不同线路特征下复杂操纵特性约束的自适应性，根据第2.1节的分析，对每个子区间的节能准点目标进行优化。依据能耗和时间累加特性可知，每个子区间累加的最优节能准点结果即为整个线路的最优节能准点结果。

动态规划（DP）是一种用于解决复杂问题的算法设计方法，特别适用于可以被分解成子问题的复杂情况^[21]。其核心思想是将问题拆分为更小的子问题，将子问题的解存储起来以避免重复计算。因此，列车节能准点运行策略可以通过设计多目标动态规划方法实现。

动态规划的关键在于设计高效的状态转移方程，提升算法性能。首先确定状态变量，定义运行能耗 $E = F_i \cdot s_i$ ，运行时间 $t = s_i / v_i$ ，充分描述节能准点多目标函数 f_{obj} ；定义状态转移方程，根据问题的特性，定义当前状态如何由先前状态转移而来，通常涉及对状态变量的操作（选择、合并或比较）；进行初始化，设置边界条件和初始状态，确保算法的正确性和完整性；根据状态转移方程的依赖关系，确定状态计算的顺序，以确保所有需要的子问题都计算完成。

3 仿真和线路试验结果分析

3.1 参数设置

为验证本文所提 MDP-EP 方法的有效性，针对高

速列车应用开展了 MATLAB 仿真和线路试验，试验环境的基本参数如表1所示。列车的运行过程设置为从零速起车到零速停车，以验证全场景速度范围内的性能。

表1 参数设置

Table 1 Parameter setting

参数名称	MATLAB 仿真环境	试验环境
对比线路	京张铁路	京津城际铁路
对比区间	清河站—下花园	北京南—天津南
整车质量/t	460	908
起车位置公里标/km	11.160	1.086
停车位置公里标/km	125.364	123.207
运行时间/min	30.6	35.0
最高速度/(km·h ⁻¹)	350	400

3.2 仿真结果分析

仿真试验结果对比如表2和图3~图5所示。

表2 MDP-EP 与恒力、恒速的运行能耗与运行时间数据对比

Table 2 Comparison of energy consumption and running time data among MDP-EP, constant force, and constant speed strategies

对比条目	MDP-EP 规划	准点（恒速）规划	恒力 规划	晚点（恒速）规划
总耗时/s	1 859.34	1 836.03	3 190.29	2 418.89
总耗时/min	30.99	30.60	53.17	40.31
总能耗/(kW·h)	1 741.45	1 924.41	2 556.31	1 642.93

由表2和图3可以看出，在运行时间方面，基于MDP-EP规划与准点（恒速）规划的运行时间相差0.39 min（约23 s），属于运行误差允许的范围；而基于晚点（恒速）规划与准点（恒速）规划的运行时间相差为9.71 min（约583 s），远超出运行误差范围。

在运行能耗方面，与准点（恒速）规划的值相比，MDP-EP规划的节能率达到9.5%，晚点（恒速）规划的节能率达到14.6%。

由图4可知，在MDP-EP规划中节能权重系数的变化对节能率有较大影响。当节能权重系数 λ_e 趋于1的时候， λ_p 趋于0，此时节能率是不断增大的，但其耗时也不断增加。通过MDP-EP的计算，在节能权重系数 $\lambda_e = 0.18$ 的时候，系统可实现运行时间误差允许范围（30 s）内的最优节能效果。因此，通过权重系数的调整，可以实现多目标节能准点优化。

图5展示了MDP-EP与恒力、恒速的运行速度对比。从图5可以看出，这3种方式均在所确定的可达集中完成规划，但恒力速度波动比较大，MDP-EP仅在某些子区间出现速度波动。

综上，与MDP-EP规划相比，晚点（恒速）规划具有更高的节能率，但其运行时间却远超过运行误差（23 s）允许范围。MDP-EP规划能在满足准点误差要求的同时，将节能率提高9.5%，实现了列车节能准点

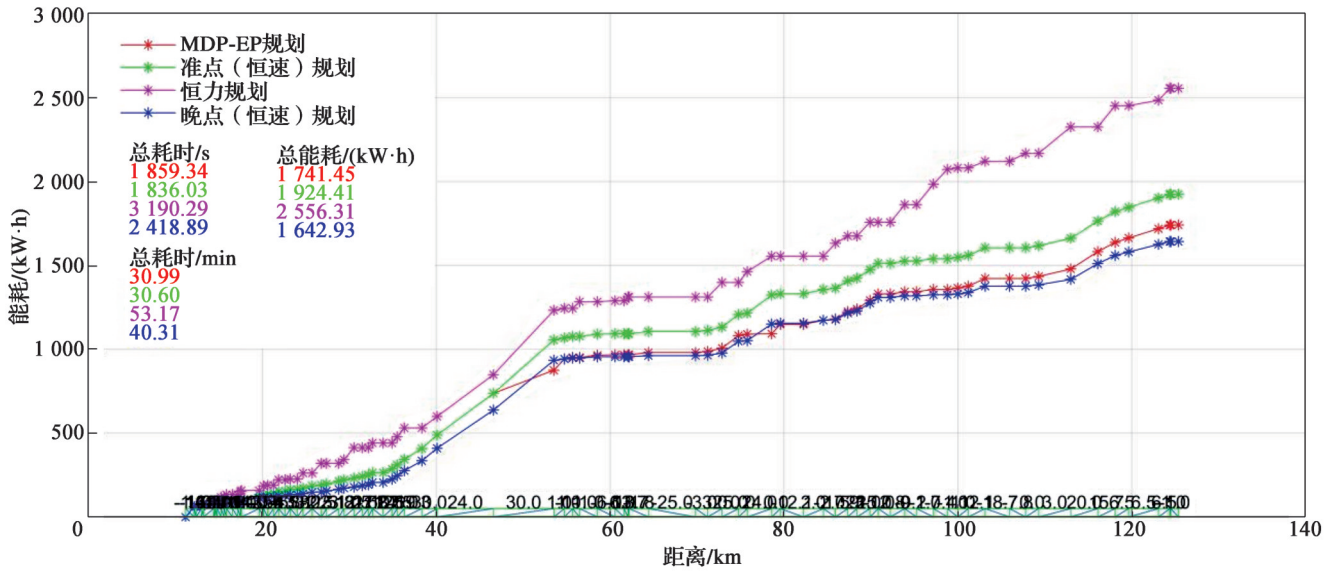


图3 MDP-EP与恒力、恒速的运行能耗与运行时间数据对比

Fig. 3 Comparison of energy consumption and running time data among MDP-EP, constant force, and constant speed strategies

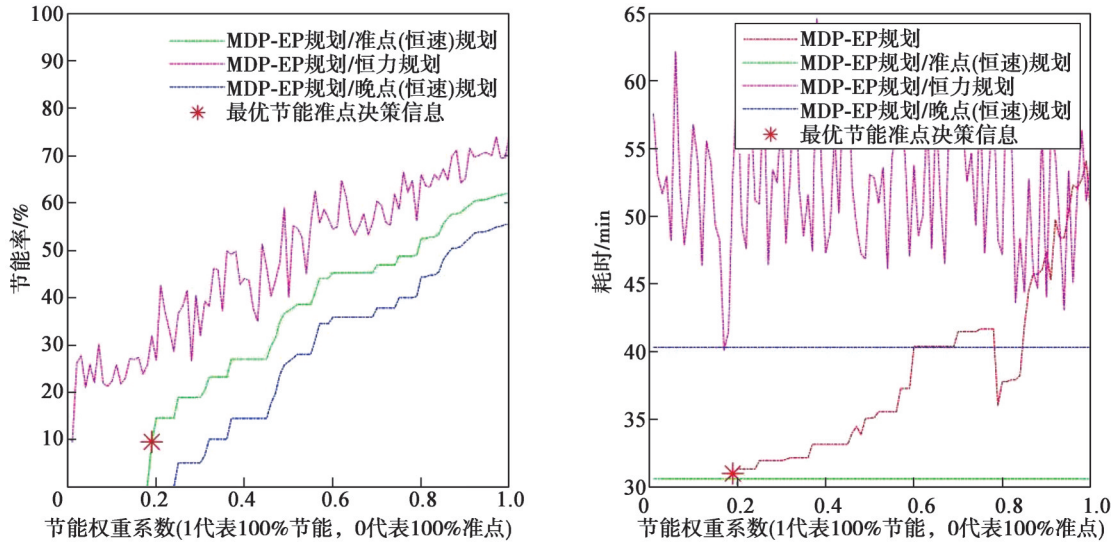


图4 MDP-EP与恒力、恒速的运行节能功能准点效果对比

Fig. 4 Comparison of energy saving and punctuality effects among MDP-EP, constant force, and constant speed strategies

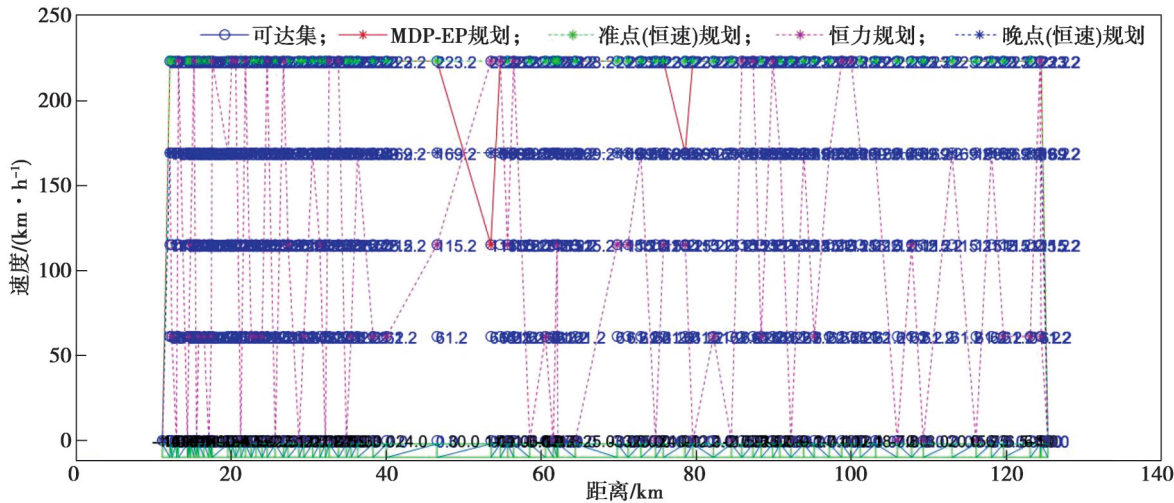


图5 MDP-EP与恒力、恒速的运行速度对比

Fig. 5 Comparison of operating speed among MDP-EP, constant force, and constant speed strategies

多目标运行策略的控制目标。

3.3 线路试验结果分析

线路试验中, 人工驾驶运行速度和MDP-EP运行速度分别如图6和图7所示, 能耗统计数据如表3所示。在运行能耗方面, 人工驾驶时其值为3 505 kW·h, MDP-EP规划时其值为3 084 kW·h, 通过MDP-EP规划, 列车节能率达到12%, 具有良好的节能效果。

表3 MDP-EP与人工驾驶的运行能耗数据对比

Table 3 Comparison of energy consumption data between MDP-EP and manual driving

类型	机械能耗/(kW·h)
人工驾驶	3 505
辅助驾驶	3 084

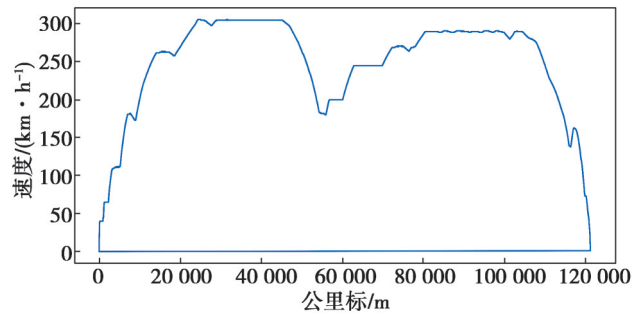


图6 人工驾驶的运行速度

Fig. 6 Operating speed under manual driving

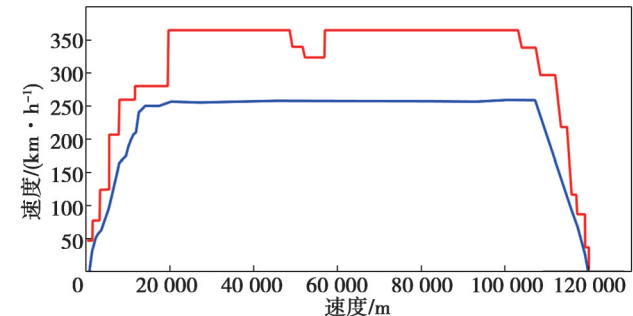


图7 MDP-EP运行速度

Fig. 7 Operating speed under MDP-EP

4 结论

本文针对列车全线路运行最优节能准点问题, 提出了一种基于多目标动态规划的列车节能准点运行策略。通过状态约束和控制约束提高节能准点目标对线路特征信息变化的自适应性, 结合节能准点目标的耦合机理设计最小能耗-最优运行时间目标函数。在仿真环境和试验环境下, 针对不同线路信息的仿真结果表明, 本文所提出的MDP-EP策略在保证运行时间的条件下具有良好的节能性能。

在后续的研究中, 可结合极大值原理等数值优化算法计算的最优惰行点等信息, 进一步提高节能效果。同时需考虑功率传递效率等效率方面的约束, 以及列车再生制动能量利用的节能技术。

参考文献:

[1] SHEN Hongtian, YAN Jianwei. Optimal control of rail transportation associated automatic train operation based on fuzzy control algorithm and PID algorithm[J]. Automatic control and computer sciences, 2017, 51(6): 435-441.

[2] KOKOTOVIC P, SINGH G. Minimum-energy control of a traction motor[J]. IEEE transactions on automatic control, 1972, 17(1): 92-95.

[3] XU Yanping, ZHAO Xia, WANG Lin, et al. Optimal control of automatic train operation based on multi-scale dynamic programming[C]//IEEE. Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing: IEEE, 2014: 3429-3433.

[4] LU Shaofeng. Optimising power management strategies for railway traction systems[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2011.

[5] LU Shaofeng, HILLMANSEN S, HO T K, et al. Single-train trajectory optimization[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2013, 14(2): 743-750.

[6] HE Jing, QIAO Duo, ZHANG Changfan. On-time and energy-saving train operation strategy based on improved AGA multi-objective optimization[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2023, 238(5): 511-519.

[7] KE B R, LIN Chunliang, LAI Chiwen. Optimization for train-speed trajectory and control for mass rapid transit systems[J]. Control engineering practice, 2011, 19(7): 675-687.

[8] 刘炜, 许嘉轩, 王沛沛, 等. 基于模拟退火算法的列车节能操纵研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2320-2327.

[9] LIU Wei, XU Jiaxuan, WANG Peipei, et al. Train energy saving operation based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of system simulation, 2018, 30(6): 2320-2327.

[10] 严细辉, 蔡伯根, 宁滨, 等. 基于差分进化的高速列车运行操纵的多目标优化研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 65-71.

[11] YAN Xihui, CAI Bogen, NING Bin, et al. Research on multi-objective high-speed train operation optimization based on differential evolution[J]. Journal of the China railway society, 2013, 35(9): 65-71.

[12] LIN W S, SHEU J W. Automatic train regulation for metro lines using dual heuristic dynamic programming[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2009, 224(1): 15-23.

[13] LI Xiang, GAO Ziyong, SUN Wenzhe. Existence of an optimal strategy for stochastic train energy-efficient operation problem[J]. Soft computing, 2013, 17(4): 651-657.

[14] KHMELNITSKY E. On an optimal control problem of train operation[J]. IEEE transactions on automatic control, 2000, 45(7): 1257-1266.

[15] LIN Xuan, WANG Qingyuan, WANG Pengling, et al. The energy-efficient operation problem of a freight train considering long-distance steep downhill sections[J]. Energies, 2017, 10(6): 794.

- [14] 刘建强, 魏远乐, 胡辉. 高速列车节能运行优化控制方法研究[J]. 铁道学报, 2014(10): 7-12.
LIU Jianqiang, WEI Yuanle, HU Hui. Research on optimization control method of energy-saving operation of high-speed trains[J]. Journal of the China railway society, 2014 (10): 7-12.
- [15] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能操纵优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 76-84.
GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Optimization of energy-efficient train operation based on dynamic programming approach[J]. Journal of the China railway society, 2020, 42(8): 76-84.
- [16] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能运行两阶段优化方法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 946-954.
GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Two-stage optimization method of train energy-efficient operation based on dynamic programming[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2020, 55(5): 946-954.
- [17] 张凌莺. 基于动态规划的城市轨道交通列车运行曲线多目标优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHANG Lingying. Multi-objective train trajectory optimization of urban rail transit based on dynamic programming [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [18] 高豪. 城市轨道交通列车节能运行优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
GAO Hao. Research on optimization of energy-efficient train operation in urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [19] 阴佳腾. 基于近似动态规划的城轨列车运行一体化调整方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
YIN Jiateng. Integrated metro train rescheduling optimization based on approximate dynamic programming[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 王青元, 冯晓云, 朱金陵, 等. 考虑再生制动能量利用的高速列车节能最优控制仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 96-103.
WANG Qingyuan, FENG Xiaoyun, ZHU Jinling, et al. Simulation study on optimal energy-efficient control of high speed train considering regenerative brake energy[J]. China railway science, 2015, 36(1): 96-103.
- [21] 赵冬斌, 刘德荣, 易建强. 基于自适应动态规划的城市交通信号优化控制方法综述[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 676-681.
ZHAO Dongbin, LIU Derong, YI Jianqiang. An overview on the adaptive dynamic programming based urban city traffic signal optimal control[J]. Acta automatica sinica, 2009, 35(6): 676-681.

Research on energy-saving and punctuality-oriented train operation strategy based on multi-objective dynamic programming

SHI Ke, ZHANG Zhengfang, LUO Yuan, YUAN Peng, YI Jie

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

Abstract: To improve the operation of existing trains that inadequately achieve energy saving and punctuality, this paper proposes a multi-objective dynamic programming-based train operation strategy oriented towards energy saving and punctuality (MDP-EP), through analyzing the coupling mechanism between energy-saving and punctuality-oriented operation strategies. First, the train operation route was divided into several segments based on track feature information, considering the cumulative characteristics of train operation in terms of energy consumption and running time. This approach aimed to improve adaptability to variations in track feature information. Next, a speed domain reachable set and traction/braking force domain reachable set were generated based on kinematic and dynamic constraints, respectively. This step aimed to improve adaptability to constraints arising from the complex control characteristics of trains, based on state and control constraints. Following this, a minimum energy consumption-optimal running time objective function was developed, leveraging the coupling mechanism of energy saving and punctuality targets. A multi-objective dynamic programming method was then devised for iterative solutions. The energy-saving and punctuality effects of the MDP-EP strategy were verified in MATLAB-based simulation environments and experimental environments for applications in high-speed train operation. The results show the effective energy-saving performance of the proposed MDP-EP strategy in high-speed train operation while guaranteeing the running time. Specifically, MDP-EP increased the energy-saving index by 10%, compared with punctuality-oriented programming.

Keywords: high-speed train; energy-saving target; punctuality target; constraints arising from complex control characteristics; multi-objective dynamic programming; simulation