

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

李旺, 金森鑫, 张大可, 易灵芝.
货运列车自适应模型平滑切换及节能
优化研究.
电机与控制应用, 2022, 49(1): 103.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

货运列车自适应模型平滑切换及节能优化研究^{*}

李 旺^{1,2}, 金淼鑫^{1,2}, 张大可³, 易灵芝³

- (1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
3. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 为了使货运列车运行过程切近实际, 提出了一种基于加速度自适应的货运列车质点模型平滑切换方法。首先, 建立列车的单质点和多质点模型, 基于扰动加速度偏差变化率进行列车多模型的自适应切换研究。然后, 为了降低大功率机车牵引电机的工作能耗, 引入货运列车牵引控制的多目标和约束条件, 建立了多目标优化模型, 并提出一种新型的多目标飞蛾扑火(MOMFO)算法用于优化货运列车运行过程。最后, 采用HXD1型电力机车牵引50节C80货车作为研究对象, 通过仿真验证了所提方法对货运列车牵引电机节能及运行过程优化具有重要意义。

关键词: 货运列车; 加速度自适应; 模型切换; 牵引电机; 多目标飞蛾扑火算法; 节能

中图分类号: TM922.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)01-0103-07

doi: 10.12177/emca.2021.166

Research on Adaptive and Smooth Model Switching and Energy Saving Optimization of Freight Train^{*}

LI Wang^{1,2}, JIN Miaoxin^{1,2}, ZHANG Dake³, YI Lingzhi³

- (1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;
2. The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China;
3. School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to make the running process of freight train model close to reality, a smooth switching method of freight train particle model based on acceleration adaptation is proposed. Firstly, the single-point and multi-point models of the train are established, and the adaptive switching between the models is studied based on the change rate of disturbed acceleration deviation. Then, in order to reduce the working energy consumption of the high-power locomotive traction motor, the multi-objective optimization model is established by introducing optimization objectives and constraint conditions of freight train traction control, and a new multi-objective moth-flame optimization (MOMFO) algorithm is proposed to optimize the running process of freight train. Finally, using HXD1 electric locomotive pulling 50 C80 freight cars as the research object, the simulation verifies that the proposed method is of great significance to energy saving and operation process optimization of freight train traction motor.

Key words: freight train; acceleration adaptation; model switching; traction motor; multi-objective moth-flame optimization (MOMFO) algorithm; energy saving

收稿日期: 2021-11-25; 收到修改稿日期: 2021-12-15

^{*} 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ6009)

作者简介: 李 旺(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为牵引传动技术。

易灵芝(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为交流调速与电力电子装置、新能源发电、智能微电网技术等。(通信作者)

0 引言

随着交通运输网的快速发展,铁路货运列车以其运量大、成本低、全天候的优势,使货物运输逐渐向铁路货运倾斜^[1]。为准确描述货运列车牵引优化控制,改善列车牵引计算精度和计算复杂度,需要在运行过程中选取货运列车最优模型。复杂线路条件下,货运列车运行过程不仅要兼顾电机工作能耗与列车运行时间的平衡问题,还要考虑到限速、脱钩等安全问题,保证货运列车节能、省时、经济和安全平稳运行,其本质上是一个多目标、多约束的优化问题。

对于货运列车最优模型和列车牵引电机多目标节能优化问题,国内外学者已经展开了广泛研究。大多数牵引计算软件将整个列车简化为单质点模型^[2],为了优化货运列车牵引计算与控制系统,文献[3-4]将列车看作多个质点构成的质点链,建立货运列车多质点模型进行牵引计算,减小列车牵引控制误差,提高牵引计算精度,但该方法需要求解大量方程,计算复杂度大。文献[5]建立改进的列车多质点模型,对复杂的多质点模型进行简化分析,保证一定计算精度的同时,降低了牵引计算复杂度,但需对列车、线路等条件进行理想假设,也未考虑实际运行中列车牵引节能优化的多个优化目标和约束条件。文献[6]综合牵引电机能耗和平稳性指标进行计算,控制电力机车的电机牵引力输出,降低了电机工作能耗,但未考虑列车运行时间,只保证列车运行的经济性。文献[7-8]考虑了线路复杂条件,将时间和能耗作为两个优化目标构建多目标优化模型,得到了符合实际情况的列车牵引控制策略,但该方法将多目标转化为单目标问题进行求解,忽略了各指标间的相互影响,未体现多目标优化研究的本质。文献[9]提出一种多目标粒子群算法,在满足安全原则和各类约束条件下,利用算法求解获得能耗、时间与停车误差的 Pareto 前沿解。文献[10]设计了一种改进的差分进化算法对列车多目标优化数学模型进行求解,实现了列车能耗、运行时间、停车精度及不舒适度的多目标优化。文献[11]设计了一种改进的 NSGA-II 算法保证 Pareto 前沿分布均匀,兼顾列车的安全、准点和低能耗运行。诸如粒子群、差分进化、NSGA-II 等传统优化

算法虽然已经广泛应用于列车牵引运行优化中,但该类算法容易陷入局部最优且收敛速度慢。与上述优化算法相比,飞蛾扑火算法全局性优且不易落入局部极值^[12],适合解决货运列车的多目标节能优化问题。

综合上述文献存在的不足,本文提出一种基于加速度自适应的货运列车质点模型切换方法。以牵引电机为考虑对象,通过建立电机能耗模型,实现当前工况下电机能耗优化控制。针对所建立的多目标、多约束优化模型,设计一种新型多目标飞蛾扑火(MOMFO)算法优化货运列车运行过程,为货运列车多目标节能研究提供必要的理论依据。

1 货运列车建模受力分析

1.1 货运列车动力学模型

货运列车的动力学模型可分为两种:单质点模型和多质点模型。传统的单质点货运列车模型计算简单,但并未考虑车长和车钩力约束的影响。在复杂线路运行时,列车的速度、电机牵引能耗均存在较大偏差。多质点货运列车模型将整辆列车看成多个质点的连接,能够反映列车编组、长度对受力和运行的影响,但运算量大,计算复杂。

货运列车单质点模型:

$$Mx'' = \mu_t F_t(v) - \mu_b F_b(v) - F_r(x, v) \quad (1)$$

货运列车多质点模型:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = \mu_t F_t(v) - \mu_b F_b(v) - F_{ch2} - F_{r1}(x, v) \\ \vdots \\ m_i x_i'' = -\mu_b F_b(v) + F_{cqi-1} - F_{chi+1} - F_{ri}(x, v) \\ \vdots \\ m_n x_n'' = -\mu_b F_b(v) + F_{cqn} - F_{rn}(x, v) \end{cases} \quad (2)$$

假设每辆货运列车之间“刚性”连接,考虑前后车钩力为一对相反作用力,则有

$$F_{cqi-1} = F_{chi} \quad (3)$$

式中: $F_t(v)$ 和 $F_b(v)$ 分别为货运列车的牵引力和制动力; μ_t 为牵引系数; μ_b 为制动系数; $\mu_t \in [0, 1]$, $\mu_b \in [0, 1]$, 且 $\mu_t \cdot \mu_b = 0$; v 为货运列车的当前速度; x 为货运列车的当前位置; m_i 为第 i 辆货运列车的重量,随列车载荷而变化; x_i'' 为第 i 辆货运列车的加速度; F_{cqi-1} 为第 $i-1$ 辆货运列车前车钩

力; $F_{cq_{i+1}}$ 为第 $i+1$ 辆货运列车后车钩力; $F_{ri}(x, v)$ 为作用在第 i 辆货运列车上的总阻力; $F_r(x, v)$ 与其在线路上位置 x 以及速度 v 有关^[13]。

1.2 多模型切换自适应控制

扰动加速度原指船舰受海浪扰动造成的摆动、摇动和船首旋转等情况干扰,产生的附加加速度。本文将船舰上的“扰动加速度”概念引入货运列车运行过程。本文的“扰动加速度”被定义为货运列车受线路变化扰动造成列车速度、加速度变化等情况影响,产生的附加加速度。

随着货运列车进入不同条件的线路,其扰动加速度发生改变,整辆列车的受力逐渐变化,原先的模型不再适用。在应对复杂多变的线路条件时,针对所建立的货运列车模型,应选择一个最优的模型来匹配列车的运行状态,确定多模型的自适应切换准则。本文建立了货运列车的单质点和多质点模型,所采用的切换策略是在每个采样时刻,基于扰动加速度偏差变化率 J_r 来进行多模型的自适应切换控制。 J_r 的计算式为

$$J_r = \frac{da_r}{dt} \quad (4)$$

式中: a_r 为货运列车前后某一时刻的扰动加速度。

针对货运列车两种模型所对应的运行情况来设定阈值,根据扰动加速度偏差变化率的大小进行模型间的切换判断,以实现多模型的自适应切换研究。阈值切换设计结果为, $|J_r|=0$,采用单质点模型; $0<|J_r|<0.75$,采用多质点模型。

在确定模型的切换策略后,描述运行过程的多个模型会自动切换至货运列车最优模型,并将切换前的输入输出数据作为新模型的初始值,实现货运列车速度平滑运行,如图1所示。

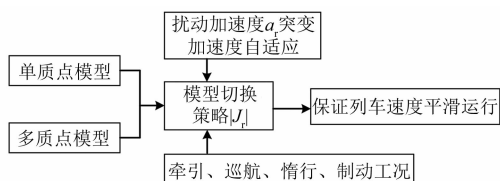


图1 货运列车模型切换策略

1.3 列车牵引电机节能优化控制

由文献[14-16]可知,列车最佳运行策略由最大牵引(MT)、巡航(CO)、惰行(IR)、最大制动(MB)四个工况组合而成。在巡航阶段,货运列

车基本保持恒速运行,传统直流电机牵引系统很难保持列车速度恒定不变,只能限制速度在较小的范围内波动,而本文电力机车HXD1采用变频异步电机,实现恒力矩、恒速和定速控制。在限速、坡道、弯道等复杂线路情况下,需要充分考虑电机工作能耗,选取合适的列车运行策略,通过优化算法得到理想工况转换点的位置,从而进行电机节能控制。

货运列车在进入大上坡道时,其牵引电机施加最大牵引力,以实现动能闯坡;在一般坡道运行时,电机转矩定速控制,实现恒速运行;在进入下坡道时,牵引电机不工作,充分利用坡道势能进行节能。以上策略能够优化电机工作能耗,对列车运行的效能提升产生很大影响。

在线路区段起点电机采用最大牵引,当 $v(s_1) > v_l - \Delta v$ 时,列车到达 S_1 位置开始转换工况,中间 $k-2$ 个区段根据电机工作能耗设置合适的运行策略,线路区段终点电机采用最大制动策略,反推得到制动位置 S_{k-1} ,如图2所示。

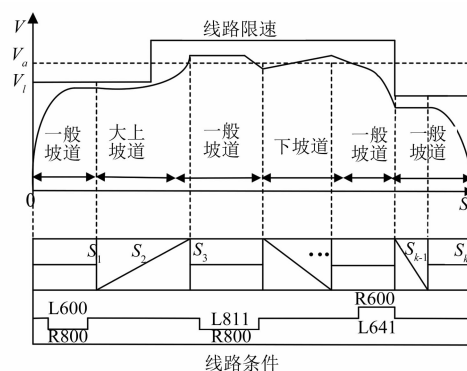


图2 货运列车运行策略示意图

2 货运列车的多目标优化模型

2.1 电机工作能耗

货运列车在不同运行工况时,其牵引电机工作能耗不同,所产生的能耗与电机输出扭矩相关。货运列车的运行能耗主要来源为电机输出扭矩转换到轮周牵引力和制动力克服阻力所做的功。牵引电机采用JD160型三相异步牵引电机,根据HXD1型机车进行了适应性优化设计,结构如图3所示。

$$F_{vb} = F_t = \frac{M_{vb} \cdot i \cdot \eta}{R} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{\xi_i} \int_0^t F_i v dt + \xi_b \int_0^t F_b v dt \quad (6)$$

式中: M_{vb} 为电机输出转矩; i 为列车传动系统总转动比; η 为传动效率; R 为车轮静力半径; E 为列车运行过程的电机工作能耗; F_i 、 F_b 分别为列车的牵引力和制动力; ξ_i 为电机牵引时的能耗利用率; ξ_b 为电机再生制动时的能量利用率。

2.2 列车运行时间

运行时间是货运列车从起点运行到终点所需的时间。运行时间越小, 列车全天往返调度次数越多, 经济性、效率越高。总运行时间为

$$T = \sum_{i=1}^n t_i \quad (7)$$

式中: t_i 为线路各区段的运行时间。

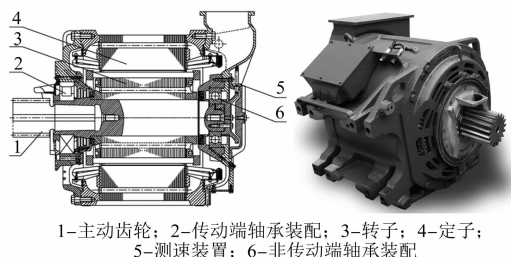


图3 JD160A 型异步牵引电机结构

2.3 各类约束条件

为防止车钩断裂, 列车运行过程中的车钩力应小于铁道科学院所建议的最大车钩力:

$$\begin{cases} F_{cqi} \leq F_M \\ F_{chi} \leq F_M \end{cases} \quad (8)$$

货运列车平稳性主要是考虑列车的冲击率限制, 即制条件如下:

$$J = \frac{da}{dt} \leq J_M \quad (9)$$

综上所述, 为优化货运列车的牵引电机工作能耗和经济性, 本文根据货运列车自适应切换动力学模型, 求出一组输入控制序列, 在满足安全运行的约束下, 使电机工作能耗和列车运行时间都尽可能达到最小。多目标优化模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min \{E, T\} \\ \text{s. t. } v(0) = 0, \\ v(x_s) = 0, \\ 0 < v(x_i) \leq v_1(x_i), \\ F_{cqi} \leq F_M, \end{aligned} \quad (10)$$

$$F_{chi} \leq F_M,$$

$$J \leq J_M,$$

$$X(0) = 0,$$

$$\Delta x = |X_n - D| < \Delta x_{\max} \quad (11)$$

式中: $v(0)$ 、 $v(x_s)$ 分别为货运列车线路起点和终点的速度; $v(x_i)$ 为列车运行到位置 x_i 时的列车速度, 要求低于速度限制 v_1 ; F_M 为最大车钩力; J_M 为最大冲击率; $X(0)$ 为货运列车线路起点; D 为实际运行距离; X_n 为货运列车线路终点; $\Delta x_{\max}$ 为允许的最大停车误差; Δx 为实际停车误差。

3 MOMFO 算法对模型求解

3.1 MOMFO 算法

为了更好地解决多目标优化问题, 优化货运列车的牵引电机工作能耗和经济性。本文引入 NSGA-II 的非支配排序思想、精英集存储机制和拥挤度策略^[17]。同时为了避免出现“早熟”现象, 引入 Lévy 飞行策略^[18], 将原始飞蛾扑火算法改为多目标优化算法。所提出的 MOMFO 算法过程如下:

$$Y_i^{N+1} = l_i \cdot e^{at} \cdot \cos(2\pi x) + w \cdot B_j^N \quad (12)$$

$$w = e^{-\frac{h}{k_{\max}}} \quad (13)$$

$$l_i = |B_j^N - Y_i^N| \quad (14)$$

$$\text{flame.no} = \text{round}\left(P - h \cdot \frac{N-1}{k_{\max}}\right) \quad (15)$$

式中: Y_i^N 为第 i 只飞蛾 N 次迭代后飞蛾的新位置; B_j^N 为火焰的位置, 即当前飞蛾的最佳位置; l_i 为第 i 只飞蛾与第 j 团火焰之间的距离; c 为描述对数螺旋形状的常数; t 为 $[-1, 1]$ 之间的一个随机数; w 为自适应权重系数; h 为当前迭代次数; $k_{\max}$ 为最大迭代次数; P 为最大火焰数量。

3.2 货运列车节能控制算法流程图

整个货运列车牵引电机节能控制算法的计算流程图如图 4 所示。

4 仿真分析

4.1 参数设置

本文以某铁路上的“A 站—B 站”为仿真线路, HXD1 型电力机车牵引 50 节 C80 货车为仿真对象, 验证本文方法的有效性。牵引电机采用 JD160 型三相异步牵引电机, 具有恒力矩、恒速和定速控制功能, 是成熟、可靠、经济的牵引电机。部分线路

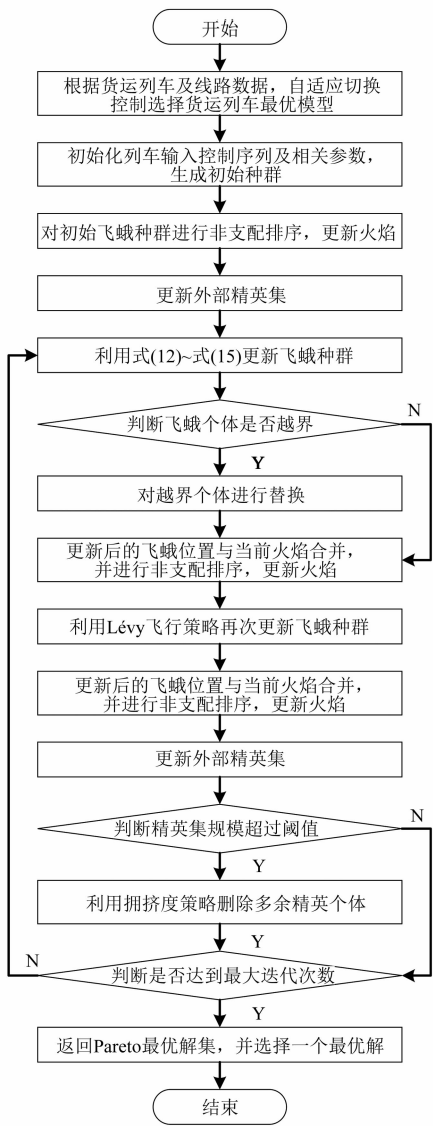


图4 货运列车牵引电机节能控制算法的计算流程图

数据如图5所示,货运列车基本属性如表1所示。

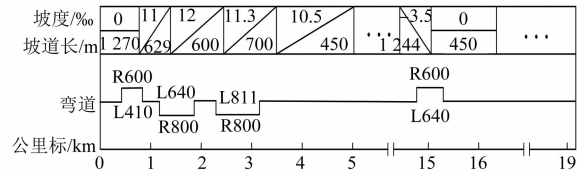


图5 “A站—B站”部分线路数据

MOMFO的参数设置:飞蛾种群的规模 FP 为100,精英集预定规模 FE 为100,迭代次数 $k_{\max}$ 为100。货运列车仿真参数设置:最大车钩力约束 $F_M=1\,000\text{ kN}$,平稳性约束 $J_M=0.75$ 。

表1 列车基本属性

参数类别	参数特性
列车编组	1 机车+50 货车
机车、货车自重/t	184、20
机车、货车车长/m	35.222、12.2
货车载重/t	80
机车单位基本阻力/ $(\text{N}\cdot\text{kN}^{-1})$	$1.2+0.006\,5v+0.000\,279v^2$
货车单位基本阻力/ $(\text{N}\cdot\text{kN}^{-1})$	$0.92+0.004\,8v+0.000\,125v^2$
最高运行速度/ $(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	80

4.2 仿真结果及分析

货运列车采用单质点模型策略和多模型自适应切换策略的距离-速度运行曲线如图6所示。

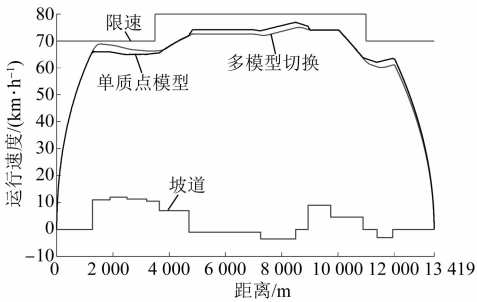


图6 两种策略下的距离-速度运行曲线

在货运列车起动加速阶段和停车制动阶段,两种策略的运行曲线基本重合。主要原因是车站附近线路条件好,通常 $|J_r|=0$,且起动、停车时列车速度较低,扰动加速度影响有限。而在中间列车速度较高的运行区段,扰动加速度的变化将会很大地影响列车运行曲线。仿真表明,采用多模型自适应切换策略可以实现货运列车速度平滑运行,更符合货运列车运行的需求。

同时,单质点模型牵引计算的电机工作能耗存在计算误差。采用多模型自适应切换策略可以减小电机牵引能耗的计算误差,如图7所示。

在上述仿真条件下,为了优化货运列车的牵引电机工作能耗和经济性,本文将 MOMFO 算法、MOPSO 算法和 NSGA-Ⅱ 算法分别用于货运列车运行过程的优化,前沿解分布情况如图8所示。由图8可以看出,利用 MOMFO 算法可以改善牵引电机工作能耗和列车运行时间,获得的 Pareto 前沿解靠近内侧,收敛性好。三种算法求解得到最省时解和最节能解,如表2和表3所示。

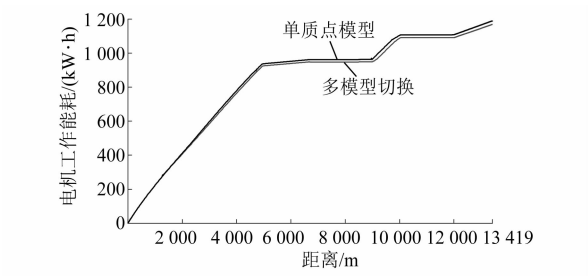


图7 两种策略下的电机工作能耗曲线

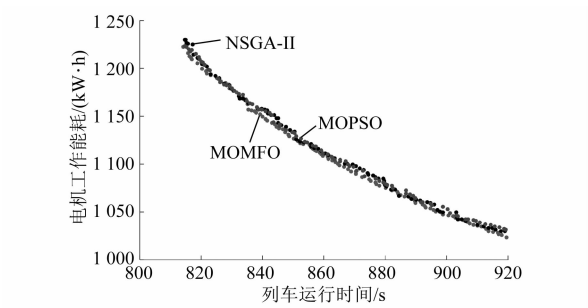


图8 三种算法的 Pareto 前沿分布比较

由表2和表3可知,列车运行时间相差不大的情况下,由 MOMFO 算法求解所得到的牵引电机工作能耗更小。此外, MOMFO 算法获得 Pareto 前沿解分布密集且均匀,呈现出良好的分布性。

表2 三种算法的最省时解

算法类型	工作能耗/(kW·h)	运行时间/s
MOMFO	1 222.37	814.3
NSGA-II	1 230.05	814.6
MOPSO	1 224.45	814.6

表3 三种算法的最节能解

算法类型	工作能耗/(kW·h)	运行时间/s
MOMFO	1 024.25	919.4
NSGA-II	1 030.28	919.0
MOPSO	1 032.44	919.3

基于上述 MOMFO 算法的优化,在牵引电机工作能耗和经济性进行协调折中处理,选择一个合适的解作为输出的优化解。本文选取电机工作能耗为 1 168.95 kW·h、列车运行时间为 833.7 s 的一个解作为优化后的解,优化前后的对比数据如表4所示。

表4 优化前后的对比数据

工况	工作能耗/(kW·h)	运行时间/s
优化前	1 560.45	815.7
优化后	1 168.95	833.7

优化前电机工作能耗为 1 560.45 kW·h、列车运行时间为 815.7 s,优化后的曲线合理利用巡航、惰行工况,在增加一定程度列车运行时间的同时,极大减小了牵引电机工作能耗,比优化前减少了 25.08% 的能耗,可以实现货运列车牵引电机的节能优化。图9~图11分别为优化前后的距离-速度曲线、控制序列、电机工作能耗曲线。

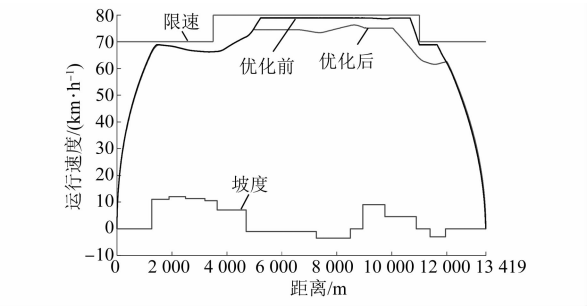


图9 优化前后的货运列车速度-距离曲线

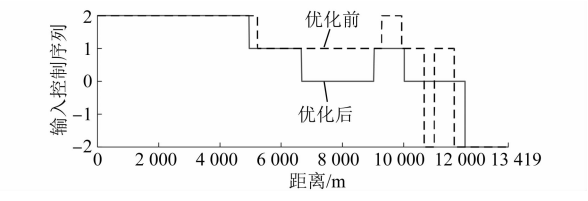


图10 优化前后的货运列车控制序列变化

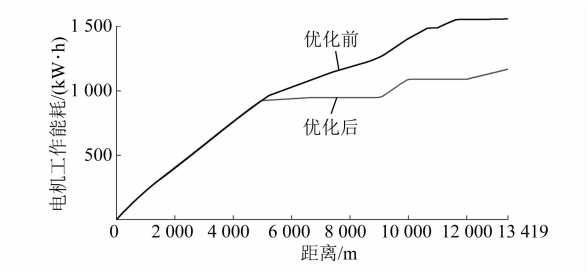


图11 优化前后的牵引电机工作能耗曲线

5 结 语

货运列车的运行过程优化对能源消耗和自动驾驶研究具有重要意义。为节约资源和提高货运

列车自动驾驶水平,本文提出了一种基于加速度自适应的货运列车质点模型平滑切换控制策略,并通过 MOMFO 算法求解模型,得到以下结论:

(1) 采用多模型切换自适应控制策略能够有效提高牵引计算精度,降低计算复杂度。

(2) 与 MOPSO、NSGA-II 算法相比,本文利用 MOMFO 算法求解的电机工作能耗和列车运行时间更小,满足节能运行的要求。

此外,本文所提方法只需更新货运列车软件系统,具有良好的应用前景。但未考虑牵引电机自身的功率损耗,后续将进行研究,再进一步提高列车的节能运行程度。

【参考文献】

- [1] TONG H, PENG J, ZHANG Y, et al. Environmental benefit analysis of “road-to-rail” policy in China based on a railway tunnel measurement[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128227.
- [2] 石红国,彭其渊,郭寒英. 城市轨道交通牵引计算算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 30.
- [3] 付雅婷,原俊荣,李中奇,等. 基于钩缓约束的重载列车驾驶过程优化[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2355.
- [4] 侯涛,郭洋洋,陈昱,等. 基于多质点模型的高速列车速度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(2): 314.
- [5] 颜保凡,郭垂江,廖勇. 列车运行时分力学模型的建立与仿真[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(11): 90.
- [6] 李学明,徐绍龙,蒋奉兵,等. 基于功率动态分配的自动驾驶机车牵引电机节能控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 104.
- [7] CAO Y, WANG Z C, LIU F, et al. Bio-inspired speed curve optimization and sliding mode tracking control for subway trains[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6331.
- [8] LIU K, WANG X C, QU Z. Research on multi-objective optimization and control algorithms for automatic train operation [J]. Energies, 2019, 12(20): 3842.
- [9] 徐凯,杨飞凤,涂永超,等. 基于多粒子群协同的城轨列车速度曲线多目标优化[J]. 铁道学报, 2021, 43(2): 95.
- [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.
- [11] 汤旻安,王茜茜,蔚璠. 黄金比例 NSGA-II 算法在动车组列车多目标优化中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2469.
- [12] MIRIJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm [J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 89: 228.
- [13] ZHANG L, ZHUAN X. Optimal operation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems using model predictive control methodology [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 22(1): 13.
- [14] ALBRECHT A, HOWLETT P, PUDNEY P, et al. The key principles of optimal train control—Part 1: formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 94: 482.
- [15] ALBRECHT A, HOWLETT P, PUDNEY P, et al. The key principles of optimal train control—Part 2: existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 94: 509.
- [16] 杨杰,贾利民,卢少锋,等. 电力牵引货运列车节能运行研究(一): 目标速度曲线优化[J]. 铁道学报, 2016, 38(4): 22.
- [17] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182.
- [18] 李笑竹,王维庆. 基于多目标飞蛾扑火算法的含风电电力系统动态环境经济调度[J]. 电气工程学报, 2020, 15(3): 1.