

一种遗传算法的城市轨道列车节能控制策略研究

高 琦 梁化典 漆 林

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的]城市轨道交通在运营过程中会产生大量能耗,其中列车运行的牵引能耗具有较大优化空间,因此亟需研究一种面向列车牵引节能的控车策略。[方法]首先,建立列车运行的动力学方程,并定义了列车运行过程的约束条件;其次,对列车牵引能耗优化策略进行分解建立目标函数,并基于遗传算法模型对列车运行能耗在不同区间分配和区间最优巡航速度进行求解;然后,通过遗传算法的交叉变异过程,得出节能效果最优的驾驶速度推荐曲线;最后,通过 Matlab 软件搭建仿真模型并采用真实的线路列车参数和运营数据,模拟列车的站间运行过程。[结果及结论]试验结果表明:基于遗传算法模型的控车策略相较于传统固定工况序列的控车策略,在牵引节能指标上有了显著提升。

关键词 城市轨道交通列车;牵引能耗;遗传算法;节能控制

中图分类号 U231.8; TP312

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.004

Research on Urban Rail Train Energy-saving Control Strategy Based on Genetic Algorithm

GAO Qi, LIANG Huadian, QI Lin

(CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Urban rail transit generates a considerable amount of energy consumption during operation, with traction energy consumption of train operation offering significant optimization potential. Therefore, there is an urgent need to study a train traction energy-saving control strategy. [Method] Firstly, a dynamic equation of train operation is established, and the constraint conditions for the train operation process are defined. Secondly, the optimization strategy for train traction energy consumption is decomposed to establish the objective function. Based on the genetic algorithm model, the allocation of train operation energy consumption in different intervals and the optimal cruising speed within intervals are solved. Then, through the cross mutation process of the genetic algorithm, the optimal energy-saving effect of the driving speed recommendation curve is obtained. Finally, a simulation model is built using Matlab software, with real-line train pa-

rameters and operational data to simulate the inter-station operation process of the train. [Result & Conclusion] Experimental results show that the control strategy based on the genetic algorithm model, compared to the conventional fixed working condition sequence control strategies, significantly improves traction energy-saving indicators.

Key words urban rail transit train; traction energy consumption; genetic algorithm; energy-saving control

近年来,随着城市化进程的快速推进,城市人口激增,城市轨道交通也进入了新的发展阶段。截至 2023 年 10 月,我国已有 55 个城市开通城市轨道交通,线路累计达 299 条,其运营里程已高达 9 862 km^[1]。城市轨道交通在方便群众出行,疏解交通压力和促进地区发展方面发挥了不可替代的作用。然而,城市轨道交通列车运营能耗一直是备受关注的问题,现有的控车策略能耗浪费较大,有进一步优化的空间。因此,亟需研究一种绿色节能环保的控车算法,以降低列车运营过程的总能耗。

对城市轨道交通列车在运行过程中的耗电量进行统计分析可知,牵引能耗占比最大,达运营总能耗的 45%~60%,其具有较大的优化空间^[2]。因此本文主要基于牵引能耗缩减的目标研究列车的运行优化策略。列车牵引节能优化问题的核心思想即在满足车辆、线路和运营约束条件下优化推荐速度曲线^[3]。国内外学者对此展开了充分研究,其中文献[4]将遗传算法应用到列车运行节能优化中,实施多目标寻优;文献[5]分连续和离散控制两种情况讨论了列车的最优控制问题,分析了列车在区间运行的最优工况并给出了各种工况转换点的解析解。本文基于遗传算法训练并优化列车运行推荐速度曲线,结合实际列车参数和线路数据,利用 Matlab 软件仿真平台模拟列车站间运行过程,并考虑实际的运营约束条件,对列车牵引节能策略进行仿真测试以验证该控车算法的有效性。

1 列车节能策略

1.1 列车能耗曲线与驾驶系统概述

针对列车实际运营场景,列车在运行过程中需要在推荐速度曲线的指导下完成运行任务,而推荐速度的获取有2种逻辑:第一种是结合站间运行时间、临时限速等因素实时计算得出,第二种是根据历史运行数据离线查表获取到最优运行曲线。由于推荐速度曲线直接决定节能效果,本文研究的列车牵引能耗优化策略在综合考虑上述2种推荐速度计算条件的基础上,引入了牵引能耗这个新的约束条件。在此基础上,求解满足牵引能耗最优的推荐速度曲线。

图1为列车在站间不同的驾驶曲线示意图。由图1可知:列车在同一站间运行存在多种推荐速度曲线,分别对应不同的运行工况组合,而速度曲线选择的随机性影响了节能效果。本文正是针对这一问题,采用遗传算法不断迭代优化工况配置,从而计算出牵引能耗最优的推荐速度曲线。

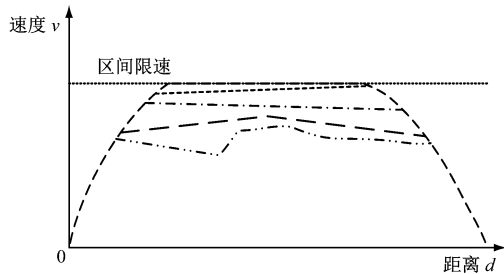


图1 列车在站间不同的驾驶曲线示意图

Fig.1 Diagram of different interval driving curves of trains

本文研究的列车节能控制策略是建立在系列约束条件、线路数据及实时获取的状态信息的基础上。列车运行过程中,车载控制器根据列车实时状态和地面控制中心传输的数据综合计算列车的最优推荐速度,并输出相应的控制力,作用于牵引制动单元,从而优化列车运行牵引能耗。

1.2 构建列车运行模型

对列车运行过程进行准确描述是节能控车策略研究的基础。通过对城市轨道交通列车进行受力分析,根据牵引计算公式建立列车动力学方程:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{F(v) - B(v) - w(v) - f(v)}{m} \\ w(v) = av^2 + bv + c \\ f(v) = f_i + f_r + f_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:

m ——列车质量;

$F(v)$ ——牵引力;

$B(v)$ ——制动力;

v ——运行速度;

t ——运行时间;

$w(v)$ ——运行基本阻力;

a, b, c ——列车的基本阻力系数;

$f(v)$ ——列车附加阻力,由坡道阻力 f_i ,曲线阻力 f_r 和隧道阻力 f_s 三者共同组成。

本文研究的列车运行牵引能耗优化问题即降低牵引力做功,可采用最小化牵引力做功的策略,因此,设定的目标函数为:

$$\min E = \int_0^s \mu_f F(v) dx \quad (2)$$

式中:

E ——牵引能耗;

μ_f ——牵引力使用系数;

S ——列车的运行距离;

x ——列车位置。

同时,需要考虑列车在运行过程中的各种约束条件,包括发车起动速度、进站停车速度、站间运行时间、线路限速和最大加速度等要求。

$$\begin{cases} t(0) = 0, t(s) = T_p \\ v(0) = 0, v(s) = 0 \\ 0 \leq v \leq V_{\text{line}}(x) \\ \left| \frac{dv}{dt} \right| \leq a_{\text{max}} \\ \mu_f \in [0, 1], \mu_b \in [0, 1] \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$V_{\text{line}}(x)$ —— x 位置的线路限速;

a_{max} ——列车运行允许的最大加速度绝对值;

μ_b ——列车制动力系数;

T_p ——列车给定运行时间。

因此式(1)~式(3)描述了列车运行节能优化的基本模型。

1.3 算法框架设计

本文采用的遗传算法在运行约束条件下计算出最优节能推荐速度曲线,其优化模型如图2所示。

根据列车节能方向研究现状可知,在给定运行区间内,当列车的运行工况为“最大加速-巡航-惰行-最大制动”时,方可生成最优速度曲线;在寻优的过程中,需要不断优化配置以上4种工况的转换点,

工况转换点的选取直接决定了列车运行的牵引能耗效果;但传统的求解节能控制序列转换点的策略过于依赖历史经验,难以获取全局最优。

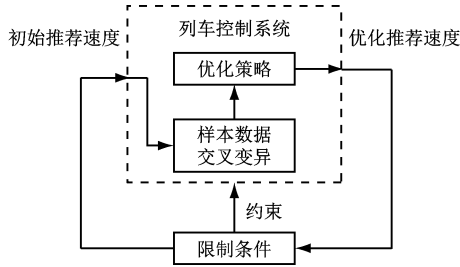


图2 遗传算法优化模型

Fig.2 Genetic algorithm optimization model

列车在站间运行的4种工况中,只有牵引和巡航工况时输出牵引力,产生能耗,而惰行和制动工况时列车没有施加牵引力,不消耗电能。因此,只需确定牵引和巡航工况的转换点即可调整列车能耗曲线,而转换点的时机取决于列车是否已经到达巡航速度;只要巡航速度和站间运行时间确定,则可算得唯一的节能推荐速度曲线。

综上,列车运行工况序列转换点的求解,可以分解为对巡航速度及不同区间能耗分配问题的求解。在此基础上,引入遗传算法建立列车节能优化模型求解最优速度曲线。主要步骤如下:

1) 获取输入数据。列车性能参数、线路数据、运营数据,以及遗传算法模型参数等数据。

2) 线路区间划分。按照线路不同位置的坡度曲率和限速的差异将线路划分为 n 个固定区间。

3) 建立初始化种群。令种群大小为 N ,初始化种群为 P 。按照每个区间的能耗和最佳巡航速度划分初始种群对,生成对应的节能状态矩阵为 $X = [E_1, u_1, E_2, u_2, \dots, E_n, u_n]$, $X_i (i = 1, \dots, n)$ 则表示每列车在运行线路上对应的区间 i 的能耗 E_n 和巡航速度 u_n 。

4) 对于给定 $X = [E_1, u_1, E_2, u_2, \dots, E_n, u_n]$,利用 E_i 和 u_i 反推区间 i 的最优速度曲线,其方法如下:

步骤1 设列车在区间运行的初速度为 v_0 ,区间出口限速为 v_r ,区间长度为 S ,将区间分成 N 等分,这样在划分后的每个 Δx 内加速度可以认为保持不变,计算列车在加速阶段的速度序列。

步骤2 令 $i = i + 1$ 并重复步骤1,当 $E = 0$ 时且 $v_i < u$ 将停止点记为 $i = k$,然后进入步骤4;反之当 $v_i = u$ 且 $E > 0$ 时,则列车转入巡航工况,计算列车在巡航工况的速度序列。

$$a = \frac{F(v_i)}{m} - w(v_i) - f(x_i) = 0$$

$$F(v_i) = m\Delta(w(v_i) + f(x_i))$$

$$v_{i+1} = u$$

$$E = E - F(v_i)\Delta x \quad (4)$$

步骤3 令 $i = i + 1$ 并重复步骤2直至 $E = 0$,将停止点记为 $i = k$,进入步骤4。

步骤4 令 $i = k + 1$, $r(v_i)$ 为基本阻力产生的加速度, $g(x_i)$ 为附加阻力产生的加速度,并计算列车惰行的速度序列。

$$a = \frac{-W(v_i, x_i)}{m} = -r(v_i) - g(x_i)$$

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i$$

$$v^2 = v^2 + 2a(\Delta x) \quad (5)$$

步骤5 重复步骤4直到列车速度序列与预先计算的速度防护曲线相交,将停止点记为 $i = j$ 。

步骤6 序列中从 $i = j$ 之后的速度,选取预先计算的速度曲线的数值作为最优速度序列。

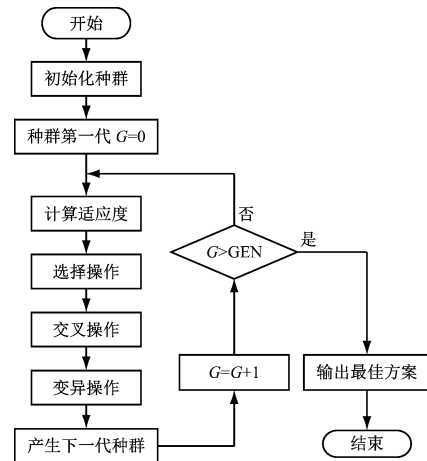
步骤7 根据上述步骤计算的最优速度序列,得出列车在线路上的站间运行时间。

$$t = \int_0^s \frac{1}{v(x)} dx = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \frac{\Delta x}{v_j} \quad (6)$$

5) 构造遗传算法目标函数,并计算个体适应度。

$$\min J = \sum_{i=1}^n E_i + \alpha \Delta |T_s - T_p| + \beta \Delta |V_r - V_{line}| + \gamma \Delta |S_s - S| \quad (7)$$

6) 执行遗传算法核心流程。按照模型最大迭代次数选择、交叉、变异,将最优个体标记为 x_{best} 。遗传算法的作用机理如图3所示。



注: G 为算法迭代次数; GEN 为迭代阈值。

图3 遗传算法的作用机理

Fig.3 Mechanism of genetic algorithm

7) 依据最优个体计算列车站间运行牵引能耗最低的速度曲线,进而指导列车运行。

2 仿真分析

2.1 模型建立

为了验证本文提出的节能控车策略效果,选取真实的线路和已投入运营的地铁运行工况数据进行模拟试验,采用文献[6]中的部分线路算例和上海轨道交通13号线的运营数据进行仿真。图4为算例线路基本情况。由图4可知:按照不同坡度划分为4个区段:AB段坡度为1‰,BC段坡度为-1‰,CD段坡度为1‰,DE段坡度为1‰。列车出发点为A点,终点为E点。

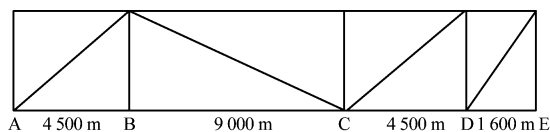


图4 算例线路基本情况

Fig. 4 Basic information of the calculation case line

仿真对象为徐州地铁3号线二期地铁改造列车,参数如表1所示。由表1可知:列车牵引质量为181.29 t,线路限速为100 km/h,进站道岔到停车点距离为1600 m,道岔限速为45 km/h,总运行时间为1200 s。

表1 仿真列车参数

Tab. 1 Train parameters in simulation

参数类别	列车质量/t	线路限速/(km/h)	最大牵引力/kN	最大常用制动力/kN	基本运行阻力/kN
参数特性	181.29	100	360	340	$w_0 = 0.11 + 0.0029v + 0.00013v^2$

2.2 系统算法实现

基于上述线路和列车数据,采用本文设计的遗传算法模型,不断求解最优的巡航速度及工况序列转换点,得出优化后的节能速度曲线如图5所示。

2.3 仿真结果

为了验证本文设计的列车控制策略节能效果,在仿真时选择了固定工况控车策略和文献[7]中具有节能导向的粒子群算法,按照相同的线路数据和运营规划进行仿真试验。表2为节能仿真结果。

由表2的仿真结果可知:在给定站间运行时间为1200 s时,不同控车策略下的牵引能耗差异显

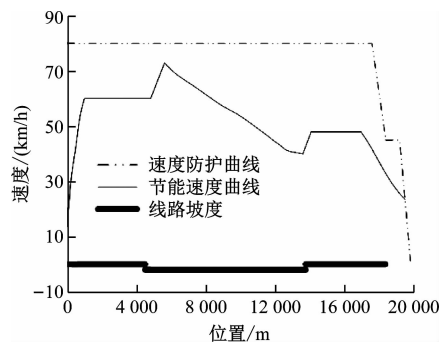


图5 优化后的节能速度曲线

Fig. 5 Energy-saving speed curve after optimization

表2 节能仿真结果

Tab. 2 Energy-saving simulation results

列车控制策略	运行时间/s	列车能耗/(kWh)
固定工况策略	1198.7	524.59
粒子群算法	1200.2	418.93
遗传优化节能算法	1199.8	405.28

著;在相同的线路数据和列车参数下,固定工况策略的列车运行能耗为524.59 kWh;粒子群算法下的列车运行能耗为418.93 kWh;而采用本文设计的基于遗传算法的节能优化策略的能耗为405.28 kWh。仿真测试结果表明,本文设计的列车控制策略在牵引能耗优化方面是合理有效的。

3 结语

本文针对列车运营过程中,驾驶速度推荐曲线选择具有随机性、随意性,从而导致牵引能耗过大的问题,研究了单列车定时节能控制策略。该策略基于遗传算法模型的交叉变异选择功能,将列车运行线路划分为多个子区间,并对子区间相应的能耗和巡航速度不断寻优,从而得出最优的能耗速度曲线,并结合真实线路和列车特征参数证明了节能控车策略的有效性,仿真数据证明该算法相较传统固定工况策略和粒子群工况策略能耗分别降低了22.7%和3.3%,实现了列车牵引能耗优化的目标。

本文的创新之处在于:

1) 给定站间运行时间,同时将线路限速、变化坡度和冲击率等多约束条件,利用遗传算法对运行能耗和巡航速度的编码来实现最优速度求解。

2) 不需要预先确定运行工况序列列表,可以实时计算优化的节能策略曲线,增加了模型优化的自由度,并使得列车整体的速度曲线显得更加平稳。

(下转第24页)

- 2011, 52(11): 3290.
- [4] LIU J, LAGHROUCHE S, AHMED F S, et al. PEM fuel cell air-feed system observer design for automotive applications: an adaptive numerical differentiation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(30): 17210.
- [5] EREN Y, ERDINC O, GORGUN H, et al. A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(20): 8681.
- [6] FERNANDEZ L M, GARCIA P, GARCIA C A, et al. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single DC/DC converter for a tramway[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(5): 2183.
- [7] POUR G B, ASHOURIFAR H, AVAL L F, et al. CNTs-supercapacitors: a review of electrode nanocomposites based on CNTs, graphene, metals, and polymers [J]. Symmetry, 2023, 15(6): 1179.
- [8] ANDARI W, GHOZZI S, ALLAGUI H, et al. Design, modeling and energy management of a PEM fuel cell/supercapacitor hybrid vehicle[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2017, 8(1): 273.
- [9] FEROLDI D, SERRA M, RIERA J. Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 387.
- [10] RODATZ P, PAGANELLI G, SCIARRETTA A, et al. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 41.
- [11] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L M, et al. Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(11): 9368.
- [12] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L M, et al. Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(12): 4791.
- [13] ZHANG W, LI J, XU L, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 59.
- [14] ZHENG J, ZHANG X, XU P, et al. Standardized equation for hydrogen gas compressibility factor for fuel consumption applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(15): 6610.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
- 第一作者:陈志,高级工程师,chenzhi_crrc@126.com
通信作者:蔡芳,正高级工程师,qifang11155@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 19 页)

参考文献

- [1] 交通运输部. 2023 年 10 月城市轨道交通运营数据[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 189.
Ministry of Transport. Operational data of urban rail transit in October 2023[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 189.
- [2] 王世峰, 康克农, 李力鹏. 列车牵引特性对牵引能耗和供电方案设计的影响分析[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊 1): 76.
WANG Shifeng, KANG Kenong, LI Lipeng. Analysis of the influence of train traction characteristics on traction energy consumption and power supply scheme design[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 76.
- [3] 段玉琼. 城市轨道交通列车节能运行研究[J]. 中国储运, 2022(9): 183.
DUAN Yuqiong. Study on energy-saving operation of urban rail transit trains[J]. China Storage & Transport, 2022(9): 183.
- [4] CHANG C S, SIM S S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(1): 65.
- [5] HOWLETT P G, MILROY I P, PUDNEY P J. Energy-efficient train control [J]. Control Engineering Practice, 1994, 2(2): 193.
- [6] 付印平. 列车追踪运行与节能优化建模及模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
FU Yinping. Research on modeling and simulations of train tracking operation and saving energy optimization[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [7] 褚心童, 张亚东, 郭进, 等. 基于蚁群算法的列车节能驾驶策略优化算法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(2): 159.
CHU Xintong, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. An optimization algorithm for train energy-saving driving strategy based on ant colony algorithm[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 159.
- 收稿日期:2023-12-01 修回日期:2024-02-02 出版日期:2024-05-10
Received:2023-12-01 Revised:2024-02-02 Published:2024-05-10
- 第一作者:高琦,正高级工程师,gq_csr@163.com
通信作者:梁化典,助理工程师,1446049372@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license