

基于蚁群算法的城市轨道交通列车节能运行优化 模型仿真分析*

李兰鹏

(上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 200070, 上海//工程师)

摘要 对城市轨道交通列车的开行模式、牵引控制特性、驾驶策略优化算法等进行了综合分析,基于蚁群算法建立了优化求解模型匹配的列车最优运行速度曲线,采用 OPEN-TRACK 软件对优化结果进行了仿真分析,验证了列车节能运行策略的可行性及算法优化的有效性。

关键词 城市轨道交通; 列车节能运行; 蚁群算法

中图分类号 TK01*8:U27

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.003

Simulation Analysis of Urban Rail Transit Train Energy-saving Operation Optimization Model Based on Ant Colony Algorithm

LI Lanpeng

Abstract Comprehensive analysis is carried out on the operation mode, traction control characteristics and driving strategy optimization algorithm of urban rail transit train. Based on ant colony algorithm, an optimization solution model is established matching the optimal train running speed curve, and OPEN-TRACK software is used to simulate and analyze the optimization results. The feasibility of train energy-saving operation strategy and effectiveness of algorithm optimization are verified.

Key words urban rail transit; train energy-saving operation; ant colony algorithm

Author's address Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

城市轨道交通系统能源供应主要依靠电能,而系统中53%的电能需供给车辆。目前,降低运行能耗的主要手段是通过降低列车牵引电源的能耗来实现系统节能^[1]。

通过设置一定的基础设施条件,并根据优化运行组织方式来实现能耗降低,已成为当前的研究主

流。文献[2]研究了在牵引和滑行状态下列车运行速度与其能耗之间的相关性。文献[3]根据仿真子区间的类型设定运行条件的顺序,利用遗传算法计算最优解序列求解能耗最优解。文献[4]利用人工蜂群算法,通过在划分的不同区段使用不同的速度策略达到城市轨道交通列车运行节能优化的目的。

在城市轨道交通列车节能运行分步与集成系统化优化方法的有效性基础上^[5],本文主要借助鲁棒性好、收敛迅速、并行计算时间短的蚁群算法来分析优化列车的运行组织模式^[6],即通过改进的蚁群算法,实现在列车牵引能耗最小等众多约束条件下的节能优化算法,并验证其有效性,从而实现列车在实际运营条件下的运行节能建模与仿真验证。

1 基于蚁群算法列车节能运行模型的建立

1.1 蚁群算法

蚁群算法是通过路径被选中次数的数量大小从而判断其中最适合方案的优化路线。该算法的基本原理来自蚂蚁出行时形成的信息路径:蚁群出行选择相同路径的次数越多,路径上留下的信息素就越多,大量的蚂蚁在同伴信息反馈之后形成的路径选择能反映方案的优化问题,形成的路径是在特定条件下的问题最优解^[7]。蚁群算法的程序如图1所示。

1.2 列车节能运行模型的建立

在列车实际运行过程中,速度是由信号系统下发的目标速度决定的,根据信号系统追踪列车所处线路的具体位置来确定列车控制方式,这就决定了线路上每一处位置因客观条件不同而有不同的目标速度。实际中有两个关键因素与列车节能运行的实现息息相关:一是线路的客观条件输入下

* 十三五国家重点研发计划子课题(2017YFC0804900)

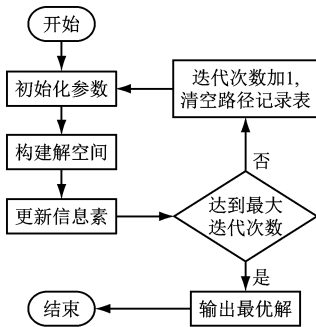


图1 蚁群算法程序示例

Fig. 1 Example of ant colony algorithm in program

系统实时的运算能力;二是运行策略下的列车控制实施。

基于以上客观问题的特点,运用积分的思想建模,假设线路由 n 个不同的离散区间组成,即:

$$x \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

在每个离散区间中根据运营需要设定目标速度 v ,每个目标速度亦是 1 个离散区间,即:

$$v \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (2)$$

使得线路中各个区间的优化目标速度下列车的牵引能耗可以表示为:

$$E = \min \sum_{i=1}^n E_{x_i, v_i} = \min \sum_{i=1}^n (E_{t_i} + E_{t_0}) \quad (3)$$

式中:

E ——列车在对应区间内的能耗总和;

E_{x_i, v_i} ——列车在 x_i 处、 v_i 条件下的牵引能耗 E_{t_i} 与初始能耗 E_{t_0} 之和。

为了满足运营时刻表的要求,列车在线路中(包括车站和区间)运行的时间是严格控制的。根据数学模型优化选择运行“路径”而求得的时间必须满足规定要求(允许在误差范围内波动)。在此模型上需要建立时间约束,并根据时间约束建立以下条件:

$$t - \Delta t \leq t_i = \sum_{i=1}^n t_{x_i, v_i} \leq t + \Delta t \quad (4)$$

式中:

t ——运营时刻表要求的列车运行时间;

t_i ——列车实际总运行时间;

t_{x_i, v_i} ——列车在 x_i 处、 v_i 条件下的客观开行时间;

Δt ——时间误差,根据列车实际出行延误控制在 5 s 内。

综合运筹学可将上述问题理解为:列车在特定区间内以 $v_A = 0$ 的速度出发,起始点为 A 站,到达 B

站时的运行时间为 t ,此时 $v_B = 0$,总路程为 s (s_i 表示区间离散之后对应的路程, Δs 表示区间线路参数差异的离散程度值)。求解在符合安全运行的条件下,在满足运营时刻表运行时间的要求下,控制列车运行从而达到能耗最小的目标,这就是节能优化的最优解问题。

列车在此模型下形成的节能最优解条件通过式(5)界定:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \min \sum_{i=1}^n E_{x_i, v_i} \\ \left\{ \begin{array}{l} n = s/\Delta s \\ 0 \leq v_i \leq v_{i, \max}, v_A = 0, v_B = 0 \\ s_s = \sum_{i=1}^n s_i = s, s_A = 0, s_B = s \\ t - \Delta t \leq t_i = \sum_{i=1}^n t_{x_i, v_i} \leq t + \Delta t, \\ t_A = 0, t_B = t \end{array} \right. \\ \text{s. t.} \end{array} \right. \quad (5)$$

“工况转换约束”

式中:

$v_{i, \max}$ ——区间限速值;

s_s ——区间距离。

模型中的“工况转换约束”可理解为:为符合乘客乘坐舒适度而实现的能耗降低的最大值。由于列车牵引和制动控制之间不能随意转变工况,列车惰行和牵引能直接转变工况,因而列车匀速运行工况和制动工况可相互转换。

1.3 优化准备阶段的设计

优化阶段的主要目的是建立列车在不同控制方式下形成的运行模式与不同目标速度之间的联系,并由此建立对应关系(关系对照表),如运行能耗、运行时间的对照表等。

式(1)对应的过程称为对线路区间的离散化处理。此过程处理的目的是使长路径的线路切分成细小单元的小区间,且这些小区间具备坡度、弧度和限速等线路条件的统一性。在优化准备阶段可对优化前必不可少的条件进行处理,主要分为低密度线路离散和高密度线路离散:低密度线路离散是指以 $\Delta s = 50$ m 的小区段均分线路,从而得到 $n = s/\Delta s$;高密度线路离散中可设置 $\Delta s = 25$ m。

根据以上离散化处理过程,采用式(2)对速度进行离散化处理。考虑到线路的实际运营情况,列车的实际运营速度一般为 40 ~ 80 km/h。在本研究

中,将目标速度的离散化条件设置为:① $n = 9$; ② $v \in \{v_1 = 40 \text{ km/h}, v_2 = 45 \text{ km/h}, v_3 = 50 \text{ km/h}, v_4 = 55 \text{ km/h}, v_5 = 60 \text{ km/h}, v_6 = 65 \text{ km/h}, v_7 = 70 \text{ km/h}, v_8 = 75 \text{ km/h}, v_9 = 80 \text{ km/h}\}$ 。经离散处理的区间和速度均在对应的范围内有相应的车辆能耗和运行时间。根据运行条件得到符合运营规定的最优解:运行时间和能耗均满足要求;能耗最低的速度离散区间,即运行速度码序列(见图2)。

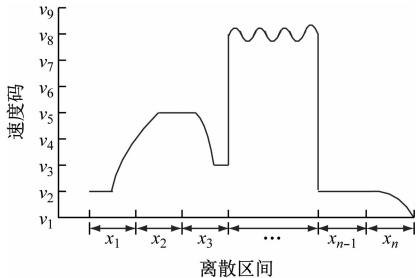


图2 列车运行速度码序列

Fig. 2 Sequence of train running speed in km/h

1.4 列车驾驶策略优化求解

本文对列车节能运行优化采用的是基于栅格模型的蚁群算法^[8],通过端点逼近的方式快捷求解。根据蚁群算法流程,模型中列车运行策略的优化流程及相关计算程序如图3所示。

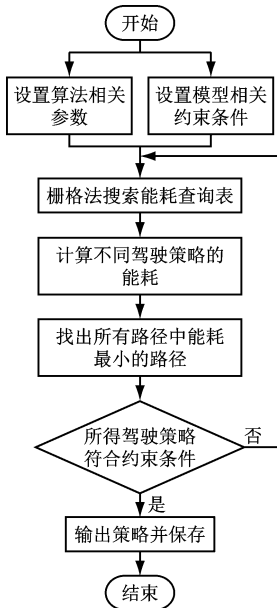


图3 列车驾驶策略的优化流程图

Fig. 3 Flow chart of train driving strategy optimization

2 列车节能运行仿真分析与验证

2.1 列车节能运行仿真分析

根据客观试验条件选择的仿真线路为上海轨

道交通16号线(以下简称“16号线”)。16号线的起讫点分别为龙阳路站和滴水湖站,总长为58.96 km,全线有13座车站,列车最高运行速度为120 km/h,采用第三轨供电方式。

本研究使用 OPENTRACK 仿真软件。该软件数据输出便捷直观,在轨道交通研究领域运用广泛。其操作过程如下:

- 1) 首先通过“线网编辑器”,模拟建立车站及线路区间的网络拓扑图,并将列车运行的线路长度及坡度、特定制式的信号机及其控制方式、曲线线路半径、轨道坡度及区间限速等应答器信息参数设置在仿真系统内。
- 2) 在网络拓扑图中根据实际的线路数据为信号机设置相关系数,如开放进路方式,从而进一步设置列车的进路、交路以及全线进路。
- 3) 输入“Train”编辑器的参数:特定型号车辆的质量、车厢长度、技术速度、运营要求的编组数,以及列车在运行区间内的牵引-速度曲线等。
- 4) 列车运行方案设计。需匹配线路中的行车进路,根据实际运营在时刻表数据库中设置站点和停靠点,以及时刻表上要求的时间信息。
- 5) 运行仿真。通过仿真计算,得到仿真参数指标和试验结果。

2.2 列车节能运行验证分析

本次仿真设计选取在16号线惠南站—惠南东站区间以80 km/h的速度运行的单列列车为研究对象。由地铁单位获得的实际线路区间的部分参数见表1。

表1 惠南站—惠南东区间线路参数
Tab. 1 Line parameters of interval between Huinan Station and East Huinan Station

起点位置/m	终点位置/m	坡度/‰	限速/(km/h)
0	172	2.0	80
172	2 002	4.0	80
2 002	3 002	3.1	80
3 002	3 528	26.0	80
3 528	3 828	27.5	80
3 828	4 198	8.0	80
4 198	5 772	0	80

根据线路数据,通过离散理论建立能耗和时间的对照表,利用基于栅格模型的蚁群算法,通过求解得到速度结果并形成对照表,发现列车在此特定区间内的速度最优解,如图4所示。

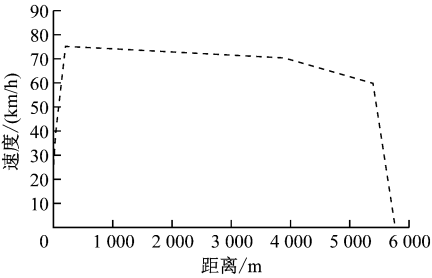


图4 基于栅格模型的蚁群算法下的列车最优速度曲线
Fig. 4 Train optimal speed curve of ant colony algorithm based on raster model

仿真优化前后的列车速度曲线如图5—图6所示。需指出,OPENTRACK 仿真软件无法实现列车的惰行控制,以及先制动后以特定速度匀速运行的仿真,造成图6中仿真曲线的细微偏差。但车辆的运行能耗主要为牵引能耗,故此处仿真偏差对结果影响有限。

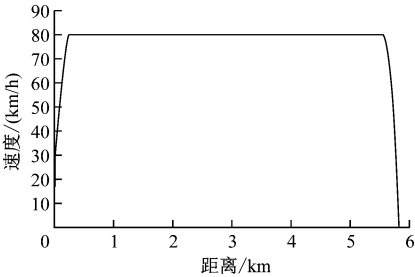


图5 仿真优化前的列车速度-距离曲线
Fig. 5 Train speed-distance curve before simulation optimization

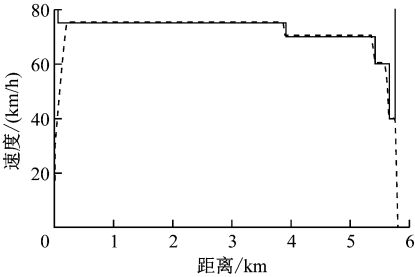


图6 仿真优化后的列车速度-距离曲线
Fig. 6 Train speed-distance curve after simulation optimization

从图5—图6能够判断,优化前后列车的速度结果差异较为明显,且具有显著性。列车在线路上采用匀速工况行驶能够大大降低其牵引能耗。相较优化前的列车速度结果,列车通过若干次的减速控制能够实现最高速度的降低,这也是能耗降低的表现。就乘客的乘坐体验而言,列车速度低(速度变化范围小更不易察觉)具有更高的舒适度。

优化前后列车牵引功率曲线如图7—图8所

示。由图7—图8可见,列车在3~4 km区段附近为匀速运行状态时,其对应的功率却有较大差别,究其原因此位置附近的线路坡度较大,使得列车功率有了较大变化,从而导致能耗增多;列车采用优化后的最优速度曲线运行策略得到的结果表明,其最大功率有了更多的降低空间,即实现了节能效果。

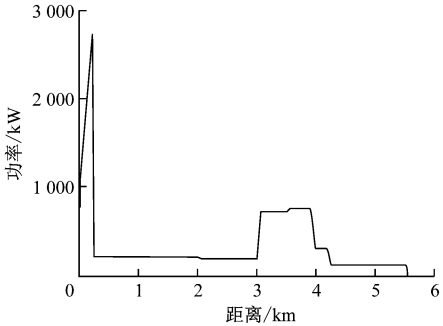


图7 仿真优化前的列车牵引功率-距离曲线
Fig. 7 Vehicle traction power-distance curve before simulation optimization

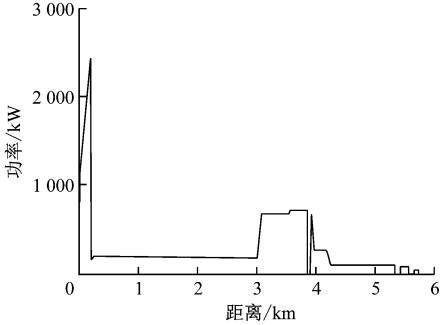


图8 仿真优化后的列车牵引功率-距离曲线
Fig. 8 Train traction power-distance curve after simulation optimization

优化前后列车运行能耗如图9—图10所示。由图9—图10可见,优化后列车的运行能耗约为89 MJ,对比优化前的运行能耗(约为98 MJ),成功实现9.2%的节能效益,优化求解应用的有效性得到了数据验证。

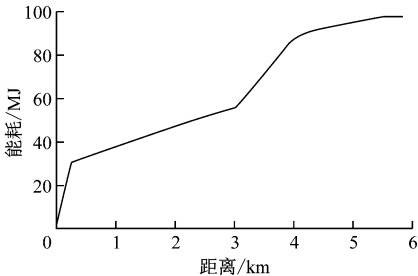


图9 仿真优化前的车辆运行能耗-距离曲线
Fig. 9 Vehicle operation energy consumption-distance curve before simulation optimization

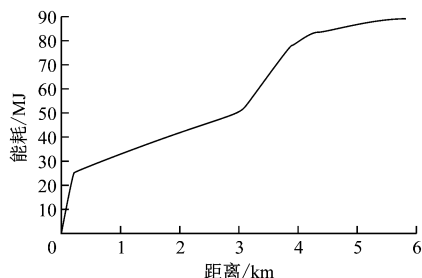


图10 仿真优化后的车辆运行能耗-距离曲线

Fig. 10 Vehicle operation energy consumption-distance curve after simulation optimization

3 结语

1) 蚁群算法的本质是离散优化算法的实现。客观上,本文主要研究列车节能运行的线性优化问题,对于过于复杂的实际问题,其方法和问题之间的适用性和准确性可能会对数据结果产生影响。

2) 本研究通过在仿真过程中对单列列车运行优化求解来判断节能状况。多列列车节能优化的实现将更复杂和更具实用性。

3) 目前城市轨道交通车辆的再生制动系统配备不一,对于具备再生能量回收功能的车辆而言其能耗问题将更加复杂。本文未考虑能量回收的影响。后期可将此作为主要方向进行深入研究。

参考文献

- [1] 龙潭. 地铁能源管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(2): 77.
LONG Tan. Research on metro energy management system[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(2): 77.
- [2] 丁勇, 毛保华, 刘海东, 等. 定时约束条件下列车节能操纵的
- (上接第10页)
- [7] 张嘉敏, 张嘉锐. 轨道交通基于大数据智能运营策略与框架综述[J]. 综合运输, 2019, 41(11): 50.
ZHANG Jiamin, ZHANG Jiarui. A review of tactics and framework for intelligent operation of railway based on big data[J]. China Transportation Review, 2019, 41(11): 50.
- [8] 樊子民. 城市轨道交通列车开行方案和列车运行图优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
FAN Zimin. Urban rail transit train operation plan and train diagram optimization [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [9] 王生华, 殷培强. 上海地铁智能运维系统建设情况[J]. 城市轨道交通, 2019(5): 17.
WANG Shenghua, YIN Peiqiang. Construction of Shanghai Metro intelligent operation and maintenance system[J]. China Metros, 2019(5): 17.

仿真算法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2241.

DING Yong, MAO Baohua, LIU Haidong, et al. An algorithm for energy-efficient train operation simulation with fixed running time [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2241.

- [3] 顾青. 城市轨道交通列车节能优化驾驶研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
GU Qing. Energy-efficient optimization driving method for trains in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 李瑶. 基于人工蜂群算法的城轨列车运行节能优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
LI Yao. Research on energy-saving operation optimization of urban rail train based on artificial bee colony algorithm [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [5] 宁晶洁. 城市轨道交通列车节能运行模型及算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
NING Jingjie. Research on model and algorithm of energy saving operation for urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [6] 汪采萍. 蚁群算法的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
WANG Caiping. Research on application of ant colony algorithm [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [7] 林凤涛, 郭厚焜. 基于蚁群算法的车间配送路径优化的仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2007(10): 13.
LIN Fengtao, GUO Houkun. Simulation and research on path optimization of workshop distribution route based on ant colony algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(10): 13.
- [8] 柳长安, 鄢小虎, 刘春阳, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划方法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1220.
LIU Chang'an, YAN Xiaohu, LIU Chunyang, et al. Dynamic path planning for mobile robot based on improved ant colony optimization algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1220.

(收稿日期: 2022-09-15)

- [10] 单宝伟. 网络化运营条件下轨道交通物资信息化管理探究[J]. 营销界, 2019(33): 146.
SHAN Baowei. Research on information management of rail transit materials under network operation condition [J]. Marketing Industry, 2019(33): 146.
- [11] 王卓然. 基于列车运行控制策略优化的城市轨道交通节能研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
WANG Zhuoran. Urban rail transit energy saving research based on train operation control strategy optimization [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.
- [12] 徐小海. 城市轨道交通综合运营能耗评估及行车组织策略优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
XU Xiaohai. Study on comprehensive energy consumption evaluation and traffic organization strategy optimization of urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

(收稿日期: 2022-09-16)