

文章编号:1671-1637(2016)02-0118-07

## 基于粒子群算法的城轨列车节能驾驶优化模型

黄友能<sup>1,2</sup>, 宫少丰<sup>2</sup>, 曹源<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 3. 伯明翰大学 电子电气与系统工程学院, 西米兰德 伯明翰 B15 2TT)

**摘要:**为了降低城市轨道交通中列车在站间运行的能耗,研究了列车的站间节能驾驶策略,在考虑线路限速和坡度的情况下,建立了时间约束下的列车节能优化模型,采用粒子群算法优化目标速度序列得出了列车节能驾驶策略。节能驾驶优化方法通过2个阶段来实现,第1阶段在站间运行时间不变的情况下,采用粒子群算法优化了列车在站间的节能驾驶策略,得到了运行时间和能耗的关系,第2阶段在多站间总运行时间不变的前提下,将运行时间进行重新分配,得到了列车在全线运行的节能驾驶策略。以北京地铁亦庄线实际线路数据和车辆参数为基础,对优化方法进行仿真验证。仿真结果表明:经过第1阶段的优化,列车在万源街-荣京东街的单站间运行能耗降低了6.15%,经过第2阶段的优化,列车在多站间总运行能耗降低了14.77%。可见,优化模型可以有效降低列车的运行能耗,为列车时刻表的编制提供依据。

**关键词:**城市轨道交通;列车节能驾驶;粒子群算法;驾驶策略;优化方法

**中图分类号:**U284.48

**文献标志码:**A

## Optimization model of energy-efficient driving for train in urban rail transit based on particle swarm algorithm

HUANG You-neng<sup>1,2</sup>, GONG Shao-feng<sup>2</sup>, CAO Yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>3</sup>

(1. National Engineering Research Center for Rail Transportation Operation Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, West Midlands, UK)

**Abstract:** In order to reduce the interstation operation energy consumption of train in urban rail transit, the interstation energy-efficient driving strategy of train was studied. On the basis of considering speed limit and gradient, a energy-efficient optimization model with the constraint of trip time was established, the optimal energy-efficient driving strategy was proposed by using particle swarm optimization (PSO) to optimize the target speed sequence. The optimization method of energy-efficient driving was realized through two phases. In the first phase, under the condition of constant interstation trip time, the interstation energy-efficient driving strategy of train was optimized with PSO, and the relationship between trip time and energy consumption was obtained. In the second phase, under the condition of the constant total trip time of whole interstations, the trip time was redistributed, and the energy-efficient driving strategy of train for the whole line was obtained. Based on the real track data and vehicle parameters of Yizhuang Line

收稿日期:2015-11-21

基金项目:北京市科技计划项目(D151100005815001);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015JBM013);中国神华能源股份有限公司科技创新项目(20140269)

作者简介:黄友能(1974-),男,湖北天门人,北京交通大学副教授,工学博士,从事列车运行控制和节能优化研究。

of Beijing Subway, the optimization method was simulated and verified. Simulation result shows that after optimization, the interstation operation energy consumption of train reduces by 6.15% in the first phase in Wanyuan Street-Rongjingdong Street, and the total operation energy consumption of whole interstations reduces by 14.77% in the second phase. So the model can effectively reduce the operation energy consumption of train, and provides a basis for the generation of train timetable. 3 tabs, 12 figs, 21 refs.

**Key words:** urban rail transit; train energy-efficient driving; particle swarm algorithm; driving strategy; optimization method

**Author resume:** HUANG You-neng(1974-), male, associate professor, PhD, +86-10-51685195, ynhuang@bjtu.edu.cn.

## 0 引言

城市轨道交通列车运行过程中能耗的主要形式为用电能耗,其中,列车牵引供电系统的能耗最大。列车自动运行子系统作为列车自动控制系统中的一个重要子系统,主要根据站间约束条件实现对列车的自动运行控制,因此,降低城市轨道交通能耗的一个重要途径便是通过列车自动运行子系统对列车进行控制,利用节能优化算法获得列车节能驾驶策略后以指导列车自动运行,从而减少列车运行过程中的能耗。

在列车驾驶策略方面,最早 Ichikawa 在 20 世纪 60 年代进行了设计与研究<sup>[1]</sup>;Khmelnitsky 建立了连续型的节能操纵模型,利用庞特里亚金极大值原理分析并证明列车的最优驾驶策略由最大牵引、巡航、惰行、最大制动 4 种工况组成<sup>[2]</sup>;Golovitcher 使用极大值原理得出最优工况序列的速度曲线与转换点方程,并对数值进行求解分析<sup>[3]</sup>;Liu 等根据不同的列车类型进行仿真<sup>[4]</sup>;Howlett 等针对多坡度线路的节能操纵问题进行研究,采用最小原则进行设计并求解,得到线路的节能运行曲线<sup>[5]</sup>;Miyatake 等针对能耗存储设备充放电控制与能耗最优化进行相关研究,分别探讨了梯度法、动态规划、二次规划这 3 种优化方法的优缺点<sup>[6]</sup>;Lu 等提出一种基于距离的列车速度曲线搜索模型,并分别用蚁群算法、遗传算法和动态规划来寻找最优速度剖面<sup>[7]</sup>;Chuang 等利用人工神经网络优化得到了列车的最优惰行点,使列车实现最小的运行能耗和运行时间<sup>[8]</sup>;付印平结合特定的工况序列,计算了列车节能控制模式转换点的位置<sup>[9]</sup>;Ke 等利用离散组合优化的思想,将列车节能优化问题进行离散化并利用蚁群优化算法进行组合优化<sup>[10-12]</sup>;于雪松对求解该问题的算法进行了改进,进一步提高了计算速度<sup>[13]</sup>。

在时刻表优化方面,吴洋等通过调整运行间隔,增加运行时间以降低列车运行能耗<sup>[14-16]</sup>;Nasri 等研究了列车预留的时间裕度来优化时刻表以降低能耗<sup>[17]</sup>;颜邦杰等通过分析列车运行能耗和再生制动能量利用等因素,制定列车运行时刻表<sup>[18]</sup>;Wong 等通过优化停站时间和惰行时间调整时刻表,达到节能的目的<sup>[19]</sup>;Li 等综合考虑了节能、减排与旅行时间等目标,提出了多目标列车调度模型,制定列车节能时刻表<sup>[20]</sup>。

综上所述,国内外学者在列车的节能操纵模型、算法研究与仿真方面进行了广泛的研究,但研究大多将列车驾驶策略和列车时刻表作为 2 个独立的过程进行研究,而实际上这 2 个过程是相互关联的,并且都会对列车能耗产生影响。基于此,本文在以往研究的基础上,将列车的节能驾驶策略和列车时刻表同时优化:首先,在考虑运行站间存在多个限速区段与坡度变化的情况下,将站间分为多个限速与坡度相同的区段,利用粒子群算法计算各区段最优的目标速度序列,得到站间的运行曲线;其次,通过计算站间最小运行时间进一步求得总的预留时间,将预留时间分配给各个站间,对整个线路的驾驶策略进行优化,生成优化的时刻表以达到节能的目的。

## 1 假设和优化模型

为减少列车在多站间运行的总能耗,建立了一个两阶段优化的节能模型,并设计了优化算法以求解站间运行曲线和列车运行时刻表。

### 1.1 假设

(1)地铁车辆有定员和超员 2 种荷载标准,车辆的空车-重车自动调整装置能根据列车荷载大小调整牵引电机电流,保证列车在不同质量时,仍然按照规定的加速度运行,从而保证列车的平稳运行与旅

客的舒适度。

(2) 列车运行线路仅存在基本阻力和坡度阻力(不考虑陡坡等特殊情况), 不考虑隧道阻力与曲线阻力。

(3) 列车启动阶段仅采用牵引模式, 进站时仅采用制动模式, 其余位置列车的运行模式仅有牵引、巡航和惰行 3 种运行模式<sup>[21]</sup>。

## 1.2 优化模型

优化模型包括 2 个阶段, 第 1 阶段为单站间节能运行策略的优化, 第 2 阶段为多站间列车时刻表的优化。

第 1 阶段的优化目标为在满足给定时间的前提下, 实现列车能耗的最小化, 目标函数为

$$W = \min \left( \alpha \varphi \left| \frac{T_{oi} - T_i}{T_i} \right| + \beta \left| \frac{E_{oi} - E_i}{E_i} \right| \right) \quad (1)$$

式中:  $W$  为目标函数值, 即适应度;  $T_i$  为优化前时刻表所规定的第  $i$  站间的列车运行时间;  $T_{oi}$  为优化后第  $i$  站间的列车运行时间;  $E_i$  为优化前的列车运行能耗;  $E_{oi}$  为优化后的列车运行能耗;  $\alpha$  为运行时间权重;  $\beta$  为运行能耗权重;  $\varphi$  为晚点惩罚因子。

运行时间权重越大, 对运行时间准点的要求越高。运行能耗权重越大, 对节能的要求越高。当  $T_{oi} > T_i$ , 即晚点时,  $\varphi$  通过取较大值  $1.0 \times 10^8$  实现晚点惩罚; 当  $T_{oi} \leq T_i$  时,  $\varphi$  取 1, 不作惩罚。式(1)中优化模型的约束条件为

$$\begin{cases} a = a_1 + a_2 - a_3 \\ T_{oi} \leq T_i \\ v_0 = 0 \\ v_e = 0 \\ 0 \leq v \leq v_{\max} \\ a \leq a_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $a$  为列车加速度;  $a_1$  为牵引力加速度;  $a_2$  为坡度阻力加速度;  $a_3$  为基本阻力加速度;  $v$  为列车速度;  $v_0$  为列车初始速度;  $v_e$  为列车末速度;  $v_{\max}$  为线路限速;  $a_{\max}$  为列车最大加速度。

坡度阻力加速度由运行路线的坡度决定, 基本阻力加速度由列车当前运行速度决定, 列车实际运行时间不能超过时刻表给定时间, 列车在运行线路中, 速度  $v$  不能超过线路的限速  $v_{\max}$ , 列车加速度不能超过最大加速度  $a_{\max}$ 。

第 2 阶段的优化目的在于通过调整各站间的运行时间使全线的运行能耗最小, 目标函数为

$$Z = \min \left( \sum_{i=1}^d E_{oi} \right) \quad (3)$$

式中:  $Z$  为目标函数值, 即列车全线运行总能耗。

式(3)中优化模型的约束条件为

$$\begin{cases} T_i = \sum_{i=1}^d T_{oi} \\ T_{\min i} \leq T_{oi} \leq T_{\max i} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T_i$  为全程多站间总运行时间;  $T_{\min i}$  为第  $i$  站间的最小运行时间;  $T_{\max i}$  为第  $i$  站间(共有  $d$  个站间)的最大运行时间。

## 2 基于粒子群算法的列车节能优化

### 2.1 站间节能驾驶策略优化

本阶段的主要任务为: 利用粒子群算法获得单站间的最优驾驶策略, 然后根据运行时间的不同, 分别获得不同时间对应的列车能耗, 再利用拟合方法获得线路上每个站间对应的能耗与运行时间曲线(能耗曲线), 为下一阶段的优化过程做准备。

首先将站间线路离散化为若干个区段, 保证同一区段内线路的坡度和限速相同, 同时, 线路离散化后每个区段对应的离散距离处的目标速度也将被离散化, 表示为

$$\begin{cases} X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, X_n\} \\ V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_{n-1}, V_n\} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $X$  为离散距离序列集合;  $V$  为离散目标速度序列集合;  $X_1 \sim X_n$  分别为第  $1 \sim n$  个离散区段距离;  $V_1 \sim V_n$  分别为第  $1 \sim n$  个离散区段对应的目标速度。

这样每个离散化后的区段会有一个相应的目标速度, 不同的目标速度序列对应着不同的列车运行策略, 相应的能耗和时间也不同。

最终的优化结果是要得到一组能耗最低且满足时刻表运行时间要求的目标速度序列  $V$ 。利用粒子群算法进行求解寻优, 设置粒子数为  $m$ , 将列车目标速度序列作为粒子的位置信息, 则解空间为  $n$  维。粒子群算法对粒子所处位置  $x$  不断进行更新, 更新速度为  $y$ , 表示为

$$y_{jk} = \omega y_{jk} + c_1 r_1 (p_{jk} - x_{jk}) + c_2 r_2 (p_{gk} - x_{jk}) \quad (6)$$

$$x_{jk} = x_{jk} + \mu y_{jk} \quad (7)$$

式中:  $y_{jk}$  为第  $j$  个粒子在第  $k$  轴的更新速度;  $x_{jk}$  为第  $j$  个粒子在第  $k$  轴的位置;  $p_{jk}$  为第  $j$  个粒子在第  $k$  轴的个体极值;  $p_{gk}$  为种群在第  $k$  轴的群体极值;  $c_1, c_2$  均为非负的加速常数;  $\omega$  为惯性因子, 为非负数;  $r_1, r_2$  均为在  $[0, 1]$  范围内变化的随机数;  $\mu$  为

约束因子,用于控制速度的权重。

将寻优得到的适应度最低的目标速度序列转化为列车运行曲线,即得到该站间的节能驾驶策略。图1为利用粒子群算法寻优站间节能驾驶策略的流程。

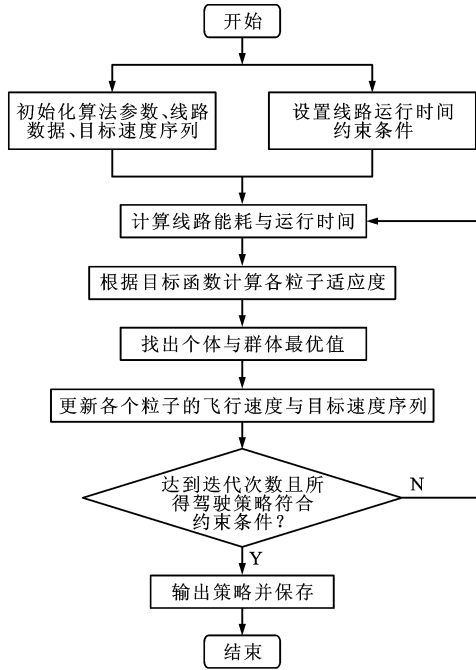


图1 站间节能驾驶策略优化流程

Fig.1 Optimization flow of interstation energy-efficient driving strategy

通过以上方法,可以得到某一时间下所对应的最优驾驶曲线与相应的能耗,但是,要得到站间的能耗曲线,需要得到不同运行时间对应的能耗,因此,在满足时刻表规定运行时间的前提下,进行多次计算,获得不同时间所对应的最优驾驶策略的能耗,而时间是连续的,在实际求取过程中,利用拟合方法获得列车运行时间对应的能耗曲线图。

## 2.2 列车运行时间优化

本阶段的优化目标是在上文所获得的列车最优驾驶策略与能耗的基础上,对全程时刻表进行优化。本阶段的主要任务为最小运行时间  $T_{\min i}$  的求解与预留时间的分配。

列车的计划运行时间往往大于列车最小运行时间,本文定义列车按照如下模式运行的运行时间为最小运行时间:从启动开始便以最大牵引力做加速运动,达到区段限速后,以恒定速度进行匀速运动,当列车接近终点,以最大减速度进行制动。

预留时间定义为列车总运行时间与最小运行时间的差值。在列车节能方面,预留时间的分配方式会影响列车在多站间的运行总能耗。根据第1阶段

利用粒子群算法优化的结果可知,在同一站间内,列车的能耗随着时间的增长而逐渐降低。

图2为预留时间分配,假设站间1、2为例,最小运行时间分别为  $T_{\min 1}$ 、 $T_{\min 2}$ ,在最小运行时间的基础上分配预留时间  $\Delta T$ ,总能耗分别减少  $\Delta E_1$ 、 $\Delta E_2$ ,对比  $\Delta E_1$ 、 $\Delta E_2$  的大小,可确定预留时间应该分配到较大值  $\Delta E_2$  所在站间,预留时间分配的原则是使全程多站间的总能耗最小。约束条件为

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{T_s}{h} \\ T_{pi} = T_{pi} + \Delta T \\ T_{pi} \leq T_{maxi} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_s$  为总的预留时间;  $h$  为预留时间的分割个数;  $T_{pi}$  是第  $i$  个站间分配预留时间后的运行时间。

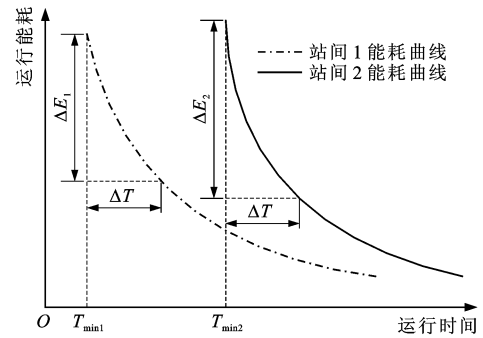


图2 预留时间分配

Fig.2 Distribution of reserving time

预留时间的优化流程见图3。 $\Delta E_1 \sim \Delta E_d$  分别为将  $\Delta T$  分配给第  $1 \sim d$  个站间后能耗的减少量。将总的预留时间分为  $h$  个  $\Delta T$ ,在最小运行时间  $T_{\min i}$  的基础上将  $\Delta T$  预分配给各个站间,利用粒子

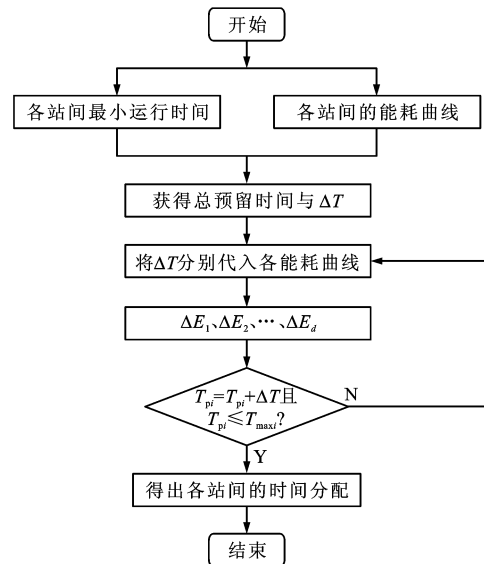


图3 预留时间分配流程

Fig.3 Distribution flow of reserving time

群算法计算得到该运行时间对应的最优驾驶策略,计算能耗的减少量  $\Delta E_i$  并进行对比,最终将  $\Delta T$  分配给  $\Delta E_i$  最大的站间。进行循环迭代直到将  $h$  个  $\Delta T$  全部分配到各站间。

通过以上方法对预留时间进行分配,即可生成新的节能运行时刻表。根据时刻表规定的运行时间,通过第 1 阶段的站间驾驶策略优化方法,可得到各站间的列车速度曲线。

### 3 列车节能优化仿真与结果

北京地铁亦庄线全长 23.3 km,共 14 个车站,列车运行下行方向起点宋家庄站,终点亦庄火车站,见图 4。图 5 为亦庄线全线的限速和坡度变化,线路限速最大为  $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最小为  $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,坡度值最大为  $2.4\%$ 。表 1 为列车的计划运行时刻表,列车全线计划运行总时间为 2 030 s,其中站停时间 415 s,站间运行时间 1 615 s。利用本文提出的列车节能优化模型,基于亦庄线实际线路数据、实际列车参数与列车运行过程中采集到的列车运行数据,进行了节能优化仿真,并给出了仿真结果。第 1 阶段的仿真数据为亦庄线万源街-荣京东街站间数据,主要针对列车的驾驶策略进行优化,同时,利用拟合方法得到亦庄线各站的能耗曲线。第 2 阶段的数据为亦庄线各站间的数据,主要是以第 1 阶段的方法为基础,结合得到的能耗曲线,优化列车时刻表。



图 4 北京地铁亦庄线  
Fig. 4 Yizhuang Line of Beijing Subway

#### 3.1 站间驾驶策略优化

万源街-荣京东街的相关数据见图 6,可见坡度与限速均随线路而变化。

图 7 为最优解的适应度变化情况,适应度函数在迭代 70 次后停止变化,可知粒子群算法得出了全局最优解,即两站之间的最优驾驶策略。图 8 为粒子群算法得出的列车最优驾驶策略。表 2 为站间运行策略优化前后的具体数据,可见采用优化驾驶策略后,相比实际列车运行策略,能耗降低了 6.15%。

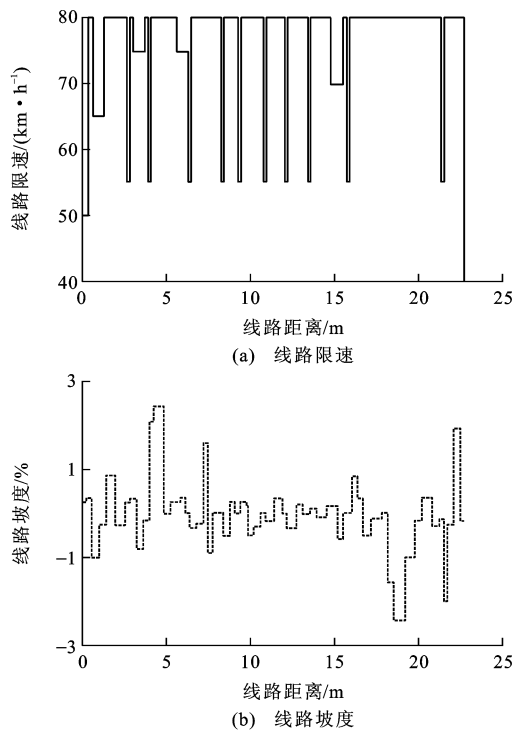


图 5 亦庄线限速和坡度曲线  
Fig. 5 Curves of speed limit and gradient of Yizhuang Line

表 1 亦庄线计划运行时间 Tab. 1 Scheduled operation times of Yizhuang Line			
站间编号	站间	运行时间/s	站停时间/s
1	宋家庄-肖村	190	30
2	肖村-小红门	108	30
3	小红门-旧宫	155	30
4	旧宫-亦庄桥	135	35
5	亦庄桥-文化园	90	30
6	文化园-万源街	114	30
7	万源街-荣京东街	103	30
8	荣京东街-荣昌东街	94	30
9	荣昌东街-同济南路	162	30
10	同济南路-经海路	148	30
11	经海路-次渠南	139	30
12	次渠南-次渠	72	35
13	次渠-亦庄火车站	105	45

表 2 站间驾驶策略优化结果 Tab. 2 Optimization results of interstation driving strategy				
站间	距离/m	优化前单位质量运行能耗/J	优化后单位质量运行能耗/J	节能率/%
万源街-荣京东街	1 300	221.678 4	208.042 4	6.15

在计划运行时间下,利用粒子群算法优化出列车在各站间的驾驶策略,并得到相应的能耗,将计划

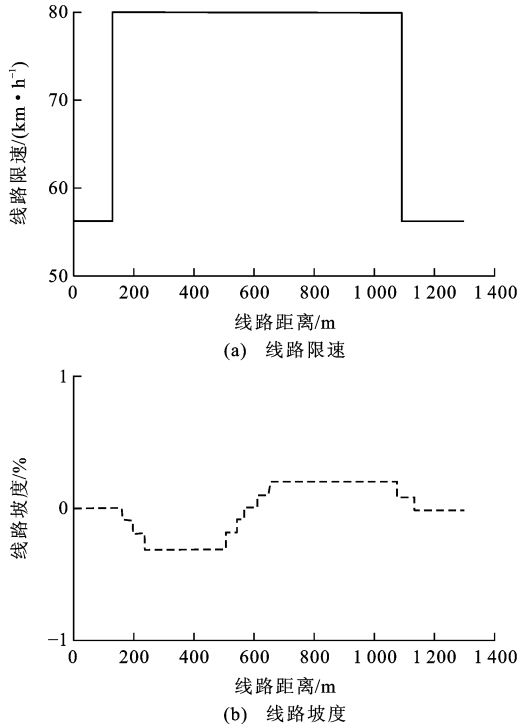


图6 万源街-荣京东街限速与坡度曲线

Fig. 6 Curves of speed limit and gradient of Wanyuan Street-Rongjingdong Street

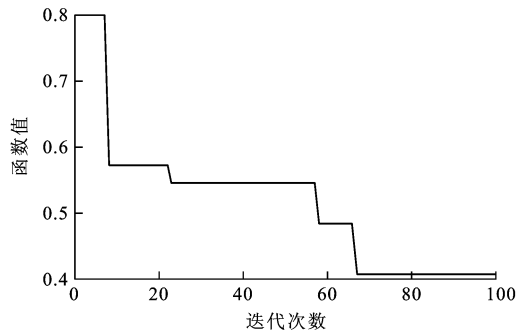


图7 适应度函数计算结果

Fig. 7 Calculation result of fitness function

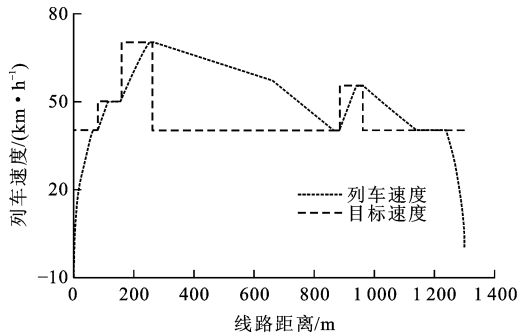


图8 列车最优驾驶策略

Fig. 8 Optimal driving strategy of train

运行能耗与优化运行能耗进行对比,结果见图9,可见通过第1阶段的优化,列车在各站间的运行能耗均有所降低。

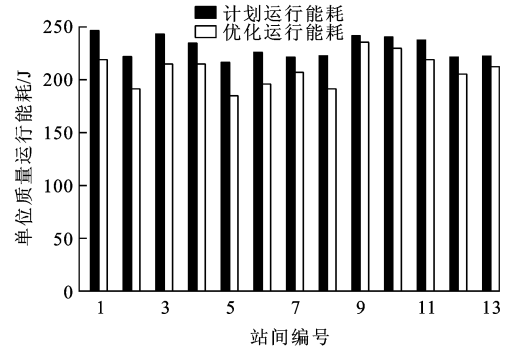


图9 计划时刻表下优化前后运行能耗对比

Fig. 9 Comparison of energy consumptions before and after optimization under scheduled timetable

本阶段还计算了各站间的能耗曲线作为第2阶段优化的基础。首先利用上述算法多次计算,取多组计划时间以计算得出多组离散的能耗-时间对应值,再利用曲线拟合的方法得到站间的能耗曲线。图10为万源街-荣京东街线路的能耗拟合曲线。通过此方法可得出亦庄线各站间的能耗曲线。

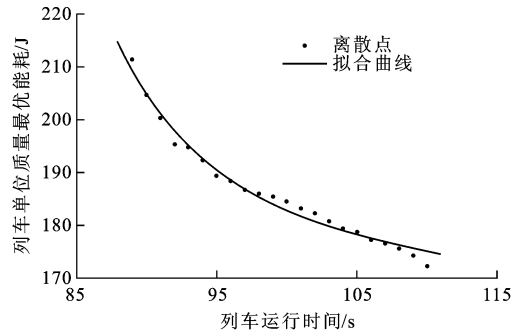


图10 万源街-荣京东街能耗拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of energy consumption of Wanyuan Street-Rongjingdong Street

### 3.2 列车时刻表优化

根据亦庄线的站间距、坡度、计划运行时间和限速等线路数据,可分别求出各站间最小运行时间,见表3。在得出列车站间的最小运行时间后,对实际列车运行时刻表进行分析,得到时刻表的预留时间。在保证列车总的运行时间不变的前提下,将预留时间重新分配给各个站间。

对第1阶段中得出的亦庄线13个站间的能耗曲线进行对比,对列车在整个线路上的运行时间进行优化,最终得出预留时间的分配结果。图11为优化前后列车在各站间运行时间的对比,在保证宋家庄至亦庄火车站总运行时间不变的前提下,缩短5个站间的运行时间,增加了7个站间的运行时间。图12为优化前后列车在各站间运行能耗的对比,相比按照计划分配站间时间的运行能耗,按照重新分

配的时间优化得到的能耗减少 14.77%。

表 3 站间最小运行时间

Tab. 3 Minimum operation times of interstations

站间编号	站间	最小运行时间/s
1	宋家庄-肖村	165
2	肖村-小红门	92
3	小红门-旧宫	143
4	旧宫-亦庄桥	123
5	亦庄桥-文化园	74
6	文化园-万源街	101
7	万源街-荣京东街	88
8	荣京东街-荣昌东街	92
9	荣昌东街-同济南路	142
10	同济南路-经海路	138
11	经海路-次渠南	131
12	次渠南-次渠	89
13	次渠-亦庄火车站	93

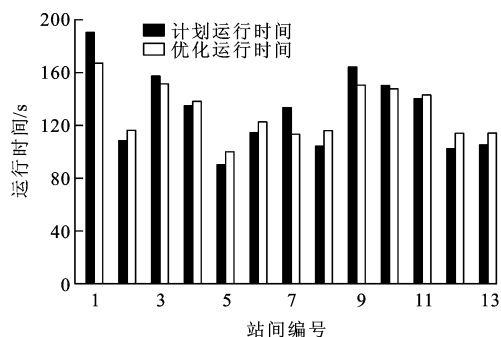


图 11 优化前后站间运行时间对比

Fig. 11 Comparison of interstation operation times before and after optimization

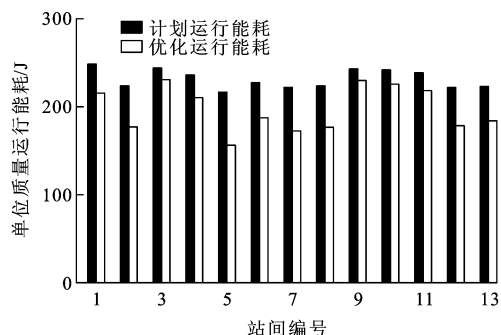


图 12 优化前后站间运行能耗对比

Fig. 12 Comparison of interstation energy consumptions before and after optimization

## 4 结 语

(1)本文采用粒子群算法作为核心设计方法,提出一种两阶段列车节能优化模型。首先,通过

优化算法获得列车最优驾驶策略,得到各站间的能耗曲线,再根据能耗曲线进行对比,对列车的运行时间进行优化,从而优化列车运行时刻表达到节能的目的,并对列车时刻表的编制具有很好的指导作用。

(2)本文仅考虑了单车的节能驾驶,并未考虑同一线路上同时运行的多辆列车之间的相互影响,多车追踪的节能优化驾驶是下一步的研究方向。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] ICHIKAWA K. Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of train[J]. Bulletin of JSME, 1968, 11(47): 857-865.
- [2] KHMELNITSKY E. On an optimal control problem of train operation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(7): 1257-1266.
- [3] GOLOVITCHER I M. Energy efficient control of rail vehicles[C]//IEEE. 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: IEEE, 2001: 658-663.
- [4] LIU Rong-fang, GOLOVITCHER I M. Energy-efficient operation of rail vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(10): 917-932.
- [5] HOWLETT P G, PUDNEY P J, VU X. Local energy minimization in optimal train control[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2692-2698.
- [6] MIYATAKE M, KO H. Optimization of train speed profile for minimum energy consumption[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5(3): 263-269.
- [7] LU Shao-feng, HILLMANSEN S, HO T K, et al. Single-train trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 743-750.
- [8] CHUANG H J, CHEN C S, LIN C H, et al. Design of optimal coasting speed for saving social cost in mass rapid transit systems [C]//IEEE. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. New York: IEEE, 2008: 2833-2839.
- [9] 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 Yin-ping. Research on modeling and simulations of train tracking operation and saving energy optimization [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [10] KE B R, CHEN M C, LIN C L. Block-layout design using MAX-MIN ant system for saving energy on mass rapid transit systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(2): 226-235.
- [11] KE B R, LIN C L, LAI C W. Optimization of train-speed trajectory and control for mass rapid transit systems[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(7): 675-687.
- [12] KE B R, LIN C L, YANG C C. Optimisation of train energy-

(下转第 142 页)

- SUN Yang. Methodology of bus network optimization and adjustment under the operation of urban new rail transit line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [19] WARDROP J G. Some theoretical aspects of road traffic research [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1952, 1(3): 325-362.
- [20] FAN Wei, MACHEMEHL R B. Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(1): 40-51.
- [21] 四兵锋, 孙壮志, 赵小梅. 基于随机用户平衡的混合交通网络流量分离模型[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 93-98.  
SI Bing-feng, SUN Zhuang-zhi, ZHAO Xiao-mei. Mixed traffic network flow-split model based on stochastic user equilibrium[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 93-98. (in Chinese)
- [22] YAN Ya-dan, LIU Zhi-yuan, MENG Qiang, et al. Robust optimization model of bus transit network design with stochastic travel time[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(6): 625-634.
- [23] BELTRAN B, CARRESE S, CIPRIANI E, et al. Transit network design with allocation of green vehicles: a genetic algorithm approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(5): 475-483.
- [24] 李淑庆, 李哲, 朱文英. 一体化公交网络均衡配流模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 62-69.  
LI Shu-qing, LI Zhe, ZHU Wen-ying. Equilibrium assignment model of integrated transit network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 62-69. (in Chinese)
- [25] CIPRIANI E, GORI S, PETRELLI M. Transit network design: a procedure and an application to a large urban area[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 20(1): 3-14.
- [26] 郭孜政, 姜梅, 张殿业, 等. 点-域匹配的公交主干线网规划方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 77-81, 98.  
GUO Zi-zheng, JIANG Mei, ZHANG Dian-ye, et al. Planning method of bus main artery network based on point-area match[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 77-81, 98. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 124 页)
- efficient operation for mass rapid transit systems[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2012, 6(1): 58-66.
- [13] 于雪松. 城市轨道交通列车节能优化及能耗评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
YU Xue-song. Energy-efficient optimization and energy consumption evaluation of urban rail transit train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [14] 吴洋, 王月明, 曾理. 晚点情况下地铁列车间隔的实时调整方法[J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(5): 21-23.  
WU Yang, WANG Yue-ming, ZENG Li. Method of real-time adjustment of metro trains headway after a delay[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2003, 26(5): 21-23. (in Chinese)
- [15] 吴洋. 晚点情况下地铁列车实时运行调整及速度控制模式研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.  
WU Yang. Research of train operation adjustment for delay and train speed controlling model[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [16] 吴洋, 罗霞. 一种晚点地铁列车实时调整策略及其动态速控模式[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(6): 113-118.  
WU Yang, LUO Xia. Tactic for real-time operation adjustment and corresponding dynamic velocity control mode for delayed metro trains[J]. China Railway Science, 2005, 26(6): 113-118. (in Chinese)
- [17] NASRI A, MOGHADAM M F, MOKHTARI H. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems[C]//IEEE. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. New York: IEEE, 2010: 1218-1221.
- [18] 颜邦杰, 张辰秋, 林志铭, 等. 捷运列车排点与节能[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(1): 139-144.  
YAN Bang-jie, ZHANG Chen-qi, LIN Zhi-ming, et al. MRT timetable and energy conservation [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29(1): 139-144. (in Chinese)
- [19] WONG K K, HO T K. Dwell-time and run-time control for DC mass rapid transit railways [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(6): 956-966.
- [20] LI Xiang, WANG De-chun, LI Ke-ping, et al. A green train scheduling model and fuzzy multi-objective optimization algorithm[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(4): 2063-2073.
- [21] SU Shuai, LI Xiang, TANG Tao, et al. A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 883-893.