

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.05.024

城轨列车运行时分节能优化方法

刘 硕¹, 刘 旭², 谢 浩¹, 崔宝山³, 王学楷⁴, 马铁军⁵

(1. 北京地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 北京 102208; 2. 北京地铁运营有限公司客运营销部, 北京 100044; 3. 北京地铁运营有限公司通信信号分公司, 北京 100082; 4. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 5. 中国铁路北京局集团有限公司调度所, 北京 100039)

摘 要: 基于传统的城轨列车站间运行曲线优化模型, 研究列车运行图中的运行时分优化模型和方法。同时在满足运营需求的前提下, 以降低城轨列车运行能耗为目标利用遗传算法对列车全周转内各个站间的运行时分进行优化。根据北京地铁亦庄线的实际数据, 对以上方法的节能效果进行实际验证和比较。结果表明, 基于遗传算法的城轨列车运行时分优化方法相比城轨列车实际运行与仅优化站间驾驶策略方法分别可以获得 17.3%与 4.1%的节能效果。

关键词: 城市轨道交通; 列车节能运行; 运行图; 遗传算法

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2019)05-0145-06

Optimization of Train Running Time for Saving Energy in Urban Rail Transit

LIU Shuo¹, LIU Xu², XIE Hao¹, CUI Baoshan³, WANG Xuekai⁴, MA Tiejun⁵

(1. Operation Technology Research and Development Center of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 102208; 2. Passenger Marketing Department of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044; 3. Communication and Signal Branch Company of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100082; 4. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 5. China Railway Beijing Group Co., Ltd, Beijing 100039)

Abstract: This study investigates the running optimization model and method based on the traditional optimization model of the train driving strategy. To reduce energy consumption, we optimize the operating time of the trains between stations (depending on the demand) using a genetic algorithm. Finally, we verify and compare the effects of two energy-saving methods based on the actual data from the Yizhuang Line of Beijing metro. The genetic algorithm optimization-based method can reduce the energy by 17.3% compared to the energy consumption during actual operation, and by 4.1% compared to the energy consumption when only optimizing the driving strategy.

Keywords: urban rail transit; energy-efficient train operation; timetable; genetic algorithm

城市轨道交通具有快速、便捷、绿色等特点, 近年来在世界范围内发展迅速。尽管城市轨道交通是一种绿色的交通方式, 但近年来城轨系统的能量总消耗也在急剧增长。截至 2017 年底, 北京地铁已建成 22 条线路, 运营总里程达到了 608 km, 年耗电量超 20 亿 kW·h, 连续多年成为北京工业用电第一大户, 年均增长量达 20%。因此, 城市轨道交通的节能任务

迫在眉睫。而牵引供电方面的能耗在城市轨道交通总能耗中占比近 50%, 可节能空间巨大, 因此列车运行优化与控制是城轨节能研究中的重点方向。

在单列车优化运行控制方面, Asnis^[1]分析了恒定坡度下的列车节能优化问题, 利用极大值原理探求问题的最优解。基于这些研究, 南澳大学的 Howlett^[2-3]将节能驾驶问题作为有限维度约束优化模型, 利用极大值原理找出最优策略的性质, 并给出了求解列车节能速度曲线的基本方法。Khmelnitsky^[4]考虑连续变化的坡度、限速条件下, 以动能为状态变量建立节能驾驶优化模型。Liu^[5]针对一般线路条件, 考虑了限速、列车驾驶特性等因素, 应用极大值原理研究节能驾驶

收稿日期: 2018-06-15 修回日期: 2018-08-20

第一作者: 刘硕, 男, 硕士, 从事轨道交通运行与控制方面的研究, 18612240317@163.com

基金项目: 北京市自然科学基金“轨道交通联合”项目(L171007)

策略。在列车运行图优化方面, Albrecht 和 Oettich^[6]在 2002 年首次提出列车运行图节能优化方法, 并利用动态规划方法优化了列车运行图。进一步, Albrecht^[7-8]将运行图的鲁棒性考虑到节能模型中, 形成一个多目标优化的运行图优化问题——最小化乘客在换乘站的等待时间和能耗。Ghoseiri 等^[9]考虑了单线、复线线路的列车运行图优化问题, 提出一种大规模的非线性优化模型。Ding 等^[10]采用两级迭代优化模型为地铁确定节能驾驶策略并优化列车时间表。Sicre 等^[11]考虑了高速列车运行时间分配的优化问题。建立了一种仿真模型用于计算运行时间的冗余量和每次行程的能耗之间的关系, 从而得到两站之间运行时分和能耗之间的一种权衡关系。

当列车在站间的运行时分不同时, 该站间的驾驶策略也会不同, 因此造成牵引能耗不同。其次, 两个站间的线路参数不同, 因此能耗与运行时分的函数关系不同, 不同的运行时分分配方案造成列车在两个站间的总运行能耗也不同。

针对以上提到的列车节能运行方法以及现有的列车运行图编制方法, 研究了基于列车站间节能驾驶的列车节能运行图编制方法。该方法对于城市轨道交通节能研究具有重大的意义, 并符合国家节能减排与可持续发展战略。

1 列车牵引能耗计算模型

基于列车的牵引计算和列车运行图编制理论给出了列车牵引能耗的计算模型。表 1 中列出了本节用到的目标函数、决策变量及参数的含义。

以车次为单位, 若列车运行图中包含 k 个车次(每个车次的牵引能耗可能因为使用不同标尺而不同), 则运行图牵引能耗可计算为

$$E^t = \sum_{i=1}^k E_i \quad (1)$$

式中, 第 i 个车次的牵引能耗 E_i 是该车次包含的 N_i 个站间的牵引能耗与折返区域牵引能耗之和。

$$E_i = \sum_{j=1}^{N_i} e_j + e_{\text{折返}} \quad (2)$$

实际运行系统中, 列车在折返区域运行距离较短, 且运行时间基本相同, 因此, 为简化模型, 可假设列车在每次折返所需的牵引能耗相同。每个站间的运行能耗可根据列车在站间的驾驶策略计算, 具体可参见

表 1 第 1 节中目标函数、决策变量及参数的含义

Tab. 1 The definition of the objective function, decision variables, and parameters in Section 1

名称	含义
k	列车运行图中包含的车次数量
E^t	列车运行图的牵引能耗之和
E_i	第 i 个车次的牵引能耗
e_j	第 j 个站间的牵引能耗
$e_{\text{折返}}$	列车在折返区域的能耗
s_j	列车在第 j 个站间的运行距离
x	列车的位置
F	列车施加的牵引力
$v(x)$	列车在位置 x 处的运行速度
B	列车施加的制动力
w	列车的运行基本阻力
g	坡道阻力
t	列车的运行时分
$V(x)$	列车在位置 x 处的限速
$F_{\max}$	列车可输出的最大牵引力
$B_{\max}$	列车可输出的最大制动力
t_i^*	列车在第 i 个站的停站时分
T	列车的实际全周转运行时分
$t_{\text{折返}}$	一个周期内折返总时分
t_i	第 i 个站间的运行时分
$T_{\min}$	满足列车运行计划的单周期最低总运行时分
$T_{\max}$	满足列车运行计划的单周期最高总运行时分
$t_{\min}$	满足列车运行计划的最低站间运行时分
$t_{\max}$	满足列车运行计划的最高站间运行时分

文献[12]。列车牵引能耗为列车施加的牵引力对位移的积分, 即

$$e_j = \int_0^{s_j} F(x) dx \quad (3)$$

另外, 列车的运行遵循牛顿第二定律, 其动力学方程表示为

$$m\rho \frac{dv(x)}{dt} = F(x) - B(x) - w(v) - g(x) \quad (4)$$

列车运行需要满足时间约束、最大牵引力和最大制动力的约束以及限速约束, 即

$$\begin{cases} \int_0^{s_j} \frac{1}{v(x)} dx = t_i \\ 0 \leq F \leq F_{\max}, 0 \leq B \leq B_{\max} \\ v \leq V(x) \end{cases} \quad (5)$$

列车的实际全周转运行时分满足关系

$$T = \sum_{j=1}^{N_j} (t_i + t_i^*) + t_{\text{折返}} \quad (6)$$

列车单周期实际总运行时分还应满足约束

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (7)$$

列车站间运行时间 t_i 应满足约束

$$t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max} \quad (8)$$

由于在实际运营中,列车停站时分主要由车站情况及乘客上下车时间决定,难以通过条件约束,因此根据实际运行图的停站时分设置了模型中的停站时分,即将停站时分看作固定值,只对运行时分进行优化。

2 列车运行时分优化

本节主要介绍基于遗传算法的列车运行图优化步骤,表2列出了本节用到的目标函数、决策变量及参数的含义。

表2 第2节中目标函数、决策变量及参数的含义

Tab. 2 The definition of the objective function, decision variables, and parameters in Section 2

名称	含义
U_1	最短站间运行时分
U_2	最长站间运行时分
k	染色体个体长度
b_i	每个个体的第 i 位二进制数
pop-size	染色体数量
E^t	列车运行总能耗
T_1	实际站间运行时间
$T_{\text{总}}$	列车总运行时间
T_0	列车折返及停站时间
T_1^*	标准列车站间运行时间
$\text{Eval}(X_i)$	第 i 个染色体的适应度函数
σ	T_1 与 T_1^* 存在偏差时的惩罚因子
α	列车运行能耗的比例因子
P_i	染色体 i 对应的选择概率
r	每个染色体的累积概率
p_c	发生交叉的概率
p_m	发生变异的概率

遗传算法共有3种遗传算子:选择算子、交叉算子、变异算子^[13],共有选择、交叉、变异3种基本操作。基本操作流程分节叙述如下。

2.1 编码与解码

遗传算法的第一个问题是如何在解空间和染色体

空间之间建立一个映射,这样染色体空间的交叉和变异操作就可以被简化。遗传算法在进行搜索之前需要先将解空间的解数据进行编码(如二进制编码)。

2.1.1 编码

假设需要对 N 个站间运行时间进行优化,每个车站停站时间固定,列车折返时间固定,则在建模中每两个站间的运行时分采用二进制的方式编码。根据城市轨道交通运营数据,列车在每两个站之间的运行时分通常为 90~217 s,因此采用七位二进制码来表示(若在某些站间列车实际运行时间在这个时间范围之外,可以通过增减二进制码的长度进行调整)。编码时规定 0000000 代表 90, 1111111 代表 217, 这样一个染色体串就存在 $7N$ 位二进制数。具体对应关系如图1所示。

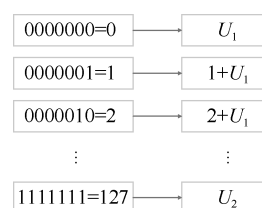


图1 染色体个体与列车运行时间对应关系

Fig. 1 The relationship between the trip time and chromosomes

图1中 U_1 代表最短站间运行时分, U_2 代表最长站间运行时分。

2.1.2 解码

遗传算法的解码公式为

$$X = U_1 + \left(\sum_{i=1}^k b_i \cdot 2^{i-1} \right) \cdot \frac{U_2 - U_1}{2^k - 1} \quad (9)$$

式中: X 代表个体的十进制表示; U_2 代表每个个体的取值上界; U_1 代表每个个体的取值下界; k 代表个体长度; b_i 代表每个个体的第 i 位二进制数。本问题中,最短站间运行时分 $U_1=90\text{s}$, 带入该设定参数可得解码公式为

$$X = 90 + \left(\sum_{i=1}^7 b_i \cdot 2^{i-1} \right) \cdot \frac{U_2 - U_1}{2^k - 1} \quad (10)$$

2.2 初始化

定义 pop-size 为染色体的数量,在遗传算法开始阶段需要在上述限制条件下随机生成 pop-size 个染色体。为了在保证结果精确性的同时尽可能降低算法时长,定义 pop-size 为 50,即初始化 50 个染色体,如图2所示,初始化的具体流程如下:

- 1) 置 $i=1$ 。
- 2) 随机生成一个可行的染色体 X_i 。
- 3) 若 $i < \text{pop-size}$, 则 $i=i+1$, 跳至步骤 2)。
- 4) 得到 pop-size 个初始化的染色体。

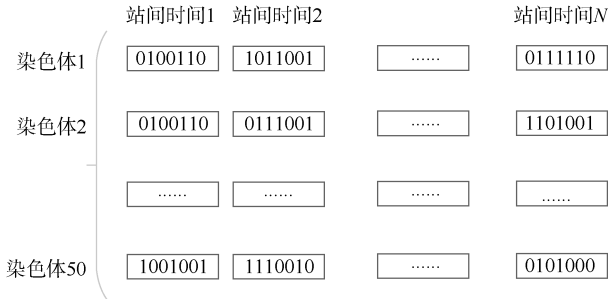


图2 染色体初始化

Fig. 2 Initialization of the chromosomes

2.3 设置适应度函数

在遗传算法问题中适应度函数会为每条染色体分配一个繁殖的概率,使每条染色体被选中的概率与它相比于其他染色体的适应度成比例。针对每一个染色体 X ,优化的目标值为列车运行时的能量损耗 E^t 。由式(1)及式(2)可得

$$E^t = \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^N e_j + e_{\text{折返}} \right) \quad (11)$$

根据各个站间运行时分及站间距离可以分析列车在各个站间的节能运行工况,判断工况转换序列,并采用 Pareto 寻优方法计算工况间的转换点,从而得到染色体变化后各个站间的列车最优驾驶曲线^[12],根据式(3)~(5)得到各站间相应的驾驶能耗 e_j 。

使用遗传函数求解时还需要考虑实际站间运行时间 T_1 的大小,在遗传算法中, $T_1 = \sum_{i=1}^N T_i$ 。根据规定的列车总运行时间 $T_{\text{总}}$ 和列车折返及停站时间 T_0 可求得标准列车站间运行时间 $T_1^* = T_{\text{总}} - T_0$ 。由于当列车站间运行时间过小时,会降低列车运行图节能效果;当列车站间运行时间过大时,优化后的运行图运量将难以达到实际要求。因此实际列车站间运行时间应尽量接近标准列车运行时间,适应度函数为

$$\text{Eval}(X_i) = \alpha E^t + \sigma |T_1 - T_1^*| \quad (12)$$

式中: α 为适应度函数中列车运行能耗的比例因子; σ 为当 T_1 与 T_1^* 存在偏差时的惩罚因子。

2.4 选择过程

遗传算法中,通过旋转轮盘每次选择一条染色体,

来产生新一代。具体的选择过程总结如下:

- 1) 在列车停站时间固定及折返时间固定的情况下,分别计算每个站间的能耗以及运行时间,从而运用适应度计算各个染色体的适应度值为

$$\text{Eval}(X_i) = \alpha E^t + \sigma |T_1 - T_1^*| \quad (13)$$

- 2) 计算群体的适应度总和

$$F = \sum_{i=1}^{\text{pop-size}} \text{Eval}(X_i) \quad (14)$$

- 3) 计算每个染色体 X_i 对应的选择概率

$$P_i = \frac{\text{Eval}(X_i)}{F} \quad (15)$$

- 4) 计算每个染色体的累积概率

$$r = \sum_{i=1}^k \text{Eval}(P_i) \quad (16)$$

- 5) 在 $\{0, r_{\text{pop-size}}\}$ 之间随机生成一个实数。

- 6) 选择染色体 X_i , 使 $r_{i-1} < r < r_i$ 。

- 7) 重复第二步和第三步,并获得 pop-size 个染色体。

2.5 交叉运算

交叉运算是一种用于产生后代染色体的主要操作方法。首先,需要定义一个参数 p_c 来表示交叉的概率。然后重复以下过程:

首先在 $[0, 1]$ 间随机生成一个数字 r , 若 $r < p_c$ 则挑选出这个染色体 X_i 。注意不是所有的染色体都会被选中,但是不同染色体有相同的被选中概率。

不失一般性,假设染色体 $X_1, X_2, \dots, X_c$ 被选中并且 c 是一个偶数,则可将这些染色体两两配对为

$$(X_1, X_2), (X_3, X_4), \dots, (X_{c-1}, X_c)$$

每一对染色体的交叉运算选用单点交叉算子方法,其中两个父辈染色体 X_1 和 X_2 左侧部分不变,右侧部分相互交换可以得到两个新的子辈染色体 Y_1 和 Y_2 。例如父辈染色体的一段为 $X_1=0011011\dots$, $X_2=0100101\dots$ 。如果随机生成的分割点为 2,即分割点位于染色体第 2 位右端,则新的子辈为 $Y_1=0000101\dots$, $Y_2=0111011\dots$,如图 3 所示。由于研究背景为列车运行时分节能优化,因此在交叉过程中两个父辈染色体选取的节点应当选在相同的位置,这样可使列车每个站间的运行时分相互对应。

交叉运算的步骤总结如下:

- 1) 定义并初始化交叉概率 p_c 和存储即将进行交叉运算染色体的数组 C 。

- 2) 置 $i=1, k=0$ 。
- 3) 在 $[0, 1]$ 之间随机生成一个数字 r 。
- 4) 如果 $r < p_c$, 将染色体 X_i 作为父辈, 置 $C(k)=i, k=k+1, i=i+1$ 。
- 5) 如果 $i \leq \text{pop-size}$, 则转到步骤 3)。
- 6) 使用 $X_{C(1)}, X_{C(2)}, \dots, X_{C(k)}$ 表示选中的父辈, 置 $j=1$ 。
- 7) 从父辈 $X_{C(j)}, X_{C(j+1)}$ 中产生两个后代 $Y_{C(j)}, Y_{C(j+1)}$ 。
- 8) 从父辈与子辈中选取两个最优染色体来代替两个父辈, 置 $j=j+2$ 。
- 9) 如果 $j < k$, 则转到步骤 7)。

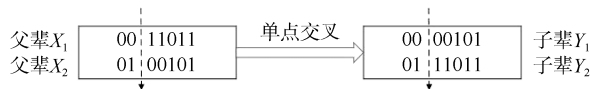


图3 染色体单点交叉示意图

Fig. 3 Crossover of the chromosomes

2.6 变异操作

突变是使染色体产生变化的另一项重要操作, 为了避免优化问题陷入局部最优解, 引入了基因码变异机制。定义一个参数 p_m 来表示变异产生的概率, 并通过类似于交叉运算父辈染色体的方式来选择一些进行变异的父辈染色体。

对于每一个需要进行变异的父辈染色体 X , 按照概率随机将其中的一位基因选定进行突变, 即 1 变为 0, 0 变为 1, 完成一次变异。例如, 若父辈染色体 X 为 0010011..., 选择第 3 位进行变异, 则变异结果 X^* 为 0000011..., 如图 4 所示。由于染色体对应了多个站间的运行时分, 而在实际问题中站间时分的优化可变范围不大, 染色体中高位基因的变化会导致列车运行时分的巨大差异, 使变异后的染色体很大概率会被淘汰。为避免此问题, 在遗传算法的变异环节中设置了二进制码的高位数据变化概率较低, 低位数据变化概率需较高, 这样可使变异后的站间时分仍然满足列车时刻表的约束, 同时降低优化时间, 所以针对变异阶段运行时分的每一位赋予不同的变异概率。具体的实现过程: 设染色体某位发生变异的概率为 q_m , 则每一个站间运行时分二进制码的最高位, 即染色体整体从左数的第 $7k+1$ 位 ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) 不会发生变异, $q_m=0$ 。每一个站间运行时分二进制码的第 2 位和第 3 位变异的概率, 即染色体整体从左数的第 $7k+2$ 和 $7k+3$ 位 ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) 被选中发生变异的概率较低, $q_m=1/(18N)$ 。剩下的站间运行时分后 4 位发

生变异的概率最高, $q_m=2/(9N)$ 。

突变操作的一般过程总结如下:

- 1) 初始化一个突变概率 p_m , 置 $i=1$ 。
- 2) 生成一个在 $[0, 1]$ 间的随机数 r 。
- 3) 如果 $r \leq p_m$, 则按照 q_m 大小进行加权对这条染色体其中的一位进行变异。
- 4) $i=i+1$ 。
- 5) 如果 $i \leq \text{pop-size}$, 转到步骤 2)。

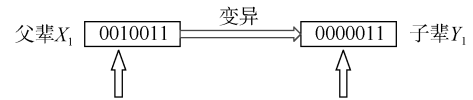


图4 染色体变异操作

Fig. 4 Mutation of the chromosomes

2.7 整体步骤

在编码解码、选择、交叉和变异操作之后, 会产生一个新的染色体种群。遗传算法在给定的上述步骤的多次迭代后, 算法将终止。返回节能效果最优的站间运行时分, 并解码成为问题的最终解决方案。

3 案例分析

3.1 北京亦庄线概况

为了评估所提出的模型和算法的性能, 以北京亦庄线的基础数据为例进行了实例分析。

在亦庄线当前的运行时刻表中, 各站间运行时间在不同时段是相同的。亦庄线周期运行时刻表的列车全周转运行时间中, 26 个站间的运行时间总计 3 312 s, 停站时间总计 768 s, 终点站折返时间总计 540 s。根据亦庄线的坡度、限速、站间距离等基本信息对所提出的模型及算法的性能进行了实例分析。

3.2 仿真结果分析

MATLAB 中内嵌有遗传算法工具箱 GUI 界面, 这种交互式操作界面很大程度上简化了遗传算法的使用流程。在使用 MATLAB 遗传算法工具箱时, 首先通过 .m 文件自定义适应度函数以及各约束函数。接下来打开遗传算法的 GUI 界面, 对遗传算法的参数及环境进行设定。

使用遗传算法利用该 GUI 界面可求得列车各站间运行时分并计算出每两个站间的能量损耗, 详细结果见表 3。

实验结果表明, 在保持列车在各站间运行时分相同的情况下, 仅进行站间驾驶策略优化时节能效果

表3 不同优化方法的节能效果比较

Tab. 3 Energy-efficient performance of different methods

站间	T_P/s	E_P/kWh	T_{SE}/s	E_{SE}/kWh	T_{GA}/s	E_{GA}/kWh
宋家庄—肖村	102	16.6	102	9.9	113	5.9
肖村—小红门	99	24.2	99	18.7	119	7.4
小红门—旧宫	137	28.4	137	41.0	142	38.4
旧宫—亦庄桥	146	22.7	146	22.6	144	23.8
亦庄桥—文化园	158	12.4	158	10.5	151	12.0
文化园—万源	102	13.6	102	10.6	108	8.7
万源—荣京	99	10.0	99	7.8	100	7.2
荣京—荣昌	112	15.3	112	14.3	116	12.9
荣昌—同济南	84	17.5	84	10.8	93	7.9
同济南—经海	132	21.1	132	22.0	123	24.9
经海—次渠南	153	21.8	153	15.5	130	21.5
次渠南—次渠	102	11.7	102	10.1	95	12.2
次渠—亦庄	194	29.6	194	17.7	186	20.0
总计	1620	244.9	1620	211.5	1620	202.8

注: T_P 表示亦庄线上各站间的实际运行时分, E_P 表示各站间给定出行时间的实际能量消耗; T_{SE} 和 E_{SE} 表示分开计算的站间运行时分和能耗; T_{GA} 和 E_{GA} 分别表示由遗传算法计算得到的运行时分和能耗。

一般, 相比实际能量消耗降低了 $(244.9-211.5)/244.9=13.6\%$; 遗传算法的仿真结果相比实际运行能耗降低了 $(244.9-202.8)/244.9=17.2\%$, 相比仅优化站间驾驶策略时能耗降低了 $(211.5-202.8)/211.5=4.1\%$ 。因此优化结果具有良好的节能效果。这是由于在列车运行图优化时调整了列车在每个站间的运行时间, 从而在整体上降低了列车的实际总能耗。

4 结语

综上所述, 城市轨道交通系统是我国近年来交通领域发展的重点之一, 其节能减排的工作对城轨的可持续发展具有重要的意义。结合列车站间节能运行的方法和运行图编制方法, 提出了列车运行时的节能优化方法, 是在传统的单列车单站间优化列车运行策略基础上进一步研究单列车多站间的节能运行问题。论文成果对于城轨列车节能运行、提高列车运行能效、减少系统运营成本具有一定的理论和实践意义。

参考文献

- [1] ASNIS I, DMITRUK A, OSMOLOVSKII N. Control of the motion of a train by the maximum principle[J]. Energetically optimal USSR computational mathematics and mathematical physics, 1985, 25(6): 37-44.
- [2] HOWLETT P G. An optimal strategy for the control of a train[J]. Australian math. soc. ser. B. 1990, 31(4): 454-471.
- [3] HOWLETT P G, MILROY I P, PUDNEY P J. Energy-efficient train control[J]. Control engineering practice, 1994, 2(2): 193-200.
- [4] KHMELNITSKY E. On an optimal control problem of train operation[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2000, 45(7): 1257-1266.
- [5] LIU R F, GOLOVITCHER I M. Energy-efficient operation of rail vehicles[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2003, 37(10): 917-932.
- [6] ALBRECHT T, OETTICH S. A new integrated approach to dynamic schedule synchronization and energy-saving train control[J]. Computers in railways VIII. southampton, UK: WIT Press, 2002: 847-856.
- [7] ALBRECHT T. A contribution to the utilization of Genetic Algorithms for optimal control and planning of a flexible urban rail transport (in German: Ein Beitrag zur Nutzbar-machung genetischer Algorithmen für die optimale Steuerung und Planung eines flexiblen Stadtschnellbahn-betriebes)[D]. Germany: Dresden University of Techno-logy, 2005.
- [8] ALBRECHT T. Energy-efficient train control in suburban railways: experiences gained from onboard tests of a driver assistance system[C]//In Proceedings of 1st interna-tional seminar on railway operations modelling and analysis (RailDelft2005), 2005.
- [9] GHOSEIRI K, SZIDAROVSKY F, ASGHARPOUR M. A multi-objective train scheduling model and solution[J]. Transportation research part B: methodological, 2004, 38(10): 927-952.
- [10] DING Y, LIU H, BAI Y, et al. A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation[J]. Journal of transportation systems enginee-ring and information technology, 2001, 11 (1): 96-101 .
- [11] SICRE C, CUCALA A P, FERNÁNDEZ-CARDADOR A, et al. A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and schedu-ling[J]. WIT transactions on the built environment, 2010, 114: 549-560.
- [12] 宿帅. 城轨列车运行图和速度曲线一体化节能方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
SU Shuai. An energy-efficient approach by integrating the train timetable and speed trajectory in urban rail[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [13] 李玉生, 侯忠生. 基于遗传算法的列车节能控制研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (2): 384-387.
LI Y S, HOU Z S. Study on energy saving control for train based on genetic algorithm[J]. Journal of system simulation, 2007, 19(2): 384-387.

(编辑: 郝京红)