

文章编号:1001-8360(2017)08-0010-08

# 城市轨道交通追踪列车定时节能操纵优化

陈志杰, 毛保华, 柏 赟, 陈绍宽, 史芮嘉

(北京交通大学 城市轨道交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:**研究在给定站间运行时分前提下的城市轨道交通追踪列车节能操纵优化模型,模型以两列车在两站间运行的总能耗最小为目标,通过同时优化前行列车和追踪列车的操纵策略以提高再生制动能的利用。在一定的制动停车距离、线路平纵断面和限速条件下,将站间区间划分为若干个子区间,建立两列车在各个子区间的运行工况序列选择模型,通过遗传算法优化两列车在每个子区间的牵引力使用系数、末速度和运行时间,提高列车牵引时对再生制动能的利用率。算例表明,在给定的站间区间上,本文模型在保证正点前提下比单列车定时节能算法的能耗降低 5.8%。当区间存在陡下坡时,两列车在途中运行过程中比在进出站过程中协同利用再生制动能效效果更显著。

**关键词:**追踪列车操纵; 节能; 定时; 线路条件; 再生制动

中图分类号:U231.92 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2017.08.002

## Optimization on Energy-efficient Operations for Trailing Train in Urban Rail System with Fixed Run-time

CHEN Zhijie, MAO Baohua, BAI Yun, CHEN Shaokuan, SHI Ruijia

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To minimize the total energy consumption of two urban rail transit trains that are running in the two inter-station sections at given operational time, an optimization model for the energy-efficient trailing train operations was built to increase the utilization of the regenerating energy by optimizing the operation strategies of both the front train and the trailing train. The inter-station sections were divided into several subsections according to the braking distances, the plane and vertical sections of the railway line, and the speed limits of the sections. Then a selection model of operating condition sequences of the two trains in each subsection was built. A genetic algorithm was used to optimize the traction coefficients, the terminal velocities and the running time of both trains in each subsection in order to increase the utilization of the regenerating energy. The results demonstrate that, when the trains are running in the given inter-station sections, the optimization result reduces the energy consumption by 5.8% in comparison with the energy-efficient single-train operation algorithm under the condition of punctuality. In the case of steep descents in the sections, the effect of cooperative utilization of regenerating energy when the two trains are running on the way is more significant than the regenerating energy utilization when one train is departing from and another train is arriving at stations.

**Key words:** trailing train operation; energy-efficient; fixed-time; line condition; regenerative braking

城市轨道交通列车牵引能源消耗占城轨系统总能耗的 60% 以上<sup>[1]</sup>,降低列车牵引能耗受到国内外学者

的广泛关注。目前,国内外对单列车节能操纵的研究已经较为成熟<sup>[2]</sup>,对多列车节能操纵的研究主要集中在追踪条件下的多列车节能操纵及其考虑再生制动能利用两个方面。

在提高铁路高速列车再生制动能利用方面,文献<sup>[3]</sup>研究了列车最优巡航速度与列车牵引传动系统效

收稿日期:2016-06-13; 修回日期:2016-09-07  
基金项目:国家自然科学基金(71571016,71390332,71621001-3)  
第一作者:陈志杰(1989—),男,浙江宁波人,博士研究生。  
E-mail:14114225@bjtu.edu.cn  
通信作者:毛保华(1963—),男,湖南祁阳人,教授,博士。  
E-mail:bhmao@bjtu.edu.cn

率、再生制动能利用率的定量关系。在提高城市轨道交通列车再生制动能利用率方面,一些学者将城轨列车节能操纵模型和时刻表优化模型相结合,如文献[4]通过调整列车在各车站的到发时刻,最大化多列车在出站牵引和停站制动的重叠时间;文献[5]通过将站间区间划分为若干个子区间,离线优化多列车在各车站的到发时刻以及在各子区间的速度曲线;文献[6]在此基础上细化了列车在各子区间的工况序列,并设计了列车车站出发时刻的实时优化算法。还有一些学者将城轨列车节能操纵模型和牵引供电模型相结合,如文献[7]根据供电网电压调整供电区段内多列车的运行速度,建立列车节能运行与牵引供电系统相配合的综合列车节能操纵模型;文献[8]基于给定的前行列车的运行状态,结合牵引供电模型分析了追踪列车对前行列车的再生制动能利用策略。上述研究成果都能有效利用铁路或城市轨道交通列车运行过程中产生的再生制动能。

既有研究基于给定的一列车的运行状态,在调整列车车站到发时刻的基础上优化了列车在站间的操纵策略,此外部分研究还通过同时优化多列车的操纵策略进一步降低了总能耗。但既有研究对多列车在站间的运行工况仍延用了单列车节能操纵策略,即假设列车在出站牵引阶段采用最大牵引力运行,在停站制动阶段采用最大制动力运行,在途中运行过程中采用巡航或惰行工况运行。此外部分既有研究也考虑了列车在途中运行过程中的多次牵引和制动,但仍假设列车仅采用最大牵引力和最大制动力。

本文在给定列车站间运行时的前提下,通过同时调整前行列车和追踪列车在站间运行过程中的工况序列以及牵引力和制动力的作用,以两列车的总能耗

最小为目标,研究考虑再生制动能利用的追踪列车协同节能操纵优化问题,并分析追踪列车节能操纵策略与单列车节能操纵策略的不同之处。

## 1 问题描述

城市轨道交通列车在站间运行时的工况包括牵引、惰行和制动三种,不同工况下列车加速、减速或匀速运行。其中匀速(巡航)是一种较为节能的列车运行状态,在巡航模式下列车根据运行阻力可能采用牵引工况,也可能采用惰行或者制动工况。列车在站间制动时一般采用再生制动,此时可向供电网反馈再生制动能,以用于同一供电区段内的其他列车牵引。通过调整同一供电区段内的两追踪列车在各自站间运行过程中的工况序列,使一列车在站间牵引时,另一列车正在站间以再生制动工况运行,可减少列车牵引时从供电区段的牵引变电所获取的能量,实现两列车节能运行。

由于两列车在站间运行过程中有无穷多种工况序列的组合方式,为了缩小工况序列组合方式可行解的搜索规模,本文通过将包含多个坡道和限速的站间区间划分为若干个单一坡道和限速的子区间,使列车在每个子区间内运行时,都能根据线路条件和单列车节能操纵策略唯一确定一种合适的工况序列。

### 1.1 列车站间运行工况序列的设置方法

设两列车 A 和 B 在两站间同向运行,两站间区间位于同一个供电区段。两列车在站间运行过程中,列车 A 于 P 位置开始制动停车,列车 B 于 P' 位置开始制动停车,如图 1 所示。记列车 A 从 P 运行至前方车站 2 的区间为  $l$ ,从车站 1 至 P 划分为  $m$  个子区间,记每个子区间为  $u_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 。

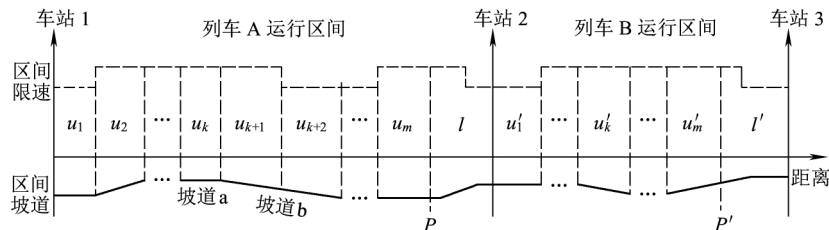


图 1 站间区间划分

子区间  $u_k$  的划分原则是保证子区间内线路的坡道和限速唯一。子区间  $u_k$  的划分方法是先按坡道划分,当同一个坡道内包含多个限速时再对该坡道按限速划分:例如坡道 a 只包含一个限速,则取整个坡道为子区间  $u_k$ ,而坡道 b 包含两个限速,则拆分成子区间  $u_{k+1}$  和  $u_{k+2}$ 。同理记列车 B 从 P' 运行至前方车站 3 的区间为  $l'$ ,从车站 2 至 P' 划分为  $m'$  个子区间,记每个子区间为  $u'_k (k = 1, 2, \dots, m')$ 。类似,若两列车在同

一站间运行,则两列车分别对这一个站间区间划分不同的  $l$  和  $l'$ ,进而确定各自的  $u_k$  和  $u'_k$ 。

根据城轨列车在单一坡道和限速区间的节能操纵策略<sup>[9]</sup>,本文设定列车在图 1 的子区间运行时的工况序列见表 1。列车在牵引加速阶段采用的牵引力等于列车在当前速度下的最大牵引力与牵引力使用系数的乘积;列车在牵引巡航阶段采用的牵引力或在制动巡航阶段采用的制动力的作用大小等于列车巡航时运行阻力

的大小;列车在制动减速阶段保持制动力和运行阻力的合力为定值,此时列车采用恒定减速度制动。

表 1 列车在各个子区间的工况序列

子区间类型	列车在子区间的工况序列
类型 1	$l, l'$ 制动减速
类型 2	$u_k, u'_k$ (上坡、平坡或下坡, 且列车巡航时运行阻力 $\geq 0$ ) 牵引加速→牵引巡航→惰行减速
类型 3	$u_k, u'_k$ (下坡, 且列车巡航时运行阻力 $< 0$ ) 牵引加速→惰行加速→制动巡航

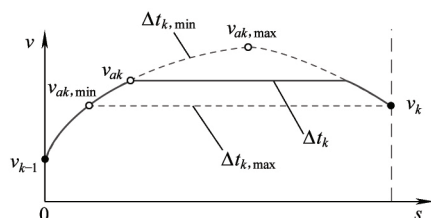
### 1.2 列车在子区间运行时间的分配方法

以列车 A 为例,当列车在每个子区间  $u_k$  的运行工况序列确定后,就可以通过调整列车在子区间的初速度  $v_{k-1}$ 、末速度  $v_k$ 、列车在牵引加速阶段采用的牵引力使用系数  $\gamma_k \in (\gamma_{k0}, 1]$  ( $\gamma_{k0}$  表示列车巡航时采用的牵引力使用系数),根据列车运动方程计算列车在每个子区间运行时间  $\Delta t_k$  的取值范围。令  $\Delta t_{k, \min}$  和  $\Delta t_{k, \max}$  分别表示当  $v_{k-1}, v_k, \gamma_k$  已知时,列车在子区间  $u_k$  可以取得的最短运行时间和最长运行时间,对应的列车在各子区间采取的工况序列见表 2。

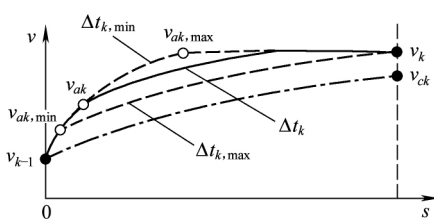
表 2 列车在子区间最短或最长运行时间下采取的工况序列

子区间类型	$\Delta t_k = \Delta t_{k, \min}$	$\Delta t_k = \Delta t_{k, \max}$
类型 2	牵引加速→惰行减速	牵引加速→牵引巡航 ( $v_{k-1} \leq v_k$ ) 牵引巡航→惰行减速 ( $v_{k-1} > v_k$ )
类型 3	牵引加速→制动巡航	牵引加速→惰行加速 ( $v_k \leq v_k$ ) 惰行加速→制动巡航 ( $v_k > v_k$ )

表 2 中的  $v_{ck}$  表示列车从子区间起点以初速度  $v_{k-1}$  惰行至子区间终点的末速度。令  $v_{ak}$  表示列车在子区间牵引加速阶段的末速度。在不同子区间运行时间下,列车在子区间的速度-距离曲线如图 2 所示。



(a) 子区间类型 2



(b) 子区间类型 3

图 2 列车在不同子区间运行时间下的速度-距离曲线

图 2 中的  $v_{ak, \min}, v_{ak, \max}$  表示当列车在子区间的运行时间分别取  $\Delta t_{k, \max}$  或  $\Delta t_{k, \min}$  时,对应的列车在牵引加速阶段的末速度。从图 2 可以看出,当  $v_{k-1}, v_k, \gamma_k$  已知时,通过搜索合适的  $v_{ak} \in [v_{ak, \min}, v_{ak, \max}]$ ,一定可以找到唯一一条运行时间为  $\Delta t_k \in [\Delta t_{k, \min}, \Delta t_{k, \max}]$  的列车速度曲线,即通过变量  $v_{k-1}, v_k, \gamma_k, \Delta t_k$  可以唯一确定列车在子区间  $u_k$  的一种操纵策略。

由于列车在站间采用定时模式运行,因此如果首先设定列车从 P 点至站 2 的制动停车时间,则可以将列车从站 1 至 P 点的剩余总运行时间按照比例  $q_k \in [0, +\infty)$  分配给每个子区间,即列车在每个子区间  $u_k$  的运行时间  $\Delta t_k$  可以用  $q_k$  表示为

$$\Delta t_k = \min\left\{ \left( q_k / \sum_{k=1}^m q_k \right) \cdot \left( T_{\text{plan}} - \sum_{k=1}^m \Delta t_{k, \min} - 2\Delta s_l / v_m \right) + \Delta t_{k, \min}, \Delta t_{k, \max} \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_{\text{plan}}$  为列车从站 1 到站 2 的计划运行时间;  $\Delta s_l$  为子区间  $l$  的距离;  $v_m$  为列车在子区间  $l$  的制动停车初速度(即子区间  $u_m$  的末速度);  $2\Delta s_l / v_m$  为列车在子区间  $l$  的制动停车时间。同理可以根据分配比例  $q'_k \in [0, +\infty)$  得到列车 B 在每个子区间  $u'_k$  的运行时间  $\Delta t'_k$ 。

相对于列车在整个站间区间仅采用“牵引→巡航→惰行→制动”的四阶段控制策略的追踪列车牵引和再生制动工况的协同算法,上述划分子区间的方法更有利于对追踪列车在站间运行途中的牵引和再生制动工况的协同,同时又保证了追踪列车工况组合方式可行解的搜索规模控制在合理的范围之内。

## 2 模型建立

### 2.1 模型假设

本文提出的追踪列车节能操纵优化模型基于如下假设:

(1) 由于列车低速时再生制动的制动能力不足,只能采用空气制动,因此本文设定列车以低于某一速度制动时不再向供电网反馈再生制动能。

(2) 由于线路条件中的曲线对城轨列车牵引能耗的影响较小<sup>[10]</sup>,本文假设列车通过曲线的全过程中曲线附加阻力都为定值,从而将曲线转化为一个固定坡度的坡道处理。

### 2.2 目标函数

当列车 A 和列车 B 在站前的制动停车距离  $\Delta s_l$  和  $\Delta s'_l$  确定后,就可将两列车所在的站间区间如图 1 所示划分出  $m$  和  $m'$  个子区间。列车在各个子区间运行过程中的牵引能耗和再生制动能可通过列车运动方程和机械能模型计算得到<sup>[6]</sup>。令  $F_a$  表示列车 A 在子区

间  $u_k (k \in [1, m])$  牵引过程中最大牵引级位 ( $\gamma_k = 1$ ) 对应的单位牵引力,  $F_b$  表示列车 B 在子区间  $u'_k (k \in [1, m'])$  制动巡航以及在区间  $l'$  制动减速过程中的单位再生制动力, 则有

$$F_a(v_t) = \begin{cases} f_a & v_t \leq V_c \\ a_0 + a_1 v_t + a_2 v_t^2 & v_t > V_c \end{cases} \quad (2)$$

$$F_b(v'_t) =$$

$$\begin{cases} -G_t - c_0 - c_1 v'_t - c_2 v'^2_t & v'_t > V_0, \text{列车制动巡航} \\ \frac{v'^2_m}{2\Delta S'_l} - G_t - c_0 - c_1 v'_t - c_2 v'^2_t & v'_t > V_0, \text{列车制动减速} \\ 0 & v'_t \leq V_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_t$  和  $v'_t$  分别为列车 A 和列车 B 在时刻  $t$  的速度。式(2)表示列车 A 运行速度低于  $V_c$  时采用恒定单位牵引力  $f_a$  加速;反之列车 A 单位牵引力可近似表示为关于速度的二次方程形式<sup>[9]</sup>, 其中  $a_0, a_1, a_2$  为参数。式(3)表示当列车 B 以大于速度  $V_0$  制动时才会采用再生制动, 其中  $G_t$  为时刻  $t$  列车 B 所在坡道的单位坡道阻力,  $c_0, c_1, c_2$  为列车单位基本阻力参数。

令  $t_k^1, t_k^2$  分别表示列车 A 在子区间  $u_k$  内牵引过程的起止时刻,  $t_{kj}^3, t_{kj}^4$  分别表示列车 B 在时段  $[t_k^1, t_k^2]$  内第  $j$  次 ( $j \in [1, J]$ ) 制动过程的起止时刻,  $\eta$  表示再生制动能利用率, 则列车 A 在子区间  $u_k$  运行过程中的单位牵引能耗  $E_k$ , 以及牵引过程中能够利用的单位再生制动能  $\hat{E}_k$  可以表示为

$$E_k = \int_{t_k^1}^{t_k^2} (\gamma_k F_a(v_t) v_t) dt \quad (4)$$

$$\hat{E}_k = \sum_{j=1}^J \left( \int_{t_{kj}^3}^{t_{kj}^4} \min(\gamma_k F_a(v_t) v_t, \eta F_b(v'_t) v'_t) dt \right) \quad (5)$$

同理可以得到列车 B 在子区间  $u'_k$  运行过程中的单位牵引能耗  $E'_k$ , 以及牵引过程中能够利用的单位再生制动能  $\hat{E}'_k$ 。因此追踪列车节能操纵优化模型的目标函数可以用两列车在站间运行全过程中的单位牵引能耗与列车牵引时可利用的单位再生制动能的差值表示。

$$\min E = \sum_{k=1}^m (E_k - \hat{E}_k) + \sum_{k=1}^{m'} (E'_k - \hat{E}'_k) \quad (6)$$

### 2.3 决策变量

模型的决策变量包括:

(1) 列车 A 在子区间  $l$  的制动停车距离  $\Delta S_l$ , 列车 B 在子区间  $l'$  的制动停车距离  $\Delta S'_l$ 。

(2) 列车 A 在子区间  $u_k$  的牵引力使用系数  $\gamma_k$ 、末速度  $v_k$ 、站间运行时间分配比例  $q_k (k \in [1, m])$ 。

(3) 列车 B 在子区间  $u'_k$  的牵引力使用系数  $\gamma'_k$ 、

末速度  $v'_k$ 、站间运行时间分配比例  $q'_k (k \in [1, m'])$ 。

### 2.4 约束条件

模型的约束条件包括:

(1) 列车 A 在子区间的初速度、末速度、巡航速度不能超过子区间限速。

$$0 \leq v_{k-1} \leq v_{hk} \quad 0 \leq v_k \leq v_{hk} \\ v_{hk} \leq v_{klim} (k \in [1, m]) \quad (7)$$

式中:  $v_{klim}$  为子区间  $u_k$  的区间限速;  $v_{hk}$  为列车 A 在子区间  $u_k$  的巡航速度(即列车 A 在子区间  $u_k$  的最大速度)。

(2) 考虑乘客的舒适性, 若子区间  $u_k$  和  $u_{k+1}$  的连接处是一个变坡点, 列车 A 在过变坡点前的单位牵引力或制动力与过变坡点后的单位牵引力或制动力的变化值  $\Delta F_k$  应满足

$$|\Delta F_k + G_{k+1} - G_k| \leq \delta \quad (k \in [1, m-1]) \quad (8)$$

式中:  $\delta$  为乘客能忍受的最大加速度变化量的阈值;  $G_k, G_{k+1}$  为子区间  $u_k, u_{k+1}$  的单位坡道阻力。同时列车 B 也需满足上述两个约束条件。

(3) 考虑行车安全, 保证追踪列车在两站内的最小追踪间隔要求, 列车 A 在时刻  $t$  的速度  $v_t$  应满足:

$$v_t \leq \sqrt{2b(\Delta S_t - L_t - L_s)} \quad (9)$$

式中:  $\Delta S_t$  为两列车在时刻  $t$  的运行距离差;  $L_t$  为列车长度;  $L_s$  为停车安全间隔长度;  $b$  为列车常用制动减速度。

## 3 算法求解

模型的目标函数和约束条件都是非线性的, 用数值算法求解较为困难, 适合采用启发式算法。由于遗传算法具有强大的全局搜索和局部搜索能力, 适合求解列车节能操纵问题<sup>[4-5]</sup>, 因此本文采用遗传算法求解。

### 3.1 编码结构

本文采用两层嵌套式遗传算法求解模型。采用嵌套形式的原因是: 列车站前制动停车距离  $\Delta S_l, \Delta S'_l$  的不同取值会影响子区间的划分, 以及子区间个数  $m, m'$  的取值, 导致每个优化方案对应的染色体长度都不尽相同。采用嵌套形式后, 外层遗传算法优化两列车在站前的制动停车距离, 进而确定子区间的划分方式, 以及  $m$  和  $m'$  的取值; 内层遗传算法优化每列车在各个子区间的速度曲线, 以提高再生制动能的利用。嵌套后, 内层遗传算法中子区间个数为定值, 染色体编码长度相等, 有利于内层遗传算法的交叉操作。

外层遗传算法采用实数编码, 对应的染色体  $L_1$  的

基因编码结构为 $[\Delta s_l, \Delta s'_l]$ ;内层遗传算法也采用实数编码,对应的染色体 $L_2$ 的基因编码结构为 $[\gamma_1, v_1, q_1, \dots, \gamma_m, v_m, q_m, \gamma'_1, v'_1, q'_1, \dots, \gamma'_m, v'_m, q'_m]$ 。

### 3.2 搜索流程

算法初始种群:以常用制动减速度 $b$ 从站前反推列车制动速度曲线至区间限速,将得到的列车A或列车B的制动停车距离乘以系数 $r$ ,作为 $\Delta s_l$ 或 $\Delta s'_l$ 的最大取值范围,并在该范围内对 $\Delta s_l$ 或 $\Delta s'_l$ 赋随机数,得到外层遗传算法初始解;对于每个外层遗传算法初始解,首先生成最短站间运行时间下的列车速度曲线,进而随机减小子区间末速度和牵引力使用系数以及随机调整运行时间分配比例得到内层遗传算法初始解。

算法迭代过程:两层遗传算法都采用标准遗传算法的搜索流程;内层遗传算法的适应度函数取模型目标函数的倒数,外层遗传算法的适应度函数取内层遗传算法的最优解;采用轮盘赌的方式选择适应度大的染色体遗传,并每次选择适应度最大的两个染色体不经过交叉变异直接遗传至下一代;对 $L_1$ 采用单点交叉和单点变异,对 $L_2$ 采用两点交叉和两点变异。

当染色体 $L_2$ 作为初始解或每次交叉变异后不满足约束条件时,需做如下调整(以列车A为例):

步骤1 根据交叉变异后列车在每个子区间的末速度 $v_k$ 和牵引力使用系数 $\gamma_k$ ,通过列车运动方程计算列车在子区间的最短运行时间 $\Delta t_{k,\min}$ 和最长运行时间 $\Delta t_{k,\max}$ ,并判断 $\Delta t_{k,\min}$ 和 $\Delta t_{k,\max}$ 是否满足列车站间计划运行时间 $T_{\text{plan}}$ 的约束。

$$\sum_{k=1}^m \Delta t_{k,\min} + 2\Delta s_l / v_m \leq T_{\text{plan}} \leq \sum_{k=1}^m \Delta t_{k,\max} + 2\Delta s_l / v_m \quad (10)$$

若站间最短运行时间大于 $T_{\text{plan}}$ ,表明列车站间运行速度过慢,应增加 $v_1, \dots, v_m$ 的值,若站间最长运行时间小于 $T_{\text{plan}}$ ,表明列车站间运行速度过快,应减少 $v_1, \dots, v_m$ 的值,调整后 $v_1, \dots, v_m$ 满足式(10)。

步骤2 若列车通过子区间 $u_{k-1}$ 和 $u_k$ 的变坡点前后的加速度变化值大于 $\delta$ ,则应减小 $\gamma_k$ 的值,并返回步骤1重新判断 $v_k, \Delta t_k$ 是否满足约束。

步骤3 若列车A在子区间 $u_k$ 的运行速度不满足式(9),表明列车A在该子区间运行速度过快,应减少 $v_k$ 的值,并返回步骤1重新判断 $v_k, \Delta t_k$ 是否满足约束。

算法终止条件:当各层遗传算法迭代至其设定的最大迭代次数,或连续 $N_s$ 次迭代最优解不变时,该层遗传算法终止。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

选取两个站间区间作为算例,其中站1至站2的距离为2600m,站间计划运行时间 $T_{\text{plan}}=190$ s;站2至站3的站间距离为1350m,站间计划运行时间 $T'_{\text{plan}}=100$ s。假设根据时刻表列车A从站1发车 $x$ 秒后,列车B开始从站2发车。两站间区间的线路坡道如图3所示。未协同优化前两列车在整个站间均采用“牵引→巡航→惰行→制动”的四阶段控制策略运行。设单列车质量280t,案例相关参数取值见表3。

表3 参数取值

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
$f_a / (\text{kN} \cdot \text{t}^{-1})$	1.0	$a_0$	1.2148	$c_1$	$4.51 \times 10^{-4}$	$b / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	1.0
$V_c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11	$a_1$	$-2.035 \times 10^{-2}$	$c_2$	$7.7 \times 10^{-6}$	$\delta / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.8
$V_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.22	$a_2$	$9.2 \times 10^{-5}$	$L_l / \text{m}$	140	$r$	1.5
$\eta$	0.8	$c_0$	$5.121 \times 10^{-2}$	$L_s / \text{m}$	40		

外层遗传算法和内层遗传算法的交叉概率都取0.9,变异概率均取0.09,种群大小分别取24、100,最大迭代次数分别取20、80, $N_s=6$ 。模型通过MATLAB计算求解,外层遗传算法平均迭代至8代后收敛,内层遗传算法平均迭代至50代后收敛。

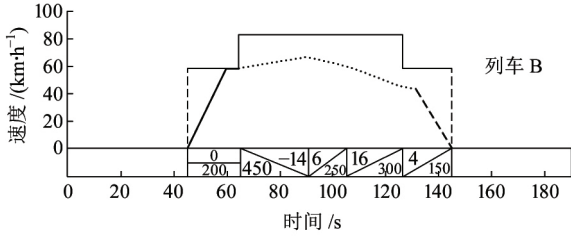
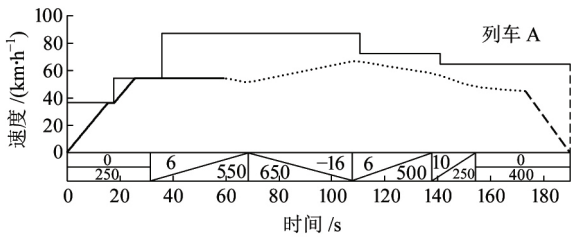
### 4.2 列车在站间运行途中的协同节能操纵

取 $x=45$ s,协同优化前后两列车在各自站间的运行速度-时间曲线如图3所示,图中阴影区域表示该时段内有再生制动能可利用,列车速度曲线中的实线、点划线、虚线分别表示当前列车采用牵引、惰行、制动工况运行。未协同前,两列车均在各自站间的节能坡

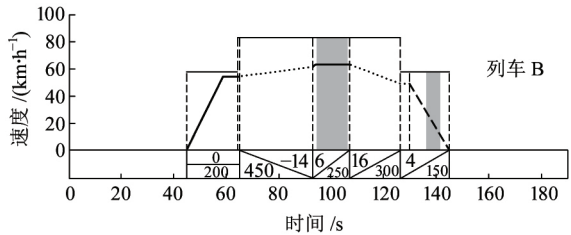
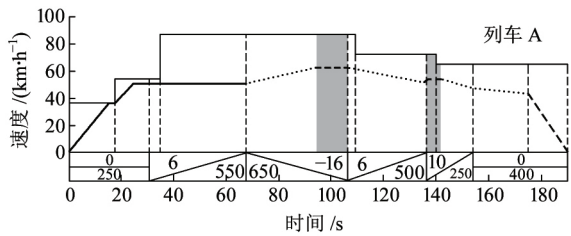
采用惰行工况进行动能闯坡,如图3(a)所示。列车A在站1至站2的区间运行牵引能耗为17.30kW·h,列车B在站2至站3的区间运行牵引能耗为13.47kW·h,由于没有再生制动能的利用,两车总能耗30.77kW·h。

协同优化后,本文提出的优化模型通过协同列车A在-16‰下坡道的制动巡航工况和列车B在6‰上坡道的牵引巡航工况,达到节能运行的目的,如图3(b)所示。在列车B停站制动的过程中,列车A还在10‰的上坡道进行了短暂的牵引提速。优化后列车A

在站 1 至站 2 的区间运行牵引能耗为 17.82 kW·h, 列车 B 在站 2 至站 3 的区间运行牵引能耗为 14.00 kW·h, 两车共吸收再生制动能耗 2.84 kW·h, 总能耗 28.98 kW·h, 相比未协同前节能 5.8%。



(a) 两列车均采用单列车节能操纵策略运行



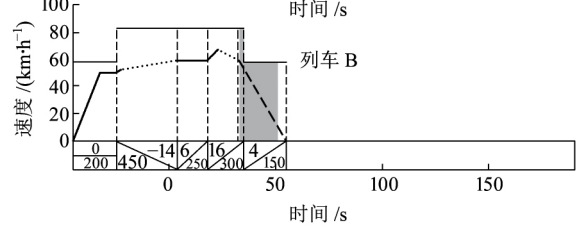
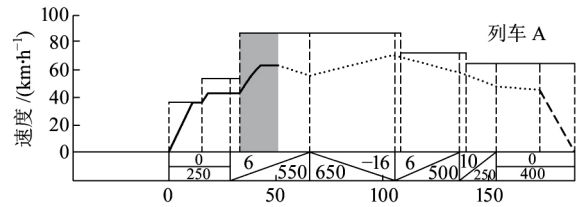
(b) 两列车采用本文提出的协同控制策略运行

图 3 两列车在途中运行过程中的协同节能操纵策略

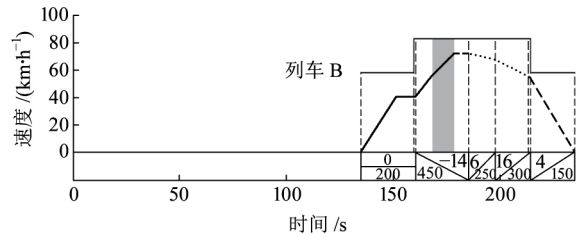
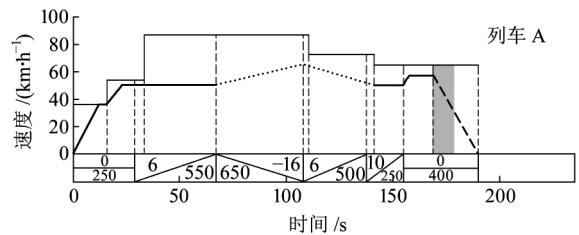
### 4.3 列车在出站牵引阶段和停站制动阶段协同节能操纵

分别取  $x = -45\text{ s}$ 、 $x = 135\text{ s}$ , 使一列车出站牵引一段时间后, 另一列车开始停站制动。协同优化后两列车在各自站间的运行速度-时间曲线如图 4 所示。由于固定运行时分下不能通过文献[4]中调整时刻表的方法来两列车在出站牵引阶段和停站制动阶段的运行重叠时间, 但是本文中列车在出站牵引阶段的工况序列和牵引力大小是可调整的, 因此可以通过适当减小一列车在出站牵引阶段的牵引力大小, 同时适当增加另一列车在停站制动阶段的制动初速度, 从而实现提高两列车牵引和再生制动运行重叠时间的目的。

如图 4 所示, 根据遗传算法的协同优化结果, 出站



(a)  $x = -45\text{ s}$



(b)  $x = 135\text{ s}$

图 4 两列车在进出站过程中的协同节能操纵策略

列车首先牵引加速到约 40 km/h, 然后保持该速度巡航一段时间, 当另一列车开始停站制动时, 出站列车再次牵引加速至 60 km/h 以上。在图 4(a) 中, 由于列车 A 第二次牵引加速是在 6‰ 的上坡道, 列车提速需要消耗更多的能量, 因此再生制动能的利用时间较长, 约 17 s。在图 4(b) 中, 由于列车 B 第二次牵引加速是在 -14‰ 的下坡道, 列车提速需要消耗的能量较少, 因此再生制动能的利用时间较短, 约 9 s。同时由于列车 B 是在下坡道提速, 故列车 B 只能采用较小的牵引力, 即图 4(b) 中列车 B 的第二段牵引加速曲线相比第一段斜率更小。协同优化后图 4(a) 和图 4(b) 中, 两列车的总能耗分别为 28.60 kW·h 和 27.87 kW·h, 相比未协同前分别节能 1.3% 和 3.8%。

分别取  $x = 0\text{ s}$ 、 $x = 90\text{ s}$ , 使一列车出站牵引或停站制动时, 另一列车正在区间运行途中, 如图 5 所示。在图 5(a) 中, 两列车都在出站牵引阶段适当降低了列车运行速度, 使列车 A 在之后的牵引巡航和牵引加速过程中都能利用列车 B 在制动巡航和制动减速过程中产生的再生制动能。在图 5(b) 中, 列车 B 通过协同

其运行通过 $-16\%$ 下坡道的时间,使列车A在出站牵引过程中正好能利用上列车B制动巡航时产生的再生制动能。同时两列车通过调整开始停站制动的时

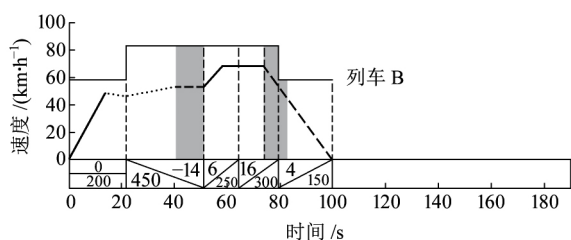
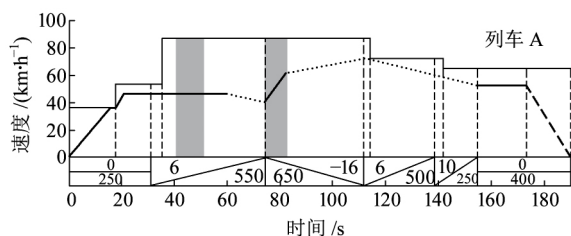
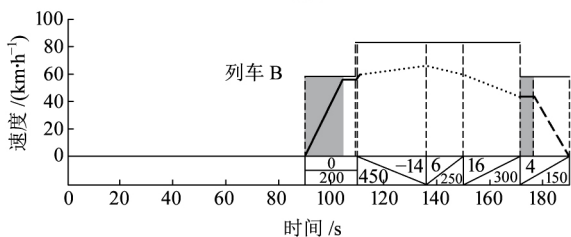
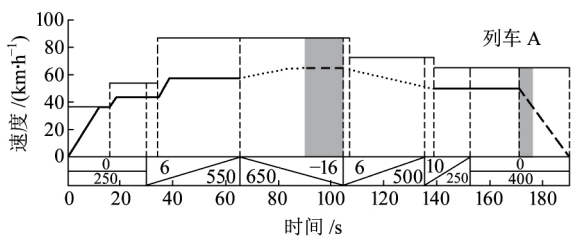
(a)  $x=0\text{ s}$ (b)  $x=90\text{ s}$ 

图5 一列车在进站或出站过程中与另一列车在途中运行过程中的协同节能操纵策略

#### 4.4 线路坡道对再生制动能利用的影响分析

根据上述分析,坡道对列车再生制动能的利用有较大影响。将两站间的线路坡度都同乘系数 $\varphi \leq 1$ ,分析当线路坡度变平缓后,协同优化前后两列车在站间运行途中( $x=45\text{ s}$ ),在进出站过程中( $x=-45\text{ s}$ 、 $x=135\text{ s}$ ),以及在一车进出站、一车在站间运行途中( $x=0\text{ s}$ 、 $x=90\text{ s}$ )的平均节能效果对比,如图6所示。

从图6可以看出,随着线路坡度的减小,协同优化

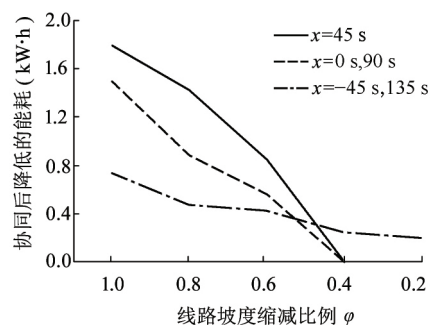


图6 不同线路坡度下的追踪列车协同节能操纵优化效果

前后的节能效果差距逐渐变小。当 $\varphi \leq 0.4$ 时,列车在途中运行过程中不再产生再生制动能,因此当 $x$ 取 $0.45、90\text{ s}$ 时协同后没有优化效果,此时列车在站间仍采用“牵引→巡航→惰行→制动”的控制策略运行。而此时通过调整列车在进出站过程中的速度曲线,仍有约 $0.3\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的节能空间。

## 5 结论

本文通过协同优化前行列车和追踪列车的操纵策略,提出追踪列车定时节能操纵优化模型。研究表明:

(1)追踪列车定时节能操纵策略为:当线路坡度变化较大时,两列车在途中运行过程中通过协同一列车在下坡道的制动巡航工况和另一列车在上坡道的牵引巡航工况,可减少总能耗。当线路坡度变化较小时,两列车在途中运行过程中一般只采用惰行工况,此时通过优化两列车的进出站过程,使一列车采用“牵引→巡航→牵引”的工况序列和另一列车适当提高进站制动初速度,仍能减少一部分能耗。

(2)追踪列车和单列车的节能操纵策略存在明显不同之处:既有文献采用的最大牵引和最大制动的操纵策略适合于单列车节能操纵,但不一定适合于追踪列车节能操纵。追踪列车应根据站间线路条件协同调整不同列车的牵引力和制动力大小,以增加追踪列车牵引和再生制动的运行重叠时间,如列车在下坡道时可适当减小牵引力大小,在上坡道时可采用“最大牵引→巡航”的工况序列,以适当延长列车牵引时间。

通过本文提出的方法,可以在离线状态下计算生成多种情景下的追踪列车协同操纵策略,提供给列车ATO系统以用于决策支持。同时通过离线生成大量的追踪列车协同速度曲线,也可以从中提炼出追踪列车协同节能操纵的一些启发式策略,这部分内容有待将来进一步深化研究。

参考文献:

[1] GONZALEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P, et al. A

- Systems Approach to Reduce Urban Rail Energy Consumption [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 509-524.
- [2] 荀径, 杨欣, 宁滨, 等. 列车节能操纵优化求解方法综述 [J]. 铁道学报, 2014, 36(4): 14-20.
- XUN Jing, YANG Xin, NING Bin, et al. Survey on Trajectory Optimization for Train Operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4): 14-20.
- [3] 王青元, 冯晓云, 朱金陵, 等. 考虑再生制动能量利用的高速列车节能最优控制仿真研究 [J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 96-103.
- WANG Qingyuan, FENG Xiaoyun, ZHU Jinling, et al. Simulation Study on Optimal Energy-efficient Control of High-speed Train Considering Regenerative Brake Energy [J]. China Railway Science, 2015, 36(1): 96-103.
- [4] YANG X, LI X, GAO Z Y, et al. A Cooperative Scheduling Model for Timetable Optimization in Subway Systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 438-447.
- [5] LI X, HONG K L. An Energy-efficient Scheduling and Speed Control Approach for Metro Rail Operations [J]. Transportation Research Part B, 2014, 64(4): 73-89.
- [6] SU S, TANG T, ROBERTS C. A Cooperative Train Control Model for Energy Saving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 622-631.
- [7] 荀径, 唐涛, 宋晓美, 等. 再生制动条件下的城轨列车节能驾驶综合模型 [J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 104-110.
- XUN Jing, TANG Tao, SONG Xiaomei, et al. Comprehensive Model for Energy-saving Train Operation of Urban Mass Transit under Regenerative Brake [J]. China Railway Science, 2015, 36(1): 104-110.
- [8] 唐海川, 王青元, 冯晓云. 地铁列车追踪运行的节能控制与分析 [J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 37-43.
- TANG Haichuan, WANG Qingyuan, FENG Xiaoyun. Energy Saving Control of Metro Train Tracing Operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(1): 37-43.
- [9] GU Q, TANG T, CAO F, et al. Energy-efficient Train Operation in Urban Rail Transit Using Real-time Traffic Information [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 1 216-1 233.
- [10] 刘海东, 毛保华, 丁勇, 等. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(5): 68-73.
- LIU Haidong, MAO Baohua, DING Yong, et al. Train Energy-saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(5): 68-73.

(责任编辑 安琪)

## 下 期 要 目

- 高速铁路路基填料中细颗粒分布特征及其对冻胀的影响
- 基于任务均衡的城市轨道交通乘务任务轮转模型及算法
- 基于高速列车运行实绩的致因—初始晚点时长分布模型
- 基于实测数据的 CRH380A 型高速动车组特征谐波建模
- 基于转向架悬挂参数与踏面锥度优化的高速车辆动力学性能分析
- 适应高铁场景的新型基扩展信道估计模型
- 高速铁路列控系统列车位置在线估计算法研究
- 铁路信号安全关键软件形式化建模
- 轨道交通轮轨噪声研究进展
- 高速铁路桥梁桩基础竖向动荷载测试
- 列车—桥梁耦合系统非线性随机振动分析