

被动信号优先策略下现代有轨电车站间协调能耗优化*

欧冬秀^{1,3} 闫 黄² 阳 扬⁴

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 同济大学经济与管理学院, 200092, 上海;

3. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 4. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海//第一作者, 教授)

摘 要 为了降低半独立路权现代有轨电车线路运行的能耗, 基于现代有轨电车系统的运行特性和线路特征, 提出了半独立路权现代有轨电车线路的区段划分方法; 并结合现代有轨电车列车运行模式, 推算出了单区段现代有轨电车能耗优化速度曲线。在沿线交叉口已经考虑被动信号优先配时策略的基础上, 以区段运行时间、距离、限速及交叉口信号状态等为约束条件, 建立了基于站间协调控制的现代有轨电车全线能耗优化模型。选取国内某城市实际现代有轨电车线路为例, 对比分析仿真速度曲线与模型求解速度曲线, 结果显示该能耗优化速度曲线能有效降低现代有轨电车运行能耗。

关键词 现代有轨电车; 被动信号优先; 站间协调; 交叉口; 能耗

中图分类号 U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.006

Optimization of Inter-station Coordinated Energy Consumption under Tram Passive Priority Strategy

OU Dongxiu, YAN Huang, YANG Yang

Abstract To reduce the operation energy consumption of modern tram with semi-closed road right, a section division method of tram system with semi-closed road right is provided based on the operating and rail line characteristics. Then, combined with tram operation mode, the speed curve of energy consumption optimization in single tram section is calculated. In the condition of signal priority configuration policy adopted at intersections, a whole line optimization model of tram energy consumption based on inter-station cooperating control is established with constraints like running time, distance, speed limitation and crossing signal status. Taking the tram line in a Chinese city as example, the simulation velocity curve and model solution velocity curve are comparatively analyzed. The result shows that the energy consumption of tram system is effectively reduced by using the optimized velocity curve of energy consumption.

Key words modern tram system; signal passive priority; in-

ter-station cooperation; intersection; energy consumption

First author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

现代有轨电车运行环境为城市道路, 易受到交叉口信号控制和社会车流等因素影响, 使得现代有轨电车站间运行不连续, 运行效率得不到有效保障。因此, 建立适用于现代有轨电车系统的运行能耗优化模型具有重要意义。

完全独立路权下现代有轨电车能耗优化模型, 与铁路和地铁相类似。这方面的已有研究对驾驶策略的探讨较多。随着研究问题的深入和智能控制理论的发展, 国内外学者还相继将遗传算法、蚁群算法和动态规划等理论应用在模型求解中, 取得了大量成果^[1-8]。然而, 对于半独立路权的现代有轨电车线路, 由于列车运行受交叉口信号控制, 到达路口时的信号状态将会影响列车站间运行的连续性。现代有轨电车交叉口信号优先控制策略主要包括被动优先、主动优先及实时优先。被动信号优先采用固定信号配时, 通过协调干线上各交叉口的信号方案实现干线协调控制, 为现代有轨电车列车提供信号优先^[9-10]。因此, 在建立半独立路权现代有轨电车运行节能优化模型时, 需要考虑被动信号优先策略的影响。

目前, 对于现代有轨电车能耗的研究多集中于车辆性能和电容控制上。文献[11]通过设定不同车辆加速时间和最大运行速度来对比车辆能耗, 寻找最优驾驶行为; 文献[12]通过设定车辆性能、线路条件和运营组织模式等多个参数来对比能耗, 从而提出节能优化措施; 文献[13-14]通过仿真路口是否停车、路口区域是否限速等因素对列车能耗进行对比研究, 提出节能方案。上述研究始终未将交叉口信

* 国家重点研发计划基金项目(2018YFB1201403); 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ2202600)

号控制因素引入现代有轨电车能耗模型中,因此无法指导半独立路权有轨电车线路的节能优化。

本文依据半独立路权现代有轨电车线路特征进行区段划分,通过分析现代有轨电车列车运行模式,推算单区段现代有轨电车能耗优化速度曲线;进而研究站间协调的现代有轨电车全线能耗优化模型;最后,通过遗传算法对该模型进行求解并进行节能结果对比分析。

1 单区段能耗优化速度曲线

1.1 区段划分

铁路与地铁线路两个车站之间的区间,称为站间区间,简称为站间。站间中存在多个限速值变化点,据此可以将站间划分为多个限速保持一致的区段,这是建立能耗优化模型的基础。

半独立路权现代有轨电车除在站点停车外,还存在交叉口的影响。在被动信号优先策略下,列车

在交叉口遇红灯需停车,遇绿灯需限速通过,这是现代有轨电车与铁路和地铁最主要的区别。因此,在对现代有轨电车线路进行区段划分时,需要将交叉口作为可变因素进行考虑。

现代有轨电车站间区间内除交叉口外,还存在影响速度曲线变化的环境分界点,如坡道、弯道和隧道的起始点。同时,在交叉口区域内列车限速值也会改变,所以交叉口的停车线位置和出口位置同样是区段分界点。为此,站间区间的速度曲线将根据环境分界点与交叉口区段端点两种要素进行划分,列车在这些位置存在限速,这会导致速度曲线产生相应变化。

此外,对于布设在交叉口附近的现代有轨电车站点,由于站点距交叉口进口或出口较近,在区段划分上将交叉口与车站两点重新定义,即站点与交叉口的远端点构成一个区段。列车在此区段内一定会产生停车,停车等待时间为驻站时间加上信号等待时间。区段划分示意图如图1所示。

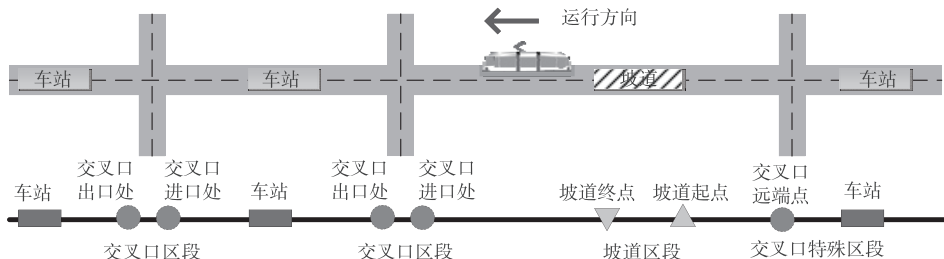


图1 现代有轨电车站间区段划分线路平面与拓扑对比示意图

1.2 速度曲线推导

站间区间内含有多个区段,列车在单个区段中的运行环境相对较为稳定。假设在一个区段内,列车存在牵引、巡航、惰性和制动4种运行模式,每种模式只会在一一定的连续时间内采用1次,因此有:

$$S_{\text{sec}(i)} = \beta_{\text{trac}(i)} S_{\text{trac}(i)} + \beta_{\text{cr}(i)} S_{\text{cr}(i)} + \beta_{\text{co}(i)} S_{\text{co}(i)} + \beta_{\text{b}(i)} S_{\text{b}(i)} \quad (1)$$

式中:

$S_{\text{sec}(i)}$ 、 $S_{\text{trac}(i)}$ 、 $S_{\text{cr}(i)}$ 、 $S_{\text{co}(i)}$ 、 $S_{\text{b}(i)}$ ——分别表示区段内的轨道长度、牵引距离、巡航距离、惰行距离、制动距离;

$\beta_{\text{trac}(i)}$ 、 $\beta_{\text{cr}(i)}$ 、 $\beta_{\text{co}(i)}$ 、 $\beta_{\text{b}(i)}$ ——分别为相对应各项的系数,该系数取值由各区段内列车的运行模式所决定,取值为0或1。

以区段入口速度与出口速度(即分界点速度)为依据,可将列车在区段内的运行分为以下4种情况:

(1) 入口速度与出口速度都低于交叉口限速或为0;

(2) 入口速度小于出口速度,入口速度低于交

叉口限速或为0,出口速度高于交叉口限速或为0;

(3) 入口速度大于出口速度,入口速度高于交叉口限速,出口速度低于交叉口限速或为0;

(4) 入口速度与出口速度都高于交叉口限速。

对于上述4种情况,在确定的区段长度和限速下可以得到此区段满足式(1)的速度曲线解集。通过设置运行时间约束,比较能耗变化可推导出最优速度曲线。推导流程如图2所示。

为了便于计算,推导过程中速度分辨率设定为1 km/h。实际中的列车在站间区间运行时间需要满足正点运行需求,而通过区段划分,运行时间约束分散到各个单区段上。设置单区段运行时间约束,一方面要求计算所得运行时间与设定运行时间的差值逐渐降低,另一方面该差值在一定范围(设定阈值)内变化即认为有效。

2 站间协调控制列车能耗优化模型

包含交叉口的区段中,出入口限速决定于列车

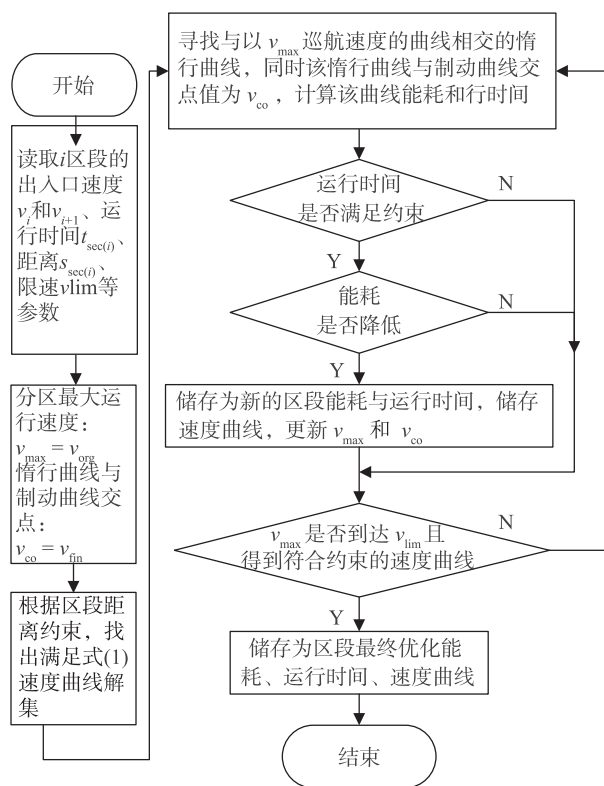


图2 单区段能耗优化速度曲线推导流程

到达交叉口时的信号灯状态。在沿线交叉口为固定配时策略下,通过线路参数、列车发车时刻、交叉口信号参数等得到列车沿线交叉口通行情况计算规程,主要计算当列车在某一时段抵达某交叉口时信号灯状态。列车能耗随着区段运行时间的增长而降低,据此可调整各区段运行时间。将列车在交叉口等待信号时间分配到各区段中,降低区段运行最大速度,调整速度曲线;按照同一区间中区段能耗减少量大小分配时间,在满足站间运行时间约束下尽可能降低运行能耗。

2.1 模型假设

(1) 本文研究对象为半独立路权现代有轨电车,沿线交叉口信号已经考虑社会交通流影响,实施了面向现代有轨电车的被动信号优先机制,优化了信号周期与绿信比。

(2) 为满足列车在车站的充电需求,列车驻站时间固定,且不低于某一固定值(如 30 s),不因上下车客流量变化而发生改变。

(3) 列车运行中,牵引时的牵引力随牵引曲线变化;制动时保持减速度恒定;巡航时受力平衡,保持理想匀速状态;在惰行时受各项运行阻力的影响,减速度随受力变化。

2.2 模型变量

2.2.1 区段分界点的瞬时速度

在现代有轨电车站间能耗优化中,各区段的出入口速度(v_i, v_{i+1})是非常重要的控制因素。本文定义各区段的出入口速度矩阵为 \mathbf{V}_{tram} ,则有:

$$\mathbf{V}_{\text{tram}} = [v_1, v_2, \dots, v_i, v_{i+1}, \dots, v_n, v_{n+1}]^T \quad (2)$$

\mathbf{V}_{tram} 是包含了现代有轨电车线路上所有区段出入口速度的集合。各分界点速度 v_i 的取值范围视分界点的最高限速而定。 n 为线路上区段个数。

2.2.2 站间运行时间

现代有轨电车运行时需要确定时刻表,即需要确定站间运行时间,并给出一定的准许误差 Δt 。各站间运行时间为 $t_{r_sec(i)}$ 。本文定义各站间的运行时间矩阵为 \mathbf{T}_{r_sec} ,则有

$$\mathbf{T}_{r_sec} = [t_{r_sec(1)}, t_{r_sec(2)}, \dots, t_{r_sec(i)}, \dots, t_{r_sec(N-1)}]^T \quad (3)$$

式中, N 为现代有轨电车线路上的站点数,即 $N-1$ 为相应的站间区间数,且 $N \leq n$ 。当 $N=n$ 时,表示线路上没有任何道路交叉口与环境分界点,列车全线在平直线上运行。 $n-N$ 既是线路上平面交叉口数量与未合并的环境分界点数量之和。

各站间的运行时间取值范围根据现代有轨电车列车时刻表与准许误差来确定。

2.2.3 区段运行时间

当站间运行时间确定后,该时间将作为该站间范围内所有区段运行时间和的约束。各区段运行时间 $t_{r_sec(i)}$ 是直接影响列车运行速度曲线的变量之一,其矩阵 \mathbf{T}_{sec} 表示形式如下:

$$\mathbf{T}_{sec} = [t_{sec(1)}, t_{sec(2)}, \dots, t_{sec(i)}, \dots, t_{sec(n-1)}]^T \quad (4)$$

\mathbf{T}_{sec} 所有元素求和得到的值应与 \mathbf{T}_{r_sec} 所有元素求和得到的值一致。

2.2.4 发车时刻

发车时刻决定了列车发车时距第一个交叉口绿灯相位的时间,将在一定程度上影响列车在第一个交叉口乃至后续交叉口的通行情况,是需要调整与控制的变量之一。

在本文的基本假设中,现代有轨电车沿线交叉口信号周期保持一致,且周期的长度不会改变。因此,列车以第一个交叉口信号周期的每次起始时刻为 0 时刻,列车在每个周期内的第 x 时刻发车,且满足:

$$x \in [0, \mathbf{T}_{\text{signal}}] \quad (5)$$

式中:

$\mathbf{T}_{\text{signal}}$ ——沿线交叉口信号配时的周期长度。

若速度曲线完全一致,理想情况下,时刻 x 下发

出的所有列车在沿线交叉口的通行情况应一致。

2.3 优化目标

本文研究现代有轨电车列车运行能耗时,采用的推算方式为列车动能变化与阻力做功。根据列车基本运行模式特点,列车在牵引、巡航模式下会产生牵引力,牵引力做功,惰行时牵引力不做功。其优化目标为列车所有区段能耗之和最小,即: $\min \left(\sum_{i=1}^n E_i \right)$ 。

其中 E_i 为单区段能耗值。

2.4 模型约束

为确保求解出合理的速度曲线,需要根据实际情况设置以下模型约束条件,以降低模型求解时的复杂度。

(1) 各区段长度约束。当推算各区段的速度曲线时,需要确保推算出的速度曲线在区段所经过的距离与区段长度保持一致。

(2) 线路总运行时间约束。当得到整条线路的速度曲线时,需要确保推算出的速度曲线在全线运行的时间不超过线路允许的最大运行时间。

(3) 各区段运行时间约束。各区段出入口速度与最高限速确定后,列车在区段的运行时间范围已确定,需设置检验区段的运行时间约束。

(4) 各区段运行速度约束。列车在各区段运行时,需要严格遵循当前所处路段的限速,不可以高于区段限速行驶。

(5) 各交叉口通行状况约束。列车在交叉口分界点的速度需满足当前该交叉口的通行情况。可根据列车抵达该交叉口前的运行时间来计算。

2.5 模型求解

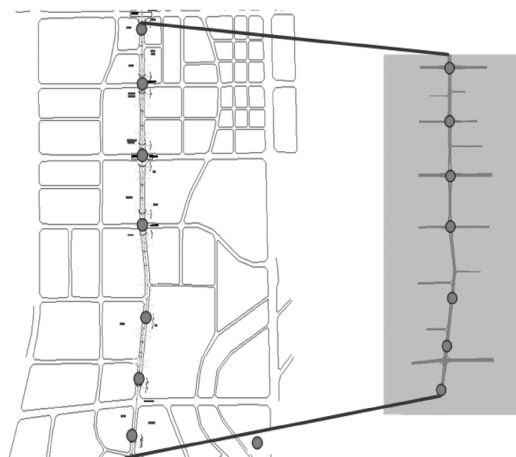
基于对求解问题的模型化处理与复杂度考虑,本文选择采用遗传算法对本文所描述的问题进行求解。具体步骤如下:将线路环境参数输入生成能耗优化初始种群;对初始种群进行二进制编码,主要包括发车时刻、各区段入口速度及区段运行时间。

以列车速度为例,列车在限速若为 70 km/h,则采用 7 位自然二进制编码 0000000 ~ 1000110 表示 0 ~ 70 km/h 的速度范围;同样,列车的发车时刻处于 0 ~ 119 s 之间,也需要 7 位二进制编码 0000000 ~ 1110111 表示。

通过编码后,设置适应度函数、基因杂交比例和变异比例等参数,利用 Matlab 遗传算法工具箱进行编程,解码后得到优化结果。过程不再赘述,通过实际案例对模型进行验证和分析。

3 节能效果仿真对比分析

选取国内某城市实际现代有轨电车线路为研究对象,研究范围为 7 站 6 区间,如图 3 所示。通过 VISSIM 仿真平台搭建仿真线路,仿真模拟驾驶运行,获取仿真速度曲线,计算能耗,并将结果与能耗优化模型求解结果进行对比验证。现代有轨电车线路基础参数设定见表 1。



注: ● 为有轨车站点

图 3 某城市现代有轨电车部分线路建模图

表 1 某城市现代有轨电车基础参数设定表

参数	取值
最大运行速度/(km/h)	60
正常运行最小速度/(km/h)	25
交叉口限行速度/(km/h)	20
正常运行期望速度/(km/h)	50 ~ 55
站点停靠时间/s	30
常规减速度/(m/s ²)	2
紧急制动减速度/(m/s ²)	2.4
发车间隔/s	120

对于沿线交叉口信号配时,沿线交叉口信号周期时间为 120 s,现代有轨电车相位绿灯时长 30 s。根据列车常规运行速度,依据被动信号优先绿波带进行相位差计算和相序组合。

上述参数作为现代有轨电车对比仿真验证的基础参数。根据线路参数生成的模型求解的初始种群,一般采取随机生产方式,但可能与实际情况有较大差异。本文根据最大运行时间,考虑各区段长度与交叉口给出初始种群,发车时刻为 0 s。设置基因杂交比例为 0.8,变异比例为 0.2,每代种群的个体为 100 个,共运行 150 代。基础参数下仿真速度曲线与模型求解速度曲线对比如图 4 所示。

模型求解结果为:发车时刻为 75 s,总运行时间

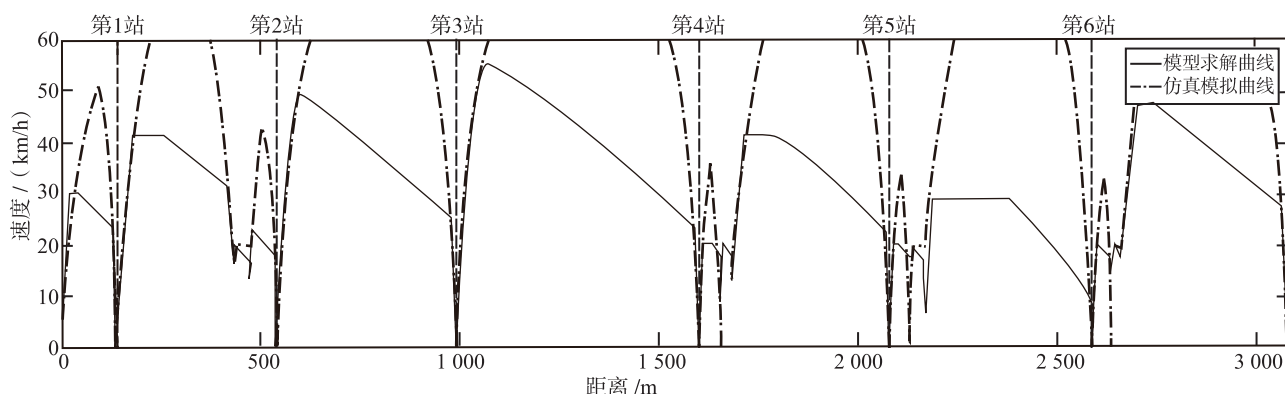


图4 某城市现代有轨电车仿真速度曲线与模型求解速度曲线对比图

为 550 s, 列车平均运行速度为 20.2 km/h, 列车运行净能耗为 11.46 kW·h, 总能耗为 13.02 kW·h。而仿真中采取了较为极端的驾驶操作, 为尽快抵达站点或交叉口, 仿真中都尽可能采用牵引加速, 直至制动转换点才制动减速, 这导致列车在交叉口多次停车等待, 浪费大量时间。仿真列车运行净能耗为 22.14 kW·h, 按 88% 效率计算, 总能耗为 25.15 kW·h。模型求解速度曲线中, 列车在交叉口等待时间被重新协调到区段运行时间约束中, 增加了区段运行时间, 降低了区段平均运行速度, 且列车在交叉口无需停车, 很大程度上节省了能耗, 节能近 48.2%。

沿线交叉口的信号周期长度、路段限速、交叉口限速及列车的平均运行速度需求, 都会对能耗优化的结果产生影响。故本文针对不同的运行条件对能耗优化算法的推算结果进行对比。

(1) 路段限速降低至 50 km/h。模型求解结果: 发车时刻为 76 s, 能耗优化计算得出的速度曲线净能耗为 11.17 kW·h, 总能耗为 12.69 kW·h。较限速 60 km/h 时能耗优化模型求解结果的能耗下降 2.5%。

(2) 交叉口限速降低至 15 km/h。模型求解结果: 发车时刻为 82 s, 运行净能耗为 13.00 kW·h, 总能耗为 14.77 kW·h, 较路段限速 60 km/h、交叉口限速 20 km/h 情况下的能耗增加了 11.8%。其原因在于交叉口限速的降低, 即列车必须以更低的速度通过交叉口, 故列车在驶出交叉口后的牵引能耗增大, 而交叉口低速通过浪费的时间必须靠减少在其余分区的运行时间来弥补。这两者都会导致能耗增加。

(3) 交叉口信号周期缩短至 90 s。模型求解结果: 发车时刻为 21 s, 运行净能耗降至 10.43 kW·h, 总能耗为 11.85 kW·h, 较路段限速 60 km/h、交叉口限速 20 km/h 情况下的能耗降低了 9.0%。降低沿线交叉口信号控制周期, 就降低了列车可能停车等待

的红灯窗口, 使列车抵达交叉口时的通行可能性增大, 潜在停车等待时间减少。

至此, 可以发现, 路段限速、交叉口限速及信号周期长度的调整都会对现代有轨电车的能耗优化速度曲线求解造成影响, 其影响也基本符合道路交通流的基本特征。

4 结语

本文根据半独立路权现代有轨电车线路特征, 提出了含有交叉口特殊区段的线路区段划分方法。通过分析现代有轨电车运行模式的阻力模型及运行模式, 探讨了在单区段出入口速度、运行时间约束及限速确定的前提下能耗优化曲线的求解方法; 通过离散运行速度, 找出满足约束下的单区段速度曲线解, 并通过逐步迭代的方式求解能耗最优的单区段速度曲线。

本文还搭建了基于站间协调的现代有轨电车能耗优化模型: 在沿线交叉口已经考虑被动优先配时策略的基础上, 推算信号灯状态, 将列车在交叉口等待时间转移到区段运行时间上; 进而通过控制各区段出入口速度、区段运行时间、路段限速、发车时刻等变量, 利用遗传算法对模型进行了求解。结果显示, 在满足现代有轨电车运行需求的前提下能够求解得到合理的能耗优化曲线。同时需要指出, 本文仅考虑了线路上单列列车的节能优化, 而在实际运行中, 线路上可能会有前后车的影响。这是需要进一步研究的重点和难点。

参考文献

- [1] 陈荣武, 刘莉, 郭进. 基于遗传算法的列车运行能耗优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, (1): 108.

(下转第 32 页)

表4 不同桥墩刚度下道岔1各部位相对基本轨位移

桥墩刚度 / (kN/cm)	转辙机处梁轨 相对位移/mm	直尖轨相对基 本轨位移/mm	曲尖轨相对基 本轨位移/mm
400	4.894	13.976	10.950
500	4.864	13.951	10.937
600	4.832	13.927	10.915
700	4.809	13.905	10.906
800	4.784	13.892	10.894
1 500	4.543	13.829	10.708
2 500	4.487	13.782	10.663

3 结论

(1) 随着单渡线道岔始端距梁缝距离的增大,右线钢轨伸缩附加力基本不变,左线钢轨伸缩附加力受固定墩影响略有变化。

(2) 随着单渡线道岔始端距梁缝距离的增大,道岔各部位的位移值均减小,变化规律近似呈线性。

(3) 根据道岔位移随道岔始端距梁缝距离的变化规律可知:当连续梁桥上单渡线道岔始端距梁缝大于14 m时,在伸缩力和制动力作用下转辙机处梁轨相对位移小于5 mm,道岔钢轨强度和道岔位移满足无缝道岔布置要求,可供类似工程设计参考。

(4) 随着连续梁桥墩刚度的增大,道岔各部位相对基本轨的位移逐渐减小,但影响较小。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路无缝线路设计规范:TB 10015—2012[S].北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] 王平,刘学毅.无缝道岔计算理论与设计方法[M].成都:西南交通大学出版社,2007.
- [4] 李秋义,孙立,杨艳丽.客运专线桥上无缝道岔设计方法研究[J].铁道工程学报,2008(12):50.
- [5] 李秋义.客运专线桥上无缝道岔计算模型和计算方法研究[J].铁道标准设计,2010(2):64.
- [6] 徐桂弘,徐浩,王平,等.无砟轨道连续梁桥与道岔纵向相互作用规律的研究[J].铁道建筑,2011(5):119.
- [7] 张世杰.桥上无缝道岔交叉渡线无砟轨道影响因素分析[J].铁道工程学报,2013,(10):48.
- [8] 赵才友,王平,包进荣.连续梁桥上无缝道岔合理化布置研究[J].铁路计算机应用,2011,20(2):1.
- [9] 朱彬.列车荷载图式对桥上无缝线路纵向力的影响分析[J].铁道建筑技术,2017(12):20.

(收稿日期:2019-01-20)

(上接第28页)

- [2] HUANG Y, MA X, SU S, et al. Optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic algorithm[J]. Energies, 2015, 8(12): 14311.
- [3] 宋文婷, 谭冕, 蔡文川, 等. 高速列车的节能操纵策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, (3): 423.
- [4] 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.
- [5] LI Z, WEI X, WANG H, et al. Optimizing power for train operation based on ACO[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2016: 453.
- [6] LU S, HILLMANSEN S, HO T K, et al. Single-train trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 743.
- [7] HAAHR J T, PISINGER D, SABBAGHIAN M. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 99: 167.
- [8] 唐海川, 朱金陵, 王青元, 等. 一种可在线调整的列车正点运行节能操纵控制算法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 89.
- [9] SERMPIS D, PAPADAKOS P, FOUSEKIS K. Tram priority at signal-controlled junctions[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2012, 165(2): 87.
- [10] ZHOU Y F, JIA S, MAO B, et al. An arterial signal coordination optimization model for trams based on modified AM-BAND [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016 (1181): 1.
- [11] KUBÍN J, FERKOVÁ Ž. Influence of driving style of a tram driver on the tram's energy consumption [C] //2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE). Slovakia: IEEE, 2015: 417.
- [12] 李明, 刘楠, 石俊杰. 有轨电车运行能耗影响因素及节能措施分析[J]. 机车电传动, 2017, (2): 96.
- [13] RAWICKI S. Energy saving control of tram motors taking light signalling and city disturbances into account[C] //13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan: IEEE, 2008: 1481.
- [14] RAWICKI S, NOWAK M. Energy-saving coordination of traffic of some trams driven by induction motors[J]. Poznan University of Technology Academic Journals: Electrical Engineering, 2016(85): 447.

(收稿日期:2017-10-15)