

# 城市轨道交通接触网焦耳能耗分析与改善研究

张明锐<sup>1</sup>, 李启峰<sup>1</sup>, 龚晓冬<sup>2</sup>, 唐贾言<sup>3</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235;  
3. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125)

**摘要:** 分析城市轨道交通接触网系统发热原理及能耗情况, 总结接触网能耗计算的基本方法和影响接触网能耗的主要因素, 提出基于列车运行调整的改善触网电压、降低触网能耗的优化策略。进而以触网焦耳能耗最小为目标, 考虑列车运行图和牵引特性等多重约束条件, 运用蚁群算法, 对基于无线通信列车自动控制原理的列车运行建立优化调整控制模型。最后根据上海地铁 2 号线一期实际参数进行仿真实验, 验证优化策略的有效性和可行性。该策略对于计划运行图的改进及列车运行安排的实时调整优化均具有一定的指导价值。

**关键词:** 城市轨道交通; 接触网; 能耗; 蚁群优化算法; 列车运行调整

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

## Analysis on Joule Energy Consumption of Catenary in Urban Mass Transit and Its Improvement

ZHANG Mingrui<sup>1</sup>, LI Qifeng<sup>1</sup>, GONG Xiaodong<sup>2</sup>, TANG Jiaayan<sup>3</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China)

**Abstract:** By analyzing the thermal principle and energy consumption of catenary system in urban mass transit, this paper summarizes the calculation methods and main influencing factors of the catenary energy consumption. The optimization strategy for improving voltage and reducing energy consumption of catenary is presented based on train operation regulation. And a model minimizing the Joule energy consumption of catenary at the most is built to optimize and regulate the train operation schedule based on communication-based train control system (CBTC) with the

ant colony optimization algorithm under multiple constraints. At last the optimization strategy has been simulated with the practical parameter of the urban mass transit line 2 in shanghai and its effectiveness and feasibility are verified. The proposed strategy has a guiding value for improving the contemplated schedule and real-time optimal regulation of train operation arrangement.

**Key words:** urban mass transit; catenary; energy consumption; ant colony optimization algorithm; train operation regulation

城市轨道交通能耗主要分布在牵引系统、动力照明设备、弱电系统及其他方面。其中牵引系统的能耗占地铁总能耗的 40%~48%<sup>[1]</sup>, 而接触网作为牵引系统向列车提供电能直接环节, 也消耗了相当一部分电能。

随着城市轨道交通行车密度的增大和列车运行速度的提高, 接触网电流增大成为必然, 致使触网产生巨大的能耗。较大的触网电流会导致触网导线局部温度过高而软化, 抗拉强度下降; 巨大的触网能耗以发热形式向隧道释放, 不仅会增大隧道区间内的温度, 尤其在夏季, 给环控系统的通风散热带来压力, 而且会增加地铁用电量, 增大运营成本<sup>[2-3]</sup>。因此, 接触网能耗分析与改善研究具有很好的工程应用价值。

列车运行时, 接触网电压和电流动态变化。列车启动阶段, 巨大的启动电流导致启动区段的接触网电压出现严重下降, 对于远离牵引变电站的区段, 列车启动引起的接触网电压跌落幅度更大。列车制动阶段, 巨大的再生反馈电流又会抬升接触网电压。因此, 接触网电压处于剧烈的波动中。对于额定电压 1500 V 的轨道交通牵引系统, IEC 标准中规定其电压波动范围在 1000~1800 V, 电压波动 40% 以上。

而大幅度的电压波动会引起牵引变流器—电机系统直流侧电压、电流的持续振荡,进而造成电机输出转矩脉动,大大降低牵引系统效能和稳定性<sup>[4-5]</sup>。

本文重点研究地铁运行中,多车同时启动和制动时,巨大电流引起的触网电压大幅度波动和触网发热能耗问题。首先分析柔性接触网发热原理,建立了接触网电流分布模型,在此基础上总结出接触网能耗计算基本方法及影响能耗的主要因素。文章对比研究不同行车组织对触网能耗和电压波动的影响,提出通过改善触网电压水平,降低能耗的控制策略,以能耗最小为目标,考虑列车运行图和牵引特性等多重约束条件,对基于无线通信列车自动控制原理的列车运行建立优化调度控制模型,并运用实际线路参数进行仿真分析。

## 1 轨道交通牵引供电系统

### 1.1 地铁供电系统

地铁直流牵引供电系统主要包括整流变压器、整流器、直流开关柜、馈电线、接触网和走行轨等。整流变压器将交流 33/35 kV 降到 1220 V 左右,通过整流器整流为 1500 V 左右的直流电,所得到的直流电通过上网电缆分配给接触网,然后供给列车用电,如图 1。

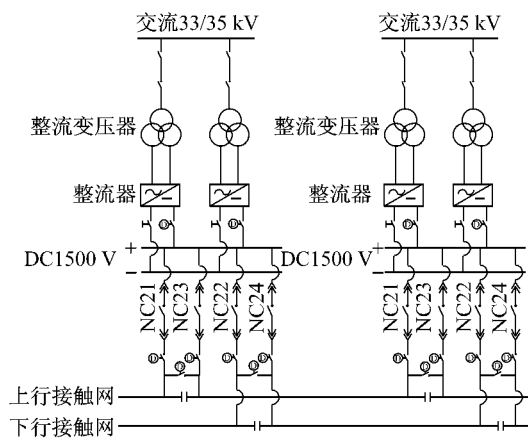


图 1 直流牵引供电系统原理图

Fig.1 Principle diagram of DC traction power supply system

### 1.2 接触网系统

接触网分为柔性接触网和刚性接触网,本文重点讨论柔性接触网。柔性接触网由承力索、接触线、吊弦、电连接、分段绝缘器等组成。

接触网导线通电发热,与外部环境进行对流、辐射等多种形式热交换,最终达到一个平衡状态<sup>[6-7]</sup>。

其热平衡方程为:

$$Q_c + Q_r + Q_p = Q_R + Q_S \quad (1)$$

式中:  $Q_c$  为对流热损失;  $Q_r$  为接触网导线辐射热损失;  $Q_p$  为接触网导线温升所需吸收的热量;  $Q_R$  为传输电流产生的焦耳热;  $Q_S$  为日光短波辐射的热量。

本文重点讨论接触网通过传输电流时产生的焦耳热。接触网导线焦耳热与环境温度、导体导热系数、导体材料和结构、电流大小等因素相关,其中电流大小是影响焦耳热的主要因素。

## 2 接触网能耗分析

### 2.1 接触网电流分布

牵引变电所向接触网供电有两种方式:单边供电和双边供电。双边供电时列车从两侧变电所获取电能,由于馈电网为均匀结构,其电流分配与距离成反比<sup>[8]</sup>。单供电区间接触网电流分布情况如图 2 所示。

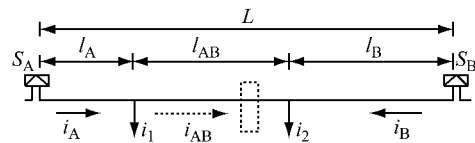


图 2 单供电区间接触网电流分布

Fig.2 Distribution of catenary current in a single power supply interval

$$i_A = i_1(L - l_A)/L + i_2 l_B/L \quad (2)$$

$$i_B = i_1 l_A/L + i_2(L - l_B)/L \quad (3)$$

$$i_{AB} = i_2 l_B/L - i_1 l_A/L \quad (4)$$

式中:  $L$  为牵引变  $S_A$  与  $S_B$  的间距;  $i_1$  和  $i_2$  分别为列车 1 和列车 2 从接触网上获取的电流;  $l_A$  为列车 1 行进过程中与牵引变  $S_A$  的距离;  $l_B$  为列车 2 行进过程中与牵引变  $S_B$  的距离;  $i_A$ ,  $i_B$  和  $i_{AB}$  分别为接触网  $l_A$ ,  $l_B$  和  $l_{AB}$  区段的电流值。

### 2.2 接触网能耗计算及影响因素分析

通常地铁列车启动过程经历三个阶段:恒加速度启动、恒功率加速和恒功率调速。恒加速度启动时加速度一般为  $0.9 \sim 1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,列车在恒加速度启动阶段结束时启动电流达到最大,最高可达 5000 A 以上。随着列车行车密度的增大,单供电区间出现多列车相继启动的概率越来越大,使得处于启动区段的接触网长时间流经大电流,接触网局部发热的可能性也加大。

本文对单供电区间内,列车启动时段内,接触网总能耗和启动区段接触网能耗进行分析<sup>[9-10]</sup>。

接触网能耗基本计算公式为

$$Q_R = \int_{t_0}^{t_1} i^2(t) l r_0 dt \quad (5)$$

式中:  $t_0$  为计算起始时刻;  $t_1$  为计算结束时刻;  $i(t)$  为计算区段接触网电流;  $r_0$  为接触网单位长度等效电阻;  $l$  为计算区段接触网长度。

单供电区间接触网能耗计算公式为

$$Q_R = \int_{t_0}^{t_1} [i_A^2(t) l_A(t) r_0 + i_{AB}^2(t) l_{AB}(t) r_0 + i_B^2(t) l_B(t) r_0] dt \quad (6)$$

由式(6)可知,一定时间段内,接触网能耗与电流分布直接相关,而供电区间接触网电流的具体分布又取决于列车运行组织,这就是说,可以通过优化列车运行时刻表达到降低接触网能耗的目的。

### 2.3 改善接触网电压、降低能耗策略分析

本节分析一个供电区间内,两列列车按照不同运行图运行时接触网能耗情况。首先,根据列车运行图中时间、距离、速度及列车牵引特性求得每一扫描时刻列车电流在供电区间上的分布,从而得到各扫描时刻的瞬态供电网络。通过对瞬态网络的求解,得到各时刻、各位置的接触网的电压、电流值,然后根据前述能耗计算公式进行分析。

如图 3,牵引变  $S_A$ — $S_B$  供电区间  $L=2\,960\text{ m}$ ,该区间内有相继启动的两列列车 C1 和 C2,其运行策略均为最快运行策略,即牵引至最高速—巡航—制动。取不同启动时差  $\Delta t$ ,对比分析启动时间 30 s 内,接触网整个区间  $L$  总能耗及启动区段  $L_1$  和  $L_2$  的能耗。

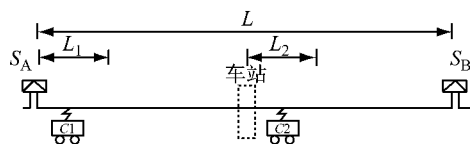


图 3 单供电区间两列列车同时运行情况

Fig.3 Two trains running simultaneously in a single power supply interval

最快运行策略下,列车最高速度  $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,启动过程时间约为 30 s,启动距离约为 360 m,电流从零上升至最大电流时间约为 10 s,如图 4。

图 5 为两列列车同时启动行进过程中接触网电压变化曲线。列车 C1 从牵引变电所  $S_A$  处开始启动,网压下降幅度较低,仅跌落 7%。而列车 C2 从中间车站开始启动,在启动过程中网压降落较大,最大跌落 17%。

启动时长 30 s 内,列车 C1,列车 C2 同时启动及不同时差  $\Delta t$  启动时,接触网总能耗及 2 启动区段能

耗计算结果如图 6。

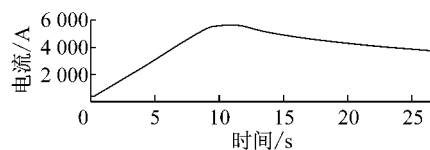


图 4 最快运行策略下列车启动过程电流曲线

Fig.4 Current curve in starting progress at the fastest operation strategy

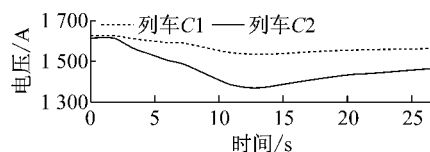


图 5 列车 C1, C2 启动阶段网压曲线

Fig.5 Catenary voltage curve of train C1 and C2 in starting process

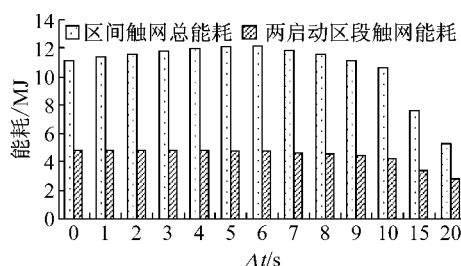


图 6 不同启动时差下接触网能耗对比图

Fig.6 Contrast figure of catenary energy consumption at different starting time difference

列车 C1, 列车 C2 启动区段接触网长度占该供电区间接触网总长度的 24.3%, 而接触网发热能耗约为该区段接触网总能耗 40%~50%。可知, 接触网主要发热能耗集中在启动区段, 即启动区段接触网发热能耗较为严重。

两列列车发车时刻相差  $\Delta t=6\text{ s}$  时, 区间触网发热能耗最大;  $6\text{ s} < \Delta t < 20\text{ s}$ , 随  $\Delta t$  的增大区间触网能耗而减小。  $\Delta t=10\text{ s}$  时, 与同时启动能耗相当,  $\Delta t=15\text{ s}$  时能耗相比于同时启动降低约 35%,  $\Delta t=20\text{ s}$  时能耗相比于同时启动降低约 55%。

通过以上分析, 均衡考虑商业运行规则以及列车快捷、舒适要求, 同一供电区间两列列车发车时差取 15 s 为宜, 即

$$|f_{g1} - f_{g2}| = t_{\text{opt}} \quad (7)$$

式中:  $f_{g1}$  和  $f_{g2}$  分别为第  $g$  供电区间两列列车启动时刻;  $t_{\text{opt}}$  为最宜启动时差, 取值 15 s。

依据式 7 对运行图进行调整, 列车 C1 启动 15 s 后列车 C2 再启动, 对比于图 6 接触网电压变化, 调整后列车 C2 接触网电压最大跌落由原来 17% 降低

到10%。接触网电压的改善不仅有利于提高车辆牵引效能和稳定性,还可以大幅度降低接触网总能耗、避免接触网局部发热。

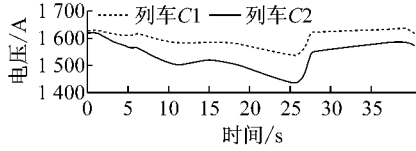


图7 优化调整后列车启动阶段网压曲线

Fig.7 Catenary voltage curve in starting process after optimization regulation

### 3 基于蚁群算法列车运行图调整<sup>[11-15]</sup>

#### 3.1 能耗最小优化模型

本文能耗最小优化模型是结合单向列车行车组织建立。设有  $M$  个车站, 车站集  $S = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 。单向运行中有  $N$  列车, 列车集  $T = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 。一般一个供电区间包含两个车站区间, 所以有  $(M-1)/2$  个供电区间, 供电区间集  $G = \{0, 1, \dots, \frac{M-1}{2}-1\}$ 。能耗最小等效优化目标为

$$Z = \max \left\{ \sum_{g=0}^{(M-1)/2-1} (|f'_{g1} - f'_{g2}| \operatorname{sgn} |f'_{g1} - f'_{g2}|) \right\} \quad (8)$$

$$\operatorname{sgn} |f'_{g1} - f'_{g2}| = \begin{cases} 0 & |f'_{g1} - f'_{g2}| > t_{\text{opt}} \\ 1 & |f'_{g1} - f'_{g2}| \leq t_{\text{opt}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $g$  为供电区间编号;  $f'_{g1}$  和  $f'_{g2}$  分别为供电区间  $g$  内两列列车的发车时刻。

列车运行调整约束条件为

$$f'_{ij} - d'_{ij} \geq Ts_{ij} \quad (10)$$

$$d'_{(i+1)j} - f'_{ij} \geq Tr_{ij} \quad (11)$$

$$|d'_{i(j+1)} - d'_{ij}| \geq Td_i \quad (12)$$

$$|f'_{i(j+1)} - f'_{ij}| \geq Tf_i \quad (13)$$

$$|f'_{g(j+1)} - f'_{gj}| \geq t_{\text{opt}} \quad (14)$$

式中:  $f'_{ij}$  为列车  $j$  在车站  $i$  的实际发车时刻;  $d'_{ij}$  为列车  $j$  在车站  $i$  的实际到站时刻;  $Ts_{ij}$  为列车  $j$  在车站  $i$  的最小停站时间;  $Tr_{ij}$  为列车  $j$  在车站  $i$  至车站  $i+1$  区间的最小运行时间;  $Td_i$  为列车在车站  $i$  的最小到达间隔时间;  $Tf_i$  为列车在车站  $i$  的最小发车间隔时间;  $f'_{g(j+1)}$ ,  $f'_{gj}$  分别为供电区间  $g$  内两列列车  $j$  和  $j+1$  的发车时刻。

#### 3.2 列车运行优化调整

##### 3.2.1 列车运行图

图8给出了6个车站,6列列车的到达、通过、出

发情况。

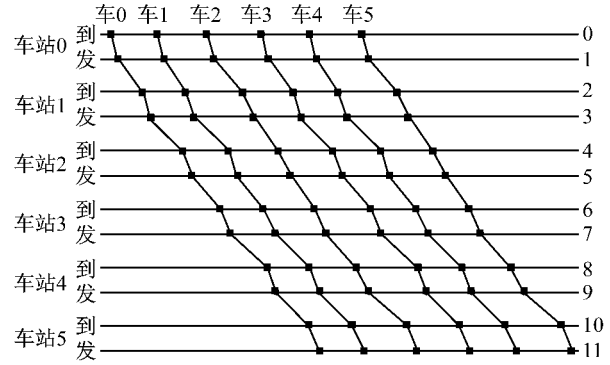


图8 列车运行图

Fig.8 The train operation schedule

对于车站  $i$ , 定义到达线编号为  $2i$ , 出发线编号为  $2i+1$ 。对于  $M$  个车站  $N$  列列车, 其运行时刻表用  $2M \times N$  的矩阵  $T0$  表示, 调整后用矩阵  $T1$  表示。则在供电区间  $g$  内运行的相邻两列列车的启动时刻分别表示为  $T0[4g+1, j+1]$  和  $T0[4g+3, j]$ 。

##### 3.2.2 蚁群搜索策略

在供电区间  $g$  内, 若将两列列车的启动时刻  $T0[4g+3, j]$  和  $T0[4g+1, j+1]$  调整为  $T1[4g+3, j]$  和  $T1[4g+1, j+1]$ , 根据启发函数计算各可行点的选择概率, 启发函数分别为

$$\eta[4g+1][T0[4g+1, j+1]] = \frac{1}{\|T1[4g+1, j+1] - T0[4g+3, j]\| - t_{\text{opt}} + 1} \cdot \eta[4g+3][T0[4g+3, j]] = \frac{1}{\|T1[4g+3, j] - T0[4g+1, j+1]\| - t_{\text{opt}} + 1} \quad (15)$$

$$\eta[4g+3][T0[4g+3, j]] = \frac{1}{\|T1[4g+3, j] - T0[4g+1, j+1]\| - t_{\text{opt}} + 1} \quad (16)$$

启动时刻  $T0[4g+1, j+1]$ ,  $T0[4g+3, j]$  对应的调整时间点选择概率分别为

$$P[4g+1, j+1] = \begin{cases} \frac{\tau_{(4g+1)(j+1)}^\alpha \eta_{(4g+1)(j+1)}^\beta}{\sum_{l \in \text{可行点集合}} \tau_{(4g+1)l}^\alpha \eta_{(4g+1)l}^\beta} & \text{可行点} \\ 0 & \text{不可行点} \end{cases} \quad (17)$$

$$P[4g+3, j] = \begin{cases} \frac{\tau_{(4g+3)j}^\alpha \eta_{(4g+3)j}^\beta}{\sum_{l \in \text{可行点集合}} \tau_{(4g+3)l}^\alpha \eta_{(4g+3)l}^\beta} & \text{可行点} \\ 0 & \text{不可行点} \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $\alpha$  是启发式因子, 用于表示信息素的相对

重要性; $\beta$ 是期望启发式因子,用于表示启发信息的相对重要性。

根据式(17)和式(18),采用轮盘赌法选择调整时刻。

### 3.2.3 信息素的更新

更新信息素采用 ANT—CYCLE 方式。信息素更新包括信息素的蒸发和信息素的释放,如式(19)。

$$\tau_{it} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{it} + \sum_{k=1}^{N_{\text{ant-num}}} \Delta\tau_{it}^k \quad (19)$$

其中 $\rho$ 是信息素蒸发率, $0 < \rho \leq 1$ 。 $\Delta\tau_{it}^k$ 表示在一次循环搜索中第 $k$ 只蚂蚁在 $i$ 时间线 $t$ 时间节点上释放的信息素量。

$$\Delta\tau_{it}^k = \begin{cases} \frac{Q}{Z} & \text{时间线 } i \text{ 上的节点 } t \text{ 在搜索时刻表上} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $Q$ 是信息素总量, $Z$ 是第 $k$ 只蚂蚁在一次迭代搜索中对应的目标函数值。

### 3.2.4 算法流程

算法流程如图 9 所示。

## 4 仿真算例

算例选用上海地铁 2 号线 8:00~8:30 时段,上行 3 个供电区间,6 个车站,如表 1。根据实际列车运行安排,需要对该时段的 6 列列车进行分析。列车在各车站区间的计划运行时间为[128 s,126 s,130 s,128 s,112 s],区间运行冗余时间为正负 10 s。列车在各站计划停站时间为[30 s,35 s,35 s,50 s,30 s,40 s],停站冗余时间为正负 5 s。列车最小发车间隔时间、最小到达间隔时间均为 164 s。

表 1 车站、牵引变分布

Tab.1 Distribution of stations and traction substations

车站	0	1	2	3	4	5
牵引变	TPS1		TPS2		TPS3	
站间距/m	1 466	1 425	1 490	1 330	1 131	

表 2 为优化前列车行车安排,可以看出存在多个同一供电区间相邻列车短时相继启动的情况,如从同一供电区间内车站 0、车站 1 启动的列车,发车时刻仅差 1 s。从车站 4、车站 5 启动的列车发车时差为 12 s。根据前面的分析,这种行车安排下的接触网能耗大、电压波动幅度大。

为改善触网电压、降低触网能耗,在保证该线路正常运行的情况下,运用本文提出的优化策略对列车时刻表做出优化调整。

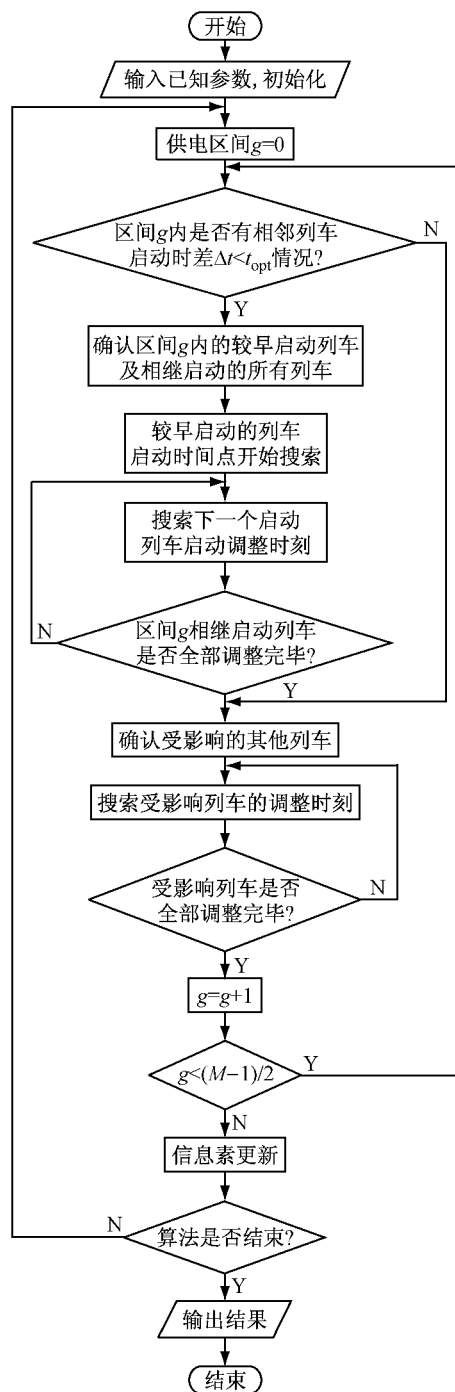


图 9 列车运行调整算法流程图

Fig.9 Flow chart of the algorithm for train operation regulation

采用基于参数的抽样实验方法,综合权衡算法的求解效率与全局收敛性,经多次仿真对比,将算法参数配置为:启发式因子 $\alpha=1.0$ ;期望启发式因子 $\beta=3.0$ ;信息素蒸发率 $\rho=0.6$ 。

经多次实验得出蚂蚁数目与目标函数值的关系,如图 10,可知当蚂蚁数目取到 15 时即可得到最优目标值,为保证优化质量,取蚂蚁数目为 20。

表 2 优化前列车时刻表

Tab.2 Train schedule before optimization

火车站		火车时刻					
		列车 0	列车 1	列车 2	列车 3	列车 4	列车 5
0	到达	8:01:17	8:04:01	8:06:45	8:09:29	8:12:13	8:14:57
	发出	8:01:47	8:04:31	8:07:15	8:09:59	8:12:43	8:15:27
1	到达	8:03:55	8:06:39	8:09:23	8:12:07	8:14:51	8:17:35
	发出	8:04:30	8:07:14	8:09:58	8:12:42	8:15:26	8:18:10
2	到达	8:06:36	8:09:20	8:12:04	8:14:48	8:17:32	8:20:16
	发出	8:07:11	8:09:55	8:12:39	8:15:23	8:18:07	8:20:51
3	到达	8:09:21	8:12:05	8:14:49	8:17:33	8:20:17	8:23:01
	发出	8:10:11	8:12:55	8:15:39	8:18:23	8:21:07	8:23:51
4	到达	8:12:19	8:15:03	8:17:47	8:20:31	8:23:15	8:25:59
	发出	8:12:49	8:15:33	8:18:17	8:21:01	8:23:45	8:26:29
5	到达	8:14:41	8:17:25	8:20:09	8:22:53	8:25:37	8:28:21
	发出	8:15:21	8:18:05	8:20:49	8:23:33	8:26:17	8:29:01

表 3 为优化调整后列车行车安排,阴影部分均是调整过的时刻.对经过车站 0,车站 1 的列车,利用区间运行时间冗余和停站时间冗余,调整为最宜启动时差.此次调整影响了通过车站 2 的列车运行,在

满足列车各种运行约束条件下,对通过车站 2 的所有列车运行时刻进行了调整.对经过车站 4,车站 5 的列车,仅利用停站时间冗余进行了调整.

表 3 优化后列车时刻表

Tab.3 Train schedule after optimization

火车站		火车时刻					
		列车 0	列车 1	列车 2	列车 3	列车 4	列车 5
0	到达	8:01:17	8:04:01	8:06:45	8:09:29	8:12:13	8:14:57
	发出	8:01:47	8:04:31	8:07:15	8:09:59	8:12:43	8:15:27
1	到达	8:03:46	8:06:30	8:09:14	8:11:58	8:14:42	8:17:26
	发出	8:04:16	8:07:00	8:09:04	8:12:28	8:15:12	8:17:56
2	到达	8:06:29	8:09:13	8:11:57	8:14:41	8:17:25	8:20:09
	发出	8:07:04	8:09:48	8:12:32	8:15:16	8:18:00	8:20:44
3	到达	8:09:21	8:12:05	8:14:49	8:17:33	8:20:17	8:23:01
	发出	8:10:11	8:12:55	8:15:39	8:18:23	8:21:07	8:23:51
4	到达	8:12:19	8:15:03	8:17:47	8:20:31	8:23:15	8:25:59
	发出	8:12:49	8:15:33	8:18:17	8:21:01	8:23:45	8:26:29
5	到达	8:14:41	8:17:25	8:20:09	8:22:53	8:25:37	8:28:21
	发出	8:15:18	8:18:02	8:20:46	8:23:30	8:26:14	8:28:58

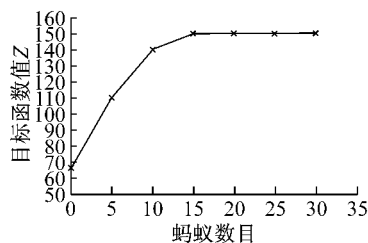


图 10 蚂蚁数目与目标函数值关系图

Fig.10 The relational figure between ant number and aimed function value

根据接触网能耗计算公式,分别求出列车时刻表优化前后该 3 个供电区间启动时段内接触网总能耗,如图 11,优化调整使 3 个供电区间启动时段内接触网总能耗降低约 27%.

在满足列车运行约束条件下,经过蚁群算法优

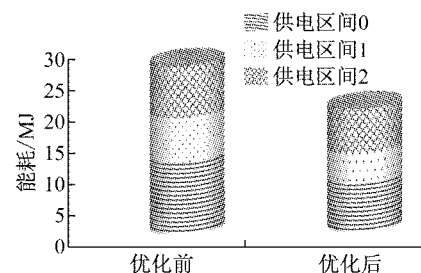


图 11 各供电区间启动时段触网总能耗

Fig.11 The total catenary energy consumption of every power supply interval in starting process

化调整,各供电区间相继启动列车的运行时刻逐一被优化,既保证了列车安全快速的运行,也达到了改善接触网电压、降低接触网能耗的目的.可知,本文提出的优化模型及求解算法对于城市轨道交通触网电压的改善和能耗的降低具有有效性和可行性.

## 5 结语

本文理论分析了城市轨道交通接触网电压变化与能耗分布的内在规律,并仿真研究了列车牵引组织对降低接触网总能耗的实际效果.提出在列车运行图组织中,运用蚁群算法优化调整相邻列车发车时刻,从而改善网压、降低接触网能耗的列车运行调整优化策略.本文建立的优化模型亦可融合其他优化目标,以建立多目标优化模型,实现列车运行图的综合优化调整.

## 参考文献:

- [1] 谢汉生,满朝翰,商一帆. 地铁主要能耗影响因素及节能措施分析研究[J]. 现代城市轨道交通,2013(4):65.  
XIE Hansheng, MAN Chaohan, SHANG Yifan. Analysis and research on the main influential factors of energy consumption and energy-saving for metro[J]. Modern Urban Transit, 2013(4):65.
- [2] 彭博,吴喜平,郑懿. 地铁区间热环境影响因素分析研究[J]. 建筑热能通风空调,2010,29(4):14.  
PENG Bo, WU Xiping, ZHENG Yi. Analysis and research on influencing factors of environment in metro running tunnel[J]. Building Energy and Environment, 2010, 29(4):14.
- [3] 朱培根,张宏,何志康,等. 地铁环控节能策略研究[J]. 制冷与空调,2010(24):5.  
ZHU Peigen, ZHANG Hong, HE Zhikang, *et al.* Study on the strategy of saving energy for metro environment [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2010(24):5.
- [4] 赵雷廷,刁利军,董侃,等. 地铁牵引变流器-电机系统稳定性控制[J]. 电工技术学报,2013,28(6):101.  
ZHAO Leiting, DIAO Lijun, DONG Kan, *et al.* Stabilization control for metro traction converter-motor system [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6):101.
- [5] 孙大南,刘志刚,林文立,等. 地铁牵引变流器直流侧振荡抑制策略研究[J]. 铁道学报,2011,33(8):52.  
SUN Danan, LIU Zhigang, LIN Wenli, *et al.* Research on DC-link oscillation suppression strategy in metro traction convertor [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8):52.
- [6] 郭蕾,李群湛,解绍锋,等. 在线防冰过程中电气化铁路接触网的温度场[J]. 西南交通大学学报,2013,48(2):230.  
GUO Lei, LI Qunzhan, XIE Shaofen, *et al.* Temperature field of catenary for electrified railway during online anti-icing[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2):230.
- [7] Mattera J P, Glises R, Baucour P, *et al.* Electrothermal modelling of the railroads catenaries[J]. Electrical Systems in Transportation, IET, 2012, 2(3):110.
- [8] 周曙,陈建君. 地铁与轻轨的供电仿真计算算法分析[J]. 电气化铁道,2011(4):23.  
ZHOU Shu, CHEN Jianjun. Simulation and calculation of power supply system for metro and light track [J]. Electric Railway, 2011(4):23.
- [9] 刘炜,李群湛,陈民武. 城市轨道交通交直流统一的牵引供电计算[J]. 电力系统保护与控制,2010(8):128.  
LIU Wei, LI Qunzhan, CHEN Minwu. Study of unified AC/DC power flow in DC traction power supply system [J]. Power System Protection and Control, 2010(8):128.
- [10] 龚孟荣. 地铁供电系统设计及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.  
GONG Mengrong. Metro power system design and simulation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [11] 冯晓芳. 基于蚁群算法的CBTC系统列车运行调整的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.  
FENG Xiaofang. Research for the train operation regulation of CBTC system based on ant colony optimization algorithm [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] 胡文斌,王勇博,吕建国,等. 优化地铁时刻表减少列车制动电阻能耗[J]. 城市轨道交通研究,2013,16(11):90.  
HU Wenbin, WANG Yongbo, LU Jianguo, *et al.* Reducing energy consumption of braking resistor based on the optimization of train schedule [J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(11):90.
- [13] 王飞杰. 城轨CBTC智能调度指挥系统关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2011.  
WANG Feijie. Study of key technology on intelligent CBTC urban rail transportation dispatching system [D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2011.
- [14] 徐航. 城市轨道交通列车运行调整目标的研究[J]. 铁路计算机应用,2013(11):50.  
XU Hang. Study on target of train diagram regulation to urban transit [J]. Railway Computer Application, 2013(11):50.
- [15] 林海香,董昱. 基于通信的列车控制在轨道交通中应用的关键技术[J]. 城市轨道交通研究,2010(9):81.  
LIN Haixiang, DONG Yu. Key technology of CBTC in urban mass transit [J]. Urban Mass Transit, 2010(9):81.