

# 遗传算法在列车运行控制模型中的应用<sup>①</sup>

周庆飞<sup>1</sup>, 戴胜华<sup>1</sup>, 李正交<sup>1</sup>, 李穹盛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

<sup>2</sup>(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对轨道交通列车节约能耗、节省时间和提高舒适度等因素之间的冲突问题, 建立了以工况转换点为求解目标的多约束条件下列车运行优化控制模型, 并提出了弯道优行法的列车通行原则, 优化了弯道运行策略. 对模型进行分析, 应用遗传算法对该问题进行求解, 最后采用 MATLAB 软件进行仿真验证. 仿真结果表明, 该模型方法能够有效的优化列车运行模式, 在运行时间只延长 11.96% 的情况下, 能耗降低了 33.27%, 并保证了乘客的舒适度, 最终得到了比较理想的运行策略.

**关键词:** 轨道交通; 优化运行; 节能控制; 遗传算法; 工况转换

## Train Operation Control Optimization Model Based on Genetic Algorithm

ZHOU Qing-Fei<sup>1</sup>, DAI Sheng-Hua<sup>1</sup>, LI Zheng-Jiao<sup>1</sup>, LI Qiao-Sheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Electronic and information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

<sup>2</sup>(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To solve the conflict of energy-saving, time-saving and comfort better, the train operation optimization control model is built under many constraints, and the condition conversion points are the goals for the model. And Optimal Operation of the Bend (OOB) is proposed as the rule for train, the operation strategy for the corners is optimized. By analyzing the model, Genetic Algorithm (GA) is used to solve this optimization model. In the end, a simulation is made to validate the model with MATLAB. From the case analysis, it proves the effectiveness of the given method to optimize the operation model, which reduces the energy consumption by 33.27% with only 11.96% extended at run time. At last, the good operation strategy is given.

**Key words:** railway transportation; optimization operation; energy-saving control; genetic algorithm; condition transformation

轨道交通具有运输能力强、安全性高、运行耗能大等特点, 优化列车运行方式已成为一个重要的研究课题. 目前, 关于城市轨道交通运行的研究重点主要集中在节能方面<sup>[1-3]</sup>, 通过调节惰行点的位置得到运行方案. 本文在借鉴现有成果的基础上, 把列车运行能耗、时间、舒适度和弯道等多种因素进行综合考虑求解, 提出了基于工况转换点的轨道交通运行优化控制模型.

## 1 模型建立与分析

### 1.1 列车运行受力分析

城市轨道交通列车运行主要有四种工况, 即牵

引、匀速、惰行和制动. 对列车进行受力分析可知, 列车在运行过程中的受力主要分为牵引力( $Q$ )、制动力( $Z$ )和运行阻力( $Y$ )三种, 示意图如图 1.

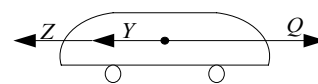


图 1 列车受力分析

列车的牵引力主要由列车牵引特性以及粘着牵引力决定, 通常列车的启动状态是指时速在 2.5 千米以下的状态, 此时粘着牵引力可以认为是列车牵引力, 如公式 1; 当大于 2.5 千米时的状态, 列车牵引力由列

① 收稿时间:2014-01-04;收到修改稿时间:2014-02-21

车牵引特性曲线决定, 此时列车的牵引力大小与车速有关, 对应的牵引特性曲线可由具体实验得到<sup>[4]</sup>.

$$F_{\alpha} = M_{\alpha} \cdot g \cdot \alpha \quad (1)$$

式中,  $F_{\alpha}$  为粘着牵引力;  $\alpha$  为粘着系数;  $M_{\alpha}$  为列车粘着质量;  $g$  为重力加速度.

运行阻力来自多方面, 包括弯道、坡道和隧道等, 为简化模型, 本文重点讨论弯道阻力的影响. 弯道阻力是指车辆因与轮缘的摩擦阻力在弯道处增大而产生的弯道附加阻力, 其与弯道半径、列车运行速度、外轨抬高系数和车辆轴距等诸多因素有关, 很难用比较精确的数学理论推导, 一般采用经验公式进行计算, 如公式 2.

$$\omega_r = \frac{700}{R} (N / KN) \quad (2)$$

式中,  $R$  为弯道半径.

## 1.2 弯道优行法

由于城市轨道交通线路一般是围绕城市需求规划设计的, 其必然会有很多的弯道存在, 而每一个弯道段面都有特定的限速规定, 在本区段运行时必须考虑下一弯道的限速要求, 否则就可能产生超速的情况. 本文提出的弯道优行法是指在满足弯道限速要求的前提下, 结合列车运行的节时节能的目标, 并充分考虑乘客舒适度的需求, 建立的弯道优化通行方法.

下面给出了弯道优行法的示意图, 其考虑了具有一般性的连续弯道情况, 该方法遵循“低先高后”的原则, 即当下一区段限速低于当前区段时, 将在进入下一弯道前先减速至理想安全通行速度, 当下一区段限速高于当前区段时, 将延续当前速度至离开当前区段后, 再提速至安全目标速度. 在减速区, 弯道优行法采用的是“惰行+必要制动”的方式, 以惰行为主, 符合列车节能的要求, 以必要的制动为辅, 确保安全通行, 提高乘客舒适度; 在提速区段, 在保证乘客舒适感的前提下尽快提速至目标速度, 以节省运行时间. 图中,  $D_1$ - $D_2$  为直道 1-弯道 1 的减速区段,  $D_3$ - $D_4$  为弯道 1-弯道 2 的减速区段,  $D_5$ - $D_6$  为弯道 2-直道 2 的提速区段.

## 1.3 列车运行优化控制模型

对于城市轨道交通系统而言, 站间距离一般较短, 合理的工况转换是保证列车安全、节能、平稳运行的有效方法. 由于给定的站间运行时间总是大于站间最小运行时间, 因而存在很多满足时间约束条件的运行控制曲线<sup>[3]</sup>.

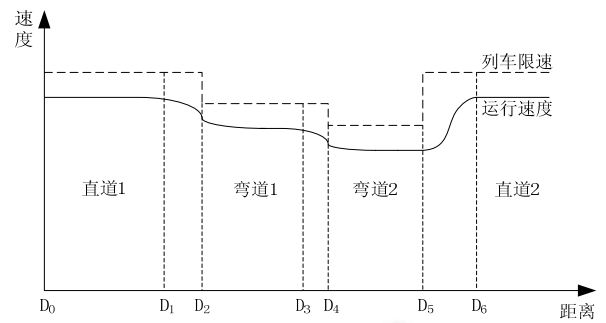


图 2 弯道优行法

从节能运行的角度出发, 合理选择惰行点以及惰行次数是降低轨道交通能耗的重要手段. 惰行点的选择受站间距离、区间限速、运行时间和弯道情况等因素影响. 当站间距离较短时, 列车一般惰行一次; 当站间距离较长或有弯道限速等情况时, 列车可能进行  $n$  ( $n \geq 2$ ) 次惰行, 以达到最优控制的目的.

从列车操控运行的角度考虑, 乘车舒适度主要取决于工况转换频率、加减速度和加减速度变化率, 特别是列车启动和制动停车的过程, 乘客舒适感最低. 研究表明, 在列车启动停车瞬间的加速度变化率对乘车舒适度影响最大<sup>[4]</sup>. 为方便建立模型, 给出数据化约束条件:

$$\begin{cases} \Delta a < 4.2 m/s^3; \text{乘客舒适度较好} \\ 4.2 m/s^3 < \Delta a < 13.4 m/s^3; \text{乘客舒适度一般} \\ 13.4 m/s^3 < \Delta a; \text{乘客舒适度非常差} \end{cases}$$

其中,  $\Delta a$  为加速度变化率.

本文把列车安全运行、节约能源和乘车舒适度等多方面因素进行数据化考虑, 建立了列车优化运行控制模型. 为研究方便, 模型的研究只涉及了两个惰行区段和一个弯道的情况, 不考虑坡度因素. 运行模式曲线如图 3 所示,  $0$ - $S_1$  为牵引加速区段,  $S_1$ - $S_2$  为第一次匀速行车区段,  $S_2$ - $S_3$  为第一次惰行区段,  $S_3$ - $S_6$  为采用弯道优行法的运行区段,  $S_6$ - $S_7$  为第二次匀速行车区段,  $S_7$ - $S_8$  为第二次惰行区段,  $S_8$ - $S$  为制动停车区段. 其中, 在牵引和制动区段, 需要考虑加速度  $a$  和加速度变化率  $\Delta a$ , 以提高乘车舒适度; 在弯道区段, 按照弯道优行法的方案进行运行, 提高行车效率.

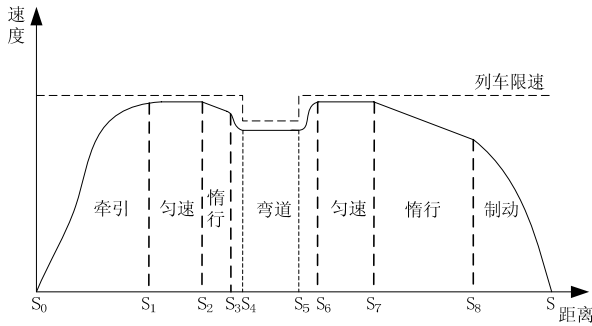


图 3 列车运行优化控制曲线

列车优化运行控制问题可转化为在满足多约束条件下工况切换点  $S_i(i=1,2,\dots,n)$  的计算。由于列车运行系统可自行计算停车前开始制动的位置，因此  $S_8$  点不用求解；由于弯道位置可知，故限速点  $S_4$  和  $S_5$  可知，不用求解。

设  $S_i$  处对应的速度为  $V_i$ ，列车在  $S_{i-1}-S_i(i=1,2,\dots,n)$  区段运行时间、能耗值、列车限速和加速度分别为  $t_i$ 、 $E_i$ 、 $v_{lim}$  和  $a_i$ ，列车运行优化控制模型的目标函数为：

$$\min F = \alpha \cdot \left| \frac{T_r - T_p}{T_p} \right| + \beta \cdot \left| \frac{E_r - E_p}{E_p} \right| \quad (3)$$

其中， $\alpha$  为时间调节因子， $\beta$  为能耗调节因子，且  $\alpha + \beta = 1$ ； $T_r$  为实际运行时间， $T_p$  为计划运行时间， $E_r$  为实际运行能耗， $E_p$  为计划运行能耗。其中， $\alpha$  和  $\beta$  的取值是根据对节时和节能的注重程度进行分配。

约束条件如下：

$$\begin{cases} V_0 = 0 \\ S_0 = 0 \\ T_r = \sum_{i=1}^n t_i \leq T_p \\ S_2 \geq S_c \\ S_{i-1} \leq S_i \\ V_i < v_{lim} \\ a_i \leq a_{lim} \\ \Delta a = \frac{da}{dt} < \Delta a_{lim} \end{cases} \quad \begin{cases} S_1 \geq S_z \\ S_2 \geq S_c \\ S_{i-1} \leq S_i \\ S_4, S_5 \text{ 已知} \end{cases}$$

其中， $S_c$  是列车从启动到惰行所需的最短距离，即第一个惰行点必需大于此值；每个区段的瞬时运行速度都要小于该区段的列车限速，即  $V_i < v_{lim}$ ； $a_{lim}$  为列车的加/减速度最大值，列车的最大加速度一般设置为  $0.8m/s^2-1.0m/s^2$ ，最大减速度为  $0.6m/s^2$ ； $\Delta a_{lim}$  为加速度

变化率的最大值，是提高舒适度的重要参数。

## 2 遗传算法设计

遗传算法是一种模拟自然界生物进化机制的随机全局搜索和优化方法，它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识，并自适应地控制搜索过程以求得最优解，具有鲁棒性强、并行性好和适应性高等特点<sup>[7]</sup>。从列车运行优化控制的数学模型可以知道，该问题属于非线性问题，用常规的数学方法进行求解比较困难。因而，本文采用了实数编码的遗传算法对该问题进行求解。

### 1) 染色体编码

采用实数对工况切换点位置  $S_i$  进行编码，即每条染色体的基因为一串位置  $\{S_1 S_2 S_3 \dots S_n\}$ ，且满足  $S_{i-1} < S_i$ 。假设有待求解的各工况转换点的值分别为  $S_1=192.400$ ， $S_2=365.300$ ， $S_3=588.200$ ， $S_6=900.300$ ， $S_7=1390.500$ ，则对应的这条染色体编码如图 4 所示。

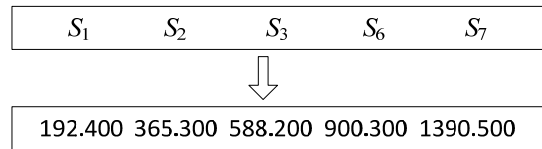


图 4 染色体编码实例

### 2) 初始种群

初始种群的生成，本文采用根据约束条件进行随机生成的方法，该方法可以有效提高种群的生成效率，针对上述模型的约束条件如下：

其中， $S_z$  为列车以最大牵引力启动到目标速度的最短距离，种群必须满足此约束条件才具有实际意义。

种群数量会影响遗传算法的正确性和计算效率，如果种群数量过大，需要的计算时间就会比较长；如果种群数量太小，容易使算法陷入局部收敛，因此在设置种群大小时需要根据具体模型进行，本模型的种群大小设置为 30，经验证可得到比较满意的效果。

### 3) 适应度函数

适应度函数总是非负的，任何情况下都希望其值

越大越好, 因此需要对目标函数进行变换以得到满足要求的适应度函数. 根据问题的实际意义分析, 只要取目标函数的倒数就可得到适应度函数, 即

$$F_s = \frac{1}{\alpha \cdot \left| \frac{T_r - T_p}{T_p} \right| + \beta \cdot \left| \frac{E_r - E_p}{E_p} \right|} \quad (4)$$

其中, 计划运行时间 TP 一般在最小运行时间的基础上增加 8%-15%, 本文取 10%. 而最小运行时间是指在最大牵引力运行、无惰行的节时模式下所需的最短运行时间.

#### 4) 染色体选择、交叉和变异

选择操作是指在种群中选取适应度值较高的个体来作为新的子种群的过程, 因而选择算子的好坏直接影响了算法的计算结果. 本文中染色体的选择采用轮盘赌法, 该方法可以选择在进化过程中适应度较大的染色体以较大的概率参与复制.

交叉操作是按照一定的概率从种群中选取两个染色体, 交换个体中特定的基因位, 这样子代中既保留了父代的特征, 又产生了新的特征. 染色体的交叉方法有单点交叉、两点交叉、多点交叉和均匀交叉等, 本文采用了两点交叉的方法. 该方法操作过程为: 第一, 在相互配对的两个染色体编码串中随机设置两个交叉点; 第二, 交换两个个体在所设定的交叉点之间的部分染色体.

染色体变异可以改善遗传算法的局部搜索能力, 维持群体多样性, 防止出现早熟现象, 本文采用了均匀变异法. 该方法操作过程为: 第一, 依次指定个体编码串中的每个基因座为变异点; 第二, 对每个变异点以特定变异概率从对应基因的取值范围内取一随机数来替代原有值.

本文所建立模型的算子方法如表 1 所示:

表 1 算子方法

算子	方法
选择算子	轮盘赌法
交叉算子	两点交叉法
变异算子	均匀变异法

算法设计流程如图 5 所示, 首先根据轨道交通环境设置相应的参数(包括线路参数、列车参数和仿真参数等), 生成初始种群后, 进行适应度计算, 如果不满

足终止条件, 即迭代代数不大于最大迭代代数, 则对种群进行选择、交叉和变异的算子计算, 获得新的子代种群, 再进行适应度计算, 如果满足终止条件, 则输出符合约束条件的最优解.

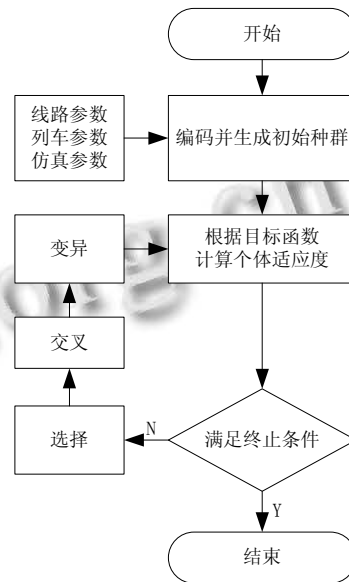


图 5 算法设计流程图

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真环境

1) 线路参数: 站间距离为 1500m, 无坡道, 列车限速为 80Km/h, 线路在 650m-850m 间有弯道, 限速为 60Km/h.

2) 列车参数: 编组方式为机车牵引, 列车长度 140m, 牵引重量 333.46t.

3) 运行参数: 站间运行时间为 105s.

4) 算法仿真参数: 如表 2 所示.

表 2 算法仿真参数

算法仿真参数	
时间调节因子	0.5
能耗调节因子	0.5
种群数量	30
最大迭代次数	150
交叉概率	0.9
变异概率	0.01
惰性次数	1 或 2

#### 3.2 仿真结果

为了比较直观的分析结果, 将遗传算法计算的各代种群适应度最大值与均值的变化曲线进行对比, 如

图 6 所示.

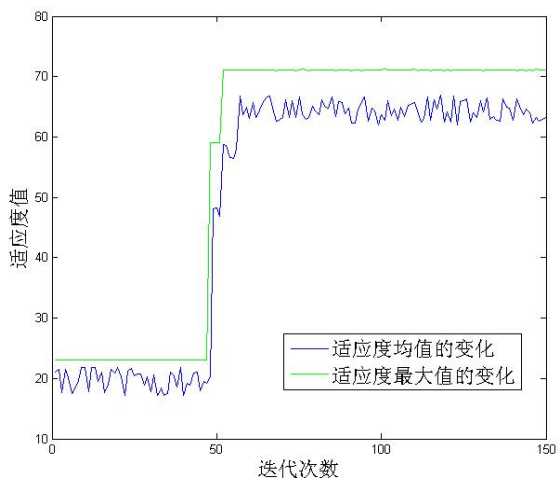


图 6 适应度变化曲线

可知, 适应度最大值在第 48 代有了一个较大的突变, 达到 59.10, 在第 52 代后稳定于 71.21; 适应度均值在第 48 代开始递增, 在 58 代后趋于稳定, 其值在

64.50 左右浮动. 因此, 将迭代次数设定为 150, 完全能够满足目标优化控制的精度要求.

为了和本文提出的优化方法进行对比分析, 表 3 列出了在节时模式下的运行数据和优化控制算法得出的运行数据.

在节时模式下, 列车以“牵引-匀速-制动”的模式全速运行, 以节约时间为主要依据, 不进行惰行, 从表中可以看出, 其运行时间为 92s, 耗能高达 62.133KW·h; 优化后的运行数据得到了较好的改善, 由于  $S1=S2$ , 可以得出, 第一个阶段并没有匀速区段, 最终得到运行时间 103s, 满足站间设定的时间要求, 而站间的运行耗能降为 41.462KW·h. 相比之下, 优化后的运行耗能下降了 33.27%, 而运行时间只延长了 11.96%. 可见, 本文提出的列车运行优化控制模型在保证安全运行的前提下, 能够有效的协调能耗、时间、舒适度等诸多因素之间的运行关系, 得到了比较理想的运行策略.

表 3 优化前后数据对比

运行模式	运行时间 (S)	运行耗能 (KW·h)	工况转换点(m)				
			S1	S2	S3	S6	S7
节时	92	62.133	-	-	-	-	-
优化	103	41.462	201.300	201.300	568.100	911.500	1358.600

#### 4 结论

本文提出的模型方法保证了列车的安全运行, 并把节约能耗、节省时间和提高乘客舒适度等因素有机的组合起来, 建立了基于工况转换点的列车运行优化控制模型, 提出了针对弯道的通行原则, 即弯道优行法, 通过遗传算法在多约束条件下对目标进行求解, 得到了预期的效果, 对地铁优化运行具有很好的参考意义.

#### 参考文献

- 1 丁勇, 刘海东, 栢赞, 周方明. 地铁列车节能运行的两阶段优化模型算法研究. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1): 96-101.
- 2 李玉生, 侯忠生. 基于遗传算法的列车节能控制研究. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 384-387.

- 3 朱金陵, 李会超, 王青元, 龙胜. 列车节能控制的优化分析. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 104-108.
- 4 王勇博. 采用遗传算法优化地铁多区间速度曲线和停站时间实现牵引节能的仿真研究. 南京: 南京理工大学, 2013.
- 5 Chang CS, Sim SS. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms. IEE Proceedings-Electric Power Application, 1997, 144(1): 65-73.
- 6 刘海东, 毛保华, 丁勇, 贾文峰, 赖树坤. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(5): 68-73.
- 7 雷英杰, 张善, 李续武, 周创明. MATLAB 遗传算法工具箱及应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- 8 Howlett P. Optimal Strategies for the Control of a Train. Automatica (S0005-1098), 1996, 32(4): 519-532.