

文章编号: 1005-8451 (2013) 10-0046-04

基于遗传算法列车自动运行速度曲线的优化

许 立, 王长林

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 本文探讨了列车自动运行系统 (ATO, Automatic Train Operation) 中的列车自动运行速度曲线的优化问题。根据ATO控制指标的要求, 建立了包含速度防护、舒适度、节能、精确停车等多个目标的列车运行控制模型; 采用遗传算法对列车自动运行控制策略进行优化, 验证和仿真了优化后的速度曲线, 直观反映了列车自动运行的安全性, 舒适性, 高效性和停车精度等性能提高情况。

关键词: 城市轨道交通; 列车自动运行; 遗传算法; 速度曲线的优化

中图分类号: U284.482 : TP39 文献标识码: A

Optimization of automatic train operation speed curve based on Genetic Algorithm

XU Li, WANG Changlin

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This thesis discussed the problem about optimization of automatic train operation speed curve based on Genetic Algorithm in Automatic Train Operation(ATO). Based on the demand of automatic train operation controlling target, it was established the train operation controlling mode of speed protecting, comfort, energy-saving, precise parking, optimized the automatic train operation controlling tactics by Genetic Algorithm. The improving of security, comfort, efficiency and precise parking were reflected intuitive by verifying and simulating the optimizing speed curve.

Key words: Urban Transit; Automatic Train Operation(ATO); Genetic Algorithm; optimization of speed curve

列车自动运行 (ATO) 系统最主要的功能是自动调整车速, 使列车平稳地运行并停在车站的正确位置。本文通过对ATO系统最优控制策略的研究, 采用遗传算法对控制策略进行优化, 在满足列车运行的高效性、速度防护、准时性、停车精度、舒适性、节能等指标的同时, 使列车能够根据不同运行环境, 实时地给出相适应的最优控制策略, 控制列车自动运行。

1 列车自动运行控制模型的建立

1.1 速度防护模型

列车在整个运行过程中, 其行驶速度要受到线路的限制, 以此来保证列车在行驶过程中不超速、安全平稳。所以, 列车行驶的速度防护模型为:

收稿日期: 2013-01-23

作者简介: 许 立, 在读硕士研究生; 王长林, 教授。

$$K_{\text{超速}} = \sum_{i=1}^n |V_i - V_{\text{限速}}| \quad (1)$$

公式 (1) 中, $K_{\text{超速}}$ 指列车超速衡量指标; V_i 指工况转换点的实时速度; $V_{\text{限速}}$ 指运行线路各个阶段的限速。因为列车关键点超速直接影响列车的安全运行, 此项指标在后期运算时应保证越小越好。

1.2 精确停车模型

随着城市轨道交通的发展, 屏蔽门、安全门开始在新的轨道交通线路上设置, 而屏蔽门对列车自动运行的停车要求很高, 所以采用最优控制系统, 列车在已设定的停车点的停车误差应在 ± 25 cm 范围内, 以及满足车站端线 (折返线、临时停车线) 的有效长度对保护区段长度的限制要求。

列车站台里制动时, 为保证列车门和站台门能够在同一位置上被打开, 这就要求列车在制动时能够做到精准停车, 精确停车模型为:

$$K_{\text{停车}} = |S_{\text{总}} - S_{\text{target}}| \quad (2)$$

公式(2)中, $K_{\text{停车}}$ 为停车误差衡量指标; $S_{\text{总}}$ 为列车总的行驶距离; S_{target} 为列车理想的停车点。

当 $K_{\text{停车}} \leq K_{\max}$ 时, 表示列车停在了允许的停车范围内, 能够保证列车车门和站台屏蔽门在同一位置打开。

当 $K_{\text{停车}} > K_{\max}$ 时, 表示列车未驶入或超出允许的停车范围内, 列车需要再进一步调整, 才能保证列车车门和站台屏蔽门在同一位置打开。

1.3 舒适度模型

舒适度表示为列车在运行的过程中对乘客的冲击率的大小, 冲击率越小乘客越舒服。冲击率的定义为加速度相对于时间的变化率。而在列车整个的运行过程中, 舒适度可以用冲击率对整个运行时间的积分来表示。在这里可以用单位时间里加速度差的累加和表示。所以列车运行舒适度模型为:

$$K_{\text{舒适度}} = \sum_{i=1}^n |a_i - a_{i-1}| \quad (3)$$

公式(3)中, $K_{\text{舒适度}}$ 为舒适度衡量指标; a_i 为工况点的加速度。影响列车舒适度的因素有很多, 如纵向冲击、垂向振动、噪音、左右摇动等。从列车行驶时操纵控制的角度来讲, 列车舒适度主要取决于控制档位的变化频度、加减速速度及加速度的变化率。所以在列车自动运行速度曲线优化中, 应该保证舒适度衡量指标 $K_{\text{舒适度}}$ 越小越好。

1.4 能耗模型

列车的能耗模型为列车从起点到终点的过程中, 加速过程、巡航过程、制动过程以及车厢内设备(例如空调、电灯等)所消耗的能量。因为论文主要研究列车行车过程, 所以列车的能耗为列车在整个行车过程中克服阻力做功所消耗的所有能量, 列车在行驶过程中的能量消耗函数为:

$$W = \frac{\int Fvdt}{\xi_M} + At + \xi_B \int Bvdt \quad (4)$$

公式(4)中, F 为列车行驶的牵引力; B 为列车行驶的制动力; v 为列车行驶的速度; A 为列车的辅助功率; t 为列车间运行时间; ξ_M 为牵引电能转换为机械能的乘积因子; ξ_B 为制动机械能转换为电能的乘积因子。因为主要考虑列车的行车过程, 公式(4)可以简化为:

$$K_{\text{耗能}} = \sum_{i=1}^n ma_{i-1}(S_i - S_{i-1}) \quad (5)$$

公式(5)中, $K_{\text{耗能}}$ 为列车能量消耗指标; a_i 为第 i 个工况的加速度; S_i 为第 i 个工况的位移。

2 基于遗传算法的列车自动运行速度曲线的优化

2.1 列车运行环境的数据处理

列车自动运行速度曲线的优化就必须有列车的运行环境和列车的自身属性作为一个基本的实验环境, 本文选择韶山3型车和线路环境来对列车自动运行速度曲线进行优化。列车运行环境参数如表1^[5]所示。

表1 列车运行环境参数

线路基本属性	数量值
列车运行2站区间间的长度	1 000 m
站内限速	65 km/h (18.06 m/s)
站间限速	80 km/h (22.22 m/s)
0~500 m坡度	-5 %
500~1 000 m坡度	10 %

列车运行曲线的优化还必须得有列车的自身属性, 列车自身属性的参数比较复杂, 主要包括列车的车次号、编组、加速特性、制动特性等。本文主要选择韶山3(553)型列车作为分析对象, 其具体参数是列车长度为120 m, 列车重量为200 t, 牵引1档加速度为0.2 m/s², 牵引2档加速度为0.4 m/s², 牵引3档加速度为0.6 m/s², 牵引4档加速度为0.8 m/s², 制动1档加速度为-0.25 m/s², 制动2档加速度为-0.45 m/s², 制动3档加速度为-0.65 m/s²。

2.2 用遗传算法优化列车自动运行速度曲线

遗传算法是解决搜索问题的一种通用算法, 对于各种通用问题都可以使用, 从优化搜索的角度而言, 遗传操作可使问题的解一代又一代地优化, 并逼近最优解, 遗传算法的流程如图1所示。

2.2.1 编码

编码是应用遗传算法的关键步骤, 目前主要应用的编码方式有二进制编码和实数编码。ATO最优速度曲线通俗讲就是: 在列车行驶过程中保证文中的多个衡量指标前提下在某个特殊位置需要选择某个档位。然后根据加速度和位置的关系

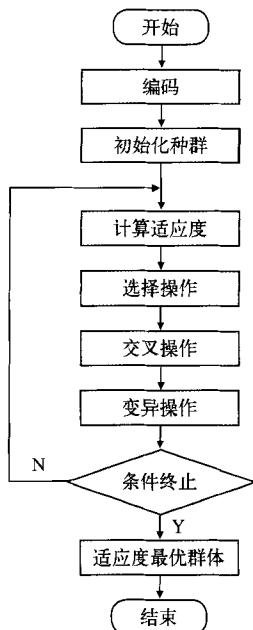


图1 遗传算法流程图

得到一条优化的速度曲线。所以对列车速度曲线的优化转化为对这些特殊位置的位移和加速的研究，即关键工况点的位置和所选档位的研究。

根据遗传算法的构造染色体的思路，可以联想到将关键点的位置和此位置所选的档位共同

$$K_{\text{总}} = \omega_{\text{超速}} \left(\sum_{i=1}^6 \left| \sqrt{2a_{i-1}(S_i - S_{i-1}) + v_{i-1}^2} - v_{\text{限中}} \right| + \left| \sqrt{2a_6(S_7 - S_6) + v_6^2} - v_{\text{限后}} \right| \right) + \omega_{\text{停车}} |S_9 - S_{\text{target}}| + \omega_{\text{适应度}} \sum_{i=1}^9 |a_i - a_{i-1}| + \omega_{\text{耗能}} \sum_{i=1}^9 m a_{i-1} (S_i - S_{i-1})$$

组合成一条描述列车运行工况的染色体。再将此染色体进行二进制编码，那么这个二进制编码序列就可以完全表示出列车的工况信息。本文列车运行环境中线路长为 1 000 m，加速度 8 级档位加速度，用 10 bit 二进制表示线路位置，用 3 bit 二进制表示对应位置的加速度信息。最终用 13 bit 二进制将关键点工况的位置表示出来，此二进制即表示一条含关键点位置信息的染色体。例如染色体为 0011001000010，它表示位置为 200 m 的地方使用的档位为 2，即对应的加速度为 0.4 m/s^2 。论文假设线路长度为 1 000 m，在 1 000 m 里最多需要 10 个工况即可把整条线路的控制任务完成，所以单条染色体的长度 (bit) 是 130 bit。

2.2.2 群体设定

遗传算法群体规模大小的选择很重要，群体规模太大，会使适应度评估次数增加，计算量会很大，效率很低，另外群体规模太大，大多数个

体会被淘汰，影响交叉操作。所以本文选择 50 条染色体构成的群体来完成操作。

2.2.3 适应度函数

列车自动运行速度曲线的优化适应度函数包含超速限制指标适应度，精确停车指标适应度，舒适度指标适应度和节能指标适应度。因为列车最优控制策略是对这个行驶过程的优化控制，所以此策略是综合各个指标的全局最优策略。在得到 4 个指标的各自适应度后，还需求出一个综合 4 个指标的整体适应度，以此来保证遗传操作是以总体适应度为选择依据。但从经验可知，列车在这个控制过程中这 4 个指标所占的权重不是完全相同的，而且相同指标在不同运行环境中运行时所占总环节的权重也不是完全相同，因此在构造整体的适应度函数时需要为这 4 个指标指定各自的权重，便于随不同运行环境的变化来调整整个适应度函数。整体适应度函数为：

$$K_{\text{总}} = \omega_{\text{超速}} K_{\text{超速}} + \omega_{\text{停车}} K_{\text{停车}} + \omega_{\text{舒适度}} K_{\text{舒适度}} + \omega_{\text{耗能}} K_{\text{耗能}} \quad (6)$$

将各个指标的适应度代入可得：

$$K_{\text{总}} = \omega_{\text{超速}} \left(\sum_{i=1}^6 \left| \sqrt{2a_{i-1}(S_i - S_{i-1}) + v_{i-1}^2} - v_{\text{限中}} \right| + \left| \sqrt{2a_6(S_7 - S_6) + v_6^2} - v_{\text{限后}} \right| \right) + \omega_{\text{停车}} |S_9 - S_{\text{target}}| + \omega_{\text{适应度}} \sum_{i=1}^9 |a_i - a_{i-1}| + \omega_{\text{耗能}} \sum_{i=1}^9 m a_{i-1} (S_i - S_{i-1}) \quad (7)$$

公式 (7) 中， S_i 和 a_i 是指第 i 个工况的位置和加速度，可以从染色体中直接获得，当获得了 S_i 和 a_i 后， v_i 可以通过公式 (8) 获得，即：

$$\begin{cases} v_0 = 0 \\ v_i = \sqrt{2a_{i-1}(S_i - S_{i-1}) + v_{i-1}^2} \quad i=1, 2, \dots, 9 \end{cases} \quad (8)$$

因为论文是对列车自动运行速度曲线的优化，所以要求 $K_{\text{总}}$ 越小越好，而遗传算法是按照适应度的最小值进行淘汰种群个体，按照适应度非最小值保留个体，所以将总适应度函数定为：

$$F = \frac{1}{K_{\text{总}}} \quad (9)$$

当经过编码，种群的初始化，计算个体的适应度函数后，如果不满足终止条件（指各个指标）或者群体的适应度还在上升，则要经过选择、交叉和变异得到下一代种群，直到满足终止条件或者达到设定的群体代数，结束算法，否则要从计

算适应度开始循环操作。

3 列车自动运行优化曲线系统的验证和仿真实现

本文对列车自动运行速度曲线进行验证和仿真。根据前面介绍的线路数据和列车自身属性的数据以及常用的遗传算法的参数的取值范围，根据经验默认将超速防护、精确停车、舒适度和节能指标的权重设置为对应的 0.4, 0.3, 0.2 和 0.1。然后分别测试了种群大小为 20, 种群代数为 100; 种群大小为 50, 种群代数为 100 和种群大小为 50, 种群代数为 200 情况下对列车速度曲线的优化。得到的实验结果如表 2 所示。

表2 列车自动运行优化曲线仿真实验结果

实验组数	实验环境	超速指标	停车精度指标	舒适度指标	耗能指标	停车位置
1	20/100	17.53	67.80	1.37	2 881	975.07
2	50/100	21.24	5.20	1.08	288	991.03
3	50/200	5.22	0.18	0.56	37.06	999.86

由表 2 可以看出，不同的实验组数各项指标的优化程度还是比较明显的。停车精度指标由 67.80 优化到了 0.18，停车误差在 14 cm 低于论文的研究目标 ± 25 cm；舒适度指标由 1.37 优化到了 0.56，加速度变化率最大为 1.26 m/s^2 低于国际通用的 $1.7 \text{ m/s}^2 \sim 1.8 \text{ m/s}^2$ ；耗能指标由 2 881 优化到了 37.06；超速指标由 17.53 优化到了 5.22，通过计算可知，列车优化后的速度均未超过限速

的规定。根据表 2 分别得到的 ATO 加速度优化曲线和 ATO 速度优化曲线如图 2 所示。

ATO 加速度优化曲线即该线路 ATO 最优控制策略的优化，从图中可以看出列车在对应位置上的加速度（即档位值），表示 ATO 在该线路中某个位置用某种档位；而 ATO 速度优化曲线，直观地反映了列车在对应位置上对应的速度值。图 2 中棕色，绿色和紫色曲线分别表示初始种群为 20，最大代数为 100，初始种群为 50，最大代数为 100，以及种群为 50，最大代数为 200 时 ATO 加速度优化曲线和 ATO 速度优化曲线。通过比较可以看出，种群为 50，最大代数为 200 时，ATO 控制策略取得最优，列车自动运行曲线效果最好。因此可以选取第 3 组实验环境，即初始种群为 50，最大种群数为 200，作为该线路上基于遗传算法的列车自动运行速度曲线优化的参数，仿真得到的曲线为该线路列车自动运行的最优曲线。

4 结束语

列车自动运行速度曲线的优化是 ATO 系统的关键部分，本文通过建立列车自动运行速度曲线超速防护，精确停车，舒适度和能耗模型；采用遗传算法对列车控制策略进行优化，根据最优控制策略对列车自动运行速度优化曲线进行了仿真，仿真结果表明列车自动运行的安全性，停车精度，舒适度和能耗均能得到很好的优化。

参考文献：

- [1] 唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (2): 98-102.
- [2] Yasunobu S. Application of predictive fuzzy control to automatic train operation controller [R]. Proc. of IECON, 1984.
- [3] 刘金琨. 智能控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005 (5): 18-54.
- [4] 张中央. 列车牵引计算 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [5] 刘翔, 朱晓敏. 城市轨道交通列车自动运行 (ATO) 最优控制策略的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

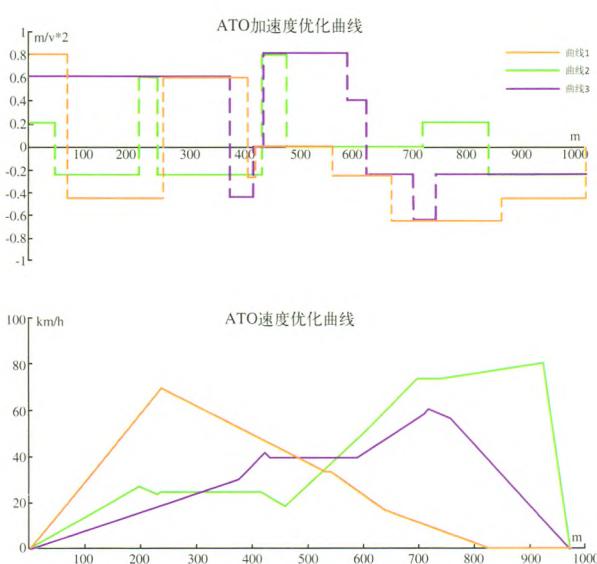


图2 列车自动运行速度优化曲线

责任编辑 方圆