

文章编号：1005-8451 (2016) 11-0001-05

基于多目标遗传算法的地铁列车定时节能算法研究

桂行东，张永，张圣乐，王晓龙，刘建新

(南京理工大学 自动化学院，南京 210094)

摘要：针对地铁列车定时节能复杂多目标优化问题，建立以节能和准时为优化目标的列车定时节能模型，采用多目标遗传算法求出一组最优驾驶策略解。该方法通过具体分析列车行驶过程中的不同受力状态，充分考虑限速、最大加速度、定点停车等约束条件，采用分解协调的思想将复杂的多目标优化问题分解成多个阶段子问题，通过线性加权和多次迭代，求出最优解。最后通过算例和仿真结果表明该算法的有效性。

关键词：多目标遗传算法；定时节能；定点停车

中图分类号：U231.92 TP39 **文献标识码：**A

Timing and energy saving algorithm for subway train based on multi objective genetic algorithm

GUI Xingdong, ZHANG Yong, ZHANG Shengyue, WANG Xiaolong, LIU Jianxin

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Timing and energy saving for subway train is a multi-objective optimization problem. The timing and energy saving model for the train was built based on timing and energy saving optimization. The multi-objective genetic algorithm was used to find an answer of optimal driving strategy. In this method, the complex multi-objective optimization problem was decomposed into several sub problems with the idea of decomposition and coordination, through analyzing the different stress states during the train running, considering the constraints such as the speed limit, the maximum acceleration, fixed point parking, and etc., the optimal solution was obtained by means of linear weighting and iteration. Finally, a numerical example and simulation results showed that the proposed algorithm was effective.

Key words: multi-objective genetic algorithm; timing and energy saving; fixed stop

随着城市轨道交通能耗越来越大，如何有效地提高能源利用率，降低运营成本，成为城市轨道交通发展中的关键问题^[1]。在地铁节能控制研究方面，目前较为常用的方法是只针对惰行控制的优化。Wong KK、Ho T K^[2]对城轨列车牵引情况下的优化操纵方法进行了研究，运用搜索算法得到了惰行点。何鹏飞^[3]提出由节时模式向节能模式转化操纵方法。许立等^[4]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，同时采用遗传算法对列车自动运行控制策略进行优化。马超云等^[5]建立了定时约束条件下地铁列车节能运行惰行控制优化模型，将遗传算法嵌入到城市列车运行计算系统

中，设计了惰行控制优化模块。

本文在借鉴国内外研究成果的基础上，针对巡航阶段和惰行阶段同时进行优化控制，进而得到列车在整个区间的优化行驶策略。采用多目标遗传算法与地铁列车运行能耗仿真计算模型相结合的方法，以节能和准时为优化目标，引入超时惩罚因子构建目标函数，同时充分考虑定点停车、限速、车辆最大加速度等约束条件，通过遗传算法和地铁运行能耗仿真计算模型求出一组最优解。仿真结果证明该方法能够实现列车节能运行、准时到达、定点停车。

1 列车能耗计算模型

1.1 列车模型

考虑到简化列车的位置和控制，本文将列车等

收稿日期：2016-03-19

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFB1200402）。

作者简介：桂行东，在读硕士研究生；张永，副教授。

效为一个质点来看，则列车的运动特性可以根据牛顿运动定律来描述。列车在运行过程中受到的外力包括：列车牵引力 F 、列车制动力 B 和列车运行总阻力 W 。列车牵引力 F 和制动力 B 分别由列车的牵引和制动系统决定，其最大值都与速度相关，分别为： $F_{max}=f_F(v)$ 、 $B_{max}=f_B(v)$ 。列车总阻力按其形成原因可分为基本阻力和附加阻力。基本阻力与许多因素有关，实际应用中很难用理论公式进行准确计算，通常采用以下经验公式进行计算：

$$W_0 = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad (1)$$

其中， W_0 为单位基本阻力 (N/kN)， A 、 B 、 C 为阻力多项式系数，通常取经验值， v 为列车速度 (km/h)。

附加阻力主要考虑坡道附加阻力和曲线附加阻力。

$$W_1 = W_i + W_c \quad (2)$$

综上，列车运行总阻力可按照如下公式计算：

$$W = (W_0 + W_1) \cdot g \cdot M / 1000 \quad (3)$$

其中， g 为重力加速度。

列车计算主要包括列车的速度 v ，位移 s 、功率 p 及牵引能耗 E 的计算^[6~7]。

(1) 速度计算

$$v_n = v_{n-1} + a \cdot \Delta t \quad (4)$$

其中， v_n 、 v_{n-1} 分别为第 n 次和第 $n-1$ 次计算的列车速度， a_n 为第 n 次计算时列车的加速度， Δt 为仿真步长。

(2) 位移计算

$$s_n = s_{n-1} + v_n \cdot \Delta t \quad (5)$$

其中， s_n 、 s_{n-1} 分别为前 n 次和前 $n-1$ 次计算的列车位移和。

(3) 牵引功率计算

$$P_n = F_n \cdot v_n \quad (6)$$

其中， P_n 为列车第 n 次计算时列车的牵引功率， F_n 为列车第 n 次计算时的牵引力。

(4) 牵引能耗计算

$$E = \sum_1^N P_n \cdot \Delta t \quad (7)$$

1.2 优化计算模型

模型中，列车运行包含 4 种工况：牵引、巡航、惰行和制动。在惰行阶段，列车既不牵引也不制动，

列车运行状态取决于受到的列车总阻力，为节能行驶状态，故列车节能模式下运行，需要尽可能考虑惰行的行驶状态。随着惰行次数的减少，列车惰行控制的范围就增大，同时牵引控制的范围就越小，因此在优化中采用惰行一次的优化策略，更利于列车节能行驶。制动阶段普遍采用再生制动的制动方式，能够将列车的机械能部分转化为电能供其他机车和线路储能装置使用，属于能量回馈过程，本文仿真中假设再生制动产生的电能被完全利用。4 段工况选择不同，会产生多组不同但满足时分要求的 { 路程 - 速度 } 曲线。每一条曲线，对应 3 个工况转折点 $\{D_1, D_2, D_3\}$ ，如图 1 所示，同时对应 1 个运行时间和能耗值。所以单车节能优化问题就转化为 4 段列车运行工况段的优化问题，即 3 个工况转折点的优化问题。仿真计算过程中考虑到定点停车，需要计算出列车何时何地开始制动能安全到站 D_3 (制动开始点) 随 D_2 (惰行开始点) 的变化而变化，故只需要考虑优化匀速开始点 D_1 和惰行开始点 D_2 。

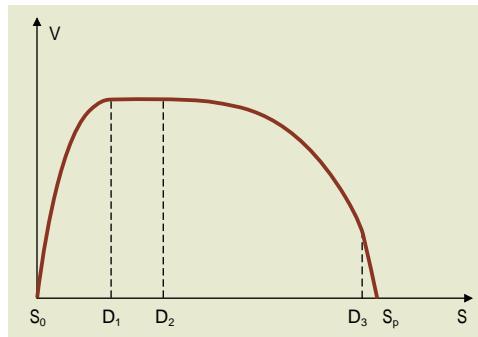


图1 列车运行工况示意图

列车从 S_0 牵引运行至 D_1 ，在 $D_1 \sim D_2$ 之间巡航运行，从 $D_2 \sim D_3$ 之间惰行，经过 D_3 后开始制动，在 S_p 处停车。列车运行在加速、巡航、惰行、制动 4 个区段，所对应的速度分别为 $v_1 \sim v_4$ ，加速度分别为 $a_1 \sim a_4$ ，运行时间分别为 $t_1 \sim t_4$ ，能耗值分别为 $E_1 \sim E_4$ ，站间给定的运行时分为 T_D 。

2 多目标遗传算法的设计

许多决策问题都是多目标优化问题，有时需要使多个目标在给定区域上达到最优，这些目标函数之间不可以相互比较，甚至是相互冲突的。在单目标优化问题中，最优解往往是唯一确定的，而多目

标优化问题，最优解通常是一个解集。由于遗传算法可以有效地利用已有的信息处理来搜索哪些有希望改善质量的串，故本文采用多目标遗传算法^[8]，并采用权重系数变换法来求解列车定时节能问题，将节能、定时两个目标优化问题，转化为单目标优化问题，求解出一组最符合实际要求的解。

(1) 编码：因为本优化模型对精度，搜索空间要求比较高，所以本文采用实数编码方式，一个站间行驶区段，个体采用 {D₁、D₂} 的编码形式，其中，D₁<D₂，D₁ 和 D₂ 分别表示匀速开始点和惰行开始点的位置。

(2) 初始种群：设置种群大小，采用随机的方法产生初始种群，其中，在 (0, S_p) 之间随机产生 D₁，在 (D₁, S_p) 之间随机产生 D₂。

(3) 适应度函数：列车定时节能优化问题是求多目标的最小值问题。列车定时节能运行优化模型的目标函数为：

$$\text{MinF} = \alpha \cdot K_T + \beta \cdot K_E \quad (8)$$

其中，K_T 为准时性能指标：

$$K_T = \begin{cases} |T - T_D| & T \leq T_D \\ |T - T_D| \cdot P_f & T > T_D \end{cases}$$

P_f，T，T_D 分别为超时惩罚因子，列车实际运行时长和约定运行时间；

K_E 为节能性能指标，为列车在 4 个阶段的能耗和，即 K_E= $\sum E$ ；

α 为运行时间权重， β 为节能运行权重：

$$\alpha + \beta = 1$$

约束条件为：

$$a_i \leq a_{\max} \quad (9)$$

$$v_i \leq v_{\max} \quad (10)$$

$$|S_p - S| \leq 0.25 \quad (11)$$

$$C = f(i, c, V_T, L_c) \quad (12)$$

上述约束条件中，a_{max} 为最大加速度，v_{max} 为列车最大行驶速度，式(12)中，i 为对应公里标区间坡度，c 为对应公里标区间曲率，V_T 为对应公里标的限制速度，L_c 为列车车长、计算重量、再生制动转化效率等相关的数据。

(4) 选择：按轮盘赌选择方法执行遗传算法的选择操作，将当前群体中适应度最高的染色体结构

完整地复制到下一代种群中，保证遗传算法终止时得到解是历代出现的最高适应度的解。

(5) 交叉：采用在组成父代个体中随机选择部分个体进行单点交叉操作，以形成后代。

(6) 变异：变异算子依概率选择一部分个体实施均匀变异。

根据多目标遗传算法，设计仿真流程：(1) 通过多目标遗传算法的产生列车实际驾驶策略；(2) 通过列车运行能耗仿真计算求出对应适应度值；(3) 多次迭代求出最优解。程序流程图如图 2 所示。

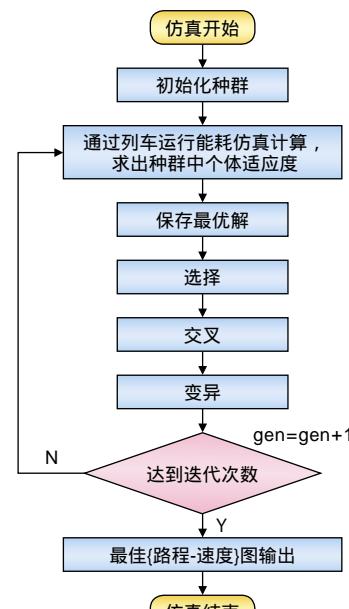


图2 仿真流程图

3 仿真实例验证

(1) 线路数据：列车从 A 站到 B 站直线行驶，A 站的公里标为 13 594 m，B 站的公里标为 12 240 m；坡度和限制速度见表 1 所示。

表1 坡度和限制速度表

公里标/m	12 240~112 290	12 290~12 910	12 910~13 290	13 290~13 594
坡度 i/N/kN	0	3.5	-1.8	0
公里标/m	12 240~13 474		13 474~13 594	
限制速度 V _r /km/h	80		55	

(2) 机车数据：列车编组方式为地铁机车牵引，列车车长 115 m，车辆重量设为 194.295 t，最大行驶速度 v_{max} 设为 80 km/h，最大加速度 a 为 1 m/s²。

(3) 运行参数设定：站间给定运行时间 T_D 为 110 s，准时权重 α 与节能权重 β 各为 0.5。

(4) 遗传算法中的参数设定：设初始种群大小为30，交叉概率为0.8，变异概率为0.05，遗传代数为50代。

(5) 能耗仿真计算模型参数设定：仿真步长 Δt 设为0.01 s，再生制动转化效率为0.95，列车的阻力系数A、B、C分别为2.031、0.0622、0.001807。

(6) 仿真结果分析：利用MATLAB软件，进行定时节能模式计算，仿真结果的{公里标—速度}曲线如图3所示，目标函数变化图如图4所示。在图4中可以看出，本文采用的多遗传算法在5代左右就开始得到很好的收敛效果，且种群的均值变化也越来越小。

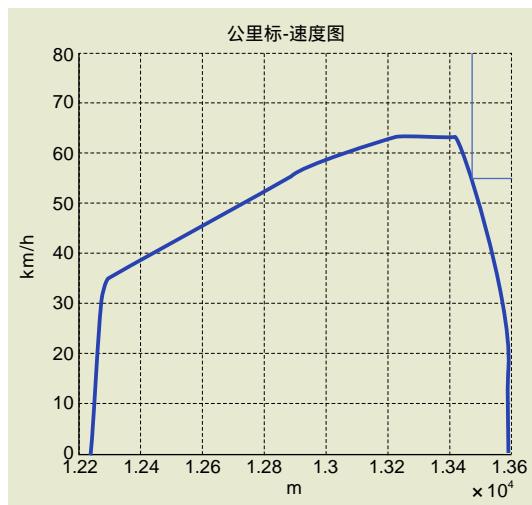


图3 定时节能模式下列车控制方案

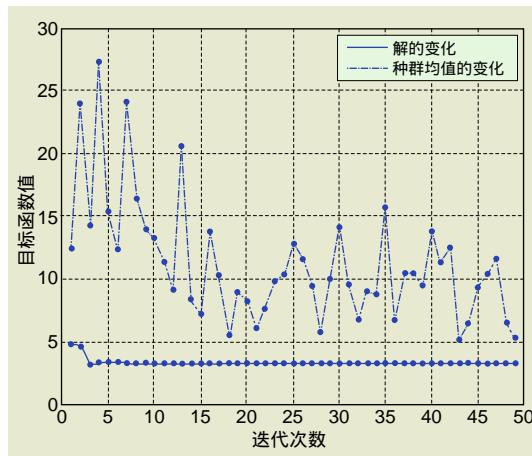


图4 遗传算法种群的变化图

为了进行节能对比，本文同时进行了一次定时节能模式下的列车控制运行仿真（节时模式，即列车运行过程中仅考虑限制速度，以最大速度行驶至

终点），得到的仿真结果{公里标—速度}曲线，如图5所示。

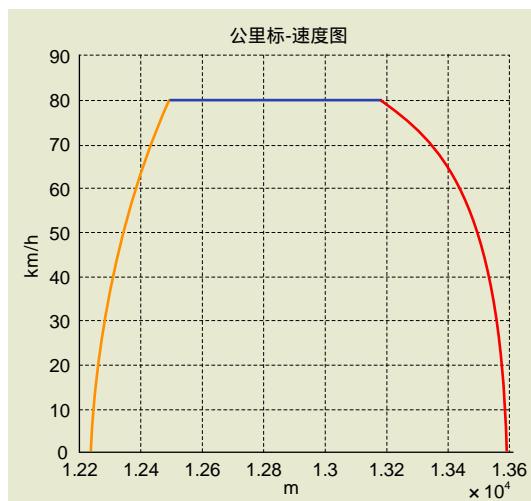


图5 节时模式下列车控制方案

通过定时节能优化算法计算后得到一组最优解，A站到B站最优运行，总能耗为8.2396 kW·h，时间为109.4462 s，与要求给点的时间110 s提前了0.4538 s，同时列车实现了在限速以下安全行驶，和定点停车的要求，故该算法能够满足列车行驶需要。同时以节时算法得到一组解和定时优化算法的对比。A站到B站运行总能耗为12.6596 kW·h，运行时间为85.23 s，与要求给点的时间110 s提前了24.77 s。通过两种方案的对比可以看出，在定时节能模式下，列车运行时间向后延迟了22.01%，但是总能耗节约了34.91%，可见定时节能算法有利于降低列车的运行能耗，同时优化算法优化结果比较理想。

4 结束语

本文通过将多目标遗传算法与列车运行能耗计算模型相结合，实现了给定线路条件下站间列车匀速点、惰行点的自动寻优，最终计算出一组最优控制方案。在满足给定列车运行时间、安全行驶以及定点停车等条件的基础上，合理地优化列车的巡航段和惰行段，实现了有效地降低列车的运行能耗。

参考文献：

- [1] 胡辉.面向节能减排的列车运行控制模型和算法研究[D].北京：北京交通大学，2013.

(下转 P14)

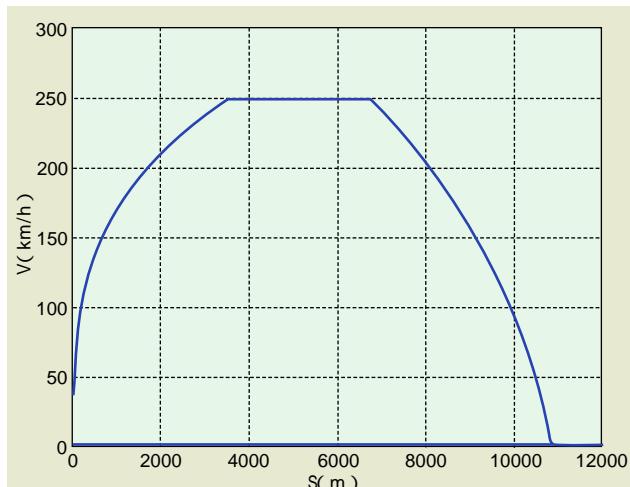


图7 多质点列车运行仿真结果

参考文献:

- [1] 胡跃兵 , 蔺红生 . 多质点列车牵引计算系统设计与实现 [J]. 中国铁路 , 2013 (6) :47-50.
- [2] 江东杰 .CRH3 型动车组牵引传动系统 [J]. 铁道机车车辆 , 2008 , 28 (12) :96.
- [3] 陈 涛 . 高速列车运行能耗测算方法及其影响因素量化分析 [D]. 北京 :北京交通大学 , 2011 (6) :21.
- [4] 王长林 , 林 翎 . 列车运行控制技术 [M]. 成都 :西南交通大学出版社 , 2008.
- [5] 马少坡 , 刘 炜 , 周晓辉 . 基于惰行节能规律的列车运行仿真研究 [J]. 铁道机车车辆 , 2011 , 31 (3) :25-29.

责任编辑 陈 蓉

(上接 P4)

- [2] Wong K.K. ,Ho T K. Coast Control of Train Movement with Genetic Algorithm [J]. Evolutionary Computation 2003(2): 1280-1287.
- [3] 何鹏飞 . 列车行车优化操纵的研究 [J]. 铁路计算机应用 , 2013 , 22 (6) :14-16.
- [4] 许 立 , 王长林 . 基于遗传算法列车自动运行速度曲线的优化 [J]. 铁路计算机应用 , 2013 , 22 (10) :46-49.
- [5] 马超云 , 丁 勇 , 杜 鹏 , 等 . 基于遗传算法的列车节能运行惰行控制研究 [J]. 铁路计算机应用 , 2010 , 19 (6) :4-8.

- [6] 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 [D]. 南京 :南京理工大学 , 2013.
- [7] 韩龙涛 . 地铁列车牵引计算及仿真 [D]. 北京 北京化工大学 , 2014.
- [8] Goldberg D.E.GeneticAlgorithmsinSearch,OptimizationandMachine Learning [M]. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, New York , 1989.

责任编辑 陈 蓉

(上接 P8)

- [4] 石 坚 , 吴远鹏 , 卓 斌 , 等 . 汽车驾驶员主动安全性因素的辨识与分析 [J] . 上海交通大学学报 , 2000 , 34 (4) : 441-444 .
- [5] BERGASA L M , NUEVO J , SOTELO M A , et al. Real-time system for monitoring driver vigilance [J]. IEEE Transactions on Intelligent transportation Systems, 2006, 7(1) : 63-77 .
- [6] Cootes T F,Cooper D H, and Taylor C J , et al.Active shape models-their training and application[J]. Computer Vision and Image Understanding,1995,61(1): 38-59.
- [7] G.J. Edwards, A. Lanitis, C.J. Taylor, and Cootes T F. Statistical Models of Face Images-Improving Specificity[J].Image Vision Computing,1998, 16(3):203-211.
- [8] Viola P, Jones M J.Robust real-time face detection [J].International Journal of Computer Vision, 2004, 57(2): 137-154.
- [9] Takahiro Ishikawa, Simon Baker,Iain Matthews, Takeo Kanade.Passive Driver Gaze Tracking with Active Appearance Models[C].Proc. 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems,2004:1019-2025.

- [10] Cootes T F,Edwards G J and Taylor C J. Active appearance models [J]. Proc European Conference on Computer Vision, 1998(2):484-498.
- [11] Kass M, Witkin A, and Terzopoulos D.Snake:active contour models[J]. Int. Journal of Computer Vision, 1987,1(4):321-331.
- [12] 李 爽 . 疲劳驾驶特征和参数提取研究 [D]. 济南 :山东大学 , 2013.
- [13] Cootes T F, Edwards G J and Taylor C J. Active appearance models[J]. Proc. European Conference on Computer Vision, 1998 (2): 484-498.
- [14] Cootes T F, Edwards G J and Taylor C J.Active appearance models[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 681-685.
- [15] 施树明 , 金立生 , 平荣本 , 等 . 基于机器视觉的驾驶员嘴部状态检测方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2004 (4).

责任编辑 陈 蓉