

文章编号:1000-582X(2013)04-039-06

多维并行遗传算法在列车追踪运行节能优化中的应用

卢启衡,冯晓云

(西南交通大学 电气工程学院,成都 610031)

摘要:为了研究先行列车与追踪列车在移动闭塞信号系统控制下进行追踪运行时的综合节能优化控制问题,构建了以能耗与运行时间误差为目标的列车节能控制模型。该模型以列车的操纵手柄级位与列车的工况转换点(即操纵手柄级位改变时,列车的位置)为控制变量。在此基础上,提出了静态与动态速度约束条件(即线路的静态速度约束与先行列车的运行状态对其后的追踪列车所产生的动态速度约束),结合外部惩罚函数,利用多维并行遗传算法对该问题进行了求解。求解时,根据 GA 的进化代数动态的调整交叉与变异概率,提高粗粒度搜索与细粒度搜索的效率。同时,采用了坡道三分法和实数编码法来缩短染色体长度,提高收敛速度。最后,在移动闭塞信号系统列车运行仿真平台上验证了该优化控制算法的正确性与有效性。

关键词:优化控制系统;节能;列车追踪运行;动态速度约束;移动闭塞信号系统;遗传算法
中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A

Application of multi-dimension parallel genetic algorithm to energy-saving optimum control of trains in following operation

LU Qiheng, FENG Xiaoyun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the energy-saving optimum control strategy of a leading train and a tracing train in following operation under a moving block system, an energy-saving control model of trains is created. The aims of the model are energy consumption and trip time error. The control variables of this model are the operating handle level and the train's position when the operating handle level is changed. Based on the model, the static and dynamic speed restraints are put forward. The static speed restraints are defined by the line conditions and the dynamic speed restraints of the tracing train caused by the leading train for the sake of safety. This problem is solved with the help of multi-dimension parallel genetic algorithm (GA) and external punishment function. During the solving process, the crossover probability and the mutation probability are adjusted dynamically according to the GA generation to improve the efficiency of the coarse grain search and the fine grain search. Ramps divided into three parts and the real number coding are adopted to shorten the length of chromosomes and improve the speed of convergence. Its correctness and effectiveness are validated at a simulation platform of train operation.

Key words: optimal control systems; energy-saving; following operation of trains; dynamic speed restraints; moving block system; genetic algorithms

收稿日期:2012-12-05

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A05)

作者简介:卢启衡(1972-),男,西南交通大学博士研究生,主要从事列车自动控制与辅助驾驶研究,
(E-mail)luqiheng@gmail.com。

随着中国能源短缺问题的日益严重,对铁路运输部门这样的能耗大户进行节能优化控制问题的研究就显得尤为重要。列车节能控制的关键在于优化列车运行的操纵方式。正常情况下,铁路运行图给列车司机采用不同的操纵方式提供了选择空间,而不同的操纵方式对应着不同的能耗,这使列车节能优化控制成为可能。

近年来,列车的节能优化控制问题引起了国内外许多学者的关注,对此都作了深入的研究。由于列车的运行具有多目标、大滞后及非线性的特点,各种人工智能算法在此问题上得到了广泛的应用。在这些算法中,遗传算法的应用较为普遍^[1-5]。研究方法都是构造相应的染色体,在充分考虑了安全与准点的前提及各种约束条件的基础上,将列车的运行能耗作为目标求解。人工神经网络也可以较好地解决该问题^[6-7],但人工神经网络的训练数据的好坏直接与最后的优化结果密切相关。其他人工智能算法还包括最大—最小蚂蚁系统算法和双启发算法^[8-9]。除了人工智能算法外,优化控制理论中的最大化原则也可以用于该问题的求解^[10-12],但因为涉及到较多的复杂数学解析运算,求解过程较为繁琐。针对多列列车在轨道上追踪运行时,节能优化所面临的更加复杂的情形,也有一些相关的研究^[13-14]。这些研究包括在移动闭塞的条件下,讨论对多列列车的追踪运行进行仿真所面临的各种运行约束、驾驶原则及驾驶习惯等问题^[13],以及追踪列车的节能优化问题^[14]。

文献[1-12]中的研究对象都是一列单独行驶的列车,没有涉及列车追踪运行的情况。文献[13-14]的研究虽然涉及了列车的追踪运行,但研究目标只是追踪列车,没有将先行列车纳入研究范围。文中将追踪运行中的先行列车与追踪列车作为共同研究对象,提出静态速度(由线路条件确定)与追踪列车的动态速度(由先行列车的运行状况确定)约束条件,构建了给定约束条件下的列车节能优化控制模型,并利用多维并行遗传算法进行全局寻优,在寻优过程中,采用了基于阶段进化的适应性策略,求得列车群的综合节能优化操纵策略。

1 移动闭塞

移动闭塞的设想最初是由汪希时教授于 1963 年提出的,其目的是为了提提高列车运行效率。

移动闭塞系统不像固定闭塞那样划分闭塞区间,该系统取消了地面信号机,采取目标距离控制模式,即根据目标距离、目标速度及列车本身的性能确

定列车制动曲线,不设定每个闭塞分区速度等级,采用一次制动方式。在列车追踪运行时,移动闭塞系统大大缩短列车运行的空间与时间间隔,提高了线路通过能力和行车密度。

移动闭塞示意图如图 1 所示。

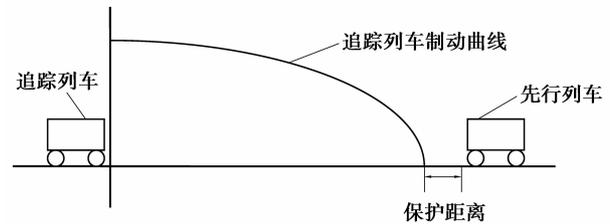


图 1 移动闭塞原理示意图

2 问题描述与模型建立

2.1 问题的描述

在移动闭塞信号系统的控制下,先行列车与追踪列车依次发车,在安全、准点的前提下到达终点并停车。先行列车与追踪列车的能耗分别为 Q_1 和 Q_2 , 目标函数为

$$\min(Q_1 + Q_2). \quad (1)$$

设 X_1 和 X_2 分别为先行列车与追踪列车的控制变量,则式(1)转化为

$$\min(f(X_1) + f(X_2)). \quad (2)$$

该问题的控制变量有 2 个,分别为列车的操纵手柄级位与操纵手柄级位改变时列车的位置。因为列车在运行的过程中,操纵手柄会改变多次,所以,式(2)中的控制变量 X_i 可用一个二维矩阵来表示:

$$X_i^T = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T = \begin{pmatrix} l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{in} \\ p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

在式(3)中, l_{ij} 是列车操纵手柄的级位, p_{ij} 是列车操纵手柄改变为 l_{ij} 时列车的位置。于是,式(2)即转化为

$$\min(f(X_1^T) + f(X_2^T)). \quad (4)$$

2.2 模型的建立

2.2.1 列车的动力学方程

列车在运行的过程中,会受到机车牵引力、各种阻力及制动力的综合影响,其中涉及到的动力学公式如下所示:

列车的运行加速度

$$a = \frac{(f_v - r_v - p_s) \times 9.8}{1\ 000}, \quad (5)$$

列车运行的基本阻力

$$r_{(v)} = a + bv + cv^2, \quad (6)$$

列车常用制动力

$$B = B_k + B_d = \sum(\varphi_h \cdot \sum K_h) + B_d, \quad (7)$$

列车运行的综合功耗

$$Q_{(T)} = \int_0^T Q_{y(t)} dt = \int_0^T \frac{U_w \sum [(I_{p2} + I_{p0}) \Delta t]}{60} dt, \quad (8)$$

式中: a 为列车运行加速度, m/s^2 ; $f(v)$ 、 $r(v)$ 及 $p(s)$ 分别表示列车对应于不同速度及位置的单位牵引力、基本阻力、坡道阻力, N/kN ; a 、 b 、 c 为列车的基本阻力系数; B 为列车常用制动力, kN , B_k 为列车常用空气制动力, φ_h 为列车闸瓦的换算摩擦系数, K_h 为列车的换算闸瓦压力之和, kN , B_d 为列车动力制动力; Q_T 为列车运行总能耗, $kW \cdot h$; U_w 为列车受电弓处网压, kV ; I_{p0} 和 I_{p2} 分别为机车的自用有功电流和部分负荷的平均有功电流, A 。

2.2.2 约束条件

1) 线路静态速度约束

线路的静态速度约束是指线路情况对列车运行速度的限制, 包括弯道、隧道、道岔及其他速度约束, 为

$$V_{\max_s(s)} = \begin{cases} V_{\max_s[1]}, & 0 \leq s \leq S_{[1]} \\ V_{\max_s[2]}, & S_{[1]} \leq s < S_{[2]} \\ \dots\dots \\ v_{\max_s[n]}, & S_{[n-1]} \leq s < S \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $V_{\max_s[i]}$ 为线路各区间的最高运行速度, km/h ; $S_{[i]}$ 为线路各限速区间的分界点位置, m ; s 为列车当前的位移, m 。

2) 先行列车对追踪列车产生的动态速度约束

先行列车的动态速度约束是指基于安全的前提, 先行列车的运行状态对其后的追踪列车所产生的速度约束, 该约束与先行列车及追踪列车所在的位置、运行速度、列车的制动性能及信号系统密切相关。

在移动闭塞系统和绝对制动距离计算方式(即“撞硬墙”方式)下, 列车的追踪距离为

$$L_{Z(v)} = L_{ZD(v)} + L_S + L_T, \quad (10)$$

式中: $L_{Z(v)}$ 为列车在当前速度 v 下的追踪距离, m ; $L_{ZD(v)}$ 为列车在当前速度 v 下的常用制动距离, m ; L_S 为安全距离, m ; L_T 为列车的长度, m 。

在移动闭塞系统下, 追踪列车在时刻 t 的动态速度约束条件为

$$V_{\max_d(t)} \{ \max(v) \mid S_{1(t)} - S_{2(t)} \geq L_Z(v(t)) \}, \quad (11)$$

式中: $S_{1(t)}$ 和 $S_{2(t)}$ 分别为先行列车与追踪列车在时

刻 t 的位置, m ; $L_{Z(v(t))}$ 为追踪列车在时刻 t 时的速度 v 所对应的追踪距离, m 。

3) 列车运行工况转换约束

列车的运行工况有牵引、惰行与制动 3 种, 其转换约束如表 1 所示。

表 1 列车工况转换原则

当前工况	待转换工况		
	牵引	惰行	制动
牵引	○	◎	●
惰行	◎	○	◎
制动	●	◎	○

注: ○ 无需转换; ◎ 可以转换; ● 禁止转换

2.2.3 目标函数

因为本问题的求解过程牵涉的约束较多, 为了简化求解过程, 利用外部惩罚函数法将其转化为无约束的控制问题。目标函数为

$$\min E = E_1 + E_2, \quad (12)$$

式中, E_1 和 E_2 分别为先行列车与追踪列车的目标函数, 计算过程为

$$E_1 = \int_0^T Q_{y1(t)} dt + \alpha \cdot (t_{1(X)} - T)^2 + \beta \cdot \int_0^T load_{(s)} ds, \quad (13)$$

$$E_2 = \int_0^T Q_{y2(t)} dt + \alpha \cdot (t_{2(x)} - T)^2 + \beta \cdot \int_0^X load_{(s)} ds + \gamma \cdot \int_0^X \int_0^T load_{(s,t)} dt ds, \quad (14)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别为列车运行时间误差、静态超速及动态超速的惩罚因子, $load_{(s)}$ 和 $load_{(s,t)}$ 分别为静态限速与动态限速的惩罚函数, 函数表示为

$$load_{(s)} = \begin{cases} \delta, & V_{(s)} > V_{\max_s(s)} \\ 0, & \text{else} \end{cases},$$

$$load_{(s,t)} = \begin{cases} \eta \cdot V_{(t)}, & V_{(t)} > V_{\max_s(t)} \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (15)$$

3 遗传算法

该优化问题属于非线性规划问题, 如果使用常规方法进行求解, 难度较大, 而 GA 则是解决这一类型问题的有效工具。

3.1 染色体

3.1.1 染色体的构造

为了提高 GA 的搜索与收敛速度, 染色体长度不应过长。文中采用了坡道三分法^[13], 即将一个线路上较长的坡道划分为 3 个部分, 在第 1 部分延用

上一坡道的操纵方式;在第 2 部分改变操纵方式来适应目前的坡道状态;在第 3 部分再次改变操纵方式,为列车在下一坡道的运行做准备。

基因编码方式采用实数编码,从而省略了编码与解码过程,这样既进一步缩短了染色体长度,又提高了求解与收敛速度。

文中的控制变量是列车的操纵手柄级位和其改变时列车的位置,染色体的结构如图 2 所示。

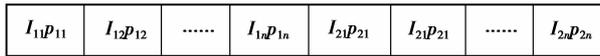


图 2 染色体的结构

其中, l_{1i} 为先行列车的操纵手柄级位, -1 为常用制动, 0 为惰行, 其他为牵引; p_{1i} 为先行列车的操纵手柄改变时先行列车的位置; l_{2i} 和 p_{2i} 分别为追踪列车的控制变量。

3.1.2 适应度函数

文中涉及的是求最小值的问题,所以式(12)不符合适应度函数的要求。显见目标函数(12)得到的解值一定为正,于是,将其求倒后,即可得到满足 GA 要求的适应度函数

$$f_i = \frac{1}{E_1 + E_2}, \tag{16}$$

其中, f_i 为染色体 i 的适应度值。

3.2 遗传算子

3.2.1 染色体选择

文中采用基于精英保留策略的轮盘赌法作为 GA 的选择算子。染色体的选择概率计算如式(17)所示。文献[15]证明了基于精英保留策略的 GA 在全局范围内的搜索具有收敛性。

$$p_i = \frac{f_i}{f_{\text{sum}}} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}, \tag{17}$$

其中: f_i 为染色体 i 的适应度; f_{sum} 为该种群的总适应度; p_i 为染色体 i 的选择概率。

3.2.2 染色体交叉

根据文中所研究问题的特点,采用两点并行交叉算子,即先将被选中的一对父代染色体分别在先行列车与追踪列车的某一随机位置切断,然后进行交换、重组,进而生成子代的新染色体。

3.2.3 染色体变异

文中采用的是概率变异算子,即根据预先设定的概率及随机选定的染色体基因位置进行变异。

3.3 基于阶段进化的适应性策略

在 GA 的进化过程中,由于全局收敛性,种群的

多样性会不断下降并最终稳定在一个较低的水平。所以,在 GA 进化初期的全局搜索阶段可采用较大的交叉与变异概率,而在后期的局部搜索阶段,为了避免最优染色体的淘汰,应采用较小的交叉与变异概率。

文中将进化过程分为 3 个阶段,分别用 T_1 、 T_2 和 T_3 表示,划分计算如式(18)所示。

第一阶段: $(0, T_1]$, 其中 $T_1 = \alpha T$;

第二阶段: $(T_1, T_2]$, 其中 $T_2 = (1 - \alpha)T$; (18)

第三阶段: $(T_2, T]$ 。

式中, T 为 GA 进化总代数, $\alpha \in (0, 0.5)$, 文中取 $\alpha = 0.382$, 相应的交叉与变异概率取值及计算过程如表 2 所示。

表 2 交叉与变异概率取值与计算过程

	第一阶段 ($t \in (0, T_1]$)	第二阶段 ($t \in (T_1, T_2]$)	第三阶段 ($t \in (T_2, T]$)
交叉概率(p_c)	1.00	0.90	0.80
变异概率(p_m)	$\min(0.1, 10/L)$	$\min(0.05, 1/L)$	$\min(0.01, 0.1/L)$

注: t 为 GA 进化代数, L 为染色体长度。

4 仿真实例

为验证算法的有效性,在列车运行仿真平台上进行模拟测试。线路为虚拟线路,如图 3 所示,线路全长 19 600 m。线路出发点为 A,终点为 E, A 点到 D 点的限速为 80 km/h, D 点到 E 点(即进站道岔到停车点)限速为 45 km/h。采用移动闭塞系统,追踪列车发车时间间隔为 4 m。列车均采用 SS1 型机车单机牵引,牵引重量为 3 000 t,牵引车辆均为滚动轴承货车,列车长度为 600 m,换算制动率为 0.3。先行列车运行时间为 25 m,追踪列车预期运行时间为 22 m。安全距离取 50 m。当先行列车尾部越过 D 点(即进站道岔)后,追踪列车的运行不再受其影响。

所有参数值和计算过程均来自或参照列车牵引计算规程^[16]。

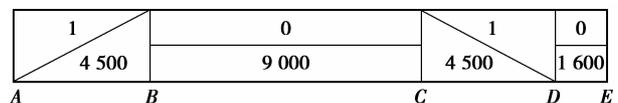


图 3 模拟线路示意图

经遗传算法优化计算后,先行列车与追踪列车的速度-距离曲线分别如图 4 与图 5 所示。

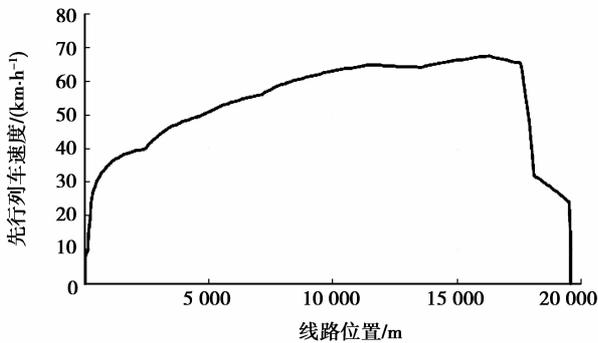


图 4 先行列车速度-距离关系

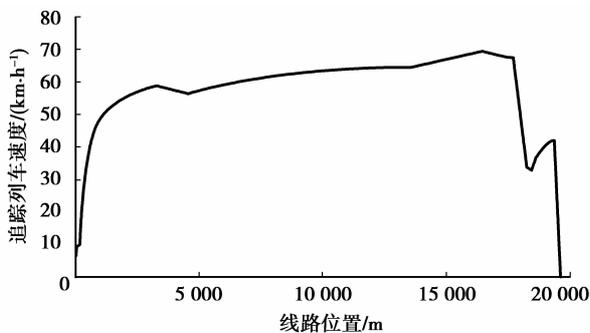


图 5 追踪列车速度-距离关系

列车之间的距离-时间曲线如图 6 所示,先行列车与追踪列车之间的距离始终大于安全距离,确保了列车的运行安全。当运行时间大于 1 240 s 之后,先行列车已越过进站道岔,之后已无需讨论安全距离的必要。

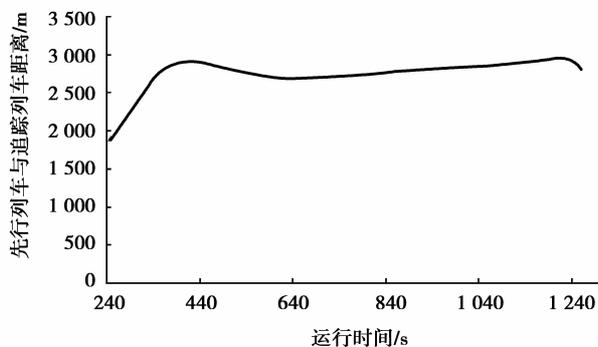


图 6 先行列车与追踪列车运行间隔

在此次模拟运行过程中,先行列车的综合能耗为 462.39 kW·h,运行时间为 1 502 s;追踪列车的综合能耗为 424.75 kW·h,运行时间为 1 356 s。

遗传算法中各代平均适应度变化如图 7 所示,收敛性良好,于第 76 代达到最大值,之后略有下降。

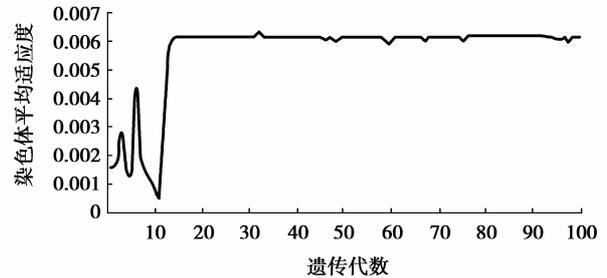


图 7 遗传代数与平均适应度的关系

从优化结果和各代平均适应度收敛结果来看,总体效果还是满意的。

5 结 论

1)通过对列车在追踪运行时的静态速度约束和动态速度约束条件的定义与分析,保证了对追踪列车进行节能优化控制时所必需的安全前提。

2)通过对坡道进行化简并运用坡道三分法,对染色体进行实数编码及外部惩罚函数法等措施,可大大缩短染色体长度,提高 GA 的搜索与收敛速度。

3)通过运用多维并行交叉算子和动态调整交叉概率、变异概率的策略,使粗粒度搜索与细粒度搜索的优势得以发挥,使 GA 可以更快的在全局范围内搜索到最优解。

4)通过在移动闭塞模拟平台上的运行结果可知,该方法可在安全与准点的前提下,有效地降低先行列车与追踪列车的运行能耗。

参考文献:

- [1] Bocharnikov Y V, Tobias A M, Roberts C, et al. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways[J]. Electric Power Applications, IET, 2007, 1(5):675-682.
- [2] 李波,王自力,吴娜. 基于遗传算法的列车优化操纵曲线研究[J]. 系统仿真技术,2007(4):192-196,191.
LI Bo, WANG Zili, WU Na. Research on the optimization of operation curve using genetic algorithm[J]. System Simulation Technology, 2007(4):192-196,191.
- [3] 付印平,李克平. 列车运行节能操纵优化方法研究[J]. 科学技术与工程,2009,9(5):1337-1340.
FU Yinping, LI Keping. Optimal method of train saving energy operation [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(5):1337-1340.
- [4] 马超云,毛保华,梁肖,等. 地铁列车节能运行情形控制

- 研究[J]. 交通信息与安全,2010,28(2):37-42.
- MA Chaoyun, MAO Baohua, LIANG Xiao, et al. Coast control of urban train movement for energy efficiency[J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2010, 28(2): 37-42.
- [5] 李玉生, 侯忠生. 基于遗传算法的列车节能控制研究系统[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 384-387.
- LI Yusheng, HOU Zhongsheng. Study on energy-saving control for train based on genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 384-387.
- [6] Chuang H J, Chen C S, Lin C H, et al. Design of optimal coasting speed for saving social cost in mass rapid transit systems[C]// Proceedings of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2008: 2833-2839.
- [7] Acikbas S, Sylemez M T. Coasting point optimization for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms[J]. Electric Power Applications, IET, 2008, 2(3): 172-182.
- [8] Ke B R, Lin C L, Lai C W. Optimization of train-speed trajectory and control for mass rapid transit systems[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(7): 675-687.
- [9] Sheu J W, Lin W S. Automatic train regulation with energy saving using dual heuristic programming[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Control Applications, September 28-30, 2011, Denver, CO. Piscataway: IEEE Press, 2011: 760-767.
- [10] Liu R F, Golovitcher I M. Energy-efficient operation of rail vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(10): 917-932.
- [11] 朱金陵, 李会超, 王青元, 等. 列车节能控制的优化分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 104-108.
- ZHU Jinling, LI Huichao, WANG Qingyuan, et al. Optimization analysis on the energy saving control for trains [J]. China Railway Science, 2008, 29 (2): 104-108.
- [12] Albrecht T, Gassel C, Binder A, et al. Dealing with operational constraints in energy efficient driving[C]// Proceedings of the IET Conference on Railway Traction Systems, April 13-15, 2010, Birmingham, UK. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [13] 丁勇, 周方明, 柏赞, 等. 自动闭塞区段追踪列车节能操纵仿真算法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4593-4597.
- DING Yong, ZHOU Fangming, BAI Yun, et al. Simulation algorithm for energy-efficient train following operation under automatic-block system[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4593-4597.
- [14] Ding Yong, Bai Yun, Liu Fangming, et al. Simulation algorithm for energy-efficient train control under moving block system [C] // Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, March 31-April 2, 2009, Los Angeles, California, USA. IEEE Press, 2009, 5: 498-502.
- [15] 林丹, 李敏强, 寇纪淞. 基于实数编码的遗传算法的收敛性研究[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(11): 1321-1327.
- LIN Dan, LI Minqiang, KOU Jisong. On the convergence of real-coded genetic algorithms [J], Journal of Computer Research and Development, 2000, 37(11): 1321-1327.
- [16] 中华人民共和国铁道部. TB/T 1407-1998 列车牵引计算规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

(编辑 詹燕平)