

基于免疫粒子群算法的 地铁列车节能优化研究

谭文举¹, 贺德强², 王合良²

(1. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530021;
2. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 在综合考虑地铁列车动力学特性、线路条件、区间限速以及准点运行等条件的基础上, 建立基于再生制动能量利用的多约束能耗模型。通过免疫粒子群组合算法求解列车能耗模型, 得到列车节能操纵工况序列及各工况转换点, 最终求得列车站间运行的最低能耗。为验证该方法的有效性, 以南宁地铁1号线为仿真实例, 计算得出优化后的列车能耗降低6.62%。

关键词: 能耗模型; 免疫粒子群; 节能优化; 优化操纵; 地铁列车

中图分类号: U231⁺.92; U292.4; U268.6

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.02.023

Research on Energy Saving Optimization of Metro Train Based on Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

TAN Wenju¹, HE Deqiang², WANG Heliang²

(1. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530021, China;

2. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: With full consideration of metro train dynamic characteristics, line conditions, speed limit in the interval, punctuality and so on, the multi-constraints energy consumption model based on utilization of regenerative braking energy was established according to the modern optimal control theory. Then the model of train energy consumption was solved by means of immune particle swarm optimization algorithm, the energy saving operation conditions and the switching points were obtained. Finally, the minimum energy consumption of train at the station was obtained. In order to verify the effectiveness of the method, the Nanning metro line 1 was simulated as an example, and the energy consumption was reduced by 6.62% after optimization.

Keywords: energy consumption model; immune particle swarm; energy saving optimization; operatim optimization; metro train

0 引言

由于地铁运行能耗的增加, 相关节能优化操纵问题引起了国内外学者的高度重视, 并随之展开了大量研究。文献[1]采用极大值原理求解满足区间限速条件

下的列车能耗方程, 得到列车节能操纵工况序列及各工况转换点。文献[2]采用多目标粒子群算法优化ATO系统的驾驶策略, 通过与非支配遗传算法对比, 验证了该方法的优越性, 并成功应用于马德里地铁。文献[3]通过分析列车动力学特性建立定时节能模式下的优化操纵模型, 并采用遗传算法获取列车最优的目标速度曲线。文献[4]将列车运行线路划分为 N 个子区间, 并建立对应的列车运动方程, 通过引入动态规划算法

收稿日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51165001); 南宁市科技攻关项目(20151021); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室课题(15-140-30S003)

获取列车最优驾驶策略。文献 [5] 采用矩阵离散法求解不同操纵工况的矩阵模型, 寻找出模型的全局最优解, 并基于该算法开发了一套列车优化操纵智能指导系统, 具有良好的工程应用价值。

现有的列车优化操纵问题, 主要采用动态规划法、群集智能算法和极值原理三类方法^[6]。极值原理计算过程复杂, 且在计算非线性方程时存在两点极值问题; 动态规划法没有标准模型可供应用, 求解时易发生维数灾难。本文在综合分析各优化算法优缺点的条件下, 将免疫信息处理机制引入粒子群算法中, 克服了基本粒子群算法及其他群集智能算法过早收敛, 并且容易陷于局部最优的缺点, 进而采用该方法求解列车能耗模型, 获取最优操纵工况序列, 最终求得列车站间运行的最低能耗。

1 列车能耗模型

列车节能优化是一个复杂的多目标、多约束的函数寻优过程, 涉及运动学、动力学和能量守恒等原理。列车从接触网获取电能, 驱动列车运行, 引起动能的变化, 并克服阻力做功, 同时供给空调、照明等辅助设备用电。本文仅研究列车牵引能耗和再生制动能量的回收利用, 因此, 求解列车能耗可以转化为计算其动能的变化和克服阻力做功(辅助设备用电忽略不计)。列车运行过程中受牵引力、制动力和阻力等作用, 其中阻力包括基本阻力和附加阻力, 附加阻力分为曲线阻力、坡道阻力和隧道阻力^[7]。

将列车视为单质点模型, 建立列车的动力学方程:

$$m \frac{dv}{dt} = F_a - F_b - f(v_i) - f(s) \quad (1)$$

式中: m 为列车质量; F_a 为列车牵引力; F_b 为列车制动力; $f(v)$ 为列车基本阻力; $f(s)$ 为列车附加阻力; v_i 为列车运行速度; s 为列车运行距离。

其中, 牵引工况下, $F_b=0$; 制动工况下, $F_a=0$; 惰行工况下, 无施加牵引力与制动力, 仅受基本阻力和附加阻力影响, $F_a=F_b=0$ 。

根据列车的动力学特性并结合动能定理和能量守恒定律建立牵引工况下能耗方程:

$$Q_1 = \frac{1}{2} m (v_{q2}^2 - v_{q1}^2) + \int_0^t (f(v_i) + f(s)) \cdot v_i dt \quad (2)$$

式中: Q_1 为列车牵引能耗; v_{q2} 为列车牵引末速度; v_{q1} 为列车牵引初速度。

再生制动过程产生的能量方程为

$$Q_2 = -\frac{1}{2} m (v_{z2}^2 - v_{z1}^2) - \int_0^t (f(v_i) + f(s)) \cdot v_i dt \quad (3)$$

式中: Q_2 为列车再生制动能量; v_{z2} 为列车制动末速度; v_{z1} 为列车制动初速度。

惰行工况下, 无牵引能耗。综上所述, 列车站间运行总能耗的目标函数为

$$\min Q = \frac{Q_1}{\eta} - \mu Q_2 \quad (4)$$

式中: Q 为列车运行总能耗; μ 为再生制动能量利用系数; η 为电能利用效率。

约束条件为

$$\left. \begin{aligned} F_a &\leq F_{a \max} \\ F_b &\leq F_{b \max} \\ v_i &\leq v_{\max} \\ \sum_{i=1}^n t_i &= T \\ \sum_{i=1}^n s_i &= S \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $F_{a \max}$ 为最大牵引力; $F_{b \max}$ 为最大制动力; v_{\max} 为列车最大限速; t_i 和 s_i 分别为列车各工况下的运行时间与运行距离; T 为列车站间运行时间; S 为列车站间运行距离。

2 免疫粒子群算法求解能耗模型

免疫粒子群优化算法^[8]将免疫算法的免疫特性及免疫机理引入到粒子群算法中, 通过免疫调节和抗体的多样性, 克服粒子群进化后期出现的早熟收敛现象, 同时粒子群算法使得抗体进化具有一定的方向性, 从而使粒子以更快的速度朝最优解的方向收敛。该算法结构简单、运行速度快、适应性强, 在可行空间中具有良好的搜索能力, 相较动态规划法、极值原理以及其他群集智能算法可以在收敛性和结果质量之间获得较好的平衡^[9]。利用免疫粒子群算法求解列车能耗模型的流程为:

步骤 1: 将构建的列车能耗模型输入算法程序中, 作为寻优的目标方程。

步骤 2: 初始化粒子群参数。最大迭代次数 $K=50$, 粒子群规模 $n=20$, 学习因子 $c_1=c_2=1.05$, 惯性权重 $w \in [0.6, 1.5]$ 。

步骤 3: 随机产生粒子群 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$, 其中每个粒子 $x_i = [F_a, F_b, f(v), f(s), t_i, v_i, v_{q1}, v_{q2}, v_{z1}, v_{z2}]$ ($i=1, 2, \dots, n$), 并初始化粒子的速度和位置。

步骤 4: 计算粒子的适应度值(目标方程的函数值), 进而得出粒子的个体最优解 P_{best} 和全局最优解 g_{best} , 并把 g_{best} 作为免疫记忆粒子存入记忆库中。判断是否满足终止条件(达到最大迭代次数或最优解无变化), 若满足, 则输出 g_{best} , 即为目标方程的最优解; 若不满足, 则执行步骤 5。

步骤 5: 根据粒子速度更新公式和位置更新公式产生 n 个新粒子, 然后随机产生 m 个新粒子。

步骤 6: 计算 $(n+m)$ 个新粒子的选择概率, 选取其中选择概率较大的 n 个新粒子, 组成新的粒子群 X' 。其中选择概率如式(6)所示:

$$P(x_i) = \frac{\frac{1}{D(x_i)}}{\sum_{i=1}^{n+m} \frac{1}{D(x_i)}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n+m} |f(x_i) - f(x_j)|} \quad (i=1, 2, \dots, n+m) \quad (6)$$

式中: $f(x_i)$ 为粒子 x_i 的适应度函数; $D(x_i)$ 为粒子浓度(与该粒子相似的粒子)。为保证粒子的多样性, 浓度大的粒子选择概率小, 浓度小的粒子选择概率大。

计算公式为

$$D(x_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n+m} |f(x_i) - f(x_j)|} \quad (i=1, 2, \dots, n+m) \quad (7)$$

步骤 7: 用记忆库中的免疫记忆粒子替换粒子群 X' 中适应度较差的粒子^[10], 形成下一代粒子群 X'' , 然后执行步骤 4。

3 实例仿真

本文以南宁地铁 1 号线东段线路东盟商务区站—凤岭站为仿真实例, 模拟列车客流高峰期 (AW3 工况) 运行情况, 并根据南宁地铁 1 号线电气牵引规格书和模拟运行计算书中相关数据进行计算。其中列车站间运行距离为 1 177 m, 最小曲线半径为 650 m, 最大坡度为 24.3‰, 区间最大限速为 80 km/h。为简化计算过程, 采用纵断面化简原理将线路进行化简, 化简后的线路参数如表 1 所示。列车采用 4 动 2 拖 6 辆编组, AW3 工况下列车基本参数如表 2 所示。优化前列车采用满动力无惰行的运行模式(最大牵引—匀速—最大制动), 运行图如图 1 所示, 准点运行时间为 76.0 s, 站间运行总能耗为 31.6 kW·h。

表 1 东盟商务区站—凤岭站线路参数

区段编号	1	2	3	4
区段长度 /m	129.9	200.0	660.0	187.4
折算坡度 /‰	2.0	8.7	21.3	2.1

表 2 列车性能参数

最大牵引力 / kN	最大制动力 / kN	列车质量 / kg	单位启动阻力 / (N·kN ⁻¹)	最大牵引功率 / kW
386	335	344 380	5	4 377.6

将构建不同工况与路况下的列车能耗函数及其约束条件代入免疫粒子群算法程序, 结合线路参数、列车性能参数计算定时节能模式下列车操纵工况的转换点、列车最优运行速度、最佳惰行距离, 并适度优化列车驾驶策略, 最终计算出考虑列车再生制动能量回收利用情况下的站间运行能耗(利用率 $\mu=50\%$)。优化后列车采用“最大牵引力启动加速—恒功率牵引—匀速—惰行—最大电制动力制动—空气制动”的操纵工况序列。列车速度—时间图如图 2 所示, 0A 段为最大牵引力阶段, AB 段为最大功率牵引阶段, BC 段为

匀速阶段, CD 段为惰行阶段, DE 段为最大电制动阶段, EF 为空气制动阶段; 各工况转换点对应 A、B、C、D、E 点, 其坐标分别为 (10.4, 40.0), (25.4, 74.0), (52.6, 74.0), (57.6, 71.1), (74.8, 1.4), 另外, F 点坐标为 (76.0, 0)。匀速阶段 (BC 段) 最优目标速度为 74.0 km/h。优化前后的列车运行参数如表 3 所示。由表 3 可得, 优化后列车在满足正点运行的前提下, 总能耗为 29.5 kW·h, 比优化前降低了 6.62%, 达到预期的节能优化效果。

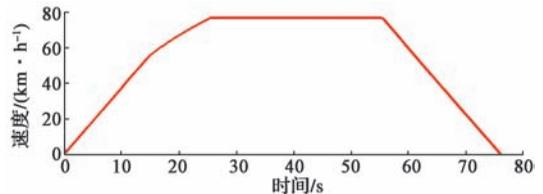


图 1 优化前列车速度—时间曲线

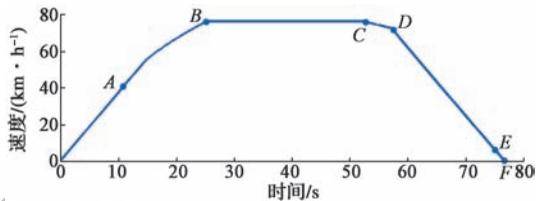


图 2 优化后列车速度—时间曲线

表 3 列车优化前后运行参数

状态	运行时间 /s	站间距离 /m	运行能耗 / (kW·h)
优化前	76.0	1 177	31.6
优化后	76.0	1 177	29.5

4 结论

①本文引入免疫粒子群算法求解列车节能优化操纵问题, 获取列车站间运行的最优驾驶策略。该方法运算效率高, 具有良好的全局寻优能力。

②以南宁地铁 1 号线为例, 结合实际线路条件与列车操纵工况, 进行实地仿真测试, 求得各工况转换点的速度—时间坐标, 降低列车运行总能耗达 6.62%, 从而验证了本文所提方法的可行性与适用性。

③文中所提方法仍处于试验仿真阶段, 开发一套兼容性强、稳定性好的基于免疫粒子群算法的地铁列车节能优化专家系统是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] 王青元, 冯晓云. 列车准点节能运行的控制工况最优切换研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 91-98.
 [2] Domínguez M, Fernández-Cardador A, Cucala A P, et al. Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 29(3): 43-53.
 [3] Cucala A P, Fernandez A, Sicre C, et al. Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(8): 1548-1557.

(下转第 105 页)