

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809020



采用萤火虫算法的高速列车 节能运行优化

马晓娜, 朱爱红, 段玉琼

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 智能算法可以通过优化列车运行曲线达到节能降耗的目的. 将列车运行能耗作为目标函数, 以限速、时间和距离为约束条件, 建立优化模型. 以 CRH₃ 型动车组和武广客运专线中某段线路为基础, 进行仿真实验. 运用萤火虫算法, 搜索能耗最低时的一组列车工况转换速度序列. 仿真结果表明: 列车运行能耗指标降低 14.33%, 且满足停车精确性与准时到站的要求.

关键词: 高速列车; 运行能耗; 萤火虫算法; 节能运行曲线; 工况转换速度序列

中图分类号: U 248.48

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)04-0452-05

Energy-Saving Operation Optimization of High-Speed Trains Using Firefly Algorithm

MA Xiaona, ZHU Aihong, DUAN Yuqiong

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Intelligent algorithms can be used to optimize train operation curve to achieve energy saving and consumption reduction. Train consumption was taken as the objective function, and the optimization model was established with the speed limit, time and distance as the constraints. The simulation experiment was carried out based on the CRH₃ electric multiple units running on a certain train line from the Wuhan to Guangzhou stations. The firefly algorithm was used to search for a set of train operating speed conversion sequences with the lowest energy consumption. The simulation results showed that the energy consumption index of the train was reduced by 14.33%, and the parking accuracy and on-time arrival requirements were met.

Keywords: high-speed train; operation energy consumption; firefly algorithm; energy-saving operation curve; condition conversion speed sequence

随着高速列车的发展, 列车节能运行方式越来越受关注. 对高速列车运行节能降耗最简易可行的方式是优化列车的运行曲线. 不同的运行曲线对应不同的列车能耗, 基于此理论支撑, 国内外学者进行了大量实验研究. Hoang 等^[1]把列车的节能问题定义成满足约束条件的优化问题, 采用搜索算法进行列车运行曲线的优化设计; Chang 等^[2]使用遗传算法优化列车驾驶曲线的惰行运行距离, 通过对惰行点位置的选取, 取得了一定的节能效果; Ko 等^[3]采用动态规划的方法, 求解列车节能操纵优化的问题; 付印平^[4]采用遗传算法优化列车的工况转换点位置, 达到节能降耗的目的; 李玲玉^[5]使用动态粒子群算法优化列车的距离-速度运行曲线, 降低了 11.98% 的列车能耗; 刘建强等^[6]基于现代最优控制理论, 得出整个运行过程中列车运行能耗最小时, 最大牵引、匀速、惰行及最大制动的转换点; 宿帅等^[7]基于驾驶策略

收稿日期: 2018-09-12

通信作者: 朱爱红(1969-), 女, 副教授, 主要从事交通信息工程及控制的研究. E-mail: 791338890@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61661027)

的列车自动驾驶系统(ATO)控制方法,给出一种 ATO 节能驾驶策略的求解算法;荀径等^[8]介绍列车节能操纵优化研究的基本问题,根据求解方法的特征将研究方法分类;宋文婷等^[9]采用遗传算法为子区间搜索最优的速度码组合序列,获得列车节能运行的速度操纵范围;唐涛等^[10]通过蚁群算法优化列车 ATO 控制策略,将单车运行能耗降低了 5.67%;Zhu 等^[11]运用萤火虫算法优化列车运行曲线,达到节能运行的目的.针对以上所用算法存在参数复杂、寻优精度低等不足,本文提出采用萤火虫仿生智能算法(firefly algorithm,FA),对列车运行工况转换点处的速度进行优化,实现高速列车节能运行的目标.

1 列车节能运行优化模型

1.1 优化策略

在规定运行时间内,列车按照运行图从起点站至终点站的运行曲线存在无数条,如图 1 所示.图 1 中: S 为列车运行距离; v 为速度.通过寻优确定一条使列车能耗最低的运行曲线.

1.2 评价指标

列车在运行过程中消耗的能量主要有 3 部分:发动机牵引时提供的能量、制动装置减速运行时的能源消耗和车厢内其他设备(照明、空调设备等)产生的电能消耗.文中只考虑列车的牵引能耗,其计算模型为

$$E = \int_0^T P(t)dt = \int_0^T F(t) \cdot v(t)dt.$$

上式中: E 为牵引能量消耗; T 为运行时间; $F(t)$ 为 t 时刻的牵引力; $v(t)$ 为 t 时刻的列车运行速度.

运行时间是指列车在某段线路上运行所消耗的时间之和,其计算模型为 $T = \int_0^S t(s)ds$,其中, $t(s)$ 为列车运行距离与运行时间的函数关系式.

运行距离是指列车按照运行图在一定时间内,以一定速度在线路上行驶过的距离,其计算模型为

$$S = \int_0^T v(t)dt.$$

1.3 数学模型

根据以上基础理论^[12-15],建立列车节能优化的数学模型为

$$f_e = \min E = \min \sum_{i=1}^n E_i.$$

其工况转换约束条件为

$$\text{s. t. } \begin{cases} v = ds/dt, \\ m \cdot dv/dt = f(u,v) - w(s,v) - b(u,v), \\ 0 \leq s_i \leq S, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad s_1 = 0, \quad s_n = S, \\ v(0) = v(S) = 0, \quad v(s_i) \leq v_{\max}, \\ t(0) = 0, \quad t(S) = T, \quad 0 \leq t(s_i) \leq T. \end{cases}$$

上式中: f_e 为列车节能性优化数学模型的适应度函数; f 为单位牵引力; w 为单位阻力; b 为单位制动力; v_{\max} 为线路的限速值; s_i 为列车在每一个时间步长内的行驶距离; T 为列车的运行时间; n 为时间步长个数; u 为运行工况(牵引、惰行和制动).牵引工况时,列车只受到牵引力作用,处于加速阶段;相反,制动工况时,列车只受制动力作用,处于减速阶段;惰行工况时,列车仅受地面阻力的作用,同处于减速阶段.时间步长 Δt 取 0.01 s,则 n 的计算式为 $n = T/0.01$.

2 基于萤火虫算法的节能优化

萤火虫夜间活动时,发出黄绿色荧光,其亮度受自身荧光素的影响,荧光强度与荧光素值成正比,萤火虫发出荧光会吸引周围萤火虫向其移动.荧光素值越大,吸引力越强.每只萤火虫都在向着荧光更强

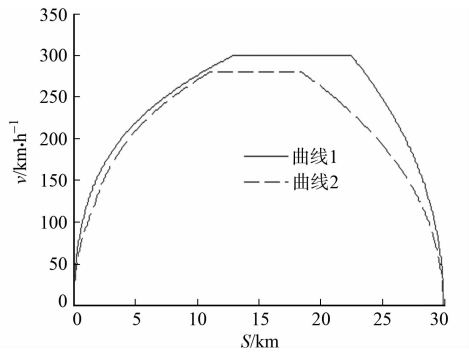


图 1 列车节能操纵策略示意图

Fig. 1 Diagram of train energy-saving operation

的萤火虫方向移动,最后,所有荧光虫会聚集在荧光最亮的那只萤火虫附近. 基于萤火虫这种特殊的活动规律,学者提出了一种新型的算法,即萤火虫算法.

萤火虫包含亮度和吸引度 2 个要素,其更新过程可从数学角度说明. 萤火虫相对荧光亮度计算式为 $I=I_0 \times \exp(-\gamma r_{i,j})$. 其中: I_0 是萤火虫自身($r_{i,j}=0$ 处)的荧光亮度,也是最大的荧光亮度,与目标函数值相对应,目标函数值越大,自身亮度会越高; γ 为光强吸收系数,运动距离的增加和传播媒介的吸收会使荧光强度逐渐变弱,因此,设置光强吸收系数来体现这一特点,取值为常数; $r_{i,j}$ 是萤火虫 i 与 j 之间的空间距离,计算式为 $r_{i,j}=|x_i-x_j|=\sqrt{\sum_{k=1}^d(x_{i,k}-x_{j,k})^2}$. 其中: x_i,x_j 为萤火虫个体 i 和 j 所在的空间位置. 萤火虫的吸引度为 $\beta=\beta_0 \times \exp(\gamma r_{i,j}^2)$. 其中: β_0 是光源处($r_{i,j}=0$)的吸引度,也是最大吸引度.

萤火虫 i 被吸引向萤火虫 j 移动,位置更新计算式为

$$x_i = x_i + \beta \times (x_j - x_i) + \alpha \times (\text{rand} - 1/2).$$

上式中: α 为移动步长因子,在 $[0,1]$ 间取值; rand 为随机因子,在 $[0,1]$ 间取值.

为了进一步验证萤火虫算法的优良性,采用萤火虫算法和差分进化算法对函数式

$$F(x) = \exp(-(x_1 - 4)^2 - (x_2 - 4)^2) + \exp(-(x_1 + 4)^2) + 2 \times \exp(-x_1^2 - (x_2 + 4)^2) + 2 \times \exp(-x_1^2 - x_2^2), \quad |x| \leq 5$$

进行测试. 优化过程的仿真图分别如图 2,3 所示. 图 2,3 中: N 为迭代次数. 对比图 2,3 可知:萤火虫算法收敛速度快于差分进化算法,寻优性能较好.

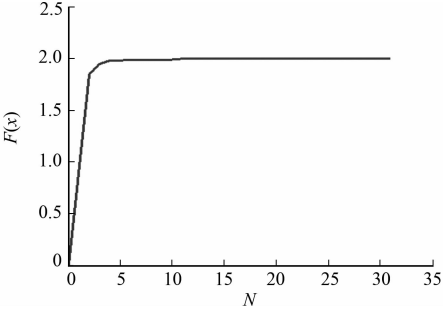


图 2 萤火虫算法迭代图

Fig. 2 Firefly algorithm iteration diagram

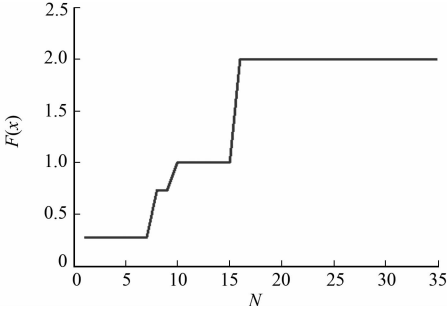


图 3 差分进化算法迭代图

Fig. 3 Differential evolution algorithm iteration diagram

萤火虫算法初始化中,布置 50 个萤火虫,初始种群如图 4 所示. 图 4 中:黑色圆点代表萤火虫. 最终,所有萤火虫都聚集在亮度最高的萤火虫周围,如图 5 所示.

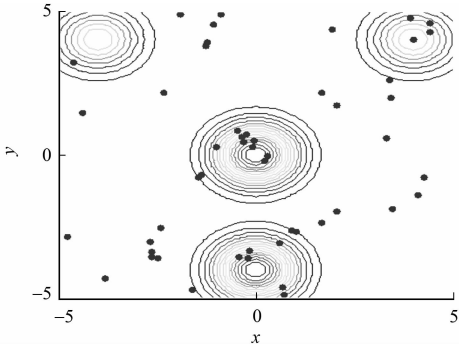


图 4 萤火虫初始种群

Fig. 4 Firefly initial population

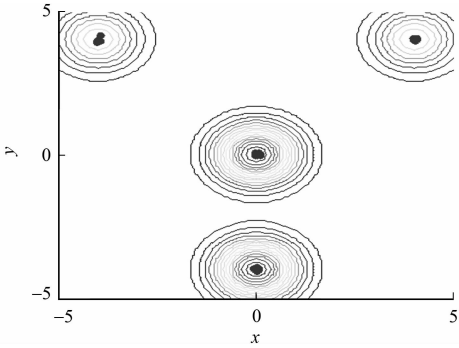


图 5 萤火虫聚集图像

Fig. 5 Firefly aggregate image

3 仿真实验与分析

为验证萤火虫算法的优化效果,选用 CRH₃ 型动车组为仿真车型,对武广专线中武汉站到咸宁北路段间的线路进行仿真实验. 列车主要性能参数,如表 1 所示. 表 1 中: ω_0 为单位运行阻力.

列车牵引力(F)和制动力(B)特性曲线,分别如图 6,7 所示. 线路距离为 84. 508 km;在 34~40 km

路段限速 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 其余路段限速 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; 图定运行时间 T 为 $1\,438\text{ s}$; 允许时间误差为 30 s .

萤火虫算法初始化相关参数, 如表 2 所示. 表 2 中: N_{\max} 为最大循环次数. 将高速列车能耗作为算法的适应度值. 同时, 为了保证列车安全且准点到达终点站, 将运行距离和时间作为惩罚函数, 惩罚函数系数为 $R=10^5$.

首先, 根据仿真运行线路状况和列车运行图, 拟定 9 个列车运行工况(牵引-惰行-制动-惰行-牵引-惰行-牵引-惰行-制动), 因此, 需要设置 8 个工况转换速度值. 然后, 将萤火虫个体代表工况转换速度值, 通过 1 000 个萤火虫的不断移动, 搜索出亮度最高的 8 个萤火虫序列, 即列车运行能耗最低时依次对应的一组工况转换速度序列.

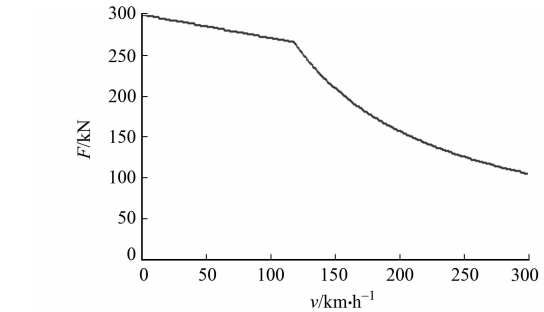


图 6 CRH₃ 型动车组牵引特性曲线

Fig. 6 CRH₃ traction characteristic curve

表 1 列车主要性能参数	
Tab. 1 Main train parameters	
主要参数	参数性能
编组长度/m	200
定员/人	601
满载质量/t	536
最大牵引力/kN	300
最大牵引功率/kW	8 800
$\omega_0/\text{N}\cdot\text{kN}^{-1}$	$0.79+0.006\,4v+0.000\,115v^2$
最高速度/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	300

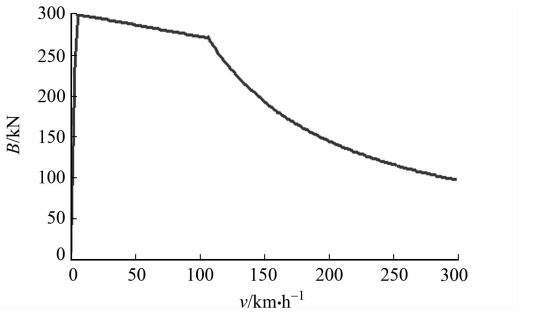


图 7 CRH₃ 型动车组制动特性曲线

Fig. 7 CRH₃ brake characteristic curve

表 2 萤火虫算法参数值
Tab. 2 Firefly algorithm parameter values

参数名称	n	N_{\max}	α	γ	β_0	rand
参数值	1 000	30	0.4	1	0.9	1

参照《列车牵引规程》, 仿真可得高速列车优化前的运行曲线, 如图 8 所示. 运用萤火虫算法优化工况转换处的速度值, 得到优化后的高速列车运行曲线, 如图 9 所示.

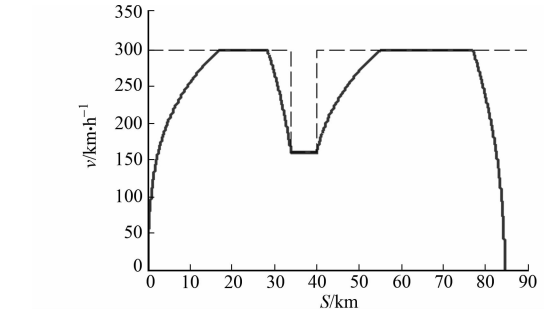


图 8 优化前高速列车运行曲线

Fig. 8 High speed train operation curve before optimization

对比图 8, 9 可知: 列车工况转换点处的速度发生了明显变化. 计算得出优化前、后的节能性优化指标, 如表 3 所示. 表 3 中: s_E 为停车误差距离.

由表 3 可知: 高速列车运行曲线优化后, 列车节能模式的运行时间为 $1\,436.90\text{ s}$, 满足到站准时性的要求; 停车误差为 0.22 m , 满足停车精确性的要求; 能耗指标从 $4\,530\text{ MJ}$ 减少到 $3\,880\text{ MJ}$, 降低了 14.33% 的能源消耗. 综上所

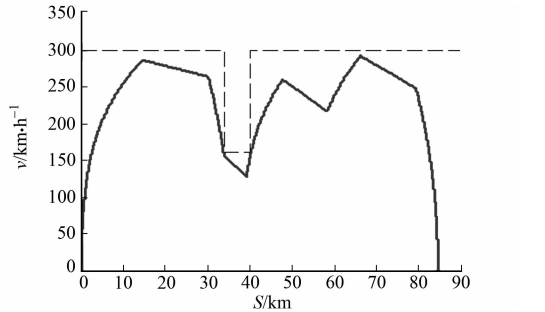


图 9 优化后高速列车运行曲线

Fig. 9 High speed train operation curve after optimization

表 3 优化前、后的节能性优化指标

Tab. 3 Energy efficiency indicators of before optimization and after optimization

评价指标	优化前	优化后
S/m	84 507.71	84 507.78
s_E/m	0.29	0.22
E/MJ	4 530	3 880

述,文中所用方法取得了一定的节能效果.

4 结 束 语

运用算法优化列车的运行曲线.以列车运行能耗为目标函数,以限速、时间和距离为约束条件,建立优化模型.运用萤火虫算法对模型中列车运行工况转换点处的速度进行优化.以 CRH₃ 型动车组及武广客运专线中武汉站到咸宁北路两站间线路数据作为实验基础,得到高速列车优化后的运行曲线.对比优化前后的运行曲线和各项运行指标可知,该方法有效降低了高速列车运行过程中的能源消耗,且满足精确停车和准时到站的要求.仿真结果表明:所提方法在满足约束条件下取得了较好的实验效果,为后续研究提供了理论依据,可进一步进行相关方面的优化实验工作.

参考文献:

[1] HOANG H H,POLIS M,HAURIE A.Reducing energy consumption through trajectory optimization for a metro network[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1975,20(5):590-595. DOI:10.1109/TAC.1975.1101058.

[2] CHANG C S,SIM S S.Optimizing train movements through coast control using genetic algorithms[J].Electric Power Application,1997,144(1):65-73. DOI:10.1049/ip-epa:19970797.

[3] KO H,KOSEKI T,MIYATAKE M.Application of dynamic programming to optimization of running profile of a train[J].Computer in Railways,2004,45(3):8. DOI:10.1007/BF02252938.

[4] 付印平.列车追踪运行与节能优化建模及模拟研究[D].北京:北京交通大学,2009.

[5] 李玲玉.基于粒子群算法的城市轨道交通列车节能优化研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[6] 刘建强,魏远乐,胡辉.高速列车节能运行优化控制方法研究[J].铁道学报,2014,36(10):8-11. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.10.002.

[7] 宿帅,唐涛.城市轨道交通 ATO 的节能优化研究[J].铁道学报,2014,36(12):51-53. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.12.009.

[8] 荀径,杨欣,宁滨.列车节能操纵优化求解方法综述[J].铁道学报,2014,36(4):15-17. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.04.003.

[9] 宋文婷,谭觅,蔡文川.高速列车的节能操纵策略研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(3):424-427. DOI:10.3969/j.issn.1672-7029.2016.03.003.

[10] 唐涛,荀径,曹芳.北京地铁亦庄线列车节能驾驶研究[J].北京交通大学学报,2016,40(4):20-23. DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.2016.04.003.

[11] ZHU Aihong,MA Xiaona,DUAN Yuqiong,*et al.* Operation optimization of train based on firefly algorithm[C]//4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. Chongqing:IEEE Press,2018:1624-1628.

[12] 王合良,贺德强,莫志刚.基于改进 QPSO 算法的地铁列车节能优化操纵研究[J].广西大学学报,2016,41(5):1395-1397. DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2016.1394.

[13] 曹佳峰,刘斌.基于 2 阶段优化的高速列车节能运行仿真研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(4):822-824. DOI:10.3969/j.issn.1672-7029.2018.04.001.

[14] 王德春,李克平,李想.多目标列车节能调度模型及模糊优化算法[J].科学技术与工程,2012,12(12):2869-2873. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2012.12.022.

[15] 卢启衡,冯晓云,王青元.基于遗传算法的追踪列车节能优化[J].西南交通大学学报,2012,47(2):266-268. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.2012.02.016.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)