

基于遗传算法的高速动车组列车惰行节能控制策略研究^{*}

李华柏, 陈春棉

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为降低高速动车组(EMUs)的运行能耗,建立了准点约束条件下的 EMUs 惰行能耗模型。在此基础上,采用自适应遗传算法对 EMUs 中间运行阶段的惰行控制策略进行优化,寻找最优位置与数目的惰行关键工况转换点,确定列车运行的惰行速度曲线,从而达到准点和节能运行的效果。

关键词: 遗传算法; 高速动车组; 惰行控制; 节能运行

中图分类号: TM922; U266 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)07-0112-06

doi: 10.12177/emca.2022.116

Research on Energy-Saving Control Strategy for Coasting of High-Speed EMU Based on Genetic Algorithm^{*}

LI Huabo, CHEN Chunmian

(Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In order to reduce the operation energy consumption of high-speed electric multiple units (EMUs), an energy consumption model of EMUs coasting under on-time constraints is established. On this basis, the adaptive genetic algorithm is used to optimize the coasting control strategy of EMUs in the middle operation stage, allocate the optimal position and number of key condition conversion points of coasting, and determine the coasting speed curve of train operation. As a result, the effects of the punctual and energy-saving operation are achieved.

Key words: genetic algorithm; high speed electric multiple unit (EMU); coasting control; energy saving operation

0 引言

随着中国高速铁路近些年的持续快速增长,减少高速列车牵引能耗已成为降低铁路运输系统整体能耗的关键之一。机车牵引能耗约占铁路能耗的 60%~70%。高速动车组列车的牵引能耗受到区间限速、运行线路条件、操纵策略等多种因素的影响和制约,采用不同的控制策略,牵引能耗存在较大差异。因此,对列车运行控制与操纵策略进行优化,在保证列车运行安全、正点、精确停车

的同时,使得运行能耗最小,具有较大的理论与现实意义。

惰行控制是高速动车组节能的重点研究方向之一。张杰等^[1]依据牵引制动特性及线路条件构建运行能耗数学模型,对运行区间进行离散分区,得到最优速度转换序列与控制策略。高浠瑞等^[2]建立了动车组追踪运行多目标优化模型,运用克隆选择算法进行优化,获得列车运行中手柄级位和工况转换点的最优控制序列。张琼洁^[3]基于 RBF 神经网络结构,采用遗传算法对 CRH380AL

收稿日期: 2022-01-24; 收到修改稿日期: 2022-05-19

^{*} 基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(20C1216); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ60072)

作者简介: 李华柏(1973—),男,硕士,副教授,研究方向为电力牵引传动、电机及其控制。

陈春棉(1981—),女,硕士,讲师,研究方向为铁道车辆。(通信作者)

型动车组的惰行控制过程进行了优化与仿真。王成莉^[4]对列车节能操纵规律进行了分析,建立了能耗模型,基于遗传算法得到了列车运行能耗最小、全线优化控制下的运行速度曲线。王茜茜^[5]基于黄金比例遗传算法对列车进行节能优化,构建的列车一次节优化模型与二次节优化模型,在节能与准点性方面均取得了较好的效果。潘洋等^[6]基于仿真的列车节能运行模型,应用模糊非支配排序遗传算法求解列车节能运行方案和最优能耗曲线。杨辉等^[7]以站间运行的能耗和时间的权衡为目标函数,建立了动车组运行能耗 RBF 神经网络模型,采用遗传算法确定动车组节能、正点运行的速度优化设定曲线。李学明等^[8]基于区间速度曲线及牵引力运行数学模型对不同牵引力分配策略下牵引电机能耗指标等进行计算,获取最小化目标函数值的牵引力功率分配节能方案。

动车组在时间、距离与限速多目标约束条件下的节能控制优化一般采用如下处理方式:(1)将多目标约束的优化问题转化为单目标优化进行求解,这一转化过程中,目标函数数量难以统一,可能导致目标值的求解偏差;(2)通过仿真求出运行时间与能耗之间的关系,但是由于动车组列车运行过程的复杂性与不规律性,难以在能耗与运行时间之间作出精确的权衡。基于以上分析,本文采用自适应遗传算法对动车组列车多目标约束的惰行节能控制策略进行优化,基于实际线路条件,寻找最优位置与数目的惰行关键工况转换点,使优化后控制策略更符合实际运行情况。

1 动车组惰行节能控制模型

1.1 惰行控制的基本原理

动车组列车运行期间主要采用最大牵引、匀速、惰行和最大制动的操纵模式,如图 1 所示。惰行模式下动车组运行不消耗能量,因此,在满足运行时分的前提下,中间运行阶段应尽可能减少制动,采用惰行操纵模式进行减速,加大惰行工况在整个运行期间的比例,从而降低整体运行能耗。

基于动车组能耗控制节能模型,惰行控制策略是以最大加速度完成起动车加速,以最大制动完成减速停车,在列车运行的中间阶段,以线路限速为约束,在合适的位置插入合适位置与数目的“牵引-惰行”工况转换点,线路限速,在满足时间

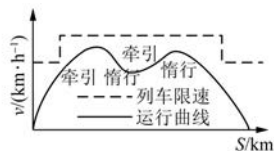


图 1 惰行控制曲线

约束的前提下,充分利用惰行节能。

在正点约束的前提下,采用自适应遗传算法,根据线路限速、坡度条件为列车的中间运行阶段插入合适数目和位置的关键工况转换点,确定出列车运行的速度曲线,动车组列车按该速度曲线运行,实现正点约束条件下能耗最小的优化效果。

图 2 是站间 4 组不同惰行点对应的速度距离曲线,说明惰行点位置的变化会明显地改变列车的运行速度曲线,导致站间惰行工况与牵引工况的比例发生变化,从而引起运行能耗与列车站间运行时分的变化^[3]。

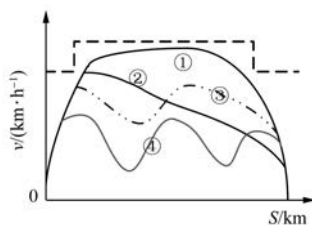


图 2 不同的惰行控制点对应的站间运行曲线

1.2 动车组惰行控制模型

1.2.1 单质点模型下动车组受力分析

多质点模型将机车和每节车辆分别简化为一个质点,构成质点链,因此在列车通过变坡道、变曲率段的时候,模型能够更准确地反映列车的受力情况^[9]。由于多质点模型会增加控制策略与建模的复杂性,为了简化计算,本文采用单质点列车刚性模型进行分析。

动车组的牵引力主要通过线性插值法获得,列车速度为 v 时的牵引力为

$$F(v) = F_{v1} + \frac{(F_{v2} - F_{v1})(v_2 - v_1)}{v_2 - v_1} \quad (1)$$

式中: F_{v1} 、 F_{v2} 为与当前速度最接近的速度 v_1 、 v_2 所对应的两组牵引力。

牵引力还可以采用经验公式法进行计算,CRH3 对应的牵引力为^[5]

$$F(v) = \begin{cases} -0.285v + 300, & v \leq 119 \text{ km/h} \\ 31\,500v, & v > 119 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2)$$

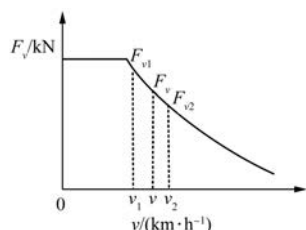


图3 高速动车组牵引力线性插值计算曲线

动车组的阻力包括基本阻力 F_0 、坡道附加阻力 F_g 、曲线附加阻力 F_r 。

动车组单位重要基本阻力为

$$f_0 = a_1 + a_2v + a_3v^2 \quad (3)$$

动车组基本阻力为

$$F_0 = \frac{Mg}{1\,000} f_0 \quad (4)$$

式中: M 为动车组总质量; g 为重力加速度。

单质点模型下, 动车组坡道附加阻力为

$$F_g = \frac{Mg\gamma}{1\,000} \quad (5)$$

式中: γ 为坡度千分数。

列车单位质量所受到的曲线阻力为

$$f_r = \frac{600}{R} \quad (6)$$

式中: R 为曲线半径。

列车曲线附加阻力为

$$F_r = \frac{Mg}{1\,000} f_r \quad (7)$$

1.2.2 动车组惰行控制能耗模型

由于动车组站间运行距离比较长, 根据线路坡度条件以及限速情况, 中间可能存在多个“牵引—惰行”的工况转换点, 如图4所示。

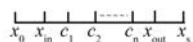


图4 惰行工况分布图

假设整个运行线路的始末位置分别为 x_0 、 x_s , ($x_0 \sim x_{in}$) 为起动加速阶段, ($x_{out} \sim x_s$) 为减速停车阶段, $c_1, c_2, \dots, c_n$ 为工况转换点。($x_{in} \sim c_1$) 为牵引工况, ($c_1 \sim c_2$) 为惰行工况。依此类推, $c_1, c_3, \dots$ 为“牵引—惰行”工况转换点, $c_2, c_4, \dots$ 为“惰行—牵引”工况转换点。在每个工况运行区间内, 通过累加迭代计算列车的牵引运行能耗。

将列车运行的过程分割成许多微小的距离步长 ΔL 。当 ΔL 足够小时, 则可近似认为在该步长内列车受力恒定, 做匀变速运动^[4]。

在牵引工况区间, 第 i 个工况 ($c_{i-1} \sim c_i$) 内的第 j 个距离步长上能耗为

$$E_{ij} = \frac{1}{2}m(v_{j+1}^2 - v_j^2) + (F_g + F_0 + F_r)\Delta L/\eta + F_0[(v_j + v_{j+1})/2]\Delta L/\eta \quad (8)$$

$$t_{i,j} = 2\Delta L/(v_{i,j+1} + v_{i,j}) \quad (9)$$

式中: η 为能量利用效率。

因此, 该牵引工况范围内的列车牵引能耗与运行时分为

$$\begin{cases} t_i = \sum t_{i,j} \\ E_i = \sum E_{i,j} \end{cases} \quad (10)$$

在惰行区间, 有:

$$\begin{cases} t_i = \sum t_{i,j} \\ E_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

列车惰行节能问题可描述为, 列车在指定线路上运行, 以准时、准点停车与线路限速为约束条件, 使得列车运行能耗最小。构建能耗模型目标函数如下:

$$E = \sum E_i + E_{in} + E_{out} \quad (12)$$

约束条件:

$$\begin{cases} a = \frac{dv}{dt} = \mu_1 F(v) - \mu_2 B(v) - F_0 - F_g - F_r \\ v = \frac{dx}{dt} \\ T = \sum t_i + t_{in} + t_{out} \\ 0 \leq v_i \leq v_{i, \lim} \\ \Delta S \leq \Delta S_{\max} \\ \Delta T \leq \Delta T_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: μ_1 与 μ_2 分别为牵引力系数与制动力系数; $B(v)$ 为制动力函数; t_i 为列车中间运行阶段的时间; $v_{i, \lim}$ 为列车相应位置的限速; t_{in} 、 t_{out} 、 E_{in} 、 E_{out} 分别为起动加速阶段与减速停车阶段的运行时间与能耗; $\Delta S_{\max}$ 为距离裕量; $\Delta T_{\max}$ 为时间裕量。

2 基于遗传算法的动车组惰行控制策略优化

高速动车组的运行控制需要综合考虑牵引

能耗、站间运行时分以及停车精度等多个目标,具有大滞后、非线性的特点。本文采用遗传智能算法对其运行过程进行优化。遗传算法是一种随机进行迭代、用于解决最优化问题的搜索启发式算法。

2.1 初始种群生成

(1) 染色体编码。染色体编码表达式如下:

$$W = [(u_1, c_1), (u_2, c_2), \dots, (u_i, c_i), \dots, (u_k, c_k)] \quad (14)$$

式中: u_i, c_i 为控制变量, u 表示操纵级位的集合, 用于定义牵引级位、空档和制动级位, c 表示工况转换点位置的集合。

$W_i = [u_i, c_i]$, 代表列车第 i 次控制策略, 式(14)表明, 列车在准时与停车准确度约束的前提下完成站间运行, 在 k 个合理的操纵序列中寻找能耗最小的组合^[9]。

染色体构造采用二进制基因编码方式, 采用在染色体中可以同时表示惰行点的数目和位置的分层遗传算法, 基因表示类似于多个惰行点控制, 引入一位基因 3, 确定所需惰行点的数目, 如表 1 所示。当该位为“1”时表示多个惰行点控制, 该位为“0”时表示单惰行点控制^[3]。

表 1 染色体表示的惰行点控制

惰行点	二进制编码	绝对距离/m
惰行点 1 (基因 1)	11100001000	1 800
惰行点 2 (基因 2)	101110111000	3 000
多惰行点控制 (基因 3)	0/1	—
染色体	111000010001 10111011100010/1	—

(2) 种群产生。初始种群规模选择为 200 个, 迭代次数为 200 次。

(3) 适应度函数。按动车组能耗模型, 以定时、准确停车为约束条件, 以能耗最小为控制目标, 采用线性加权和方法, 将多目标优化转化为单目标优化问题。建立目标函数如下:

$$\begin{cases} J = k_1 E + k_2 \Delta t + k_3 \Delta S \\ \text{优化目标: } \min J \end{cases} \quad (15)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为能耗、运行时间、停车准确度权

重系数, 参考文献[9], 结合本文的仿真数据分析, 分别取 0.4、0.3、0.3^[6]。

适应度函数为

$$F_{it} = \frac{\lambda}{J + C} \quad (16)$$

式中: λ 为调整系数; C 为正常数。

2.2 遗传操作

染色体的遗传操作包括选择、交叉、变异 3 种操作。选择操作是从群体中选择优胜、淘汰劣质个体。交叉操作是将父代个体进行替换重组而生成新的个体。变异操作是将种群中的个体随机地交换某些基因, 从而产生有益的基因组合^[9]。

交叉和变异是从上一代染色体得到新基因的两个非常重要的操作, 交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的大小会影响算法的搜索效率, 设置较小不利于种群进化, 设置过大则会降低算法效率^[3-4]。自适应遗传算法可以根据个体的适应度值自动调整概率。当个体的适应度较差时增加其交叉和变异概率, 使其能够快速收敛, 当群体中个体的适应度较好时, 减小交叉概率和变异概率, 能够较好地增加算法的进化效率^[3]:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_{\max}} - (P_{c_{\max}} - P_{c_{\min}})(f_{\max} - f), & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c_{\max}}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m_{\max}} - (P_{m_{\max}} - P_{m_{\min}})(f_{\max} - f), & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m_{\max}}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f_{\max}, f_{\text{avg}}$ 分别为群体中个体的最大适应度值和个体平均适应度值。

为防止遗传搜索进入迟纯状态, 设置最小交叉率 $P_{c_{\min}}$ 为 0.4, 设置最大交叉率 $P_{c_{\max}}$ 为 0.8。

3 仿真分析

本文以 CRH3 型 4 动 4 拖的编组列车为仿真研究对象, 以某高铁线路上中间 2 个站点的实际线路数据为研究案例对遗传控制算法进行仿真, 以验证控制方法的有效性。此段路线全长为 60 km, 设定运行时间为 960 s, 允许时间误差为 20 s。线路限速如表 2 所示。CRH3 动车组基本特性参数如表 3 所示。

表 2 线路基本情况

序号	区间/km	限速/(km·h ⁻¹)
1	0~2	200
2	2~25	300
3	25~33	260
4	33~42	300
5	41~57	280
6	57~60	200

表 3 CRH3 主要特性参数

参数名称	参数值
输出功率/kW	8 800
定员编组质量/t	563
最大牵引力/kN	300
能量利用效率	0.9
再生制动能量利用率	0.8
单位基本阻力/(N·kg ⁻¹)	7.75+0.062 4v+0.001 13v ²

图 5 是惰行优化控制的仿真流程图。图 6 是适应度值随遗传进化代数的变化曲线。图 6 表明,在 30 代以前适应度值变化较慢,在 30~65 代间适应度值明显上升。在 65 代时达到了最大值并保持稳定,说明种群的收敛性较好。

根据遗传算法,可以得到优化后的惰行控制点以及速度距离曲线,如图 7 所示。在中间运行

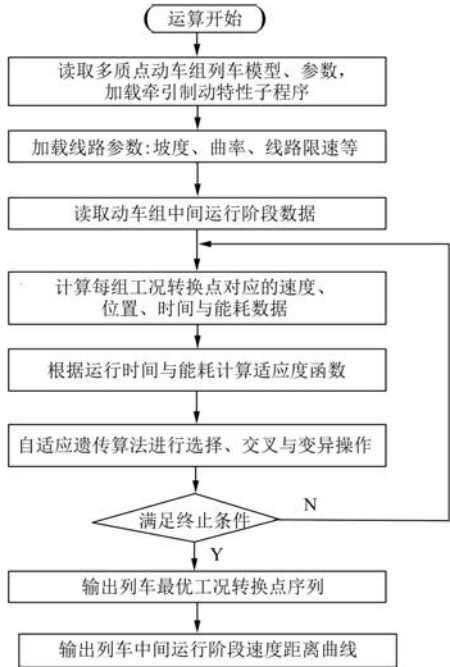


图 5 惰行控制仿真流程

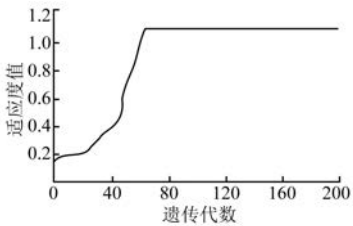


图 6 适应度值随进化代数变化曲线

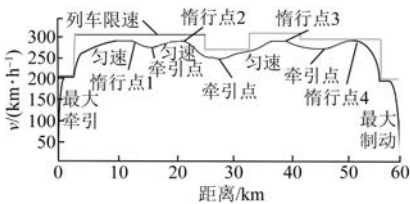


图 7 惰行控制仿真运行曲线

阶段,采用“牵引-匀速-惰行”控制策略,通过自适应遗传算法寻找使能耗最小的惰行控制点数量与位置。在牵引阶段通过调整操纵级位使列车速度不超过线路限速。站间运行时分与运行能耗经 MATLAB 程序计算,数据如表 4 所示。最大牵引、匀速、制动工况耗时 950 s、能耗 2 115 kW·h。

表 4 惰行控制节能效果

控制策略	能耗/准时/停车权重	耗时/时间误差/s	能耗/(kW·h)	停车误差/m
1	0.4/0.2/0.4	973/+13	1 801	+0.8
2	0.4/0.3/0.3	962/+2	1 838	+1.6
3	0.4/0.4/0.2	960/0	1 877	-7.6
4	0.5/0.2/0.3	975/+15	1 753	+2.2
5	0.5/0.3/0.2	964/+4	1 781	-6.4

当没有采用优化控制策略,仅考虑列车限速,采用最大牵引、匀速与最大制动策略时,由 MATLAB 计算程序可得列车运行时间 950 s,能量消耗为 2 120 kW·h。

采用惰行优化控制策略之后,在不同的权重系数下,列车的运行能耗、耗时与停车误差如表 4 所示。对比 1 号、2 号、3 号,当能耗权重不变、准时权重增加时,时间误差由 13 s 到 2 s 再到 0 s,时间误差变小。但停车误差由 +0.8 m 到 +1.6 m 再到 -7.6 m,不断增大。

对比 1 号、4 号,当能耗权重系数从 0.4 增加至 0.5,准时权重从 0.3 降至 0.2 时,能耗降低了 85 kW·h,但是时间误差从 2 s 增加到了 15 s。因

此,能耗权重系数增大,节能效果越好,但会导致时间误差与停车误差的增加。

经过大量仿真分析,本文的优化控制策略中,综合考虑能耗、准时与准点停车三者的均衡,取权重系数为 0.4、0.3、0.3,此时惰行节能的运行时间误差与停车误差均比较小,与未采取控制策略时相比,节能约 13.1%,达到了较好的节能效果。

在满足正点运行的前提下,给定目标运行时间,能耗、准点、停车权重系数为 0.4、0.3、0.3,对以下 2 种情况的能耗进行对比分析:一是基于线路限速进行 3 次惰行;二是经惰行控制策略优化进行 4 次惰行。表 5 是运行能耗的对比。

表 5 不同惰行工况点时的运行能耗

目标时间/s	惰行 3 次		惰行 4 次 (最优惰行控制点)	
	耗时/s	能耗/(kW·h)	耗时/s	能耗/(kW·h)
820	821	1 685	824	1 580
860	862	1 726	865	1 650
900	902	1 799	905	1 721
960	962	1 916	962	1 838

由表 5 可知,经遗传算法优化后,中间运行阶段 4 个惰行点产生的运行能耗低于 3 个惰行点产生的运行能耗,说明遗传算法优化后的惰行控制策略是有效的。

4 结 语

(1) 基于高速动车组多质点模型,建立了动车组的惰行控制能耗模型。以操纵级位与工况转换点位置为变量,确定出列车运行的速度曲线,实现准时与准点停车约束条件下能耗最小的优化效果。

(2) 设计了自适应遗传算法,以解决固定交叉和变异概率带来的搜索效率与种群进化问题。该算法可以根据个体的适应度值自动调整交叉和变异概率。

(3) 采用线性加权和方法,将能耗、运行时间、停车准确度这一多目标优化问题转化为单目标优化问题,通过仿真分析获取最佳加权系数。

(4) 仿真结果表明基于自适应遗传算法的动车组惰行控制策略在准点与距离约束的前提下,得到了较好的节能运行效果。

【参 考 文 献】

[1] 张杰,张倩,韦永全,等. 动车组节能运行控制策略仿真分析[J]. 机车电传动, 2018(5):34.

[2] 高浠瑞,董海鹰,杨立霞. 高速列车追踪运行的多目标优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2335.

[3] 张琼洁. 高速动车组节能运行操纵策略研究[D]. 南昌:华东交通大学,2014.

[4] 王成莉. 基于遗传算法的高速列车节能运行控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[5] 王茜茜. 基于遗传算法的动车组列车节能优化控制研究[D]. 兰州:兰州交通大学. 2020.

[6] 潘洋,符卓. 考虑人工驾驶的动车组列车节能运行优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1105.

[7] 杨辉,张琼洁,张坤鹏,等. 动车组节能运行速度优化设定[J]. 信息与控制, 2014, 43(3): 334.

[8] 李学明,徐绍龙,蒋奉兵,等. 基于功率动态分配的自动驾驶机车牵引电机节能控制[J]. 电机与控制应用. 2021, 48(3):104.

[9] 苏锐丹. 高速列车节能运行优化关键技术及算法研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部