

中低速磁浮交通多车协同利用 制动能量的研究

矫岩峻, 刘思恺, 马 啸, 刘少克

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 首先分析了中低速磁浮交通单列车运行能耗和供电系统, 在此基础上建立多列车运行能耗模型。为了充分利用再生制动能量, 提出了可对运行间隔、停站时间和区间运行时分微调的列车运行时刻表制定方法。设计了多种群遗传算法, 以多列车运行能耗最低和最大程度利用再生制动能量为目标, 优化列车运行时刻表。通过采用精英保留策略和移民策略算法, 提高了寻优过程的稳定性和速度。仿真结果表明, 本文方法可将再生制动能量的利用率由传统 14.8% 提高到 80.9%, 将被利用的再生制动能量与运行能耗比值由传统 0.74% 提高到 4.2%。

关键词: 磁浮列车; 列车运行控制; 节能驾驶; 节能优化; 多种群遗传算法

中图分类号: U292.91⁺7; U268.6

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.04.106

Research on Multi-train Cooperative Utilization of Regenerative Braking Energy for Low-speed Maglev Traffic

JIAO Yanjun, LIU Sikai, MA Xiao, LIU Shaoke

(School of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Single train model of operation energy consumption and power supply system was analyzed firstly, and on the basis of this, a multi-train operation energy consumption model was established. In order to make full use of the regenerative braking energy, a method was put forward to set up the train operation schedule which could implement fine tune of departure interval, the stopping time and the running time. A multiple population genetic algorithm was designed to optimize the train operation schedule with the minimum energy consumption and the maximum utilization of the regenerative braking energy as the goal. The elite reservation strategy and migration strategy were adopted to improve the stability and speed of the optimization process in the algorithm. Simulation results showed that this method could increase the utilization rate of regenerative braking energy from 14.8% to 80.9%, and the ratio of regenerative braking energy utilization and operation energy consumption could be increased from 0.74% to 4.2%.

Keywords: maglev train; train operation control; energy saving driving; energy saving optimization; multi population genetic algorithm

0 引言

中低速磁浮轨道交通是一种新的城市轨道交通,

其具有运行噪声小, 爬坡能力强, 转弯半径小等优点。目前长沙磁浮线已经通车, 北京 S1 线即将投入运营。作为城市轨道交通的一种, 磁浮轨道交通运行中牵引系统是其绝对主要能耗部分, 故其节能降耗是必须要面对的重要问题。

目前对轨道交通运行节能的研究包括线路设计和

节能驾驶等方面。文献[1]研究节能坡的寻优,分析了同一车型在不同的线路组合时的牵引能耗,找出了不同区间长度对应的较优的组合,进而可以指导城市轨道交通线路的节能设计。文献[2]提出通过优化停站时间和惰行时间来优化运行图,进而实现节能。文献[3-4]分别使用蚁群算法、遗传算法对单列车运行进行节能操纵优化,利用启发式算法寻找最佳挡位切换点。文献[5-6]采用遗传算法研究追踪条件下的列车运行节能。文献[7]研究了多列车条件下协同利用再生制动能量,并根据优化结果制定节能运行图。文献[8]研究了一种基于逆变回馈的再生制动能量吸收方式,将列车的制动能量经过逆变回馈回 35 kV 中压供电网络,供其他负载使用,以达到节约能源的目的。但以上研究均是针对地铁或者轻轨,在磁浮列车运行节能领域的研究还是一块空白。

本文根据磁浮列车运行过程中,牵引和制动时的能量输入输出特点,设计遗传算法,在一定范围内调整运行间隔、停站时间、区间运行时分,以提高再生制动反馈的能量利用率,进而降低系统的总能耗,并结合北京中低速磁浮列车运营示范 S1 线数据,通过仿真验证优化牵引节能的有效性。

1 单列车节能运行模型

1.1 典型运行过程

中低速磁悬浮列车的运行工况分为:牵引工况、制动工况和惰行工况。

列车典型的运行过程如图 1 所示。

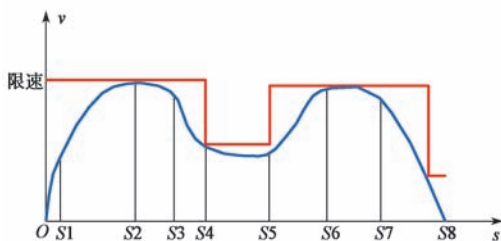


图 1 典型的列车速度与距离关系曲线

图 1 中:

O—S1: 列车启动牵引过程。

S1—S2, S5—S6: 列车牵引加速过程。

S2—S3, S4—S5, S6—S7: 列车惰行过程。

S3—S4, S7—S8: 列车制动过程。

牵引加速过程是指列车处于牵引工况,从静止或从低速加速到高速的过程。在此过程中列车受到的力有牵引力和阻力。

惰行过程是指牵引电机处于不工作状态下,列车利用惯性行走的过程。在此过程中列车只受运行阻力的作用。在列车的 3 种运行工况中,惰行工况下只有悬浮功耗,因此惰行时的功耗是最低的。因此为了降低列车运行的能耗,在中间运行阶段应当尽可能地采用惰行工况。

制动过程是指列车速度较高,利用制动力使列车速度下降,以满足线路限速要求的过程。在此过程中,速度较高时采用再生制动,速度较低时采用机械制动。列车受到的力有制动力和阻力。在这个过程中列车再生制动阶段向电网反馈能量,机械制动阶段不吸收也不反馈能量。

1.2 节能模型

磁浮列车从起点出发,运行到终点后制动停车,期间牵引、惰行和制动工况反复变化,在满足时间和乘客舒适度的条件下,为达到最小能耗的目的,寻求合理的工况转换序列和转换位置,是单列车节能要研究的主要内容。

与图 1 列车典型的运行过程对应的功率与距离关系如图 2 所示。

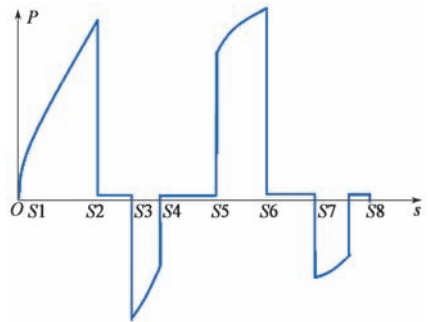


图 2 典型的列车功率与距离关系曲线

设磁浮列车从始发站出发到终点站停车的时间分别为 t_1 、 t_2 , 运行过程中牵引系统功率为 $P_0(t)$, 为方便计算, 设 $P_1(t)$ 为从电网输入到列车牵引系统的功率, $P_2(t)$ 为列车再生制动时再生的功率, 则有

$$P_1(t) = \begin{cases} P_0(t), & P_0(t) > 0 \\ 0, & P_0(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_2(t) = \begin{cases} 0, & P_0(t) > 0 \\ -P_0(t), & P_0(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

列车正常运行过程时的悬浮功率 $P_3(t)$, 其他负载平均功率为 $P_4(t)$, 可被本车利用的再生制动功率为

$$P_5(t) = \begin{cases} P_3(t) + P_4(t), & P_2(t) > P_3(t) + P_4(t) \\ P_2(t), & P_2(t) < P_3(t) + P_4(t) \end{cases} \quad (3)$$

再生制动产生的功率首先供给本列车使用, 多余的功率要反馈到直流电网上, 反馈的功率为

$$P_6(t) = \begin{cases} P_2(t) - P_3(t) - P_4(t), & P_2(t) > P_3(t) + P_4(t) \\ 0, & P_2(t) < P_3(t) + P_4(t) \end{cases} \quad (4)$$

将一列车上所有用电系统看成一个整体负载, 其从网侧吸收为正, 反馈为负, 称其为车辆功率:

$$P_7(t) = P_1(t) - P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = P_1(t) + P_3(t) + P_4(t) - P_5(t) - P_6(t) \quad (5)$$

对功率 $P_1(t), P_2(t), \dots, P_6(t)$ 在时间 $t_1 \sim t_2$ 内进行积分, 对应产生的或消耗的能量为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_6$ 。

中低速磁浮列车采用直线感应电机牵引, 电磁铁悬浮车体, 磁浮列车牵引计算运行能耗应同时考虑牵引能耗和悬浮能耗两部分, 这与传统轮轨列车牵引计算时只考虑牵引系统能耗是不同的。在单列磁浮列车

运行节能研究中, 牵引计算目标是总的牵引和悬浮能量输入小, 反馈制动能量利用率高, 故其目标函数为

$$Q = \min(Q_1 + Q_3 - Q_5) \quad (6)$$

2 牵引供电系统模型

中低速磁浮交通的供电系统负责对列车及其附属设备提供电力能源, 其作为城市电网的子用户, 从城市电网获取电能, 再经过降压和整流等步骤向列车、控制台等输送电能, 起中间节点的作用。磁浮轨道交通供电系统组成如图3所示。

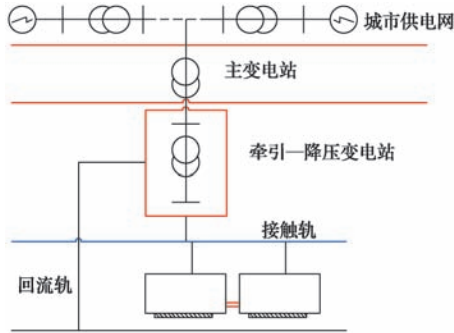


图3 磁浮交通供电系统示意图

如图3所示, 在中低速磁浮的供电系统的设计规划中, 根据线路的要求, 一般情况下会沿线建设城市轨道交通专用主变电站, 将城市电网输送来的高压电能进行第一步降压处理, 输出为35 kV或10 kV交流电。然后, 再经牵引变电所进行第2次的降压和整流处理, 输出1 500 V列车牵引电网专用直流电。

牵引供电系统正常运行时, 每个供电区间都是由相邻2个牵引变电所双边提供电能。当列车处于再生制动工况时, 制动产生的电能首先供给本车使用, 多余的电能通过整流器反馈回直流供电网, 可供在同一供电区域内的其他设备使用, 而在电网中能瞬时吸收较大功率的设备只有其他处于牵引工况的列车, 如果牵引列车不能及时将再生制动产生的功率及时吸收, 为保护供电网络和车载用电设备, 当列车网压或变电站网压超过门限值时, 多余能量会被地面制动电阻消耗。牵引供电系统示意图如图4所示。

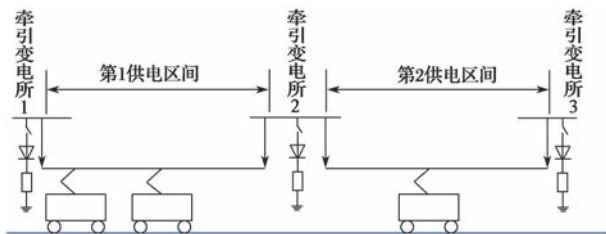


图4 牵引供电系统示意图

3 多车运行节能策略研究

单列车运行节能的研究中, 只考虑单辆列车运行过程中能耗最小, 没有充分利用再生制动反馈回电网的能量。本文在传统列车运行时刻表编制方法的基础上提出改进, 认为在一定范围内可以微调列车区间运

行时分、停站时间和运行间隔, 以提高再生制动反馈回电网能量的利用率, 进而实现整体最节能的目标。

3.1 多列车运行节能模型

多列车协同利用再生制动能量关键在于列车制动时, 在同一时刻, 同一供电区间, 有其他列车处于牵引工况, 可以吸收这部分能量。多列列车在多站间连续运行, 若想充分利用再生制动能量, 可考虑改变运行间隔、区间运行时分、停站时间, 这个过程中变量多, 范围大, 一个微小的调整, 可能使得此处利用率变高, 另一处利用率却变低, 有顾此失彼的可能性, 所以本文采用遗传算法解决这一问题。

设在同一个供电区间有 n 列车。第 i 列车的牵引系统功率为 $P_0^{(i)}(t)$, 从电网输入到牵引系统功率为 $P_1^{(i)}(t)$, 再生制动时产生的功率为 $P_2^{(i)}(t)$, 悬浮功率为 $P_3^{(i)}(t)$, 其他负载功率为 $P_4^{(i)}(t)$, 反馈到电网的功率为 $P_6^{(i)}(t)$ 。

将同一供电区间内 n 列列车看成一个整体, 其功率为

$$P_z(t) = \sum_{i=1}^n P_0^{(i)}(t) \quad (7)$$

则总牵引功率和总再生制动产生的功率为

$$P_{qy}(t) = \sum_{i=1}^n P_1^{(i)}(t) \quad (8)$$

$$P_{zd}(t) = \sum_{i=1}^n P_2^{(i)}(t) \quad (9)$$

总悬浮功率和总其他功率为

$$P_{xf}(t) = \sum_{i=1}^n P_3^{(i)}(t) \quad (10)$$

$$P_{qt}(t) = \sum_{i=1}^n P_4^{(i)}(t) \quad (11)$$

反馈到电网的总功率为

$$P_{fk}(t) = \sum_{i=1}^n P_6^{(i)}(t) \quad (12)$$

在一个供电区间内, n 列列车运行时, 需要从电网输入总功率为

$$P_{cxy}(t) = P_{qy}(t) + P_{xf}(t) + P_{qt}(t) \quad (13)$$

再生制动功率被利用的总功率为

$$P_{zly}(t) = \begin{cases} P_{fk}(t), & P_{fk}(t) < P_{cxy}(t) \\ P_{cxy}(t), & P_{fk}(t) > P_{cxy}(t) \end{cases} \quad (14)$$

一个供电区间里面, 当反馈功率大于其他用电设备吸收的功率时, 则通过地面制动电阻消耗, 溢出功率为

$$P_{yc}(t) = \begin{cases} 0, & P_{fk}(t) < P_{cxy}(t) \\ P_{fk}(t) - P_{cxy}(t), & P_{fk}(t) > P_{cxy}(t) \end{cases} \quad (15)$$

在同一供电区间内 n 列车运行通过, 功率 $P_{qy}(t)$ 、 $P_{zd}(t)$ 、 $P_{xf}(t)$ 、 $P_{qt}(t)$ 、 $P_{fk}(t)$ 、 $P_{zly}(t)$ 、 $P_{yc}(t)$ 相对应消耗或产生的能量分别为 Q_{qy} 、 Q_{zd} 、 Q_{xf} 、 Q_{qt} 、 Q_{fk} 、

Q_{zly} 、 Q_{yc} 。

多列车运行能耗为

$$Q_{yx} = Q_{qy} + Q_{xf} \quad (16)$$

多列车再生制动利用率为

$$Lv_{zs} = \frac{Q_{zly}}{Q_{fk}} \times 100\% \quad (17)$$

再利用能量占运行能耗百分比为

$$Lv_{qy} = \frac{Q_{zly}}{Q_{yx}} \times 100\% \quad (18)$$

3.2 染色体编码

假设当前要优化 2N 列车在车站数量为 K 的某双线线路上运行, 其中正反向运行的车各有 N 列, 将一列车从始发站运行到终点站所包含的信息称为 1 条基因, 2N 条基因组成一个染色体。1 条基因包含以下信息: 发车时间 (t_{fc})、策略选择 (cl)、停站时间 (t_{tz}) 信息。策略中包含了运行功率与时间的关系, 故其决定了区间运行时分 (t_{yx})。则第一站到站时间: $t_{dz}(1) = t_{fc}(1) + t_{yx}(1)$ 。第二站发车时间为: $t_{fc}(2) = t_{dz}(1) + t_{tz}(2)$ 。以后依此类推, 直到终点站。

染色体结构如图 5 所示。

T_FC|T_TZ|Celue|T_YX|T_DZ|Q_QYXT|Q_YX|Lv_qy|Lv_zs

图 5 染色体示意图

图 5 中 T_{FC} 、 T_{TZ} 、 $Celue$ 、 T_{YX} 、 T_{DZ} 、 Q_{QYXT} 、 Q_{YX} 分别包含了 2N 列车在 K 站间的发车时间、停站时间、策略选择、区间运行时分、到站时间、牵引系统能耗、运行能耗。

3.3 种群初始化

假定同一方向的任意相邻两列列车之间的标准运行间隔为 Fc_{Bz} , 允许在 $\pm Fcbd$ 范围内波动; 任意一辆车在某一车站标准停站时间为 Tz_{Bz} , 允许在 $\pm Tzbd$ 范围内波动; 任意两站之间有 CL 个运行策略可供选择。则 2N 条基因生成染色体时需要满足以下条件:

①正向首车在始发站的发车时间为 0, 反向首车始发站发车时间范围为 $0 \sim Fc_{Bz}$ 。

②同一方向上相邻两车运行间隔范围为 $Fc_{Bz} \pm Fcbd$ 。

③任意一站的停站时间范围为 $Tz_{Bz} \pm Tzbd$ 。

④任意一辆车在选择运行策略时, 需要考虑到站时间必须满足与前一列车到达该站时间之差在 $Fc_{Bz} \pm Fcbd$ 范围内。

以上的条件, 可将任何一站的前后两车到站时间间隔和列车在站台停站时间都限制在一个合理的时间范围。

3.4 计算目标函数值和适应值

本文为充分利用再生制动产生的能量而达到节能的目的, 设计适应值:

$$f = Lv_{qy} = \frac{Q_{zly}}{Q_{yx}} \quad (19)$$

这样设计适应值的目的是, 为了选出运行能耗少且再生制动能量被利用多的染色体。

3.5 遗传操作

1) 选择复制

本文采用轮盘赌法进行染色体的选择操作, 逐步淘汰适应值小的基因^[4]。

则种群中第 i 个基因被选中的概率 p_i 为

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{popsiz} f_j} \quad (20)$$

式中: f_i 为第 i 个基因的适应值; $\sum_{j=1}^{popsiz} f_j$ 为种群所有基因适应值的总和。

2) 交叉

本文进行单点交叉, 选择任意 2 个染色体, 对某一同位基因进行交叉互换。交叉的位点可以是发车时间、停站时间或运行策略。

交叉后的染色体需满足种群初始化中的 4 个条件, 否则交叉不成功。

3) 变异

变异过程类似于交叉过程, 首先选择变异基因, 然后选择变异车站、变异类型。

变异后的染色体需满足种群初始化中的 4 个条件, 否则变异不成功。

4) 精英保留

在遗传操作过程中, 虽然随着进化会产生越来越多的优秀染色体, 但是由于遗传操作的随机性, 也可能破坏掉种群中历代迭代中最优染色体。为保证适应值最好染色体能被保存到下一代群体中, 本文采用精英保留策略。精英保留策略的操作过程是: 首先找出当代中的最优染色体和最差染色体, 如果当代染色体中最优染色体比种群历代迭代最优染色体适应值高, 则以当代最优染色体替换历代最优染色体; 如果当代最优染色体比历代迭代最优染色体差, 则用历代最优染色体替换掉当代染色体中的最差染色体。

3.6 多种群遗传算法主程序设计

本文设置 2 个辅助种群 (A、C)、1 个主种群 (B) 和 1 个特殊种群 (D)。ABC 按照种群初始化的方式生成, D 种群是由 B 中染色体变形而来的, D 中染色体的各个基因运行间隔均为 Fc_{Bz} , 正向运行的各车运行策略和停站时间均与正向第 1 基因相同, 反向运行的各车运行策略和停站时间均与反向第 1 基因相同。

主程序分为外循环和内循环阶段。内循环阶段中, 各个子种群彼此独立, 为保证群体中染色体的多样性, 每个子种群的交叉率和变异率取不同的值。各个子种

群进化到一定代数后, 用 ACD 种群最优染色体替代 B 种群中最差染色体, 同时使 A、C 种群的最优染色体进行互相移民, 且将 ABC 种群的最优染色体变形成符合 D 种群染色体形式, 替换 D 种群最差的 3 个染色体。这样, B 种群中染色体的更新有 2 种方式: 一是 B 种群自身的遗传操作进行染色体更新, 另一种方式接受 ACD 种群提交的最优染色体。AC 种群之间移民能更好地遍历解空间, 快速产生优质解。D 种群的设置可以随机产生有规律的高效利用再生制动能量。外循环则一直重复上述过程直到结束。本文算法具体过程如图 6 所示。

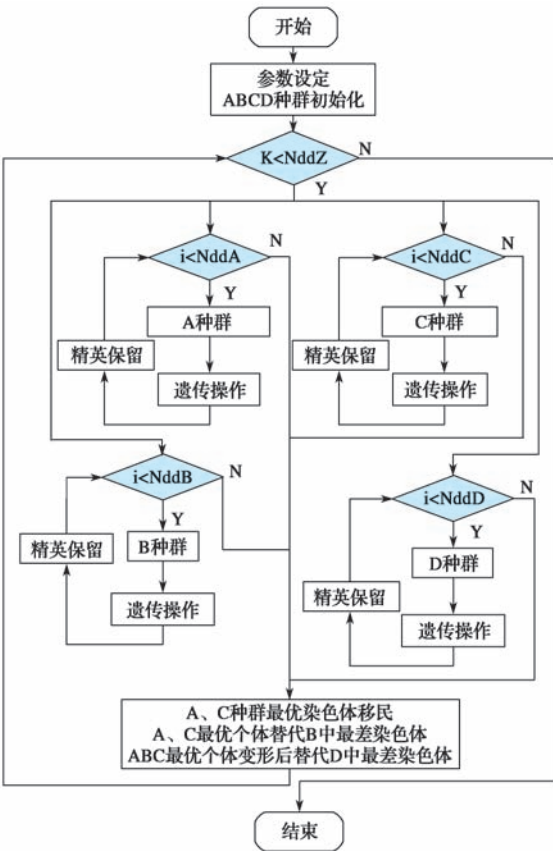


图6 主程序图

4 仿真

本文利用北京低速交通 S1 线仿真数据, 仿真列车以 5 车站 2 供电区间运行情况为例。列车从石门营始发途径小园、矿务局、上岸村终到石龙路, 双向运行。牵引变电所分别设置在石门营站、矿务局站、石龙路站。线路情况如表 1 所示。

仿真时设 $F_{c_Bz}=240\text{ s}$, $T_{z_Bz}=27.5\text{ s}$, 任何两车站之间正、反 2 个方向均有 5 个运行策略可供选择 (CL=5, 5 种策略之间运行时间相差不大)。表 2 作为示例列出石门营到小园双向的 5 种策略。

表1 线路情况

供电区间	车站	距离/m
一	石门营—小园	1 297
	小园—矿务局	1 267
二	矿务局—上岸村	1 044
	上岸村—石龙路	1 064

表2 石门营—小园策略示例

方向	策略	运行时间/s	运行能耗/(kW·h)
石门营—小园	1	85	16.8
	2	87	16.1
	3	89	15.3
	4	91	14.4
	5	93	14.0
小园—石门营	1	96	29.6
	2	99	29.5
	3	102	28.9
	4	106	28.7
	5	110	28.4

为了更好地利用再生制动能量, 采用本文方法, 设置 $F_{cbd}=30\text{ s}$, $T_{zbd}=2.5\text{ s}$, $CL=5$, $2N=10$, 将正向行驶的车按发车时间顺序从小到大编号为奇数, 反向行驶的车编号为偶数。经优化计算得到车站与运行时间关系如图 7, 站间运行策略选择如表 3, 停站优化时间如表 4。

表3 站间策略选择

车编号	策略	车编号	策略
1	2 2 2 4	2	3 5 5 1
3	2 2 2 5	4	3 5 5 1
5	2 2 2 4	6	3 4 5 3
7	2 2 2 4	8	3 5 5 4
9	2 1 5 4	10	3 2 5 4

表4 停站优化时间

车编号	停站时间/s	车编号	停站时间/s
1	2 0.5 0.5 0	2	-1 -2 2 0
3	0.5 2 -2 0	4	0 -1 -2 0
5	-1 1 -2 0	6	2 -2 1 0
7	-1 2 0.5 -2	8	-2 -1 -1 0
9	-2 -2 -1 0	10	-1 -2 -2 0

注: 表中数字表示在标准停站时间基础上的增减。

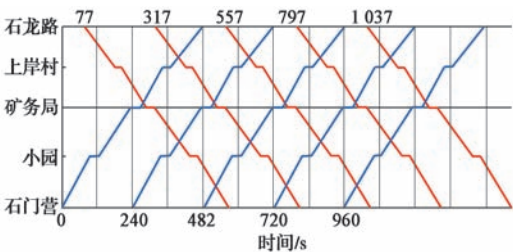


图7 优化运行图

第一供电区间的总功率 $P_z(t)$ 、再生制动反馈电网功率 $P_{rk}(t)$ 、再利用功率 $P_{zly}(t)$ 、溢出功率 $P_{yc}(t)$ 与时间的关系分别如图 8 (a) ~ 图 8 (d)。第二供电区间的如图 9 (a) ~ 图 9 (d) 所示。为对比本文优化结果与传统方式的差异, 仿真 2N 列列车运行均采用策略 3、运行间隔和停站时间分别为 240 s 和 27.5 s 的条件下的能耗关系, 并将对比结果列入表 5 所示。

表5 优化结果与传统方式对比

区间	对比	$Q_{_qy}$	$Q_{_zly}$	$Q_{_yc}$	$Lv_{_qy}$	$Lv_{_zs}$
一	传统	432.3	3.50	19.4	0.80%	15.30%
	优化	426.3	18.4	6.60	4.30%	73.70%
二	传统	410.2	2.80	16.7	0.70%	14.20%
	优化	383.8	15.8	1.50	4.10%	91.40%
总	传统	842.5	6.20	36.1	0.74%	14.80%
	优化	810.1	28.2	22.7	4.2%	80.9%

注: 表中 $Q_{_qy}$ 、 $Q_{_zly}$ 、 $Q_{_yc}$ 单位均为 kW·h。

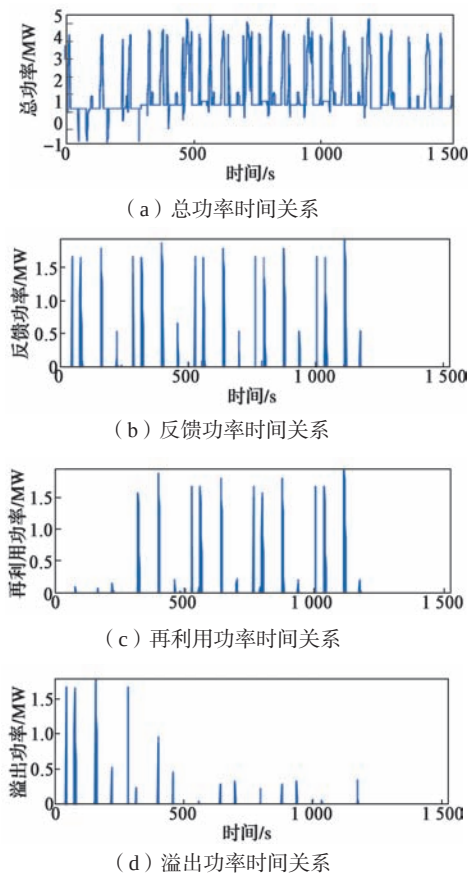


图 8 第一供电站功率时间关系

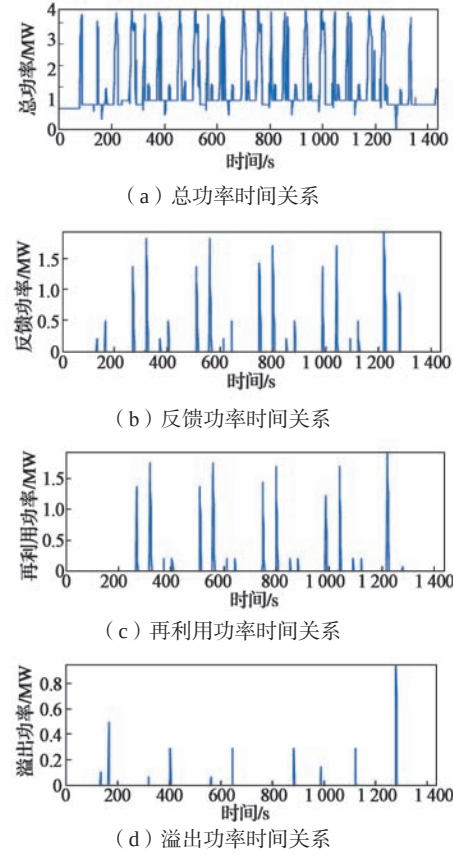


图 9 第二供电站功率时间关系

通过表 5 对比可以看出，本文优化的结果，可将再生制动能量的利用率由 14.8% 提高到 80.9%，将被利用的再生制动能量占运行能耗由 0.74% 提高到 4.2%。

5 结语

本文以中低速磁浮交通单列车运行能耗模型和供电系统模型为基础，建立多列车运行能耗模型。提出了可对运行间隔、停站时间和区间运行时分微调的列车运行时刻表制定方法。设计多种群遗传算法，以全线总能耗最低为目标进行寻优，算法中采用精英保留策略和移民策略，提高了寻优过程的稳定性和速度。利用北京中低速列车运营示范 S1 线部分线路，仿真 10 列车在 5 车站 2 供电区间双向运行的情况，本文方法可将再生制动能量的利用率由 14.8% 提高到 80.9%，将被利用的再生制动能量占运行能耗比例由 0.74% 提高到 4.2%。以上数据对比充分表明，本文方法可以提高再生制动能量的利用率，进而降低多列车全线运行时消耗的能量。

参考文献:

[1] 胡晓丹, 张杰. 城市轨道交通节能坡寻优研究 [J]. 铁道工程学报, 2013, 5(5): 27-39.

[2] WONG K K, HO T K. Dwell time and Run-time Control for DC Mass Rapid Transit Railways [J]. IET of Electric Power Applications, 2007, 1(6): 956-966.

[3] 于雪松. 城市轨道交通列车节能优化及能耗评估 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 21-35.

[4] 李丹. 基于遗传算法的城市轨道交通列车节能操纵方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 22-34.

[5] 王宝宝, 王瑞峰. 基于遗传算法的追踪列车节能操纵优化研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(11): 66-70.

[6] 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): 265-270.

[7] 步兵, 丁奕, 李辰岭. 列车控制与行车调度一体化节能方法的研究 [J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 64-71.

[8] 汪琪. 城市轨道交通列车再生制动能量回收系统的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 31-45.

[9] 王青元, 冯晓云, 朱金陵. 考虑再生制动能量利用的高速列车节能最优控制仿真研究 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 36(1): 96-102.

作者简介: 矫岩峻 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事磁悬浮直线传动技术、轨道交通牵引节能相关研究。