

基于再生制动能量利用的地铁列车 时刻表设计方法研究

贺德强^{1,2}, 王合良^{1,2}, 谭文举³, 苗 剑^{1,2}

- (1. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004;
2. 广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530021)

摘 要: 结合线路参数、列车运行工况以及时刻表等因素, 分析了同一供电区段内列车再生制动能量的利用情况, 建立基于再生制动能量利用与运行时刻表设计的多车节能优化模型。通过引入浓度免疫算法, 调整列车时刻表中发车间隔、停站时间、运行时间等要素并优化列车操纵工况, 求解出实际线路下的节能运行时刻表及多车节能驾驶策略。结合南宁地铁1号线某供电区段的仿真数据证明, 采用优化的节能运行时刻表在满足正点运行的前提下, 提高再生制动能量的利用率达11.4%, 降低列车运行的总能耗达16.9%。

关键词: 再生制动能量; 运行时刻表; 免疫算法; 多车节能

中图分类号: U231⁺.92; U292.4 **文献标识码:** A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.018

Timetable Design of Metro Train Based on Regenerative Braking Energy Utilization

HE Deqiang^{1,2}, WANG Heliang^{1,2}, TAN Wenju³, MIAO Jian^{1,2}

- (1. Mechanical Engineering College, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, Nanning, Guangxi 530004, China;
3. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530021, China)

Abstract: Combined with the line parameters, running condition, operation schedule, and so on, the recovery and utilization of regeneration braking energy was analyzed in the same power supply section. The multiple vehicles energy-saving optimization model was built based on the use of regenerative braking energy and the design of timetable. By introducing the immune algorithm, the headway, dwell time and running time were adjusted, and the train operation strategies was optimized. Finally, the energy-saving train operation schedule and multi vehicle energy-saving driving strategy were obtained in the actual line. The simulation data of one power supply section of Nanning metro line 1 proved that the utilization rate of regenerative braking energy was improved up to 11.4% and the total energy consumption of train was reduced up to 16.9% by using the optimized energy-saving schedules, which ensured the punctuality.

Keywords: regenerative braking energy; timetable; immune algorithm; multiple vehicle energy-saving

0 引言

地铁以其方便快捷、舒适安全、正点率高等优点,

成为人们重要的出行交通选择, 对缓解城市交通压力发挥着重要作用。与此同时, 地铁部门是城市公共交通中最大的耗能单位, 研究地铁列车的节能优化对节约运行成本, 促进城市交通的健康绿色发展具有重要意义。国内外专家学者针对地铁列车的节能优化展开了大量研究。文献[1-2]采用极大值原理优化列车工况转换点,

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51165001); 广西科技攻关项目(桂科攻1598009-6); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题(15-140-30S003)

并通过列车仿真平台模拟列车节能运行曲线。文献[3-5]基于遗传算法建立列车优化控制模型,求得列车站间运行的最优操纵策略。文献[6-7]综合考虑线路条件、最大限速以及准点率等因素,建立多约束的列车能耗模型,并采用模拟退火算法求得列车站间运行的最低能耗。

以上针对单车节能优化的研究,主要从列车操纵控制角度以减少牵引、增加惰行的方式达到节能目的,忽略了列车再生制动能量的回收利用。通过优化列车运行时刻表以及站间驾驶策略,充分利用再生制动能量是实现多车节能的关键所在。

文献[8]通过调整列车停站时间,优化运行时刻表,有效降低了制动电阻的耗能。文献[9]采用二次规划算法求解追踪列车能耗模型,优化不同追踪间隔下的列车运行曲线,较好地吸收列车再生制动能量。文献[10]综合利用运行时间控制与发车间隔优化等方法增大列车加速与制动同步时间,提高了再生制动能量利用率。文献[11]提出了一种列车运行控制与牵引供电于一体的节能优化方法,在先行列车与追踪列车准点运行的前提下,降低了运行总能耗。已有的研究成果在制定列车时刻表时未能全面考虑发车间隔、停站时间与站间运行时间等因素,或者未将时刻表设计与站间操纵策略的优化相结合。

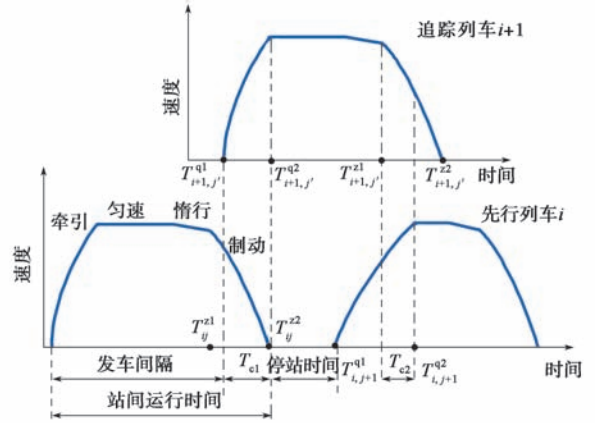
本文从多车节能角度,分析再生制动能量利用情况,建立多车能耗模型,以最大限度降低列车运行能耗以及提高再生制动能量利用率为目标,通过引入浓度免疫算法,并结合时间裕度^[12]思想,调整列车运行时间、停站时间以及发车间隔等时间要素,适度优化列车操纵工况,设计出具有鲁棒性的节能时刻表,从而增加相邻列车加速与制动的重叠时间,充分利用再生制动能量,有效降低了列车运行总能耗,为列车的行车调度与节能驾驶提供理论指导。

1 再生制动能量利用分析

地铁线路站间距离短,列车运行过程中,需要频繁牵引与制动,当列车再生制动时,若相邻列车处于牵引加速状态,则再生制动能量将反馈到接触网供相邻列车使用^[13]。相邻两列车加速与制动的同步时间(重叠时间)受发车间隔、停站时间、站间运行时间等因素影响,若两车间距过大,同一供电区段内至多只有一列车运行,再生制动能量无法被相邻列车使用,此时为避免牵引网压过大,该部分能量被车载电阻吸收。本文针对客流高峰期发车密度较大的情况下,研究两列车在同一供电区间内的再生制动能量利用情况。

如图1所示,先行列车与追踪列车分别按照同一时刻表以最大牵引-匀速-惰行-最大制动的节能模式运行^[14],牵引加速与再生制动同步发生的情况为:先行列车制动-追踪列车牵引,追踪列车制动-先行列车牵引^[15],重叠时间分别为图1中的 T_{c1} 与 T_{c2} ,当

重叠时间达到最大值时,再生制动能量利用率最高。



T_{c1} 为先行列车制动与追踪列车加速重叠时间; T_{c2} 为追踪列车制动与先行列车加速重叠时间

图1 再生制动能量原理图

根据线路中牵引变电所的管辖范围与站间距离大小,同一供电区间包含一个或多个车站,因此两列车制动与加速同步可能发生于相同或不同车站之间。重叠时间 T_{c1} 表示为

$$T_{c1} = \begin{cases} \min(T_{i+1,j'}^{q2} - T_{i+1,j'}^{q1}, T_{i,j}^{z2} - T_{i,j}^{z1}), & \text{if } T_{i,j}^{z1} < T_{i+1,j'}^{q1} < T_{i,j}^{z2} \\ \min(T_{i+1,j'}^{q2} - T_{i+1,j'}^{q1}, T_{i+1,j'}^{q2} - T_{i,j}^{z1}), & \text{if } T_{i,j}^{z1} < T_{i+1,j'}^{q2} < T_{i,j}^{z2} \\ \min(T_{i+1,j'}^{q2} - T_{i,j}^{z1}, T_{i,j}^{z2} - T_{i,j}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{q1} < T_{i,j}^{z1} < T_{i+1,j'}^{q2} \\ \min(T_{i,j}^{z2} - T_{i+1,j'}^{q1}, T_{i,j}^{z2} - T_{i,j}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{q1} < T_{i,j}^{z2} < T_{i+1,j'}^{q2} \\ 0 & \text{if } T_{i+1,j'}^{q2} < T_{i,j}^{z1} \text{ or } T_{i+1,j'}^{q1} > T_{i,j}^{z2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{i,j}^{z1}$, $T_{i,j}^{z2}$ 分别为先行列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站制动起始与结束时刻; $T_{i+1,j'}^{q1}$, $T_{i+1,j'}^{q2}$ 分别为追踪列车 $(i+1)$ 在 j' 至 $(j'+1)$ 站加速起始与结束时刻。当两车间距小于一个站间距离时, $j = j'$; 当间距大于1个站间且小于2个站间距离时, $j' = j-1$ 。

重叠时间 T_{c2} 表示为

$$T_{c2} = \begin{cases} \min(T_{i,j+1}^{q2} - T_{i,j+1}^{q1}, T_{i+1,j'}^{z2} - T_{i+1,j'}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{z1} < T_{i,j+1}^{q1} < T_{i+1,j'}^{z2} \\ \min(T_{i,j+1}^{q2} - T_{i,j+1}^{q1}, T_{i+1,j'}^{z2} - T_{i+1,j'}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{z1} < T_{i,j+1}^{q2} < T_{i+1,j'}^{z2} \\ \min(T_{i,j+1}^{q2} - T_{i+1,j'}^{z1}, T_{i+1,j'}^{z2} - T_{i+1,j'}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{q1} < T_{i+1,j'}^{z1} < T_{i,j+1}^{q2} \\ \min(T_{i+1,j'}^{z2} - T_{i,j+1}^{q1}, T_{i+1,j'}^{z2} - T_{i+1,j'}^{z1}), & \text{if } T_{i+1,j'}^{q1} < T_{i+1,j'}^{z2} < T_{i,j+1}^{q2} \\ 0, & \text{if } T_{i,j+1}^{q1} > T_{i+1,j'}^{z2} \text{ or } T_{i,j+1}^{q2} < T_{i+1,j'}^{z1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{i+1,j'}^{z1}$, $T_{i+1,j'}^{z2}$ 分别为追踪列车 $(i+1)$ 在 j' 至 $(j'+1)$ 站制动起始与结束时刻; $T_{i,j+1}^{q1}$, $T_{i,j+1}^{q2}$ 分别为先行列车 i 在 $(j+1)$ 至 $(j+2)$ 站加速起始与结束时刻。

则两列车在整条线路中加速与再生制动重叠总时间为

$$T_c = \sum_{j=1}^{m-1} (T_{c1} + T_{c2}) \cdot \rho(j, j+1) \quad (m \text{ 为车站总数}) \quad (3)$$

$\rho(j, j+1)$ 为 j 与 $(j+1)$ 站是否位于同一供电区间的判

定系数。

$$\rho(j, j+1) = \begin{cases} 1, & j \text{ 与 } j+1 \text{ 站处于同一供电区间} \\ 0, & j \text{ 与 } j+1 \text{ 站处于不同供电区间} \end{cases} \quad (4)$$

由于相邻列车距离较近, 再生制动能量传输损耗忽略不计, 并且接触网上下行线路供电相互独立, 因此得到列车再生制动阶段回收的能量为

$$Q'_z = \int_0^{t_c} M \cdot a_z \cdot (v_z - \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot t) dt \quad (5)$$

式中: v_z , a_z 分别为加速与制动重叠时的制动初速度, 制动加速度。

两列车全线路制动总能量为

$$Q_z = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{m-1} \int_0^{t_{i,j}^z} M \cdot a_{i,j}^z \cdot (v_{i,j}^z - \frac{1}{2} \cdot a_{i,j}^z \cdot t) dt \quad (6)$$

式中: $a_{i,j}^z$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间的制动加速度; $v_{i,j}^z$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间制动初速度; $t_{i,j}^z$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间再生制动时间。

由 Q_z 与 Q'_z 得到列车再生制动能量利用率为

$$\eta = \frac{Q'_z}{Q_z} \times 100\% \quad (7)$$

2 多车能耗模型

在同一时段, 列车按照相同时刻表运行, 列车质量视为定值 M , 列车牵引初速度 $v_0=0$, 则列车牵引加速阶段能耗:

$$Q_q = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{m-1} \int_0^{t_{i,j}^q} M \cdot a_{i,j}^q \cdot \frac{1}{2} \cdot a_{i,j}^q \cdot t dt = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{m-1} \int_0^{t_{i,j}^q} M \cdot (a_{i,j}^q)^2 \cdot t dt \quad (8)$$

式中: $a_{i,j}^q$, $t_{i,j}^q$ 分别为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间的牵引加速度与牵引加速时间。

列车匀速运行阶段能耗:

$$Q_y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{m-1} \int_0^{t_{i,j}^y} F_{i,j}^q \cdot v_{i,j} dt \quad (9)$$

式中: $v_{i,j}$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间的匀速运行速度; $F_{i,j}^q$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间的牵引力; $t_{i,j}^y$ 为列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间匀速运行时间。

设列车 i 在 j 至 $(j+1)$ 站间惰行时间为 $t_{i,j}^d$, 惰行阶段仅空调、照明等车载辅助设备用电, 牵引能耗忽略不计。

综上所述, 基于再生制动能量利用最大化原则与时刻表优化方法, 结合式 (5)、式 (8)、式 (9) 建立多车能耗目标方程:

$$\min Q = f(t_{i,j}^q, t_{i,j}^y, t_{i,j}^d, t_{i,j}^z, T_p, T_i, a_{i,j}^q, a_{i,j}^z, v_{i,j}, a_z, v_z, F_{i,j}^q) = Q_q + Q_y + Q'_z \quad (10)$$

约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{停站时间约束: } T_{p \min} < T_p < T_{p \max} \\ \text{运行时间约束: } \frac{|t_{i,j}^q + t_{i,j}^y + t_{i,j}^d + t_{i,j}^z - T|}{T} \leq \beta \\ \text{发车间隔约束: } T_f > T_{z \min} \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_p 为停站时间; $T_{p \min}$ 为最小停站时间; $T_{p \max}$ 为最大停站时间; T 为列车 i 在 j 到 $(j+1)$ 站间计划运行时间; β 为时间裕度 (取 5%); T_f 为发车间隔; $T_{z \min}$ 为最小追踪间隔。

客流高峰期 T_p 经验值为 [20,50]s。

3 免疫算法求解能耗模型

免疫算法 (Immune Algorithm, IA) 是一种基于人工免疫理论发展而来的全局优化算法, 以其良好的鲁棒性和自适应性广泛应用于函数优化、智能控制及调度决策等领域。免疫算法继承了群集智能算法的复制、交叉与变异操作并对其进行改进, 通过抗体的亲和度与浓度双重机制并行实施搜索策略, 有效保持了可行解的多样性, 防止算法的过早收敛^[16]。采用免疫算法求解多车能耗模型的步骤为:

①输入能耗函数及其约束条件作为抗原, 设置抗体 (可行解) 规模 $P=50$, 最大迭代次数 $N=200$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.2$ 。

②随机产生初始抗体群 A , 且群体中任一抗体 $A_i = [t_{i,j}^q, t_{i,j}^y, t_{i,j}^d, t_{i,j}^z, T_p, T_i, a_{i,j}^q, a_{i,j}^z, v_{i,j}, a_z, v_z, F_{i,j}^q]$ 。

③计算抗体亲和度 (待优化的能耗方程函数值), 并保留亲和度较大的抗体, 构成抗体群 B 。设亲和度函数为:

$$F_k = -Q + c \quad (12)$$

式中: Q 为列车能耗函数; c 为常数。

④引入基于浓度 (与抗体相似的抗体数量) 的抗体繁殖策略, 计算抗体群 B 中个体的浓度 N_k 与期望繁殖率 E_k , 其中 $E_k = \frac{F_k}{(N_k)^\alpha}$ (α 为常数)。选择期望繁殖率高的抗体进行复制操作, 产生抗体群 C 。

⑤对抗体群 C 的个体进行交叉和变异操作, 产生抗体群 D , 从中选取 n 个亲和度高的抗体代替 C 中亲和度低的抗体, 产生下一代抗体群。

⑥判断是否满足终止条件 (达到最大迭代次数或抗体的最大亲和度趋于恒定)。若满足终止条件, 输出当前抗体, 即为能耗函数的最优解, 从而求得两列车在全线路运行的最低能耗; 若不满足, 则重复步骤 ③~⑤。免疫算法求解多车能耗模型的流程如图 2 所示。

4 实例仿真

为验证本文方法的有效性, 采用南宁地铁 1 号线运行数据, 模拟上行线路中火车站至民族广场站 4 站 3 区间内实际线路下的两列车运行情况。针对客流高峰期, 火车站 - 朝阳广场站、朝阳广场站 - 新民路站、新民

路站 - 民族广场站分别以 AW3、AW2 工况进行模拟, 对应列车质量 M_1 为 344 380 kg, M_2 为 307 300 kg。AW3 与 AW2 工况下, 列车分别以最大牵引力 386 kN、346 kN 启动加速, 再生制动过程中最大电制动力均为 335 kN, 列车限速为 80 km/h。优化前发车间隔为 150 s, 各列车按照计划时刻表以牵引 - 匀速 - 制动的节时模式运行, 先行列车与追踪列车速度 - 时间曲线如图 3 所示^[17-18]。计划时刻表如表 1 所示。

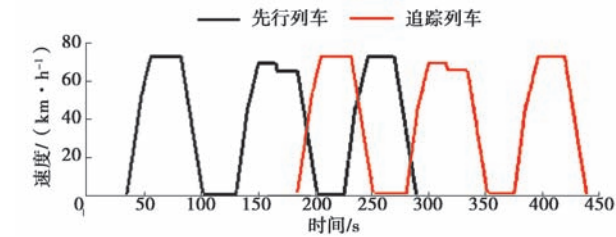


图 3 优化前列车运行图

表 1 计划时间表

时间	火车站	朝阳广场	新民路	民族广场
到达时间 /s	0	101.25	201.76	289.22
停站时间 /s	35	30	25	30

本文采用 Visual Studio 2010 仿真浓度免疫算法, 在约束条件限制范围内搜索多车能耗模型的可行解, 最终寻找出再生制动能量利用最大化的节能时间表 (如表 2 所示) 与站间操纵策略, 并绘制先行列车与追踪列车节能运行曲线 (如图 4 所示)。

优化后发车间隔调整为 143 s, 列车按照节能模式运行, 即在节时模式的基础上增加一段惰行, 符合列车节能优化原则。对比表 1 与表 2 数据, 火车站、朝阳广场站、新民路站与民族广场站在满足列车作业时间的基础上停站时间取整后调整为 35 s、27 s、26 s、28 s。列车实际到站时间符合设定的时间裕度范围, 满足正点率要求。由表 3 数据可知, 再生制动能量利用率提高 11.4%, 站间运行总能耗降低 16.9%。

仿真证明, 该方法通过亲和度与浓度双重机制精准识别可行解, 与传统群集智能算法相比, 计算速度快, 求解精度高, 同时弥补了神经网络等局部优化算法容易过早收敛等缺点, 在满足列车安全性、舒适性、正点运行以及列车限速的前提下, 有效降低了列车总能耗。

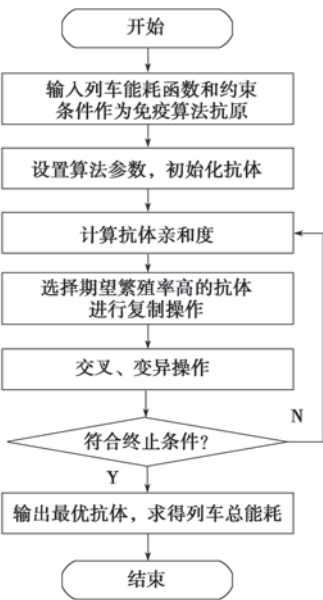


图 2 免疫算法求解能耗流程

表 2 节能时间表

时间	火车站	朝阳广场	新民路	民族广场
到达时间 /s	0	101	198	286
停站时间 /s	35	27	26	28

表 3 列车能耗

优化前后	再生制动能量利用率 /%	列车总能耗 / (kW·h)
优化前	33.2	114.1
优化后	44.6	94.8

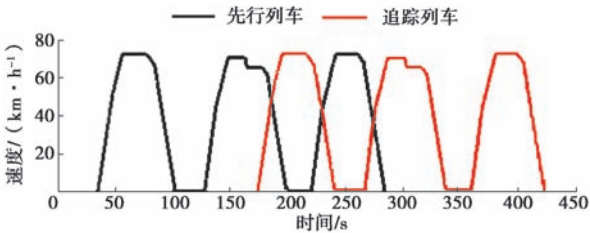


图 4 优化后列车运行图

5 结论

①本文基于再生制动能量利用最大化原则与浓度免疫算法优化列车运行时刻表及列车运行工况, 提高再生制动能量利用率达 11.4%, 降低列车运行总能耗达 16.9%, 弥补了片面优化时刻表或列车驾驶策略的不足。

②该方法可以移植到列车自动驾驶系统中, 通过与列车牵引控制单元通信实现多车的节能优化操纵, 为行车调度与节能驾驶提供理论指导。

③对比计划时刻表与节能时刻表可以看出, 在满足列车作业时间与最小追踪间隔的基础上, 适度缩短列车发车间隔与停站时间, 能够显著提高再生制动能量利用率, 并且有效改善线路通行能力。

参考文献:

[1] 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.

[2] HAI N T. Evaluation of Effect Pontryagin's Maximum Principle for Optimal Control Train by Criteria of Energy Save [C]. Tainan, China: 2010 International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation, 2010: 363-366.

[3] CHANG C S, SIM S S. Optimising Train Movements through Coast Control Using Genetic Algorithms [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(1): 65-73.

[4] 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, 3(4): 192-196.

[5] 马超云, 丁勇, 杜鹃, 等. 基于遗传算法的列车节能运行惰行控制研究 [J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(6): 4-8.

[6] 陈万里, 程家兴. 基于模拟退火算法(SAA)求解列车控制问题 [J]. 安徽大学学报, 2000, 24(3): 46-49.

[7] KIM K, ASCE M. Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(9): 665-674.

[8] 胡文斌, 王勇博, 吕建国, 等. 优化地铁时刻表减少列车制动电阻能耗 [J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(11): 90-94.

[9] 唐海川, 王青元, 冯晓云. 地铁列车追踪运行的节能控制与分

析 [J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 37-43.

[10] ALBRECHT T. Reducing Power Peaks and Energy Consumption in Rail Transit Systems by Simultaneous Train Running Time Control[J]. Computers in railways IX, 2004, 74(3): 885-894.

[11] 荀径, 唐涛, 宋晓美, 等. 再生制动条件下的城轨列车节能驾驶综合模型 [J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 104-110.

[12] 王壮. 基于列车节能控制的时刻表建立及自动调整方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[13] Peña-Alcaraz M, Fernández A, Cúcalá A P, et al. Optimal Underground Timetable Design Based on Power Flow for Maximizing the Use of Regenerative-Braking Energy [J]. Journal of Rail & Rapid Transit, 2012, 226(4): 397-408.

[14] 熊军. 南昌地铁 1 号线车辆牵引计算与仿真分析 [J]. 机车电传动, 2016(2): 61-64.

[15] 步兵, 丁奕, 李辰岭, 等. 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.

[16] 刘国联, 谭冠政, 何燕, 等. 基于改进的人工免疫算法的函数优化 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(7): 162-165.

[17] 张文丽, 李群湛, 刘炜, 等. 地铁列车再生制动节能仿真研究 [J]. 变流技术与电力牵引, 2008(3): 41-44.

[18] 何海兴, 沈红平, 李卫红. 基于大数据的地铁列车能耗仿真和节能操纵 [J]. 大功率变流技术, 2014(6): 40-45.



作者简介: 贺德强(1973 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通列车状态监测与故障诊断技术教学科研工作。

动态消息

中国中车发布首列导轨电车

7 月 21 日, 中车四方车辆有限公司举行了导轨电车新品发布暨学术交流活 动。此次发布的导轨电车产品是在城市立体化交通网建设的大背景下应运而生, 是中国首列自主研发的新型制式轨道交通产品, 是积极响应 “中国制造

2025” 战略推出的 “中国造” 新产品。

本次发布的导轨电车采用两动一拖编组形式, 全焊接铝合金车体, 最高运行速度 80 km/h。导轨电车作为中等运量的公共交通系统, 占地面积小, 车站形式灵活, 路面选择、供电形式多样化, 综合工程造价经济, 检修维护更加便捷。导轨电车以其特殊的轨道交通模式, 特有的技术特征和系统运行方式, 为国内城市公共交通提供了全新的选择方案, 开启了城市公共交通系统的 “胶轮时代”。

(朱一迪)

广告索引

- 深圳市宝创科技有限公司 (封 2)
- 株洲中车时代电气股份有限公司 (前插 1)
- 思库机电工程技术 (上海) 有限公司 (前插 2)
- 广州金升阳科技有限公司 (前插 3)
- 咸阳亚华电子电器有限公司 (前插 4)
- 湖南中车时代电动汽车股份有限公司 (前插 5、6)
- 三菱电机机电 (上海) 有限公司 (前插 7)
- 宁波中车新能源科技有限公司 (前插 8)
- 株洲时代电气绝缘有限公司 (前插 9)
- 株洲庆云电力机车配件工厂有限公司 (前插 10)
- 汕头华兴冶金设备股份有限公司 (前插 11)
- 宁夏银利电气股份有限公司 (前插 12)
- 湖南中车时代通信信号有限公司 (中插 1)

- 株洲中车时代电气股份有限公司半导体事业部 (中插 2)
- 宝鸡中车时代工程机械有限公司 (中插 3)
- 株洲中车时代装备技术有限公司 (中插 4、5)
- 襄阳中车电机技术有限公司 (中插 6、7)
- 中铁检验认证株洲牵引电气设备检验站有限公司 (中插 8、9)
- 宁波中车时代传感技术有限公司 (中插 10)
- 上海意兰可电力电子设备有限公司 (后插 1)
- 深圳通业科技股份有限公司 (后插 2)
- 江苏必得科技股份有限公司 (后插 3)
- 苏州康开电气有限公司 (后插 4)
- 北京创四方电子股份有限公司 (后插 5)
- 温州市龙电绝缘材料有限公司 (后插 6)
- 北京石竹科技股份有限公司 (后插 7)
- 安徽省康利亚股份有限公司 (后插 8)
- 株洲时代新材料科技股份有限公司 (封 3)
- 深圳市中电华星电子技术有限公司 (封 4)