

# 基于多目标仿真技术的牵引节能优化关键算法及应用研究

刘明亮<sup>1</sup> 郑俊锋<sup>1</sup> 吕鑫男<sup>2</sup>

(1. 合肥市轨道交通集团有限公司, 230601, 合肥; 2. 通控研究院(安徽)有限公司, 230094, 合肥//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通供电系统中牵引供电能耗受列车运行策略、运行时刻表编制和线路断面设计等多种因素影响。利用多列车仿真技术开发了一套牵引能耗仿真分析模型和多车牵引供电模型,研究了单车驾驶策略和基于运行时刻表的多车协同牵引节能优化技术。基于合肥轨道交通 1 号线列车运行数据的仿真结果表明,该优化技术效益较为明显,综合节能效果可达 5%。

**关键词** 城市轨道交通; 列车; 牵引能耗; 驾驶策略; 时刻表; 仿真技术

**中图分类号** U260.13

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.01.032

## Research on Traction Energy-saving Optimization Key Algorithms and Application Based on Multi-objective Simulation Technology

LIU Mingliang, ZHENG Junfeng, LYU Xinnan

**Abstract** The energy consumption of traction power supply in urban rail transit power supply system is affected by factors such as train operation strategy, operation timetable compilation, line cross section design. A set of traction energy consumption simulation analysis model and multi-vehicle traction power supply model are developed by using multi-train simulation technology. The single-vehicle driving strategy and the energy-saving optimization technology of multi-vehicle cooperative traction based on operation timetable are studied. The simulation results based on Hefei Rail Transit Line 1 train operation data show that the benefit of the optimization technology is evident, with the comprehensive energy-saving effect up to 5%.

**Key words** urban rail transit; train; traction energy consumption; operation strategy; timetable; simulation technology

**First-author's address** Hefei Rail Transit Group Co., Ltd., 230601, Hefei, China

更短的列车运行间隔、更强的运载能力和更低的能源消耗等已成为城市轨道交通发展的重要方

向。尤其是能源消耗,得到了各方的高度重视。在城市轨道交通能耗中,电费约占运营成本的 30%,而牵引能耗约占全部电费的 50%<sup>[1]</sup>。牵引能耗受多方面因素的影响,线路条件、驾驶策略和运行计划时刻表是其中主要因素。本文基于列车仿真技术,利用能耗仿真分析模型和多车牵引供电模型,对原有驾驶策略和列车运行图进行分析,并结合相关线路实际工况和运营情况,运用多种算法,优化现行驾驶策略及时刻表,以降低能耗。

## 1 基于仿真平台的牵引能耗分析模型

### 1.1 能耗仿真模型

在仿真模型中,线路数据(临时限速、坡度等)、列车牵引数据和输电网数据等,均会被视作静态数据输入到系统中,此类数据在仿真过程中保持不变。同时,列车加速度、减速度、轮周功率和接触网功率等动态变量也被输入到系统中。最后,再赋予列车行车时间约束和时刻表配置。多车仿真系统流程图如图 1 所示。

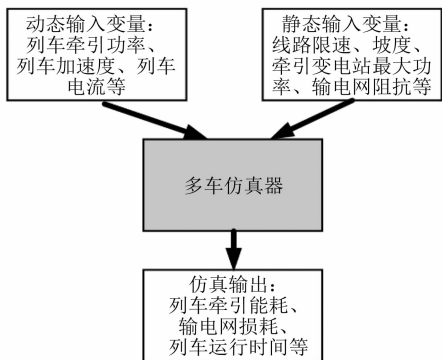


图 1 多车仿真系统流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-vehicle simulation system

基于此仿真模型还可进一步研究同一供电分区不同列车间再生能量互相吸收规则。通过调整区间运行时间、行车间隔及列车在区间运行工

况,充分利用在同一供电区间的列车再生制动能源回馈,在确保一部分制动能量被吸收及列车运力的前提下,对列车的行车策略进行优化<sup>[4]</sup>。

在每一个时间步进中,仿真系统计算出列车此刻的各个动态变量。这些变量的集合会被存储在软件内部,并最终形成完整的列车运行曲线和相应的列车运行数据。

假设一列质量为  $M_v$  的列车从步进  $i$  移动到步进  $j$ ,加速度是  $a$ ,则列车在步进  $j$  时的运行距离  $S_j$  和速度  $V_j$  为:

$$S_j = V_i \Delta T + \frac{1}{2} a \Delta T^2 + S_i \quad (1)$$

$$V_j = V_i + a \Delta T \quad (2)$$

式中:

$\Delta T$ ——时间步进长度;

$V_i$ ——在步进  $i$  时的列车运行速度;

$S_i$ ——步进  $i$  时的列车运行距离。

列车功率、能耗和运行时间为:

$$P = M_v a V_i \quad (3)$$

$$E_j = P \Delta T + E_i \quad (4)$$

$$T_j = T_i + \Delta T \quad (5)$$

式中:

$P$ ——列车功率;

$E_i$ ——步进  $i$  时的列车能耗;

$E_j$ ——步进  $j$  时的列车能耗;

$T_i$ ——步进  $i$  时的仿真时间;

$T_j$ ——步进  $j$  时的仿真时间。

## 1.2 多车牵引供电模型

多列车运行过程是一个非常复杂的非线性动力学系统,也是城市轨道交通牵引供电计算的基础。由列车运行仿真系统给出列车在线路上的位置、时间以及功率需求,再通过多车牵引供电系统仿真软件计算各时间点网压、电流、功率以及一段运行时间的能耗。

城市轨道交通列车在线路上取流来自所在供电区间上的所有牵引变电站。然而如采用运行图截面法进行牵引供电计算时,在计算模型中供电方式被简化为双边供电,即列车仅从相邻的前后两个牵引变电所取流,每次计算仅仅涉及这两个变电所,这样的建模方法使得简化模型的计算结果与实际供电结果存在很大误差。

依照戴维南-诺顿等效模型,对于双向多车直流牵引供电系统等效电路模型,可将直流牵引变电所

等效为串联内阻和二极管的电流源。串联内阻用于计算变电所工作过程中的电压降,当有电流输出时,变电所的接触网输出电压即为牵引变电所直流母线的空载电压减去等效内电阻的电压降。接触网和钢轨被等效为有固定电阻率的电阻,其阻值大小由长度决定,即由列车运行距离决定。运行列车被等效为理想功率源,在某一运行时刻的功率为恒定值,由列车运行状态驾驶策略决定。

根据运行图数据中任一时刻列车运行位置,可以把牵引供电网络支路化,确定区间电阻值并建立系统导纳矩阵,此导纳矩阵具有实矩阵、对称矩阵和稀疏矩阵的特性,其中采用稀疏矩阵来存储大规模的导纳矩阵可以提高计算速度。

直流牵引网电气潮流计算依据节点电压法,通过对电网节点矩阵应用高斯消去法求解式(6),可得到系统各节点电压和变电站工作负荷等。由于列车被等效为理想功率源模型,因而在节点电压方程中的输入电流矩阵中包括牵引变电站输入电流值和列车电流。如式(7)所示,根据列车运行功率可以求得列车电压电流的函数关系,假设列车一个初始电压即可得到列车初始电流值,将其带入节点电压方程,即可得到新的列车电压,经过迭代计算即可得到各节点最终电压值。列车的初始电压可选取变电站的空载电压值。

$$V = Y^{-1} I \quad (6)$$

$$P_T = P_T(t) = U_T(t) I_T(t) \quad (7)$$

式中:

$V$ ——节点电压矩阵;

$Y$ ——节点导纳矩阵;

$I$ ——输入电流矩阵;

$P_T$ ——列车牵引功率;

$U_T(t)$ ——时刻  $t$  时的列车电压;

$I_T(t)$ ——时刻  $t$  时的列车输入电流。

## 2 优化策略

### 2.1 驾驶策略优化

仿真系统能够在给定时间约束和时刻表下,计算出最优的行车方案(工况转换点),以达到节能的目的。基于输入的每一组数据,仿真器都能输出对应的行车时间、能量消耗和行车轨迹。其中,行车时间和行车轨迹能直接得出,而能量消耗由式(8)计算:

$$F_{\text{total}} = M_e a = F(v) - R_{\text{mo}}(v) - R_{\text{cu}}(v) - F_{\text{grad}} \quad (8)$$

式中:

$F_{\text{total}}$ ——列车合力;

$F(v)$ ——列车在运行速度  $v$  时的牵引力;

$R_{\text{mo}}(v)$ ——列车在运行速度  $v$  时的运行阻力;

$R_{\text{cu}}(v)$ ——列车在运行速度  $v$  时弯道阻力;

$F_{\text{grad}}$ ——坡度阻力,即重力在水平方向上的分力;

$M_e$ ——列车有效质量。

列车有效质量的计算公式为:

$$M_e = M_l(1 + \lambda) + M_p \quad (9)$$

式中:

$M_l$ ——列车质量;

$\lambda$ ——转动容限;

$M_p$ ——乘客质量。

约束条件如下:

$$\begin{cases} v \leq v_{\text{limit}}(s) \\ u_f \in [0, 1] \\ u_b \in [0, 1] \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$v_{\text{limit}}(s)$ ——位置  $s$  处的线路限速;

$u_f$ ——列车牵引指令的信号量;

$u_b$ ——列车制动指令的信号量。

优化的初始和结束状态见公式(11)。

$$\begin{cases} v(0) = 0, s(0) = 0 \\ v(T) = 0, s(T) = s_t \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$s_t$ ——终点站的里程。

优化的目标是通过优化计算列车工况转换点、工况选择和列车目标速度,得到最佳行车轨迹。使列车在给定的运行时间下达到最小的能量消耗。因此,目标函数如式(12)。

$$\begin{cases} M_{\text{minsin}} = E_{\text{sg}} C_e, & \text{if } D_{\text{sg}} \leq D_{\text{max}} \\ [T_i, E_{it}] = f(M_T) \\ M_T = [M_{T1}, \dots, M_{Ti}] \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$M_{\text{minsin}}$ ——待优化的单程最小能耗;

$E_{\text{sg}}$ ——单车能耗;

$C_e$ ——单位电费;

$D_{\text{sg}}$ ——列车延误时间;

$D_{\text{max}}$ ——允许的最大延误时间;

$T_i$ ——区间运行时间;

$E_{it}$ ——区间运行能耗;

$M_T$ ——列车控制指令流;

$f$ ——仿真过程。

为了能更快、更准确地计算出最优的行车轨迹,本文使用了改进型暴力搜索算法。通常的暴力搜索会对解空间内的所有候选解都进行计算,这种算法在解决简单的问题时较为有效并且简易。但是对于复杂问题,解空间的大小会随变量的增加呈指数型增长,从而大大增加了计算时间。改进型暴力搜索算法可以解决这个问题,该改进算法先根据列车的目标距离和指定的行车时间,计算出一个候选解作为估计值;之后,该改进算法只考虑这个估计值周围的候选解,从而大大降低了解空间的大小,减小了计算时间。计算步骤如下:

步骤 1:首先,基于仿真器和时刻表站间运行时间,计算出一组工况序列的估计解。

$$\begin{cases} T_{\text{acc}} + T_{\text{cur}} + T_{\text{brk}} = T_{\text{Ish}} \\ S_{\text{acc}} + S_{\text{cur}} + S_{\text{brk}} = S_{\text{Ish}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$T_{\text{acc}}$ ——列车加速时间;

$T_{\text{cur}}$ ——列车巡航时间;

$T_{\text{brk}}$ ——列车制动时间;

$T_{\text{Ish}}$ ——计划区间运行时间;

$S_{\text{acc}}$ ——列车加速距离;

$S_{\text{cur}}$ ——列车巡航距离;

$S_{\text{brk}}$ ——列车制动距离;

$S_{\text{Ish}}$ ——区间运行距离(该计算中,惰行工况暂不会被考虑)。

步骤 2:根据工况序列的估计解,在估计解周围求解候选解,大幅降低解空间。工况序列中的加速部分和减速部分则会被保留下来。该改进算法不会对此部分再做计算,以降低解的复杂度。暴力搜索的解复杂度为  $O(n^2)$ 。因此,降低区段数量可以大大降低算法的运行速度。

$$\begin{cases} T_{\text{acc}} = V_{\text{max}} / a_{\text{acc}} \\ S_{\text{acc}} = \frac{1}{2} a_{\text{acc}} T_{\text{acc}}^2 \\ S_{\text{cur}} = V_{\text{max}} T_{\text{cur}} \\ T_{\text{brk}} = V_{\text{max}} / a_{\text{brk}} \\ S_{\text{brk}} = V_{\text{max}} T_{\text{brk}} + \frac{1}{2} a_{\text{brk}} T_{\text{brk}}^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中:

$V_{\text{max}}$ ——列车巡航速度;

$a_{acc}$ ——列车牵引加速度;

$a_{brk}$ ——列车制动加速度。

步骤 3: 计算解空间内所有的解, 并计算出对应的列车运行时间和能耗。

$$\left\{ \begin{array}{l} ALL([T_l, E_{it}] \text{ pair}) = \sum_{S=1}^{S=S_l} \sum_{M_{Cx}=1}^4 \cdots \sum_{M_{Cx+j}=1}^4 f(M_T), \\ \text{if } D_{sg} \leq D_{max} \\ T_{sg} = \sum_{i=1}^{n_s-1} (T_{li}), \quad \text{if } |T_{li} - T_{lshi}| \in [0, T_{lr}] \\ D_{sg} = T_{sg} - T_{sh} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中:

$[T_l, E_{it}] \text{ pair}$ ——区间运行时间和区间运行能耗的映射数组;

ALL——所有解;

$S_l$ ——区间里程数;

$M_C$ ——列车行驶模式;

$n_s$ ——车站数量;

$T_{sg}$ ——单车全程运行时间;

$T_{sh}$ ——单车计划运行时间;

$D_{sg}$ ——列车延误时间;

$T_{li}$ ——区间实际运行时间;

$T_{lshi}$ ——区间计划运行时间;

$T_{lr}$ ——计划运行间隔与优化运行间隔差值的最大容限。

步骤 4: 解空间内所有的可行解都会被计算出来, 对应列车运行时间和能耗。但是每一个列车运行时间可能对应多组列车曲线。因此该步骤中, 会查阅所有的可行解, 并将每一个运行时间中最低列车能耗对应的解提取出来。

$$E_{\theta} \geq E_{\theta-1} \quad \text{and} \quad T_{sg\theta} = T_{sg\theta-1}, \theta \in \zeta \quad (16)$$

式中:

$\zeta$ ——所有可行解;

$\theta$ ——单一解;

$E_{\theta}$ ——解  $\theta$  对应的能耗值;

$T_{sg\theta}$ ——解  $\theta$  对应的全程运行时间。

步骤 5: 步骤 4 之后, 每一个运行时间中最低列车能耗对应的解被保留了下来。至此, 通过优化计算列车工况转换点、工况选择和列车目标速度, 可得到最佳行车轨迹。

## 2.2 时刻表优化

在列车制动时, 由再生制动产生的能量会反馈

至接触网, 如果线路中存在正在加速的列车, 这部分能量便会对其进行供给。如果依然有能量剩余并且供电系统配备有储能装置, 这些能量便会被传送到储能装置中<sup>[5]</sup>。图 2 为提高再生制动能量使用率并降低变电站负荷的原理示意图。

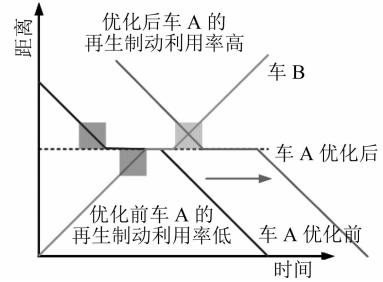


图 2 提高再生制动能量使用率并降低变电站负荷的原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of increasing the utilization rate of regenerative braking energy and reducing load on substation

基于研究发现, 改变列车的站间运行间隔, 不仅会影响列车再生制动能量的使用效率, 也会改变列车运行轨迹, 从而影响列车运行能耗<sup>[6]</sup>。因此, 本次时刻表优化, 针对高峰期以及非高峰期的行车间隔进行优化。目标旨在充分利用不同列车间再生制动能量互相吸收规则, 从列车运行能耗优化和列车再生制动能量优化中找到一个平衡点, 降低变电站总能耗。同时不改变总运行时间、停站时间和折返时间, 以减小对时刻表编制的影响。

基于输入的每一组数据, 仿真器都能输出对应的行车时间、列车能量消耗、变电站能量消耗和再生制动能量等信息。本次时刻表优化, 是通过计算列车最优站间运行间隔、高峰期行车间隔和非高峰期行车间隔, 得到最佳再生制动能量和行车策略间的平衡。因此, 目标函数如下:

$$M_{minall} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (E_{sub_i}) & \text{if } T_{run_{all}} \in [T_{lb}, T_{ub}] \\ \sum_{i=1}^n (D_{run_i} + E_{sub_i}) & \text{if } T_{run_{all}} \notin [T_{lb}, T_{ub}] \end{cases} \quad (17)$$

$$E_{sub_i} = \sum_1^{T_{run_i}} (fv_i^2 t - u_{re} f_{re} I_t V_t + E_{loss}), u_{re} \in [0, 1] \quad (18)$$

式中:

$u_{re}$ ——再生制动状态;

$I_t$ ——列车电流;  
 $V_t$ ——列车电压;  
 $f_{re}$ ——再生制动利用效率;  
 $T_{run_{all}}$ ——列车全天运行时间;  
 $T_{run_i}$ ——列车单程运行时间;  
 $T_{lb}$ ——全天运行时间最小值;  
 $T_{ub}$ ——全天运行时间最大值;  
 $f v_t^2 t$ ——当前列车运行速度下的能耗;  
 $n$ ——列车数量;  
 $E_{sub_i}$ ——列车单程运行时变电所输出能耗;  
 $E_{loss}$ ——输电线损耗;  
 $D_{run_i}$ ——基于指定的列车运行时间约束的惩罚系数。

公式(17)~(18)的约束条件为:

$$T_{run_{all}} = \sum_{i=1}^n T_{run_i} = \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^m (T_{run_d} + T_{Srun_j}) \quad (19)$$

$$T_{run_d} = T_{run_s} \pm \Delta T_{run_d} \quad \text{if } \Delta T_{run_d} \in [0, 5] \quad (20)$$

式中:

$m$ ——站间区间数量;  
 $T_{run_d}$ ——列车优化站间运行时间;  
 $T_{Srun_j}$ ——行车间隔;  
 $T_{run_s}$ ——列车计划站间运行时间;  
 $\Delta T_{run_d}$ ——列车站间运行时间的浮动范围。

为了能更快、更准确地计算出最优时刻表,最终采用了遗传算法。该算法基于群体智能理论的优化算法,具有通用性好、易于实现和收敛速度较快等优点。在本次优化算法中,每一组可行解(也被称为个体或者基因序列)由一组列车站间运行间隔和行车间隔等组成。每一代种群包含 50 组可行解。而每一组可行解内的单个时间变量,则被称为基因。

遗传算法的实现步骤如下:

步骤 1:初始化算法。在初始化过程中生成初代的共 50 个可行解,每组可行解均包含在合适范围内随机生成的运行间隔和行车间隔。

步骤 2:根据每一组可行解,计算出全天时刻表。并根据时刻表中所有列车的运行状态和目标函数,计算再生制动能量利用率和变电站负载情况,得到每组可行解对应的适应度值。

步骤 3:根据适应度值,对 50 个可行解进行排序,并进行遗传操作。遗传操作中交叉和突变的比

率分别为 0.8 和 0.2。最后得到新一代包含 50 组全新可行解的种群。

4) 重复步骤 2 与步骤 3,直到计算出的可行解满意以下 3 个条件之一:两代种群的最佳适应度值相差在 0.001 内;种群的最佳适应度值停滞超过 20 代;种群总数量不超过 200 代。

3 基于合肥轨道交通 1 号线数据的优化结果

根据合肥轨道交通 1 号线的列车和线路数据,结合正常 ATO(列车自动运行)列车运行曲线,对列车的行车驾驶策略进行优化。同时保证列车运行时间与计划时刻表保持一致。优化后列车运行曲线如图 3 所示,优化结果对比如表 1 所示。采用时刻表优化方案的结果对比如表 2 所示。

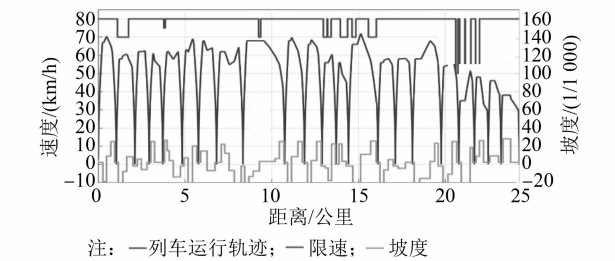


图 3 合肥轨道交通 1 号线九联圩站—合肥火车站方向优化列车曲线

Fig. 3 Optimization of train curve in the direction of Jiulianwei station to Hefei Railway station of Hefei Rail Transit Line 1

表 1 合肥轨道交通 1 号线列车曲线优化前后结果对比  
Tab. 1 Comparison of results before and after optimization of Hefei Rail Transit Line 1

项目	合肥火车站方向		九联圩站方向	
	时间/s	2 822	2 858	
现行列车曲线	能耗/(kWh)	301	269	
优化列车曲线	时间/s	2 822	2 858	
	能耗/(kWh)	289	256	

注:合肥火车站方向优化后节能 4%;九联圩站方向优化后节能 5%。

表 2 的优化方案调整了高峰期和非高峰期的行车间隔,高峰期行车间隔缩短了 3 s,非高峰行车间隔增加了 1 s,结合运行图,全天运营时间缩短了 109 s。同时保证了全天发车列次、高峰期发车列次、非高峰期发车列次、区间运行时间和折返时间等均保持不变,不会对客流和运营产生影响。后续在优化行车间隔参数的同时,进一步对停站时间进行优化,将进一步提升节能效果。

表 2 合肥轨道交通 1 号线采用时刻表优化方案的结果对比

Tab.2 Results comparison after Hefei Rail Transit Line 1 adopting timetable optimization plan

时刻表	高峰期行车 间隔/s	非高峰期行车 间隔/s	变电站 全天节能/%
现有时刻表	330	418	
优化时刻表	327	419	1.4

4 结语

本文基于列车仿真系统,以降低牵引能耗为出发点,一方面通过求解最佳站间运行间隔、最佳工况转换点位置,计算得出最优驾驶策略,以达到列车运行能耗的最优化;另一方面仿真评估线网在现有运行方案、时刻表优化方案下的全天运行情况。结果表明,优化驾驶策略在保证列车站间运行时间、停站时间、折返时间不变的情况下,有效降低列车上行和下行的运行能耗达 5%。该驾驶策略不会对列车时刻表产生影响,具有较强的应用价值。而在此基础上,采用优化时刻表可使全天变电站能耗进一步降低约 1.4%。因此,本文提出的优化驾驶策略和优化时刻表方案均具有较强的经济性和应用性。

参考文献

[ 1 ] 邱宇. 地铁列车节能型运行图优化研究[ D]. 北京:北京交通大学,2017.

QIU Yu. Optimization of metro train timetable for energy saving [ D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2017.

[ 2 ] 彭磊. 城市轨道交通列车牵引节能综合技术研究与实践[ J].

(上接第 169 页)

参考文献

[ 1 ] 侯秀芳,梅建萍,左超. 2020 年中国内地城轨交通线路概况[ J]. 都市轨道交通,2021(1):6.

HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. Overview of urban rail transit lines in Chinese mainland in 2020[ J]. Urban Rapid Rail Transit,2021(1):6.

[ 2 ] 张颖,岳芑,薛祎. 智慧城市背景下上海打造智慧地铁的调研与分析[ J]. 市场周刊,2016(11):58.

ZHANG Ying, YUE Yan, XUE Yi. Investigation and analysis on smart metro construction in Shanghai with background of smart city[ J]. Market Weekly,2016(11):58.

[ 3 ] 何霖. 城市轨道交通企业资产管理信息化[ M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

HE Lin. Urban rail transit enterprise asset management informatization [ M]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd.,2018.

城市轨道交通研究,2018(3):84.

PENG Lei. Research and practice of comprehensive energy-saving technology for urban rail transit train traction[ J]. Urban Mass Transit,2018(3):84.

[ 3 ] 王勇. 列车牵引传动系统节能技术实现与研究[ D]. 北京:北京交通大学,2017.

WANG Yong. Realization and research on energy saving technology of train traction drive system[ D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2017.

[ 4 ] 沈小军,曹戈. 地铁车辆再生制动能量利用率影响因素[ J]. 同济大学学报(自然科学版),2019(11):1648.

SHEN Xiaojun, CAO Ge. Factors influencing the utilization rate of regenerative braking energy of urban rail transit vehicles[ J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2019(11):1648.

[ 5 ] 秦超. 地铁车辆再生制动能量吸收技术仿真研究[ D]. 长春:吉林大学,2018.

QIN Chao. Simulation research on regenerative braking energy absorption technology of metro vehicle[ D]. Changchun:Jilin University,2018.

[ 6 ] 王耀国. 轨道交通列车再生制动能量回馈装置研究[ J]. 隧道与轨道交通,2019(1):35.

WANG Yaoguo. Research on feedback device of rail transit train regenerative braking energy[ J]. Tunnel and Rail Transit,2019(1):35.

[ 7 ] 刘安海,于惠钧,黄星,等. 地铁车辆再生制动混合型储能回收装置研究[ J]. 电工技术,2021(1):1.

LIU Anhui, YU Huijun, HUANG Xing, et al. Research on regenerated braking hybrid energy storage and recovery device for metro vehicles[ J]. Electric Engineering,2021(1):1.

( 收稿日期:2021-08-30)

[ 4 ] 徐宛容. 国际固定资产管理标准——PAS 55 剖析[ J]. 中国设备工程,2011(6):4.

XU Wanrong. International fixed assets management standard—PAS 55 analysis[ J]. China Plant Engineering,2011(6):4.

[ 5 ] 刘振亚. 企业资产全寿命周期管理[ M]. 北京:中国电力出版社,2015.

LIU Zhenya. Life-cycle asset management of enterprise[ M]. Beiiing:China Electric Power Press,2015.

[ 6 ] 李孟兴,樊小伟,邓鸿岳. 基于安全效能成本的资产全寿命周期管理研究[ J]. 供用电,2011(3):80.

LI Mengxing, FAN Xiaowei, DENG Hongyue. Analysis and discussion of the life cycle asset management based on safety efficiency cost (SEC)[ J]. Distribution & Utilization,2011(3):80.

[ 7 ] 李春佳. 智慧城市内涵、特征与发展途径研究——以北京智慧城市建设为例[ J]. 现代城市研究,2015(5):79.

LI Chunjia. Research on the connotation, characteristic and development of smart city; a case study of smart city construction in Beijing[ J]. Modern Urban Research,2015(5):79.

( 收稿日期:2021-02-19)