

# 基于司机驾驶风格的混合动力有轨电车 能量管理策略<sup>\*</sup>

刘禹贝<sup>1</sup> 林晓鸿<sup>1</sup> 赵云云<sup>1</sup> 陈维荣<sup>2</sup> 戴朝华<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都//第一作者, 助理工程师)

**摘 要** 以锂离子电池、超级电容为混合动力的有轨电车, 其能量管理策略难以适应不同类型司机的驾驶风格。为进一步提高有轨电车的系统能量效率, 提出了基于司机驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略, 并构建了混合动力有轨电车功率损耗模型。将司机的驾驶风格分为激进型、标准型和迟钝型三类, 利用模糊逻辑算法对三类司机驾驶风格进行识别, 引入基于司机驾驶风格的牵引/制动补偿因子, 以对有轨电车的牵引/制动功率进行补偿, 得到最优的功率分配。最后对基于司机驾驶风格的能量管理策略进行仿真分析, 评估其节能效果。仿真结果表明: 相较于常规的逻辑门限控制能量管理策略, 基于司机驾驶风格的能量管理策略可使系统能量损耗降低 4.81%。

**关键词** 有轨电车; 混合式储能系统; 司机驾驶风格; 能量管理策略; 功率补偿

**中图分类号** U482.10.9

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.03.015

## Hybrid Tram Energy Management Strategy Based on Driver's Driving Style

LIU Yubei, LIN Xiaohong, ZHAO Yunyun, CHEN Weirong, DAI Chaohua

**Abstract** The energy management strategy of hybrid tram powered by lithium-ion battery and super capacitor is difficult to adapt to different types of driver's driving style. To further improve the system energy efficiency of tram, a new energy management system is innovated based on the influence of different driving styles, and a power loss model of hybrid tram is established. The driving styles are classified into forwardness, standard and backwardness three types, and fuzzy logic algorithm is used for the identification of them. Traction/braking compensation factor based on driver's driving style is introduced to compensate the traction/braking power of the tram, and the optimal power distribution is obtained. Finally, a tram

energy management strategy based on driving style is simulated and analyzed to evaluate the energy-saving effect. Simulation results show that compared with the conventional energy management strategy of logic threshold control, the system energy loss of the strategy based on driver's driving style can be reduced by 4.81%.

**Key words** tram; hybrid energy storage system; driver's driving style; energy management strategy; power compensation

**First-author's address** Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

## 0 引言

车载储能供电的有轨电车以其无网运行的灵活性及能源利用率高的特性受到广泛关注, 发展迅猛。储能式有轨电车常选择锂离子电池(以下简称“锂电池”)及超级电容作为其能量来源。高能量密度的电池与高功率密度的超级电容组合使得有轨电车不仅能够满足动力性要求, 也能提高系统的能量效率。混合动力能量管理策略是实现储能式有轨电车性能的关键, 其核心是对动力系统进行协调控制, 对锂电池与超级电容之间的功率进行分配。在满足整车动力需求的前提下, 能量管理策略的优劣将直接影响整车的系统能量效率。

在有轨电车行驶过程中, 司机的驾驶风格影响着有轨电车的速度运行曲线, 影响储能系统能量管理策略的控制效果, 进而影响系统能耗<sup>[1]</sup>。在有轨电车操作控制系统中, 司机通过控制牵引手柄与制动手柄驾驶有轨电车, 由于司机对手柄的控制方式存在差异, 有轨电车实际的牵引功率或制动功率会

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2017YFB1201004-05)

因司机的驾驶风格不同而有所不同。在混合动力有轨电车供能系统中,因存在多种动力源,因而有多种不同的工作组合模式,不同的驾驶风格对能量输出与回收的影响也更为明显。

目前,国内外鲜有针对有轨电车司机驾驶风格对车辆影响的研究。驾驶风格识别的主要方法有模糊识别法、基于特征参数识别法、决策类模式识别法及神经网络识别法等。文献[2]提出采用平均冲击度值作为特征参数的驾驶风格在线识别方法。文献[3]提出利用数据挖掘及神经网络对驾驶风格进行识别,并搭建了 DrivingStyles 平台,以提供辅助驾驶建议。文献[4]通过建立马尔科夫模型,预测司机的驾驶风格,以实现功率的自适应分配,达到采用混合动力汽车降低等效燃油指标、提升其经济性的目的。

此外,在进行司机驾驶风格识别时,尚未考虑沿途交通状况对线路不同区段有轨电车最高限速的影响,即忽略了线路工况对驾驶风格识别结果的影响。因此,在制定基于驾驶风格的管理策略时,需考虑有轨电车运行的线路工况,将线路工况与驾驶风格相结合,使有轨电车能量管理策略达到更好的实际运用效果。

因此,为提高有轨电车实际运行的能量效率,本文以采用锂电池及超级电容供能的混合动力有轨电车为研究对象,分析有轨电车司机不同驾驶风格对系统能耗的影响,并基于逻辑门限控制原理提出新型的能源管理策略。

### 1 构建混合动力有轨电车功率损耗模型

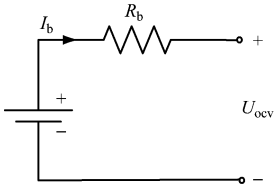
本文搭建了以锂电池和超级电容为动力源的混合动力有轨电车功率损耗模型。以唐山轨道客车有限责任公司设计的 100% 低地板混合动力有轨电车为例,其主要技术参数如表 1 所示。

#### 1.1 锂电池建模

研究和分析锂电池,可以从锂电池的等效电路模型入手。锂电池常用的等效电路包括 Rint 模型、RC(电阻电容)模型及 PNGV(partnership for a new generation of vehicles)模型等<sup>[5]</sup>,其中,Rint 模型结构简单、参数易辨识,且考虑了开路电压、充电/放电内阻和 SOC(荷电状态)的关系,能够准确地反映锂电池的特性,其应用最为广泛。图 1 是锂电池的 Rint 等效电路模型。

表 1 混合动力有轨电车主要技术参数  
Tab.1 Main technical parameters of hybrid energy tram

技术参数	参数值
应用环境温度/℃	-25 ~ 42
母线电压/V	750
列车编组	4 节编组(动车-拖车-拖车-动车)
轴重/t	10.50
最高运行速度/(km/h)	80
线路最大坡度/‰	5
列车长度/m	30.19
列车宽度/m	2.65
列车自重/t	51.06
列车额定载员/人	267
续航里程/km	30



注:  $U_{ocv}$ ——锂电池开路电压;  $R_b$ ——锂电池等效内阻;  $I_b$ ——流经锂电池的电流。

图 1 锂电池 Rint 等效电路模型

Fig.1 Rint equivalent circuit model of lithium-ion battery

根据图 1 的等效电路模型,基于基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,并结合锂电池内部能量交换过程,可得:

$$\begin{cases} I_b = \frac{U_{ocv} - \sqrt{U_{ocv}^2 - 4R_b P_b}}{2R_b} \\ P_{b,loss} = I_b^2 R_b \\ \eta_{b,ch} = \frac{U_{ocv}}{U_{ocv} - I_b R_{b,ch}} \times 100\% \\ \eta_{b,dis} = \frac{U_{ocv} - I_b R_{b,dis}}{U_{ocv}} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

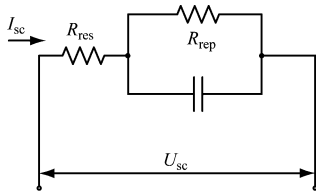
式中:

- $P_b$ ——锂电池的输出功率;
- $P_{b,loss}$ ——锂电池能量损耗功率;
- $\eta_{c,ch}$ ——锂电池充电耗能系数,即锂电池充电过程中实际消耗能量与锂电池储存能量之比;
- $\eta_{c,dis}$ ——锂电池放电供能系数,即锂电池放电过程中实际有效供能与锂电池消耗能量之比;
- $R_{b,ch}$ ——锂电池充电过程的内阻;
- $R_{b,dis}$ ——锂电池放电过程的内阻。

#### 1.2 超级电容建模

如图 2 所示,经典 RC 电路串并联模型是超级

电容常见的等效电路模型<sup>[6]</sup>。该模型考虑了超级电容漏电流效应和暂态过程,模型参数易辨识,且具有较高的精度。



注: $U_{sc}$ ——超级电容开路电压; $I_{sc}$ ——流经超级电容的电流;  
 $R_{res}$ ——超级电容等效串联电阻; $R_{rep}$ ——超级电容等效漏电阻。

图2 超级电容的经典RC电路等效模型

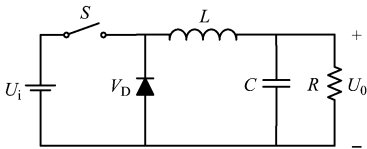
Fig.2 Classical RC circuit equivalent model of supercapacitor

设 $P_{sc}$ 为超级电容的输出功率。根据图2的等效电路模型,由基尔霍夫电压定律、基尔霍夫电流定律和超级电容内部能量交换过程可得到超级电容的能量损耗功率 $P_{sc,loss}$ 、充放电过程中充电耗能系数 $\eta_{sc,chg}$ 和放电供能系数 $\eta_{sc,dis}$ 的表达式分别为:

$$\begin{cases} P_{sc,loss} = I_{sc}^2 R_{res} \\ \eta_{sc,chg} = \frac{P_{sc}}{P_{sc} - P_{sc,loss}} \times 100\% \\ \eta_{sc,dis} = \frac{P_{sc} - P_{sc,loss}}{P_{sc}} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

### 1.3 DC(直流电)/DC 变换器建模

锂电池通过单向DC/DC变换器连接至母线,既能合理、有效地利用电池能量,又可以在回收制动再生能量时使电池免受大能量冲击。单向DC/DC变换器的拓扑结构如图3所示。



注: $U_i$ ——输入电压; $L$ ——等效电感; $V_D$ ——二极管正向压降;  
 $C$ ——等效电容; $R$ ——等效电阻; $U_0$ ——输出电压。

图3 单向DC/DC变换器拓扑结构

Fig.3 Unidirectional DC/DC converter topology structure

设DC/DC变换器转换期间产生的电能损耗为 $P_{dc,loss}$ ,锂电池端的功率为 $P_{bat}$ ,其计算式分别为:

$$P_{dc,loss} = \frac{P_{dc}(1 - \eta_{dc})}{\eta_{dc}} \quad (3)$$

$$P_{bat} = \frac{P_{dc}}{\eta_{dc}} \quad (4)$$

式中:

$P_{dc}$ ——DC/DC转换器的输出功率;

$\eta_{dc}$ ——DC/DC转换器的电能变换效率。

### 1.4 有轨电车混合动力拓扑结构

如图4所示,本文采用一种改进式有轨电车混合动力拓扑结构,通过使用一个单向DC/DC变换器来代替双向DC/DC变换器,同时加入间隔可控开关,实现锂电池与超级电容之间的功率分配。通过控制开关S1与S2的闭合及单向DC/DC变换器,可实现8种电源工作模式(包括4种驱动模式及4种制动模式)。

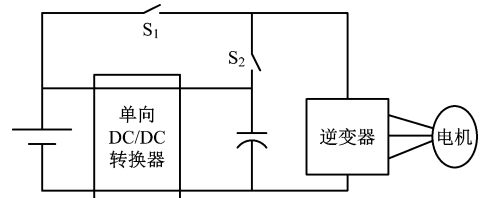
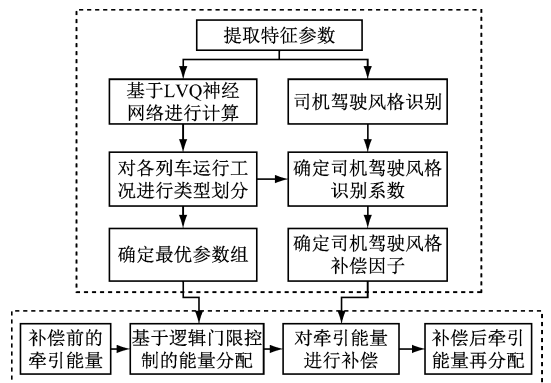


图4 改进式有轨电车混合动力拓扑结构

Fig.4 Improved tram hybrid power topology structure

## 2 基于驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略

对有轨电车司机的驾驶风格进行分类与识别,确定有轨电车的驾驶风格补偿因子后,可利用超级电容快速响应的特点对有轨电车整体混合动力系统的能量输出进行修正。为此,结合工况的能量管理策略,本文提出了基于驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略,其设计思路如图5所示。



注:LVQ(Learning Vector Quantization)——学习矢量量化。

图5 基于驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略设计思路

Fig.5 Energy management strategy design idea of hybrid energy tram based on driving style

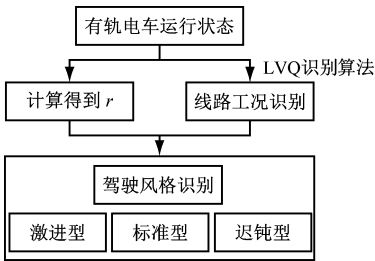
2.1 驾驶风格识别系数

本文在借鉴机动车司机驾驶风格划分标准的基础上,将有轨电车司机驾驶风格分为3种类型:激进型、标准型和迟钝型。其中:激进型司机的特点为司机对操纵手杆的操作幅度较大,操作速度较快,对路况变化反应也较快;标准型司机的特点为前方路况有一定的预见性,可避免有轨电车的硬加速与急减速,对手杆的操作幅度和速度的控制较为合理;迟钝型司机的特点为司机对操纵手杆的操作幅度较小,操作速度较慢,对路况变化反应也较慢。

不同的线路工况对司机操纵手柄的操作有一定的影响。此外,即使司机以同一手柄操作幅度进行驾驶时,在不同的线路工况下司机所体现出来的驾驶风格也会有所不同。因此,对于司机驾驶风格的判定需要与线路工况相结合<sup>[7]</sup>。

2.2 司机驾驶风格识别算法

当有轨电车行驶在郊区的线路区段时,有轨电车的速度等级较高,加速度较大,运行速度较为稳定,此时容易呈现出激进型的驾驶风格。当有轨电车在市区的拥堵区段内行驶时,沿途交通状况复杂,有轨电车存在最高限速,其加速时间较短,列车起停也较为频繁,此时容易呈现出迟钝型的驾驶风格。因此,需结合有轨电车的运行特点,对于不同的线路工况,分别构建基于模糊逻辑的司机风格识别策略。司机驾驶风格识别算法的计算思路如图6所示。

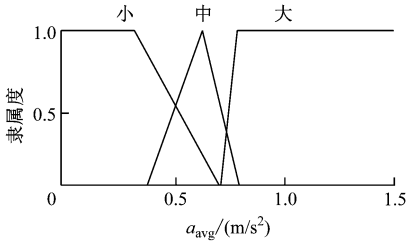


注: $r$ ——有轨电车的加速度标准差  $a_{\text{std}}$  与平均加速度  $a_{\text{avg}}$  之比,即  $r = a_{\text{std}}/a_{\text{avg}}$ 。

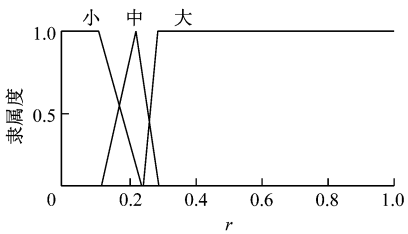
图6 司机驾驶风格识别算法计算思路

Fig.6 Calculation idea of driver's diving style identification algorithm

采用平均加速度  $a_{\text{avg}}$  及  $r$  作为模糊输入。设  $k$  为司机风格补偿因子,为模糊输出。图7为有轨电车在市区通畅区段内行驶时  $a_{\text{avg}}$  及  $r$  的隶属度函数,图8为  $k$  的隶属度函数。



a)  $a_{\text{avg}}$  的隶属度函数



b)  $r$  的隶属度函数

图7 有轨电车在市区通畅区段内行驶时各输入数据的隶属度函数

Fig.7 Membership function of each input data when tram runs in urban unobstructed section

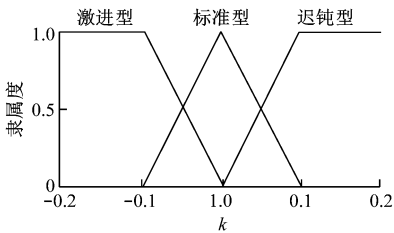


图8 有轨电车在市区通畅区段内行驶时  $k$  的隶属度函数

Fig.8 Membership function of  $k$  when tram runs in urban unobstructed section

由此,可得到司机驾驶风格模糊逻辑规则,如表2所示。

表2 司机驾驶风格模糊逻辑规则

Tab.2 Fuzzy logic rules for driver's diving style

项目		$r$		
		小	中	大
$a_{\text{avg}}$	小	迟钝型	迟钝型	标准型
$a_{\text{avg}}$	中	标准型	标准型	激进型
$a_{\text{avg}}$	大	激进型	激进型	激进型

本文设定计算司机驾驶风格的计算识别间隔为10 s。利用上文的模糊逻辑识别策略对统计期内司机各时刻的驾驶风格进行识别,其结果如图9所示。

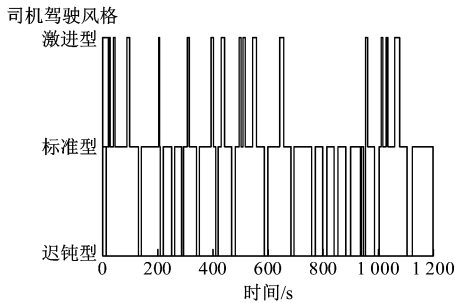


图9 司机驾驶风格仿真识别结果截图

Fig. 9 Screenshot of driver's driving style simulation identification results

## 2.3 能量管理补偿原则

### 2.3.1 基于司机驾驶风格的有轨电车牵引功率补偿

牵引手柄位置能够直接反映有轨电车的牵引功率。当牵引功率为正时,利用  $k$  对有轨电车行驶过程中的牵引功率进行解析。考虑到超级电容的快速瞬态响应特性,使用超级电容作为主能量的补偿元件。图 10 为基于司机驾驶风格有轨电车牵引功率补偿流程,分为两种情况:①情况 1,在满足有轨电车动力性需求情况下,当超级电容处于满电或高低电压状态时,用超级电容进行功率补偿;②情况 2,当超级电容处于亏电状态时,则用锂电池进行功率补偿。

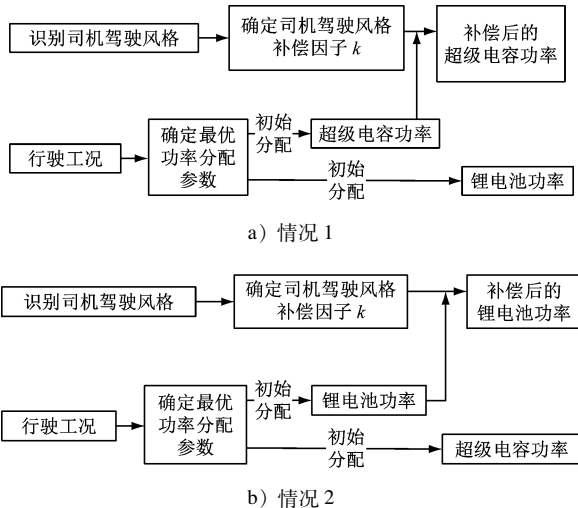


图 10 基于司机驾驶风格的有轨电车牵引功率补偿流程

Fig. 10 Tram traction power compensation process based on driver's driving style

在情况 1 和情况 2 下,得到修正后总能量输出分别为:

$$P_{qy1,de} = P_b + \text{sgn}(P_{de})kP_{sc} \quad (5)$$

$$P_{qy2,de} = \text{sgn}(P_{de})kP_b + P_{sc} \quad (6)$$

式中:

$P_{qy1,de}$ ——情况 1 修正后的牵引功率;

$P_{qy2,de}$ ——情况 2 修正后的牵引功率;

$P_{de}$ ——修正前的牵引功率;

$\text{sgn}$ ——阶跃函数。

### 2.3.2 基于司机驾驶风格的有轨电车制动功率补偿

制动手柄位置能够直接反映有轨电车制动功率。为了能够最大程度回收制动的再生能量,同时减少锂电池的充/放电频率,降低有轨电车的能量损耗,本文利用  $k$  对有轨电车行驶过程中的制动功率进行解析。考虑到有轨电车制动时须将安全作为首要考虑因素,因此可在总制动功率不变的前提下,修正锂电池与超级电容回收制动的再生能量比例,使用超级电容作为能量补偿元件。即:当超级电容处于满电状态时,不需要进行功率补偿;当超级电容处于亏电或高低电压状态时,用超级电容进行功率补偿。基于司机驾驶风格的有轨电车制动功率补偿如图 11 所示。

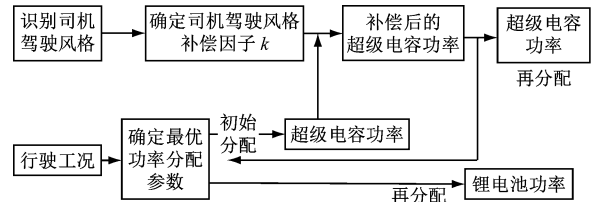


图 11 基于司机驾驶风格的有轨电车制动功率补偿

Fig. 11 Tram braking power compensation based on driver's diving style

使用超级电容进行功率修正时,将修正后的总能量输出进行分配:

$$P_{zd,sc} = kP_{sc} \quad (7)$$

$$P_{zd,d} = P_{de} - P_{zd,sc} \quad (8)$$

式中:

$P_{zd,sc}$ ——补偿后超级电容的输出功率;

$P_{zd,b}$ ——补偿后锂电池的输出功率。

## 3 能量管理策略仿真测试及分析

为验证本文提出的混合动力有轨电车能量管理策略的合理性,本文搭建了整车仿真模型,在典型工况<sup>[8]</sup>对基于司机驾驶风格的能量管理策略及常规的能量管理策略(逻辑门限控制)进行仿真测试,得到有轨电车牵引功率的仿真对比结果如图 12 所示。

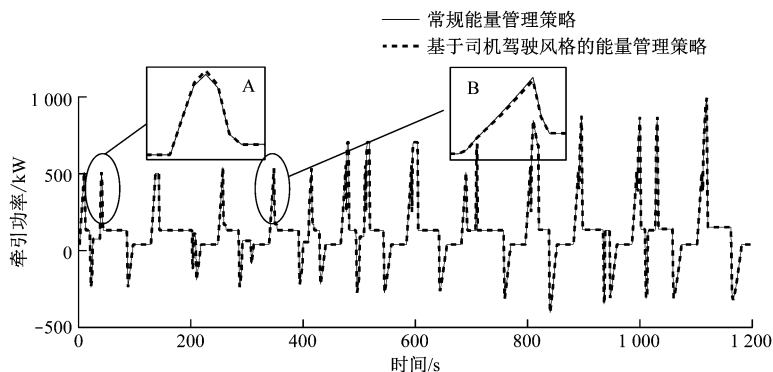


图 12 基于司机驾驶风格能量管理策略和常规能量管理策略的牵引功率对比

Fig. 12 Comparison of traction power based on driver's driving style energy management strategy and conventional energy management strategy

由图 12 的截图 A 可知,当司机为迟钝型驾驶风格时,与常规能力管理策略相比,基于司机驾驶风格能量管理策略的牵引功率更大,可以使牵引功率能够提前进入司机驾驶操作的设定范围;从截图 B 可知,当司机为激进型驾驶风格时,与常规能力管理策略相比,基于司机驾驶风格能量管理策略的牵引功率更小,功率波动较为平缓。

有轨电车处于制动状态时,由于以列车运行安全作为首要考虑因素,系统制动能量以司机操作为准,系统的制动功率在司机驾驶风格识别前后并无区别。

基于司机驾驶风格能量管理策略、常规能量管理策略两种情况下有轨电车供电系统锂电池与超级电容的能量损耗进行对比,其结果如图 13 所示。由图 13 可知:常规能量管理策略下的系统能量损耗为 3.74 kWh,基于司机驾驶风格能力管理策略下的系统能量损耗为 3.56 kWh,系统能量损耗下降了 4.81%。系统能量损耗减少的原因主要有 2 个:①在有轨电车的牵引与制动时,通过  $k$  对激进型与迟

钝型驾驶风格的功率波动进行调整与补偿,使其牵引/制动功率靠近标准型驾驶风格的水平,使得混合动力有轨电车系统在全寿命周期内的牵引/制动功率在较为理想的范围内波动;②选用超级电容作为基于司机驾驶风格能力管理策略的补偿元件,利用超级电容的快速响应特性来减少锂电池输出功率的波动,降低了有轨电车系统的能量损耗,提高了系统的能量效率。

## 4 结语

本文提出了基于司机驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略。首先利用模糊逻辑规则对司机的驾驶风格进行识别,根据识别结果确定基于司机驾驶风格的牵引/制动补偿因子。然后利用超级电容对有轨电车在牵引/制动时进行功率补偿,对其初步功率分配进行修正后得到最终的功率分配。仿真结果表明,与常规的能力管理策略相比,在本文所提出的基于司机驾驶风格的能量管理策略下,锂电池的 SOC 变化更为平稳,超级电容的利用率更高,系统能量损耗可降低了约 4.81%。

## 参考文献

- [1] KUBÍN J, FERKOVÁ Ž. Influence of driving style of a tram driver on the tram's energy consumption[C]//2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE). Tatranska Lomnica, Slovakia. New York: IEEE, 2015: 417.
- [2] 陈大分,姜久春,王占国,等. 动力锂离子电池分布参数等效电路模型研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 169.  
CHEN Dafen, JIANG Jiuchun, WANG Zhanguo, et al. Research on distribution parameters equivalent-circuit model of power lithium-ion batteries [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 169.

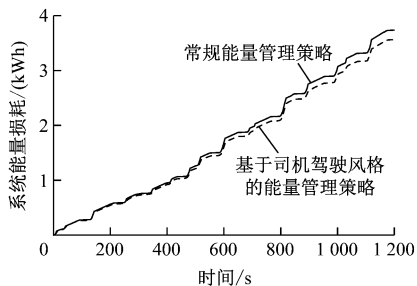


图 13 基于司机驾驶风格能量管理策略和常规能量管理策略的系统能量损耗对比

Fig. 13 Comparison of system energy loss based on driver's driving style energy management strategy and conventional energy management strategy