

接触网间歇式供电电容储能车辆 储能系统运行工况建模分析^{*}

綦芳 赵正虎

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘要 以接触网间歇式供电电容储能车辆储能系统运行工况的建模方法为研究对象,对接触网间歇式供电电容储能式有轨电车运行过程建立多质点模型,并对以超级电容为基础的车载储能系统建立其数学模型。对储能车辆进行区间线路仿真,得到超级电容功率曲线及SOC(荷电状态)曲线,并将多质点模型与单质点模型下的仿真结果进行对比。对车载储能系统运行工况进行分析,验证了列车多质点动力学模型对储能系统的能量计算具有更高的精确性。

关键词 有轨电车;多质点模型;超级电容;储能系统

中图分类号 U482.1;TK01*8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.007

Operational Condition Modeling Analysis of Vehicle Capacitive Energy Storage System by Catenary Intermittent Power Supply

QI Fang, ZHAO Zhenghu

Abstract Taking the operational condition modeling of vehicle capacitive energy storage system by catenary intermittent power supply as the research object, a multi-particle model is established for the operation process of tramcar capacitive energy storage by catenary intermittent power supply, and the mathematical model of the on-board energy storage system based on supercapacitor is built. Through route interval simulation of energy storage vehicle, the supercapacitor power curve and SOC (state of charge) curve are obtained, the simulation results of multi-particle model and single-particle model are compared. By analyzing the operational conditions of the on-board energy storage system, the multi-particle model is verified to have higher accurate energy calculation for the energy storage system.

Key words tram; multi-particle model; supercapacitor; energy storage system

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

在有轨电车牵引供电系统中,列车再生制动能量的吸收与利用以及对电网电压波动的抑制,需要依赖储能装置的合理选择与配备。目前,国内多数有轨电车选择接触网间歇式供电电容储能车辆,由车载储能装置及接触网混合供电。对车载超级电容储能系统典型运行工况进行分析,这对有轨电车运行控制策略的拟定以及节能减排有着重要意义。

目前,国内对储能式列车车载储能系统及能量管理策略的研究不胜枚举。文献[2]基于列车运行状态,对地面混合储能装置进行了研究分析,并提出了一种分时段控制策略。文献[3]提出了基于动态混合度的储能式有轨电车能量管理策略,并对车载超级电容进行了建模分析。文献[4]对超级电容储能原理及储能式有轨电车供电系统进行了研究。文献[5]对混合动力列车运行控制及能量管理策略进行了研究。文献[6]对有轨电车超级电容器储能系统状态监测技术进行了研究。

本文以接触网间歇式供电电容储能式有轨电车为研究对象,基于有轨电车基础车辆参数以及超级电容参数,对列车建立多质点动力学模型;结合列车单质点模型研究列车受力情况及车载储能系统运行工况,分析储能系统的充放电模式,对超级电容建立等效电路模型,计算并推导超级电容的输出电流、输出电压及SOC(荷电状态)。最后通过仿真,以列车的一段线路数据作为基础,绘制储能系统功率曲线及超级电容SOC曲线,进而对计算结果进行验证。

1 列车运行仿真计算模型

需建立有轨电车的运行仿真计算模型,给出列车牵引力、制动力及阻力计算的公式;尤其在列车

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201005-07)

阻力计算方面建立多质点动力学模型并进行分析,为储能系统运行工况的建模分析奠定基础。

1.1 牵引力计算

列车的牵引力是传动系统对车轮产生旋转力矩,通过动轮与钢轨之间的相互作用而产生的。列车牵引电机牵引特性曲线如图 1 所示。一般来说,列车需以最大牵引加速度启动,该阶段处于牵引恒转矩区;当列车加速到牵引恒功率点速度 v_1 时,进入牵引恒功率区;当速度继续提高到牵引降功率点速度 v_2 时,进入牵引降功率区。

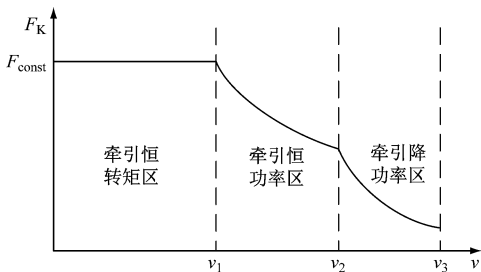


图 1 列车牵引电机牵引特性曲线

牵引电机轮周牵引力 F_K 的计算公式如下:

$$F_K = \mu_k \begin{cases} F_{\text{const}}, & 0 < v \leq v_1 \\ \frac{3.6p_n}{v}, & v_1 < v \leq v_2 \\ \frac{3.6p_nv_2}{v^2}, & v_2 < v \leq v_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

F_{const} ——电机轮周最大牵引力, kN;

μ_k ——牵引电机轮周牵引力使用系数,其值在 0 到 1 之间;

p_n ——电机最大牵引功率, kW;

v ——列车运行速度, km/h;

v_1 ——列车牵引恒功率点速度, km/h;

v_2 ——列车牵引降功率点速度, km/h;

v_3 ——列车最大运行速度, km/h。

实际列车牵引力 F_T 受到电机牵引特性和列车黏着牵引力双重限制,应为轮周电机牵引力 F_K 与黏着牵引力 F_μ 中较小的一个,即

$$F_T = \min\{F_K, F_\mu\} \quad (2)$$

列车黏着牵引力的计算公式如下:

$$F_\mu = G_f \mu \quad (3)$$

式中:

F_μ ——黏着牵引力, kN;

G_f ——列车的黏着质量, kN;

μ ——黏着系数。

1.2 制动力计算

列车制动一般以再生制动为主,以空气制动为辅,可以最大限度减少能源的浪费。再生制动能回收制动能量,回馈到超级电容中,减少了总能量消耗,因而得到了广泛的应用。 t 时刻列车电制动力 F_B 为:

$$F_B = u_b \min\{F_\mu, b(v, E_t)\} \quad (4)$$

式中:

u_b ——列车制动力使用系数,取值为 0 ~ 1;

$b(v, E_t)$ ——列车再生制动特性函数;

F_μ ——制动黏着力,其计算与式(3)一致。

1.3 阻力计算

列车运行过程中受到的阻力主要包括基本阻力和附加阻力。基本阻力计算式为:

$$W_0(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (5)$$

式中:

A, B, C ——常数(依列车车辆类型而异);

v ——列车运行速度, km/h。

列车附加阻力由坡道阻力、弯道阻力和隧道阻力组成,计算式为:

$$F_j = F_i + F_r + F_s = i + 600/R \quad (6)$$

式中:

F_j ——附加阻力, kN;

F_i ——坡道阻力, kN;

F_r ——弯道阻力, kN;

F_s ——隧道阻力(一般忽略不计), kN;

i ——坡度千分数;

R ——弯道半径, m。

1.4 列车多质点模型

单质点列车模型将列车看作一个刚性质点,其附加阻力计算公式如式(6)所示。列车在运行过程中难免会出现车辆前后段不在同一坡道、弯道的情况,此时采用单质点模型将影响附加阻力的计算精度。因此,本文在考虑列车长度的基础上,应用多质点模型对列车进行附加阻力计算。

多质点列车模型将列车视为多个质点构成的“质点链”,按照列车的长度分段累加列车覆盖在各段坡道及弯道上的附加阻力,其附加阻力计算如下:

$$F_j = F_i + F_r = \frac{1}{L} \left[\sum i_i \cdot l_i + 600 \sum \frac{l_{ri}}{R_i} \right] \quad (7)$$

式中:

L ——列车长度;

i_i, l_i ——列车所覆盖的第 i 个坡道的坡道千分度和长度;

R_i, l_{ri} ——列车所覆盖的第 i 个弯道的弯道半径和长度。

2 储能系统模型

本文所研究的储能式有轨电车采用超级电容作为储能元件,列车以超级电容和接触网作为动力源。图2为该储能式有轨电车的拓扑结构。

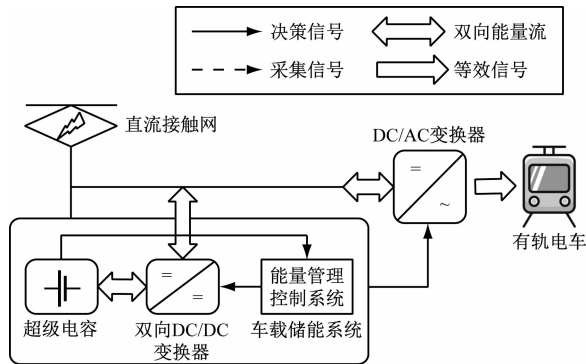


图2 储能式有轨电车的拓扑结构

列车在无网段正常运行时,通过超级电容给列车供电,列车在站台停靠时需对车载超级电容充电^[7]。此外,列车制动时,超级电容还将按一定策略对再生制动能量进行吸收以再利用^[8]。所以,在分析储能系统的工况时,要根据列车的运行工况,对列车储能系统建立合理的能量解算模型,并通过仿真计算得出超级电容的功率及SOC曲线。

本文对超级电容的建模采用的是超级电容经典等效模型,如图3所示。

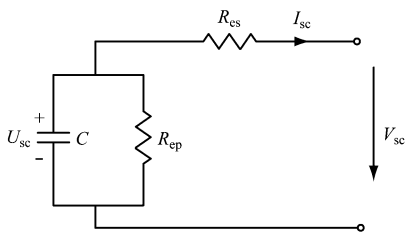


图3 超级电容经典等效模型

根据超级电容经典等效模型,推导出超级电容输出电流 I_{sc} 和输出电压 V_{sc} 计算公式如下:

$$\begin{cases} I_{sc} = C \frac{dU_{sc}}{dt} - \frac{U_{sc}}{R_{ep}} \\ V_{sc} = U_{sc} - I_{sc} R_{es} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

C ——超级电容的电容值;

R_{ep} ——超级电容的漏电阻;

R_{es} ——超级电容的等效串联电阻;

I_{sc} ——流过超级电容的电流;

V_{sc} ——输出电压;

U_{sc} ——开路电压。

SOC 是电池荷电状态,也称为剩余电量,代表电池使用一段时间或长期搁置不用后的剩余容量与其完全充电状态的容量比值,常用百分数表示,其量符号定为 Q_{soc} 。与传统电池 SOC 的计算方法类似,超级电容 SOC 的计算可以类比电池 SOC 从电量角度的定义。 Q_{soc} 的计算表达式如下:

$$Q_{soc} = \frac{Q}{Q_n} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

Q ——超级电容的当前电量;

Q_n ——超级电容的额定电量。

通常可以根据超级电容开路电压的值来确定相应的 Q_{soc} 值^[9]。针对上述超级电容等效模型, Q_{soc} 的计算公式如下:

$$Q_{soc} = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\% \quad (10)$$

式中:

V ——某时刻超级电容的工作电压;

V_{max} ——超级电容的最高工作电压;

V_{min} ——超级电容的最低工作电压。

结合列车运行工况,超级电容功率与车辆运行状态的方程为:

$$P = V_{sc} I_{sc} = \begin{cases} F_T v / \eta + p_a & ① \\ \eta (F_0 + F_i + F_r) v + p_a & ② \\ p_a & ③ \\ -\eta \alpha \cdot F_B v + p_a & ④ \end{cases} \quad (11)$$

式中:

P ——超级电容输出端功率;

η ——总效率;

α ——再生制动能量利用系数;

p_a ——辅助系统的功率;

F_T ——列车牵引力;

F_0 ——列车基本阻力;

F_i ——坡道阻力;

F_r ——弯道阻力;
 F_B ——列车制动力;
 v ——列车速度。

在式(11)中:①为牵引阶段;②为巡航阶段,车辆接近匀速行驶,此时超级电容输出功率与列车合阻力相关;③为惰行阶段;④为制动阶段,此时制动能量回馈给超级电容。

3 储能系统运行工况分析

对有轨电车储能系统的运行工况进行分析,主要基于车载超级电容充放电特性、SOC 及功率曲线的研究。

3.1 超级电容充放电特性

常用超级电容器的充电模式有恒流充电、恒压充电、恒功率充电及恒流转恒压充电。本文研究的现代有轨电车超级电容采用恒流转恒压充电。在这种模式下,超级电容充放电的理想电压、电流曲线如图 4 所示。

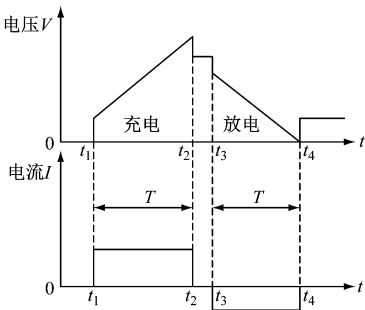


图 4 超级电容的充放电特性曲线

3.2 储能系统运行仿真与结果分析

本仿真研究截取有轨电车的部分线路数据,对长度为 1 160 m 的区间线路进行仿真。仿真所采用的列车基础参数如表 1 所示,超级电容参数如表 2 所示,线路坡道数据如表 3 所示,线路弯道数据如表 4 所示,列车运行速度曲线如图 5 所示。

将单质点列车模型与多质点列车模型下的仿真数据导出,得到与实际数据对比的列车运行功率、超级电容 SOC 及超级电容功率如图 6 所示,仿真与实际的超级电容数据为整车 4 块超级电容中 1 块数据。

根据图 6 a) 中的列车实际运行功率曲线及两种模型下的列车运行功率仿真曲线,可以计算出列车在该区段段的能耗,能耗计算结果如表 5 所示。

表 1 列车基础参数

参数	数值
整车质量/t	48
动车数量	2
逆变器效率/%	95
最高牵引电压/V	900
单位质量启动阻力/kN	37.2
拖车转动惯量	0.1
能量回收系数	0.6
牵引最大黏着系数	0.2
制动最大黏着系数	0.2
基本阻力系数 A	0.801 25
基本阻力系数 B	0.044 583
基本阻力系数 C	0.000 438 8
整车超级电容块数	4

表 2 超级电容参数

参数	数值
额定容量/F	583
额定储存能量/(kW·h)	19
最高工作电压/V	547
最低工作电压/V	410
能量转换效率/%	97
最大充电电流(30 s)/A	600
最大放电电流(30 s)/A	600

表 3 线路坡道数据

坡道编号	坡道千分度	坡道长度/m
1	0	80
2	-0.003 017	190
3	0.007 568	150
4	-0.002 448	250
5	0.003 559	140
6	-0.045 793	350

表 4 线路弯道数据

弯道编号	半径/m	起点/m	终点/m
1	40	297.81	383.41

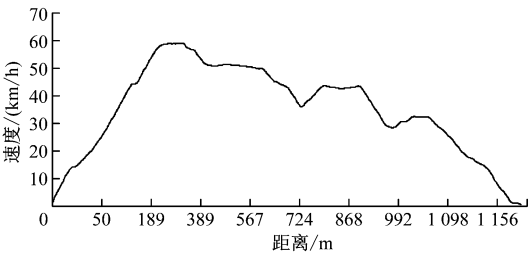


图 5 列车运行速度曲线

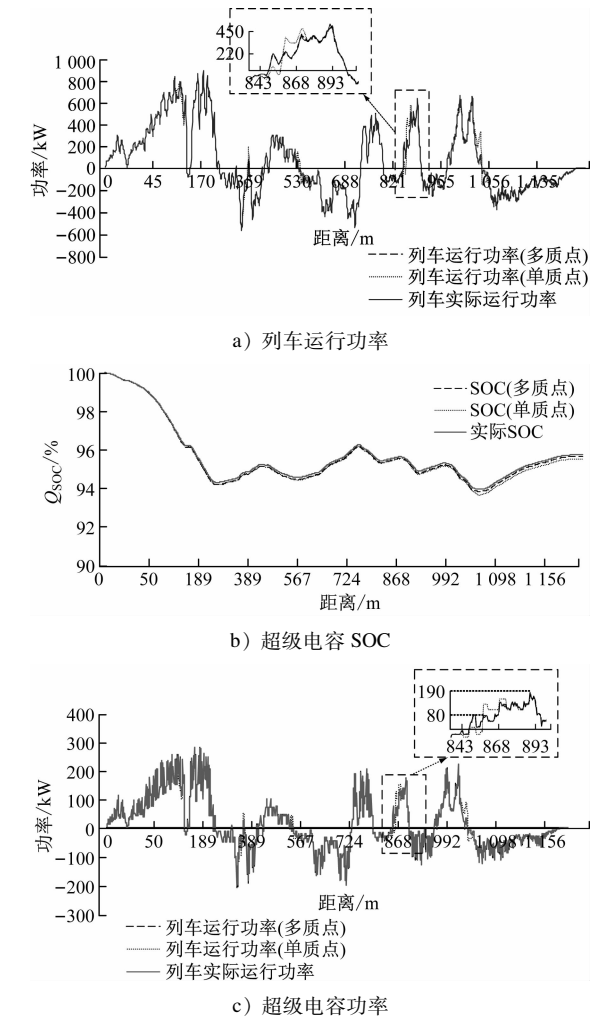


图6 有轨电车运行仿真曲线与实际曲线

表5 列车区间能耗值

区间全长/m	模型	能耗值/(kW·h)
1 160	多质点(仿真)	3.052
1 160	单质点(仿真)	3.151
1 160	实际	2.979

由表5可以看出,多质点模型与单质点模型仿真计算得到的列车区间能耗有一定差异。与实际能耗值相比,多质点模型下的仿真能耗误差约为2.4%,单质点模型下的仿真能耗误差约为5.4%。可见运用多质点模型对区间能耗的计算更为精确。图6仿真结果显示,列车在进入区间线路最后一段大坡度坡道时,两种不同模型下的列车运行功率、超级电容功率及超级电容SOC差异明显,且多质点模型下的仿真结果更接近实际值。所以,仿真能耗计算存在差距的主要原因是列车在变坡、变曲率点处的两种动力学模型下的受力情况差异明显,这直

接导致了功率及能耗计算的差异,同样影响了超级电容功率及电量变化。相较于单质点模型,多质点模型能够提高车辆在变坡点及变弯道点处列车受力计算的准确性。图6b)和图6c)的超级电容SOC及功率的仿真与实际曲线可以显示超级电容的用电过程,进一步发现多质点模型下超级电容的工况特性也更接近实际情况,多质点模型对于储能系统的能量计算也更为精确,能更准确地反映超级电容的充放电工况特性曲线,方便后续优化有轨电车能量管理策略。

4 结语

本文以接触网间歇式供电电容储能车辆为研究对象,对该类型有轨电车建立多质点动力学模型,对超级电容车载储能系统建立数学模型;通过仿真分析得到车载储能系统的超级电容SOC曲线和功率曲线,并与列车单质点模型对比;参照储能系统实际运行工况曲线,比较不同模型下仿真与实际的能耗值,验证了多质点模型对于储能系统能量计算具有更高的精确性。研究结果对列车能量管理策略的设计与优化具有重要工程价值。

参考文献

[1] 郝小亮,徐成永.有轨电车可持续发展研究[J].都市快轨交通,2019(1):98.

[2] 秦强强,张骄,李宇杰,等.基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分时段控制策略[J/OL].电工技术学报,2020(增刊2):120[2020-04-16].https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80400.

[3] 陈维荣,时方力,戴朝华,等.基于动态混合度的储能式有轨电车能量管理策略[J].西南交通大学学报,2020(2):409.

[4] 赵军,范晓云,何杜明,等.超级电容有轨电车供电系统研究[J].电力电子技术,2017,51(6):86.

[5] 陈彦秋.混合动力列车运行控制及能量管理策略研究[D].成都:西南交通大学,2014.

[6] 张志江.有轨电车超级电容器储能系统状态检测技术研究[D].大连:大连交通大学,2014.

[7] 刘昕,卢怡,张继业.混合动力有轨电车运行能耗研究[J].现代城市轨道交通,2019(2):29.

[8] 成建国,张一,文小龙.城市轨道交通新型车载储能系统的研制[J].城市轨道交通研究,2015(7):95.

[9] 杨水丽,侯朝勇,许守平,等.基于时间序列关联聚类的储能电池典型工况曲线提炼[J].电力系统自动化,2018,42(9):1884.

(收稿日期:2020-01-21)