

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80428

基于参数反馈的城轨交通超级电容 健康状态估算

信月 杨中平 林飞 诸斐琴
(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 随着城轨交通超级电容储能系统应用的日益广泛,其寿命问题引起了很大的关注。由于超级电容的寿命与其承受的电压、电流和温度密切相关,本文基于超级电容的电、热模型和高温加速寿命测试,提出一种超级电容健康状态估算模型。首先利用 Arbin 测试仪对超级电容进行恒电流充放电测试以辨识其电、热模型参数,基于北京地铁某线路典型工况下的电流曲线在 80℃ 恒温箱中对超级电容进行加速循环寿命测试,并对容量进行监测。经过 587 次循环后,容量衰减为初始值的 96.02%。根据测试结果计算得到超级电容健康状态估算模型参数,结合等效电路模型和热模型对超级电容的健康状态进行仿真分析,同时将容量 C 和等效串联电阻 ESR 实时反馈修正模型参数。最后在 90℃ 恒温箱中进行加速寿命测试,容量 C 的实验测试结果与仿真结果之间的最大误差小于 2%,验证了所提出的健康状态估算模型的准确性。

关键词: 城轨交通 超级电容 健康状态估算 寿命模型 高温加速寿命测试

中图分类号: TM921

Research on State of Health Estimation of Supercapacitor in Urban Rail Transit Based on Parameter Feedback

Xin Yue Yang Zhongping Lin Fei Zhu Feiqin

(School of Electrical Engineering Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China)

Abstract With the increasingly widespread use of supercapacitor energy storage system for urban rail transit, its life expectancy has attracted great attention. Since the lifetime of the supercapacitor (SC) is closely related to the voltage, current, and temperature it withstands, a new state of health (SOH) estimation model of SC is proposed based on the electric and thermal models of the SC and accelerated life testing at high temperatures. First, the SC was charged and discharged by a constant current through the Arbin instrument to identify parameters of electrical and thermal models. Based on the current curve under a typical condition of a Beijing subway line, an accelerated cycle life test was performed on the SC in a temperature chamber at 80℃ and the capacity C was monitored. After 587 cycles, the capacity C is reduced to 96.02% of the initial value. The parameters of the SOH estimation model are calculated according to the testing results. The equivalent circuit model and the thermal model are used to simulate the SOH of the SC. Meanwhile, the capacity C and equivalent series resistance (ESR) are fed back in real-time to correct the model parameters. Finally, a high temperature accelerated life test was conducted in a temperature chamber at 90℃. The maximum error of capacity C between the experimental results and the simulation results is less than 2%, which verifies the accuracy

国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201105)。

收稿日期 2018-07-01 改稿日期 2018-12-10

of the proposed SOH estimation model.

Keywords: Urban rail transit, supercapacitor, state of health (SOH) estimation, life model, high temperature accelerated life test

0 引言

随着城市轨道交通再生制动技术的快速发展,超级电容(Supercapacitor, SC)以其充放电速度快和循环寿命长等优点得到了广泛应用。利用超级电容储能系统回收列车的再生制动能量,可有效地降低列车的运行能耗,减小牵引网直流侧网压波动^[1-2]。城轨列车具有运行密度大、站间距离短、起停频繁等特点,导致超级电容储能系统频繁充放电,因此需要对其寿命问题予以考虑。超级电容的性能会受工作温度、电压、电流的影响逐渐退化,高温会促进电解液的活性,加速电化学反应和热分解,当超级电容两端电压接近电解液的分解电压时,超级电容会迅速老化,而电流与其稳定自发发热温升有关^[3]。单体性能的衰减会影响整个储能系统的储能特性。因此,为了提高整个储能系统的安全性和可靠性,需要准确地估计超级电容单体的寿命指标等效串联内阻(Equivalent Series Resistance, ESR)和容量 C ,以监测当前的健康状态(State of Health, SOH)^[4]。

目前,有很多方法估计超级电容的容量 C 和内阻ESR,包括离线方法和在线方法。文献[5-11]分别应用带遗忘因子和限定记忆的递推最小二乘法对超级电容的等效电路模型进行参数辨识,两种方法均能有效地克服辨识数据逐渐增多带来的数据饱和现象,但辨识精度有待提高。文献[12]通过Simscape language建立了可变电容器模型,并使用Simulink中的Parameter estimation对模型参数进行辨识。文献[13]提出了一种基于自适应增益滑膜观测器的在线辨识方法,考虑了容量和偏置电压之间的非线性关系,进行了李雅普诺夫稳定性分析,但此方法辨识结构复杂,实现较困难。文献[14]采用了模糊-神经网络法对超级电容的容量和内阻进行预测,但此种基于人工智能的估算方法还尚未成熟。此外,一些标准的制定机构,例如,IEC(国际电工委员会)、EUCAR(欧洲汽车研究中心)对超级电容进行了离线参数辨识^[15]。文献[16]使用了IEC 62391标准和电化学阻抗谱法对超级电容的容量 C 和内阻ESR进行参数辨识,IEC标准辨识方法简单,结果精确;电化学阻抗谱法在参数辨识过程中所需的激励信号

过小,不足以反映超级电容在城轨交通应用中的真实工况。综合以上方法,本文选用IEC标准对超级电容等效电路模型参数进行辨识。

为了研究超级电容的寿命特性,国内外很多学者针对不同应用场合对超级电容进行加速寿命测试,并建立了寿命预测模型。文献[17]设计了多组加速寿命测试实验,在高温和高压下对超级电容进行浮充测试,通过小电流对其进行充放电以忽略电流对超级电容老化的影响,提出了一种基于电压倍增器的寿命模型,但是此寿命模型没有考虑循环测试和电流对超级电容寿命的影响。文献[18]在不同电压、电流、温度和功率的情况下对超级电容进行恒压-恒流充电、恒功率放电循环测试,并基于实验结果和阿伦尼乌斯方程建立了寿命估算模型,但此模型不适用于城轨交通超级电容储能系统的寿命估算。文献[19-20]在高温和高压下对超级电容进行浮充测试,提出了一种超级电容寿命模型,并给出了容量和内阻随温度和电压的变化关系,但没有考虑动态循环充放电的影响。文献[21]在高温下对超级电容模组进行恒功率循环加速寿命测试,基于测试数据和厂家提供的日历测试降解数据,提出了一种考虑电压、温度和有效值电流的寿命模型,该模型综合考虑了循环测试和电流对超级电容寿命的影响,但是没有给出容量和内阻随电压、电流和温度的变化趋势关系。

基于以上分析发现,现有的文献中没有针对城轨交通储能系统应用的加速寿命测试,且所建立的寿命模型是否适用于城轨交通应用还有待验证。因此,本文在考虑电压、电流和温度的前提下,建立一种新的适用于城轨交通应用的超级电容健康状态估算模型,并基于北京地铁某实际线路典型工况下的仿真电流曲线对超级电容进行高温循环加速寿命测试。

1 基于参数反馈的超级电容健康状态估算建模

在城轨交通应用中,储能系统的能量管理策略是研究超级电容储能技术的关键内容之一,不同的能量管理策略对超级电容所承受的电压、电流、温

度应力产生不同的影响, 进而对超级电容的寿命产生很大影响^[22-24]。为了验证不同能量管理策略对超级电容寿命的影响, 本文提出一种超级电容健康状态估算模型。如图 1 所示, 首先将不同能量管理策略下的电流波形输入至超级电容的等效电路模型和热模型中得到电压和温度, 综合考虑电压、电流和温度估算出超级电容的容值, 由于在使用过程中, 超级电容的容量 C 会逐渐衰减, 内阻 ESR 会增大, 因此在仿真过程中为了更准确估算超级电容的寿命, 需要将容量和内阻的变化反馈到超级电容的单体模型中, 实时更新模型中的参数^[25]。接下来分别对超级电容的电、热和寿命模型进行建模分析。

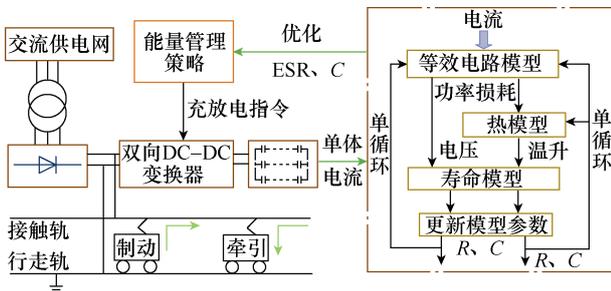


图 1 基于参数反馈的超级电容 SOH 估算

Fig.1 Supercapacitor SOH estimation based on parameter feedback

1.1 等效电路模型

超级电容器, 即双电层电容器 (Electric Double Layer Capacitor, EDLC), 是电化学电容器的一种, 属于普通电化学储能设备^[15]。超级电容器由极化电极、电解液、隔膜、集流体组成, 其结构如图 2 所示。在电容器正负极施加电压时, 电解液中的正负离子分别向两极移动, 形成紧密的双电层。由于炭电极具有比表面积大、电化学性能好和容量高等特点, 其循环充放电寿命长, 储存容量大。

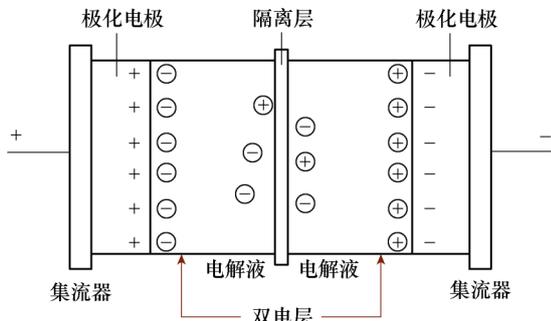


图 2 双电层结构

Fig.2 Double layer structure

由于在城轨交通应用中, 超级电容的充放电周期一般是几秒到几十秒, 超级电容主要表现为电容特性, 因此, 一阶 RC 模型足以描述电容的储能特

性。如图 3 所示, 其中 ESR 为等效串联内阻, 表征超级电容内部损耗, C 为超级电容的等效电容, 表征其储能特性^[26]。



图 3 RC 串联等效电路模型

Fig.3 RC series equivalent circuit model

1.2 热模型

图 4 为超级电容的热模型, 其中 P_s 为损耗功率, C_{th} 为 SC 热阻, R_{th1} 和 R_{th2} 均为热容, R_{th1} 用于描述从 SC 内部核心到其外壳的热传递现象, R_{th2} 用于描述 SC 外壳和环境之间的热对流现象。 T_{c1} 为 SC 的内核温度, T_{c2} 为外壳温度, T_a 为外部环境温度^[21]。

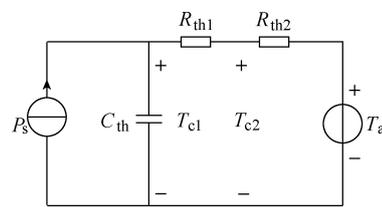


图 4 SC 热模型

Fig.4 SC thermal model

其温升方程为

$$C_{th} \frac{dT_{c1}}{dt} = P_s + \frac{T_a - T_{c1}}{R_{th1} + R_{th2}} \quad (1)$$

通过求解式 (1) 的微分方程可以得到 T_{c1} 和 T_{c2} 为

$$T_{c1}(t) = e^{-\frac{t}{C_{th}(R_{th1} + R_{th2})}} \cdot \left[\int_0^t e^{\frac{\xi}{C_{th}(R_{th1} + R_{th2})}} \cdot \frac{(R_{th1} + R_{th2})P_s(\xi) + T_0}{C_{th}(R_{th1} + R_{th2})} d\xi + T_0 \right] \quad (2)$$

$$T_{c2}(t) = \frac{T_{c1}(t) - T_a}{R_{th1} + R_{th2}} R_{th2} + T_a \quad (3)$$

1.3 容量衰减模型

文献[21]在高温下对超级电容进行恒功率循环寿命测试, 提出一种考虑电压、温度以及有效电流的单体寿命估算模型, 有

$$\tau_d(V(t), \theta(t), I_{RMS}) = \frac{t_{end} - t_{init}}{\frac{1}{\tau_0} \int_{t_{init}}^{t_{end}} \exp\left(\frac{V(t)}{V_0} + \frac{\theta(t)}{\theta_0} + \frac{I_{RMS}}{I_{RMS0}}\right) dt} \quad (4)$$

式中, t_{init} 、 t_{end} 分别为循环测试的起、止时间; τ_0 、 τ_d 分别为动态充放电循环下的参考等效寿命和实际寿命; V 、 θ 、 I_{RMS} 分别为 SC 端电压、温度和有效

值电流； V_0 、 θ_0 、 I_{RMS0} 分别为与 SC 端电压、温度和有效值电流相关的常数。根据厂家提供的日历测试结果，当 SC 承受温度增加 10°C 或电压增加 0.2V 时，寿命减少一半，文献[21]给出了模型中 V_0 、 θ_0 、 I_{RMS0} 的计算结果，见表 1。 I_{RMS} 的计算公式为

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{end}} - t_{\text{init}}} \int_{t_{\text{init}}}^{t_{\text{end}}} i_c^2(t) dt} \quad (5)$$

式中， i_c 为每个循环周期内流过 SC 的电流。

表 1 寿命模型参数

Tab.1 Parameters of life model

参 数	数 值
τ_0/s	1.4×10^{13}
V_0/V	$0.2/\ln 2$
$\theta_0/^\circ\text{C}$	$10/\ln 2$

文献[20]提出一种超级电容的容量估算模型。即

$$C(t, T, V) = C_0(1 + c_a t_{\text{eq}}) \quad (6)$$

$$t_{\text{eq}} = t c_T^{(T-T_0)/\Delta T} c_V^{(V-V_0)/\Delta V} \quad (7)$$

式中， t_{eq} 为 SC 参考等效寿命； t 为实际寿命； C_0 为 SC 初始容值； c_T 、 c_V 、 c_a 为常数。此寿命公式适用于恒温恒压测试条件。为了在城轨交通应用中估算 SC 的健康状态，本文提出一种新的容量估算模型，将式 (4) 变形得到动态电压和温度下的等效寿命为

$$\tau_0 = \frac{\tau_d \int_{t_{\text{init}}}^{t_{\text{end}}} \exp\left(\frac{V(t)}{V_0} + \frac{\theta(t)}{\theta_0} + \frac{I_{RMS}}{I_{RMS0}}\right) dt}{t_{\text{end}} - t_{\text{init}}} \quad (8)$$

其中将

$$k = \frac{\int_{t_{\text{init}}}^{t_{\text{end}}} \exp\left(\frac{V(t)}{V_0} + \frac{\theta(t)}{\theta_0} + \frac{I_{RMS}}{I_{RMS0}}\right) dt}{t_{\text{end}} - t_{\text{init}}} \quad (9)$$

定义为 SC 的退化率， I_{RMS0} 为待辨识参数。由于式 (8) 中的 τ_0 与式 (6) 中的 t_{eq} 均为等效寿命，本质概念相同，将式 (8) 代入式 (6) 可得到动态循环工况下超级电容的寿命衰减公式为

$$C(V(t), \theta(t), I_{RMS}) = C_0(1 + ckt) \quad (10)$$

式中， c 为待辨识参数。

因此，在循环使用过程中容量 C 的衰减公式为

$$C(V(t), \theta(t), I_{RMS}) = C_0 \left(1 + c \frac{\int_{t_{\text{init}}}^{t_{\text{end}}} \exp\left(\frac{V(t)}{V_0} + \frac{\theta(t)}{\theta_0} + \frac{I_{RMS}}{I_{RMS0}}\right) dt}{t_{\text{end}} - t_{\text{init}}} \right) \quad (11)$$

2 实验分析

为了辨识等效电路模型、热模型和寿命模型的参数，本节分别对超级电容进行恒电流循环充放电测试和高温加速寿命测试。

2.1 实验平台

本文选用 Maxwell 技术公司 3000F/2.7V 超级电容单体进行充放电测试。如图 5 所示为 Arbin 测试仪整体结构，通过在 Console 软件中编程可对超级电容进行多种充放电操作，包括恒压充放电、恒流充放电、恒功率充放电和基于仿真电流数据进行循环充放电等。测试仪有 CH1、CH2 两个测试通道，电压范围为 $0 \sim 5\text{V}$ ，电流范围分为三个级别，分别是 $\pm 300\text{A}$ 、 $\pm 50\text{A}$ 和 $\pm 5\text{A}$ 。另外，利用 Arbin 测试仪可以进行温升实验，温度测试通道共 8 个，通过温度传感器能采集单体的表面温度和两极温度。



图 5 Arbin 测试仪

Fig.5 Arbin instrument

图 6 为北京切克实验设备有限公司的高低温试验箱，可以实现特定温度下超级电容充放电测试。试验箱参数见表 2。



图 6 高低温试验箱

Fig.6 Temperature chamber

表2 高低温试验箱参数

Tab.2 Parameters of high-low temperature test chamber

参数	数值
温度范围/℃	-40~150
温度波动/℃	±0.5
功率/kW	3
电源频率/Hz	50
电源电压/V	220

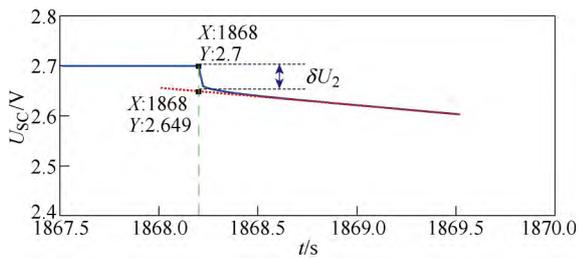
2.2 模型参数辨识

2.2.1 电、热模型参数辨识

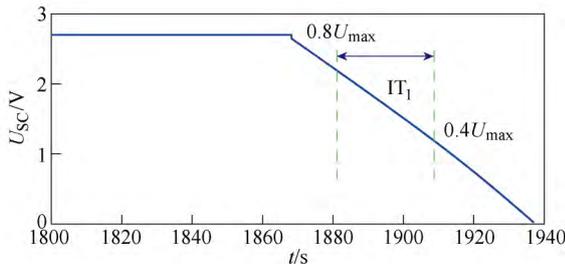
为了获得超级电容的健康状态评估指标 ESR 和 C 的值, 使用 IEC 62391 标准对超级电容的等效电路模型进行参数辨识。先以 10A 的电流对超级电容进行恒流充电至额定电压 2.7V, 然后恒压充电 30min, 最后以 10A 恒电流放电至 0V。基于 SC 的放电过程计算容量 C 和内阻 ESR, 如图 7 所示, 单体的内阻 ESR 等于开路时单体端电压阶跃乘以放电电流的倒数, 单体的电容通过计算电荷量 IT₁ 得到, 指定最大单体电压的 80%~40%作为电压测量值。由式 (12) 和式 (13) 计算得到超级电容测试单体的容量和内阻分别为 3 117.407F 和 0.279mΩ。

$$C = \frac{IT_1}{0.8U_{max} - 0.4U_{max}} \quad (12)$$

$$ESR = -\frac{\delta U_2}{I} \quad (13)$$



(a) 容量 C



(b) 内阻 ESR

图7 基于 IEC 标准的放电过程

Fig.7 Discharging process based on IEC standard

为了对超级电容热模型中的热容、热阻等参数进行辨识, 对 SC 进行恒电流循环充放电测试, 实验条件见表 3。利用最小二乘法可对温升模型的参数进行辨识, 辨识结果曲线如图 8 所示。实验测量结果与拟合结果之间的误差小于 0.7%, 拟合精度较高。拟合前和拟合后的参数见表 4, 其中, 拟合前的参数值为厂家提供的热容和热阻的典型值。

表3 实验条件

Tab.3 Experimental conditions

参数	数值
初始温度/℃	24.66
循环周期/s	60
电流幅值/A	200

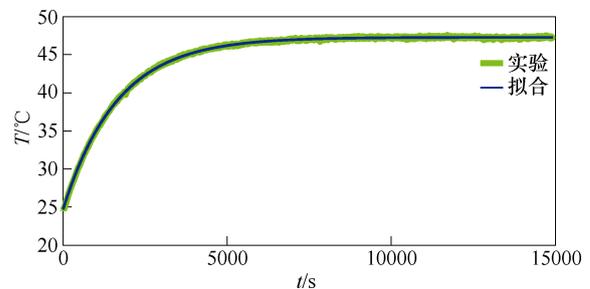


图8 SC 热模型参数辨识结果

Fig.8 Identification result of SC thermal model

表4 参数拟合结果

Tab.4 Parameter fitting results

参数	初值	拟合结果
C _{th} /(J/℃)	400	390.92
R _{th1} /(℃/W)	2.5	2.27
R _{th2} /(℃/W)	2.5	1.95

2.2.2 寿命模型参数辨识

为了辨识寿命估算模型中的参数 c 和 I_{RMS0}, 对超级电容进行高温加速寿命测试。为了确定加速寿命测试的环境温度, 分别对单体进行 45℃、65℃、80℃、90℃高温循环充放电测试。测试结果发现容量 C 均正常衰减, 表明超级电容均能正常工作。为了加快单体老化, 最终将 80℃作为加速老化的环境温度。为了模拟城轨交通超级电容储能系统的实际应用, 本文选用北京地铁某线路的实际工作仿真电流对超级电容进行循环充放电测试, 如图 9a 所示, 周期 T=450s, 此仿真曲线是发车间隔为 450s 时的地铁线路的典型工况曲线。将此电流曲线输入至 Arbin 测试仪, 在 80℃恒温箱中进行循环加速寿命测试。基于此电流曲线充放电一次即为一个循环, 每次循环前保证 SC 电压的初始值相同。图 9b 为超

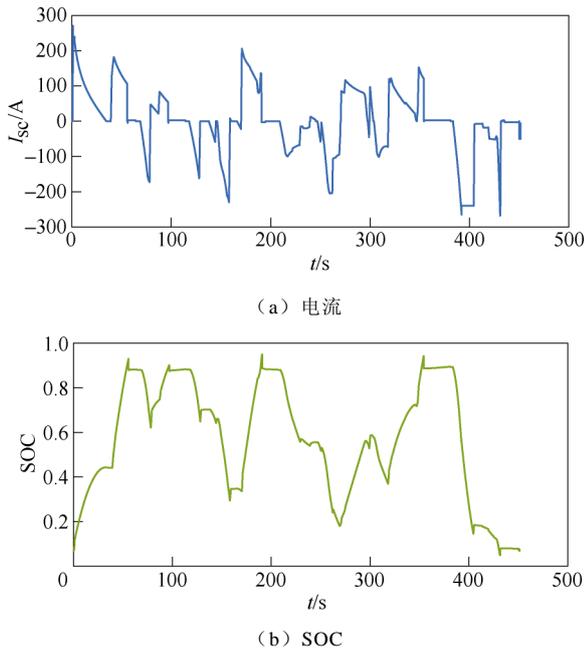


图 9 仿真电流和 SOC 曲线

Fig.9 Simulation curves of current and SOC

级电容的荷电状态 (State of Charge, SOC) 曲线, SOC 的计算公式为

$$SOC = \frac{0.5CU^2}{0.5CU_{max}^2} \quad (14)$$

在高温加速寿命测试过程中, 对超级电容进行连续测试 8h 后, 静置 12h, 然后基于 IEC 标准对测试单体进行充放电测试, 计算其容值 C 和内阻 ESR 。经过 587 个充放电循环后, 通过计算得到容值的变化见表 5。由于内阻 ESR 的值为 $m\Omega$ 级, 难以精确测量, 因此规定当容值衰减为初始值的 80% 时, 超级电容失效, 且假定容量衰减为原来的 80% 时, 内阻衰减为原来的 100%, 以便后文进行容量和内阻的仿真分析。

表 5 基于 IEC 标准的容值 C 的计算值

Tab.5 Calculated values of C based on IEC standard

循环次数	C/F	循环次数	C/F
0	3 117.407	335	3 040.546
73	—	398	3 025.556
138	3 082.787	445	3 016.370
203	3 066.673	535	2 999.259
269	3 048.787	587	2 993.333

由表 5 可以看出, 经过 587 次循环后, 超级电容的容量衰减为初始值的 96.02%, 且衰减趋势呈线性。对离散的数据点进行线性拟合, 拟合结果如图 10 所示, 容量随循环次数的变化关系为

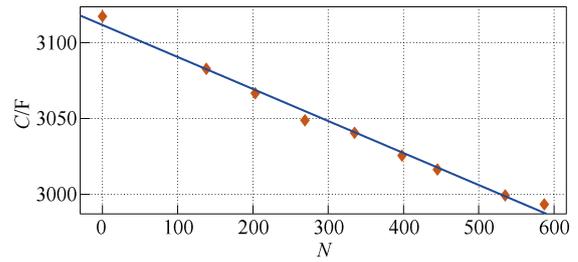


图 10 容量拟合结果

Fig.10 Fitting result of capacity C

$$C = 3112 - 0.2113N \quad (15)$$

对高温加速寿命测试结果进行线性外推, 由式 (16) ~ 式 (18) 可以得到超级电容的循环次数 N_c 和循环寿命 τ_c 分别为 2 926 次和 1 321 966s。

$$N_c = \frac{3112 - C_{end}}{0.2113} \quad (16)$$

$$C_{end} = 0.8C_0 \quad (17)$$

$$\tau_c = N_c T_c \quad (18)$$

式中, T_c 为循环周期; C_{end} 为超级电容失效时的容值。

将式 (18) 代入式 (4) 计算得到

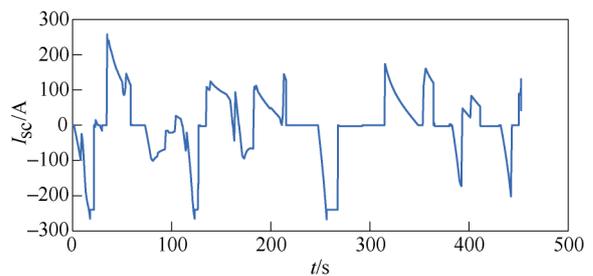
$$I_{RMS0} = \frac{20}{\ln 2} \quad (19)$$

在 $80^\circ C$ 高温加速寿命测试中, 通过计算得到 SC 退化率的初始值 $k_{80} = 3.479 \times 10^6$ 。由式 (11) 和式 (19), 可以计算得到 $c = -1.428 \times 10^{-14}$ 。

2.3 实验验证

为了验证本文所提出的健康状态估算方法的准确性, 设计了另外一组高温加速寿命测试, 测试的电流和 SOC 波形如图 11 所示。此电流波形是通过改变超级电容储能系统的能量管理策略后得到地铁实际线路的仿真电流波形, 循环周期为 452.4s。选用一个新的 3 000F/2.7V 超级电容单体进行测试, 在高温加速寿命测试前, 基于 IEC 标准测得容量的初始值 C_0 为 3 188.981F, 初始内阻 ESR_0 为 0.197m Ω 。

将图 11a 所示的电流波形输入 Arbin 测试仪中, 在 $90^\circ C$ 恒温箱中对 SC 进行循环充放电测试, 经过



(a) 电流

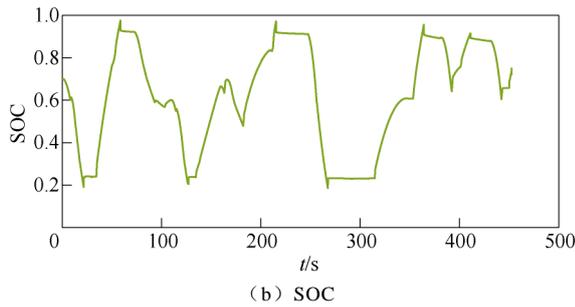


图 11 仿真电流、SOC 曲线

Fig.11 Simulation curves of current and SOC

522 次循环后, 得到的容量变化数据如图 12 所示, 容值衰减为初始值的 90.18%, 在第 330 个循环后, 容量有再生现象, 但整体变化呈下降趋势。搭建如图 1 所示 SOH 估算仿真模型, 将图 11a 所示的电流波形输入至仿真模型, 每个循环周期实时反馈更新模型中的容值 C 和内阻 ESR , 经过 522 次循环得到的仿真和实验的对比结果如图 12 所示。

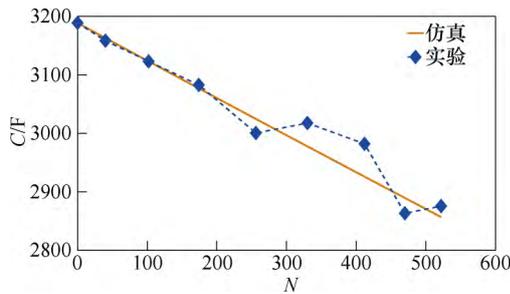


图 12 90°C 下容量的变化趋势

Fig.12 The variation trend of capacity C at 90°C

由实验与仿真的对比结果可以看出容量 C 的变化趋势一致, 其误差分析见表 6, 最大误差为 1.89%, 验证了本文提出的超级电容健康状态估算模型在城轨交通应用中的有效性。由于高温循环寿命测试加速了超级电容的老化, 使得参数反馈的效果不明显。在实验测试期间容量近似呈线性衰减, 但在城市轨道交通实际应用中, 超级电容的工作温度较低, 老化速度较慢, 随着其老化程度的加深, 寿命衰减呈现为非线性, 通过实时反馈修正模型的参数, 可以使健康状态估算结果更准确。

表 6 实验结果和仿真结果之间的误差

Tab.6 Errors between experiment and simulation results

循环次数	相对误差(%)	循环次数	相对误差(%)
0	0.000	330	1.32
40	0.136	412	1.89
102	0.001	470	0.922
174	0.226	522	0.661
256	0.805	—	—

3 结论

本文在考虑电压、电流和温度的前提下, 建立了一种适用于城轨交通应用的超级电容的健康状态估算模型。利用 Arbin 测试仪对超级电容单体进行恒电流循环充放电测试和 80°C 高温加速寿命测试, 基于测试结果对单体等效电路模型、热模型和寿命估算模型的参数进行了辨识, 并建立了实时参数反馈的健康状态估算仿真模型。最后进行了 90°C 高温加速寿命测试, 容量在 522 个充放电循环后下降为初始值的 90.18%。对比实验和仿真结果, 估算误差在 2% 以内, 验证了本文所提出模型的准确性和适用性。

另外, 本文对超级电容健康状态的研究依据高温测试下一定范围内的实验数据, 未涵盖其整个生命周期。在实际应用过程中, 随着容量的进一步衰减, 超级电容的寿命衰减演化为非线性的情况需要考虑。在后续更深入的研究中, 还需要准确辨识内阻 ESR 的值并考虑加入冷却系统后对超级电容寿命的影响。

参考文献

- [1] 赵亚杰, 夏欢, 王俊兴, 等. 基于动态阈值调节的城轨交通超级电容储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 427-433.
Zhao Yajie, Xia Huan, Wang Junxing, et al. Control strategy of ultracapacitor storage system in urban mass transit system based on dynamic voltage threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 427-433.
- [2] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于列车运行状态的城轨超级电容储能装置控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 16-23.
Xia Huan, Yang Zhongping, Yang Zhihong, et al. Control strategy of supercapacitor energy storage system for urban rail transit based on operating status of trains[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 16-23.
- [3] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容器老化特征与寿命测试研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 145-153.
Gu Shuai, Wei Li, Zhang Yicheng, et al. Prospects of ageing characteristic and life test research on supercapacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,

- 33(21): 145-153.
- [4] 石建, 周腊吾, 葛召炎, 等. 大风电机组变桨用超级电容模组健康状态在线监测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 108-113.
Shi Jian, Zhou Lawu, Ge Zhaoyan, et al. Online monitoring method of health state of ultracapacitor for wind turbine pitching[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 108-113.
- [5] 赵洋, 孙家南, 姜鸣. 基于改进最小二乘法的超级电容器特征参数辨识[J]. 高压电器, 2016(5): 199-204.
Zhao Yang, Sun Jianan, Jiang Ming. Characteristic parameters identification of supercapacitor based on improved least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2016(5): 199-204.
- [6] 赵洋, 姜鸣, 刘学良. 超级电容器等效电路模型参数辨识算法比较研究[J]. 电气应用, 2015, 34(15): 80-84.
Zhao Yang, Jiang Ming, Liu Xueliang. Comparative study on parameter identification algorithms for supercapacitor equivalent circuit model[J]. Electro-technical Application, 2015, 34(15): 80-84.
- [7] 赵洋, 梁海泉, 张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 188-195.
Zhao Yang, Liang Haiquan, Zhang Yicheng. Review and expectation of modeling research on electro-chemical supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 188-195.
- [8] Eddahech A, Ayadi M, Briat O, et al. Online parameter identification for real-time supercapacitor performance estimation in automotive applications[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 51(10): 162-167.
- [9] 郭瑞, 刘敬力, 李宝华. RLS 算法在碳基超级电容器参数辨识中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2014(12): 1660-1664.
Guo Rui, Liu Jingli, Li Baohua. Application of RLS algorithm to parameter identification of Carbon-supercapacitor[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014(12): 1660-1664.
- [10] 梁海泉, 谢维达, 孙家南, 等. 超级电容器时变等效电路模型参数辨识与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 949-954.
Liang Haiquan, Xie Weida, Sun Jianan, et al. Parameter identification and simulation of time varying equivalent circuit model of supercapacitor[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 949-954.
- [11] 陈涵, 刘会金, 李大路, 等. 可变遗忘因子递推最小二乘法对时变参数测量[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1474-1477.
Chen Han, Liu Huijin, Li Dalu, et al. Time-varying parameters measurement by least square method with variable forgetting factors[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1474-1477.
- [12] 韩志坚, 吴光敏, 张文斌, 等. 超级电容模型参数辨识方法的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 50-54.
Han Zhijian, Wu Guangmin, Zhang Wenbin, et al. Study on parameters identification method for super capacitor model[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(18): 50-54.
- [13] Mejdoubi A E, Chaoui H, Gualous H, et al. Online parameter identification for supercapacitor state-of-health diagnosis for vehicular applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9355-9363.
- [14] Soualhi A, Sari A, Razik H, et al. Supercapacitors ageing prediction by neural networks[C]//IECON 2013-Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2014: 6812-6818.
- [15] John M M. 超级电容器的应用[M]. 韩晓娟, 李建林, 田春光, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [16] Gualous H, Louahlia H, Gallay R. Supercapacitor characterization and thermal modelling with reversible and irreversible heat effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3402-3409.
- [17] Williard N, Baek D, Park J W, et al. A life model for supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2015, 15(4): 519-528.
- [18] Uno M, Tanaka K. Accelerated charge-discharge cycling test and cycle life prediction model for supercapacitors in alternative battery applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4704-4712.
- [19] Bohlen O, Kowal J, Sauer D U. Ageing behaviour of

- electrochemical double layer capacitors: part I. experimental study and ageing model[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(1): 468-475.
- [20] Bohlen O, Kowal J, Sauer D U. Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors: part II. lifetime simulation model for dynamic applications[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 173(1): 626-632.
- [21] Kreczanik P, Venet P, Hijazi A, et al. Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and RMS current[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 61(9): 4895-4902.
- [22] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(17): 84-94.
Cai Guowei, Chen Chong, Kong Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(17): 84-94.
- [23] 毕恺韬, 安群涛, 段建东, 等. 基于级联多电平直流变换器的超级电容储能系统能量自均衡控制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(8): 1919-1928.
Bi Kaitao, An Quntao, Duan Jiandong, et al. Self-balancing control strategy for super capacitor energy storage system based on cascaded multilevel DC-DC converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(8): 1919-1928.
- [24] 王野, 姜万东, 叶佳虹, 等. 一种新型超级电容模组充电电源设计[J]. *电气技术*, 2017, 18(5): 109-112.
Wang Ye, Jiang Wandong, Ye Jiahong, et al. Design a new super capacitor module for charging power[J]. *Electrical Engineering*, 2017, 18(5): 109-112.
- [25] Mesbahi T, Rizoug N, Bartholomeus P, et al. Improved model of battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on thermo-electrical and aging behaviors[C]//IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Manchester, UK, 2014: 1-8.
- [26] 李轩, 李永丽, 常晓勇. 基于精确线性化理论的超级电容储能系统的非线性控制算法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(21): 12-20.
Li Xuan, Li Yongli, Chang Xiaoyong. Nonlinear control algorithm for super capacitor energy storage system based on exact linearization theory[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(21): 12-20.

作者简介

信月女, 1997年生, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通地面式超级电容储能系统和超级电容单体特性。

E-mail: 17121512@bjtu.edu.cn (通信作者)

杨中平 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动、节能、高速列车系统优化设计等。

E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn

(编辑 赫 蕾)