

采用非线性最小二乘法的超级电容 等效电路模型参数辨识

王知雨, 王斌, 王朝晖

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车混合储能系统中超级电容在传统模型参数辨识中误差较大、不利于估计其工作状态和进行系统能量管理的问题,提出了一种采用非线性最小二乘法的等效电路模型参数辨识方法。为了精确表征超级电容内部电荷再分配过程及其端电压特性,减小模型误差,该方法首先在超级电容三支等效电路模型的基础上,分析超级电容充、放电过程中内部的电荷再分配过程;然后,利用粒子群算法分段辨识得到模型参数初值;最后,在所得模型参数初值的基础上采用基于信赖域的非线性最小二乘法对模型参数进行优化。采用超级电容进行多组恒流充、放电实验,结果表明,在不同充、放电条件下,模型计算的端电压与对应实验测试端电压的平均绝对百分误差均在0.5%以内,由此验证了基于非线性最小二乘法参数辨识的有效性和准确性。

关键词: 超级电容;等效电路模型;非线性最小二乘法;参数辨识

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004002 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0010-09



OSID 码

A Parameter Identification Method for an Equivalent Circuit Model of Supercapacitor Using Nonlinear Least Squares

WANG Zhiyu, WANG Bin, WANG Chaohui

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A parameter identification method for supercapacitor equivalent circuit model using nonlinear least squares is designed to solve the problem that the model error of supercapacitors in hybrid energy storage system of electric vehicle is large and affects the state estimation of supercapacitors and system energy management. In order to actually characterize the process of charge redistribution inside the supercapacitor and its terminal voltage performance and to reduce the model error, a nonlinear parameter identification method is proposed. Firstly, based on a three branch equivalent circuit model, the initial parameters of the model are obtained by analyzing the internal charge redistribution process of the supercapacitor in the charge/discharge process. Then, initial values of model parameters are obtained by using a particle swarm optimization method accordingly. Finally, the nonlinear least-squares method with a trust region technique is employed to optimize the model parameters. The effectiveness and accuracy of the proposed parameter identification method based on the nonlinear least-squares method are verified by multiple constant current charge/discharge experiments for the supercapacitor. Results show that the average percentage errors between the terminal voltage calculated by the simulation

收稿日期: 2019-11-16。 作者简介: 王知雨(1996—),男,硕士生;王斌(通信作者),男,助理研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51907160);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JQ5126)。

网络出版时间: 2020-01-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200111.1777.002.html>

model and the corresponding measured terminal voltage are within 0.5% under different charge/discharge conditions.

Keywords: supercapacitors; equivalent circuit model; nonlinear least squares; parameter identification

随着新能源技术的发展,超级电容被越来越多地应用于电动汽车混合储能系统中。超级电容器作为一种高性能、低碳排放的新型储能装置,具有容量大、功率密度高、充、放电循环寿命长、工作温度性能好且可靠性高等优点^[1-2]。尤其是,将超级电容与蓄电池或燃料电池等高能量密度存储器件配合使用构成混合储能系统,能够充分利用两种不同储能元件的优点,展现出良好的应用前景^[3]。在电动汽车中,超级电容与锂电池组成的混合储能系统更加适用于电动汽车的多样化工作模式需求^[4]。此外,超级电容应用于无线传感器网络能有效延长传感器节点的寿命^[5];超级电容在不间断电源中和锂电池相结合可弥补间歇性供电缺陷,还可以用于充电站储能系统、风力发电等诸多领域^[6-7]。

为了提高电动汽车运行效率,控制并掌握超级电容在混合储能系统中的储能情况尤为重要。然而,超级电容的终端电压受内部残留电荷及自放电效应的影响,其内阻状态和能量状态会随时变化^[8],因此有必要建立反映超级电容工作特性的模型并对其参数进行精确辨识,以实现超级电容工作状态的准确估计,这对于包含超级电容的电动汽车混合储能系统能量状态估计、自适应控制及储能优化配置等研究具有重要意义^[9]。超级电容三分支等效电路模型能有效反映充、放电过程中内部的等效容量和内阻变化、电荷再分配现象和自放电行为,受到了广泛的关注和研究^[10]。但是,由于三分支等效电路模型具有较多的模型参数,所用传统分阶段参数辨识方法的辨识结果不精确,导致对应的模型估计电压会与实际电压产生一定偏差。

目前,超级电容等效电路模型参数辨识方法有传统的分阶段参数辨识方法、递推最小二乘法、粒子群算法、人工神经网络辨识方法、卡尔曼滤波算法等^[11-15]。分阶段参数辨识方法相对简单,并被广泛应用,但模型精度较低^[11-12];递推最小二乘法的参数辨识方法需要根据之前的结果进行递推,如果初值不可靠,将导致不可逆的累积偏差^[13];粒子群算法需对模型参数反复辨识并对其结果进行分析,并且计算结果将受初始粒子的影响^[14];人工神经网络用于等效电路模型参数辨识需要对大量实验数据样本

进行多次训练以达到最优解;卡尔曼滤波算法虽然可实现模型参数的精确在线辨识,但其往往仅适用于模型参数较少的动态模型^[15]。

为了反映超级电容内部非线性的电荷再分配过程,提高超级电容等效电路模型的精度,本文针对超级电容三分支等效电路模型,在初步确定模型参数初值后,采用基于信赖域非线性最小二乘法对模型参数进行优化,并对超级电容进行多组恒流充、放电实验,通过对模型计算的端电压与对应实验测试的端电压平均百分误差的分析,验证了采用信赖域非线性最小二乘法对超级电容三分支等效电路模型参数辨识的有效性和准确性。

1 超级电容三分支等效电路模型

超级电容的三分支等效电路模型已被证明能够描述超级电容器充、放电过程中的等效容量和内阻变化、电荷再分配和自放电等非线性行为^[16]。在三分支等效电路模型结构中,瞬时、短期和长期分支分别包含能反映不同充、放电时间常数的级联 RC 元件,另外,在最末端并联一个自放电电阻来模拟自放电效应。

根据超级电容的储能机理,3个分支的 RC 元件分别表征了超级电容内部多孔碳电极的大孔、中孔和微孔结构,不同孔径的碳电极储存电荷的能力不同,体现在位于极孔表面大孔隙的时间常数远小于位于较深处的中孔和微孔的时间常数^[17]。具有最小时间常数的大孔分支在充、放电过程中最快地聚集和释放电荷,而在静置过程中,大孔、中孔和微孔分支由于电荷量的差异而进行电荷再分配过程,进而在宏观表现为超级电容端电压的下降。自放电电阻用来表征超级电容内部的漏电流造成的长期自放电现象^[18]。综上所述,三分支超级电容等效电路模型从超级电容内部储能机理出发,能有效描述超级电容的电化学工作特性、内部电荷再分配及长期自放电现象。

1.1 等效电路模型

超级电容三分支等效电路模型如图1所示,其中第一个分支为瞬时分支,由电阻 R_1 和一个非线性电容 C_1 组成,且非线性电容 C_1 满足

$$C_1 = C_0 + C_v = C_0 + k_v U_1 \quad (1)$$

式中: C_0 为恒定电容; $C_v = k_v U_1$ 为可变电容; U_1 为非线性电容端电压; k_v 为比例系数。

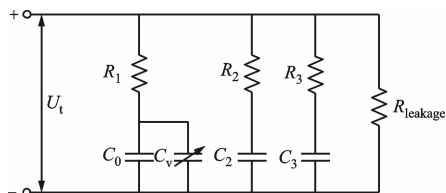
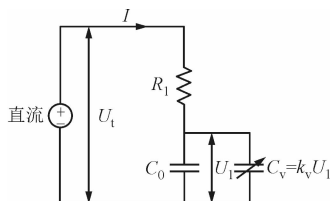


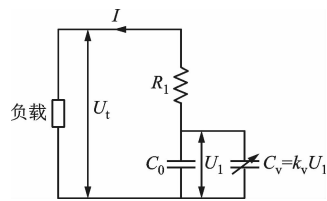
图1 超级电容三支等效电路模型示意图

等效电路模型的第2个分支和第3个分支分别为短期分支和长期分支,对应的时间常数 τ_2 分别为 $R_2 C_2$ 和 $R_3 C_3$ 。 $R_{leakage}$ 作为自放电分支并联于模型分支最末端。

在充电阶段,瞬时分支因具有最小的时间常数而率先存储电荷,即充电过程中电荷几乎全部储存于瞬时分支,对应的等效电路如图2a所示;同理,在放电阶段,假设放电过程中电荷率先从瞬时分支释放,对应的等效电路如图2b所示。



(a) 充电过程等效电路图



(b) 放电过程等效电路图

图2 超级电容充、放电过程等效电路示意图

电阻 R_1 根据初始端电压 U_t 的变化量 ΔU_t 及充、放电电流大小 I 的比值来确定

$$R_1 = \Delta U_t / I \quad (2)$$

在此过程中,非线性电容 C_1 、电荷量 Q 及自身端电压 U_1 满足

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_1 U_1)}{dt} = (C_0 + k_v U_1) \frac{dU_1}{dt} \quad (3)$$

式中: $U_1 = U_t - IR_1$ 。

在实验条件下,充、放电电流 I 往往被设定为恒定值,因此,可以推导出在恒流充、放电阶段,等效电路中非线性电容端电压 U_1 与时间 t 的关系,即

$$t = \frac{C_0}{I} U_1 + \frac{k_v}{2I} U_1^2 \quad (4)$$

当超级电容充电结束时,由于其内部电荷分布的不均衡将导致电荷再分配现象,对应的端电压将下降,在等效电路中体现为瞬时分支将电荷向短期与长期分支转移,在足够长的静置时间后其内部电荷达到平衡状态,随后超级电容端电压将趋于稳定,充电-静置过程中超级电容等效电路如图3所示。

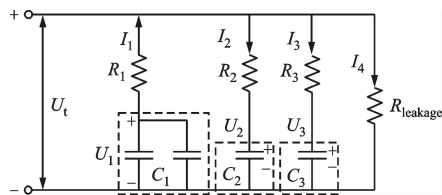


图3 充电后静置过程模型等效电路

基于基尔霍夫电流定律和电压定律可以得到

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} U_t &= U_1 - I_1 R_1 \\ U_2 &= U_t - I_2 R_2 \\ U_3 &= U_t - I_3 R_3 \\ U_t &= I_4 R_{leakage} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当超级电容放电结束时,放电-静置过程中超级电容等效电路如图4。通过基尔霍夫电流和电压定律可以得到

$$I_1 = I_2 + I_3 - I_4 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} U_t &= U_1 + I_1 R_1 \\ U_2 &= U_t + I_2 R_2 \\ U_3 &= U_t + I_3 R_3 \\ U_t &= I_4 R_{leakage} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

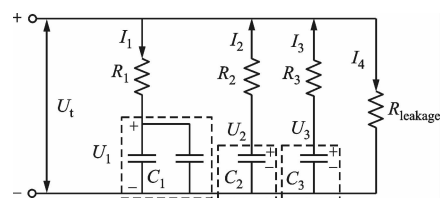


图4 放电后静置过程模型等效电路

1.2 分阶段模型参数辨识

在充、放电阶段,通过实验采样得到超级电容端电压 U_t 和充、放电电流 I 。然后,根据式(3)计算出电阻 R_1 的值进而得到 U_1 ,并分阶段作出 U_1 与对应充、放电时间 t 的关系曲线。根据式(4),采用曲线拟合方法得到第一分支恒定电容 C_0 与 k_v 的值。在确定模型第一分支的参数之后,再根据充电-静置与放电-静置2个阶段的超级电容端电压 U_t ,分阶段进行剩余模型参数辨识。

在充电-静置阶段,以 $T = \Delta t$ 的采样周期进行

数据点的采集,那么在每个采样时刻 $t=k\Delta t$, 3 个分支相应的支路电流及电容电压按式(9)~(14)计算

$$I_1(k) = \frac{1}{G} \left(\frac{U_1(k) - U_2(k)}{R_2} + \frac{U_1(k) - U_3(k)}{R_3} + \frac{U_1(k)}{R_4} \right) \quad (9)$$

$$I_2(k) = (U_1(k) - U_2(k) - I_1(k)R_1)/R_2 \quad (10)$$

$$I_3(k) = (U_1(k) - U_3(k) - I_1(k)R_1)/R_3 \quad (11)$$

$$U_1(k+1) = (-C_0 + \Psi)/k_v \quad (12)$$

$$U_2(k+1) = I_2(k)/C_2 + U_2(k) \quad (13)$$

$$U_3(k+1) = I_3(k)/C_3 + U_3(k) \quad (14)$$

式中

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_{\text{leakage}}} + \frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1}{R_2} \quad (15)$$

$$\Psi = \sqrt{C_0^2 - 4k_v(I_1(k)\Delta t - C_0U_1(k) - \frac{1}{2}k_vU_1(k)^2)} \quad (16)$$

在充电-静置阶段,等效电路模型的端电压 U_t 的迭代计算如下

$$U_t(k+1) = U_1(k+1) - I_1(k)R_1 \quad (17)$$

同样地,在放电-静置阶段以 $T=\Delta t$ 采样周期进行数据点的采集,3 个分支相应的支路电流及电容电压可以按式(18)~(23)计算

$$I_1(k) = \frac{1}{G} \left(\frac{U_1(k) - U_2(k)}{R_2} + \frac{U_1(k) - U_3(k)}{R_3} + \frac{U_1(k)}{R_4} \right) \quad (18)$$

$$I_2(k) = (U_2(k) - U_1(k) - I_1(k)R_1)/R_2 \quad (19)$$

$$I_3(k) = (U_3(k) - U_1(k) - I_1(k)R_1)/R_3 \quad (20)$$

$$U_1(k+1) = (-C_0 + \Psi)/k_v \quad (21)$$

$$U_2(k+1) = U_2(k) - I_2(k)/C_2 \quad (22)$$

$$U_3(k+1) = U_3(k) - I_3(k)/C_3 \quad (23)$$

在放电-静置阶段,等效电路模型的端电压 U_t 的迭代计算如下

$$U_t(k+1) = U_1(k+1) + I_1(k)R_1 \quad (24)$$

式(17)和式(24)基于三支等效电路模型,分别描述了超级电容在充电结束与放电结束后静置过程中内部发生的电荷再分配现象。可以看出,各分支电容电压在静置过程的初值会极大地影响迭代的过程。假设充电-静置过程中由于瞬时分支具有最小的时间常数而储存了过程中所有的电荷,有 $U_1(0) = U_{t,\max}$, $U_2(0) = 0$, $U_3(0) = 0$, 其中 $U_{t,\max}$ 表示充电后超级电容最大端电压值。相应地,假设放电-静置过程中瞬时分支率先释放电荷,有 $U_1(0) = 0$, $U_2(0) =$

$U_{t,\min}$, $U_3(0) = U_{t,\min}$, $U_{t,\min}$ 表示放电后超级电容最小端电压值。

根据式(9)~(24),得到了充电-静置与放电-静置阶段的等效电路模型参数辨识方法,并给出了基于所作假设的模型初值条件。接下来将根据迭代方程及初始条件对模型参数进行初步辨识。

2 模型参数的初步辨识

本文实验所用 Maxwell BCAP0350 超级电容器的规格参数如表 1 所示。在常温条件下,超级电容以恒定电流值为条件进行充电-静置与放电-静置实验,充电截止条件为额定电压 2.5 V,放电截止条件为超级电容充电前的初始端电压 0.3 V。图 5 为所搭建的超级电容检测实验平台,实验采样周期为 1 s。过大的采样周期不能反映实验过程,而且还会对模型参数辨识结果产生不利影响,但缩短采样周期,又会造成数据过多,导致计算量增加。此外,本文实验过程中常温条件下的超级电容温度变化迟缓,不会显著影响超级电容模型内部参数。

表 1 BCAP0350 超级电容器规格参数表

参数	数值
额定容量/F	350
最大等效串联电阻/mΩ	3.2
额定电压/V	2.5
最大工作电压/V	2.85
最大漏电流(25℃)/mA	0.3

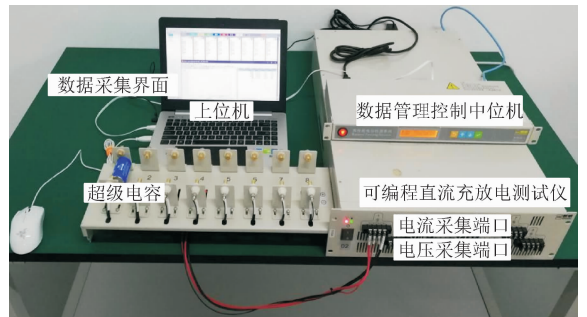


图 5 超级电容检测实验平台

在 Matlab/Simulink 环境下建立了超级电容三支等效电路模型,如图 6 所示。模型内各分支电阻及电容元件的参数均为固定参数,模型参数值在每次完整的充、放电实验后更新。根据三支等效电路模型充、放电及其静置过程中,对应的内部电荷再分配过程,首先对超级电容进行 2 A 的恒流充、放电实验,根据式(4)对充、放电过程中的电压变化曲线进行拟合,分别得到充、放电过程中 C_0 和 k_v 的

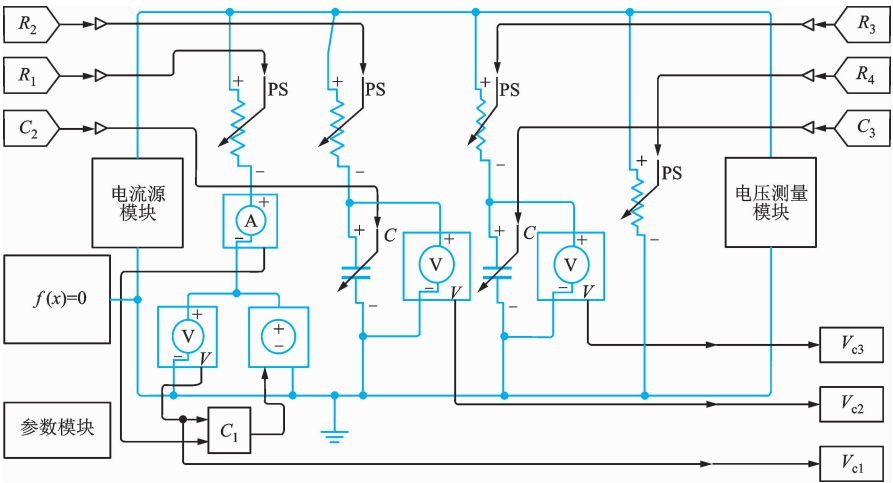


图 6 Matlab/Simulink 三支等效电路模型图

值,同时利用式(2)计算 R_1 的值,具体计算结果如表 2 所示。

表 2 2 A 恒流充、放电阶段参数表

充、放电过程	C_0/F	$k_v/(\text{F} \cdot \text{V}^{-1})$	$R_1/\text{m}\Omega$
2 A 恒流充电	269.21	71.68	2.2
2 A 恒流放电	256.95	51.88	6.2

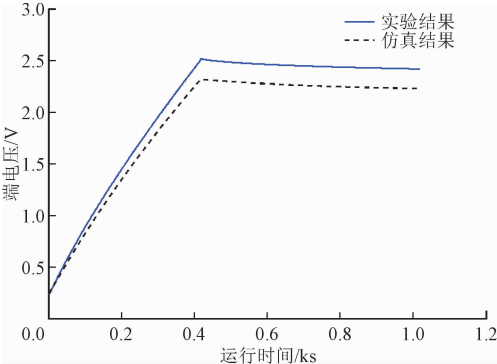
根据式(9)~(14)及式(18)~(23),利用粒子群算法分别对充电后的静置阶段及放电后的静置阶段进行模型参数的初步估计。基于三支等效电路模型以及对应静置阶段各分支电容电压,得到相应的参数辨识结果,具体参数如表 3 所示。

表 3 2 A 恒流充、放电后的静置阶段参数表

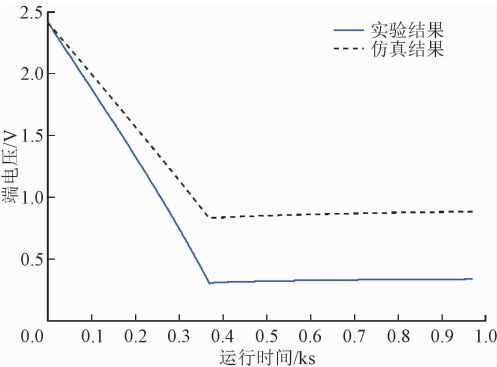
过程	R_2/Ω	C_2/F	R_3/Ω	C_3/F	$R_{\text{leakage}}/\Omega$
2 A 充电	0.432 7	20.363 3	11.178 5	40.117 0	74 397
2 A 放电	0.002 8	94.788 2	13.112 0	32.584 5	18 252

在 2 A 恒流充、放电的实验条件下,基于分阶段辨识方法的仿真结果与实验曲线对比如图 7 所示。

由图 7 可以看出充电-静置阶段与放电-静置阶段仿真曲线与实验曲线的误差较大,这是由于:①充电过程中电荷几乎全部储存于瞬时分支的假设;②充、放电结束时刻,对三支等效电路模型中各电容电压进行了假设以得到迭代初始条件。通过模型计算结果可以看出,三支模型中各分支在充、放电过程中均参与了电荷的分配过程,虽然充、放电结束后的静置阶段仿真曲线与实验曲线的趋势具有较强的一致性,但由于不能确定静置阶段模型各分支电压的初始值,模型的计算结果将大幅偏离实验曲线。综上所述,基于分阶段辨识方法的模型参数辨识精度取决于充、放电过程中各阶段关键点的选取因而



(a)恒流充电-静置阶段



(b)恒流放电-静置阶段

图 7 初步参数辨识后所得端电压仿真结果与实验结果对比

具有较大误差,因此,需要进一步对模型参数进行优化估计以得到准确的模型计算结果。

3 模型参数辨识优化

参数辨识方法通常分为离线辨识方法和在线辨识方法,离线参数辨识是将一次实验全部的测量数据作为系统的输入量和输出量去识别模型的参数;在线参数估计是将实时测量数据应用于递推过程,

进行参数的自适应修正^[19]。离线参数辨识技术被当作一个优化问题来解决,其模型参数的最优值是通过最小化目标函数来获得的,而目标函数通常选择实验数据和仿真结果之间的均方根误差作为其自身的收敛准则。本文基于信赖域的非线性最小二乘法对模型参数进行迭代优化,将实现三支等效电路模型参数离线辨识。

基于信赖域的非线性最小二乘法,利用二次型函数 $q(s)$ 作为目标函数 $f(x)$ 在当前迭代点 x 邻近域 N 内的近似函数,并以此来逼近目标函数 $f(x)$,通过最小化邻近域 N 来计算搜索步长 s ,使得迭代点在 $x+s$ 处具有局部最小值,从而实现全局收敛特性,其基本形式如下

$$\left. \begin{aligned} \min_s \{q_k(s) : \|D_k s\|_2 \leq \Delta_k\} \\ q_k(s) = \frac{1}{2} s^T H_k s + s^T g_k \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: g_k 为 $f(x)$ 在第 k 次迭代点 x 处的梯度向量; H_k 为 Hessian 矩阵,是 $f(x)$ 二阶导数的对称矩阵; D_k 是对角标度矩阵; $\Delta_k > 0$ 表征信赖域尺度, s 为搜索步长。

如果 $f(x+s) < f(x)$,则当前点 x 将更新为 $x+s$,此次搜索步骤被视为成功,信任区域将保留到下一步;否则,搜索步骤不成功,则 x 保持不变,并且区域 N 将在下一步减小。综上所述,根据 Richard 等人的研究^[20]可总结出基于信赖域的最小二乘法迭代基本流程如图 8 所示。

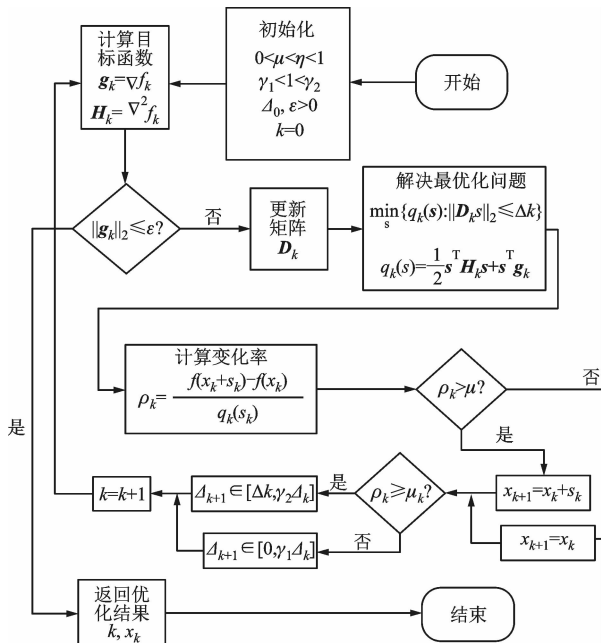


图 8 基于信赖域的最小二乘法迭代流程

本文基于信赖域的非线性最小二乘算法,以仿真结果和实验结果的误差向量平方和作为目标函数进行参数估计,其具体的误差收敛准则如下

$$J(\theta) = \min_{\theta} \|f(\theta)\|_2^2 \quad (26)$$

式中: θ 表示待辨识参数; $f(\theta)$ 为包含模型待辨识参数的误差量, $f(\theta) = U_e(k) - U_i(k)$, $U_e(k)$ 表示第 k 次实验采样得到的端电压数据。整个参数优化过程的具体实施步骤如下。

(1) 在 Matlab/Simulink 中建立三支等效电路模型(见图 6),并将恒流充、放电数据及实验对得到的超级电容端电压数据导入。首先对充电-静置过程进行参数优化。

(2) 使用 Simulink/Parameter Estimation Tool 建立一个新的参数优化实验,将模型端电压作为待验证的输出信号。

(3) 确定模型初始状态并代入模型初始参数值。

(4) 设定待辨识参数并设置其上下限,确定参数优化的目标函数及终止条件。

(5) 运行参数优化算例后,更新模型参数并仿真验证参数优化的有效性。

(6) 将参数优化后,模型仿真得到的充电-静置过程的末状态作为放电-静置过程的初始状态,并重复步骤 2~5,完成放电-静置过程的参数优化。

(7) 将充电-静置及放电-静置过程参数优化后的模型参数代入模型,验证模型的计算结果是否与实验结果一致。

由于基于信赖域的非线性最小二乘算法对于参数初值的选取具有较强的依赖性,整个参数优化过程得到的是目标函数在误差限度范围内的局部最优解,而目标函数和模型参数的迭代步长并不同时收敛到所设误差范围内,当模型参数的迭代步长率先收敛于误差范围而终止迭代时,将导致目标函数无法达到最优解。因此,合理地选取模型参数初值对于算法最终结果的准确性至关重要。

为了证明模型参数初值选择的必要性,本文针对 2 A 恒流充、放电实验,分别基于粒子群优化算法确定初值和基于随机参数确定初值,然后将两种方法得到的模型计算结果进行对比,如图 9 所示。

在整个充、放电过程中,仿真计算随机选择参数优化初值的端电压的平均绝对百分误差(MAPE, E_{MAPE})为 1.11%,充、放电静置阶段结束时刻模型端电压的绝对误差分别为 19 mV 和 -4 mV;而根据粒子群算法确定初值的模型计算的端电压平均绝对百分误差为 0.37%,充、放电静置阶段结束时刻模

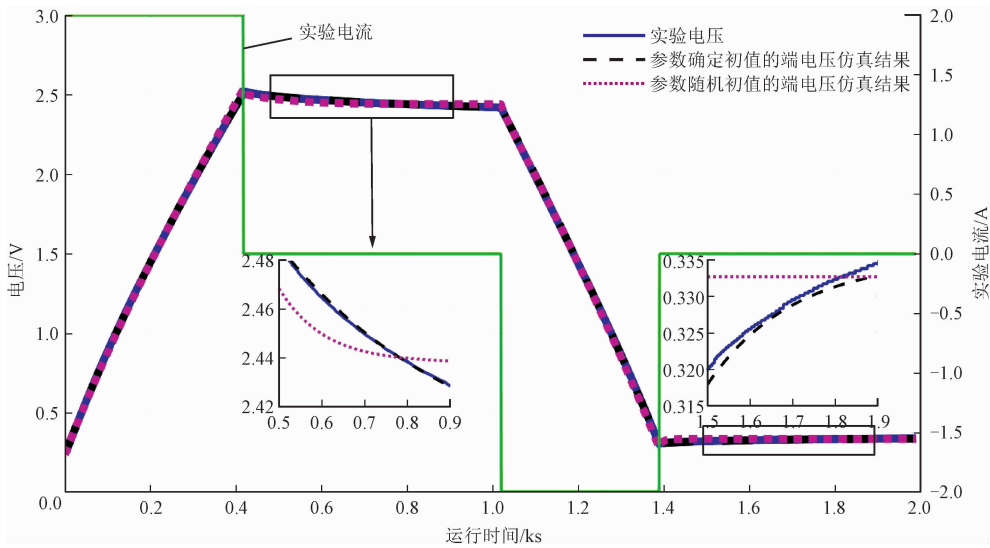


图 9 不同初值条件对应的端电压仿真与实验曲线

型端电压的绝对误差分别为 5.0 mV 和 -2.9 mV。可以看出,针对三支等效电路内部电荷再分配过程的参数初值,基于信赖域的非线性最小二乘参数优化算法具有更准确的参数辨识能力,虽然按照粒子群算法得到的模型参数初值并不能完全描述整个充、放电过程,但在电压曲线的恒流充电、充电后的静置、恒流放电和放电后的静置这 4 个阶段中准确描述了超级电容端电压曲线,为非线性最小二乘参数优化算法提供了较为准确的、符合各阶段内部电荷再分配过程的等效电路模型参数初始条件。

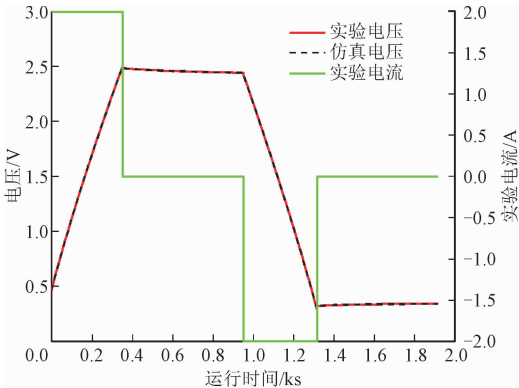
4 实验分析

为了验证得到模型参数整个过程的正确性,对超级电容进行多组恒流值的充、放电实验进行验证。每次实验利用上一次恒流充、放电的模型参数作为下一次实验参数辨识的初值,在已知 2 A 恒流充、放电实验参数的条件下,依次对 5、10、20 A 恒流充、放电实验过程进行模型参数辨识,每完成一次完整的充、放电实验后对模型参数进行更新,并依次对所得模型进行仿真和实验验证,得到的实验与仿真电压对比曲线如图 10 所示。

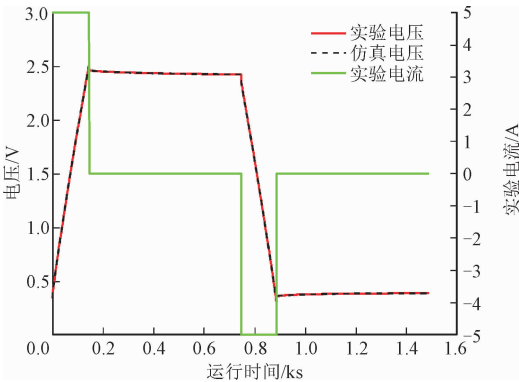
实验中,在超级电容 10 A 和 20 A 放电实验后期,由于超级电容内部电动势不足以按照所述恒流实验条件进行放电,因此放电电流逐渐减小。从模型计算结果可以看出,基于非线性最小二乘参数优化算法对超级电容进行的 2、5、10、20 A 恒流充、放电仿真计算曲线较好地跟踪了实验结果曲线,各组仿真结果在恒流充电、充电后的静置、恒流放电、放电后的静置这 4 个阶段内均能准确地与实验电压曲

线相对应,并且,不同的电压初值会对应不同的模型参数辨识结果,但模型参数辨识的精确性不会受电压初值的影响。在 4 个恒电流充、放电条件下,模型计算的端电压均准确跟踪了恒流充、放电实验后超级电容的端电压,最终得到的模型仿真曲线与实验端电压曲线的平均绝对百分误差分别为 0.37%、0.12%、0.18%、0.14%。

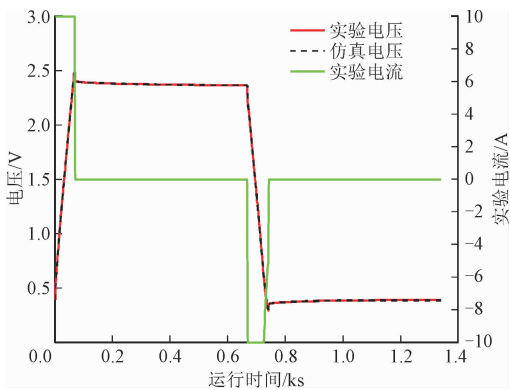
多组实验对应的模型参数辨识结果如表 4 所



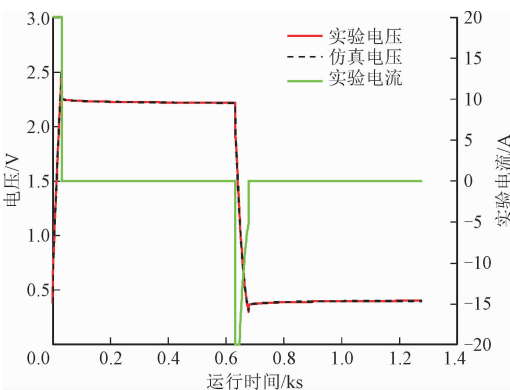
(a) 2 A 恒流充、放电



(b) 5 A 恒流充、放电



(c)10 A 恒流充、放电



(d)20 A 恒流充、放电

图 10 不同恒流充、放电条件下端电压的仿真与实验结果对比

示。由表 4 可以看出:三支等效电路模型的瞬时、短期和长期分支的级联 RC 元件反映出不同的充、

放电时间常数,并且各分支在恒流放电阶段比恒流充电阶段体现出更小的时间常数,说明超级电容充、放电的初始状态对其自身相应的充、放电过程具有影响;对比于恒流充电过程,恒流放电过程因初始电压较高而更快地进行电荷的转移,各分支表现为较小的时间常数。

综上所述,模型计算的电压曲线在整个充、放电过程中能够很好地反映超级电容的端电压特性结果,即模拟计算结果与实验测试超级电容端电压曲线匹配程度较高,模型能够较为准确地反映所用超级电容的恒流充、放电过程,验证了本文提出的基于信赖域非线性最小二乘法对超级电容等效电路模型参数辨识的准确性和普遍适用性。

5 结 论

本文利用非线性最小二乘法对超级电容三支等效电路模型参数进行辨识。首先分析了三支等效电路模型充、放电阶段的端电压非线性变化及静置阶段的电荷再分配过程,利用粒子群算法分阶段初步确定模型参数初值后,采用基于信赖域的非线性最小二乘法对模型参数进行进一步优化,其中,将粒子群算法分阶段模型参数辨识结果作为基于信赖域非线性最小二乘法的确定参数初值,通过对比确定参数初值和随机参数初值对最终模型参数辨识结果的准确性,最终得到准确表征超级电容充、放电及其静置过程中端电压非线性变化的模型参数。

表 4 各实验过程所得模型参数辨识结果

充、放电条件	实验过程	C_0/F	k_v	R_1/Ω	R_2/Ω	C_2/F	R_3/Ω	C_3/F	$R_{\text{leakage}}/\Omega$
2 A	充电-静置	265.963 0	48.112 1	0.009 7	3.808 0	5.655 6	26.446 0	14.614 7	$6.404\ 5\times10^7$
	放电-静置	213.543 3	41.705 9	0.022 3	0.026 6	67.207 8	24.676 9	6.807 9	$5.645\ 4\times10^9$
5 A	充电-静置	269.794 5	43.543 8	0.010 3	3.171 0	7.175 6	31.026 5	9.573 3	$7.237\ 0\times10^8$
	放电-静置	216.831 0	38.271 7	0.019 2	0.047 1	69.939 0	28.237 7	6.217 2	$2.630\ 7\times10^9$
10 A	充电-静置	263.425 3	46.658 0	0.013 2	1.912 5	8.842 3	31.259 4	8.239 4	$1.142\ 6\times10^9$
	放电-静置	208.733 0	36.933 1	0.017 0	0.640 0	78.443 6	14.772 5	7.586 5	$7.691\ 4\times10^9$
20 A	充电-静置	265.712 0	44.058 3	0.014 3	1.935 2	9.329 4	38.195 3	5.898 3	$9.719\ 4\times10^9$
	放电-静置	204.410 7	39.431 2	0.015 3	0.079 8	81.784 3	17.685 7	6.797 4	$8.436\ 2\times10^9$

分别设定 2、5、10、20 A 实验条件对超级电容进行恒流充、放电实验,通过对比相应的仿真模型及实验结果验证本文的参数辨识方法,结果表明,所得模型计算结果能高精度跟随实验测试结果,本文所提等效电路模型参数辨识方法,可有效提高模型精度,具有普遍的适用性。

参考文献:

[1] GONZ LEZ A, GOIKOLEA E, BARRENA J A, et al. Review on supercapacitors: technologies and materials [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1189-1206.

[2] 张乐, 续丹, 王斌, 等. 采用权值配比优化的超级电容等效电路模型参数辨识 [J]. 西安交通大学学报,

- 2018, 52(2): 96-102.
- ZHANG Le, XU Dan, WANG Bin, et al. Parameter identification of the equivalent circuit model of supercapacitor using weight distribution optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 96-102.
- [3] 张雷, 胡晓松, 王震坡. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 32-43.
- ZHANG Lei, HU Xiaosong, WANG Zhenpo. Overview of supercapacitor management techniques in electrified vehicle applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 32-43.
- [4] ZHANG L, HU X, WANG Z, et al. A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: a control/management perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1868-1878.
- [5] CHAI R, YING H, ZHANG Y. Supercapacitor charge redistribution analysis for power management of wireless sensor networks [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 169-177.
- [6] ARGYROU M C, CHRISTODOULIDES P, KALO-GIROU S A. Energy storage for electricity generation and related processes: technologies appraisal and grid scale applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 804-882.
- [7] 毛业军, 邓谊柏, 陈铁柱. 基于超级电容的分布式太阳能发电系统设计 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(3): 40-44.
- MAO Yejun, DENG Yibai, CHEN Tiezhu. Design of distributed solar power generation system based on super capacitor [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2018, 41(3): 40-44.
- [8] BERRUETA A, URS A A, MART N I S, et al. Supercapacitors: electrical characteristics, modeling, applications, and future trends [J]. IEEE Access, 2019, 7: 50869-50896.
- [9] MUZAFFAR A, AHAMED M B, DESHMUKH K, et al. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: design, fabrication and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 123-145.
- [10] XU D, ZHANG L, WANG B, et al. Modeling of supercapacitor behavior with an improved two-branch equivalent circuit [J]. IEEE Access, 2019, 7: 26379-26390.
- [11] HIDALGO-REYES J I, G MEZ-AGUILAR J F, ESCOBAR-JIMNEZ R F, et al. Classical and fractional-order modeling of equivalent electrical circuits for supercapacitors and batteries, energy management strategies for hybrid systems and methods for the state of charge estimation: a state of the art review [J]. Microelectronics Journal, 2019, 85: 109-128.
- [12] LUIS ZUBIETA R B. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 199-205.
- [13] REICHBACH N, KUPERMAN A. Recursive-least-squares-based real-time estimation of supercapacitor parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 810-812.
- [14] SAHA P, DEY S, KHANRA M. Modeling and state-of-charge estimation of supercapacitor considering leakage effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(1): 350-357.
- [15] LIU C, WANG Y, CHEN Z, et al. A variable capacitance based modeling and power capability predicting method for ultracapacitor [J]. Journal of Power Sources, 2018, 374: 121-133.
- [16] SHEN J F, HE Y J, MA Z F. A systematical evaluation of polynomial based equivalent circuit model for charge redistribution dominated self-discharge process in supercapacitors [J]. Journal of Power Sources, 2016, 303: 294-304.
- [17] KAUS M, KOWAL J, SAUER D U. Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(25): 7516-7523.
- [18] SEDLAKOVA V, SIKULA J, MAJZNER J, et al. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion [J]. Journal of Power Sources, 2015, 286: 58-65.
- [19] MONESS M, MOSTAFA A M. An algorithm for parameter estimation of twin-rotor multi-input multi-output system using trust region optimization methods [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2013, 227(5): 435-450.
- [20] BYRD R H, SCHNABEL R B, SHULTZ G A. Approximate solution of the trust region problem by minimization over two-dimensional subspaces [J]. Mathematical Programming, 1988, 40(1): 247-263.

(编辑 刘杨)