

混合动力车用超级电容能量源建模

强国斌，李忠学，陈杰

(上海交通大学机械与动力工程学院，上海200030)

摘要：阐述了超级电容的一种基于试验数据的建模方法。结合试验研究超级电容容量特性和内阻特性，全面分析了建模有影响的超级电容各种功率特性，继而得出超级电容数学模型，最后用MATLAB/Simulink做出仿真模型进行仿真示例。

超级电容是20世纪60年代发展起来的一种新型储能单元，具有功率密度大、充电时间短、使用寿命长、充放电效率高优异特性，它与二次电池联用作为电动汽车的动力系统，已被认为是今后解决电动汽车发展的最优途径之一。电动汽车上经常使用的超级电容是以活性炭为电极材料、由碳电极和电解液界面上电荷分离产生电动势的双电层电容[1](ElectricDoubleLayerCapacitors)。

把超级电容作为能量源的建模方法与电化学蓄电池很相似。电化学蓄电池模型虽然已经比较成熟，然而精确模型的建立仍然很大程度上依赖于试验。超级电容的发展上世纪60年代才起步，国内外(尤其国内)对超级电容能量源建模方法的研究甚少，在超级电容特性还没有从理论上彻底解释和量化之前，借助试验建立模型的方法既准确又方便。

本文准备在分析对建模有直接影响的超级电容特性(电容容量特性和内阻特性)的基础上，研究一种利用试验数据建立的超级电容能量源模型的方法。

1 超级电容容量特性和内阻特性

超级电容的特性参数很多，如容量特性、内阻特性、寿命特性、漏电流及自放电等，其中直接影响建模的是容量特性和内阻特性。

1.1 容量特性

超级电容本征容量的定义：

$$C = \frac{Idt}{dV}$$

对本征容量的标定常采用如下方法：

$$C = \frac{Q_{cha}}{V_{max}} = \frac{Q_{dch}}{V_{max}}$$

V_{max} 为电容充满电时的工作电压， Q_{cha} 和 Q_{dch} 分别表示完全充电和完全放电时，充入和放出的电荷量，在理想的情况下它们是相等的。

实验室通常采用恒流—恒压循环测试的方法对本征容量进行标定，即先以恒定电流 I 充电到电压上限 V_{max} ，并在此电压下继续充电一定时间(比如10s)；充电结束后转向放电，维持放电电流 I 放电至电压下限 V_{min} ，再在此电压下放电一定时间。通过这样的试验可测出充电电量 Q_{cha} 和放电电量 Q_{dch} ，取平均值 Q ，用公式 $C=Q/V_{max}$ 计算本征容量。

超级电容本征容量与充放电电流和电解液温度有关，即 $C=C(T, I)$ 。表1为MaxwellPC2500超级电容器的一组试验数据，数据来源于美国国家可再生能源实验室(NREL)。

表 1 不同工作温度和电流下的本征电容量 C/F

电流 I/A	温度 T/ °C		
	0	25	40
- 225.0	2 844.00	2 885.00	2 900.50
- 112.5	2 871.00	2 899.00	2 906.40
- 56.3	2 908.36	2 926.08	2 908.40
56.3	2 896.30	2 898.00	2 889.50
112.5	2 864.20	2 887.20	2 891.40
225.0	2 842.00	2 880.00	2 889.60

1.3内阻特性

超级电容等效内阻(Ri)主要由电极内阻、溶液内阻和接触电阻组成[2]。

在实验室中对超级电容进行恒流-恒压循环试验时会发现，在充电结束转向放电时，电容端电压会突然回落；而在放电结束转向充电时，电容端电压会突然上升。这是因为在恒压充(放)电性结束前，充(放)电电流已经很小，可以忽略等效内阻的电压降，电路端电压U0近似等于电容电压U；接下来在恒流充放电开始后，电流很大，内阻引起压降UR不能忽略，造成电压明显下降(或上升)。测出充电时的电压上升值 Vch和放电时电压下降值 Vdch，可以认为它们是内阻压降引起的，这样可以计算充电等效内阻Rch和放电等效内阻Rdch：

$$R_{ch} = \frac{\Delta V_{ch}}{I} \quad R_{dch} = \frac{\Delta V_{dch}}{I}$$

Ri也是电流I和温度T的函数。MaxwellIPC2500超级电容器的一组等效内阻试验数据(来源于NREL)如表2。

2超级电容能量源建模

在分析超级电容功率特性的基础上，建立数学模型，并用MATLAB/Simulink软件做出仿真模型对超级电容等功率充放电循环进行仿真示例。

2.1超级电容的功率特性

超级电容的等效电路图，见图1。

表 1 不同工作温度和电流下的等效内阻 $R_e/m\Omega$

电流 I/A	温度 $T/^\circ C$		
	0	25	50
-225.0	1.069 88	0.899 26	0.860 49
-112.5	1.087 41	0.905 14	0.867 65
-56.3	1.070 65	0.933 98	0.879 22
56.3	1.182 12	0.951 75	0.866 90
112.5	1.173 84	0.917 27	0.845 69
225.0	1.112 84	0.889 87	0.831 24

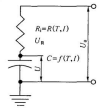


图 1 超级电容等效电路

令充电时的电流和功率 P 为正值, 放电时的电流 I 和功率 P 为正值。

$$P = U_e I = (U - IR) I$$

(1) 本征容量 C 和实际储存电量 Q

假设第 n 时刻超级电容储存的电量为 $Q(n)$, 则下一时刻, 储存的电量为 $Q(n+1)$:

$$Q(n+1) = Q(n) - Idt$$

电容本征容量 C 是温度和工作电流的函数 $C = f(T, I)$, 测定在几组特定温度和工作电流下的本征容量值(如表 1 所示), 然后利用插值查表的方式就可以方便地求出任何温度和工作电流下的本征容量值。

(2) 工作电压 U 和荷电状态 SOC

假设某时刻超级电容工作电压为 $V(n)$, 下一时刻的工作电压 $V(n+1)$, 则有:

$$V(n+1) = V(n) - I \frac{dt}{C}$$

超级电容在工程应用中要考虑到使用寿命, 因此要限制在 $V_{min} \sim V_{max}$ 的电压范围内工作。荷电状态 SOC 反映了在允许的工作电压范围内超级电容储存电量的程度(充电来源), 是设计超级电容重要的控制参数, 用以下公式定义:

$$SOC = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}$$

式中 V ——超级电容工作时的实际电压;

V_{max} ——超级电容电压上限, 即额定电压, 电容达到这个电压点停止充电;

V_{min} ——超级电容电压下限, 电容达到这个电压点, 停止放电。

(3) 等效内阻和效率

等效内阻 R_e 是温度和工作电流的函数。测定几组特定温度和工作电流下的等效内阻(如表 2), 然后利用插值查表可求出任何温度和工作电流下的内阻。内阻在充电过程中会将部分电能转化为热能造成损耗, 因此影响着超级电容充电时的效率。

参照蓄电池效率的定义方法^[1], 超级电容的效率定义为充电过程放电与充电的能量比:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\int U_d(t) I_d(t) dt}{\int U_c(t) I_c(t) dt}$$

$$\frac{\int [U_c(t) - I_c(t) R_e(t)] I_c(t) dt}{\int [U_c(t) + I_c(t) R_e(t)] I_c(t) dt}$$

相应地, 定义充电效率 η_c 和放电效率 η_d 分别为:

$$\eta_c = \frac{\int U_c(t) I_c(t) dt}{\int [U_c(t) - I_c(t) R_e(t)] I_c(t) dt}$$

$$\eta_d = \frac{\int [U_c(t) - I_c(t) R_e(t)] I_c(t) dt}{\int U_c(t) I_c(t) dt}$$

式中下标 d 表示放电, c 表示充电。

和化学蓄电池相比超级电容一个突出优势就是内阻小, 充放电效率保持在 90% 以上, 能够在大电流的情况下有效工作。

2.2 数学模型

本征容量: $C = C(T, I, t)$ (通过试验获得)

等效内阻: $R_e = R_e(T, I, t)$ (通过试验获得)

充电功率:

$$P(t) = U_c(t) \cdot I(t) - [U(t) - I(t) R_e(T, D)] I(t)$$

单体电压:

$$U(n+1) = U(n) - \frac{I(t) dt}{C(T, D)}$$

荷电状态:

$$SOC(t) = \frac{U(t) - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}$$

充电效率:

$$\eta_c = \frac{\int [U_c(t) - I_c(t) R_e(T, D)] I_c(t) dt}{\int U_c(t) I_c(t) dt}$$

放电效率:

$$\eta_d = \frac{\int U_c(t) I_c(t) dt}{\int [U_c(t) - I_c(t) R_e(T, D)] I_c(t) dt}$$

2.3 基于 MATLAB Simulink 能量源模型

根据数学模型, 以 Maxwell PC2500 超级电容的试验数据为基础, 用 MATLAB Simulink 软件建立一个超级电容能量源仿真模型对超级电容等功率充放电一个循环进行仿真。

此模型由 4 个电容组成, 两两并联后再串联。假定模型工作温度恒定在 35 $^\circ C$, 电容电压上限 2.5 V, 电压下限 1.25 V, 电容初始荷电状态值为 0.8。用 Simulink 软件做出的仿真模型如图 2 所示。当输入一个循环等功率放电-充电曲线(如图 3), 模型输出中的荷电状态变化和电流变化如图 4。

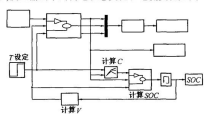


图 2 超级电容 Simulink 仿真模型

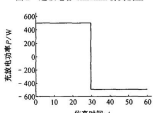


图 3 一个循环等功率放电-充电曲线

从图4可以看出，放电时荷电状态SOC值下降，充电时SOC值升高。由于内阻损耗的存在，SOC随时间的变化不是绝对线性关系，呈近似线性关系，并且最终SOC值回到近似0.77左右，相对初值0.8降低了一些；放电时电流增大，充电时电流减小，这是由于放电时SOC值降低电压降低，充电时SOC值升高电压升高，为维持400W功率，电流需相应变化，同时由于内阻损耗的缘故，电流变化呈近似线性关系。

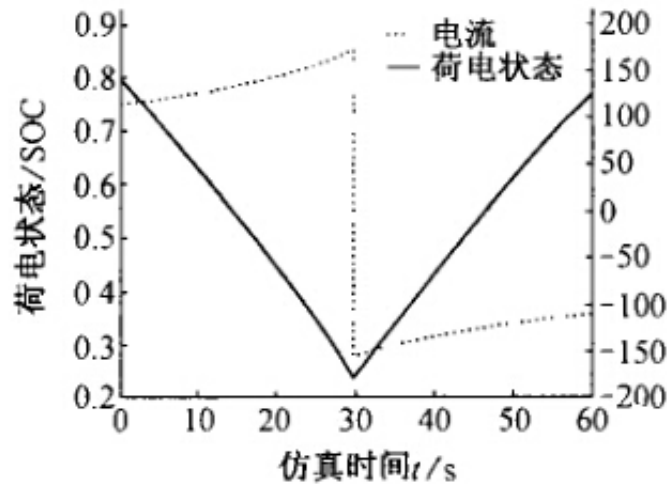


图4 荷电状态和电流变化曲线

超级电容在车辆上的应用，缺少必要的试验数据，该方法有利于超级电容的实时控制。

3结束语

工程应用中超级电容的设计关键是认识超级电容的特性以建立超级电容模型。本文从工程应用出发，结合试验，着眼于对建模有直接影响的功率特性的研究。在此基础上，研究一种借助试验获得的关键数据建立适用模型的建模方法。借助试验建立模型，既准确又方便。然而采用这种建模方法，针对不同型号的电容，建模前必须获得相关特性数据，另外文中超级电容建模没有考虑多个电容串、并联在一起时能量不均衡的影响以及寿命特性的影响，还做更多的研究工作。

参考文献：

- [1] M Endo, T Takeda, Y J Kim. High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC) s. from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Activated Carbons [J]. Carbon Science, 2001, (3&4): 117-128.
- [2] Wendy G. Pell, Brain E. Conway, William A. Adams. Electrochemical efficiency in multiple discharge/recharge cycling of supercapacitors in hybrid EV applications [J]. Journal of Power Sources, 1999, 80: 134-141.
- [3] 陈清泉, 孙逢春. 混合动力车辆基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001. 36-37.
- [4] 薛定宇, 陈阳群. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 192-325.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/95238.html>