

**NO. 273**

# 超级电容在电动汽车上的应用

目前见到的电动汽车主要是混合动力汽车，储能装置主要有蓄电池和超级电容两部分。通过DC/DC变换器等功率变换装置转换成符合要求的直流电或交流电供给负载使用，以完成整个车辆的运行。

随着科技的进步，近年来出现了一种新的元器件—超级电容。这种新型的电子器件比蓄电池高10倍以上的功率密度和100倍以上的充放电速率。利用超级电容可以迅速地吸收和释放制动再生能量。

汽车在行驶过程中有一部分能量因热量散发和制动而消耗掉，特别是在城市中行驶，经常遇到交通信号的提示，这样不仅造成能源浪费，而且增加环境污染。

如何把制动所消耗的能量回收到电池中是一个能量管理系统中的关键。由于蓄电池充电是通过化学反应来完成的，所需时间较长，但制动时间较短，因而回收能量效果不佳。

超级电容是介于蓄电池和电容器之间的一种能量存储器，它具有优良的脉冲充放电性能和大容量储能性能。超级电容是根据电化学双电层理论研制而成的。

当向电极充电时，处于理想化电极状态的电极表面电荷将吸引周围电解质溶液中的异性离子，使这些离子附于电极表面形成双电荷层，构成双电层电容。由于两电荷层的距离非常小（一般在0.5nm以下），加之采用特殊电极结构，使电极表面积成万倍地增加，从而产生极大的电容量，电容器的这种极化作用可以储存电能。



▲奥威科技 公交用超级电容系统（整车储能模组），用于上海、广州等地超级电容公交车，3-5 分钟快充，可循环几十万次



▲Maxwell（汽车 48V 轻混常用）单体与模组，沃尔沃 48V、凯迪拉克 ATS/CTS 等用的 2.85V/3000F 圆柱形超级电容及集成模组



▲单颗圆柱形超级电容（改装 / 启停常用），2.7V 高容量单体，多颗串联组成 12V/48V 系统，用于启停、电压稳定



▲多单元串联模组（家用车 48V 轻混 / 重卡），蓝色圆柱单元组成的 PCB 集成模组，体积小，适配发动机舱安装

# 1. 超级电容器的机理与特点

## 1.1 超级电容器的机理

超级电容器是一种具有超级储电能力、可提供强大脉冲功率的物理二次电源。超级电容器结构形式大致分为两种：一种是圆柱状电容器，即把基片卷绕起来装进圆形金属外壳内，这种电容器适用于低电压大电流充放电的情况；另一种是叠层式的，即将电极基片叠起来，组装在塑料或金属壳内，这种电容器用在高电压小电流充放电的情况下比较合适。

## 1.2 超级电容器的特点

(1) 很高的功率密度：超级电容器的内阻很小，且在电极液界面和电极材料本体内均能够实现电荷的快速贮存和释放，因而它的输出功率密度高达数 kW / kg，是一般蓄电池的数十倍。超级电容器和电化学电容器、充电电池和燃料电池等电池的功率密度、能量密度之间关系的曲线比较，超级电容器功率密度较高。

(2) 极长的充放电循环寿命：超级电容器在充放电过程中没有发生电化学反应，充放电寿命很长：可达500000次，或90000小时，而蓄电池的充放电寿命很难超过1 000次。当今蓄电池的充放电循环寿命只有数百次，只有超级电容器的几十分之一。

(3) 大电流：可以任意并联使用来增加电容量，如采取均压后，还可以串联使用。可以提供很高的放电电流（如2700F的超级电容器额定放电电流不低于950A，放电峰值电流可达1680A），一般蓄电池通常不能有如此高的放电电流一些高放电电流的蓄电池在如此高的放电电流下的使用寿命将大大缩短。

(4) 贮存寿命极长：超级电容器充电之后贮存过程中，虽然也有微小的漏电流存在，但这种发生在电容器内部的离子或质子迁移运动乃是在电场的作用下产生的，并没有出现化学或电化学反应，没有产生新的物质，而且，所用的电极材料在相应的电解液中也是稳定的，故理论上超级电容器的贮存寿命几乎可以认为是无限的。

(5) 高可靠性：超级电容器工作过程中没有运动部件，维护工作极少，因而超级电容器的可靠性是非常高的。

(6) 比能量低：比能量低是目前超级电容器的显著缺陷，并在一定程度上限制了电动汽车的续驶里程。

(7) 非常短的充电时间：可以数十秒到数分钟内快速充电。

从目前已经做出的超级电容器充电试验结果来看，全充电时间只要 10 ~ 12min；蓄电池在这么短的时间内是无法实现全充电的。

(8) 安全系数高：超级电容器用的材料是安全的和无毒的，而铅酸蓄电池、镍镉蓄电池均具有毒性。

(9) 电容量大：超级电容器采用活性炭粉与活性炭纤维作为可极化电极，与电解液接触的面积大大增加，根据电容量的计算公式，那么两极板的

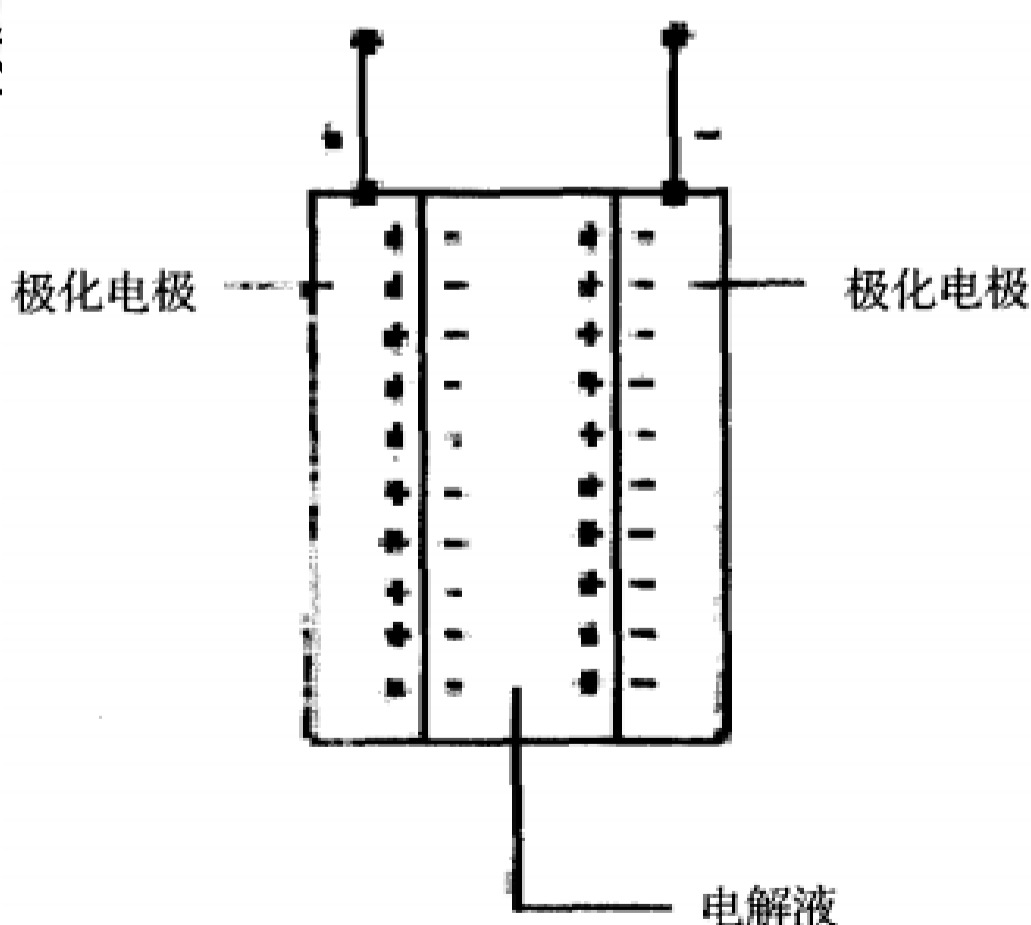


图 1 超级电容器工作机理

## 2. 超级电容主要参数及充放电时间常数的确定

### 2.1 超级电容主要参数

- (1) 工作电压：电容器能够连续长期保持的最大电压。
- (2) 电流：对电容器进行充电后，为使电容器在某一电压处于稳定状态而从外部施加的一个电流。
- (3) 时间常数：如果一个超大容量电容器能够模拟为一个电容和一个电阻的简单串联组合，则该电容和电阻的乘积便为时间常数，其单位为 S，相当于将电容器恒压充电至满容量的 63.2% 时所需的时间。
- (4) 等效串联：电阻当一个电容器被模拟为包括电感、电容、电阻的等效模拟电路时，其中的电阻部分即为等效串联电阻。等效串联电阻可以利用交流阻抗技术或电流阶跃技术测试得到。
- (5) 放电容量：电容器在放电过程中可以放出的全部容量，具体计算方法是将放电过程中一个瞬间的电压与电流的乘积对放电时间进行积分。
- (6) 理想存储能量：电容器存储能量的理想值。对于一个简单的电化学电容器，其理想存储能量值可以通过  $E = 0.5CU^2_w$  来计算，其中 C 为电容器的容量； $U_w$  为电容器的工作电压。
- (7) 平均放电功率：平均放电电流和平均放电电压的乘积即为平均放电功率。
- (8) 最大输出功率：当为电容器外接一个合适的负载时，其可以达到的最大输出功率，计算公式为  $P = U^2 / (4R)$ ，此处 U 为电容器的初始电压，而 R 为电容器的等效串联电阻。
- (9) 放电效率：在一个特定的充放电循环中，电容器放出的能量占充入的能量的百分比。

## 2.2 超级电容充放电时间常数的确定

超级电容作为一种高功率动力源，可大电流充放电，并且使用寿命比电池大的多，这使得其充放电效率对性能的发挥有着极其重要的影响。超级电容器组的时间常数是决定超级电容器组充放电效率的重要因素。超级电容器组的充放电时间的确定主要从如下方面考虑：

超级电容器组的充放电效率。假设电容组以恒定的电流*i*充放电，经过时间*t*后，电容器组电量从*Q*<sub>1</sub>，到*Q*<sub>2</sub>，相应的电压由*U*<sub>1</sub>到*U*<sub>2</sub>，则电容器组存储释放的能量*E*为：

$$E = (Q_2^2 - Q_1^2) / 2C$$

此时超级电容器组内阻*R*<sub>C</sub>消耗的能量*E*<sub>R</sub>为：

$$E_R = I^2 R_C t = R_C (Q_1 - Q_2)^2 / t$$

定义时间常数  $\tau = R_C C$ ， $\beta = U_1 / U_2$  (充电) 或  $\beta = U_2 / U_1$  (放电)，得到充电效率  $\eta_c$  和放电效率  $\eta_d$  为：

$$\eta_c = \frac{E}{E + E_R} = \frac{t}{t + 2\tau [1 - 2\beta / (1 + \beta)]}$$

$$\eta_d = \frac{E - E_R}{E} = 1 - \frac{2\tau}{t} \left( 1 - \frac{2\beta}{1 + \beta} \right)$$

根据以上可以知道，对于相同的 $\tau$ ，超级电容器组效率随充放电深度增大而减小，随充放电时间*t*增大而增大。对于相同的 $\beta$ ， $\eta_c$ 永远大于 $\eta_d$ ；同时 $\tau$ 越小，相同放电时间效率也越高，并且基本上接近，但随着 $\tau$ 的增大，偏差迅速增大。

所以在选用超级电容器时，要综合考虑充放电深度和时间的匹配关系，根据电容器的成本随时间常数的增大而增大的原则，在不影响使用的前提下，尽量选用时间常数小的电容器。此时电容器的充放电时间可以设计相等。

## 3. 超级电容器与蓄电池性能比较

### 3.1 蓄电池的不足

电动汽车动力源蓄电池在加速或爬坡时要进行大电流放电；减速或下坡时要快速充电实现制动能量回收，要求蓄电池具有优良的倍率快速充放电特性和使用寿命长且性能稳定。

而对蓄电池实行大电流充放电将使之寿命大大缩短。

同时由于电动汽车放置蓄电池的空间有限，布置非常紧凑，热量易积累，使得蓄电池暴露在高温环境中造成高温失效。

尽管针对电动汽车所使用的铅酸蓄电池作了许多改进，但是其在高温时性能恶化快，寿命短，充放电效率低已经成为电动汽车发展的难题之一。

### 3.2 超级电容器的优势

超级电容器也称电化学电容器，因其存储能量大，质量轻，可多次充放电而成为一种新型的储能装置。

超级电容器有以下优势：

(1) 电容量大：超级电容器采用活性炭粉与活性炭纤维作为可极化电极，与电解液接触的面积大大增加。根据电容量的计算公式，两极板的表面积越大，则电容量越大。因此，一般双电层电容器容量很容易超过 1F，它的出现使普通电容器的容量范围骤然跃升了 3~4 个数量级。

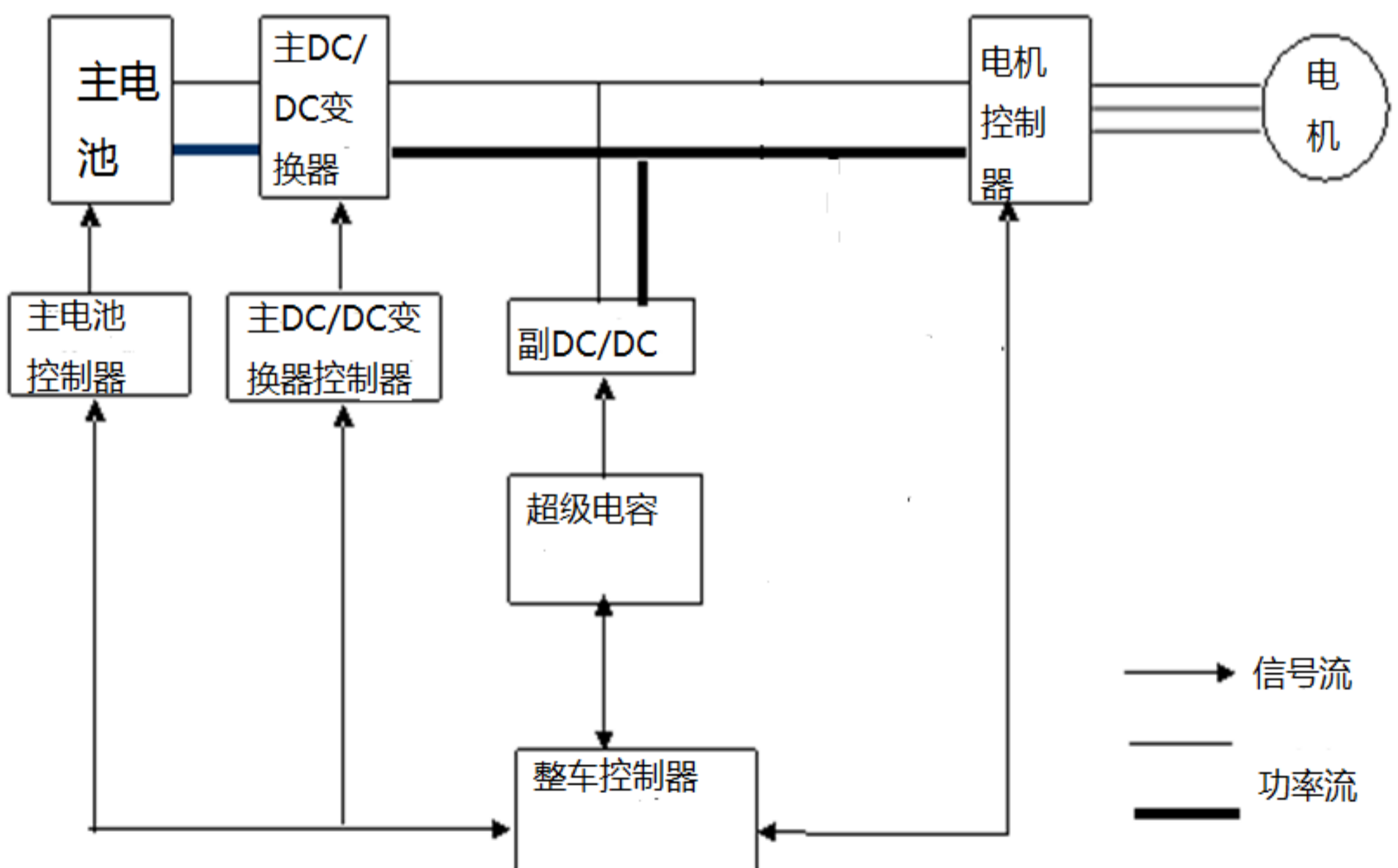
(2) 快速充放电：可以从数十秒到数分钟内快速充电，而蓄电池在如此短的时间内充满电将是极危险的或是几乎不可能的。

(3) 充放电寿命很长：超级电容器充放电寿命可达500000次或90000h，而蓄电池的充放电寿命很难超过1000次；超级电容器可以提供很高的放电电流，一般蓄电池通常不能有如此高的放电电流，一些高放电电流的蓄电池在如此高的放电电流下的使用寿命将大大缩短

(4) 很宽的工作温度范围：蓄电池很难在高低温，特别是低温环境下工作；超级电容器用的材料是安全无毒的，而铅酸蓄电池、镍镉蓄电池均具有毒性。

(5) 超级电容器可以任意并联使用来增加电容量，如采取均压措施后，还可以串联使用。尽管有在能量存储上的优势，但超级电容器还是不能和电化学蓄电池相比，即使是铅酸蓄电池也能比超级电容器多存储10倍以上的能量。

### 电动汽车动力系统框图



## 4. 汽车应用案例

(1) 兰博基尼 Sián FKP 37 / Sián Roadster / Sián EVO: 全球首款量产超级电容混动超跑。48V超级电容集成在变速箱, 比锂电轻30%、能量回收>90%, 瞬时释放大功率, 综合830马力。

(2) 兰博基尼 Terzo Millennio (概念): 车身一体化超级电容, 取消传统电池包。

(3) 红旗 H5 混动版: 全系配超级电容, 启停/急加速辅助, 延长主电池寿命、提升低温启动。

(4) 沃尔沃 48V轻混 (S60/S90/XC60/XC90等): 用Maxwell超级电容, 降低电池峰值负荷、延长寿命、提升启停响应。

(5) 凯迪拉克 2016款 ATS/CTS: 超级电容做电压稳定, 启停0.3秒重启、节油8%。

(6) 部分通用/别克/雪佛兰 48V轻混: 启停系统标配超级电容, 提升低温可靠性。

(7) 超级电容公交车 (国内大量运营): 上海26路/930路、广州海珠、昆明等线路。奥威科技/中车方案, 3-5分钟充满, 跑20-40km, 制动能量回收强。

(8) 宇通/金龙/安凯 混动/纯电客车: 超级电容回收制动能量 (效率>80%), 辅助启动、延长电池寿命。

(9) 轻卡/重卡/工程机械: 三一重工等用超级电容做启停/能量回收, 节油、减磨损。

(10) 部分国产混动SUV/轿车: 如吉利、长安部分48V轻混, 用超级电容优化启停与动力响应。

## 5. 仿真分析

仿真模型采用向前仿真和向后仿真相接合的仿真方法。在电动汽车设计过程中，向后仿真一般用于初期的系统预估，即对所需开发的电动汽车整车结构及相应的控制策略作初步的筛选与评估。

前向仿真则是实际汽车系统组装前，通过对已选定的部件进行详细设计和动态模拟，在寻求优化与之匹配的整车控制策略的原则指导下，适当改进部件，以达到整车性能满足设计要求，在各子系统中都已建立了模块，通过模块的住址建立电动汽车模型，之后选择行驶工况进行性能的仿真。

图2是基于 ADVISOR车辆仿真软件的纯电动汽车系统的模型实现。驾驶工况选用美国环境保护署 EPA制订的城市道路循环工况 UDDS(Urban dynamometerdrivingschedule)，该道路循环工况参数见表 1所列，纯电动汽车的主要仿真数据见表 2 所列。

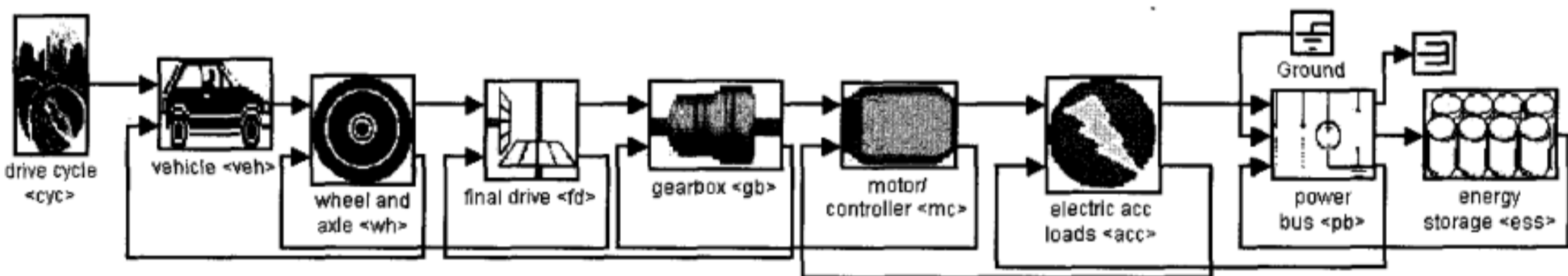


图 2 纯电动汽车系统的模型实现

表 1 UDDS 道路循环工况参数

项目	单位	数值
循环时间	sec	1 369
行驶路程	km	11.99
最高车速	km/h	91.25
平均车速	km/h	31.51
最大加速度	m/s <sup>2</sup>	1.48
最大减速度	m/s <sup>2</sup>	-1.48
空载时间	sec	259
停车次数		17

表 2 纯电动汽车的主要仿真数据

项目	单位	数值
最大装载质量	kg	1 026
轴距	mm	2 512
迎风面积	m <sup>2</sup>	2.4
轮胎滚动半径	m	0.276 8
电容单元最大电压	V	3
电容组单元数量	个	50
电机额定电压	V	144
电机额定功率	kW	16

图 3是 ADVISOR的部分仿真输出曲线。

图 3是 ADVISOR的部分仿真输出曲线。其中 (a)为驾驶工况的变化；(b)为电能输出随时间特性曲折的曲线，说明电动汽车可以回收能量；(e)为超级电容 SOC放电时间特性；(d)为电动机的输出扭矩，整个驱动循环中，电动机输出扭矩正负皆有，负值反映了电动机处于发电的状态。

仿真结果显示了实际车速能够很好的贴近循环工况车速。通过仿真计算，该纯电动汽车的最高车速为 83.8km / h；30km / h行驶时的爬坡度为 5.6%；最大加速度为 0.9m / s；0~40km / h的加速时间为 2.6So该结果与道路试验结果基本吻合。

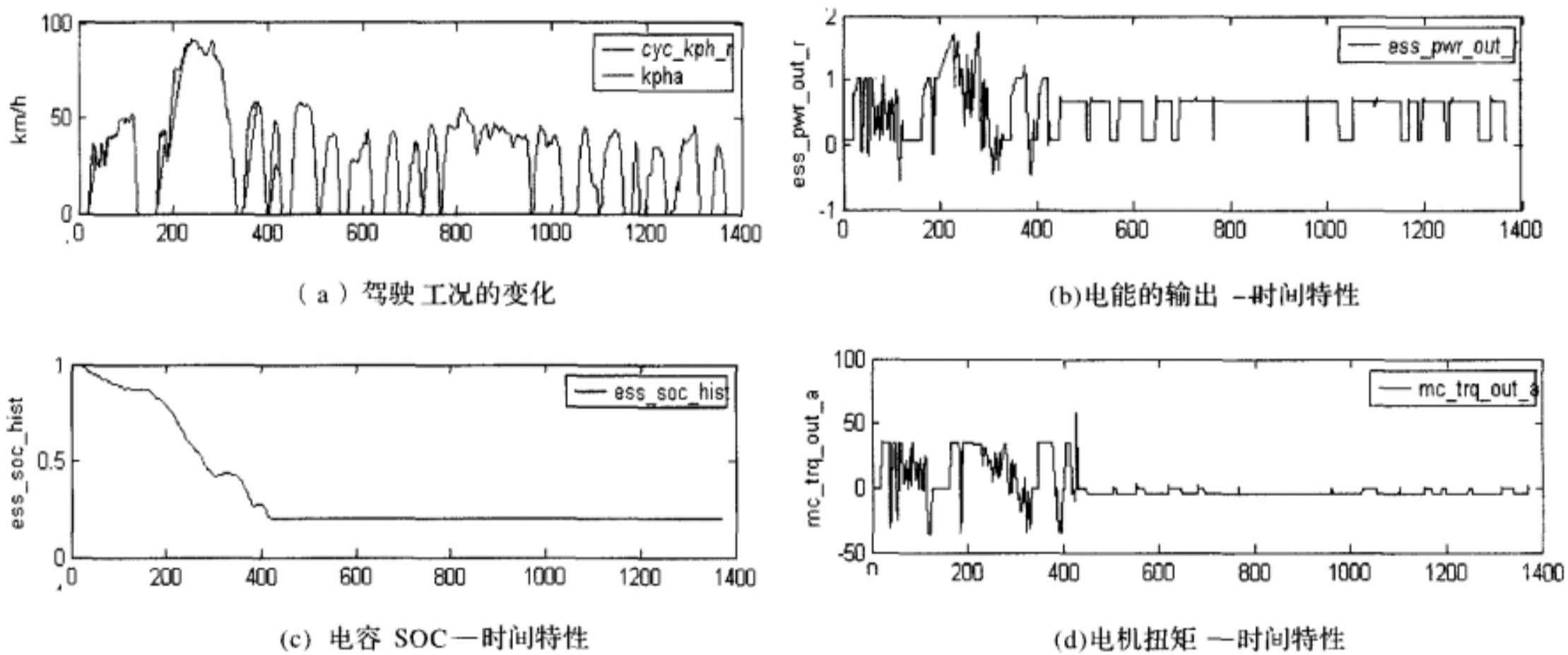
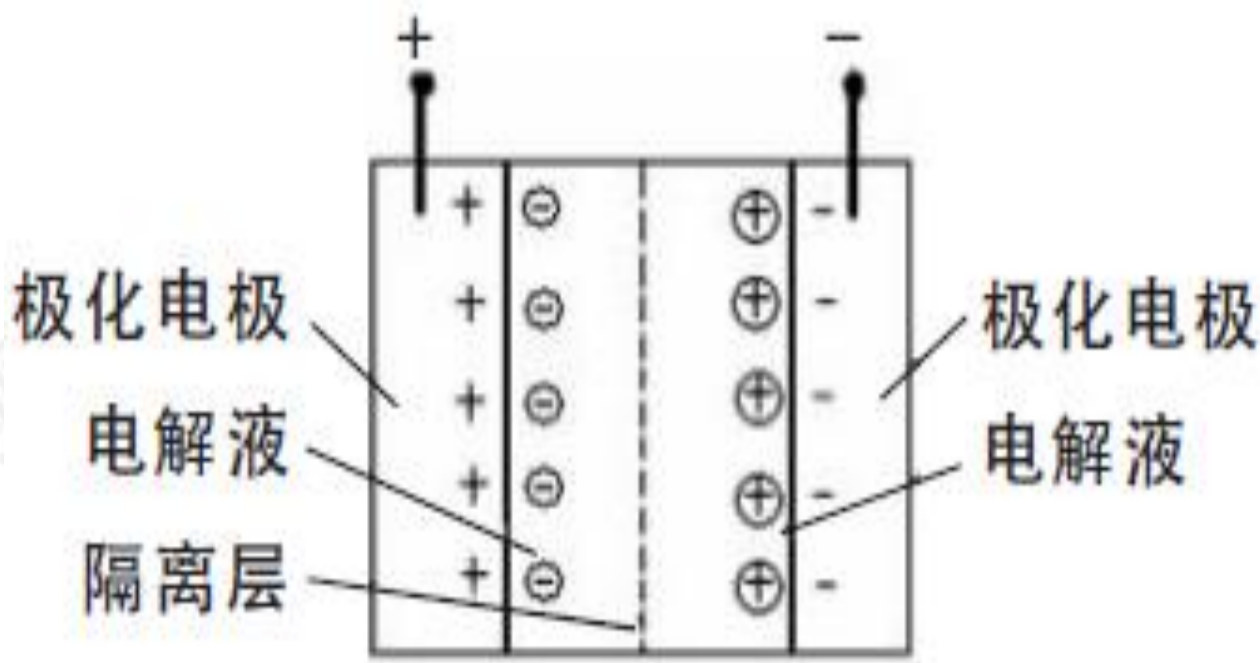
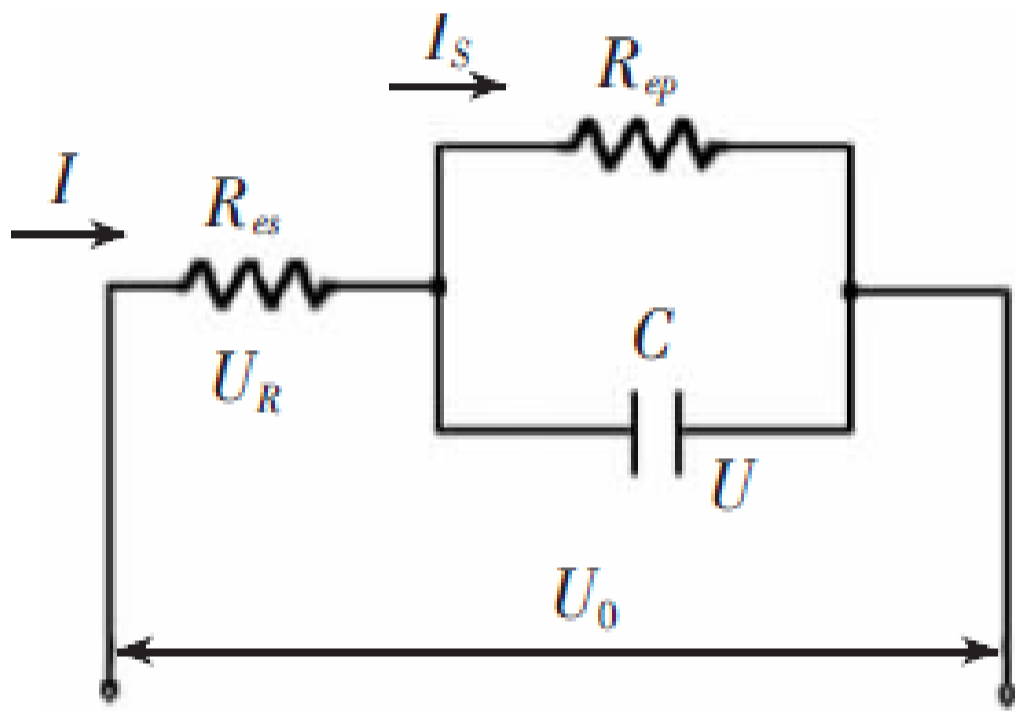


图 3 仿真输出曲线

## 超级电容原理简介

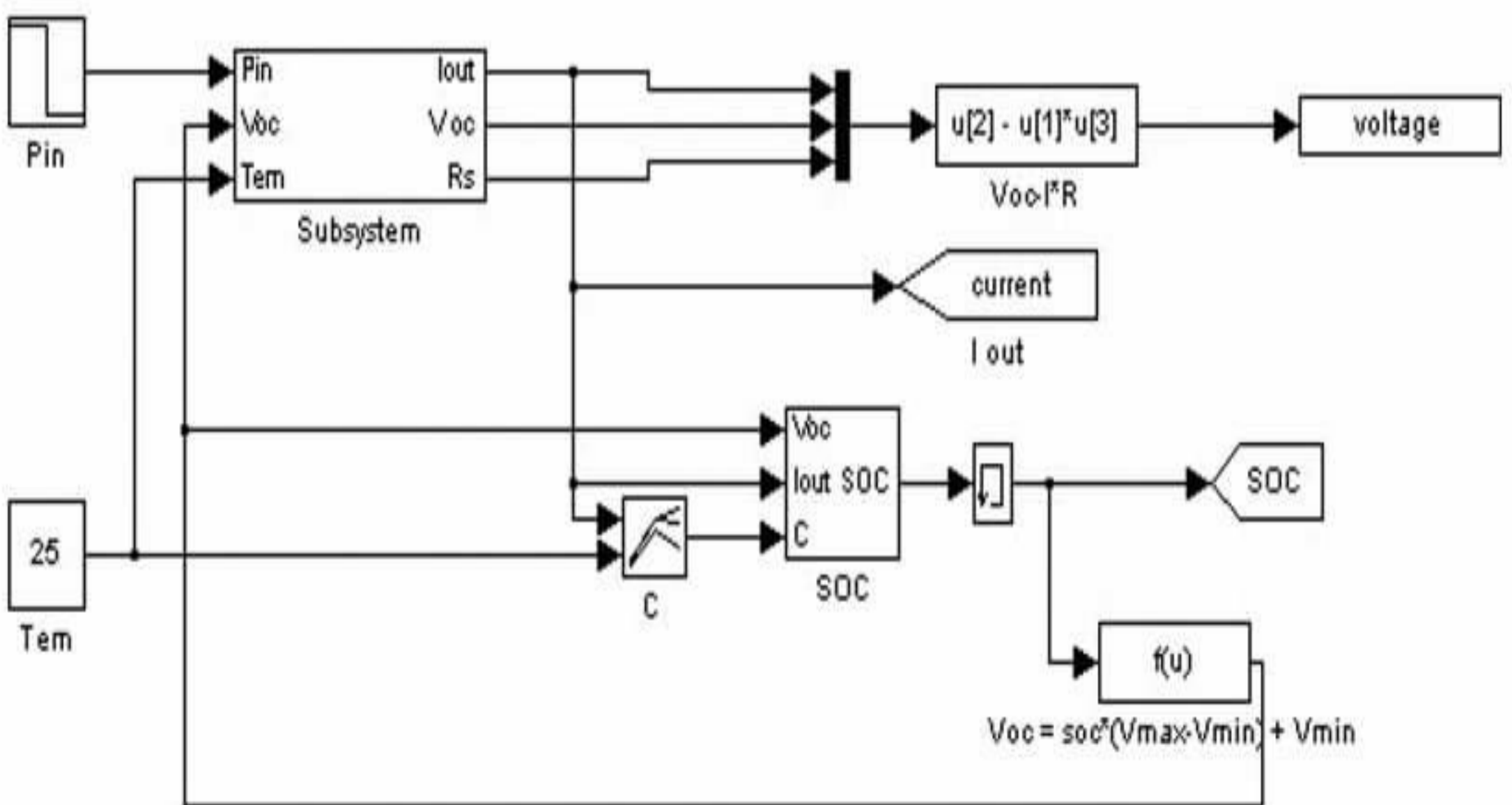


双电层超级电容器结构图



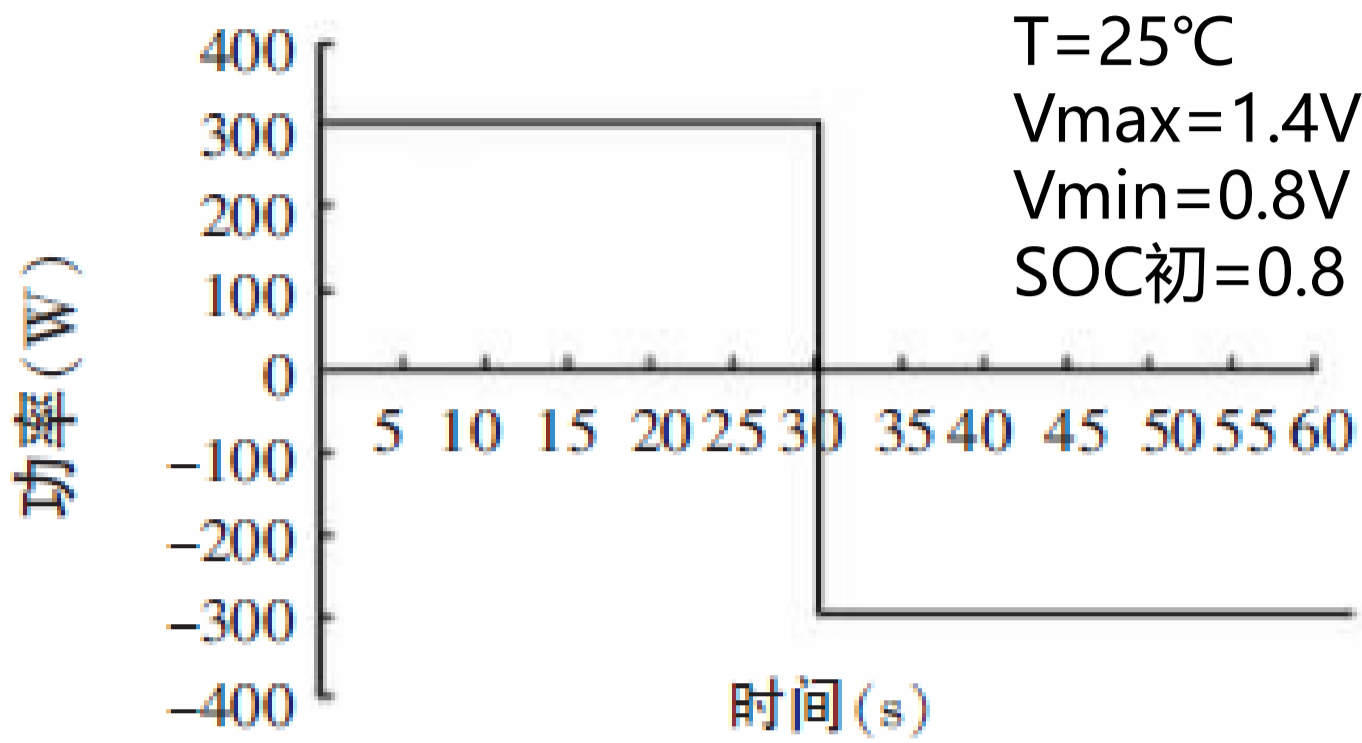
超级电容等效电路图

## 超级电容的simulink 模型

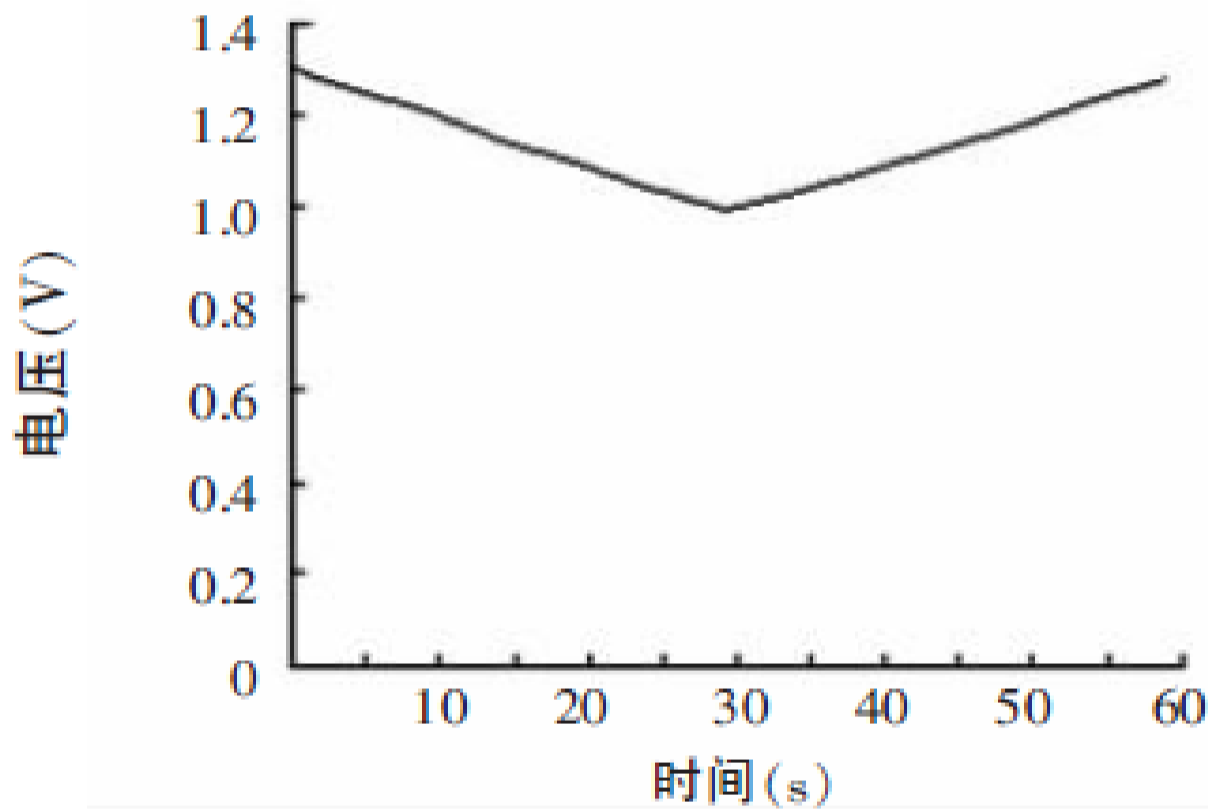


超级电容的simulink 模型

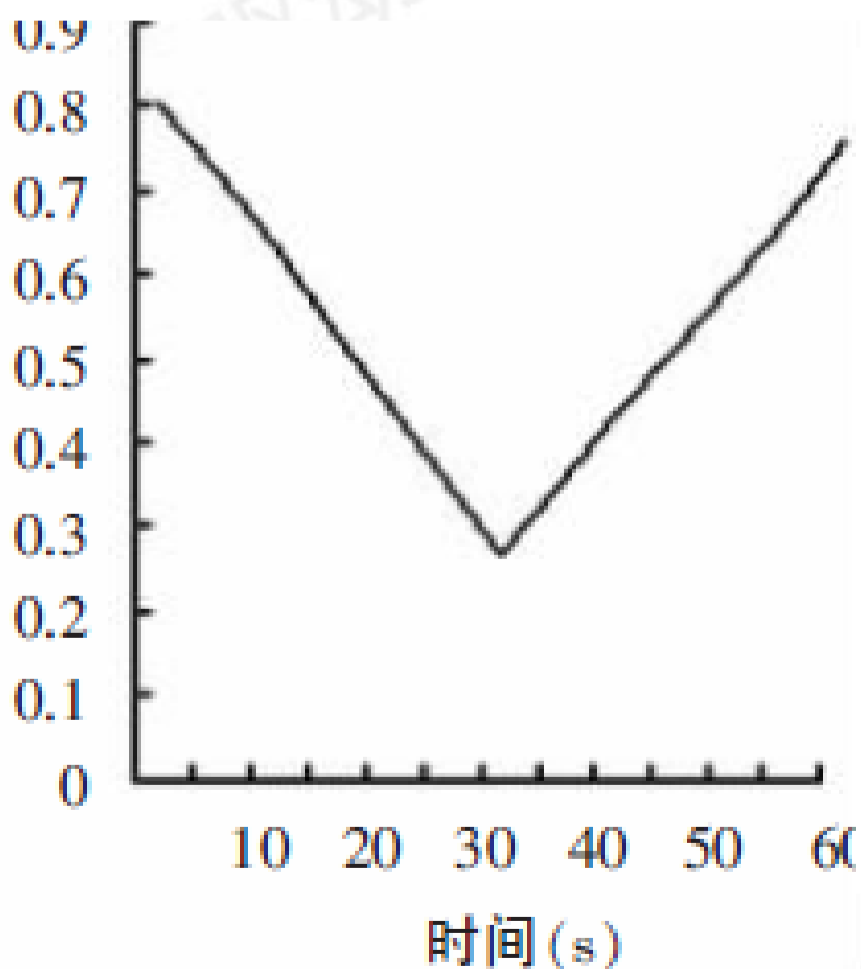
## 超级电容simulink 模型的仿真



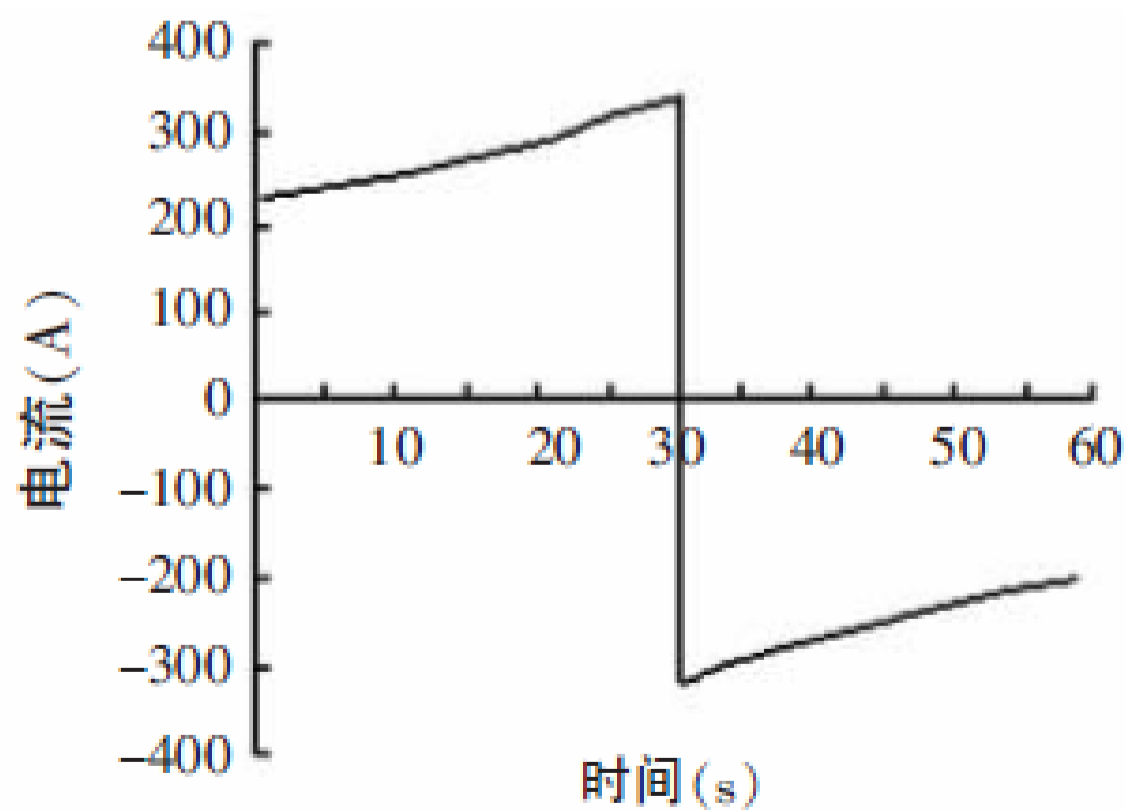
循环等功率放电 - 充电曲线



电压变化曲线



SOC 值变化曲线



电流变化曲线

## 6. 结束语

在传统能源大量使用、能源危机日益显现的时代，新能源的开发与利用显得尤为重要。

在城市工况中，电动汽车以中低速行驶。在制动过程中，可使车辆部分动能转化为电能并反充到超级电容中，从而增加超级电容可利用的电能。

充分挖掘超级电容的潜力，减少电容的能量损失，提高放电容量和续驶里程。增加动力传动系统和控制系统的效率，降低整车重量和风阻系数。加强各机械总成部件的润滑，减少摩擦。

超级电容电动汽车系统以其高效洁净无污染、功率密度大等特点，越来越受到人们的青睐，有着广阔的发展前景。

驱动视界

驱动视界

本文PDF文档免费下载链接：

[www.shinden.com.cn](http://www.shinden.com.cn)

百度“无锡胜鼎”，页面右上角“技术文档”



与新能源汽车电驱动工程师共同成长

Growing together with electric drive engineers for new energy vehicles

扫码进群

