

超级电容在电动车中的应用研究

曹秉刚，曹建波，李军伟，续慧，许鹏

(西安交通大学电动车研究开发中心，710049，西安)

摘要：介绍了超级电容的机理与特点，概述了国内外超级电容在电动车中的应用研究现状，通过分析比较超级电容在电动车中应用的拓扑结构及控制策略，设计了一种新型的超级电容—蓄电池复合电源电动车控制系统(包括一个双向DC/DC变换器和一个三相全桥逆变器)。实验结果表明，该复合电源电动车能兼顾蓄电池和超级电容的优点，可以更好地满足电动车启动和加速性能的要求，并能提高电动车制动能量回收的效率，增加续驶里程。以超级电容为惟一能源的电动车可以作为固定线路车使用，但配套设施还需要完善，所以发展趋势并不乐观。

由于环境污染和石油危机的双重压力，电动车已经逐渐成为人们生活中一种重要的绿色交通工具。电源是电动车的能量源泉，但目前电池技术还不能完全满足电动车的要求。

超级电容是一种介于电池和静电电容器之间的储能元件，具有比静电电容器高得多的能量密度和比电池高得多的功率密度，不仅适合于作短时间的功率输出源，而且还可利用它比功率高、比能量大、一次储能多等优点，在电动车启动、加速和爬坡时有效地改善运动特性。此外，超级电容还具有内阻小，充放电效率高(90%以上)、循环寿命长(几万至十万次)、无污染等独特的优点，和其他能量元件(发动机、蓄电池、燃料电池等)组成联合体共同工作，是实现能量回收利用、降低污染的有效途径，可以大大提高电动车一次充电的续驶里程。因此，超级电容在电动车领域有着广阔的应用前景，将是未来电动车发展的重要方向之一。

目前，日本、美国、瑞士、俄罗斯等国家都在加紧超级电容的开发，并研究超级电容在电动车驱动和制动系统中的应用，而我国超级电容的生产和应用还处于起步阶段。

1 超级电容的机理与特点

超级电容(Ultracapacitor)是近期发展起来的一种新型储能元件，是一种具有超级储电能力、可提供强大脉动功率的物理二次电源，它与常规电容器不同，其容量可达数万法。超级电容按储能机理主要分为三类：由碳电极和电解液界面上电荷分离产生的双电层电容；采用金属氧化物作为电极，在电极表面和体相发生氧化还原反应而产生可逆化学吸附的法拉第电容；由导电聚合物作为电极而发生氧化还原反应的电容。

由于双电层电容的充放电纯属于物理过程，其循环次数高，充电过程快，因此比较适合在电动车中应用。双电层超级电容是靠极化电解液来储存电能的一种新型储能装置，其原理结构如图1所示。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。由于超级电容与传统电容相比，储存电荷的面积大得多，电荷被隔离的距离小得多，因此一个超级电容单元的电容容量就高达几法至数万法。由于采用了特殊的工艺，超级电容的等效电阻很低，电容量大且内阻小。使得超级电容可以有很高的尖峰电流，因此具有很高的比功率，高达蓄电池的50~100倍，可达到10kW/kg左右，这个特点使超级电容非常适合于短时大功率的应用场合。

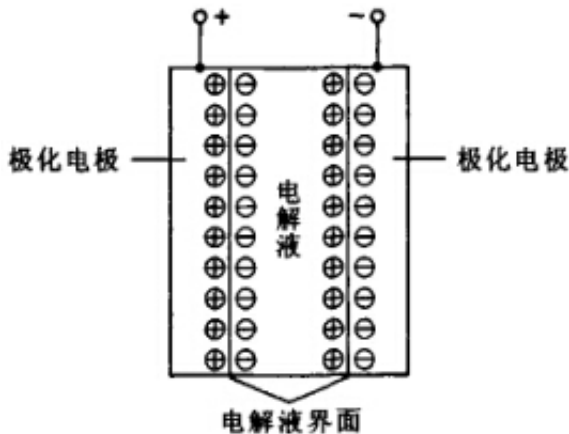


图1 超级电容原理图

超级电容具有极其优良的充、放电性能，在额定电压范围内，可以以极快的速度充电至任一电压值，放电时则可以放出所存储的全部电能，而且没有蓄电池快速充电和放电的损坏问题。此外，超级电容还具有不污染环境及机械强度高、安全性好(防火、防爆)、使用过程中免维护、使用寿命长(大于10年)和工作温度范围宽(-30 ~ +45)等优点，并且在瞬间高电压和短路大电流情况下有缓冲功能，能量系统较为稳定。超级电容与铅酸电池和普通电容的性能对比见表1。

表1 3种储能元件的对比表

性能	铅酸电池	超级电容	普通电容
充电时间/s	$(3.6 \sim 18) \times 10^3$	0.3~30	$10^{-3} \sim 10^{-6}$
放电时间/s	$(1.08 \sim 108) \times 10^3$	0.3~30	$10^{-3} \sim 10^{-6}$
比能量/ $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$	10~100	1~10	<0.1
比功率/ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$	< 10^3	< 10^4	< 10^5
循环寿命/次	10^3	> 10^5	> 10^5
充放电效率	0.7~0.85	0.85~0.98	>0.95

2应用研究现状

2.1国内外的应用研究进展

由于超级电容的优越性能和近年来对超级电容开发能力的提高，因此超级电容在工业领域中得到了广泛应用。目前，世界各国争相研究、并越来越多地将其应用到电动车上。超级电容已经成为电动车电源发展的新趋势，而超级电容与蓄电池组成的复合电源系统被认为是解决未来电动车动力问题的最佳途径之一。

2.1.1日本的情况

日本本是将超级电容应用于混合动力电动汽车的先驱，超级电容是近年来日本电动车动力系统开发中的重要领域之

一。本田的FCX燃料电池—超级电容混合动力车是世界上最早实现商品化的燃料电池轿车，该车已于2002年在日本和美国的加州上市。日产公司于2002年6月24日生产了安装有柴油机、电动机和超级电容的并联混合动力卡车，此外还推出了天然气—超级电容混合动力客车，该车的经济性是原来传统天然气汽车的2.4倍。目前，装备超级电容的混合动力电动公交车已经成为日本的国家攻关项目。

2.1.2 欧美的状况

瑞士的PSI研究所给一辆48kW的燃料电池车安装了储能360Wh的超级电容组，超级电容承担了驱动系统在减速和启动时的全部瞬态功率，以50kW的15s额定脉冲功率来协助燃料电池工作，牵引电机额定连续功率为45kW，峰值功率为75kW，采用360V的直流电源。大众Bora实验车进行的燃油消耗测试结果表明其油耗少于7L / 100km，而相同质量的BMW7系列油耗则为10.7L / 100km。1996年俄罗斯的Eltran公司研制出以超级电容作电源的电动汽车，采用300个电容串联，充电一次可行驶12km，时速为25km / h。美国在超级电容混合动力汽车方面的研究也取得了一定进展，Maxwell公司所开发的超级电容器在各种类型电动汽车上都得到了良好的应用。美国NASA Lewis研究中心研制的混合动力客车采用超级电容作为主要的能量存储系统。

2.1.3 中国的现状

目前，国内对以超级电容作为惟一能源的电动汽车的研究取得了一定的进展，2004年7月我国首部“电容蓄能变频驱动式无轨电车”在上海张江投入试运行，该公交车利用超级电容比功率大和公共交通定点停车的特点，当电车停靠站时在30s内快速充电，充电后就可持续提供电能，时速可达44km / h。2005年1月上海交通大学与山东烟台市签署协议，共同投资开发超级电容公交车，计划在烟台福山区建一条12km的示范线，在福山高新技术产业区建立年产1万辆新型环保超级电容公交车的生产基地。哈尔滨工业大学和巨容集团研制的超级电容电动公交车，可容纳50名乘客，最高速度20km / h。但是，国内目前对超级电容—蓄电池复合电源电动车的设计及控制，基本上还处于起步阶段。

2.2 电动车中应用超级电容的拓扑结构

2.2.1 纯超级电容电动车

直接以超级电容作为电动车的惟一能源，此方法结构简单、实用、成本低，而且实现了零排放，因此比较适合用于短距离、线路固定的区域，例如火车站或者机场的牵引车、学校和幼儿园的送餐车、公园的浏览车和电动公交车等。

2.2.2 复合电源电动车

超级电容与蓄电池、燃料电池等配合可以组成复合电源系统，但燃料电池因为成本较高，现在还不能得到实际应用。因此，国内外对超级电容—蓄电池复合电源系统的研究更多，其拓扑结构概括如图2所示。图2a结构最简单，但由于没有DC / DC变换器，蓄电池和超级电容将具有相同的电压，以致超级电容仅在蓄电池电压发生快速变化时输出和接收功率，从而减弱了超级电容的负载均衡作用。图2b与图2c都采用了双向OC / OC变换器，图2b中双向DC / DC跟踪检测蓄电池的端电压，以调控超级电容的端电压使两者匹配工作。由于蓄电池端电压的变化比超级电容的端电压平缓，因此对于DC / DC，图2b比图2c易于控制。图2d理论上虽然具有更高的灵活性，但对DC / DC的控制策略要求非常精确复杂且不易维护。

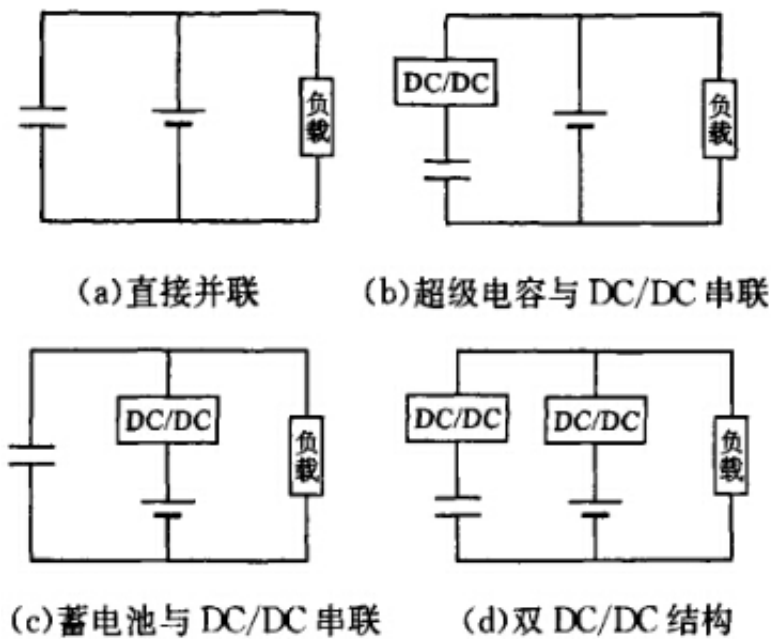


图 2 超级电容-蓄电池复合电源的拓扑结构

2.3 复合电源系统的控制策略

2.3.1 速度约束控制策略

当车辆起步时，超级电容中应当储存较多的能量，需要超级电容放电，保证电动车的加速性能，而当车辆在高速行驶的情况下，超级电容应当储存比较少的能量，以便在制动过程中接收较多的能量。超级电容储存的能量与其端电压的平方成正比，由于超级电容的端电压变化范围比较大，因此放电时如何控制其放电深度，以备在行驶过程中二次放电或进行再生制动回收充电，但需要在实验中反复进行测试才能获得。

2.3.2 电流约束控制策略

电动车在行驶过程中，由于频繁地加速、减速和上下坡等原因，使得负载电流变化比较大，当负载电流太大以至于超过蓄电池所能承受的最大放电或充电电流时，为了避免电池组过放电或过充电，需要由超级电容放电或充电，以便改善电池组的工作状态，延长其使用寿命。电池组的工作电流为

$$i_b = i_l + i_c \quad (1)$$

式中： i_l 为总线电流(负载电流)； i_c 为由超级电容器通过双向DC/DC变换器产生的电流； i_b 为电池组工作电流. 限制条件为

$$\begin{aligned} -I_{bn} &\leq i_b \leq I_{bp} \\ I_{bn} &= k_1 C_n \quad I_{bp} = k_2 C_n \end{aligned} \quad (2)$$

式中： I_{bn} 为电池组最大充电电流； I_{bp} 为电池组最大放电电流； C_n 为电池的标称容量； k_1 为电池组允许的最大充电率； k_2 为电池组允许的最大放电率. 由式(1)和式(2)可以得到

$$(-I_{bn} - i_l) \leq i_c \leq (I_{bp} - i_l) \quad (3)$$

电流控制策略就是通过 Buck-Boost 双向电路, 控制 i_c 在合适的范围内工作^[20].

为了避免过大的回馈电流对蓄电池造成损害, 可采用恒定充电电流的制动方式, 即以蓄电池充电电流为被控对象. 这是一种比较实用的控制策略, 适合于采用蓄电池单电源系统的电动车. 由于蓄电池电压在再生制动过程中不会发生明显的变化, 因此电枢电流的上升不会太大. 在超级电容-蓄电池复合电源系统中, 由于超级电容端电压在单次再生制动过程中就会发生很大的改变, 随着制动过程中超级电容端电压的上升和电机反电动势的下降, 电枢电流将急剧上升, 有可能对功率器件甚至电机造成损害, 因此对超级电容充电时可采用恒功率的策略, 即对再生制动过程中超级电容的充电功率进行控制.

在超级电容电压低的时候, 采用大电流充电, 当电容电压上升时, 充电电流指令值下降, 可兼顾能量回收与系统器件保护.

2.3.3综合控制策略

采用速度约束控制策略可使车辆的动力性能得到提高, 而采用电流约束控制策略时蓄电池的电流可以工作在规定的范围内, 对蓄电池有保护作用. 这2种控制策略各有优缺点, 采用综合控制策略. 即将速度约束控制策略和电流约束控制策略进行综合应用, 可以兼顾它们的优点, 既能对蓄电池起到保护作用, 延长电池的使用寿命, 又能提高整车的动力性能.

3西安交通大学的超级电容应用研究

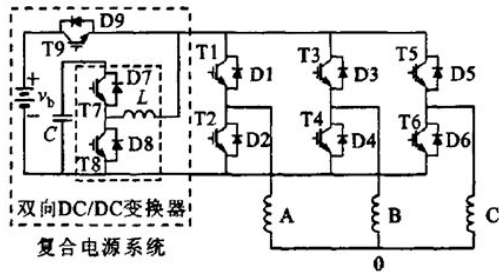
西安交通大学电动车研发中心一直致力于电动车关键技术领域的研发, 提交了15项国家发明专利, 正式授权5项, 有2项国际发明专利已经被正式受理. 研发中心对电动汽车超级电容-蓄电池复合电源系统进行了研究, 其核心是应用了双向全桥DC/DC变换器, 该变换器具有能量双向流动以及升、降压功能. 研发中心率先将H鲁棒控制算法应用到电动汽车复合电源能量回收技术上, 和传统控制方法相比, H鲁棒控制可以方便地同时考虑输入电压的变化、负载扰动和其他非线性的补偿. 由图3所示的实验表明, 在市内道路行驶时, 采用H鲁棒控制的复合电源电动汽车(TUEV-I)比蓄电池单电源电动汽车提高续航里程30%~50%.

西安交通大学电动车研发中心还依托西安交大科技园和博源电动车技术有限责任公司合作进行了超级电容-蓄电池复合电源微型电动车的研究. 该微型电动车采用轮毂式无刷直流电机(BLDCM), 运用再生制动能量回收技术, 并应用了 μ 综合鲁棒控制算法. 实验证明, 采用上述技术的微型电动车比普通电动车在动力性能和续航里程上都有显著提高, 尤其是在频繁刹车和突然加速的工况下, 效果提高更明显. 设计的复合电源微型电动车控制系统的主电路如图4所示, 工作原理如图5所示, 系统工作状态如表2所示. 该复合电源微型电动车具有如下优点: 在车辆制动和减速时

可大电流充电，从而提高能量回收效率，延长电动车的续驶里程； 超级电容的功率密度较大，因此可大电流放电，改善电动车的启动、加速、爬坡性能； 可避免蓄电池大电流充放电，提高蓄电池的使用寿命； 可提高制动力矩，改善制动系统的可靠性； 回收时可先对超级电容充电，再对电池充电，所以可控性较好； 结构紧凑，成本较万方数据



(a)XJTUEV-I 电动汽车 (b)超级电容
图 3 XJTUEV-I 电动汽车及其所用的超级电容



v_b : 电池电压; T1~T9: 场效应晶体管; D1~D9: 二极管;
C: 超级电容; L: 电感; A、B、C: 电机定子的三相绕组

图 4 复合电源电动车的主电路结构

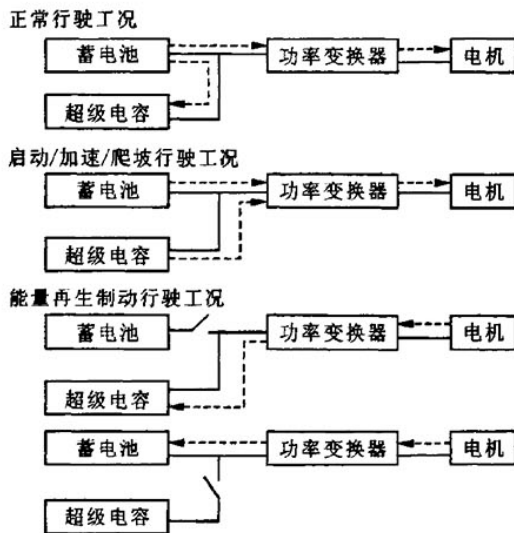


图 5 复合电源工作原理框图

表 2 系统工作状态

工作状态	T7	T8	T9	T1~T6
1	0	P	1	BLDCM 正常驱动的工作序列
2	P	0	1	BLDCM 正常驱动的工作序列
3	0	P	0	全部关断
4	0	0	0	BLDCM 再生制动的工作序列

注: P 表示脉宽调制; 0: 截止; 1: 导通.

4 超级电容的应用发展趋势

超级电容由于具有比功率高、循环寿命长、充放电时间短等优势，因此作为电动车的动力源而得到重视。随着环保型电动车研究的深入。超级电容已经成为近年来新型能源器件的一个研究热点，超级电容的市场份额也将会越来越大。

用超级电容作为惟一能源的电动车，由于超级电容比能量低的致命影响，注定其续驶里程短，难以推广应用。如果超级电容的比能量不能在近阶段内有突破性进展，那么以超级电容作为惟一能源的电动车在近几年里就很难进入实用阶段。

超级电容和其他储能元件组成的复合电源系统兼顾了其他储能元件的高比能量和超级电容的高比功率的优点，可以更好地满足电动车启动和加速性能的要求，并能提高电动车制动能量的回收效率。增加续驶里程。目前，超级电容可以和蓄电池、燃料电池、飞轮电池等组成复合电源系统。由于燃料电池存在成本很高、冷启动响应慢等缺陷，因此近几年还处于实验阶段。飞轮电池的使用条件要求比较苛刻，再加上安全考虑，因此目前还很难有所突破。对蓄电池的研究目前已相当成熟，并且它成本相对较低，在电动车能源领域占有重要的地位，因此超级电容一蓄电池复合电源系统最具有竞争力。在纯电动车和混合动力电动车上采用超级电容一蓄电池复合电源系统，将是电动车领域未来发展的重要方向之一。随着对电动车用超级电容的进一步研究和开发，超级电容一蓄电池复合电源系统在满足性能和成本要求上更具有实用性，其市场前景广阔，经济效益显著。

5 结论

本文在介绍超级电容的机理特性和概述国内外超级电容在电动车中应用现状的基础上，总结了超级电容应用在电动车中的拓扑结构及其控制策略。西安交通大学电动车研发中心通过对电动车和超级电容的研究，认为：超级电容比能量低的特性决定了以超级电容为惟一能源的电动车只适合于短距离和线路同定的区域，因此近期内难以推广应用。超级电容一蓄电池复合电源系统综合了超级电容和蓄电池的优点，不仅可以改善电动车的瞬时功率特性，而且可以避免蓄电池大电流放电，延长蓄电池的使用寿命，增加电动车的续驶里程，因此将是超级电容应用于电动车领域的重要发展方向，并具有广阔的市场前景。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/94030.html>