

Discussion on energy system of hybrid electric vehicle

Sui Jin^{*} Liang Tingting

Shanghai (Jiaotong University) Shenzhou automobile design and Development Co.,
Ltd., Shanghai

Abstract: The technical requirements of electrochemical power sources for hybrid vehicles were described briefly in this paper. The advantages and disadvantages of electrochemical power sources, which included storage batteries, super—capacitors, fuel cells, valve-regulated ultra battery, were also discussed. Based on electrical properties, safety and cost, Ni—MH battery and hybrid super capacitor of C / KOH SO—lution / NiOOH are reasonable selections for auxiliary power sources of hybrid vehicles.

Key words: hybrid vehicle; Ni--MH battery; super capacitor; fuel cells; Li--ion battery; valve-regulated ultra battery

Received: 2019-11-03; Accepted: 2019-11-27; Published: 2019-12-20

混合动力车能源系统论述

隋 进* 梁婷婷

上海（交大）神舟汽车设计开发有限公司，上海

邮箱: jshui66246@163.com

摘 要: 对混合动力车用电化学能源系统的技术要求和各种电化学能源—— 蓄电池、超级电容器、燃料电池、阀控超电池等的优缺点作了简要的论述。从电性能、安全性和价格等方面综合考虑, 认为 MH—Ni 电池、混合型超级电容器 (C/KOH 溶液 / NiOOH) 作为混合动力车的辅助能源是目前合理的选择。

关键词: 混合动力车; MH—Ni 电池; 超级电容器; 燃料电池; 锂离子电池; 阀控超电池

收稿日期: 2019-11-03; 录用日期: 2019-11-27; 发表日期: 2019-12-20

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



据 2003 年的报道 [1], 全世界注册登记的汽车约 7.5 亿辆, 每年排放 CO₂ 约 40 亿吨, 影响着全球的气候。同时, 汽车排放的氮氧化物、碳氢化合物以及

颗粒物危及人类的健康。

我国石油资源短缺，人均占有的探明可采储量仅相当于世界平均水平的 7.7%。

2005 年，我国石油净进口 1.36 亿吨，占我国石油全部消耗量的 42.9%。因此，提高我国石油的利用率，减少其消耗量是我们迫切需要研究的问题。

我国也是世界上城市大气污染严重的国家之一，大城市的氮氧化物由汽车排放的约占 50% 以上，这是因为采用单一热机作动力源的汽车在行驶时，其速度经常变化，热机的输出功率处于动态变化之中。因而，其燃料的利用率必然较低，废气与颗粒物的排放量较大。这是必须解决的问题。

1 混合动力车

1.1 助力型 (power—assist) 混合动力车

混合动力车是既省油又环保的汽车，其能源系统由两个动力源组成。它主要有助力型、双重模式和燃料电池型。

助力型 (power—assist) 混合动力车主要动力源为热机，如使它尽可能长时间工作在最高效率区，则燃料的利用率会较高，有害气体与颗粒物的排放量较少。另一个是辅助能源，它可以用蓄电池，或是超级电容器，或是阀控超电池，还可以用储能飞轮。当车辆上坡或加速时，需要较大的功率，这时辅助动力源根据指令提供额外的功率输出，而热机仍工作在最佳输出功率状态。当车辆下坡或减速行驶时，车辆的动能将立即转化为电能储存到辅助能源中，回收部分能量，从而提高了动力系统的能量利用率，延长了车辆行驶里程。显然，这种混合动力车排放的废气与颗粒物较之用单一热机的汽车排放量要少。

1.2 双重模式 (dual—mode) 混合动力车

它所用的蓄电池的容量较大 (12Ah ~ 60Ah)，这种车辆可以在闹市区用蓄电池驱动，离开闹市区后再启动热机驱动，也是一种既省油又环保的汽车。据报道，混合动力车尾气排放量约为普通汽车的 10%，燃油量可降低 25% ~ 50%

[2]。以上两种混合动力车是一种“准绿色交通工具”。

1.3 以燃料电池为主能源的混合动力车

辅助电源用超级电容器或是蓄电池，这种混合动力车可称得上为真正的绿色交通工具。混合动力车正吸引着世界各国政府和汽车制造商竞相开发，推广应用。

2 混合动力车对电化学能源系统的技术要求

2.1 上海汽车股份有限公司对 HEV 电池的技术要求

上海汽车股份有限公司汽车工程研究院对混合动力轿车动力电池的技术要求如下 [3]：

- (1) 电池容量：6. 0 ~ 10Ah；
- (2) 单体电池内阻：<3m Ω ；
- (3) 电池组额定电压：100 ~ 400V；
- (4) 电池组能量：1. 2 ~ 2. 4kwh；
- (5) 比功率：>1000W / kg；
- (6) 峰值功率：15 ~ 30kW；
- (7) 单体电池的一致性要求：静态单体电压差在 10mV 以内；
- (8) 有频繁的充放电能力，可满足混合动力车行驶 16 万公里或运行 8 年时间；
- (9) 工作在荷电状态 20% ~ 90% ；
- (10) 充放电倍率：10C；
- (11) 工作温度范围：-30℃ ~ +65℃ ；
- (12) 重量：40 ~ 70kg；
- (13) 体积：（850 ~ 900）mm × （430 ~ 450）mm × （210 ~ 250）mm。

2. 2 美国 PNGV 对 HEV 电池的技术指标

表 1 为美国 PNGV（the partnership for NEXT generation Vehicle）b 对助力型

HEV 电池和双重模式 HEV 电池的技术指标。

表 1 助力型 HEV 电池和双重模式 HEV 电池的技术指标

特性	单位	指标 *		
		2000 年	2004 年	2006 年
18s 功率 / 能量比	W/ Wh	(83) 27	(83) 27	(83) 27
比能量	Wh/KG	(8) 23	(8) 23	(10) 24
能量密度	Wh/L	(9) 38	(9) 38	(12) 42
循环寿命 **	千次	(200) 120	(200) 120	(200) 120
使用期限	年	(5) 5	(10) 10	(10) 10
成本 ***	¥/kwh	(1670) 555	(1000) 333	(800) 265

注：* 该指标是对 400V 电池体系而言，其中圆括号内的数字是助力型电池指标；

** 在放电深度为 2% — 5% 时的循环寿命；

*** 指有效能量的成本 (S / kWh)

从上述所列的技术指标可以看出，对于助力型混合动力车（HEV）电池，在充放电时要经受大电流脉冲，要能接受和利用再生制动能量，着重要求电池具有高的比功率性能，对于比能量的要求是次要的。而纯电动车用电池首要的是要有高的比能量，在放电深度为 80% 时，要有较长的充放电循环寿命。

3 混合动力车的电化学能源系统

混合动力车的电化学能源系统包括蓄电池（如 MH—Ni 电池、锂离子电池、阀控超电池）、燃料电池（如质子交换膜氢氧燃料电池）、超级电容器等，其共同的特征是提供能量的过程均发生在电极 / 电解质的相界。它们的单体均有两个与电解质相接触的电极。蓄电池、超级电容器和阀控超电池是闭合电化学体系，能量的贮存与转换发生在同一区域。而燃料电池为开放体系，其正极和负极是作为电荷传递的介质。正、负极活性物质从燃料电池外部不断地供给燃料，使它不断地工作。例如：氧气来源于空气或氧气罐；燃料氢气、碳氢化合物也是贮存在罐子里的。所以，只要从外部不断地供应氧气和燃料，燃料电池就可以长期工作，这是蓄电池、超级电容器和阀控超电池所不能的。

蓄电池、燃料电池、阀控超电池的正、负极和混合型超级电容器的一个电极在充放电过程中发生氧化还原反应或离子嵌入 / 脱出反应，电极发生相变，

产生应力，所以，他们的循环寿命没有双电层电容器的充放电循环寿命长。蓄电池电极只有在放电深度很浅时，才有较长的充放电循环寿命。

下面对目前应用于混合动力车的几种电化学能源作简要的论述。

（1）双电层电容器

充电时，电解液中的离子在电极 / 电解液界面发生定向排列，即电极表面带正电荷时，吸引电解液中的负离子；电极表面带负电荷时，吸引电解液中的正离子，在两电极形成双电层，将电能贮存在界面双电层中。放电时，发生电子在外电路中的流动，释放电能做功。其特点是：充放电过程中，正、负极上不发生电化学反应，仅仅是电解液中的正、负离子在电极上聚集 / 松弛散开过程，而电极表面双电层的形成和松弛几乎是瞬间发生的，形成的时间约为 $10 \sim 8\text{s}$ 。所以双电层电容器能大电流密度充放电，输入 / 输出功率大，可逆性好，充放电循环寿命可达 100 万次，其缺点是比能量较低。

美国航空航天局（NASA）路易斯研究中心研发的电动大客车，全长 12.2m，总重量 15 000kg，由小型燃气轮机和双电层电容器组成混合动力系统。此车的最大功率为 250Hp（约 186 kW），平均负荷功率为 73Hp（约 54.4kW），双电层电容器的贮存能量为 1600kJ（约 444Wh），在电压为 400V 时约 20F，使用寿命比化学电源高出几十倍，能回收刹车和怠速时所产生的能量。超级电容器在充放电过程中，电压能被精确测出，且其荷电状态与电压呈线性关系，因此，从测定的电压就可以正确地确定其荷电状态。而蓄电池在充放电过程中，荷电状态的变化与电压的关系不明显，在荷电状态变化较大的范围内，电压的改变不大，不能用其电压来确定它的荷电状态。蓄电池在充电时的电流控制极为重要，特别是在电量接近充足的时候，电流过大将危及电池极板，殃及电池寿命。超级电容器能接受大电流，并有很高的效率。在能量管理上，它比用化学电源要简便得多。

瑞士 Paul Scherrel Institute（简称 PSI）、Swiss Federal Institute of Technology 和 montena components 联合开发的混合动力车，以 6.5kW 燃料电池和 10kW 双电层电容器组成混合动力源 [71]。燃料电池由 PSI 研制。双电层电容器的电解质为四氟硼酸四乙基铵乙腈溶液。电容器单体的技术指标为：额定电压 2.5V；

容量 800F; 最大比功率 6500W / kg 比能量 2.75Wh / kg 等效串联电阻(1000Hz) 为 1. 0mQ。

电容器组由两组各 24 只单体串联后并联而成, 使电压达到 60V, 容量为 60F, 等效串联电阻 (ESR) 为 20mQ, 最大能量为 30Wh, 最大输出功率为 45kW, 能量回收效率接近 70% 。

(2) 混合型超级电容器

混合型超级电容器的比能量要高于双电层电容器, 比功率大于 1000W / kg, 作为混合动力车的辅助电源也是合适的。混合型超级电容器的一个电极为活性碳电极, 充电时形成双电层, 另一个电极为电池电极, 在此电极上发生电化学氧化还原反应或是离子的嵌入 / 脱出反应而贮存电能。混合型超级电容器的代表性体系有: 活性碳 / H_2SO_4 溶液 / JPbO_2 、活性碳 / KOH 溶液 / NiOOH 、 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ / LiPF_6 乙腈溶液 / 活性碳等。活性碳 / KOH 溶液 / NiOOH 混合型超级电容器已在无轨电车上作为动力源使用, 比功率达到 1000W/kg 再生制动能量回收率最高可达到 40%, 表现出良好的性能。

(3) MH—Ni 电池

MH—Ni 电池是绿色环保型电池, 它是当今被选作混合动力车的重要辅助电源。目前, MH—Ni 电池的比功率已达到 500 ~ 800W / kg。研究报告中报道接近 1000W / kg。助力型混合动力车用 MH。Ni 电池为 D 型电池, 容量为 6.5Ah, 双重模式混合动力车用的 MH—Ni 电池容量在 12 ~ 60Ah 之间。Honda Insight HEV 用 MH—Ni 电池组总能量为 900Wh, 由 120 只 6.5Ah 的 D 型电池组成, 其额定电压为 144V; Toyota Prius HEV 用 MH—Ni 电池组总能量为 1.8kWh, 由 240 只 6.5Ah 的 D 型电池组成, 其额定电压为 288V。如用电池驱动车辆, 行驶距离约 9.6km, 若采用 6.0kWh 的 MH—Ni 电池组, 由电池驱动可行驶约 40km 。

HEV 电池使用高倍率电流脉冲充放电, 放电深度为荷电态改变 2% ~ 10%, 要有 8 ~ 9 万次的循环寿命, 约相当于车辆行驶 16 万公里, 电池寿命终止时表现为比功率明显下降。

尽管, MH—Ni 电池已用于混合动力车作为辅助电源, 并且日本丰田公司不断地增加产量, 但并不能说明该电池没有什么问题了。MH—Ni 电池较适合的工

作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ ，温度低于 -20°C ，充放电性能明显变差；温度高于 $+45^{\circ}\text{C}$ （2，充电效率降

低，负极贮氢合金在较高温度下易发生粉化，致使充放循环寿命下降。要达到在 -30°C 至 $+65^{\circ}\text{C}$ 能长时间正常地工作还有许多工作要做。

据报道，我国自行研制的低温 MH—Ni 电池，在 -40°C 以 0.4C A 电流放电，放电容量可达到其额定容量的 70% 以上，主要在于负极贮氢材料做了改变。另据报道，江苏研制的高温 MH—Ni 电池，他们在正极材料中加入活性二氧化铅，显著地提高了 MH—Ni 电池的高温充电效率。这些可喜成果如何用到混合动力车的 MH—Ni 电池中，需要积极地进行试验。

（4）阀控超电池

由于阀控铅酸蓄电池在部分荷电状态下，高倍率放电导致负极表面形成硫酸铅的紧密层，这种硫酸铅在再充电时很难被还原为金属铅。在高倍率电流充电时，在负极上过早地产生氢气，负极充电效率降低。为了解决这一问题，CSIRO（澳大利亚联邦科学与工业研究组织）研制了“阀控超电池”（Valve—regulated ultra battery），其正极为阀控铅蓄电池的正极，而负极则由一片碳电极和一片铅电极组合而成。

阀控超电池充放电时，通过组合负极的电流 i 由 i_1 和 i_2 组成。负极中的碳电极在高倍率电流充放电时可分担一部分充放电电流，起到缓冲作用。

3.5 锂离子电池

Sony / Nissan 研制的 HEV 锂离子电池，以 1c 倍率电流放电，比能量达到 $62\text{Wh} / \text{kg}$ ，在 50% 荷电状态下，比功率达到 $1000 \sim 1200\text{W} / \text{kg}$ ，其自放电率也较低。但工作温度不能超过 45°C ，否则，充放电循环寿命会减少。另一方面，由于低温下有机电解质导电率低，电池阻抗大，低温充放电性能差。

锂离子电池的充放电控制复杂，需要对每一单体电池充放电控制，充电电压 $\leq 4.20\text{V}$ 。过充电时，一方面是负极可能产生金属锂的沉积，易导致正负极短路，很不安全，这是因为电池电解质使用的非水溶剂是可燃性有机物，并有一定的毒性；另一方面，正极的锂离子脱出过多，会发生相变，影响正极锂离子

子的嵌入能力,使得电池容量下降,寿命缩短。电池组包含几十个单体电池,都要求精确地控制充放电电压,势必增加充电器的成本。

4 结束语

由燃料电池与蓄电池(或超级电容器)组成的混合动力车是真正的绿色交通工具。但这种车辆的价格太贵,其每千瓦的价格目前约为内燃机车价格的 60 倍,推广应用还需要解决氢的生产、贮存和运输的基础设施的配套建设问题。锂离子电池在各种蓄电池中性能最优异,单体电池的电压也最高,组合电池数量少,但其价格较贵,安全性问题比其他蓄电池和超级电容器突出。阀控超电池的价格较低,由于在混合动力车中使用,它处于部分荷电状态,极板的硫酸盐化还是存在的,同时,由于铅、硫酸铅和二氧化铅的摩尔体积相差较大,它的充放电循环寿命不可能满足混合动力车的要求。

从电性能、安全性能和价格等方面综合考虑,MH—Ni 电池和混合型超级电容器(活性碳 I KOH 溶液 I NiOOH)作为混合动力车的辅助电源是目前合理的选择。

参考文献

- [1] Gassmann F, et al. Super capacitors boost the fuel car [J]. Euro physics News, 2003, 34, (5): 1—12.
- [2] 胡信国, 阎智刚, 张宁琳, 等. 国外电动车的发展近况 [J]. 电池, 2001, 31 (3): 138—141.
- [3] 李磊, 冯事成, 杨玉飞, et al. 混合动力汽车制动能量回收领域中电化学技术的应用研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2017 (01): 31—32.
- [4] 胡晓岚. 某混合动力 SUV 制动能量回收系统研究与开发 [D]. 2015.