

电动汽车电池的现状与发展趋势

宋永华, 阳岳希, 胡泽春

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Present Status and Development Trend of Batteries for Electric Vehicles

SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun

(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: With the advent of more stringent regulations related to emissions, energy resource constraints and financial crisis, the world has sparked a global race to electrify transportation. Battery is not only a key component of electric vehicles, but also plays a prominent role as the joint of power and automotive industry. This paper reviews improvements made in the design and manufacture of batteries as well as development of electric vehicles during the past decades. State of the art for three important battery technologies in EV application, namely lead-acid battery, NiMH battery and lithium-ion battery, as well as their current application are presented; and in the viewpoints of chemical properties of the cell and the performances of commercial pack for EV, detailed comparative analyses in technology and economy are performed. The application outlook of EV battery, its development trend in future and new cell technologies being developed are prospected, and it is pointed out that the power sector of China should pay special attentions to the development of EV battery technology, analyze the influences of EV charging load on power grid and take steps in time.

KEY WORDS: batteries; electric vehicle (EV); lead-acid battery; NiMH battery; lithium-ion battery

摘要: 电动汽车电池既是发展电动汽车的核心, 更是电力工业与汽车行业的关键结合点。结合电动汽车的发展历史概述了车用动力电池的发展情况, 重点介绍了 3 种主要电动汽车电池: 铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池的研究现状及当前的应用情况, 并从电池化学性能和商业化的电动汽车电池组性能 2 个角度在技术和经济层面进行了详细的比较分析, 最后对当前电动汽车电池的应用前景、未来发展趋势和研发中的新电池技术进行了展望, 指出中国电力行业应关注电动汽车电池技术的发展, 分析电动汽车充电负荷对电网的影响并及时采取应对措施。

关键词: 电池; 电动汽车; 铅酸电池; 镍氢电池; 锂离子电池

0 引言

能源紧张和气候变化使具有节能环保优势的

电动汽车受到了全球的关注。电动汽车采用电能取代石油等化石燃料作为动力, 是未来交通的唯一长远解决方案^[1]。当前与电动汽车相关的研究热点有电动汽车电机驱动系统, 电动汽车充电技术, 充电谐波分析和充电站监控系统等^[2-8], 其中电动汽车电池技术被视为最主要的难关^[9]。

应用在电动汽车上的储能技术主要是电化学储能技术, 即铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫等电池储能技术。过去这些储能技术分别在比能量、比功率、充电技术、使用寿命、安全性和成本等几方面存在严重不足, 制约了电动汽车的发展。近年来, 电动汽车电池技术的研发受到了各国能源、交通、电力等部门的重视, 电池的多种性能得到了提高, 如锂离子电池技术在安全性方面取得了突破性进展。这些将有望推动电动汽车的大规模商业化。

本文首先介绍电动汽车电池的发展历程, 随后重点介绍了 3 种电动汽车动力电池(铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池)的研发状况和应用实例, 接着从技术和经济层面加以分析, 分别论述其在电动汽车领域的应用前景, 同时介绍几种处于研发阶段的电动汽车最新电池技术。最后根据我国国情, 探讨了电动汽车电池未来的发展方向和研究重点, 同时指出了其对电网的重要影响。

1 电动汽车电池的发展

1837 年 Davidson 于阿伯丁制造了世界上第 1 辆以电池为动力源的车辆^[10]。在 19 世纪末到 20 世纪初之间, 电动汽车由于缺乏成熟的电池技术和合适的电池材料发展得非常缓慢, 以内燃机为动力的传统汽车占领了市场。

第 1 代现代电动汽车 EV1 由美国通用汽车公司在 1996 年制造, 它采用的是铅酸电池技术。1999

年研发的第2代通用汽车公司的电动汽车以镍氢电池为动力源, 一次充电的行驶里程是前者的1.5倍, 同样因无竞争力而退出市场。

同期, 日本丰田汽车公司利用镍氢电池技术制造了将内燃机和电动机相结合的第3代电动汽车, 即混合动力车(hybrid electric vehicles, HEVs)。HEV是具备多个动力源(主要是汽油机、柴油机和电动机), 根据情况同时或者分别使用几个动力源的机动车辆^[11]。镍氢电池成为在电动汽车电池技术的研究领域和市场应用中最受关注的电池。

2006年锂离子电池技术的迅速发展, 特别是在安全性方面的大幅提高, 使之逐步被应用于纯电动车和混合动力车, 成为镍氢电池强劲的竞争者^[12]。

2007年, 插电式的混合动力车(plug-in HEVs, PHEV)诞生了。PHEV与HEV最大的不同是它的电池能量可来自于电网, 而不完全依靠内燃机化石燃料提供。当电池电量高时, PHEV采用纯电动车模式(动力完全来自电池)行驶, 电池电量降低时, 进入传统的HEV模式。

2008年, 金融危机、国际油价的高位震荡和节能减排等产生巨大的外部压力, 全球汽车产业正式进入能源转型时期。世界各国对发展电动汽车实现交通能源转型这样的技术路线达成了高度共识; 电动汽车电池产业同样进入了加速发展的新阶段。

纵观电动车的整个发展过程, 出现过多种不同类型的汽车和电池, 其中产生巨大影响并商业化使用直到现在的电动汽车电池主要有铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池。本文将针对这3种重要的电动汽车电池的研究和应用情况进行介绍。

2 3种类型电动汽车电池的研究和应用情况

2.1 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池1859年由Gaston Plante发明, 以氧化铅为正极板, 以海绵铅为负极板, 硫酸水溶液作为电解液。充放电过程依靠极板上活性物质和电解液发生化学反应来实现^[13]。

铅酸蓄电池是目前在汽车领域应用得最为广泛的电池, 主要作为内燃机汽车内部各种电器和电子设备的电源^[14]。铅酸蓄电池在过去50a被广泛应用, 具有成熟的技术, 可以大批量生产, 生产成本低, 价格便宜。尽管新电池技术不断地产生, 但铅酸蓄电池至今仍作为动力源应用于旅游观光车, 电动叉车或者一些短距离行驶的公交车上。表1^[13, 15]所示为铅酸蓄电池的性能指标和作为汽车动力源

表1 铅酸蓄电池的性能指标及其在电动汽车的应用情况
Tab. 1 Performance indices of lead acid battery and its applications to EVs

比能量/ (W·h/kg)	能量体积密度/ (W·h/L)	比功率/ (W/kg)	循环 次数	单体 电压/ V
30~50	60~75	90~200	500~800	2.105
电动汽车电池组 单体容量/(A·h)	电动汽车电池组 单体质量/kg	电动汽车电池组 单体电压/V	电动汽车 类型	
150	42	12	短距离电动汽车 (如观光车)	

注: 电动汽车电池组模块数据为文献[16]公布的超威集团电动车用密封铅酸电池6DM150, 容量标定为3小时率。

的应用情况, 表中的电动汽车电池组模块相关数据选自文献[16]提供的国内主要电动汽车电池厂家所公布的数据。

应用于电动汽车的新一代阀控式密封铅酸蓄电池(valve-regulated lead acid battery, VRLA)不须维护, 允许深度放电, 可循环使用; 然而VRLA依旧有着铅酸蓄电池比能量和比功率低的致命弱点, 根本原因是金属铅的密度大。功率密度虽可以通过增大电极的表面积来提高, 却会增加侵蚀速度而缩短电池的使用寿命^[17]。充放电方式也会严重影响它的使用寿命, 长期过充电产生的气体会导致极板的活性物质脱落, 不适合放电到低于额定容量的20%, 反复过度放电同样导致寿命急剧缩短; 此外, 在没有定期充满的情况下会有硫酸盐晶体析出, 硫酸盐晶体会使电池的孔隙度降低, 限制活性物质的进入, 导致电池的容量减小。在典型的HEV应用中, 电池经常工作于一个高倍率部分荷电状态, 使用寿命和性能表现会因此受到严重影响。掌握铅酸蓄电池变流放电情况下的电池特性对延长电池寿命有重要意义。文献[18]提出了一种以能势为依据估计电池荷电状态的方法。文献[19]指出VRLA在轻度混合电动汽车中是有应用前景的, 因其成本低、技术成熟、性能可靠, 先进铅酸蓄电池联盟(advanced lead-acid battery consortium, ALABC)在组织研制中度混合的电动汽车使用的VRLA, 但不适于重度混合汽车或纯电动车。

铅酸蓄电池作为电动汽车电池的未来研究重点是解决比能量低的问题, 以及高倍率部分荷电状态时寿命严重缩短的问题。可通过使用密度小的非腐蚀性容器来提高比能量, 再在活性物质中增加碳减轻硫化物以减小对电池容量寿命的影响。文献[15]研究表明在铅酸蓄电池活性物质中加入合适添加剂可使比能量提高到70W·h/kg, 比功率也会大幅提高。

2008年,中国铅酸电池产量占全球总产量的1/3,约为90.77 GVA·h,总产值为1 134亿元^[20]。主要的车用铅酸动力电池生产商有超威电源、江苏双登等^[16]。

2.2 镍氢电池

碱性电池由镍基和碱性溶液电解液构成,主要有镍镉电池、镍锌电池和镍氢电池3种,其中镍氢电池最有应用于电动汽车的竞争力^[17,21]。镍氢电池相对于镍镉电池,比能量较高并对环境无污染。镍锌电池由于容易快速产生枝晶而导致寿命缩短,已有一些方法可解决该问题,如采用第三电极充电,使用新的隔膜和在电解液中添加缓蚀剂等方法^[22];商业化的HEV大多数采用镍氢电池技术。

镍氢电池由氢氧化镍的阳极和由钒、锰、镍等金属形成的多成分合金阴极组成,其性能指标及在电动汽车的应用情况如表2^[23]所示。相对铅酸电池,镍氢电池在能量体积密度方面提高了3倍,在比功率方面提高了10倍。这项技术独特的优势包括:更高的运行电压、比能量和比功率,较好的过度充放电耐受性和热性能。

表2 镍氢电池的性能指标及其在电动汽车的应用情况

Tab. 2 Performance indices of NiMH battery and its applications to EVs

比能量/ (W·h/kg)	能量体积密度/ (W·h/L)	比功率/ (W/kg)	循环 次数	单体 电压/ V
30~110	140~490	250~1 200	500~1 500	1.2
电动汽车电池组 单体容量/(A·h)	电动汽车电池组 单体质量/kg	电动汽车电池组 单体电压/V	电动汽车 类型	
90	2.2	1.2	混合动力车(如混合动力公共汽车)	

注:电动汽车电池组模块数据为春兰(集团)公司电动车用镍氢电池QNFG90,容量标定为3小时率。

镍氢电池广泛应用受限的原因是其在低温时容量减小和高温时充电耐受性的限制;此外,价格也是制约镍氢电池发展的主要因素,原材料如金属镍非常昂贵。文献[9]指出基于镍氢电池的电动汽车电池技术已表现出局限性。镍氢电池虽比铅酸电池储存更多的能量,但过放电会造成永久性损伤,荷电状态(state of charge, SOC)必须被限制在一个较小的范围内,电池储存的大部分能量并没有被实际使用,如丰田Prius只能使用电池20%的能量。另外,否能准确测量镍氢电池的荷电状态直接影响其使用寿命及充放电效率。文献[24]建立了一种基于状态空间的镍氢电池的荷电状态递推算算法。文献[23]

指出对于镍氢电池的研究应该主要解决在实际应用中,在常温和低温的条件下,镍氢电池比功率严重下降的问题,提出可以提高金属氢化物电极表面催化剂的活性来进一步提高镍氢电池的高速充放电功率和容量。文献[25]分析镍氢电池存在的问题可以通过使用合适的添加剂、导电黏结剂和优化电池设计等方式予以解决,指出镍氢电池仍是近期和中期电动车使用的首选动力电池。

2006年我国生产镍氢电池13亿只,出口9.13亿只,创汇 6.06×10^8 USD,超过日本成为世界上镍氢电池第一生产大国。车用电池生产商以春兰动力电池为代表,已掌握电池最新封装技术,各项性能指标达到国际标准,已成为“十城千辆”新能源汽车的主要动力供应商。其研制的混合动力客车用动力电池镍氢电池组及管理系统已在“北京实施混合动力公共汽车示范项目”中应用^[26]。“十城千辆”推广计划的整车制造厂家一汽、二汽和株洲客车等均采用春兰集团的镍氢电池。

2.3 锂离子电池

锂离子电池的传统结构包括石墨阳极、锂离子金属氧化物构成的阴极和电解液(有机溶剂溶解的锂盐溶液)。最常见的锂离子电池以碳为阳极,以碳酸乙烯酯和碳酸二甲酯溶解六氟磷酸锂溶液为电解液,以二氧化锰酸锂为阴极;轻巧结实,比能量大,单体电压约为3.7V^[27]。

表3为锂离子电池的性能指标及其在电动汽车的应用情况^[28-29]。可以看出,相较镍氢电池,锂离子电池具有相对较高的工作电压和较大的比能量,是镍氢电池的3倍。锂离子电池体积小,质量轻,循环寿命长,自放电率低,无记忆效应且无污染;电池单个性能指标的数值范围跨度大,这是因为锂离子电池有较多的电极组合,它们在性能上存在一定的差异。

表3 锂离子电池的性能指标及其在电动汽车的应用情况

Tab. 3 Performance indices of lithium-ion batteries and its applications to EVs

比能量/ (W·h/kg)	能量体积密度/ (W·h/L)	比功率/ (W/kg)	循环 次数	单体 电压/ V
100~250	250~360	250~340	400~2 000	3.7
电动汽车电池组 单体容量/(A·h)	电动汽车电池组 单体质量/kg	电动汽车电池 组单体电压/V	电动汽车 类型	
400	14.4	3.2	纯电动车(如私家车、纯电动公共汽车)	

注:电动汽车电池组单体数据为文献[16]公布的中航锂电有限公司生产的SE400AHA,容量标定为3小时率。

锂离子电池可分为锂离子电池和锂聚合物电池 2 种。锂离子电池的阴极材料主要有锂钴氧化物、锂镍氧化物、锂锰氧化物、磷酸铁锂等，阳极材料主要有石墨、钛酸锂等^[30]。不同阴极材料的锂离子电池部分性能比较如表 4 所示。

表 4 不同阴极材料的锂离子电池性能比较

Tab. 4 Performance comparisons of lithium-ion batteries with different cathode materials

阴极材料	理论容量/ (mA·h/g)	实际容量/ (mA·h/g)	工作电压/ V	安全性能	成本
LiCoO ₂	274	140~155	3.7	一般	高
LiNiO ₂	274	190~210	2.5~4.2	差	居中
LiMn ₂ O ₄	148	90~120	3~4	好	低
LiFePO ₄	170	120~160	3.2	很好	低

文献[27]指出要将锂离子电池大量应用于电动汽车仍然存在问题，主要是因为多种性能的限制，包括锂离子电池的安全性、循环寿命、成本、工作温度和材料供应。锂离子电池目前以小容量、低功率电池为主，大容量高功率的锂离子电池尚未大规模生产，因此针对电池组的电池管理系统中一些不成熟的技术(如均衡充电技术)是锂离子电池尚未在电动汽车中广泛应用的重要原因之一^[31]。

锂离子电池技术的先进性和在新兴关键市场(电动汽车领域)的应用，已激发全球范围内的研发热潮，因此锂离子电池势必将在电动汽车和新能源领域占据重要位置^[17,27,32]。目前在电动汽车中，应用较多的锂离子电池是磷酸铁锂电池，它具有磷氧共价键结构，使氧原子不会被释放出来，因而热稳定性和安全性较好，同时价格相对便宜。这些因素使磷酸铁锂电池成为小型电动汽车和PHEV动力电池首选。然而在锂离子电池中，磷酸锂电池的比能量、比功率以及运行电压相对较低，在大型纯电动车应用方面钴酸锂和锰酸锂电池等更具优势^[20]。

我国锂离子电池产量增长快速，2008 年总产值约 200 亿元，产量约为 9 000 t，质量基本达国际水平。国内锂离子电池关键材料的产业化，为锂离子电池动力电池的发展创造了有利条件^[33]。主要的车用锂离子电池生产商有中航锂电，中信国安盟固利和万向集团等^[16]。北京作为“十城千辆”的代表城市，2009 年开始推广新能源汽车，2011 年北京有 50 辆北汽福田的“迷迪”纯电动出租车开始在延庆试运行。汽车采用北京汽车新能源电池科技有限公司所生产的锂离子电池动力电池，电池容量 25 kW·h，理论续航里程 150 km。

3 电动汽车电池性能分析比较

3.1 基本性能

图 1 为铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池(锂离子电池和锂聚合物电池)的比能量、比功率、安全性等基本性能^[17]。通过比较可以发现，目前这几种电池技术仍然没有一种能够占据每个方面性能的优势地位。这说明目前在电动汽车应用领域出现这些不同种类电池共存的原因，也是各种电池技术在不同程度上存在的缺陷导致电动汽车的发展受到制约而未大规模产业化的原因。

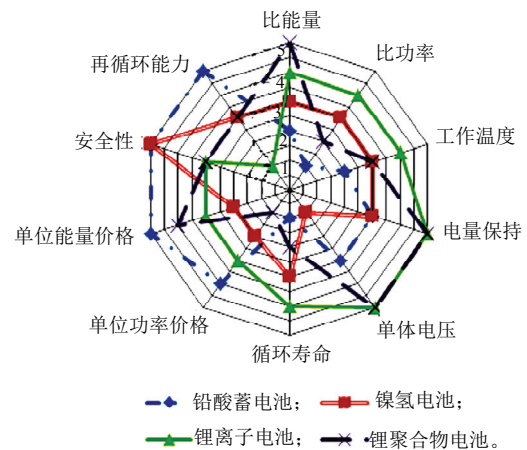


图 1 电动汽车电池性能比较^[17]

Fig. 1 Performance comparison among different kinds of EV batteries^[17]

由图 1 可以看出，在目前市场上的电池中，锂离子电池(锂离子电池和锂聚合物电池)除在价格和安全性方面处于劣势以外，其他方面均处于绝对领先地位，有进一步研发和大规模应用的前景。

3.2 部分商业化电动汽车电池组性能

表 5 为国内外主要电动汽车厂商官方公布的电池组相关数据。这些数据显示近期在电池技术方面的发展使电动汽车更有实力与传统汽车在性能、实用性和价格方面相竞争。

目前主要的汽车公司均采用镍氢电池和各种基于锂离子技术的电池。电池组容量为 3~60 kW·h 甚至更多。由表 5 还可以看出，混合动力车具有其他动力源，因此电池容量较小；而纯电动车不管是行驶里程还是加速性能完全依赖于电池，对于同等大小的汽车，纯电动车会需要一个更大容量和功率的电池组。

此外，文献[34]指出在中国电池成组技术的缺陷导致循环寿命缩短也是制约电动汽车发展的瓶颈之一。如单体循环寿命为 800~1000 次的锂离子电池，成组应用到公交车上后，循环寿命只有

表 5 部分商业化电动汽车电池组性能比较

Tab. 5 Performance comparisons of several EV battery packs on the market

车辆名称	汽车类型	电池类型	容量/(kW·h)	续航里程/km	电池质量/kg	220 V 充电时间/h	快充时间/min	发布年度
通用 EV1	纯电动车	铅酸电池	16.5	90.0~120.0	1 400	—	—	1996
雪弗莱 Volt	混合动力车	锂离子电池	16.0	64.0	185	3	—	2010
丰田 Prius	混合动力车	锂离子电池	5.2	23.4	—	—	—	2010
日产 Leaf	纯电动车	锂离子电池	24.0	160.0	300	7~8	15~20	2010
比亚迪 E6	纯电动车	锂离子电池	63.3	295.0	—	4~6	15	2011

注：—为暂未正式公开官方数据。

400~600 次，甚至更低。

4 电动汽车电池的应用前景和发展展望

根据前述分析，以下是笔者对电动汽车动力电池发展的展望：

1) 铅酸电池。

铅酸电池虽便宜，并在叉车、观光车或者短途公共汽车上作为动力源应用，但新一代铅酸电池的比能量和循环次数仍存在严重的限制。未来使用铅酸电池来驱动在高速公路上行驶的电动汽车是不实际的，但价格优势使其在轻度混合或者短途行驶的电动汽车(如观光车)中仍占一席之地。然而，文献[35]指出近期美国的“下一代电池和电动车”中有一种超级电池(ultra battery)是超级电容器与铅酸电池的并联使用。这种电池具有双电层电容器的高比功率、长寿命以及铅酸电池价格便宜的优势，将具有市场竞争力。

2) 镍氢电池。

镍氢电池虽然具有较高的比能量和比功率等优点；但由于需要大量使用镍和钴其成本较高，镍钴的稀缺性会导致其大批生产和使用时价格反而会上涨。目前，它仍然大量地应用于混合动力车，随着锂离子电池的大规模生产和成本的降低，镍氢电池终将退出。例如，日本丰田汽车公司宣布最新一代 Prius 不再使用镍氢电池而使用锂离子电池。镍氢电池是电动汽车过渡阶段使用的电池，但在近期和中期仍然是非常关键的动力电池之一。

3) 锂离子电池。

目前市场上的电池中，锂离子电池(锂离子电池和锂高聚合物电池)的性能最好，同质量的锂离子电池其能量是铅酸电池的 4~6 倍，是镍氢电池的 2~3 倍。价格和大功率锂离子电池的安全性是它的最主要缺点^[28]。2007 年镍氢电池的价格约为 1 500 USD/kW·h，锂离子电池价格为 750~1 000 USD/kW·h^[32]；因此价格劣势主要是相对铅酸蓄电池等而言。锂离子电池的主要原材料为锂，我国的锂矿资源丰富，已探明

的锂总储量居世界第 2；锂离子也存在于海水中，未来可利用太阳能从海水中提取。此外，锂离子电池具有循环使用的潜力，可解决对原材料的需求问题^[36]。最终锂离子电池的价格在大规模商业化之后会下降。实际上，国内外越来越多的汽车厂家选择锂离子电池作为电动汽车的动力电池，锂离子电池技术方面的研究也在不断地取得突破。我国的电动汽车科技发展“十二五”专项规划中指出将推动以锂离子动力电池为重点的车用动力电池产业发展，使之具有国际竞争能力。文献[29]介绍近期在钒基磷酸盐锂电池技术上取得了进展，此种锂离子电池将比目前广泛应用的磷酸铁锂电池具有更高的功率和更好的车辆应用性能。对于锂离子电池技术最大的挑战是继续扩大电池容量，同时保证安全性和循环次数不受影响，并降低成本。此外，电动汽车电池的快速充放电能力对于它未来作为风电和太阳能等新能源发电的备用非常重要。文献[37]介绍了一种快速导电离子表面技术，能够在 10~20 s 内使充满的磷酸铁锂电池完成放电。

4) 新电池技术。

目前看来磷酸铁锂、锰酸锂电池一类的锂离子电池仍有改进的空间，但潜力有限。各国研究机构都针对电动汽车需求加紧新电池的研究工作。

KOLIBRI 电池技术由德国 DBM Energy 公司研发，是一种锂聚合物电池^[38]。实际应用中电池组容量高达 100 kW·h，质量约为 300 kg(比能量约为 340 W·h/kg)，可提供 55 kW 的功率。电池高性能的基础是先进的膜技术(alpha polymer technology，阿尔法聚合物技术)，它提高了锂离子电池的稳定性和效率；结构上单体组件呈片状，降低高电流发热量，使效率高达 97%。

具有应用前景的还有锂硫电池。锂硫电池为二次锂电池，由单质硫、金属锂和有机电解液组成，具有比能量高、成本低、环境友好的特点。目前已有锂硫电池产品面世，如美国 Sion Power 公司的产品，比能量可达 350 W·h/kg^[39]。

文献[40]介绍了一种正在实验室研发中的固态锂空气电池, 该种电池具有较好的热稳定性和较广的工作温度范围(30~105℃), 且比能量非常高, 在实际使用中可以达到 1 000 W·h/kg。

内燃机和化学电池之间的性能差距难以完全通过新电池技术来解决, 还需其他方法辅助, 如燃料电池, 这些可能完全改变现有电动汽车电池储能系统^[37]。氢燃料电池虽然已经有应用, 但由于液氢的体积能量密度(2.6 kW/L)相对于汽油(6 kW/L)较低, 需要更大的燃料缸, 制氢的成本偏高, 电池膜等材料昂贵, 因此氢燃料电池的推广应用还需要时间^[32]。

5 结论

电动汽车电池作为汽车的储能装置, 既要求有足够的能量来满足一定的驾驶周期和行驶里程, 又要提供能达到车辆指定的加速性能所需要的最大功率。当目前市场上电池成本降低或处于实验室研究阶段的电池技术发展成熟后, 汽车制造厂商必然会提高电动汽车电池组的容量、功率等以增加电动汽车的行驶里程和汽车性能。电力行业应关注电动汽车电池的各种性能、容量和功率, 不仅是要能在短期内提供可靠的充电设施和网络, 研究针对大规模电动汽车充电的有序控制, 在满足电池充电需求的同时降低其对电网的负面影响; 此外, 还应研究电动汽车回馈电网技术, 利用电动汽车的电池电能存储系统向电网提供辅助服务, 以提高电网的运行效率和安全性。

参考文献

- [1] Smith M. Batteries versus biomass as a transport solution[J]. *Nature*, 2009, 457(7231): 785.
- [2] 何洪文, 余晓江, 孙逢春, 等. 电动汽车电机驱动系统动力特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(6): 136-140.
He Hongwen, Yu Xiaojiang, Sun Fengchun, et al. Study on power performance of traction motor system for electric vehicle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(6): 136-140(in Chinese).
- [3] 任桂周, 常思勤. 一种电动汽车能量高效回馈制动方法[J]. *电网技术*, 2011, 35(1): 164-169.
Ren Guizhou, Chang Siqin. A high-efficiency regenerative braking for electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(1): 164-169(in Chinese).
- [4] 张承宁, 王再宙, 宋强. 基于传声器阵列电动汽车用电机系统噪声源识别研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 109-112.
Zhang Chengning, Wang Zaizhou, Song Qiang. Research of noise source identification of traction motor system for electric vehicle based on microphone array[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 109-112(in Chinese).
- [5] 周玉栋, 许海平, 曾莉莉, 等. 电动汽车双向阻抗源逆变器控制系统设计[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(36): 101-107.
Zhou Yudong, Xu Haiping, Zeng Lili, et al. Control system of bi-directional z-source inverter for electrical vehicles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(36): 101-107(in Chinese).
- [6] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电桩谐波的工程计算方法[J]. *电网技术*, 2008, 32(20): 20-23.
Huang Mei, Huang Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(20): 20-23(in Chinese).
- [7] 李娜, 黄梅. 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析[J]. *电网技术*, 2011, 35(1): 170-174.
Li Na, Huang Mei. Analysis on harmonics caused by connecting different types of electric vehicle chargers with power network[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(1): 170-174(in Chinese).
- [8] 严辉, 李庚银, 赵磊, 等. 电动汽车充电桩监控系统的设计与实现[J]. *电网技术*, 2009, 33(12): 15-19.
Yan Hui, Li Gengyin, Zhao Lei, et al. Development of supervisory control system for electric vehicle charging station[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(12): 15-19(in Chinese).
- [9] Tollefson J. Car industry: charging up the future[J]. *Nature*, 2008, 456(7221): 436-440.
- [10] Hender B S. Recent developments in battery electric vehicles[J]. *Proceedings of the IEE: London*, 1965, 112(12): 2297.
- [11] 广瀨久士, 丹下昭二. 电动车及混合动力车的现状与展望[J]. *汽车工程*, 2003, 25(2): 204-209, 115.
Guangnaijiushi, Danxiazhaoer. Present situation and future prospects of electric vehicles and hybrid electric vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2003, 25(2): 204-209, 115(in Chinese).
- [12] Burke A F. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(4): 806-820.
- [13] 张彦琴. 铅酸蓄电池技术的发展[J]. *汽车电器*, 2004(10): 1-3.
Zhang Yanqin. Development of the lead-acid battery technology[J]. *Auto Electric Parts*, 2004(10): 1-3(in Chinese).
- [14] Caumont O, Le Moigne P, Rombaut C, et al. Energy gauge for lead-acid batteries in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000, 15(3): 354-360.
- [15] Edwards D B, Kinney C. Advanced lead acid battery designs for hybrid electric vehicles[C]//Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Long Beach, CA, USA: AIAA; Electrochem. Soc. Dept. Water & Power, City of Los Angeles; Independent Battery Manuf. Assoc. Int. Cadmium Assoc. (North America); Int. Battery Technol. Southern California Edison Company, 2001: 207-212.
- [16] 李玲. 国内车用电池产业现状大盘点[J]. *商用汽车新闻*, 2010(34): 6-7.
Li Ling. Status of China electric vehicle battery industry[J]. *Commercial Vehicle News*, 2010(34): 6-7(in Chinese).
- [17] Lukic S M, Cao J, Bansal R C, et al. Energy storage systems for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(6): 2258-2267.
- [18] 裴锋, 黄向东, 罗玉涛, 等. 电动汽车动力电池变流放电特性与荷电状态实时估计[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(9): 164-168.
Pei Feng, Huang Xiangdong, Luo Yutao, et al. Variable current discharge characteristics and SOC estimation of EV/HEV battery[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(9): 164-168(in Chinese).
- [19] 郭自强. 电动车电池的发展现状[J]. *电池工业*, 2008, 13(1): 55-59.
Guo Ziqiang. Development status of batteries for EVs[J]. *Chinese*

- Battery Industry, 2008, 13(1): 55-59(in Chinese).
- [20] 赵瑞瑞, 任安福, 陈红雨. 中国铅酸电池产业存在的问题与展望[J]. 电池, 2009, 39(6): 333-334.
Zhao Ruirui, Ren Anfu, Chen Hongyu. Current problem and perspectives of lead-acid battery industry in China[J]. Battery Bimonthly, 2009, 39(6): 333-334(in Chinese).
- [21] Dhar S K, Ovshinsky S R, Gifford P R, et al. Nickel metal hydride technology for consumer and electric vehicle batteries-A review and up-date[J]. Journal of Power Sources, 1997, 65(1-2): 1-7.
- [22] 王家捷, 穆举国, 茹海涛. 镍镉动力电池的发展和应用[J]. 电池工业, 2006, 11(3): 194-196.
Wang Jiajie, Mu Jugu, Ru Haitao. Development and application of nickel-zinc batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2006, 11(3): 194-196(in Chinese).
- [23] Fetcenko M A, Ovshinsky S R, Reichman B, et al. Recent advances in NiMH battery technology[J]. Journal of Power Sources, 2007, 165(2): 544-551.
- [24] 吴友宇, 肖婷, 雷冬波. 电动汽车用动力镍氢电池 SOC 建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2008(1): 55-58.
Wu Youyu, Xiao Ting, Lei Dongbo. Mathematic model and simulation analysis on NiMH battery in electric vehicle and its SOC estimation[J]. Journal of WUT: Information & Management Engineering, 2008(1): 55-58(in Chinese).
- [25] 徐顺余, 高海鸥, 邱国茂, 等. 混合动力汽车车用镍氢动力电池分析[J]. 上海汽车, 2006(2): 7-9.
Xu Shunyu, Gao Haiou, Qiu Guomao, et al. Analysis of nickel-hydrogen battery on hybrid vehicle[J]. Shanghai Auto, 2006(2): 7-9(in Chinese).
- [26] 张丽华, 王彦. 近年镍氢电池发展状况及前景[J]. 稀土信息, 2008(12): 34-35.
Zhang Lihua, Wang Yan. Recent development and prospects of NiMH[J]. Rare Earth Information, 2008(12): 34-35(in Chinese).
- [27] Scrosati B, Garche J. Lithium batteries: status, prospects and future[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2419-2430.
- [28] Ritchie A, Howard W. Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(2Sp. Iss. SI): 809-812.
- [29] Huang H, Faulkner T, Barker J, et al. Lithium metal phosphates, power and automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1Sp. Iss. SI): 748-751.
- [30] 谢先宇, 王潘, 安浩, 等. 汽车用动力锂离子电池发展现状[J]. 上海汽车, 2010(1): 21-25.
Xie Xianyu, Wang Pan, An Hao, et al. Development situation of power li-ion battery in vehicle[J]. Shanghai Auto, 2010(1): 21-25(in Chinese).
- [31] 韩广欣, 韩金东, 张秀军, 等. 锂离子电池组均衡充电的研究进展[J]. 电池工业, 2009, 14(1): 65-68.
Han Guangxin, Han Jindong, Zhang Xiujun, et al. Research progress on equalization charging of Li-ion battery[J]. Chinese Battery Industry, 2009, 14(1): 65-68(in Chinese).
- [32] Khaligh A, Li Z H. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [33] 陈立泉. 锂离子电池: 从基础研究到产业[J]. 新材料产业, 2009(10): 89-91.
Chen Liquan. Lithium-ion battery: from research to industry[J]. Advanced Materials Industry, 2009(10): 89-91(in Chinese).
- [34] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
Zhang Wenliang, Wu Bin, Li Wufeng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5(in Chinese).
- [35] 崔俊博, 张勇, 王晶星. 电动汽车用动力电池的研究[J]. 新技术新工艺, 2010(9): 81-84.
Cui Junbo, Zhang Yong, Wang Jingxing. Study on the power battery of the electric vehicle[J]. New Technology & New Process, 2010(9): 81-84(in Chinese).
- [36] Armand M, Tarascon J M. Building better batteries[J]. Nature, 2008, 451(7179): 652-657.
- [37] Kang B, Ceder G. Battery materials for ultrafast charging and discharging[J]. Nature, 2009, 458(7235): 190-193.
- [38] Dbm R T. Energy's electric Audi A2 completes record setting 372 mile drive on a single charge[EB/OL]. [2010-07-08]. <http://hotgadgetnewz.com/2010/10/27/dbm-energys-electric-audi-a2-completes-record-setting-372-mile-drive-on-a-single-charge>.
- [39] 王圣平, 周权, 周成冈, 等. 锂硫电池硫电极的研究现状[J]. 电池, 2010, 40(4): 232-235.
Wang Shengping, Zhou Quan, Zhou Chengang, et al. Research status quo of sulfur electrode for lithium/sulfur battery[J]. Battery, 2010, 40(4): 232-235(in Chinese).
- [40] Kumar B, Kumar J, Leese R, et al. A solid-state, rechargeable, long cycle life lithium-air battery[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(1): A50-A54.



宋永华

收稿日期: 2011-01-11.

作者简介:

宋永华(1964), 男, 教授, 英国皇家工程院院士, IEE Fellow, IEEE Fellow, 研究方向为智能电网、灵活交流输电系统的稳态和暂态分析与控制、电力系统商业化运营的理论及现代优化算法、电力系统非线性与自适应控制和智能故障诊断系统等,
E-mail: yhsong@tsinghua.edu.cn;

阳岳希(1988), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网、电动汽车对电网技术和需求响应等, E-mail: doloresyang@gmail.com;

胡泽春(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网、电力系统优化调度、电压稳定性及电力市场, E-mail: zechhu@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)