

# 电动汽车关键技术发展综述

王丹, 续丹, 曹秉刚

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

**[摘要]** 介绍了电动汽车关键技术发展状况, 分别从电动汽车用驱动电机、动力电池及电池管理系统、电机控制及能量回收系统等方面进行了概述, 并对电动汽车技术发展趋势进行了展望。在政府的支持下, 随着电机、电池及电控等电动汽车关键技术逐步完善, 电动汽车必将成为“零污染”的清洁交通工具。

**[关键词]** 电动汽车; 电机; 电池; 能源管理系统; 能量回收系统

**[中图分类号]** U469.72 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0068-05

## 1 前言

在能源危机和低碳环保的双重压力下, 世界各国都积极发展电动汽车, 日本、美国、德国的电动汽车品牌都占据了一定的市场份额。我国自2001年确立“三纵三横”研发布局以来, 在混合动力、纯电动及燃料电池汽车方面都取得了可观的成果<sup>[1]</sup>。在过去的十几年中, 对驱动电机、动力电池及电控系统等电动汽车技术进行了全面研究, 取得了诸多关键技术的改进与突破。目前我国的电动汽车技术正处于由科研向产业化转变的阶段, 产业化过程中

还面临着诸多电动汽车关键技术的问题和挑战, 有待进一步解决。

## 2 电动汽车用驱动电机

电动汽车用驱动电机不同于一般的工业电机, 根据其使用条件, 一般要求电机具有效率高、功率密度大、过载能力强、质量轻、尺寸小、可靠性好及成本低等性能<sup>[2,3]</sup>。电动汽车用驱动电机主要有直流电机(DCM)、无刷直流电机(BLDCM)、永磁同步电机(PMSM)、交流感应电机(IM)及开关磁阻电机(SRM)等<sup>[4,5]</sup>。各种电机性能比较如表1所示。

表1 各种电机性能比较

Table 1 Comparison of the motor's properties

性能	直流有刷电机	交流感应电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
功率密度	差	一般	好	一般
转矩转速特性	一般	好	好	好
效率	差	一般	高	一般
转速范围/(r·min <sup>-1</sup> )	4 000~6 000	9 000~15 000	4 000~15 000	>15 000
易操作性	最好	好	好	好
可靠性	差	好	一般	好
结构的坚固性	差	好	一般	好
尺寸及质量	大,重	一般,一般	小,轻	小,轻
成本	高	低	高	低于感应电机
控制器成本	低	高	高	一般

20世纪90年代前开发的电动汽车一般采用直流电机驱动, 但随着电力电子技术及电机控制技术

的发展, 使无刷直流电机、永磁同步电机、交流感应电机及开关磁阻电机等应用于电动汽车时能够带

**[收稿日期]** 2012-07-09

**[作者简介]** 王丹(1988—), 女, 陕西西安市人, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车控制技术和机电系统制; E-mail: wangdan10@stu.xjtu.edu.cn

来更好的性能,因此直流电机逐渐被淘汰。无刷直流电机一般用于小型电动汽车,如时风电动车。永磁同步电机由于成本高及使用时间长时易退磁等缺点而难以广泛使用,主要应用在混合动力汽车中,如日本丰田的Prius,目前笔者也在研究其应用于纯电动汽车领域的可行性,其中速达电动轿车(SDEV)试验车即采用永磁同步电机驱动,能量利用效率高,每百公里耗电10 kW·h(度)。交流感应电机由于其良好的性价比而广泛用于纯电动汽车,从而降低了纯电动汽车的成本,如速达电动汽车,美国的电动汽车驱动电机也较多使用交流感应电机。开关磁阻电机主要用于客车中。

在电动汽车用驱动电机的生产方面,由华中科技大学开发的全数字化开关磁阻电机、中船712所开发的永磁无刷电机以及中国科学院北京三环通用电气公司开发的电动汽车专用7.5 kW轮毂电机等,都有一定的突破<sup>[6]</sup>。而国外的电动汽车用驱动电机较为成熟,如日本东京电机公司、富士电子研究所及尼桑公司开发的永磁同步电机,美国德州仪器、TVMC的感应电机等。

### 3 动力电池

#### 3.1 动力电池存在的问题及其发展

电池技术一直是制约电动汽车发展的关键因素,它是整车的动力之源,直接影响电动汽车的续航里程,甚至是影响整车质量及成本。世界电动车协会主席陈清泉院士指出,我国电动汽车用电池存在两个问题,即对电池缺乏深层次分析和缺乏评价体系<sup>[7]</sup>。这一方面需要国家和企业在电池研究上加

大投入,另一方面要求投入更多的资金来分析整个电池产业链,建立电池评价体系。

电动汽车用动力电池必须具备一定的条件,即安全性好、成本低、能量密度和功率密度高及使用寿命长等。目前电动汽车用动力电池主要有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、超级电容及燃料电池<sup>[8]</sup>。铅酸电池成本低、性能可靠、技术成熟,1996年通用汽车的EV1即使用的是铅酸电池,克莱斯勒公司1998年的EPIC汽车上使用先进的铅酸电池,由于受到比能量和循环次数等因素的影响,铅酸电池主要用于短途行驶或轻度混合的电动汽车中。但是介于铅酸电池的成本低易于普及的优势,开发铅酸电池有很大的必要性,笔者也将进一步致力于这方面的研究与开发。目前美国和日本积极发展镍氢电池,如福特公司1999年推出的Ranger EV和丰田的Prius混合动力汽车等都采用镍氢电池。但镍氢电池的比能量值较低且储氢难,一般应用于混合动力汽车,作为辅助动力。自2006年以来,锂离子电池作为动力电池发展迅速,其质量轻、比能量和比功率都比铅酸电池高,提高了汽车的续航里程,且寿命高于铅酸电池,如新一代的丰田Prius不再使用镍氢电池而改用锂离子电池。另外,雪弗莱Volt,日产Leaf,比亚迪E6等均采用锂离子电池,但成本高、安全性不好是制约其发展的重要因素。表2<sup>[9]</sup>为上述电动汽车电池组的性能比较。燃料电池实现了真正的零污染,其反应产物是水,能量密度高、能量转换效率高、可靠性好,是一种理想的动力电池,因此国家“十二五”“863”计划给予燃料电池车大力支持,但由于其成本太高、储氢困难,近年内并不能实现真正的产业化。

表2 几款电动汽车电池性能比较<sup>[9]</sup>

Table 2 Performance comparison of several EV battery packs<sup>[9]</sup>

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	90~120	1 400	-	-	1996
雪弗莱 Volt	混合动力	锂离子电池	16.0	64	185	3	-	2010
丰田 Prius	混合动力	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	300	7~8	15~20	2010
比亚迪 E6	纯电动车	锂离子电池	63.3	295	-	4~6	15	2011

注:“-”为暂未公开官方数据

铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、锂聚合物电池及超级电容的比能量、比功率、循环寿命等性能比较如表3所示<sup>[10]</sup>。由表3可知,各种电池都或多或少存在一些问题,其中锂离子电池除了在安全性、价格等方面不如人意,其他方面都处于领先地位,

有进一步发展和大规模应用的前景。陈清泉院士指出“十二五”期间,能量型动力电池是主要发展方向,兼顾超级电容器和功率型动力电池的发展,并要重点突破动力电池系统的安全性、一致性、耐久性 & 低成本等关键技术<sup>[11]</sup>。

表3 电动汽车用电池性能比较

Table 3 Performance comparison among different kinds of EV battery

性能	铅酸电池	镍氢电池	锂离子电池	锂聚合物电池	超级电容
比能量	较低	一般	较高	高	低
比功率	低	一般	较高	较低	高
工作温度	较低	一般	较高	一般	高
安全性	好	好	差	一般	一般
循环寿命	短	一般	较长	较短	长
再循环能力	好	一般	差	一般	较好
单位功率价格	较低	较高	一般	高	低
单位能量价格	低	较高	一般	较低	高

### 3.2 电池管理系统

为提供充足的能量,电动汽车往往需要使用多块电池供电,电池管理系统完成均衡多块电池电量的工作,并使其处于最佳状态,具有监测电池工作状况及SOC(state of charge)检测的功能。此外,电池管理系统还应具有与外部设备通信、控制充电方式的功能。对电池管理系统的研究很多,如徐剑鸣等设计的基于太阳能电池、超级电容和蓄电池3种能量源的电动汽车复合能源系统<sup>[12]</sup>,叶敏等设计的基于CAN总线的电动汽车能源管理系统<sup>[13]</sup>,南金瑞等为北京理工大学和北方客车厂联合研制开发的电动客车BFC6110EV的锂离子电池管理系统<sup>[14]</sup>等,都不同程度地改善了电池管理系统的性能。孙逢春等则为北京公交的纯电动客车用动力电池建立了动态测试工况,为测试动力电池的动态性能及评价在对应工况下动力电池的适应性奠定了基础<sup>[5]</sup>。这些研究在电池管理的方式或是在电池管理采用的算法上加以改进,既有理论研究,又有基于车体的实际应用,大大提高了电池管理系统的性能。

目前,电动汽车在动力电池技术和电池管理系统发展的推动下已取得相当可观的成果。河南省三门峡市的速达电动轿车(SDEV)采用永磁同步电机和锂离子电池,充电一次的续驶里程可达270 km以上,最高时速150 km/h以上,能源利用效率高,质量轻、操作性和舒适性好,并可利用家用220 V电源稳定充电。西安交通大学团队研发的电动汽车采用永磁同步电机驱动,动力电池采用120 A·h的铅酸电池,续驶里程达到100 km以上。目前国内的电池产量和技术水平很高,如超威电源有限公司和江

苏双登集团有限公司等,国外的有日本松下、丰田、索尼,美国Ovonic和USABC公司,德国瓦尔塔公司等。2012年6月10日,美国《自然化学》杂志刊登了一项由韩国汉阳大学教授宣良国率领的研究小组取得的研究成果<sup>[16]</sup>,该小组开发出续航时间是现有电动汽车电池5倍的新一代电动汽车用高性能锂空气电池系统,电池充电一次续驶里程可达820 km,且电池价格低、质量轻,有望在5年后实现商业化,这无疑为电动汽车发展提供了又一有利的条件。

## 4 电机控制及能量回收系统

### 4.1 电机控制器

随着电力电子技术进步,各种微处理器功能日趋强大,电机控制器不断数字化、智能化。电动汽车的变速和方向变换是靠电机调速系统来完成的,目前电机调速一般采用电力晶体管(MOSFET、IGBT、BTR、GTO等)的斩波调速装置来完成<sup>[17]</sup>,交流异步电机、永磁同步电机及无刷直流电机等的换向只需改变磁场三相电流导通顺序即可完成,省去了传统电机换向时采用的接触器,大大简化了控制电路,提高系统的可靠性。电机的控制方式主要有变频调速控制、矢量控制、直接转矩控制等。在此基础上,为了优化电机性能,采用了模糊控制、神经网络、自适应控制、专家系统、遗传算法、分数阶及滑模变结构等智能控制方法<sup>[18-21]</sup>,使系统鲁棒性、动态响应能力得到提高,转矩脉动得到抑制,系统综合性能得到改善。交流感应电机和永磁同步电机的控制方式基本相同,表4为几种电机控制方式的优缺点的比较。

表4 几种电机控制方式的优缺点比较

Table 4 Advantages and disadvantages comparison of several methods for motor control

控制方式	优点	缺点
变频调速控制	结构简单,成本低	转速控制范围小,转矩特性不理想,控制精度低,动态性能差
矢量控制	损耗小,效率高,可靠性好,转速控制范围宽,动态性能好	结构复杂,成本高
直接转矩控制(DTC)	结构简单,动态响应迅速,直接自控制,控制性能优良	低速转矩脉动大
神经网络矢量控制	良好的动态响应性能,电机参数变化对控制系统影响减弱	网络结构复杂,样本获取训练难
模糊控制自整定PID控制	无超调,响应快,转速波动小,鲁棒性强	结构及控制复杂
分数阶与滑模变复合控制	快速性好,稳定性好,转速波动小,抗干扰能力强	结构复杂,控制算法复杂

## 4.2 能量回收系统

能量回收系统对刹车、下坡及怠速等运行工况时的能量进行回收,不仅可以节约资源、提高电动汽车续航里程,而且可以保护汽车刹车片,提高行车安全性。西安交通大学在电动汽车能量回收方面进行了深入的研究<sup>[22,23]</sup>,率先将 $H_{\infty}$ 鲁棒控制应用于电动汽车能量回收技术当中,显著提高了电动汽车一次性充电的续航里程,并拥有自主知识产权的能量回收型电动车控制器,该控制器被评为科技部、商务部、质检总局和环保总局2005年国家重点新产品。

## 5 电动汽车发展存在的问题及其发展趋势

### 5.1 电动汽车发展存在的主要问题

目前,国内外众多高校、研究所及各大汽车厂商都对电动汽车展开了多方面的研究,取得了不少成果,也有不少电动汽车上市,如通用沃蓝达、日产聆风、三菱i MiEV、比亚迪E6等。然而电动汽车却迟迟未能大规模进入市场,或面临诸如通用沃蓝达半价出售、日产聆风电池老化过快导致销量下滑之类的问题。究其原因,制约电动汽车使用的主要因素有整车续航里程短、动力电池循环寿命及安全性低、价格高等,我国电动汽车用电机、电池技术不成熟,部分部件、材料仍需进口,控制器基础硬件、芯片等也依赖进口。目前,国内外的研究重点是电池技术,通用汽车投入大量资金研究电池及电池评估体系,作为电动汽车的关键技术之一,电池技术一直是电动汽车发展的瓶颈,电池的容量、体积、轻重、寿命长短、价格高低等直接关系到电动汽车的续航里程、价格、安全可靠等各方面因素。解决电池问题,对于电动汽车的普及意义重大。

### 5.2 对电动汽车发展趋势的一些思考

在“十二五”国家科技部“863”计划电动汽车关键技术与系统集成重大项目的推动下,混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车关键技术将逐一攻破,并向产业化过渡。

1)在整车技术方面,根据我国公共交通及私人汽车市场的特色,已经建立了具有自主知识产权的

混合动力、纯电动、燃料电池、动力系统技术平台,并掌握了整车集成技术,很多企业已经开发出系列化的规模应用的产品,并且已经登陆了我国的汽车目录<sup>[24]</sup>。在接下来的发展中,通过改善汽车结构、减轻电池质量、优化汽车使用材料及改进整车集成技术等措施,使电动汽车整车达到“轻灵”的目标。

2)电机控制是电动汽车控制中的关键,在完善电机控制技术之后,系统集成技术成为电动汽车关键技术中的重点,即设计整车控制器,建立各控制模块之间的联系,针对各模块的特点和要求,从整车系统方面来优化控制结果,并对结果进行显示和监控,最终达到优化电动汽车性能,提高汽车舒适性、操作性和安全性等的目的。如当电池电量不足20%时,将电机的输出功率降低,这样建立电池与电机之间的联系,从而达到保护电池的目的。

3)混合动力汽车价格高,仍需使用汽油,且国内技术尚未成熟。其发展方向是充电式(plug-in hybrid)混合动力汽车,特别是利用夜间电力充电的混合动力汽车。据报告,到2017年全球插电式电动汽车的销量将达到100万辆,2020年将达到170万辆,美国在2011—2015年之间预计可卖出41万辆插电式电动汽车,到2018年的累计销量有望达到100万辆。纯电动汽车技术已趋于成熟,国家在“十二五”“863”计划中也加大了对它的投入,随着电池技术的改进,相信在近年来纯电动汽车将大有发展。国家对燃料电池电动汽车依然给予大力支持,但要实现真正的产业化仍然有待其价格的降低和关键技术的突破。

4)随着电动汽车产业的发展,电动汽车用电池需求量增大,电池生产和废旧电池回收处理过程中的污染问题不容忽视,完善电池回收体系,解决重金属、电解质溶液污染迫在眉睫,要边发展边治理,让电动汽车成为真正无污染的交通工具。

## 6 结语

本文通过对电动汽车关键技术发展情况及电动汽车技术发展趋势进行综述,得到如下结论。

1)目前电动汽车用驱动电机主要使用交流感

应电机和永磁电机,而永磁电机的使用则由于价格高及易退磁而受到了限制,但它所具有的独特优势,使我们在这方面还有进一步探索的可能性。随着我国电动汽车产业的发展,迫切需要我国拥有独立自主研发的性能良好的电动汽车用驱动电机。

2) 电池技术一直是制约电动汽车发展的关键因素,是电动汽车发展中存在的最大问题,电池性能的提高、寿命的延长、成本的降低及电池管理系统的日趋成熟对电动汽车的普及至关重要。此外,完善电池的生产管理环节和回收体系,解决电池污染问题,对于电动汽车实现真正的无污染意义重大。

3) 电机驱动控制系统的不断发展对电动汽车用电机运行性能的优化起到非常重要的作用,甚至对提高整车的操作性、舒适性、安全性都有作用。能量回收系统对于节约能源、提高电动汽车续航里程有着非常重要的意义。

4) 在政府政策的鼓励下,各种电动汽车争相怒放。在近几年,尤其是纯电动汽车将逐渐完善其性能,实现产业化,在汽车行业占得一席之地。我们将迎来“零污染”的清洁电动汽车新时代。

#### 参考文献

- [1] 万 钢.你连生存到2015年都不行[J].中国汽车界,2009(21):126-127.
- [2] 谢吉平,刘伟刚,王丽梅.技术决定地位——电动汽车电机技术及发展趋势[J].当代汽车,2010(2):80-85.
- [3] EL-Refaie A M, Alexander J P, Galioto S, et al. Scalable, low-cost, high performance IPM motor for hybrid vehicles[J]. Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, 2010:1-6.
- [4] 李秀芬,雷跃峰.电动汽车关键技术发展综述[J].上海汽车,2006(1):8-10.
- [5] 窦汝振,李 磊,宋剑锋.电动汽车用驱动电机系统的现状及发展趋势[J].变频器世界,2007(2):73-74.
- [6] 曹秉刚.中国电动汽车技术新进展[J].西安交通大学学报,2007,41(1):114-118.
- [7] 郭 琳.电池技术仍需加大投入专访中国工程院院士、世界电动

- 车协会主席陈清泉[J].中国投资,2011(8):64-65.
- [8] 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.
- [9] 宋永华,阳岳希,胡泽春.电动汽车电池的现状与发展趋势[J].电网技术,2011,35(4):1-7.
- [10] 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.
- [11] 陈清泉.电动汽车产业化的挑战与机遇[J].科学中国人,2012(5):30-33.
- [12] 徐剑鸣,康龙云,温懋勤,等.电动汽车复合能源系统设计[J].电力系统自动化,2012,36(3):60-64.
- [13] 叶 敏,孔德刚,曹秉刚.基于CAN总线的电动汽车能源管理系统[J].计算机测量与控制,2010,18(6):1428-1431.
- [14] 南金瑞,孙逢春,王建群.纯电动汽车电池管理系统的设计及应用[J].清华大学学报,2007,47(2):1831-1834.
- [15] 孙逢春,孟祥峰,林 程,等.电动汽车动力电池动态测试工况研究[J].北京理工大学学报,2010,30(3):297-301.
- [16] Hun-Gi Jung, Jusef Hassoun, Jin-Bum Park, et al. An improved high-performance lithium - air battery[J]. Nature Chemistry 4, 2012:579-585.
- [17] 王立颖.电动汽车的关键技术及发展前景[J].汽车工业研究,2009(8):12-15.
- [18] 续 丹,锥焕强,房念兴,等.永磁同步电机分数阶与滑模变结构复合控制研究[J].西安交通大学学报,2012,46(5):132-136.
- [19] Haddoun A, Benbouzid M E H, Diallo D, et al. A loss-minimization DTC scheme for EV induction motors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(1):81-88.
- [20] 叶 敏,曹秉刚.开关磁阻电机自适应鲁棒控制[J].微电机,2010,43(6):48-53.
- [21] Feng Huizong, Li Yangsheng, Huang Zhiyu, et al. A direct torque control (DTC) system's startup modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor (PMSM) on electric vehicle (EV)[J]. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on, 2011, 9:3295-3299.
- [22] 白志峰,曹秉刚.电动汽车驱动与再生制动的H $\infty$ 鲁棒控制[J].西安交通大学学报,2005,39(3):256-260.
- [23] 李舒欣,曹秉刚,白志峰.电动汽车再生制动的模糊PI控制实验研究[J].电气技术,2006(1):52-54.
- [24] 万 钢.我国电动汽车已经进入产业化阶段[J].环境保护,2010(18):13-15.

## Overview on key techniques of electric vehicle

Wang Dan, Xu Dan, Cao Binggang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** This article introduces the key techniques of electric vehicle from the aspects of driving motor, battery, battery management system, motor control and energy recovery system. The development of the key techniques in electric vehicle is presented. With the support of our government, electric vehicle will be used widely in the future along with the development of the key techniques on motor, battery and control system.

**[Key words]** electric vehicle; motor; battery; energy management system; energy recovery system