

电动汽车技术进展和发展趋势

曹秉刚, 张传伟, 白志峰, 李竟成

(西安交通大学电动车研究开发中心, 710049, 西安)

摘要: 通过对国内外电动汽车关键技术的发展现状和技术水平的比较分析, 以及 H 鲁棒控制方法在电动汽车驱动控制、再生制动控制和运动控制系统上应用的研究, 展望了电动汽车的发展趋势。首先发展铅酸蓄电池电动汽车 (BEV) 是明智的选择, 由于开发混合电动汽车 (HEV) 的难度较大, 所以燃料电池电动汽车 (FCEV) 将成为今后的主流技术, 是未来汽车的发展方向。

关键词: 电动汽车; 技术进展; 发展趋势

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)01-0001-05

Technology Progress and Trends of Electric Vehicles

Cao Binggang, Zhang Chuanwei, Bai Zhifeng, Li Jingcheng

(R & D Center of Electric Vehicle, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under the pressure of both environment protection and energy conservation, the development of EVs (electric vehicles) has been taken on an accelerated pace all over the world. This research focuses on the current status of EVs' key technology and their state of the art, where, H robust control method is used for driving control, regenerative braking control and motion control for EV. The prospects of EVs indicate that BEV (battery electric vehicle) is the primary selection nowadays, and instead of HEV (hybrid electric vehicle), FCEV (fuel cells electric vehicle) has long term potential for future mainstream vehicles.

Key words: electric vehicle; technology process; trend

自 1886 年发明了汽车以来, 汽车就成为人们日常生活中不可缺少的代步和运输工具, 因此缩短了人们之间的距离, 改变了人们的生活方式, 提高了人们的生活质量。由于汽车要消耗大量的石油资源、排放大量的废气、制造噪音和严重污染环境, 因此也带来了无法回避的负面影响。我国 2000 年进口石油 7 000 万 t, 计划到 2005 年将超过 1 亿 t, 给国家造成了沉重的经济负担。更严重的是目前世界上空气污染最严重的 10 个城市中我国就占了 7 个, 国家环保中心预测, 到 2010 年汽车尾气的排放量将占空气污染源的 64%^[1]。面对如此严峻的形势, 电动汽车 (EV) 的研究与开发引起了世界各国的关注。

1 电动汽车的发展历史及现状

电动汽车是 20 世纪最伟大的 20 项工程技术成就中前两项技术的融合, 即“电气化”和“汽车”的融合产物^[2]。它不是当代人的新近想法, 其构想与研制均早于燃油车, 但由于性能不如燃油车, 使其研究与开发工作一度停滞。20 世纪 70 年代的能源危机和石油短缺, 又使电动汽车获得了生机, 到了 20 世纪 80 年代, 随着人们对于空气质量和温室效应的关注, 对电动汽车的研究热情进入了空前高涨期。从 20 世纪 90 年代初起, 世界各大汽车集团公司如 Ford、GM、Nissan、Toyota 和 Honda 等, 都在电动

汽车上投入了较大的资金,并研制出多种电动汽车及电动汽车概念车,如 Ford 的 Think city, GM 的 EV1, Toyota 的 RAV4、Prius 和 FCEV, Honda 的 EV Plus、Insight 和 FCX-V3 等^[3,4]. 国内随着国家十五计划“八六三”电动汽车重大科技专项的正式启动,全国各地也掀起了一股研制和开发电动汽车的热潮.

电动汽车除了在能源、环保和节能方面显示出优越性和具有强大的竞争力外,在车辆性能方面也显示出了巨大的优势. 电动汽车的转矩响应迅速、加速快,比燃油汽车高出 2 个数量级,电机可分散配置,通过线传电子控制技术直接控制车轮转速,易实现四轮独立驱动和四轮转向^[5]. 由于网络技术、信息技术和线控技术的广泛应用,使智能交通系统 (ITS) 的实现也变得非常简单,还可以实现再生制动和能量回收,因此提高了电动汽车制动的安全性和可靠性.

电动汽车在广义上可分为 3 类,即纯电动汽车 (BEV)、混合动力电动汽车 (HEV) 和燃料电池电动汽车 (FCEV). 目前,这 3 种电动汽车都处于不同的发展阶段,面临着不同的困难和挑战. BEV 只适用于低速短距离的运输,而 HEV 的性能既能够满足用户的需求,又实现了低油耗、低排放. 在目前的技术水平和应用条件下,HEV 是比较理想的交通工具,但它必须具备 2 个动力源,因此价格较高. FCEV 具有很大的潜力,可望在 10~15 年以后实现实用化^[6~9].

2 电动汽车的关键技术

电动汽车作为机械、电子、能源、计算机、汽车、信息技术等多种高新技术的集成,是典型的高新技术产品,其最终目标是实现智能化、数字化和轻量化. 目前,研制和开发的关键技术主要有电池、电动机、电动机控制、车身和底盘设计,以及能量管理技术等,其中前 3 项是电动汽车的发展瓶颈.

2.1 电动汽车用电池

电池是电动汽车的动力源泉,也是一直制约电动汽车发展的关键因素. 电动汽车用电池的主要性能指标是比能量 (E)、能量密度 (E_d)、比功率 (P)、循环寿命 (L) 和成本 (C) 等. 要使电动汽车能与燃油汽车相竞争,关键就是要开发出比能量高、比功率大、使用寿命长的高效电池.

到目前为止,电动汽车用电池经过了 3 代的发展,已取得了突破的进展. 第 1 代是铅酸电池,目前

主要是阀控铅酸电池 (VRLA),由于其比能量较高、价格低和能高倍率放电,因此是目前惟一能大批量生产的电动汽车用电池. 第 2 代是碱性电池,主要有 Ni-Cd、Ni-MH、Na/S、Li-ion 和 Zn/Air 等多种电池,其比能量和比功率都比铅酸电池高,因此大大提高了电动汽车的动力性能和续驶里程,但其价格却比铅酸电池高. 第 3 代是以燃料电池为主的电池. 燃料电池直接将燃料的化学能转变为电能,能量转变效率高,比能量和比功率都高,并且可以控制反应过程,能量转化过程可以连续进行,因此是理想的汽车用电池,但目前还处于研制阶段,一些关键技术还有待突破. 第 2 代电动汽车用电池与美国先进电池联合会 (USABC) 制定的电动汽车用电池的中、长期目标的简单对比见表 1^[1,10~12].

表 1 第 2 代 EV 用电池参数与 USABC 中长期目标的对比

电池类型	$E/\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_d/\text{Wh}\cdot\text{L}^{-1}$	$P/\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$	$L/\text{次}$	$C/\text{\$}\cdot(\text{kWh})^{-1}$
VRLA	30~45	60~90	200~300	400~600	150
Ni-Cd	46~60	80~110	150~350	600~1 200	300
Ni-MH	60~70	130~170	150~300	600~1 200	200~350
Zn/Air	230	269	105	90~120	
Na/S	100	150	200	800	250~450
Li-ion	90~130	140~200	250~450	800~1 200	>200
中期	100	135	200	600	<150
长期	200	300	400	1000	<100

由表 1 可见,现有任何一种电池都很难完全达到 USABC 的长期发展目标,但通过比较分析,可以发现 VRLA、Ni-Cd 和 Ni-MH 的性能基本满足近期要求,具有极大的潜力. 因为铅酸电池已有 100 多年的历史,VRLA 技术比较成熟、成本低廉、可靠性好,仍将得到广泛的应用,而 Ni-Cd 电池基本上已被 Ni-MH 电池代替,Ni-MH 电池性能比较优越,也具有很大的吸引力^[11,12].

Zn/Air、Na/S 和 Li-ion 电池的技术参数比较接近中期目标,其中 Na/S 电池也是近期普遍看好的电动汽车电池,而 Li-ion 电池的比能量、放电率、充放电寿命及密封性均可以满足 USABC 制定的中期目标. 因此,只要能采用廉价材料,电动汽车用 Li-ion 电池必能获得长足的发展,目前关键是要降低批量化生产的成本、提高电池的可靠性、一致性及寿命^[12].

燃料电池 (FC) 是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能,通过电极反应直接转化为电能的发电

装置.现在应用于电动汽车的是一种称为质子交换膜的燃料电池(PEMFC),它以纯氢为燃料,以空气为氧化剂,不经历热机过程,不受热力循环限制,因此能量的转换效率高,是普通内燃机热效率的 2~3 倍^[13].同时,它还具有噪音低、无污染、寿命长、启动迅速、比功率大和输出功率可随时调整等特性,使得 PEMFC 非常适合用作交通工具的动力源.有关专家预言:21 世纪燃料电池电动汽车将可能成为汽车的主体.因此,目前世界各国政府以及各大汽车公司纷纷投入巨资,进行 PEMFC 电动汽车的研究与开发^[14].

2.2 电动机及其控制技术

电动机与驱动系统是电动汽车的关键部件,要使电动汽车有良好的使用性能,驱动电机应具有调速范围宽、转速高、启动转矩大、体积小、质量小、效率高且有动态制动强和能量回馈等特性^[15,16].目前,电动汽车用电动机主要有直流电动机(DCM)、感应电动机(IM)、永磁无刷电动机(PMBLM)和开关磁阻电动机(SRM)4类,它们的性能对比如表2所示^[17~20].近几年来,电动汽车用电机逐渐由直流向交流发展,直流电动机基本上已经被交流电动机、永磁电动机或开关磁阻电动机所取代.

表 2 电动汽车用电动机及驱动系统的性能比较

比较内容	电机类型			
	DCM	IM	PMBLM	SRM
电机功率密度	差	一般	好	一般
转矩转速特性	一般	好	好	好
转速范围	小	一般	大	最大
效率	差	一般	高	一般
易操作性	最好	好	好	好
可靠性	差	好	一般	好
成本	高	低	高	较高
电机尺寸	大	一般	小	小
电机质量	重	一般	轻	轻
控制性	好	好	好	一般
综合性能	差	一般	最好	好

由于直流电机结构简单,技术成熟,具有交流电动机所不可比拟的优良电磁转矩控制特性,所以直到 20 世纪 80 年代中期,仍是国内外电动汽车用电机的主要研发对象.但是,直流电动机价格高、体积和质量大,因此在电动汽车上的应用受到了限制.

感应电机也是较早用于电动汽车驱动的一种电机,它的调速控制技术比较成熟,具有结构简单、体积小、质量小、成本低、运行可靠、转矩脉动小、噪声

低、转速极限高和不用位置传感器等优点.其控制技术主要有 V/F 控制、转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制(DTC).在 20 世纪 90 年代以前,主要以 PWM 方式实现 V/F 控制和转差频率控制,但因转速控制范围小,转矩特性不理想,因此不适合频繁启动、频繁加减速的电动汽车.近几年来,由感应电动机驱动的电动汽车几乎都采用矢量控制和直接转矩控制.矢量控制又有最大效率控制和无速度传感器矢量控制,前者是使励磁电流随着电动机参数和负载条件的变化,从而使电动机的损耗最小、效率最大;后者是利用电动机电压、电流和电动机参数来估算出速度,不用速度传感器,从而达到简化系统、降低成本、提高可靠性的目的.直接转矩控制克服了矢量控制中解耦的思想,把转子磁通定向变换为定子磁通定向,通过控制定子磁链的幅值以及该矢量相对于转子磁链的夹角,从而达到控制转矩的目的.由于直接转矩的控制手段直接、结构简单、控制性能优良和动态响应迅速,因此非常适合电动汽车的控制.美国以及欧洲研制的电动汽车多采用这种电机^[19].

永磁无刷电动机可以分为由方波驱动的无刷直流电动机系统(BLDCM)和由正弦波驱动的无刷直流电动机系统(PMSM),它们都具有较高的功率密度,其控制方式与感应电机基本相同,因此在电动汽车上得到了广泛的应用,是当前电动汽车用电机研发热点.BLDCM 系统不需要绝对位置传感器,一般采用霍尔元件或增量式码盘,也可以通过检测反电动势波形换相.PMSM 系统需要绝对式码盘或旋转变压器等转子位置传感器,这类电机具有较高的能量密度和效率,其体积小、惯性低、响应快,非常适应于电动汽车的驱动系统,有极好的应用前景.目前,由日本研制的电动汽车主要采用这种电机^[20,21].

开关磁阻电动机(SRM)具有简单可靠、可在较宽转速和转矩范围内高效运行,控制灵活、可 4 象限运行、响应速度快和成本较低等优点.实际应用发现,SRM 存在着转矩波动大、噪声大、需要位置检测器等缺点,所以应用受到了限制^[22].

随着电机及驱动系统的发展,控制系统趋于智能化和数字化.变结构控制、模糊控制、神经网络、自适应控制、专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术,都将各自或结合应用于电动汽车的电机控制系统.它们的应用将使系统结构简单,响应迅速,抗干扰能力强,参数变化具有鲁棒性,可大大提高整个系统的综合性能.

3 西安交通大学的电动汽车研究

西安交通大学电动汽车研究开发中心改装的 XJ TUEV-1 电动汽车, 经过性能测试, 最高时速为 55 km/h, 一次充电行驶里程为 165 km (有控再生制动时可达 180 km), 并在此基础上, 进行了电机驱动、再生制动、运动控制和运行状态监控等方面的研究。

3.1 电机与驱动控制

针对电动汽车驾驶模式多变、路况复杂等特点, 对电动汽车的电机与驱动控制方面进行了深入的研究, 首次将 H 鲁棒控制方法应用于电动汽车的驱动控制和永磁直流电机的再生制动, 取得了满意的效果。图 1 所示为 XJ TUEV-1 电动汽车控制系统的电压电流双闭环结构, 并通过对电机驱动电流进行控制来提高系统的性能。理论仿真和实验表明, 在车辆运行过程中, 虽然系统参数变化较大, 但因控制算法的鲁棒性强, 因此控制效果明显优于传统的 PID 控制。

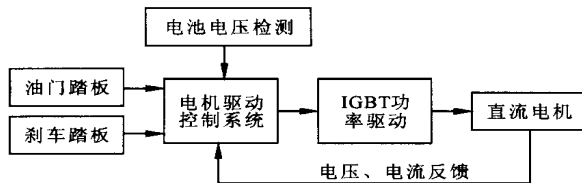


图 1 电动汽车的驱动控制系统

电机驱动控制器采用 DSP2407 芯片, 控制一个 IGBT 的半桥结构, 实现电动汽车的驱动与再生制动。倒车通过倒车挡来实现, 使电机由 4 象限运行变成 2 象限运行, 因此节约了控制器的成本。油门踏板与刹车踏板分别给出控制电机的驱动电流与能量回馈电流的指令, 通过电流传感器与电压传感器构成闭环系统, 实现电机驱动力矩的控制与回馈电流的控制。

3.2 再生制动控制系统

制约电动汽车发展的一个关键因素是它的续驶里程问题, 而再生制动可以节约能源、提高续驶里程, 具有显著的经济价值和社会效益。同时, 再生制动还可以减少刹车片的磨损, 降低车辆故障率及使用成本。

图 2 所示为 XJ TUEV-1 电动汽车再生制动控制系统的结构图, 该系统由超级电容或飞轮及其控制器组成, 而利用超级电容或飞轮吸收再生制动能量, 具有非常突出的优点。当车辆制动时, 电机工作

于发电机工况, 将一部分动能或重力势能转化为电能储存在超级电容或飞轮中, 由于超级电容或飞轮的功率密度大, 因此可以更快、高效地吸收电机回馈能量。在车辆启动和加速时, 利用双向 DC/DC 将存储的能量释放出来, 协助电池向电机供电, 不但增加了电动汽车一次充电的行驶里程, 而且避免了蓄电池的大电流放电, 达到了节省能源、降低刹车片磨损和提高蓄电池寿命的目的。

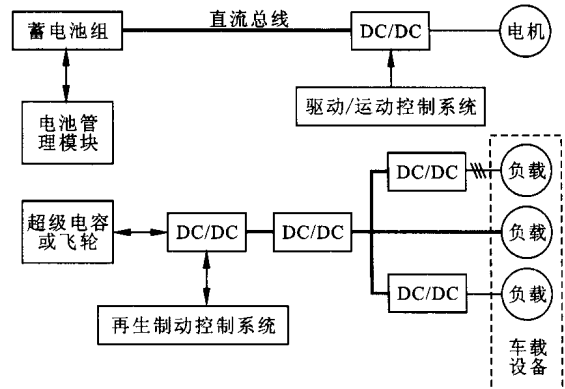


图 2 电动汽车再生制动控制系统

3.3 运行状态监控系统

传统的燃油汽车基本没有故障诊断系统, 但是对于电动汽车, 其驱动与控制系统由电力电子器件组成, 所以可以方便地获取各种传感器信号。在电动汽车上建立适时监控和故障诊断系统, 可以为车辆维修服务提供便捷的通道。

3.4 运动控制系统

电动汽车发展的一个重要趋势是采用轮边独立驱动控制。采用轮边驱动的电动汽车在国内的研究几乎是一项空白, 而日本、欧美等国已经开始进行了研究。西安交通大学电动汽车研究开发中心通过对电动汽车进行整车运动学建模及整车运动学的分析, 比较了前轮驱动和后轮驱动、单电机和双电机轮边驱动情况下的整车驱动效率。以城市公交车、出租车为研究对象, 这些车辆在城市交通道路上转向行驶时间较多, 而后轮驱动的车辆在转向行驶时一般驱动效率都较低, 基于此提出了一种新颖的电机驱动模糊控制方法^[23], 这种方法可以合理地分配 2 个驱动轮上的驱动力矩, 减小前轮所受的侧向力。

4 电动汽车的发展趋势

现在, 零排放电动汽车的技术已经逐渐成熟, 并已开始商品化, 一次充电行程基本能满足市区交通的要求。大规模应用的主要问题是电动汽车的初始

成本高和续航里程不理想,而燃料电池电动汽车仍处于研发阶段,要想低成本批量生产仍有待时日。BEV 可以实现零排放,由于一次充电行程短,因此只适用于特定的场合,如社区交通、零排放管制的城市,以及娱乐场所的短途运输等。HEV 正在国内外形成新一轮的技术开发热点,它可以提高燃油的经济性,但不能达到零排放,只能改善排放。在零排放电动汽车未形成主流之前,HEV 可起到过渡性发展的作用,因此是目前可以大批量生产、替代燃油汽车、减少废气排放的较现实的电动汽车。可以预见在未来的 10 年中, BEV 和 HEV 将在其特定市场范围内扩大其商业化生产规模并占有各自的份额,而增长速度将取决于它们的价格因素。在 20 年以后, FCEV 会成为未来的主流技术,定会有长远的市场前景,其商业化速度也会加快,因为只有它在续航里程和性能方面能与燃油车相媲美。

尽管电动汽车在 20 世纪前就已经存在,但现在的电动汽车不仅是以电动机、控制器和电源组成的以电驱动系统为基础的车辆,而且是实现清洁、高效、智能的道路运输系统的一个全新系统,是一个便于和现代交通网络结合的智能系统。无论从环保角度还是从能源角度来看,未来的电动汽车都需要有一个大的发展,其开发关系到众多工业的兴衰,可能成为未来新的经济增长点。根据我国国情,我国大部分城市普遍存在着十分严重的交通问题和汽车尾气排放污染问题,因此发展中小型电动汽车的市场更独特、应用前景更广阔。政府应鼓励电动汽车按市场机制开发,同时要抓紧充电站等基础设施的建设,并在政策、法规上予以支持。可以预见,未来的汽车将是由电气、机械和控制技术运行的车辆,也只有开发清洁、高效、智能的电动汽车,才能使 21 世纪的交通可持续地发展。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002. 1~22.
- [2] 陈清泉,詹宜君. 21 世纪的绿色交通工具——电动汽车[M]. 北京:清华大学出版社,2001. 1~16.
- [3] Chan C C. The state of the art of electric and hybrid vehicles[J]. Proceeding of IEEE,2002,90(2):1~29.
- [4] Riazenman M J. Engineering the EV future[J]. IEEE Spectrum, 1998,35(11):18~20.
- [5] Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control - research on four wheel motored "UOT electric march II" [J]. IEEE Advanced Motion Control,2002(7):1~14.
- [6] 陈清泉,孙逢春. 混合电动汽车基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001. 1~6.
- [7] 曾 斌. 世界电动汽车发展动态[J]. 中国机电工业,2002(9):15~17.
- [8] Kashima S. The present condition and the future of EV-sharing in Japan[J]. IEEE Vehicle Electronics Conference, 2001,9:149.
- [9] Chan C C. The past present and future of electric vehicle development[J]. IEEE Power Electronics and Drive Systems, 1999,1:11~13.
- [10] McDowall J. Conventional battery technologies - present and future[J]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting,2000,3:1538~1540.
- [11] 任学佑. MH/Ni 电池的发展现状[J]. 电池,2002,32(5):301~304.
- [12] 田春霞. 电动汽车用先进电池的现状与发展[J]. 电池,2000,30(2):83~85.
- [13] 何 仁. 燃料电池汽车研究现状与发展前景[J]. 汽车工业研究,2001(2):29~34.
- [14] MacArther D. Fuel cells for electric vehicles: issues and progress[A]. Battery Conference on Applications and Advances, California, 1999.
- [15] Chan C C. Engineering philosophy of electric vehicles [J]. Electric Machines and Drives, 1999(5):255~257.
- [16] Wyczalek F A. Hybrid electric vehicles: year 2000 status [J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2001,16(3):15~25.
- [17] 易将能,韩 力. 电动汽车驱动电机及其控制技术综述 [J]. 微特电机,2001(4):36~38.
- [18] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2002. 1~12.
- [19] 宋凌锋,刘克彬,邹继明,等. 电动车感应电机驱动系统效率和转矩控制仿真[J]. 微电机,2002,35(3):31~35.
- [20] 闵庆云,周杏生,谈骏良. 电动汽车用永磁无刷直流电机的控制与驱动[J]. 中小型电机,1998,25(4):29~31.
- [21] Li Jingcheng, Cao Binggang, Yang Zhongqing. Variable structure control of brushless DC motor [A]. First Circular of China-Japan Electric Vehicle Joint Conference [C]. Beijing, 2001. 128~132.
- [22] 张金平,张奕黄. 电动汽车用开关磁阻电机的 DSP 控制系统[J]. 电机电器技术,2002(4):2~4.
- [23] 李竟成,曹秉刚,康龙云,等. 电动汽车运动学建模与模糊控制[J]. 系统仿真学报,2003(3):372~374.

(编辑 管咏梅)