电动汽车电机驱动系统关键技术

孔　亮

近年随着我国交通事业的飞速发展，交通领域成为我国能耗增长最快的领域。能源危机和环境污染的加剧，使电动汽车研发成为世界汽车工业可持续发展的战略性项目，世界各国也普遍将发展电动汽车确立为保障能源安全和转型低碳经济的重要途径。

1881 年，第一辆电动汽车由法国工程师古斯塔夫·士维（Gustave Trouve）制造问世，它是采用铅酸蓄电池供电，由 0.1 hp（英制马力，1 hp=745.7 W）的直流电机驱动的三轮电动汽车，整车及其驾驶员的重量约 160 kg。两位英国教授在 1883 年制成了相似的电动汽车。因当时该应用技术尚未成熟到足以与马车竞争，因此这些早期构造并没有引起公众很多的注意。

20 世纪 40 年代之后，半导体技术快速发展，随后出现的晶闸管、三极管，尤其是在 20 世纪 80 年代问世的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为电机调速与控制提供了便利，同时伴以电力电子技术的快速发展，为以电能为能源的电机取代以石油为能源的内燃机提供了技术基础。

一、电动汽车分类

根据国标 GB/T 19596-2004 电动汽车术语，电动汽车可分为由动力电池提供能源的纯电动汽车、电机和内燃机共存的混合动力汽车和以燃料电池为能源的燃料电池电动汽车，这三类电动汽车均采用一个及以上的电机驱动系统将电能转换为机械能，进而驱动汽车，同时回收刹车的制动能量，从而实现了能量利用率的提升。

1. 纯电动汽车

纯电动汽车由电机驱动汽车，能量完全由二次电池（如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池或锂离子电池）提供。由于一次石化能源的日趋匮乏，纯电动汽车被认为是汽车工业的未来。典型的纯电动汽车动力结构如图 1 所示。电池组的电能通过充电系统在车辆行驶一定里程后进行补充。纯电动汽车的特点是车辆实现零排放，不依赖汽油，完全采用电能驱动车辆，但是由于蓄电池的能量密度和功率密度比汽油或柴油低很多，因此纯电动汽车的连续行驶里程有限。

2. 混合动力汽车

混合动力汽车按动力总成结构及能量流传递方案不同，可分为串联、并联及混联三种混合动力方式。串联混合动力车辆中，发动机动力与电动机动力通过电气系统传递；并联和混联混合动力车辆中，发动机动力与电动机动力通过一个专门的机电耦合机构实现向车轮的传递，常用的机电耦合机构包括行星齿轮耦合、变速器耦合及离合器耦合等。

串联式混合动力系统的动力总成如图 2 所示，发动机的机械能通过发电机转化为电能，电动机将电能转换为机械能传到驱动桥，驱动桥和发动机之间没有直接的机械连接。该方案的优点是系统控制简单，缺点是难以应对复杂路况，电池充放电压力较大，电池寿命要求较高。

典型的并联式混合动力系统如图 3 所示，电机与发动机通过齿轮减速机构实现动力耦合。并联混合动力具有三种驱动模式：发动机单独驱动，电动机单独驱动，发动机和电动机混合驱动。并联式混合

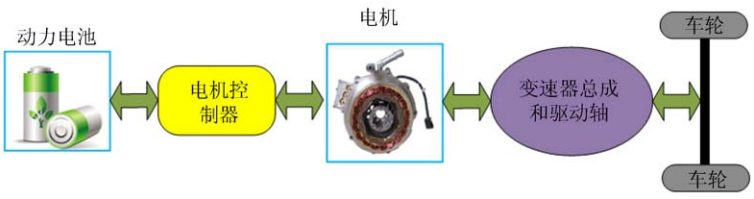


图 1　纯电动汽车动力总成结构

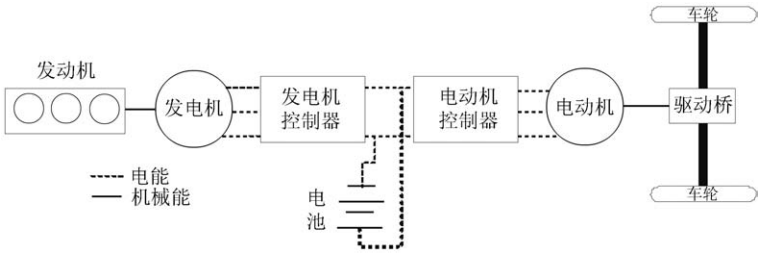


图 2　串联式混合动力总成结构

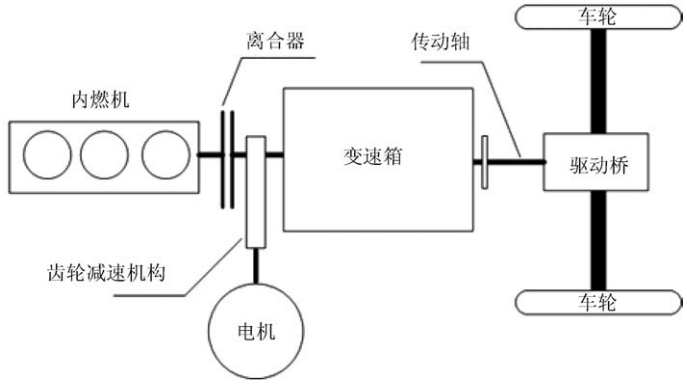


图 3　并联式混合动力总成结构

动力总成具有如下优点：

（1）发动机和电动机两个动力总成，两者的功率分别可以等于 50% ～ 100% 车辆驱动功率，比串联混合动力汽车的三个动力总成的功率、质量和体积小。

（2）发动机可直接驱动车辆，能量转换综合效率比串联混合动力汽车高。车辆需要最大输出功率时，电动机可以给发动机提供额外的辅助动力，因此可配置小功率发动机，燃油经济性比串联式混合动力汽车好。

（3）与电动机配套的动力电池组容量较小，整车质量减轻。

但是，并联混合动力汽车需要装配变速器、离合器、传动轴和驱动桥等结构，还需装配电动机、动力电池组和动力组合器等装置，因此动力系统结构复杂，结构布置和整车控制更困难。

著名的混合动力汽车 Pruis 采用混连式混合动力总成，耦合器采用行星齿轮结构，发动机与行星齿轮的行星架相连，发电机连接太阳轮，电动机连接齿圈。通过控制离合器、两个电机及制动器工作状态，可以实现多种工作模式。混联式混合动力系统与串联式混合动力系统相比，增加了机械动力的传递路线，与并联式混合动力系统相比，增加了电能的传输路线。混连式混合动力系统具有如下优点：

（1）三个动力总成比串联式混合动力三个动力总成的功率、质量和体积小。

（2）电动机可独立驱动车辆行驶。利用电动机低速大转矩特性，带动车辆起步，在城市中实现“零污染”行驶。车辆需最大输出功率时，电动机可为发动机提供辅助动力，因此发动机功率小，燃油经济性好。

但是混连式混合动力系统需要配备两套驱动系统；发动机传动系统需要装配离合器、变速器、传动轴和驱动桥等传动总成；另外，还有电动机、减速器、动力电池组，以及多种能源动力（发动机动力与电动机动力）组合或协调专用装置。

3. 燃料电池电动汽车

燃料电池是一种通过电化学反应的方式将燃料和氧化剂的化学能转化为电能的装置，具有高能量

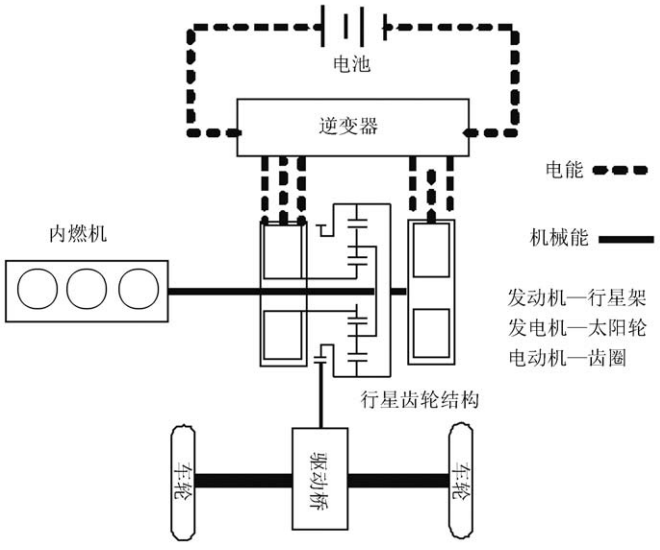


图 4　混连混合动力总成结构

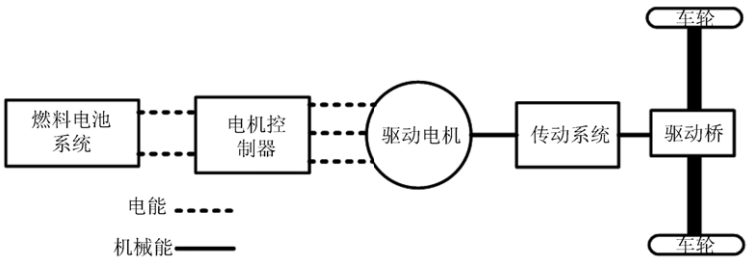


图 5　燃料电池车动力总成结构

转换效率和“零排放”特点，成为电动汽车的候选电源。燃料电池电动汽车具有系统机构简单，便于系统布置，有利于整车轻量化的优点。但是由于燃料电池寿命短，系统功率密度低、装置可靠性难以保证等问题，导致燃料电池电动汽车近年来发展缓慢。

二、中科院电工所电动汽车研发工作

我国政府一直十分重视电动汽车三大核心技术的开发。“九五”以来，在国家科技部、中国科学院的支持下，中国科学院电工研究所承担了多项国家科技部、中国科学院和北京市重大科研任务，在“九五”期间，研制了达到 90 年代末国际先进水平的电动汽车交流异步电机全数字矢量控制系统，被应用在我国首台纯电动轿车概念车上，填补了国内电动汽车交流异步电机全数字矢量控制驱动的空白，这项技术被评为“九五”国家科技攻关优秀成果，获得了国家科技部、财政部、国家计委和国家经贸委的表彰；同期还与中国科学院大连化物所、东风汽车工程研究院共同研制出我国第一台具有完全自主知识产权的燃料电池轻型客车，被评为机械工业优秀成果，得到中国机械工业联合会的表彰。“十五”期间，电工所完成了“863”电动汽车专项中单机功率密度最高的混合动力轿车电机驱动系统、单机功率最大的锂离子纯电动大巴电机驱动系统等研制工作。28 kW/ 10 kW 高功率密度永磁双电机系统应用在东风电动车辆股份有限公司的混合动力轿车上，通过了各种性能试验和型式认证试验；在科技部和北京市科委的支持下，中科院电工所将高转矩密度 / 高功率密度的交流异步电机驱动系统首次用于北京市 121 路公交车，自 2005 年 6 月始累计运行了 16 万千米，于 2008 年 8 月投入奥运中心区运行。2008 年，北京中科易能新技术有限公司（中科院电工所技术成果产业化基地）与上海安乃达驱动技术有限公司等联合成立了上海电驱动有限公司。中科院电工所的电动汽车电机驱动系统技术还向中国北车永济新时速电机电器有限责任公司等公司推广。

“十一五”以来，我国已自主开发了满足各类电动汽车需求的驱动电机系统产品，获得了一大批电机系统的相关知识产权，初步形成了车用驱动电机系统的小批量生产能力。总体来说，在电动汽车关键零部件方面，电机技术的进步明显，与国际先进的水平相比，基本指标相当。以上海电驱动有限公司为例，到目前为止，已经形成车用驱动电机系统、车用 ISG 电机（汽车起动、发电一体机）系统、车用轮毂电机系统等三个样机系列。车用驱动电机系统功率范围涵盖 10 ～ 90 kW、峰值转矩涵盖 60 ～ 300 Nm，转速范围涵盖 5000 ～ 11500 rpm；车用 ISG 电机峰值功率范围 9 ～ 30 kW，峰值转矩 60 ～ 150 Nm，最高转速达 6500 rpm；车用轮毂电机峰值功率范围 2.8 ～ 15 kW，峰值转矩 150 ～ 250 Nm，峰值转速范围 510 ～ 1350 rpm，已经初步形成了具有自主知识产权的电机驱动及相关配件的技术和生产能力。

三、车用电机驱动系统

车用电机驱动系统是电动汽车的关键技术和共性技术。因为受到车辆空间限制和使用环境的约束，车用电机驱动系统不同于普通的电传动系统，它要求具有更高的运行性能、比功率，以及适应更严酷的工作环境等。为了满足这些要求，车用电机驱动系统的技术发展趋势基本上可以归纳为电机永磁化、控制数字化和系统集成化，电机及其驱动系统的结构如图 6 所示。

1. 高功率密度车用电机控制器

电动汽车中主驱动电机控制器一般采用典型的三相桥式电压源逆变电路。其主要部件包括：功率模块、直流侧支撑电容和叠层母线排。根据车辆对控制器的功率等级需求，功率模块大多采用绝缘栅双极型晶体管 （Insulated Gate Bipola Transistor， IGBT），直流侧支撑

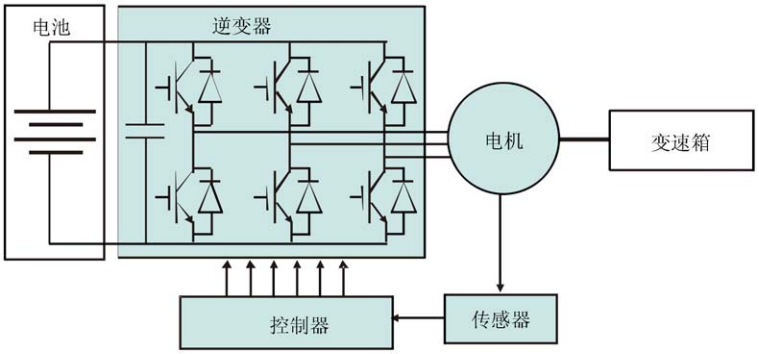


图 6　车用电机驱动系统

电容是控制器中最重要的无源器件，主要作用是吸收功率模块开关造成的直流侧脉动电流，稳定直流侧输出电压电流，从而提高蓄电池使用寿命，其体积和重量对控制器的功率密度有很大影响。因此，IGBT 功率模块和直流侧支撑电容是提高控制器性能和成本控制的关键。

为了提高 IGBT 功率模块的运行性能和可靠性，并降低成本，中国科学院电工研究所联合国内功率模块封装企业进行具备自主知识产权的国产智能IGBT功率模块研发。在 IGBT 设计方面进行了大量分析优化和工艺设计工作。

中国科学院电工研究所应用智能 IGBT 功率模块和金属膜电容技术所研制的 60 kW 高功率密度电机控制器的重量比功率为 4 kW/kg，体积比功率为 6 kW/L。并且成功应用于力帆 LF620 纯电动警务车，服务于 2010 年上海世博会。

2. 高功率密度车用电机

目前，电动汽车用电动机主要有异步电机、永磁电机和开关磁阻电机。电动车辆的驱动电机属于特种电机，是电动汽车的关键部件。要使电动汽车有良好的使用性能，驱动电机应具有较宽的调速范围及较高的转速，足够大的启动扭矩，体积小、质量轻、效率高且有动态制动强和能量回馈的性能。目前电动汽车所采用的电动机中，直流电动机基本上已被异步电动机、永磁同步电机或开关磁阻电机所取代。由于永磁同步电机具有结构紧凑、效率高、功率密度高的优势，近年来广泛用于电动汽车应用。为了进一步满足车辆应用的特殊需求，混合励磁电机、盘式电机等新型特种电机也应用于车用领域。电动汽车所用的电机正在向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。

（1）永磁同步电机

电机是以磁场为媒介进行电能和机械能相互转换的电磁装置，在电动汽车中起到了将电池中的电能装换为驱动车辆的机械能，或将汽车需制动时多余的机械能转换为电能存储在电池中。为了在电机内建立进行电能转换所必需的气隙磁场，可以采用电机内绕组通以电流来产磁场，另一种是由永磁体产生磁场。由于稀土钕永磁体和钕铁硼永磁体都是高剩磁、高矫顽力、高磁能积永磁体，用于制造永磁电机可以获得较强的气隙磁场，减小了电机体积，质量轻，损耗小，效率高，电机的形状和尺寸灵活多样，适合于车用电机高功率密度的需求。典型的车用永磁电机结构如图 7 所示，该电机为丰田普锐斯（Pruis）所用的驱动电机。



图 7　普锐斯驱动电机

永磁同步电机在运行过程中定子绕组通以三相对称电流，在电机气隙中建立与电机转子同步旋转磁场，通过控制算法调节电流的相位与频率，实现电机在全转速范围内的稳定运行。

（2）混合励磁电机

永磁电机的永磁磁链无法调节的缺点，在恒定供电电压下带来了弱磁控制问题：车辆动力性能要求电机系统在高转速下需要较宽的恒功率调速范围保证车辆的高速性能。由于受到电池电压的限制，目前大部分永磁电机系统采用增加定子绕组去磁电流的方法抵消永磁磁场，从而达到恒定供电电压下弱磁调速的目的。但这种方法降低了系统效率和功率因数，增加了控制器成本，同时还存在深度弱磁控制时稳定性差和高速失控时的电压安全问题。混合励磁电机是解决以上问

题的可行技术。

混合励磁电机在永磁电机与电励磁电机的基础上演变而来，通过在永磁电机中引入电励磁绕组使电机获得励磁可控的性能，电机更适合于宽速度范围、高弱磁比的应用场合，弥补了单一励磁方式的不足。中国科学院电工研究所以旁路式混合励磁电机为研究对象，在电机结构、电机参数特性、电机数学模型及励磁电流规划等方面进行了深入的研究。旁路式混合励磁电机工作原理如图 8 所示，为最大程度继承永磁电机高效、高功率密度的优点，电机励磁主要由永磁磁势提供，电励磁磁势主要用与增强或削弱主磁路磁通，通过调节电励磁电流的大小实现电励磁助磁与弱磁功能。

混合励磁电机具有助磁和弱磁两个工况：

（1）助磁工况：电励磁助磁工况下的磁路如图 8（a）所示。N 极侧的电励磁磁力线从电励磁端盖通过轴向气隙进入电机转子 N 极，与永磁体磁力线一同通过主气隙与电枢绕组交链，一部分磁力线通过端盖闭合，另一部分磁力线通过电机轭部与主气隙进入转子 S 极，通过 S 极侧轴向气隙进入电励磁旁路闭合。

（2）弱磁工况：电励磁弱磁通过励磁电流反向实现，反向的电励磁磁势与永磁体磁势建立与助磁工况下电励磁旁路中相反的磁力线方向，部分永磁体磁力线不经过主气隙与电枢绕组交链，实现电机弱磁运行。

综合来看，与传统无刷永磁电机相比，旁路式混合励磁电机具有显著优点：如低速时增大励磁以提高输出转矩；高速运行时减小或反向励磁从而拓宽电机的恒功率弱磁区；降低电机在高速运行下的铁损，提高效率；动态调节励磁电流大小，提高负载变化时发电电压动态性能；减小电枢反应弱磁磁势，降低永磁体高温运行时的失磁风险等。混合励磁是未来车用永磁电机的一个重要发展趋势。

3. 车用电机控制技术

针对电机控制系统强非线性、参数变化，以及汽车对电机系统高速和宽调速范围的一些需求，中科院电工所重点围绕高性能电机驱动系统适用于车用工况的安全可靠与高效节能运行控制的技术难点，提出了死区补偿技术，解决了纯电动汽车低速轻载工况的低速脉动问题；提出了基于单调节器的深度弱磁控制方法和解耦控制技术，解决了电动汽车电机驱动系统高速运动控制和高速发电控制难题。

随着纯电动汽车的发展，对电机的恒功率弱磁特性要求越来越高，人们希望电机的输出特性能够完全覆盖汽车的驱动特性，从而省去变速机构，节省空间体积和成本。因此，弱磁控制成为车用电机控制的重要研究方向之一。而经中科院电工所研究发现，目前常用的双电流环弱磁控制中，存在发生不可逆的失控可能，造成严重的系统故障和安全隐患。电工所致力于弱磁控制多年，提出了性能可靠、全局受控的弱磁控制策略，经试验验证恒功率区可达 1:6，完全满足车用需求。

四、总结

我国在传统内燃机车辆方面较国外存在一定差距，但是电动汽车正处在起步阶段，我国在电机驱动领域积累了丰富的经验和扎实的理论，近年来也在电动汽车关键技术研发方面投入较大，培育了大批的研发机构和生产企业，虽然目前的发展中存在困难和曲折，但是并没有改变政府和产业界发展电动汽车的决心。虽然传统内燃机车辆还占据目前车辆市场的绝对主导，但是发展清洁的电动汽车在能源、环境和技术方面都是大势所趋。伴随着相关技术的发展，电动汽车将会迎来进入寻常百姓家的一天。

（北京中国科学院电工研究所 100190）

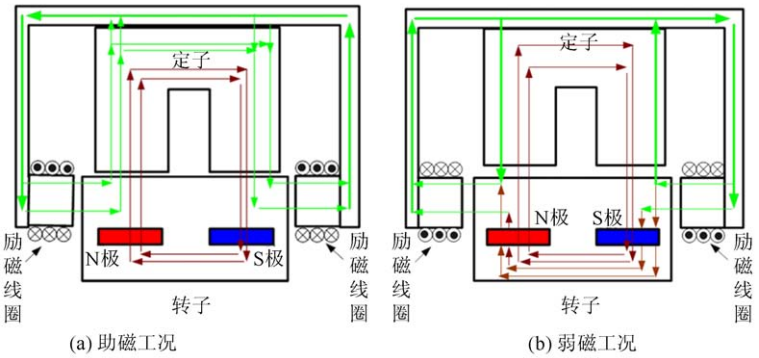


图 8　旁路式混合励磁电机工作原理

（带箭头的实线为永磁磁力线，带箭头的虚线为电励磁磁力线）