

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 汽车驱动电机系统的构成

动力系统电动化是提高汽车能量转换效率、降低排放的重要途径,驱动电机系统(drive electric machine system)是实现动力系统电动化的物质基础,驱动电机系统的存在是电动汽车区别于传统内燃机汽车的重要标志。

图 1-1 所示为纯电动汽车中的动力系统。从图中可以看出驱动电机(drive electric machine)是车辆唯一的驱动动力来源,这种特征也反映在串联混合动力汽车以及燃料电池汽车上。在混联(串并联)或并联混合动力汽车中,驱动电机与发动机通过动力耦合机构共同驱动车辆。

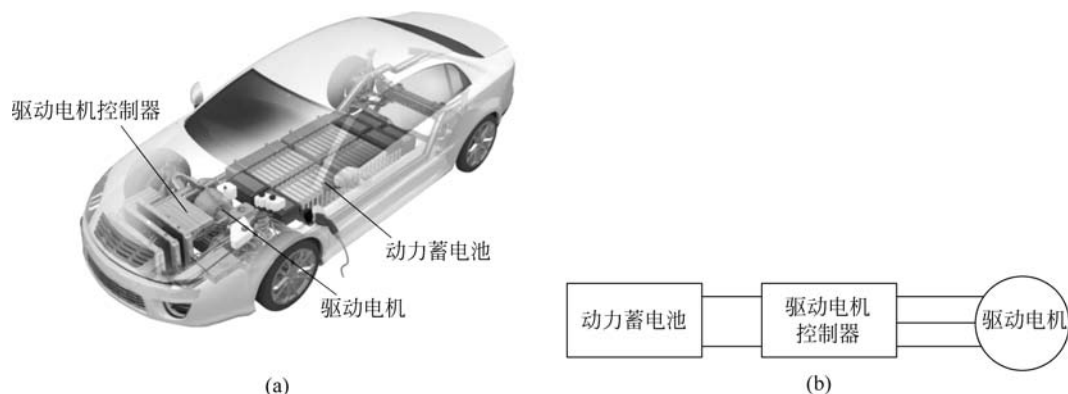


图 1-1 纯电动汽车中的动力系统

(a) 动力系统在整车中的布置；(b) 动力系统的电气连接

驱动电机系统具有发动机无法实现的能量回馈功能,即在车辆制动时,驱动电机工作在发电状态,将机械能转换为电能并回馈到车载储能部件中。制动能量回馈是提高整车经济性的重要途径。

此外,在混合动力汽车中,驱动电机系统还可以转换发动机部分输出功率,具有提高发动机工作效率和改善排放的作用。

汽车驱动电机系统定义为用于驱动汽车行驶的驱动电机、驱动电机控制器(drive electric machine controller)及相关辅助装置的组合^[1]。

1. 驱动电机

驱动电机是指基于“磁场相互作用”或“磁路磁阻变化”实现电能与机械能之间的转换,并可为车辆提供驱动力和制动力的电气装置。若电机的不同部分之间可以实现相对旋转运动,则这种电机称为旋转电机(rotating electric machine)。旋转电机中静止不动的部分称

为定子(stator),可以旋转运动的部分称为转子(rotor)。目前,电动汽车的驱动电机皆为旋转电机。

多数电动汽车的驱动电机既可以工作在电动(motoring)状态来驱动车辆,也可以工作在发电(generating)状态来回馈制动能量。图 1-2 为典型驱动电机的外形图。图中,驱动电机的高压电气接口(high voltage electrical interface),又称动力电气接口(power interface),用于通过高压线束和驱动电机控制器进行高压电气连接,从而实现电能的传输;驱动电机



图 1-2 典型驱动电机外形图

的低压电气接口,又称信号电气接口(signal interface),用于通过低压线束和驱动电机控制器进行低压电气连接,为驱动电机控制器提供电机内部温度、转子位置、电机转速等信息;冷却接口(cooling interface),即冷却液管路接口(cooling pipeline interface),用于连接整车散热系统,驱动电机普遍采用液冷(如水冷或油冷)的冷却方式;机械输出轴与整车传动系统连接,用于传递驱动转矩或制动转矩;安装接口(mounting interface)用于固定或安装驱动电机。

汽车驱动电机与普通工业电机具有相同的工作原理,可以认为汽车驱动电机是针对特殊用途和特殊场合的工业电机。表 1-1 给出了汽车驱动电机与普通工业电机的主要区别。

表 1-1 汽车驱动电机与普通工业电机的主要区别

类 别	汽车驱动电机	普通工业电机
外形和各类接口	定制化,便于和传动系统集成	通用化
工作环境	环境温度变化较大,振动较大	环境温度比较稳定,振动较小
运行工况	较为复杂,负载变化剧烈,可四象限运行	相对单一,多运行于第一象限
防护等级	IP44 或更高	根据应用场合确定
被控制参数	转矩(特殊情况下:转速)	转速、位置(特殊情况下:转矩)
功率密度	高	低
冷却方式	液冷(水冷或油冷)	多为强迫风冷或自然冷却
耐久性	高于整车耐久性	与应用环境相关
维护性	除直流电机外,应做到免维护	与应用环境相关

电机转矩的产生机理有两种:第一种是由于两个磁场相互作用而产生转矩。磁场可以由永磁材料产生或流过电流的导体产生,但两个磁场中至少有一个磁场应由载流导体产生,两个磁场相互作用也可以看作是磁场对电流产生安培力(Ampere's force)的结果,因此这种转矩又称为电磁转矩(electromagnetic torque)。电磁转矩的方向是使两个磁场趋于同向。第二种是当电机的定子铁心和转子铁心所在磁路的磁阻不断变化时,由于磁场的分布遵循“磁阻最小原理”(principle of variable reluctance),即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合而产生的转矩,这种转矩称为磁阻转矩(reluctance torque)。

依据电机转矩的产生机理可以对电动汽车驱动电机进行分类,具体如图 1-3 所示。

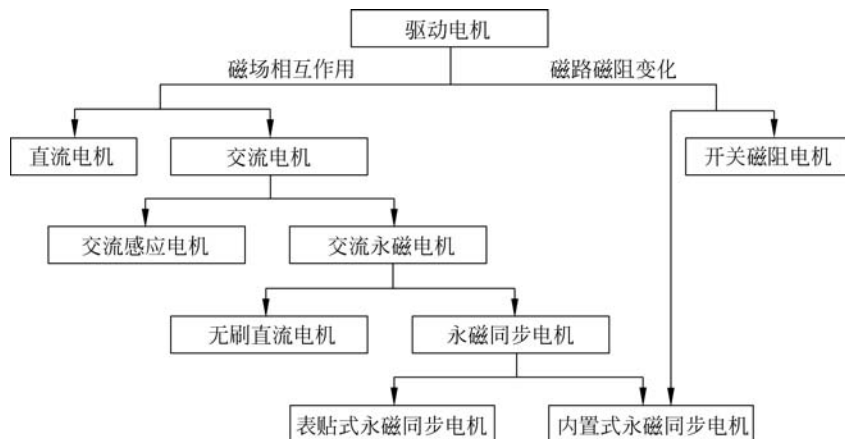


图 1-3 驱动电机的分类

从图中可看出,电动汽车的驱动电机主要有:直流电机(direct current motor,DCM)、无刷直流电机(brushless direct current motor,BLDCM)、永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor,PMSM)、交流感应电机(AC induction motor,ACIM)、开关磁阻电机(switched reluctance motor,SRM)等^[2]。由于无刷直流电机的结构和控制方法与有刷直流电机相差较大^[3],多数文献并不把其归于直流电机,因此本书后面所涉及直流电机特指有刷直流电机。各类驱动电机的特点及在电动汽车上的应用情况归纳如表 1-2 所示。

表 1-2 各类驱动电机的特点与应用

电机类型	优 点	缺 点	电动汽车应用情况
直流电机	控制性能好、控制器结构简单、成本较低	电机转速低、维护周期短、耐久性差、过载能力差、功率密度小、工作效率较低	应用较早,已被其他类型电机取代
无刷直流电机	起动转矩大、过载能力强、功率密度高、控制算法简单	转矩纹波大、工作噪声高	应用一般
永磁同步电机	工作效率较高、功率密度高	控制算法复杂、电机控制器成本高、永磁材料性能易受温度和振动影响	应用较广泛
交流感应电机	转速高、耐久性好、驱动电机成本较低、可靠性好	功率密度一般、电机控制器成本高、工作效率一般	应用较广泛
开关磁阻电机	结构简单、控制结构和控制算法简单、成本低	转矩纹波较大、工作噪声高	应用较少

根据国家标准 GB/T 18488.1—2015 的规定^[1],汽车驱动电机型号由驱动电机类型代号、尺寸规格代号、信号反馈元件代号、冷却方式代号、预留代号五部分组成,如图 1-4 所示。具体规定为:

(1) 驱动电机类型代号: KC 代表开关磁阻电机; TF 代表方波控制型永磁同步电机(无刷直流电机); TZ 代表正弦控制型永磁同步电机; YR 代表绕线交流感应电机; YS 代表笼型交流感应电机; ZL 代表直流电机; 其他类型驱动电机的类型代号由制造商参照旋

转电机产品型号编制方法的国家标准 GB/T 4831—2016^[4] 进行规定。

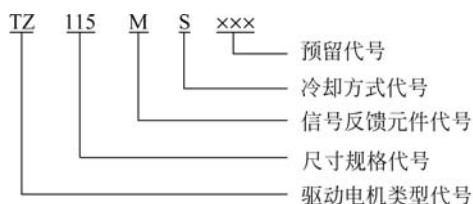


图 1-4 驱动电机的型号规定

(2) 尺寸规格代号：一般采用定子铁心的外径来表示，对于外转子电机，采用外转子铁心外径来表示，单位为 mm。

(3) 信号反馈元件指安置于电机上的转子位置或转速传感器，其代号：M 代表光电编码器；X 代表旋转变压器；H 代表霍尔元件；无传感器不标注。

(4) 冷却方式代号：S 代表水冷方式；Y 代表油冷方式；F 代表强迫风冷方式；自然冷却不标注。

(5) 预留代号：用英文大写字母或阿拉伯数字组合，其含义由制造商自行确定。

2. 驱动电机控制器

驱动电机控制器是指将车载电源(如蓄电池、超级电容、燃料电池等)输出的电能转换为驱动电机所需电能的电力电子装置^[5]。驱动电机控制器可以基于上层控制器(如动力系统控制器或整车控制器)的指令控制驱动电机的转速或转矩。

图 1-5 为典型驱动电机控制器的外形图。驱动电机控制器的高压输入电气接口通过高压线束与车载电源进行电气连接，高压输出电气接口通过高压线束与驱动电机进行电气连接；驱动电机控制器的低压电气接口通过低压线束与驱动电机、整车通信网络、整车低压电气系统以及车辆其他部件进行低压电气连接；冷却接口用于连接整车散热系统，同驱动电机类似，驱动电机控制器通常采用液冷(如水冷或油冷)的冷却方式；安装接口用于固定或安装驱动电机控制器。



图 1-5 典型驱动电机控制器外形图

汽车驱动电机控制器属于汽车电力电子部件，它与普通工业电机控制器(或驱动器)的工作原理比较类似，但也存在明显差异，表 1-3 给出了二者的主要区别。

表 1-3 汽车驱动电机控制器与普通工业电机控制器的主要区别

类 别	汽车驱动电机控制器	普通工业电机控制器
外形和各类接口	定制化,便于车辆安装	通用化
工作环境	环境温度变化较大,振动较大	环境温度比较稳定,振动较小
运行工况	较为复杂,负载变化剧烈并具有一定的随机性	相对单一

续表

类 别	汽车驱动电机控制器	普通工业电机控制器
防护等级	IP44 或更高	根据应用场合确定
输入电源	车载电源(直流)	公用电网(交流,频率 50Hz)
电能转换形式	直流电机: 直流-直流 交流电机: 直流-交流	直流电机: 交流-直流-直流 交流电机: 交流-直流-交流
电力电子器件与电子元器件	汽车级	工业级
功率密度	高	低
冷却方式	液冷(水冷或油冷)	多为强迫风冷或自然冷却
耐久性	高于整车耐久性	与应用环境相关
维护性	免维护	与应用环境相关

如图 1-6 所示,典型的汽车驱动电机控制器内部主要包括主电路和控制电路两大部分。主电路主要由电力电子器件构成,用来完成不同形式电能的转换,如从直流变换为直流或从直流逆变为交流等。控制电路由数字信号控制器(digital signal controller,DSC)、驱动电路(driving circuit)、保护电路(protection circuit)、数据采集电路(DAQ circuit)等构成。

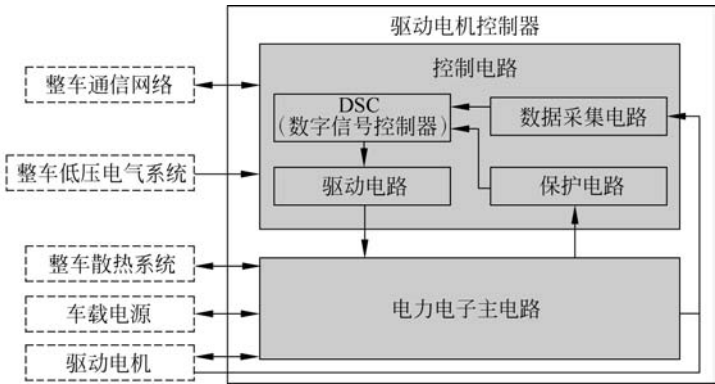


图 1-6 汽车驱动电机控制器内部构成

对汽车驱动电机实施控制可以理解为:驱动电机控制器中的 DSC 按照从整车通信网络得到的电机目标转矩或转速,根据数据采集电路得到的电机运行状态(如转速或转子位置、绕组电流、电机内部温度等)、动力系统工作状态(如直流母线电压、车载电源运行状态等)以及保护电路对驱动电机和驱动电机控制器的故障诊断结果,按一定的控制算法或控制策略,通过驱动电路对驱动电机控制器主电路中电力电子器件的通断进行控制,使驱动电机的输出转矩或转速跟踪目标转矩或转速的过程。换言之,在驱动电机控制器中,大功率电能的转换是通过对主电路中电力电子器件通断状态的控制来实现的;而控制电路的功能是让电力电子器件按正确的工作时序通断。

驱动电机控制技术是电动汽车的关键技术,对整车性能会产生直接影响。由于不同类型驱动电机的工作原理、结构有所区别,所以针对不同类型驱动电机的控制技术也有所不同。例如对于直流电机,由于励磁绕组电流和电枢绕组电流可以做到完全解耦,所以只要对二者分别进行控制就可以达到控制电机转矩的目的;而对于交流感应电机和永磁同步电机

则需要采用矢量控制技术或直接转矩控制技术对电机转矩进行控制。对所有类型驱动电机的控制问题都可以归结为对电机绕组电流的控制问题。由于驱动电机系统具有多参数、非线性、强耦合的特征,因此很难对工作过程进行准确的数学描述。将现代控制理论的控制方法(如自适应控制、模糊控制、神经网络控制等)与经典控制理论的控制方法(如 PID 控制)相结合,可以更好地满足驱动电机控制的工程化需要。

根据国家标准 GB/T 18488.1—2015 的规定,汽车驱动电机控制器型号由驱动电机控制器类型代号、工作电压规格代号、信号反馈元件代号、工作电流规格代号、冷却方式代号、预留代号六部分组成,如图 1-7 所示。具体规定为:

(1) 控制器类型代号:用电机类型代号前加英文大写字母“K”来表示。

(2) 工作电压规格代号:用驱动电机控制器的标称直流电压除以“10”再圆整后的数值来表示。最少以两位数值表示,不足两位的,在十位上冠以 0。若为交流供电,电压值均需折算成直流电压值。输入电压的单位为伏特(V)。

(3) 信号反馈元件代号: M 代表光电编码器; X 代表旋转变压器; H 代表霍尔元件; 无传感器不标注。

(4) 工作电流规格代号:用驱动电机控制器最大工作电流的有效值除以“10”再圆整后的数值来表示。最少以两位数值表示,不足两位的,在十位上冠以 0。输出电流的单位为安培(A)。

(5) 冷却方式代号: S 代表水冷方式; Y 代表油冷方式; F 代表强迫风冷方式; 自然冷却不标注。

(6) 预留代号:用英文大写字母或阿拉伯数字组合,其含义由制造商自行确定。

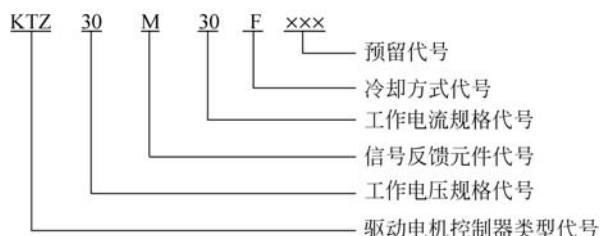


图 1-7 驱动电机控制器的型号规定

3. 相关辅助装置

相关辅助装置是指保证驱动电机和驱动电机控制器正常工作的附件,如电气开关、冷却装置、高压线束或线缆及连接器、低压线束及连接器、保护用的熔断器、用于状态监测或信息反馈的各类传感器等。这些“相关辅助装置”具有质量和体积小、易于安装和维护、使用寿命长、成本低等特点。

1.1.2 汽车驱动电机系统的发展历程

促使汽车驱动电机系统的发展有内、外两个因素。外因是随着电动汽车的发展、推广与应用,驱动电机系统需要持续不断升级自身的品质以满足不断提高的整车需求;内因是电机设计与制造技术以及电机控制技术的进步,促使汽车驱动电机系统相关技术不断提高和发展。汽车驱动电机系统的发展历程如图 1-8 所示。

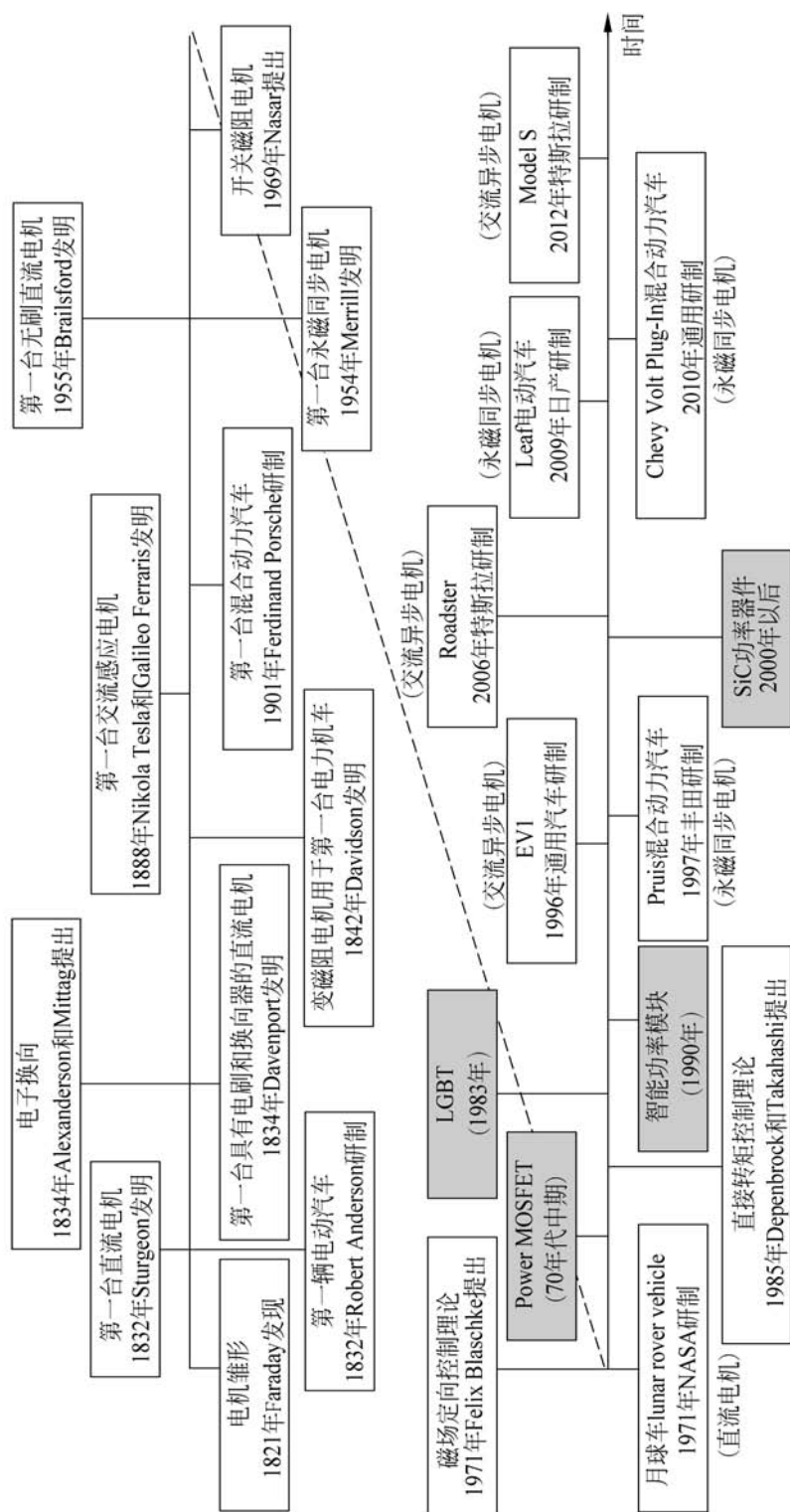


图 1-8 汽车驱动电机系统发展历程

19 世纪 20—30 年代,电机一经出现,人们就想到将它应用于交通工具,用于改善人们的出行条件。因此,电动汽车的出现与电机的发明密不可分。

19 世纪 30 年代后期至 80 年代中期,随着各类电机的涌现,电动汽车进入了快速发展的第一个“黄金时期”。人们不断尝试制造较大功率的电机来驱动车辆,车辆的性能不断改进。这个“黄金时期”在一定程度上促进了许多车辆技术的启蒙和发展。电动汽车的发展伴随着第二次工业革命的开始。

进入 20 世纪后,随着内燃机汽车的兴起,电动汽车的发展进入“低潮期”。但与此同时,电机的设计、制造与控制技术却取得较大进步,大功率发电机、工业电气传动系统等与电机及其控制技术密切相关的产品出现,使人类迈进了“电气时代”,这也是第二次工业革命的重要标志和最为显著的成果。

20 世纪 90 年代开始,电动汽车出现了“复兴”并进入了第二个“黄金时期”。促进这一变化的直接原因是人们认识到解决环境和能源问题的紧迫性和重要性。但从另外一方面,在此前 10~15 年期间,电机及其控制技术所取得的突破性进展也是导致电动汽车“复兴”的重要原因。这些突破性进展主要体现在三个方面:一是 20 世纪 80 年代初,高性能永磁材料钕铁硼(NdFeB)的出现,使驱动电机的功率密度和转矩密度大幅提高且驱动电机优异的机械特性可以简化车辆传动系统结构;二是 20 世纪 70 年代中后期到 80 年代中后期,功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(power metal-oxide-semiconductor field effect transistor, power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等电力电子器件的出现,使制造高效大功率汽车驱动电机控制器成为可能;三是一些先进电机控制技术(如交流电机的磁场定向控制、直接转矩控制以及一些智能化控制技术)的出现及工业领域的经验积累,可以实现驱动电机的精确控制,满足车辆的需求。此外,DSC 性能的提高,也为驱动电机先进控制技术的实施提供了较好的支撑。

在国内,“八五”期间开始开展电动汽车关键技术的研究;“九五”期间,开展了电动概念车、改装车、试验车的研发以及一些标准法规的研究;“十五”开始,将“驱动电机及其控制系统”作为一项核心技术,投入了大量的人力和财力对电机设计与制造、电机控制器硬件、电机控制算法等关键技术开展攻关并取得显著的科研成果。目前,中国是电动汽车驱动电机的主要制造国,并基本掌握了驱动电机控制的核心技术。

1.1.3 汽车驱动电机系统的驱动形式

按照车辆上驱动电机的数量可以将驱动电机系统的驱动形式分为单电机驱动和多电机驱动;按照车辆所有驱动轮的驱动力来源可以将驱动电机系统的驱动形式分为集中式驱动和分布式驱动。

1. 单电机驱动和多电机驱动

所谓单电机驱动是指车辆驱动力来自同一个电机。单电机驱动车辆的驱动结构和整车布置与传统内燃机汽车十分相似,即通过离合器、变速器/减速器和差速器等机械传动装置,将电机输出转矩传递到车轮驱动汽车行驶。这种驱动形式在技术上较为成熟、安全可靠,但存在灵活性差、效率不高等缺点。

多电机驱动是指车辆驱动力来自多个电机。多电机驱动的具体形式比较多,有双轴或多轴独立驱动、轮边驱动、轮毂驱动等。与单电机驱动相比,多电机驱动具有整车布置和结

构设计更为灵活、简化机械传动系统、提高能量转换效率以及提高车辆行驶稳定性等优点。

图 1-9 给出了一些常见的纯电动汽车的驱动形式。为清晰起见,图中没有画出离合器、变速器/减速器和差速器等机械传动部件。图 1-9(a)所示是单电机驱动形式,图 1-9(b)~图 1-9(f)所示为多电机驱动形式。

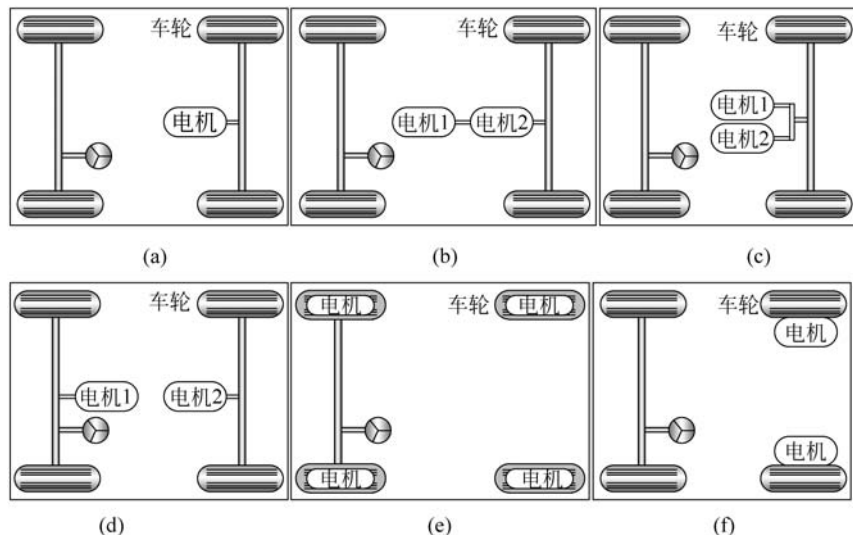


图 1-9 驱动电机系统的驱动形式

- (a) 单电机集中式驱动; (b) 同轴双电机集中式驱动; (c) 不同轴双电机集中式驱动;
(d) 双轴独立电机分布式驱动; (e) 轮毂电机分布式驱动; (f) 轮边电机分布式驱动

2. 集中式驱动和分布式驱动

所谓集中式驱动是指车辆所有驱动轮的驱动力来自同一个电机或者来自相互之间具有机械耦合机构的多个电机,图 1-9(a)~图 1-9(c)为集中式驱动形式。图 1-9(b)和图 1-9(c)中虽然采用两个电机,但这两个电机输出的机械能通过同轴连接或不同轴机械耦合机构汇到同一机械轴上,可以等同于图 1-9(a)的单电机驱动形式。有时会把集中式驱动与单电机驱动等效起来,不再做明显区分。因此,集中式驱动可理解为车辆所有驱动轮的驱动力来自同一个电机的驱动形式。

与图 1-9(a)相比,图 1-9(b)和图 1-9(c)的优点是同等功率需求下,双电机驱动时各电机功率可以减小,电机的选择具有灵活性;同时,两个电机的功率和转矩可以根据整车需求进行分配,有利于提高驱动系统效率。图 1-9(b)和图 1-9(c)的区别在于电机分别是纵向布置和横向布置,且图 1-9(c)需要动力机械耦合机构。

分布式驱动是指车辆所有驱动轮的驱动力来自不同电机的驱动形式。图 1-9(d)~图 1-9(f)属于分布式驱动形式。

图 1-9(d)为双驱动轴独立驱动形式。其特点是车辆的前轴和后轴分别采用一个驱动电机系统驱动,两个系统独立,不存在直接动力耦合装置。这种驱动形式的优点是可以根据汽车行驶特性,对两个电机的系统参数进行合理配置;可以实现四轮驱动模式,增强汽车的动力性和通过性;基于车辆行驶工况可以对两个电机的输出转矩进行分配,容易实现能量传输效率的优化。这种驱动形式也可以推广到多驱动轴的重型汽车上。

图 1-9(e)为轮毂电机分布式驱动形式。这种驱动形式将电机与车轮集成在一起,直接驱动车辆,最大限度地缩短了电机到驱动轮的机械能传输路径,提高了能量的传输效率。若电机采用高速电机,则电机与车轮之间需要齿轮减速机构。这种驱动形式有两方面的不足:一是由于车辆非簧载质量增加,比较适合质量小或速度低以及经常行驶于良好路面的车辆;二是对电机抗振性、可靠性提出了较高的要求。

图 1-9(f)为轮边电机分布式驱动形式。这种驱动形式是将电机固定在副车架上的驱动轮旁边,可通过减速器驱动对应侧的车轮。与轮毂电机相比,电机与车轮相对独立,电机参数的选择受车轮的约束较小,维修调试更为方便;此外,非簧载质量减小,使车辆在加速、制动时更加平顺,提高了在不平路面上的稳定性,可有效减小轮胎的磨损。不足之处是电机的布置占据了较大的空间,功率密度不如轮毂电机。

在行驶稳定性方面,与其他驱动形式相比,轮毂电机和轮边电机两种驱动形式可以对每个驱动轮的转矩独立进行控制,拥有较高的整车操纵稳定性及行驶安全性。

1.2 车辆对驱动电机系统的性能要求

1. 整车动力性的要求

驱动电机的机械特性,即电机的转矩-转速关系,也称为电机的外特性。图 1-10 所示为通过单一速比减速器与车辆传动系统连接的驱动电机的典型机械特性。在转速-转矩坐标平面上,电机的机械特性按象限可以分为四个区域,分别为正向驱动区、反向制动区、反向驱动区和正向制动区。图 1-10 同时给出了驱动电机的转速-功率曲线。图中, T_m 为电机的最大转矩(或称峰值转矩); T_r 为电机的持续转矩(或称额定转矩); n_m 为电机的正向最高转速,简称电机的最高转速; n_{rm} 为电机的反向最高转速; P_m 为电机的最大功率(或称峰值功率); P_r 为电机的持续功率(或称额定功率);在第一、四象限,电机的机械特性又分两个区域:恒转矩区和恒功率区,两个区域之间的转速边界即为电机的基速(base speed) n_b ,通常也是电机设计时选取的额定转速(rated speed)。

驱动电机系统对外体现的机械特性与驱动电机本身的机械特性有所区别,在动力系统直流母线电压较低、电机控制器或驱动电机温度过高等情况下,可通过电机控制器的控制,使电机输出功率减小或输出转矩下降,此时图 1-10 中的恒转矩区以及恒功率区可能变小。因此,图 1-10 可视为驱动电机系统的理想机械特性。

在实际运行时,电动汽车驱动电机系统的机械特性应能同时满足整车的最高车速、最大爬坡度、加速时间等动力性能指标的要求。

2. 整车经济性的要求

驱动电机系统的效率对电动汽车整车经济性会产生很大影响,从而影响车辆的续驶里程。驱动电机既可能工作在电动状态也可能工作在发电状态。相应地,驱动电机系统的效率包括电动状态效率和发电状态效率。图 1-11 为某电动汽车交流感应电机系统在额定直流电压下的效率。图中的上半部分(即转矩大于零的部分)为电动状态效率,下半部分(即转矩小于零的部分)为发电状态效率。

驱动电机系统的效率在数值上等于电机控制器效率与驱动电机效率的乘积,即

$$\eta_s = \eta_{inv} \eta_{em} \quad (1-1)$$