

# 第1章 绪论

随着家用汽车普及,汽车已经成为人们生活中不可或缺的一部分。然而,传统燃油车不仅会产生尾气污染,还过于依赖有限石油资源,对城市环境和气候变化会产生负面影响。我国人均资源较匮乏、单位国内生产总值(gross domestic product,GDP)能耗高,为达成“双碳”目标,发展高效率、基于电驱动技术的新能源汽车对我国能源安全具有重要战略意义。同时,相对于车用内燃机技术,我国当前的电驱动技术和西方发达国家整体差距不大,因此大力发展基于电驱动技术的新能源汽车将是我国车企赶超西方发达国家一线车企的重要机遇。

为此,我国已经将新能源汽车设计和研发置于首要位置,这是我国汽车工业快速发展、实现汽车强国梦的必经之路。新能源汽车采用可充电力电池包提供能源,采用驱动电机提供动力,同时驱动电机系统拥有发动机无法实现的能量回收系统。新能源汽车的普及可以降低尾气排放、提高能源效率、降低运营成本、推动技术创新、改善城市环境,同时也会减轻对有限石油资源的依赖。

根据《新能源汽车生产企业及产品准入管理规定》(工业和信息化部令第39号),新能源汽车是指采用新型动力系统,完全或者主要依靠新型能源驱动的汽车,包括插电式混合动力(含增程式)汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车等。在国家标准 GB/T 19596—2017《电动汽车术语》中对各种类型的新能源汽车进行了定义。

混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle,HEV)是能够至少从下述两类车载储存的能量中获得动力的汽车:可消耗的燃料、可再充电能/能量储存装置。HEV既有发动机,又有驱动电机,按照动力系统结构形式(驱动力来源)的不同可分为串联式 HEV、并联式 HEV 和混联式 HEV。串联式 HEV 的驱动力由驱动电机提供,并联式 HEV 的驱动力由驱动电机及发动机同时或单独提供,混联式 HEV 同时具有串联式和并联式驱动方式。按照外接充电能力来分,有可外接充电式混合动力电动汽车(off-vehicle-chargeable hybrid electric vehicle,OVC-HEV)和不可外接充电式混合动力电动汽车(non off-vehicle-chargeable hybrid electric vehicle,NOVC-HEV)。OVC-HEV 是正常使用情况下可从非车载装置中获取电能量的 HEV,插电式混合动力电动汽车(plug-in hybrid electric vehicle,PHEV)属于此类型。NOVC-HEV 是正常使用情况下从车载燃料中获取全部能量的 HEV。HEV 代表车型有吉利银河星耀 8、比亚迪 DM-i 系列、理想 L9、宝马 530Le、比亚迪唐 DM 等。

在 PHEV 中,也包含了增程式电动汽车(range extended electric vehicle,REEV)。REEV 是一种在纯电动模式下可以达到其所有的动力性能,而当车载可充电储能系统无法满足续航里程要求时,可打开车载辅助供电装置(发动机)为动力系统提供电能,以延长续航里程的电动汽车,且该车载辅助供电装置(发动机)与驱动系统没有传动轴(带)等传动连接,也



GB/T  
19596—2017  
《电动汽车  
术语》

就是REEV的动力只能来源于驱动电机。REEV代表车型有吉利远程星智H9M甲醇增程式混动冷藏车(商用车)、理想L6、长安深蓝SL03等。

纯电动汽车(battery electric vehicle, BEV)是驱动能量完全由电能提供的、由电机驱动的汽车。电机的驱动电能来源于车载可充电储能系统或其他能量储存装置。目前, BEV的能量全部来源于动力电池包, 能实现行驶过程完全零排放, 代表车型有极氪001、特斯拉Model X、比亚迪秦plus等。

燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)是以燃料电池系统作为单一动力源或者是以燃料电池系统与可充电储能系统作为混合动力源的电动汽车。FCEV通常以氢气、甲醇等为燃料, 通过化学反应产生电流, 依靠驱动电机驱动, 代表车型有本田Clarity、丰田Mirai等。

新能源汽车在全球范围内应用于乘用车的数量呈增长趋势, 商用车的电动化程度也在不断提高。2023年, 新能源汽车进入爆发式增长阶段, 智能化技术取得巨大进步, 电池性能也有了巨大提升, 产业链不断完善, 零配件的配套能力也有所提升。中国新能源汽车保持产销两旺发展势头, 连续10年位居全球第一。2024年, 中国新能源汽车产量超过1288.8万辆, 占全球产量70%以上, 销量达到1286.6万辆, 首次实现年销量破千万辆。2025年中国新能源汽车产销均超1600万辆, 同比分别增长29%和28.2%, 连续11年位居全球第一。多家机构预测, 2026年中国新能源汽车销量将达到1900万~2000万辆, 渗透率将达到55%~60%, 甚至更高。同时, 2025年中国新能源汽车出口261.5万辆, 同比增长103.7%, 2026年预计出口量将达到350万辆, 主要集中在西欧、拉美、东盟和中东等市场。

我国发展新能源汽车可以解决能源和环境问题, 促进产业升级和技术超越, 推动能源结构转型, 还能节约成本。中国是石油进口大国, 石油储量有限, 而新能源汽车以电为动力, 中国又是全球发电量最大的国家, 清洁能源发电比例逐年提高。同时, 纯电动汽车在行驶过程中几乎零排放, 即使考虑电厂排放量, 与传统汽车相比, 它的排放量也很低, 能减少尾气排放, 减缓温室气体排放, 从而改善大气环境和气候变化。

在传统汽车领域, 中国尚未成为汽车强国, 但在新能源汽车领域, 中国与发达国家处于同一水平, 甚至略占优势。新能源汽车的关键技术, 如驱动电机、动力电池和电控系统, 尚未被国外技术垄断, 这为实现自给自足和出口盈利提供了可能, 有助于中国成为汽车强国。

中国能源需求正从依赖化石能源向利用可再生能源转变, 而新能源汽车符合这一发展趋势, 有助于推动能源结构的转型。国家和地方政府的补贴降低了电动汽车的价格, 其运行成本也低于传统汽车。此外, 电动汽车运行时噪声小, 驱动电机运行的噪声和振动水平低于传统内燃机, 可提高舒适性。驱动电机系统是新能源汽车“三电”系统中的关键一环, 与电控系统和动力电池系统共同构建了核心动力平台。



课程介绍

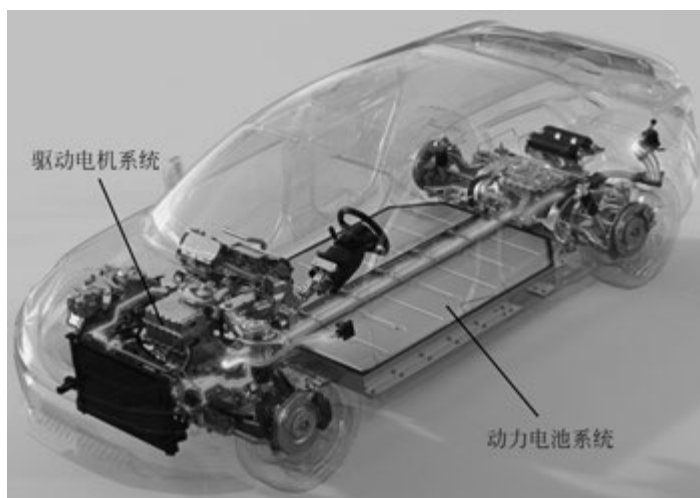
## 1.1 驱动电机系统概述



1.1 驱动电机系统概述

动力电池、驱动电机、驱动电机控制器(智能电控)是新能源汽车驱动系统三大关键技术, 称为大三电, 也是整车动力系统的核心。图1-1为纯电动汽车动力系统在整车中的布置情况。大三电中, 动力电池技术相对独立, 驱动电机与智能电控结合则相对紧密。驱动电

机及智能电控的技术水平将直接影响新能源汽车整车性能,是衡量新能源汽车整车动力性能水平的重要标志之一。

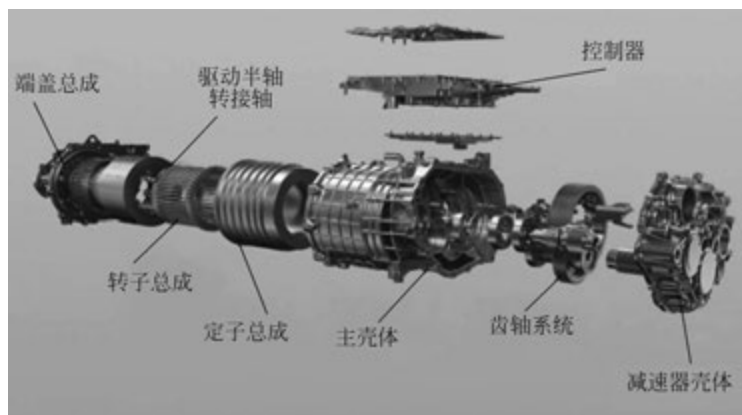


彩图 1-1

图 1-1 纯电动汽车动力系统布置

### 1.1.1 驱动电机系统定义

驱动电机系统是安装在电动汽车上,为车辆行驶提供驱动力、实现机械能与电能间相互转化的系统,包括驱动电机、驱动电机控制器及它们工作必需的辅助装置。辅助装置包含与驱动电机集成于一体的变速装置等。威睿三合一集成式驱动电机系统爆炸图如图 1-2 所示。驱动电机系统负责将动力电池电能转换为驱动新能源汽车前进的机械动力,进而推动车辆前进,它是新能源汽车的关键组成部分,它的发展一直影响着新能源汽车的发展。



彩图 1-2

图 1-2 威睿三合一集成式驱动电机系统组成

### 1.1.2 驱动电机发展情况

电动汽车出现的时间早于燃油车,驱动电机应用选型也经历了电励磁直流电机、开关

磁阻电机、交流感应电机、永磁同步电机等多种类型。

### 1. 电励磁直流电机

1834年,美国人托马斯·达文波特尝试制造了首辆搭载不可充电式蓄电池,由直流电机作为原动机的电动汽车,如图1-3所示。在电动汽车发展初期也多采用直流电机,这种电机的优点是制造简单、控制性能好、起步加速牵引力大,但它具有体积大、质量大、安全性差和效率低等缺点,逐渐被淘汰。

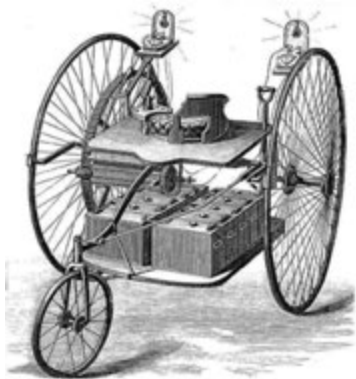


图 1-3 第一辆电动汽车

运行遵循“磁阻最小原理”,即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合。定子绕组通电后产生磁场,转子会在磁场作用下朝着使磁阻最小的位置转动,也就是转子凸极与定子凸极对齐的位置。开关磁阻电机存在控制器设计困难、噪声较大、振动严重等一些弊端,且效率和功率密度都较低,因此它在电动汽车中很少应用。

### 2. 开关磁阻电机

1983年,英国 TASC Drives 公司(后更名为 SRD Ltd.)首次将开关磁阻电机推向市场,汽车制造企业曾尝试将这种电机应用于新能源汽车用驱动电机。例如2012年,菲亚特500型EV采用了这一技术。开关磁阻电机的

### 3. 交流感应电机

交流感应电机是利用定子和转子之间电磁感应作用,在转子内感应电流以实现机电能量转换的电机。由于具有结构简单、制造成本较低、运行可靠、坚固耐用、抗过载能力强且更容易弱磁调速、能以较好性能达到更高转速等特点,交流感应电机受到过一些汽车企业青睐,现今也依然保持着一定程度的开发与应用。交流感应电机的不足之处在于:效率相对较低(尤其在低速范围内),功率因数低;转矩密度和功率密度低;控制相对复杂。最早特斯拉公司将其应用在旗下第一款车 Roadster 上,并取得了成功。

### 4. 永磁同步电机

随着电力电子技术、计算机技术的应用和发展,高性能稀土永磁材料的发现和不断完善,以高效率、高功率密度、强过载能力和高可靠性为显著特征的永磁同步电机成为电动汽车动力传动系统最主要的驱动装置之一。2018年特斯拉公司宣布 Model 3 初次采用永磁同步电机作为其驱动电机,这也宣告了一直以交流感应电机为技术路线的特斯拉公司正式加入永磁同步电机技术行列。



1.2 驱动电机系统分类

## 1.2 驱动电机系统分类

驱动电机系统的分类方式众多,下面介绍几种常见的分类方式,如按内部空间布置形式、按驱动电机数量、按电压等级等。

### 1.2.1 按内部空间布置形式

新能源汽车用驱动电机系统根据内部空间布置形式不同,可分为分体式驱动电机系统

和集成式驱动电机系统两类。该分类方式体现出驱动电机系统集成度不同,分体式驱动电机系统集成度较低、可靠性差,但维护维修方便;集成式驱动电机系统集成度高、可靠性高、功率密度高,但维护维修成本高,对冷却系统要求也高。

### 1. 分体式驱动电机系统

分体式驱动电机系统是驱动电机和驱动电机控制器未集成于一体的驱动电机系统,分体式驱动电机系统框图如图 1-4 所示。在分体式驱动电机系统中,将驱动电机、驱动电机控制器、减速装置单独安装在整车上,占用体积大、功率密度低、成本高。分体式驱动电机系统已经被淘汰。

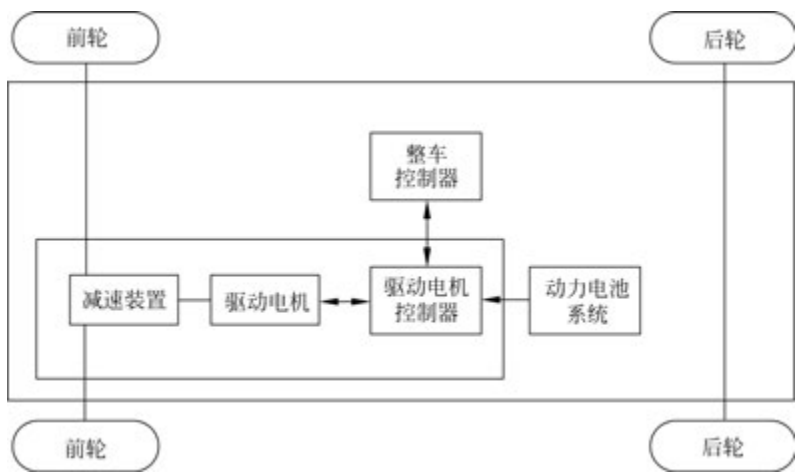


图 1-4 分体式驱动电机系统框图

由于早期新能源汽车的设计是在传统燃油车基础上进行的改造,缺乏成熟的设计规范和准则,驱动电机、驱动电机控制器和减速装置等组件分散布置在汽车底盘不同位置。同时,驱动电机控制器需要通过三相电缆传输电能控制驱动电机工作,这不仅引发了电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)问题,还占用了车辆空间,增加了制造成本,仅应用于早期的新能源汽车中。由此,便出现了将驱动电机系统多个部件整合在一起的集成式驱动电机系统。

### 2. 集成式驱动电机系统

集成式驱动电机系统是将驱动电机、驱动电机控制器及它们工作必需的辅助装置的组合,集成于一体的驱动电机系统。集成式驱动电机系统是将多个电子设备和电机组件集成在一起,以实现车辆动力传递和控制的系统,具有成本低、功率密度高、结构紧凑等优点,在新能源汽车中得到广泛应用。

最初,将驱动电机与减速装置整合在一起,形成了二合一驱动电机系统。二合一集成式驱动电机系统框图如图 1-5 所示。将驱动电机控制器与二合一驱动电机系统上下布置,极大地节省了车内空间。

尽管相对于传统驱动电机系统,这种结构更加紧凑,但是仍未解决电磁干扰问题,仍然需要通过三相电缆进行能量传输。随着集成度进一步提升,三合一驱动电机系统问世。三合一集成式驱动电机系统框图如图 1-6 所示。这种结构不再采用单独设计的驱动电机系统

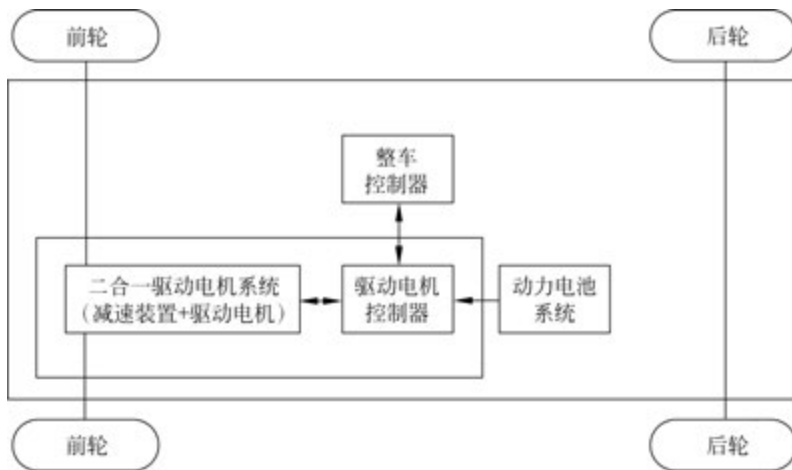


图 1-5 二合一集成式驱动电机系统框图

三大部件(驱动电机、驱动电机控制器、减速装置),而是直接对它们进行一体化设计,提高了集成度,降低了制造成本,同时也消除了之前存在的 EMI 问题。

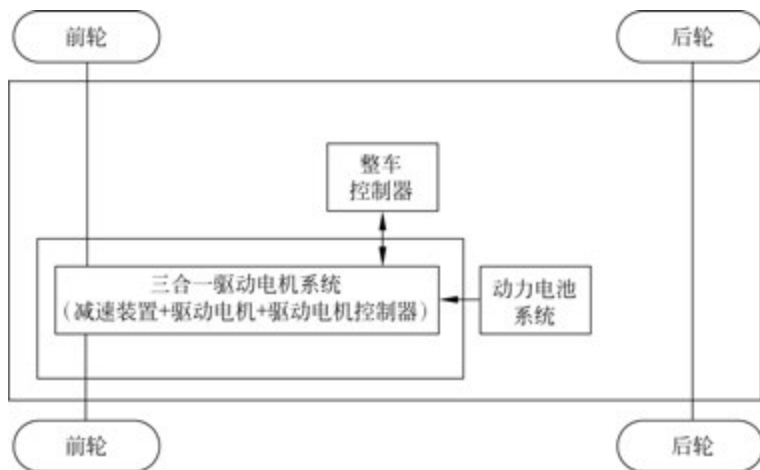


图 1-6 三合一集成式驱动电机系统框图

在集成式驱动电机系统发展过程中逐渐出现了如二合一、三合一、八合一、十二合一等多种集成式驱动电机系统,实物如图 1-7 所示。2024 年 5 月,国内自主新能源汽车品牌比



彩图 1-7

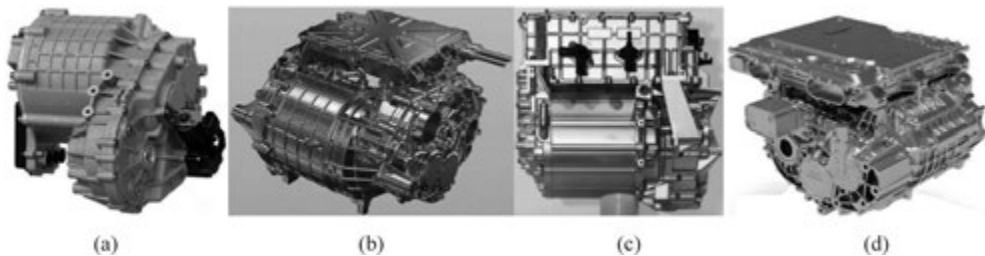


图 1-7 集成式驱动电机系统实物

(a) 二合一; (b) 三合一; (c) 八合一; (d) 十二合一

比亚迪实现了全球首创的十二合一智能电驱技术,集成了 23000r/min 驱动电机、高效减速器、碳化硅电控、整车控制器、电池管理器、直流变换器、车载充电机、配电模块、智能升压模块、智能升流模块、智能自加热模块、能量管理智控系统于一体,搭载这个驱动电机系统的纯电动汽车车速最高可达 225km/h。

尽管集成式驱动电机系统在能量传输效率和空间利用率等方面具有一些明显优势,但是与传统分体式驱动电机系统相比,仍然存在一些不足,主要表现在以下三个方面:

(1) 散热挑战。集成式驱动电机系统将各个功率部件集成在一起,导致热量集中,同时实车中散热条件较差,这可能导致系统内部温度升高。温度过高会降低系统可靠性和安全性,甚至可能影响整车性能。因此,提高集成度需要重新考虑系统散热设计,以确保各个部件都能够保持在正常工作温度范围内。

(2) 维修和维护复杂。集成式驱动电机系统维修和维护通常比分体式驱动电机系统更加复杂,修复故障可能需要专业知识、特殊工装和特殊测试设备,并且在某些情况下,维修人员可能需要拆卸整个系统才能进行维修,这就提高了驱动电机系统维护的难度和成本。

(3) 技术水平还需要进一步提高。集成式驱动电机技术相对还不够成熟,研发难度较大,远高于传统分体式驱动电机系统。还需要考虑额外润滑、冷却需求,以及更严格的布置设计。因此,研发企业需要具备更高水平的集成和设计能力,无疑提高了驱动电机技术开发门槛和成本。

## 1.2.2 按驱动电机数量

按照车辆上驱动电机数量及其配置方式不同,可以将驱动电机系统驱动形式分为单电机集中驱动和多电机分布驱动。

### 1. 单电机集中驱动

单电机集中驱动是指车辆驱动力只来源于同一台驱动电机,因此单电机集中驱动的车辆驱动系统结构和整车布置与传统内燃机汽车十分相似,即通过减速器等机械传动装置将驱动电机输出转矩传递到车轮驱动车辆行驶。在单电机配置中,驱动电机常用于驱动车辆前轮,差速器使前轮以不同速度转动,方便转向。驱动电机将来自动力电池的电能转变成驱动车辆行驶的机械能,并在动能回收中起到发电机作用,将机械能转换成电能储存于动力电池中。单电机集中驱动系统框图如图 1-8 所示。

单电机集中驱动的优点是所需部件少,技术上较为成熟,安全可靠,能适应传统传动方式,制造成本低。缺点是灵活性差,效率不如双电机系统高,变速器降挡和刹车会降低乘坐舒适性。

### 2. 多电机分布驱动

多电机分布驱动是指车辆驱动力来自多台电机,主要包括 3 种类型——双电机驱动、三电机驱动和四电机驱动,如图 1-9 所示。具体形式又有多种,如双轴或多轴独立驱动、轮边驱动、轮毂驱动等。与单电机集中驱动相比,多电机分布驱动能为扭矩矢量分配带来更大自由度,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牵引力和行驶稳定性等优点。

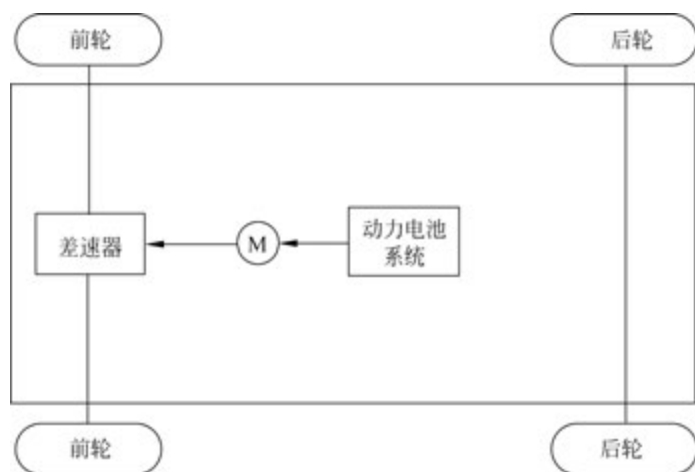


图 1-8 单电机集中驱动系统框图

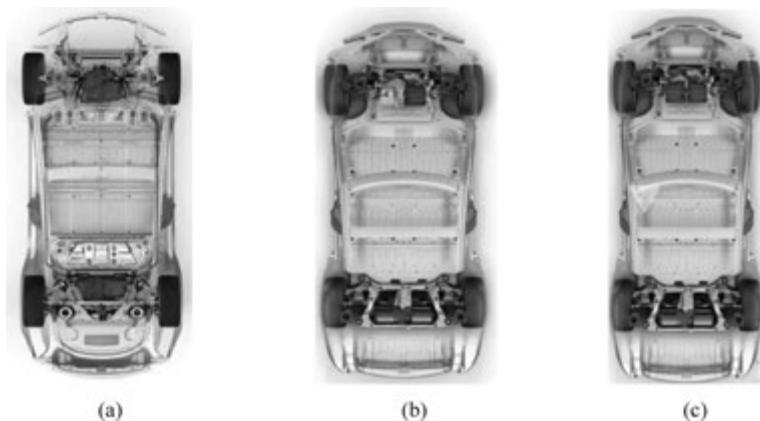


图 1-9 多电机分布驱动示意图

(a) 双电机驱动；(b) 三电机驱动；(c) 四电机驱动

### 1) 双电机驱动

在双电机驱动系统中,前后车轴各有一台驱动电机,分别通过行星齿轮耦合,转矩通过轴固定齿轮连接,前后驱动电机则由一个或两个动力电池包供电。双电机驱动系统框图如图 1-10 所示。采用这种两台电机、两个差速器、两个轴的配置,能为驱动选择不同的功率和扭矩,为变速选择不同传动比,表现出更为灵活的特性。双电机为车轮所提供的动力要大于单电机,两台驱动电机的扭矩结合显著提高了车辆加速性能,特别是在高海拔地区,双电机带来的效率和速度优于单电机。

双电机驱动系统的优点是车辆的加速更快、停止更快、驾驶员几乎无换挡顿挫感、运行平稳。两台驱动电机中,一台用于驱动车辆,另一台还可以作为逆变器为动力电池补充一定的电量。双电机驱动系统的缺点是组装复杂,缺乏标准传动,控制软件要比单电机驱动系统的略微复杂。

### 2) 三电机驱动

在三电机驱动系统中,一台电机装于前轴(配差速器),两台电机装于后轴。三电机驱



彩图 1-9

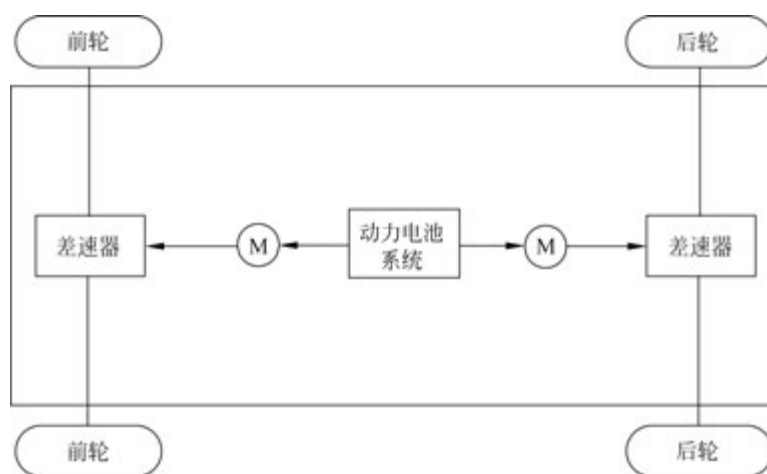


图 1-10 双电机驱动系统框图

动系统框图如图 1-11 所示。正常行驶条件下,后轴上的两台电机分别驱动两个后轮以提高效率,并且能独立驱动车辆。当需要更高性能时,第三台前置电机参与共同驱动车辆。后轴上两台电机的扭矩,通过单速变速器可直接传递给车轮,这就是电动汽车的扭矩矢量分配,无需机械差速器。这显著提高了汽车的操控性、稳定性和抓地力,更具运动感。

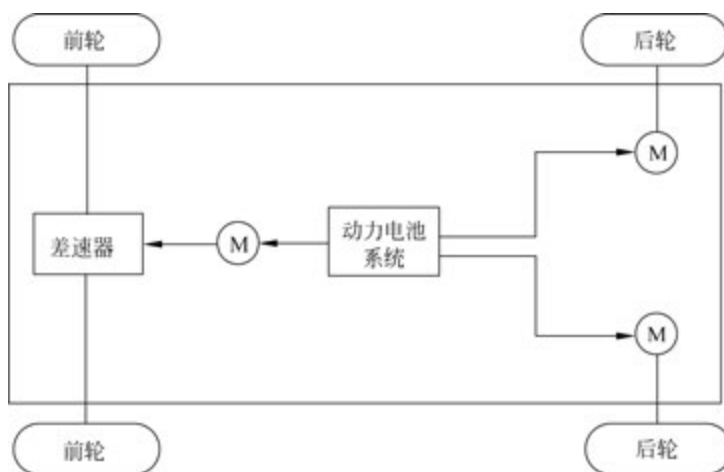


图 1-11 三电机驱动系统框图

### 3) 四电机驱动

在四电机驱动系统中,每个车轮都有专用驱动电机。四电机驱动系统框图如图 1-12 所示。四轮驱动自由控制系统能分别将正、负扭矩精确地控制到每个车轮,也就是全天候扭矩矢量控制,使汽车更安全、更节能。在车辆转弯时内外侧车轮扭矩分配是不同的,通过扭矩矢量分配,外侧车轮获得更大的动力,使车辆转弯更快速更平稳。由于扭矩是根据每台电机的功率自动调整而非机械调整,因此拥有四个驱动电机的车辆,行驶速度和反应速度都更快。在四电机驱动系统中,如果使用轮毂电机效率会更高,而且驱动电机的大部分结构都安装在车轮内,因此也释放出了更多的车内空间。

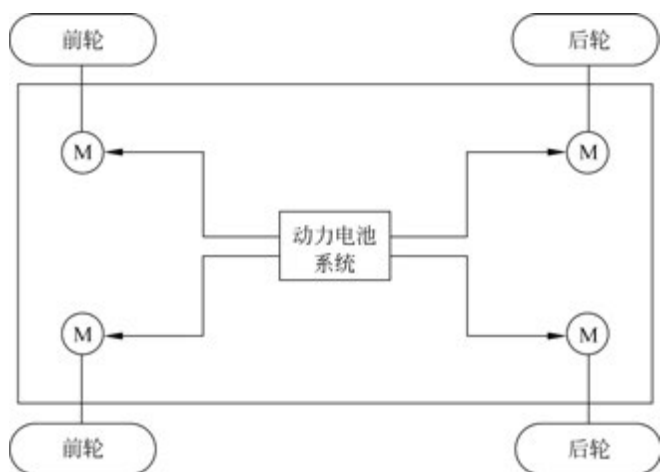


图 1-12 四电机驱动系统框图

### 1.2.3 按电压等级

新能源汽车的长续航能力和短充电时间是各大厂商技术竞争的热点,由此出现了从 400V 高压平台向 800V 高压平台的进化。因此,驱动电机系统按电压等级不同分类,目前有 400V 高压平台和 800V 高压平台两种。400V 高压平台、800V 高压平台是指一个电压范围,高压母线电压在 230~450V 的称为 400V 高压平台,高压母线电压在 550~930V 的称为 800V 高压平台。

400V 高压平台是新能源汽车发展初期各大车商普遍的选择,具有电压等级低、安全性好的优点。但是随着新能源汽车技术的发展,里程焦虑的不断升级,电能利用效率要求的提高,400V 高压平台在充电速度、损耗和能效方面的劣势逐渐凸显,800V 高压平台的出现成为新能源汽车技术发展的必经之路。相比于 400V 高压平台,800V 高压平台的优势明显,主要体现在以下四个方面。

#### 1) 直流快充更快

800V 高压平台允许在相同充电电流下实现更高充电功率为动力电池包充电,以缩短充电时间。在动力电池包充电状态下,充电功率和电功的计算公式如下:

$$P = UI \times 10^{-3} \quad (1-1)$$

$$W = Pt \quad (1-2)$$

式中:  $U$  为充电电压, V;  $I$  为充电电流, A;  $P$  为充电功率, kW;  $t$  为充电时间, h;  $W$  为电功, kW·h。

由式(1-1)可知,充电功率的大小与充电电压和充电电流成正比。因车规级器件和线缆的限制,业内认为 200A 是新能源汽车充电电流的上限,因此 400V 高压平台充电功率的上限是 80kW。可知 400V 高压平台 1h 充电电能上限就是 80kW·h,也就是 80 度电。从式(1-2)可知,在充入相同电能的情况下,要想缩短充电时间,就需要提高充电功率。提高充电功率的途径无非是提高充电电压或提高充电电流。由于充电电流受器件和线缆的限制,提高的空间有限,车企普遍采用提高平台电压的方式提高充电功率。