

电动汽车高效节能驱动与传动系统研究进展

赵升吨^{1,2,3}, 郑臻皓^{1,2,3}, 杜威^{1,2,3}, 曹杨峰^{1,2,3}, 杨啸垠^{1,2,3}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学西安市智能装备与控制重点实验室, 710049, 西安; 3. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 驱动与传动系统是电动汽车的重要组成部分, 高效节能的驱动与传动系统对于提高电动汽车动力性、经济性以及操控稳定性具有重要的意义。从不同驱动方式原理及特点、多电机耦合方式分类和典型应用等方面出发, 综述了国内外电动汽车驱动与传动结构的研究进展。从驱动方式原理及特点方面, 分析总结了单电机驱动、单电机-变速器驱动、双电机耦合驱动以及多电机驱动系统的工作模式及优缺点, 指出了单电机驱动系统存在电机效率低下、动力性欠缺以及节能性不足的问题, 而多电机驱动凭借多种工作模式提高了驱动系统的效率、延长了续航里程, 是未来电动汽车驱动与传动结构的主要类型。从多电机耦合方式分类方面, 详细总结了转速耦合、转矩耦合以及转速转矩耦合3种多电机耦合方式驱动基本原理及研究现状, 明确提出速转矩耦合驱动系统在低速重载、高速轻载路况下都能够灵活的分配多台电机的功率来提高驱动系统的整体效率, 综合性能最好。此外, 总结了目前现有的轮毂电机系统、轮边电机系统以及单桥单电机+单桥双电机驱动系统, 进一步分析表明未来的电动汽车驱动系统应朝着多动力源、一体化、机电耦合方向发展。该研究可为未来电动汽车驱动与传动系统的研发提供参考。

关键词: 电动汽车; 驱动与传动; 转速耦合; 转矩耦合; 节能性

中图分类号: TH132.46 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202504001 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0001-15

Research Progress on Efficient and Energy Saving Drive and Transmission Systems for Electric Vehicles

ZHAO Shengdun^{1,2,3}, ZHENG Zhenhao^{1,2,3}, DU Wei^{1,2,3},

CAO Yangfeng^{1,2,3}, YANG Xiaoyin^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Equipment and Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. National Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: The drive and transmission system is a crucial component of electric vehicles. An efficient and energy-saving drive and transmission system plays a significant role in enhancing the power performance, economic efficiency, and handling stability of electric vehicles. The research advancements of the drive and transmission structure of electric vehicles, both domestically and internationally, are explored, focusing on the principles and characteristics of different driving modes, the classification of multi-motor coupling methods, and typical applications. Regarding

收稿日期: 2024-10-31。 作者简介: 赵升吨(1962—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275373); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52105397)。

网络出版时间: 2024-12-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241231.0901.002>

the principles and characteristics of driving modes, the operating patterns, advantages, and disadvantages of single-motor drive, single-motor drive with transmission, dual-motor coupling drive, and multi-motor drive systems are analyzed and summarized, highlighting the challenges faced by the single-motor drive system, including low motor efficiency, inadequate power performance, and limited energy conservation. On the other hand, multi-motor drives are shown to enhance the efficiency of the drive system and extend the driving range through multiple working modes, making them the primary drive and transmission structure for future electric vehicles. In terms of the classification of multi-motor coupling methods, the fundamental principles and current research status of three multi-motor coupling methods, i. e. speed coupling, torque coupling, and speed-torque coupling, are summarized in detail, with the speed-torque coupling drive system being specifically recommended for its ability to dynamically allocate power from multiple motors, enhancing the overall efficiency of the drive system under low-speed heavy-load and high-speed light-load road conditions, thereby offering superior comprehensive performance. Additionally, existing hub motor systems, wheel-side motor systems, and single-bridge single-motor + single-bridge dual-motor drive systems are reviewed. Further analysis suggests that the future drive system of electric vehicles should transition towards multi-power sources, integration, and electromechanical coupling. This research serves a valuable reference for the development of drive and transmission systems of future electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; drive and transmission; speed coupling; torque coupling; energy saving

随着全世界汽车总保有量的不断增长,汽车尾气排放带来的环境污染问题也日益严重,各国政府为了应对不断严峻的环境污染问题,对汽车制定了越来越严格的排放标准^[1-2]。在传统燃油车日益严苛的排放法规和各国政府在政策上对新能源汽车大力支持的背景下,世界范围内掀起了快速发展新能源汽车的浪潮^[3-4]。发展新能源汽车可大大减少碳排放,对我国落实“双碳”战略具有重要的战略意义^[5-6]。新能源汽车主要包含纯电动汽车、油电混合动力汽车和氢燃料电池汽车^[7-8],为了能够在新能源汽车的赛道上争取先机,全球各大汽车公司根据自身的优劣势,制定了不同的新能源汽车发展战略。

如图1所示,以丰田、大众、本田、通用为代表的传统汽车公司借助于在传统燃油车领域的技术优势,选择从先进燃油车出发,以混合动力汽车作为过渡,将先进燃料电池汽车作为最终方案的发动机优先战略路线^[9],而以特斯拉为代表的新兴电动汽车公司,由于在发动机上缺乏技术优势,选择从豪华电动跑车出发,向下级市场渗透,逐步发展中级和小型电动车的纯电动发展战略^[10-11]。

尽管我国的汽车工业经过多年的发展已经取得了重大的进步,但在传统燃油车的一些关键领域与日本德国等燃油车强国仍然存在一定的差距^[12]。为了

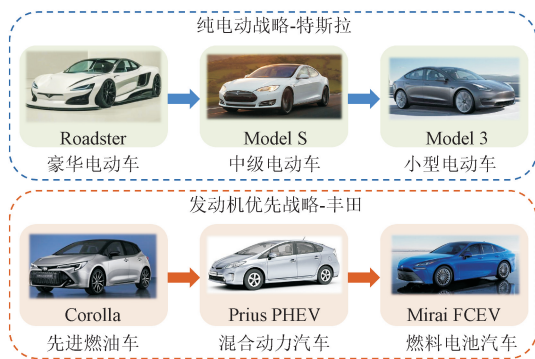


图1 国际著名汽车公司新能源汽车发展战略举例

Fig. 1 Examples of new energy vehicle development strategies of internationally renowned automobile companies

抓住新能源汽车的发展机遇,通过发展新能源汽车使我国从汽车大国迈向汽车强国,我国从十二五规划开始逐步形成了以电动化程度较高的纯电动汽车作为主要战略取向和突破口的“纯电动驱动”发展路径^[13-15]。

为此本文先对电动汽车驱动与传动系统类型及其传动原理进行了简介,对每种驱动与传动类型的应用以及优缺点等方面进行了详细的论述。探讨了电动汽车多电机耦合驱动的类型与方式以及电动汽车传动与驱动的最佳结构,进一步分析了未来电动汽车的具体发展趋势。

1 电动汽车单电机与多电机驱动方式的基本原理及特点

1.1 电动汽车驱动系统分类

电动汽车按照不同驱动方式可以分为前轮驱动汽车、后轮驱动汽车以及四轮驱动汽车^[16-19]。目前,大部分乘用电动汽车基本都采用的是前置前驱,而对于注重操控驾驶的电动车,采用的都是后置后驱或者四轮驱动^[20]。

按照驱动系统分布情况可以分为集中式驱动系统以及分布式驱动系统^[21-23]。集中驱动式电动汽车将电机输出的动力通过变速器、主减速器、差速器等机械装置传递到前轴或者后轴,集中式驱动电动汽车由于需要保留大部分传动系统,因此存在体重较大、体积较大、传递效率较低等缺点^[24-25]。分布式驱动汽车可分为轮毂驱动和轮边驱动 2 种形式,分布式驱动系统取消了传动轴、减速器、差速器等机械结构,驱动电机直接与车轮或者通过减速器与各个驱动车轮相连,使驱动轴的空间布置更加的灵活,每个车轮独立控制还可实现更精确的行驶轨迹控制以及鲁棒性更好的车身稳定性控制^[26]。

按照驱动系统采用电机数量可以分为单电机、双电机以及多电机系统,目前大多数电动汽车均采用单电机驱动结构,这样的驱动系统结构简单,但是在动力性能、经济性能上还存在不足^[27-30]。双电机及多电机驱动系统通过 2 个或者多个电机的转速、转矩耦合,可以实现适用于不同复杂工况的多种工作模式,使电动汽车具备更高的动力和更优的经济性能,双电机以及多电机驱动系统已经成为目前电动汽车驱动系统研究的新方向^[31-34]。

1.2 单电机驱动系统

1.2.1 前轮驱动系统

前轮驱动系统的特征为将电机产生的动力通过传动系统传输到汽车前车桥上。前轮驱动的电动汽车可以更加便捷地布置底盘的空间,而且整车前后轴的负载更加均衡^[35-36]。电动驱动系统包括传动系统、能源系统和辅助系统,是纯电动汽车的 3 个主要组成部分,前轮驱动系统的工作原理如图 2 所示。

1.2.2 后轮驱动系统

后轮驱动系统的特征为将电机产生的动力通过传动系统传输到汽车后车桥上,后轮驱动的电动汽车拥有更好的动力性和运动操控性^[37]。后轮驱动系统组成部分与前轮驱动系统类,其工作原理如图 3 所示。

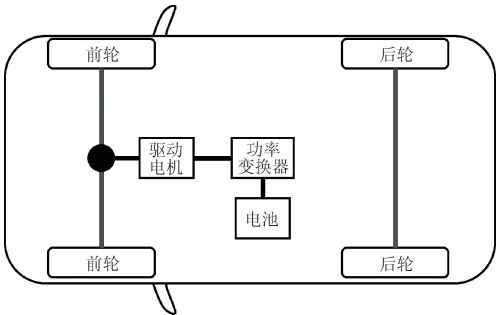


图 2 纯电动汽车单电机前轮驱动系统结构原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of single motor front wheel drive system structure of pure electric vehicle

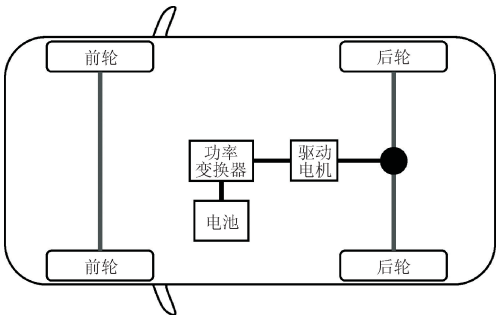


图 3 纯电动汽车单电机后轮驱动系统结构原理示意图
Fig. 3 Schematic diagram of single motor rear wheel drive system structure of pure electric vehicle

1.2.3 单电机-单档变速器构型系统

单电机-单档变速器是目前市面上纯电动汽车采用较多的一种构型,其工作原理如图 4 所示。市面上一般的电动汽车都采用此种驱动传动构型,这种构型结构简单,控制方便,利用单档变速器可以放大电机的输出性能,因此对驱动电机的性能要求不高,可以降低所需电机的输出功率并减小电机的尺寸,故成本较低^[38]。

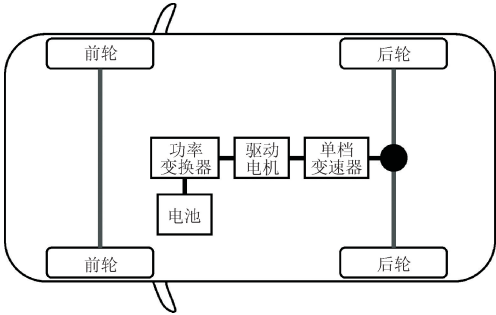


图 4 纯电动汽车单档变速器结构原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram of single-speed transmission structure of pure electric vehicle

1.2.4 单电机-多档变速器构型系统

单电机直接驱动和单档变速电动汽车不能满足

新时代电动汽车车辆动力性指标与经济性要求,且一般需要大功率的驱动电机^[39]。为了在降低驱动电机性能要求、保障车辆动力性指标不下降的同时,提高车辆的经济性能和续航里程,可将前述的单档变速器变为多档变速器,如图 5 所示。搭载多档变速器的纯电动汽车在动力性能与经济性能方面有了极大地提高,特别是在中高速阶段的加速能力有了显著的提高^[40]。尽管多档变速器能够根据路况选择合适的挡位,拓宽驱动系统的工作范围,但当车辆的需求功率较小时,电机长时间工作在低负载率状态,大功率电机在低负载率状态的效率较低,导致车辆的能耗增加,缩短了车辆的续航里程^[41-42]。

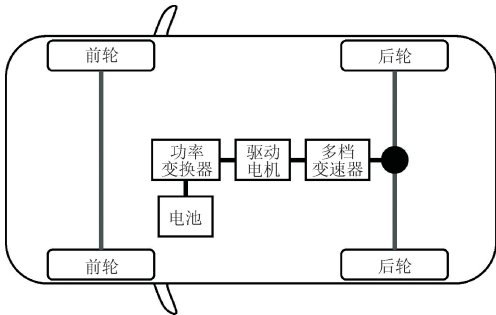


图 5 纯电动汽车多档变速器结构原理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of multi-speed transmission structure of pure electric vehicle

1.3 双电机驱动系统

1.3.1 前后轴分布驱动系统

前后轴分布驱动系统目前已经在一些高端的电动汽车上有所应用,其具体结构如图 6 所示。该系统在电动汽车前轴和后轴上分别布置了一个驱动电机,其本质是实现了前后轴 2 个电机的转矩耦合^[43-44]。市场上配备双电机分布式驱动系统的零百公里加速时间可达 5 s 以内,但当车辆工作在单电机模式时,会带动另一台电机空转,如果采用永磁

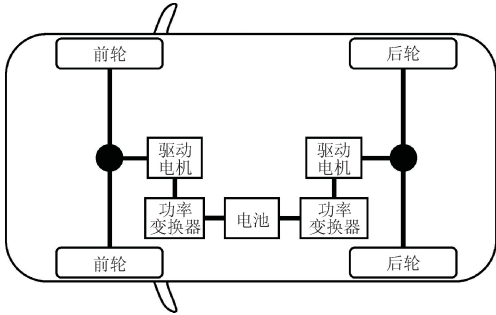


图 6 纯电动汽车前后轴分布驱动结构原理示意图
Fig. 6 Schematic diagram of front and rear axle distribution drive structure of pure electric vehicle

同步电机,此时电机处于发电状态,会产生损耗,损耗功率高速时可达 2 kW,即使采用感应电机,空转时也存在风阻、搅油等损耗,高速时损耗功率也有 0.75 kW,且感应电机的效率低于永磁同步电机^[45]。

1.3.2 双电机耦合驱动系统

由于单电机驱动系统在不同的运行工况下不能保证驱动电机一直运行在最佳工况下,在重载或者高速工况下电机常常工作在低效率区间,从而影响电机的节能性和动力性^[46-47]。双电机和齿轮系复合驱动系统可以使 2 个电机在复杂工况下,通过 2 个电机的耦合输出使 2 个电机都工作在高效区间,并获得更佳的经济性能和动力性能^[48-49]。该种驱动系统结构原理如图 7 所示,主要由 2 个电机和传动系统组成,传动系统则由行星轮系等复杂齿轮系统组成。

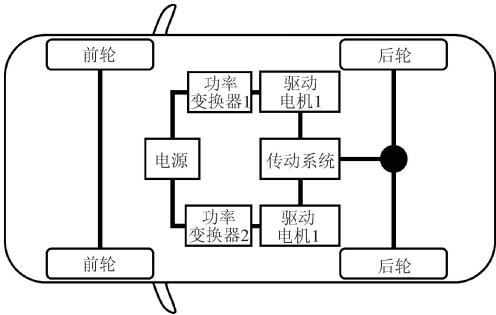


图 7 纯电动汽车双电机耦合驱动结构原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of compound drive structure of double motor of pure electric vehicle

1.3.3 轮边驱动系统

轮边电机驱动形式是将电机安装在车轮的旁边和悬架下方的位置,轮边电机通过减速器与车轮连接,是分布式驱动的一种常见方式^[50],其结构如图 8 所示。轮边驱动系统不需要传输轴等复杂的传动装置、减少了动力传输系统的占用空间、增加了车内的空间利用率^[51]。同时轮边驱动系统还可以使悬挂

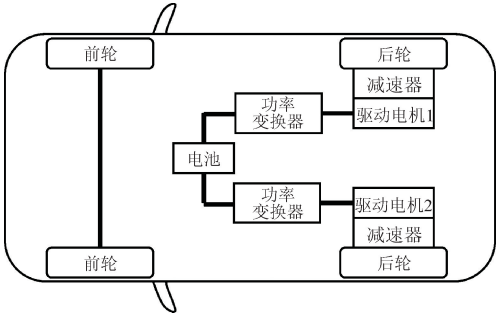


图 8 轮边电机驱动系统结构原理示意图
Fig. 8 Schematic diagram of wheel motor drive system structure

系统和转向系统设计更为自由度更大,轮胎接地面积更大,转向更为灵活,在车辆加速、刹车等方面具有优越的驾驶感受^[52]。

1.4 3 个及其以上的电机驱动系统

1.4.1 轮毂电机系统

轮毂电机通过将整个驱动传动系统集成在轮毂内部,能够轻松实现各轮的独立控制,有利于提高车辆的灵活性、安全性及操控性能^[53],其结构原理如图 9 所示。轮毂电机系统其实也是一种转矩耦合方式,4 个轮毂电机独立工作将转矩传递到路面,通过控制 4 个电机的转矩可使电动汽车在复杂的工况下运行^[54-55]。

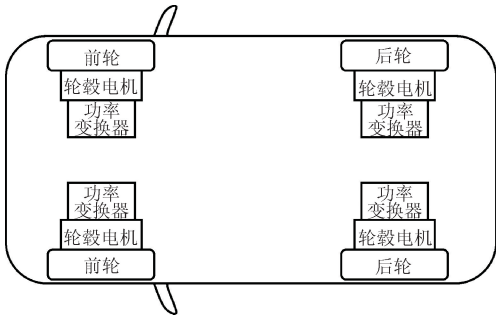


图 9 轮毂电机驱动系统结构原理示意图

Fig. 9 Wheel hub motor drive structure schematic diagram

1.4.2 多个电机耦合集中驱动系统

多电机耦合系统则可以实现更加复杂的耦合方法,常见的多电机耦合驱动系统如图 10 所示,多电机耦合驱动方法进一步加强电机的经济性和动力性,使各个电机都工作在最佳的工作区间^[56]。然而,更多的电机将会导致电动汽车驱动系统的控制更加复杂,成本也进一步增加,对于电机同步等要求也更高。所以,对于转速转矩耦合驱动方式,选择采用几个电机需要综合考虑经济性、动力性和操控安全性等各项指标。

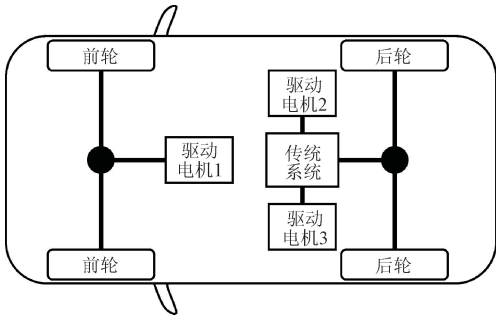


图 10 纯电动汽车三电机耦合驱动系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of three-motor coupling drive system of pure electric vehicle

1.5 总 结

电动汽车驱动与传动系统按照驱动系统位置可以分为前驱系统、后驱系统和四驱系统;按照采用电机数量可以分为单电机驱动系统、双电机驱动系统以及多电机驱动系统;按照是否采用减速器可以分为直驱系统、减速驱动系统以及耦合驱动系统。

单电机驱动系统存在电机效率低下、动力性欠缺以及节能性不足等问题,无法满足复杂工况下电动汽车行驶的要求。双电机耦合驱动系统通过 2 台电机和耦合机构的配合,能够实现多种工作模式。在车辆行驶过程中根据路况选择合适的工作模式并合理分配 2 台电机的功率,使得 2 台电机都工作在效率较高的区间,能够提高整个驱动系统的效率,延长车辆的续驶里程。从节能性、工作可靠性、操控稳定性、平顺性、制动性、动力性等多方面考虑,现代电动汽车未来的发展方向都是双电机及其以上的驱动方式。

2 多电机驱动与传动耦合方式的分类

根据工作模式的不同,本文将双电机耦合驱动系统分为 3 类^[57]:①转速耦合驱动系统;②转矩耦合驱动系统;③多模式耦合驱动系统。下面分别总结这 3 种类型双电机耦合驱动系统的研究现状。

2.1 转速耦合系统

转速耦合驱动系统的主要特点是驱动系统输出轴的转速是 2 台电机的线性组合,2 台电机的转矩和驱动系统输出轴之间呈一定的比例关系。转速耦合最常见的实现方式是借助行星轮系,如图 11 所示,2 台电机分别连接行星轮系的太阳轮和齿圈,行星架作为驱动系统的输出轴,根据行星轮系的运动学方程,输出轴的转速为 2 台电机的线性组合,扩大了驱动系统的输出转速范围,在需求车速一定的情况下,2 台电机的转速可以在一定范围内任意分配,以提高驱动系统整体效率。

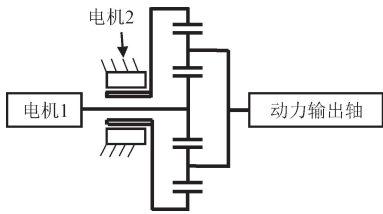


图 11 转速耦合驱动的基本实现方式

Fig. 11 Basic realization of speed coupling drive

转速耦合模式大多依靠行星轮系实现,除了图

11 所示的基本方式,图 12 展示了几种改进的转速耦合驱动系统。图 12(a)采用了拉维娜式行星轮系实现转速耦合驱动,通过控制制动器的状态,能够在转速耦合模式下实现多个档位^[58];图 12(b)使用单排行星轮系搭配定轴轮系,仅需要一个制动器就能够实现单电机驱动和转速耦合驱动模式,降低了结构设计的复杂度和控制难度^[59];图 12(c)中 2 台电机同轴同侧布置,电机 2 采用中空转子的设计,相比图 12(b),图 12(c)所示结构包含 2 个制动器,因此除了转速耦合模式,2 台电机都能够单独驱动车辆,增加了系统的容错率^[60]。

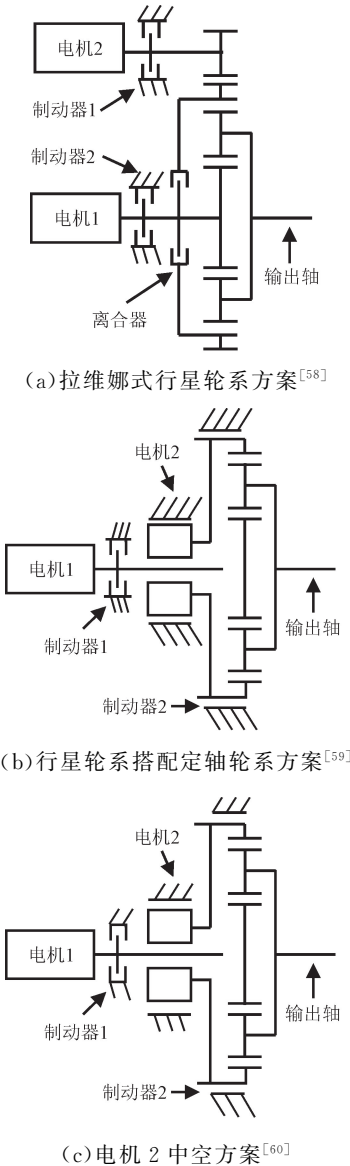


图 12 转速耦合驱动系统-行星轮系

Fig. 12 Speed coupled drive system-planetary gear train

2.2 转矩耦合系统

转矩耦合驱动系统的主要特点是驱动系统输出

轴的转矩是 2 台电机的线性组合,2 台电机的转速和驱动系统输出轴之间呈一定的比例关系。最简单的转矩耦合驱动系统如图 13 所示,2 台电机的转矩通过定轴齿轮系叠加后共同驱动车辆,扩大了驱动系统的输出转矩范围,在需求牵引力一定的情况下,2 台电机的转矩可以在一定范围内任意分配,以提高驱动系统整体效率。

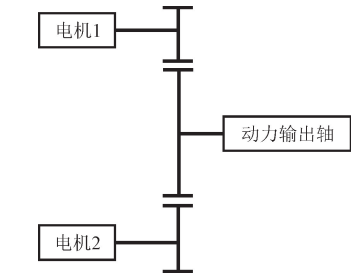


图 13 转矩耦合驱动的基本实现方式

Fig. 13 Basic realization of torque coupling drive

转矩耦合驱动系统的结构相对简单,实现方式较多,根据耦合机构的具体实现方式可将其进一步分为定轴轮系和行星轮系 2 种。其中定轴轮系除了图 14 所示的方式,还可以将 2 台电机同轴布置以减小驱动系统的体积,使驱动系统集成度更高。

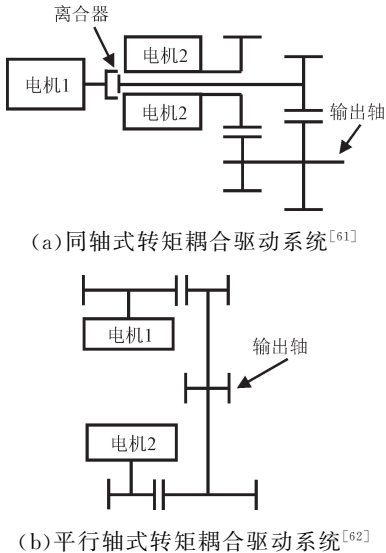


图 14 基于定轴轮系的转矩耦合驱动系统

Fig. 14 Torque coupling drive system based on fixed axle gear train

如图 14(a)所示,电机 2 采用中空转子,2 台电机分别连接 2 组传动比不同的定轴轮系,可以实现 2 台电机分别单独驱动以及双电机转矩耦合模式^[61]。图 14(b)将 2 台电机同轴固连,优点是结构简单,不需要离合/制动器,但单电机模式下,另一台

电机处于空转状态,降低了驱动系统的效率^[62]。

行星轮系中的任意 2 个部件都可以作为动力输入轴,另一个部件作为动力输出轴,因此基于行星轮系的转矩耦合模式实现方式较为灵活。图 15 为 2 种基于单排行星轮系的转矩耦合驱动系统,图 15(a)所示的驱动系统中电机 2 连接至行星轮系的太阳轮,通过控制 2 个制动器的状态,电机 2 能够以 2 个不同的传动比与电机 1 相连,以适应不同路况的需要^[63];图 15(b)所示的驱动系统中不需要离合器或制动器,电机 2 的动力经过行星轮系减速增扭后,与电机 1 的动力共同通过定轴轮系输出,优点是结构简单,但当驱动系统处于单电机模式下时,另一台电机存在空转损耗,导致单电机模式下的效率降低^[64]。

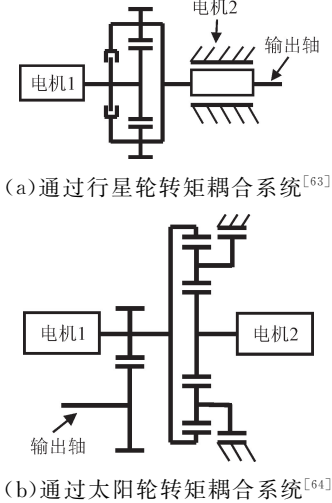
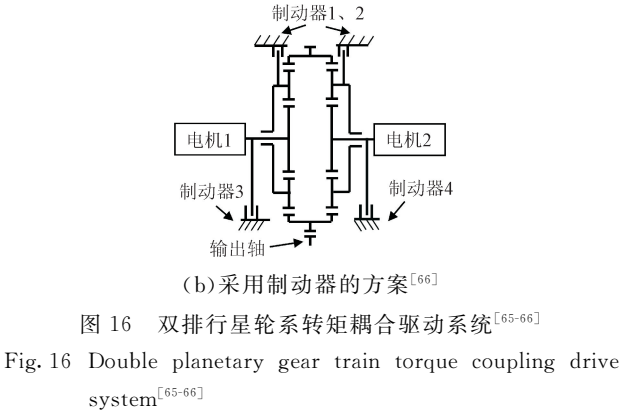
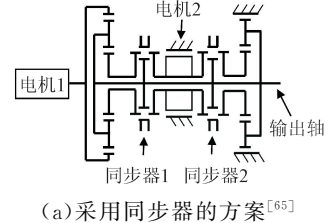


图 15 基于单排行星轮系的转矩耦合驱动系统^[63-64]
Fig. 15 Torque coupling drive system based on single row planetary gear train^[63-64]

单排行星轮系转矩耦合驱动系统中,由于电机到输出轴之间的传动比固定,调速范围较窄,采用双排行星轮系可以拓宽调速范围。如图 16(a)所示,通过控制 2 个同步器的接合状态,可在转矩耦合模式下实现多个档位,扩大了驱动系统的整体转速输出范围^[65];图 16(b)中 2 台电机和行星轮系对称布置,通过控制制动器的状态,沿齿圈对称的每一侧都能实现 2 个传动比^[66]。双排行星轮系转矩耦合驱动系统尽管能够拓宽驱动系统的转速范围,但也带来了结构复杂,执行元件多,对控制策略要求高等难题。



2.3 多模式耦合系统

双电机多模式耦合驱动系统能够实现转速和转矩耦合 2 种驱动方式,有些在此基础上还搭配定轴轮系以实现多个档位,进一步拓宽了转速和转矩的调节范围。多模式耦合驱动系统的实现同样依赖于行星轮系,由于各部件间可能的连接方式复杂多变,多模式耦合驱动系统有多种实现方式^[67-70],根据行星轮系的数量,将其分为单排行星轮系和多排行星轮系 2 类。

图 17 展示了 2 种基于单排行星轮系的多模式耦合驱动系统。图 17(a)所示的驱动系统中包含 2 个离合器和一个制动器,能够实现电机 1 单独驱动,双电机转速耦合驱动系统和双电机转矩耦合驱动 3 种模式^[67],图 17(b)所示的驱动系统中包含一个同步器和 2 个制动器,同步器的在功能上相当于 2 个离合器,因此图 17(b)所示的驱动系统中除了转速和转矩耦合模式,2 台电机还能够分别单独驱动车辆,共有 4 种工作模式^[68]。

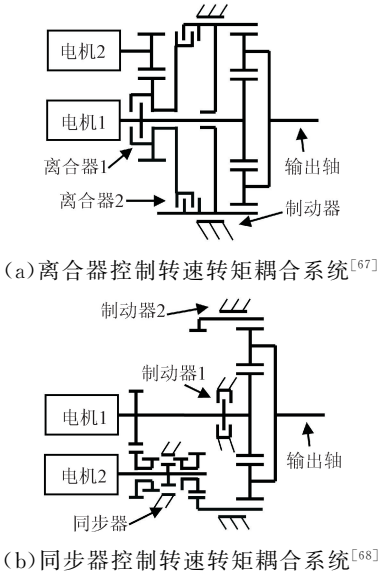


图 17 基于单排行星轮系的多模式耦合驱动系统^[67-68]
Fig. 17 Multi-mode coupling drive system based on single planetary gear train^[67-68]

基于单排行星轮系的多模式耦合驱动系统的缺点是 2 台电机的输出转速和转矩会互相限制。以图 17(a)所示的驱动系统为例,转速耦合模式下,电机 1 连接太阳轮,电机 2 连接齿圈,根据行星轮系的动力学方程,此时 2 台电机的转矩成一定的比例关系,电机 2 的需求扭矩显著大于电机 1,当 2 台电机的规格相同时,驱动系统的最大输出扭矩受电机 2 限制,电机 1 始终工作在低转矩下。为了克服这一缺点,一些学者提出了基于双排行星轮系的多模式耦合驱动系统^[71-72],如图 18 所示,2 种方案都将电机 2 的动力经过第一排行星轮系减速增扭后连接到第二排行星轮系,通过合理地选择行星轮系的参数,能够使转速耦合模式下,2 台电机的扭矩同时达到或接近峰值扭矩,转矩耦合模式下,2 台电机的转速同时达到或接近最大转速,以充分发挥 2 台电机的性能。

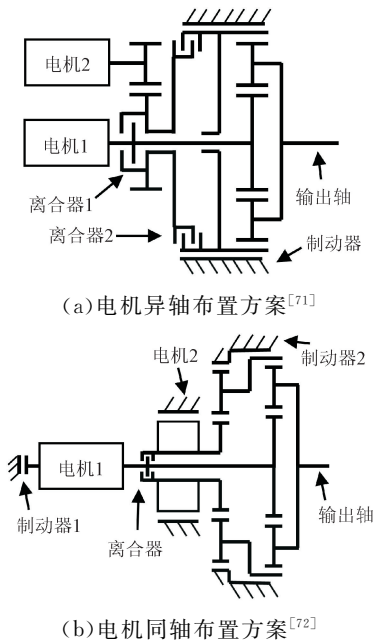


图 18 基于双排行星轮系的多模式耦合驱动系统^[71-72]
Fig. 18 Multi-mode coupling drive system based on double planetary gear train^[71-72]

2.4 总 结

多电机耦合驱动系统可以分为转速耦合、转矩耦合以及转速转矩耦合 3 种模式。转速耦合模式扩大了驱动系统的输出转速范围,在需求车速一定的情况下,2 台电机的转速可以在一定范围内任意分配,以提高驱动系统整体效率。转矩耦合模式扩大了驱动系统的输出转矩范围,在需求牵引力一定的情况下,2 台电机的转矩可以在一定范围内任意分配,以提高驱动系统整体效率。转矩和转速耦合模

式的优缺点是相互弥补的,因此结合了两者的优点的多模式耦合驱动系统在低速重载、高速轻载路况下都能够灵活的分配多台电机的功率来提高驱动系统的整体效率,综合性能最好,是未来电动汽车传动与驱动系统发展的方向。

3 典型的多电机驱动与传动耦合原理特征及其应用

3.1 轮毂电机驱动系统

在各类纯电动汽车驱动方式中,使用轮毂电机驱动的方式被认为具有巨大的发展空间,被誉为电动汽车的“终极”驱动方式^[73]。但是,目前轮毂电机还存在簧下质量偏大、空间受限、电机高效区间无法满足全部工况等问题^[74-75]。目前,轮毂电机类型按照驱动方式主要可以分为减速驱动型轮毂电机和直接驱动型轮毂电机^[76]。减速驱动型轮毂电机一般采用内转子电机加减速器的形式,在工作过程中电机大部分时间运行在高速状态,减速装置安装于电机和轮毂中间,起到减速升矩的作用^[76-80]。对于可变速比轮毂电机系统,目前国内外还少有研究。

日本精工株式会社 (NSK) 研发出可以实现变速传动的轮毂电机系统^[81]。该轮毂电机由 2 个径向磁场永磁同步电机驱动,具有 3 排行星齿轮机构,可以实现低速和高速两挡传动比,其传动原理如图 19 所示。当第一行星齿轮机构离合器接合时,轮毂电机工作于低速挡,当离合器非接合时,轮毂电机工作于高速挡状态^[82]。

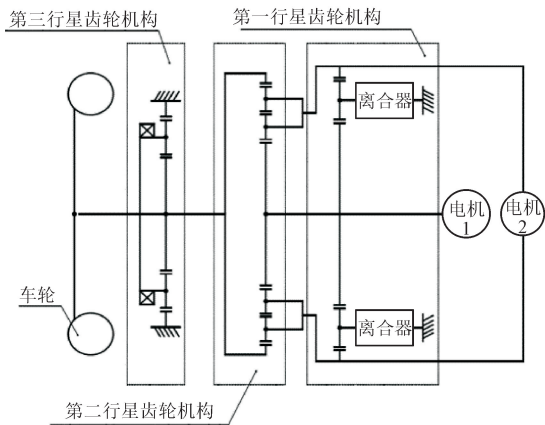
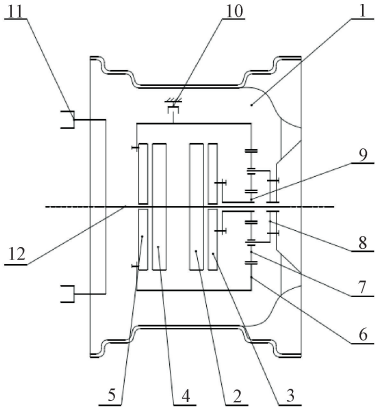


图 19 日本 NSK 公司研发配备变速箱的轮毂电机
Fig. 19 Japan's NSK company developed a wheel hub motor equipped with a gearbox

图 20 为西安交通大学开发的适用于电动汽车轮毂电机的双定子双转子的轴向交流永磁同步电

机,通过行星轮系实现动力的耦合^[83-85]。可实现单电机驱动和双电机耦合驱动 2 种工作模式。



1—轮毂;2—电机 1 定子;3—电机 1 转子;4—电机 2 定子;
5—电机 2 转子;6—齿圈;7—行星轮;8—行星架;
9—太阳轮;10—制动器;11—悬架;12—轴。

图 20 双定子双转子转速耦合轮毂电机

Fig. 20 Two-stator two-rotor speed coupled wheel hub motor

3.2 轮边电机驱动系统

将电机和驱动桥实现同轴布置即为轮边分布式电驱动桥^[86],这种驱动构型不仅可以取消传统车桥的机械差速器,也取消了桥壳和半轴等机械结构,在双电机集成式驱动桥基础上实现了进一步的减重,所以其驱动桥的重量和传统燃油重卡驱动桥相近,电动重卡簧下质量突出的问题得以部分解决^[87-88]。由于电机就在轮边驱动车轮,因此动力传输路线更短,传动效率更高。

在国外,采埃孚和梅赛德斯奔驰推出应用轮边分布式驱动桥的纯电型重型卡车^[89-90]。在国内,比亚迪也在 K9 大巴上推出了轮边电机驱动系统,其原理图如图 21 所示。该驱动桥具有高效、集成、轻

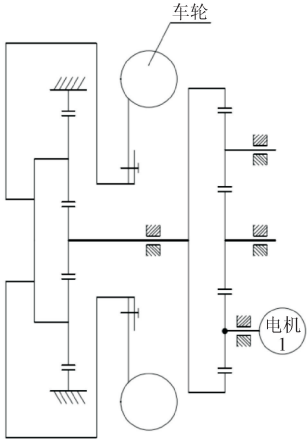
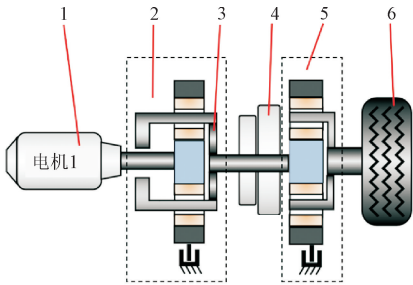


图 21 比亚迪 K9 轮边电机系统

Fig. 21 BYD K9 wheel edge motor system

量化的特点,将电机外壳和驱动桥壳一体化,取消了传动轴等传统驱动桥的机械硬链接,不需要像外置中央驱动电机以及设计电机在车辆上的布置,方便在车辆上布局。

图 22 为西安交通大学开发的两半桥分布式双电机耦合驱动结构示意图。该驱动系统共有 2 种工作模式,包括单电机工作模式和转矩耦合驱动模式。在单电机工作模式下,动力由盘式电机驱动通过轮边行星轮系传输至车轮;在转矩耦合模式下,2 个电机的动力通过转矩耦合再由轮边行星轮系传输至车轮。



1—电机 1;2—第一行星轮系;3—同步器;4—电机 2;
5—轮边行星轮系;6—车轮。

图 22 两半桥分布式双电机耦合驱动结构示意图

Fig. 22 Schematic diagram of two-half bridge distributed dual-motor coupling drive structure

3.3 多电机耦合集中驱动系统

3.3.1 双电机前后轴集中驱动系统

目前市场上出现的多电机驱动汽车主要以双电机构型为主^[91]。根据双电机分布位置不同,双电机驱动模式又可分为前后轴双电机四轮驱动和单轴集中耦合驱动系统,而前者目前应用较为广泛^[92]。如特斯拉的畅销车型 Model Y 即采用了前面章节中图 6 所示的前后轴双电机驱动技术,整个驱动系统可输出的峰值功率高达 317 kW,100 km/h 加速时间可达 5.1 s;在整车经济性方面,该车在 WLTC 工况下续航里程为 480 km,能耗测试表现出色^[93]。

3.3.2 双电机单轴集中耦合驱动系统

双电机单轴集中耦合驱动系统目前在工业界应用较少,但是有很多公司和高校对此进行了大量的研究。河南宇通公司公开了一种双电机耦合驱动系统构型,其结构原理如图 23 所示。该构型的具体布置形式为:2 个驱动电机中的一个与太阳轮连接并将动力输入到太阳轮,另一个驱动电机和齿圈连接并将动力输入到齿圈;行星轮系的行星架作为动力输出机构;整个构型中存在 2 个制动器,制动器 1 能

够选择是否接合以制动电机 2,而制动器 2 能够选择是否接合以制动电机 1^[94-99]。

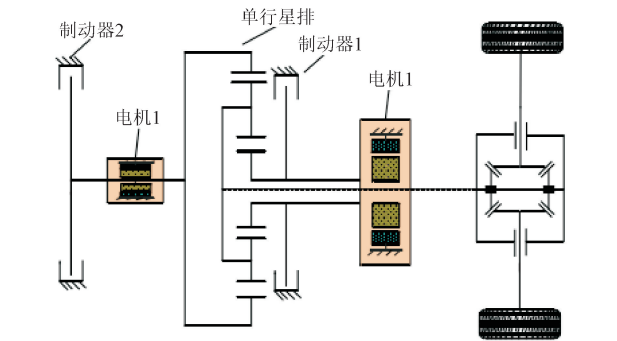
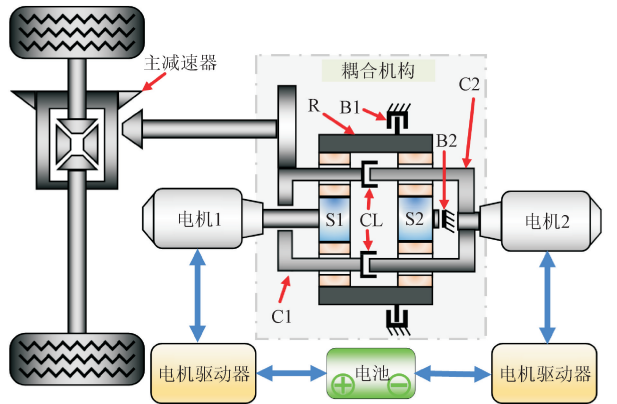


图 23 宇通客车双电机耦合驱动构型结构原理示意图
Fig. 23 Yutong bus dual motor coupling drive configuration schematic diagram

图 24 为西安交通大学开发的适用于电动货车的双电机双排行星轮系三模式驱动传动新方式。该系统可以实现单电机模式、双电机转矩耦合模式和双电机转速耦合模式 3 种驱动传动方法,利用单向离合器实现了采用 2 个控制源实现 3 种工作模式的切换^[100]。



B1—行星轮制动器;B2—太阳轮制动器;C1—左侧行星轮系行星架;
C2—右侧行星轮系行星架;CL—单向离合器;S1—左侧太阳轮;
S2—右侧太阳轮;R—齿圈。

图 24 双电机双排行星轮系驱动传动新方式原理图及原型机
Fig. 24 Two motors, two rows of planetary gear train drive and transmission new mode schematic and prototype

3.3.3 三电机以上集中式耦合驱动系统

2 个以上电机驱动系统逐渐成为高端电动汽车所必备的要求之一,高端电动汽车常用的三电机以上驱动系统为如前面章节中图 10 所示的前后轴三电机系统,奥迪、广汽埃安以及最近才生产电动汽车的小米 SU7 Ultra 都采用这种结构。奥迪推出的三电机纯电驱动奥迪 E-tron 构型为其中一台电机布

置于前轴,其余 2 台电机则布置于后轴,分别驱动两侧车轮。后轴驱动系统可在极短时间内实现对左右转矩的分配过程,最大可分配高达 2 100 N·m 的轮间差动转矩,其产生的横摆力矩能够极大程度上提高转向性能^[101]。

3.4 总 结

四轮独立驱动系统和轮边驱动系统是特殊的多电机耦合驱动系统,采用分布式驱动的方式实现了多个电机之间的转矩耦合。通过将驱动电机布置在轮内与车轮直接耦合,取消差速器、半轴等一系列传动部件大大节省了汽车空间,同时通过各电机独立控制使汽车适应更加复杂的工况,是未来电动汽车发展的重要方向。

三电机驱动构型凭借其单桥单电机+单桥双电机的结构,通过合理的参数匹配及适当的控制策略,既能够满足整车转矩需求,又可以更好地通过左右轮转矩分配技术满足高速过弯时整车的稳定性和机动性控制,还可以在行驶过程中通过多电机转矩分配提升整车经济性。未来对于动力性能和操控性能均要求较高的车型,三电机及其以上的驱动系统构型的研究具有重要的研究意义。

4 结 论

(1)电动汽车驱动与传动系统可以按照驱动系统位置分为前驱系统、后驱系统和四驱系统;按照采用电机数量可以分为单电机驱动系统、双电机驱动系统以及多电机驱动系统;按照是否采用减速器可以分为直驱系统、减速驱动系统以及耦合驱动系统。

(2)单电机驱动系统存在电机效率低下、动力性欠缺以及节能性不足等问题,无法满足复杂工况下电动汽车行驶的要求。多电机耦合驱动系统能够实现多种工作模式,可根据路况切换工作模式使各电机都工作在效率较高的区间,提高驱动系统的效率,延长车辆的续驶里程,是未来电动汽车驱动与传动系统的发展方向。

(3)多电机耦合驱动系统可以分为转速耦合、转矩耦合以及转速转矩耦合 3 种模式。转矩和转速耦合模式的优缺点是相互弥补的,因此结合了两者的优点的多模式耦合驱动系统在低速重载、高速轻载路况下都能够灵活地分配多台电机的功率来提高驱动系统的整体效率,综合性能最好。

(4)四轮独立驱动系统和轮边驱动系统是特殊的多电机耦合驱动系统,采用分布式驱动的方式实现了多个电机之间的转矩耦合,节省汽车空间,同时

通过各电机独立控制使汽车适应更加复杂的工况。

(5)三电机驱动构型凭借其单桥单电机+单桥双电机的结构,通过合理的参数匹配及适当的控制策略,可提高电动汽车动力性、转弯稳定性和经济性。对于动力性能和操控性能均要求较高的车型,三电机及其以上的驱动系统构型的研究具有重要的研究意义。

(6)未来的电动汽车驱动与传动系统应朝着多动力源、一体化、机电耦合方向发展。多电机耦合驱动系统的开发具有重大的研究价值,寻找具备更优性能的多电机耦合驱动系统将成为解决电动汽车发展瓶颈的关键所在。

参考文献:

[1] WU Ye, ZHANG Shaojun, HAO Jiming, et al. On-road vehicle emissions and their control in China: a review and outlook [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 332-349.

[2] SADOI Y. The impact of Euro 4 automobile emission regulations on the development of technological capabilities in ASEAN [J]. Journal of the Asia Pacific Economy, 2018, 23(2): 279-296.

[3] IEA. Global EV outlook 2021 [EB/OL]. [2021-07-09]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.

[4] HOSSAIN M S, KUMAR L, ISLAM M M, et al. A comprehensive review on the integration of electric vehicles for sustainable development [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022: 3868388.

[5] ZHANG Runsen, HANAOKA T. Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060: provincial disparities in energy systems, CO₂ emissions, and cost effectiveness [J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 170: 105622.

[6] ZHENG Jihu, SUN Xin, JIA Lijie, et al. Electric passenger vehicles sales and carbon dioxide emission reduction potential in China's leading markets [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118607.

[7] TRAN D D, VAFAEIPOUR M, EL BAGHDADI M, et al. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: topologies and integrated energy management strategies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109596.

[8] CHAKRABORTY M R, DAWN S, SAHA P K, et al. Evolution and present status of electric vehicles: a comprehensive review [C]//2024 International Conference on Computational Intelligence for Green and Sus-

tainable Technologies (ICCI GST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-6.

[9] BUTTERS J. COMMENT: Toyota, Tesla and the UAW [J]. Automotive News, 2023(7112): 12-13.

[10] CRONIN S. Trends: electric vehicle sales reached record levels in Q2 [J]. Oil Express, 2024(29): 47.

[11] 臧琳, 刘佳鑫, 翟诺, 等. 全球电动汽车能量管理专利情报与我国发展路线研究 [J]. 中国发明与专利, 2024, 21(6): 56-65.

ZANG Lin, LIU Jiaxin, ZHAI Nuo, et al. Research on global electric vehicle energy management patent intelligence and China's development route [J]. China Invention & Patent, 2024, 21(6): 56-65.

[12] 欧阳明高. 中国新能源汽车未来 10 年周期性和结构性趋势展望 [J]. 科技导报, 2024, 42(12): 6-13.

OUYANG Minggao. Prospects for the cyclical and structural trends of China's new energy vehicles in the next ten years [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(12): 6-13.

[13] 国务院. 国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)的通知: 国发〔2012〕22 号 [EB/OL]. (2012-07-09) [2024-08-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2012-07/09/content_3635.htm.

[14] 尹彪, 段鹏飞. “双碳”背景下我国新能源汽车产业发展对策 [J]. 上海节能, 2023(8): 1048-1052.

YIN Biao, DUAN Pengfei. Development strategies for China's new energy vehicle industry under background of “double carbon” [J]. Shanghai Energy Saving, 2023(8): 1048-1052.

[15] 王品. 中国新能源汽车发展现状及对策建议 [J]. 汽车实用技术, 2024, 49(8): 187-191.

WANG Pin. China's new energy vehicle development status and countermeasures suggestions [J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(8): 187-191.

[16] WANG Rongrong, CHEN Yan, FENG Daiwei, et al. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3962-3971.

[17] DENG Lei, ZHAO Jin, NING Donghong, et al. Design of a dual-motor powertrain with magnetorheological planetary transmission for electric vehicles [C]//WCX SAE World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2024: 2024-01-2636.

[18] TANG Zhao, XU Xing, JIANG Xinwei, et al. Optimal torque distribution strategy for minimizing energy consumption of four-wheel independent driven electric ground vehicle [J]. Journal of Applied Science and En-

- gineering, 2018, 21(3): 375-384.
- [19] WANG Xin. Optimal torque distribution for energy consumption of pure [C]//2023 IEEE 4th China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 1-6.
- [20] TROVÃO J P F. Tutorial speaker #1: optimal drivetrain design methodology for enhancing dynamic and energy performances of dual-motor electric vehicles [C]//2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 1-2.
- [21] NGUYEN C T P, NGUYEN B H, TA M C, et al. Dual-motor dual-source high performance EV: a comprehensive review [J]. Energies, 2023, 16(20): 7048.
- [22] JU Fei, DU Wei, ZHUANG Weichao, et al. Profit-effective component sizing for electric delivery trucks with dual motor coupling powertrain [J]. Energy, 2024, 296: 131055.
- [23] 姜博耀, 张丽萍. 分布式驱动电动汽车侧向稳定性集成控制策略综述 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 222-228.
- JIANG Boyao, ZHANG Liping. Review of integrated control strategies for lateral stability of distributed-drive electric vehicles [J]. Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition), 2024, 44(4): 222-228.
- [24] 高惠民. 电动汽车分布式驱动技术与应用(一) [J]. 汽车维修与保养, 2024(8): 43-47.
- GAO Huimin. Distributed drive technology and application of electric vehicle(I) [J]. For Repair & Maintenance, 2024(8): 43-47.
- [25] YU Sheng, HASPOLAT C, YALCIN Y, et al. Motor-temperature-aware optimal energy management for dual-motor electric buses [C]//2024 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-6.
- [26] 潘世坤. 汽车分布式电机驱动技术专利分析 [J]. 科技与创新, 2024(1): 118-120.
- PAN Shikun. Patent analysis of automotive distributed motor drive technology [J]. Science and Technology & Innovation, 2024(1): 118-120.
- [27] HU Xiaosong, LI Yapeng, LV Chen, et al. Optimal energy management and sizing of a dual motor-driven electric powertrain [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7489-7501.
- [28] TIAN Yang, ZHANG Yahui, LI Hongmin, et al. Optimal sizing and energy management of a novel dual-motor powertrain for electric vehicles [J]. Energy, 2023, 275: 127315.
- [29] TIAN Yang, WANG Zihao, JI Xiaoyu, et al. A concept dual-motor powertrain for battery electric vehicles: principle, modeling and mode-shift [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 185: 105330.
- [30] ADNANE M, NGUYEN C T P, KHOUMSI A, et al. Real-time torque-distribution for dual-motor off-road vehicle using machine learning approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 4567-4577.
- [31] ALLCA-PEKAROVIC A, KOLLMAYER P, MIDLETON M, et al. A review of production multi-motor electric vehicles and energy management and model predictive control techniques [C]//WCX SAE World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2024: 2024-01-2779.
- [32] KANE S, NELSON D, HUXTABLE S. Comparison of torque-split strategies for an independent axle, dual-motor all-wheel drive electric vehicle [C]//2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-5.
- [33] ZHANG Kaixuan, RUAN Jiageng, LI Tongyang, et al. The effects investigation of data-driven fitting cycle and deep deterministic policy gradient algorithm on energy management strategy of dual-motor electric bus [J]. Energy, 2023, 269: 126760.
- [34] ADNANE M, NGUYEN C T P, KHOUMSI A, et al. Real-time torque-distribution for dual-motor off-road vehicle using machine learning approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 4567-4577.
- [35] 徐华超, 卜凡, 程煜, 等. 制动能量回收对前驱式电动汽车制动稳定性的影响分析 [J]. 时代汽车, 2020(9): 85-86.
- XU Huachao, BU Fan, CHENG Yu, et al. Analysis of influence of braking energy recovery on braking stability of front-drive electric vehicle [J]. Auto Time, 2020(9): 85-86.
- [36] SIDDHARTH B R, PRADEEP D J, KUMAR Y V P, et al. Dynamic performance analysis of front-wheel drive hybrid electric vehicle architectures under different real-time operating conditions [J]. International Journal of Powertrains, 2022, 11(1): 62-89.
- [37] 张家启. 基于 ADAMS/Car 某电动车前驱与后驱整车稳态回转仿真对比分析研究 [J]. 上海汽车, 2019(12): 31-34.

ZHANG Jiaqi. Comparative analysis of steady rotation simulation of an electric vehicle front and rear drive vehicle based on ADAMS/car [J]. Shanghai Auto, 2019 (12): 31-34.

[38] 陈锋,李威霖,何胤达,等. 电动汽车用减速器传动效率影响因素研究 [J]. 机械传动, 2022, 46(9): 11-18.

CHEN Feng, LI Weilin, HE Yinda, et al. Research on factors affecting the reducer transmission efficiency of electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(9):11-18.

[39] 朱斌,傅松桥,胡伟伟. 电动汽车双速变速器自适应分区换挡策略研究 [J/OL]. 机械设计与制造. (2024-08-26) [2024-10-31]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20240824.022>.

ZHU Bin, FU Songqiao, HU Weiwei. Research on adaptive zone shifting strategy for dual speed transmission of electric vehicles [J/OL]. Machinery Design & Manufacture. (2024-08-26) [2024-10-31]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20240824.022>.

[40] 沈保山,张美娟,钟兵,等. 电动汽车用新型 AMT 变速器箱体轻量化设计 [J]. 机械设计与研究, 2023, 39(6): 240-244.

SHEN Baoshan, ZHANG Meijuan, ZHONG Bing, et al. Lightweight design of a new AMT transmission box for electric vehicle [J]. Machine Design & Research, 2023, 39(6): 240-244.

[41] ZHANG Chengning, ZHANG Shuo, HAN Guangwei, et al. Power management comparison for a dual-motor-propulsion system used in a battery electric bus [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3873-3882.

[42] DU Wei, ZHAO Shengdun, JIN Liying, et al. Optimization design and performance comparison of different powertrains of electric vehicles [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156: 104143.

[43] 姜涛,耿聪,薛奇成,等. 基于能耗优化的前后轴独立驱动电动汽车转矩分配策略 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(5): 102-109.

JIANG Tao, GENG Cong, XUE Qicheng, et al. Torque distribution strategy of FRID EV based on energy consumption optimization [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(5): 102-109.

[44] 徐绍聪,汪选要. 基于效率最优的前后轴式两档电动车转矩分配策略 [J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2024, 21(1): 18-26.

XU Shaocong, WANG Xuanyao. The efficiency-optimal torque distribution strategy for front-and-rear-axle type two-speed-gear electric vehicles [J]. Journal of Shaoyang University(Natural Science Edition), 2024, 21(1): 18-26.

[45] 杨复钰. 双电机双轴驱动纯电动汽车驱动与再生制动控制策略研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[46] WANG Junnian, ZHANG Zhenhao, GUO Dachang, et al. Torque vectoring and multi-mode driving of electric vehicles with a novel dual-motor coupling electric drive system [J]. Automotive Innovation, 2024, 7(2): 236-247.

[47] LOUBACK E, BISWAS A, MACHADO F, et al. A review of the design process of energy management systems for dual-motor battery electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 193: 114293.

[48] XUE Qicheng, ZHANG Xin, TENG Teng, et al. Dynamic coordinated control strategy of power on gear shifting for novel dual motor electric vehicle [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 55: 102941.

[49] DU Wei, MURGOVSKI N, JU Fei, et al. Real-time eco-driving control with mode switching decisions for electric trucks with dual electric machine coupling propulsion [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 15477-15490.

[50] 潘利丹,秦浠莲. 轮边驱动技术在公交客车上应用探究 [J]. 专用汽车, 2022(8): 37-39.

PAN Lidan, QIN Xilian. Research on the application of wheel-edge drive technology in public buses [J]. Special Purpose Vehicle, 2022(8): 37-39.

[51] 李明亮. 四轮轮边驱动电动载货车辆驱动力自适应控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

[52] 叶伟,韩琼. 轮边驱动车辆原地转向装置与控制研究 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(22): 7-11.

YE Wei, HAN Qiong. Research on in-situ steering device and control of wheel drive vehicle [J]. Automobile Applied Technology, 2023, 48(22): 7-11.

[53] AHMAD I, GE Xiaohua, HAN Qinglong. Stochastic sampled-data multi-objective control of active suspension systems for in-wheel motor driven electric vehicles [J]. Journal of Automation and Intelligence, 2024, 3(1): 2-18.

[54] 周晨,徐飞翔. 四轮独立转向车辆转向模式切换轨迹多目标优化方法研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 306-320.

ZHOU Chen, XU Feixiang. Multi-objective optimization method for steering mode switch trajectory of four-wheel independent steering vehicle [J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 306-320.
- [55] ZHAO Ze, ZHANG Lei, DING Xiaoling, et al. Integrated active suspension and anti-lock braking control for four-wheel-independent-drive electric vehicles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(1): 20.
- [56] 郭大畅. 三电机四驱电动汽车多模式驱动与换挡控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [57] WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, RIZZONI G. A review of architectures and control strategies of dual-motor coupling powertrain systems for battery electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 162: 112455.
- [58] WANG Yong, SUN Dongye. Powertrain matching and optimization of dual-motor hybrid driving system for electric vehicle based on quantum genetic intelligent algorithm [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014: 956521.
- [59] HAN S M, YIN X F, WU X H. Mode-switch strategy for dual-motor coupling system of electric vehicles based on optimal dynamic performance [C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering. Dordrecht, The Netherlands: Atlantis Press, 2015: 146-149.
- [60] 潍柴动力股份有限公司. 双电机行星耦合驱动系统: CN201220750254.1 [P]. 2013-06-12.
- [61] ZHU Bo, ZHANG Nong, WALKER P, et al. Two motor two speed power-train system research of pure electric vehicle [C]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2013: 2013-01-1480.
- [62] KWON K, SEO M, MIN S. Efficient multi-objective optimization of gear ratios and motor torque distribution for electric vehicles with two-motor and two-speed powertrain system [J]. Applied Energy, 2020, 259: 114190.
- [63] 宇通客车股份有限公司. 双电机驱动系统和车辆: CN201821670907.9 [P]. 2019-08-30.
- [64] 宇通客车股份有限公司. 纯电动双电机单行星排驱动系统和纯电动车辆: CN201721785955.8 [P]. 2018-09-11.
- [65] 上海交通大学, 上海凌翼动力科技有限公司. 双行星齿轮系双电机同轴耦合驱动系统: CN201621007166.7 [P]. 2017-04-12.
- [66] 辛昌然. 双电机驱动纯电动轻型客车动态建模与策略优化 [D]. 聊城: 聊城大学, 2017.
- [67] 北京理工大学. 电动汽车及其双电机耦合变速装置和该装置的控制系統: CN201210024534.9 [P]. 2014-06-25.
- [68] 长安大学. 一种双电机耦合电动助力转向装置: CN201720072666.7 [P]. 2017-09-05.
- [69] 重庆大学. 一种双电机行星耦合驱动系统: CN201610108910.0 [P]. 2018-07-06.
- [70] 福州大学. 一种双电机双模耦合电动车驱动系统: CN201710200309.9 [P]. 2019-04-02.
- [71] 北京理工大学. 一种双电机多模式耦合驱动总成: CN201320168344.4 [P]. 2013-10-02.
- [72] 福州大学. 一种双行星排式电驱动总成及其驱动方法: CN201610829651.0 [P]. 2018-07-20.
- [73] 辜承林. 轮毂电机发展思考 [J]. 电机技术, 2006(3): 3-6.
- GU Chenglin. An overview of in-wheel motors and drives for electric vehicles [J]. Electrical Machinery Technology, 2006(3): 3-6.
- [74] VAN SCHALKWYK D J, KAMPER M J. Effect of hub motor mass on stability and comfort of electric vehicles [C]//2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [75] 陈遵友. 新型轮毂电机的结构设计与拓扑优化及实验台架的设计 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [76] 汤双清, 王姣菊, 曾虎彪. 电动轮驱动技术研究 [J]. 机械工程与自动化, 2009(2): 196-197.
- TANG Shuangqing, WANG Jiaojia, ZENG Hubiao. Study on electric wheel driving technology [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(2): 196-197.
- [77] 宋佑川, 金国栋. 电动轮的类型与特点 [J]. 城市公共交通, 2004(4): 16-18.
- SONG Youchuan, JIN Guodong. Classification and characteristics of electric wheel in new-generation electric vehicles [J]. Urban Public Transport, 2004(4): 16-18.
- [78] 谢丹. 高速电动轮结构设计与分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [79] 杨宇. 轮毂电机驱动电动汽车的电制动特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [80] 米其林研究和技术股份有限公司. 包括车轮和集成在其中的悬架的车辆接地连接: CN200580031698.2 [P]. 2011-07-27.
- [81] 佚名. 日本精工研发出全球首款带变速箱的轮毂电机 [J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(4): 77.
- Anon. Seiko developed the world's first hub motor with gearbox [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(4): 77.
- [82] GUNJI D, MATSUDA Y. Hub bearing, speed reduction mechanism, and in-wheel motor; US 2013/

0217529 A1 [P]. 2013-08-22.

[83] FENG Z, DU W, CHNG C B, et al. Meta-learning-based predictive energy management for 4WD battery electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023,73(5): 6395-6408.

[84] FENG Z, ZHAO S, GAO W, et al. Study on a novel in-wheel motor driving system driven by two permanent magnet synchronous disc motors [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 5922-5933.

[85] 西安交通大学. 对称布置盘式电机差动轮系复合驱动的汽车轮毂电机: CN201910643568. 8 [P]. 2021-04-27.

[86] 陈森. 轮边后驱电动客车分布式驱动控制系统设计 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.

[87] CHEN Huipeng, WANG Weiyang, ZHU Shaopeng, et al. Design of an adaptive distributed drive control strategy for a wheel-side rear-drive electric bus [J]. Electronics, 2022, 11(24): 4223.

[88] BERGQVIST R, MONIOS J, JÖNSSON J. Potential for rapid adoption of battery-electric heavy-duty trucks for pre-and post-haulage at intermodal terminals [J]. Research in Transportation Business & Management, 2023, 50: 101035.

[89] MÜLLER C. Transition to battery-electric and fuel cell heavy-duty trucks: a multi-level, multi-dimensional approach [J]. Transportation Research: Part D Transport and Environment, 2024, 127: 104052.

[90] 袁诚坤. 量产梅赛德斯-奔驰 eActros 纯电动卡车推动运输业向碳中和转型 [J]. 汽车与配件, 2021(14): 49-51.

YUAN Chengkun. The mass production of Mercedes-Benz eActros pure electric truck drives the transition of the transport industry to carbon neutrality [J]. Automobile & Parts, 2021(14): 49-51.

[91] HONG Xianqian, WU Jinglai, ZHANG Nong, et al. The dynamic and economic performance study of a new Simpson planetary gearset based dual motor powertrain for electric vehicles [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104579.

[92] LOH E. 2022 Volvo C40 recharge [J]. Motor Trend, 2023, 75(1): 55.

[93] FOWLER S. SAME CLASS: Tesla Model Y performance [J]. Auto Express, 2023(1808): 48.

[94] 北京新能源汽车股份有限公司. 双电机-单行星排动力传动系统: CN201510088739.7 [P]. 2015-06-10.

[95] 郑州宇通客车股份有限公司. 一种双电机-单行星排动力装置及电动汽车: CN201610238910.2 [P]. 2016-08-17.

[96] 北京理工大学. 一种双电机转速耦合驱动总成: CN201010100671.7 [P]. 2011-07-27.

[97] 武小花. 纯电动大客车双电机耦合传动系统匹配与控制策略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2011.

[98] HAN Guangwei, ZHANG Chengning, DONG Yuguang. Development of measurement and control system of test bench for dual motors coupling propulsion based on LabVIEW [J]. Journal of Beijing Institute of Technology(English Edition), 2014, 23: 135-141.

[99] 西安交通大学. 一种双电机多模式电动汽车驱动用新型动力装置及汽车: CN202010439863.4 [P]. 2021-07-27.

[100]西安交通大学. 一种双驱动源与双排行星轮系多模式耦合驱动系统及汽车: CN202110189250.4 [P]. 2022-06-03.

[101]DOERR J, FRÖHLICH G, STROH A, et al. 采用三电机设计方案的 Audi E-tron S 车用电驱动系统 [J]. 汽车与新动力, 2021, 4(3): 22-27.

DOERR J, FRÖHLICH G, STROH A, et al. Audi E-tron S automotive electric drive system based on three-motor design [J]. Automobile and New Powertrain, 2021, 4(3): 22-27.

(编辑 刘杨 陶晴)