

混合动力驱动单元技术与展望

张国耕^{1,2} 史训亮¹ 王全任¹

(1.泛亚汽车技术中心有限公司,上海市 201208;2.浙江大学机械工程学院,杭州市 310307)

【欢迎引用】张国耕,史训亮,王全任.混合动力驱动单元技术与展望[J].汽车文摘,2025(1):14-22.

【Cite this paper】ZHANG G G, SHI X L, WANG Q R. Review and Prospect on the Main Development of Hybrid Drive Unit[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(1): 14-22.

【摘要】随着新能源汽车发展走向深入,混合动力汽车成为增速较快的细分市场,各汽车制造商加大对混合动力车型及混合动力驱动单元的研发投入。为了更高效地开发混合动力驱动单元,从零部件组成、结构型式、电机位置等维度介绍混合动力驱动系统的主要概念及分类,结合2024年度中国市场混合动力车型的驱动系统型式,详细阐述不同构型混合动力驱动系统的应用现状,并以丰田、本田、通用、上汽、比亚迪等汽车公司混合动力驱动单元发展历程为依托,梳理混合动力驱动单元的迭代过程,最后对混合动力驱动单元未来的发展趋势进行展望,以期为企业开发具有自主知识产权的混合动力驱动单元提供参考。

关键词:混合动力;驱动单元;机电耦合;电机;逆变器

中图分类号:U463.2 文献标志码:A DOI:10.19822/j.cnki.1671-6329.20230128

Review and Prospect on the Main Development of Hybrid Drive Unit

Zhang Guogeng^{1,2}, Shi Xunliang¹, Wang Quanren¹

(1.Pan Asia Automotive Technology Center Co., LTD., Shanghai 201208; 2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310307)

【Abstract】As the development of new energy vehicles deepens, hybrid vehicles have emerged as a relatively rapidly expanding market segment, and Original Equipment Manufactures(OEMs) have augmented their investment in the research and development of hybrid vehicles and hybrid drive units. To develop hybrid drive units more efficiently, the main concept and classification of hybrid vehicles and hybrid drive system are introduced from component composition, structure and motor position. Based on the drive system types of hybrid models in the China market in 2024, the application status of different configuration of hybrid drive systems is described in detail. And based on the development history of hybrid drive units of automobile companies such as Toyota, Honda, General Motors, SAIC and BYD, the iterative process of the hybrid drive unit is systematically sorted out, and the future development trend of the hybrid drive unit is ultimately prospected, so as to provide a reference for enterprises to develop hybrid drive units with independent intellectual property rights.

Key words: Hybrid Power, Drive Unit, Electromechanical Coupling, Motor, Inverter

0 引言

2020年以来中国新能源汽车得到快速发展。2024年中国新能源汽车年产量首次突破1000万辆。以2024年10月为例,该月新能源乘用车批发渗透率达到50.1%^[1]。其中混合动力汽车成为增速较快的细分市场,各汽车制造商加大对混合动力车型及混合动力驱动单元的研发投入。

目前,混合动力技术的研究重心主要聚焦于能量

管理策略优化,旨在有效降低整车的能耗水平。施德华^[2]提出一种融合驾驶风格的混合动力汽车能量管理策略,以实现更精细的能量调控。毛星宇^[3]针对混联式混合动力汽车,结合模型预测控制与蜚螂优化算法,提出一种新的能量管理策略,进一步提升能量利用效率。杜爱民^[4]通过仿真模型,探讨基于规则的电量保持模式能量管理策略,基于动态规划算法的能量管理策略。李东兵^[5]创新性地将径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络与动态规划方法相融

合,为混合动力汽车提供一种新的能量管理策略思路。戴科峰^[6]提出了一种将等效燃油消耗最小策略与深度强化学习方法相结合的分层能量管理策略。吴浩东^[7]通过对整车燃油消耗量进行深入分析,构建以整车实时瞬时燃油消耗率最小为目标的函数模型。王奎俊^[8]建立DynaProg最优控制的数学模型,旨在提升运算速度、优化燃油经济性并降低排放。曾晓帆^[9]针对某串并联混合动力系统,提出一种插电式混合动力汽车(Plug in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)能量管理策略的逆向解析方法,为该类车型的能量管理策略设计提供新思路。蔡杨^[10]建立以电池剩余电量(State Of Charge, SOC)为状态变量,以后驱电机和启动电机(Integrated Starter Generator, ISG)输出转矩为控制变量,以整车燃油消耗最小为目标的能量管理优化模型。栾怡萱^[11]从优化效率、实时使用能力等多个角度对各种策略进行综合评价与比较。张瑞轩^[12]对已提出的各种能量管理策略进行综述,分析近年来混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)能量管理策略的研究现状,并提出未来的研究发展趋势。

然而,在混合动力驱动系统结构设计的研究方面的成果相对不足,这也是国内各汽车制造商正在积极攻克的技术难题。赵斯力根^[13]针对行星齿轮汽车的结构特性与动态特性的关系,提出混合动力汽车动力系统构型的理论设计方法。张利鹏^[14]设计了一种可实现发动机与驱动电机高效工作区域重叠的增速离合器,并基于该离合器进行发动机启动平顺性的控制研究。周权^[15]通过将集成式两挡P1+P3构型的混合动力专用变速器(Dedicated Hybrid Transmission, DHT)应用在某功能样车上,对整车顿挫、换挡停机、整车抖动等典型问题进行优化提升,从而形成集成式两挡DHT的整车技术路线。杨磊^[16]提出一种双模功率分流机构,以改善单模功率分流机构电耗高的缺点。

针对混合动力驱动系统的技术路线和关键结构,还有诸多学者结合国内混合动力发展现状以及国外产品特点进行综述。罗林^[17]针对主流的混合动力车型,按动力传输的布置形式,解析不同构型车型的优劣势,并对不同构型的运行机理进行对比分析。何斌^[18]对当前混合动力汽车主要的技术路线、原理及应用场景进行分析。吴梅林^[19]对混合动力汽车的技术优势和不足进行分析研究,并指出当前混合动力汽车产业面临的一些问题。张立庆^[20]对各汽车企业动力分配结构的特点进行分析,并阐述国内外混合动力技术路线的发展状况。上海交通大学许敏^[21]教授则围

绕中国混合动力汽车动力总成技术路线展开深入研讨,聚焦多样化的混动架构与专用化的核心部件,提出了新的混合度定义作为动力总成电气化程度的统一评价标准,并探讨了国内外主流混动技术的异同,剖析了当下中国最前沿的混动技术特点与发展趋势,从而厘清了中国混动汽车动力总成的发展脉络。

本文结合2024年度中国市场混动车型的驱动系统型式,详细阐述不同构型混动驱动系统的应用现状,梳理混动驱动单元的迭代过程,最后对混动驱动单元未来的发展趋势进行展望,以期为企业开发具有自主知识产权的混合动力驱动单元提供参考。

1 混合动力汽车发展现状

在国家法规要求、政策引导、技术进步以及市场需求共同推动下,国内主要汽车制造商均加大了对混动技术的研发投入,混合动力在中国市场迎来黄金发展期。结合2024年中国市场销售的混合动力汽车,对混动系统结构型式进行分析。

(1)轻度混合动力汽车(Mild Hybrid Electric Vehicle, MHEV)以P0构型为主,主要包括90V轻混系统、24V轻混系统。与传统带有启停装置的车辆相比,MHEV节油率约为10%。目前,国内P0构型轻度混合动力在售车型约有115款,主要车型品牌包括奔驰、奥迪、凯迪拉克、路虎、沃尔沃、别克、吉利、宝马、红旗、雪佛兰、奇瑞、领克、长安欧尚、长城以及马自达。

(2)HEV以功率分流式(Power Split, PS)构型、P1+P3构型为主。与传统配备启停装置的车辆相比,HEV节油率约为30%,国内在售车型约有78款。其中PS构型的混动车型约40款,主要包括丰田、雷克萨斯、福特以及广汽传祺等品牌。P1+P3构型混动车型约22款,主要包括本田、长城哈弗、长城魏牌、上汽通用五菱以及广汽传祺、一汽红旗等品牌车型。P1+P2构型以吉利汽车为代表。

(3)插电式混合动力汽车主要以P1+P3构型、P2构型、P3构型为主,客户可自主选择使用混动驱动模式或纯电驱动模式。目前该类型的混动车辆是混合动力汽车的销售主力,国内在售车型约有171款。其中P1+P3或P1+P3+P4构型的混动车型约49款,主要包括比亚迪、比亚迪腾势、本田、上海通用、长城汽车、长城魏牌、东风岚图以及奇瑞等汽车品牌。P2+8AT或P2+9AT以及可选择适配P4实现四驱的混动车型约23款,主要包括奔驰、宝马、JEEP、路虎、沃尔沃等汽车品牌。P2+DCT/AMT或P3+DCT/AMT以及可选

择适配P4实现四驱的混动车型约12款,主要包括大众、保时捷、法拉利、宾利、荣威以及上汽大通等汽车品牌。PS构型以及可选择适配P4实现四驱的混动车型约7款,主要包括丰田、福特以及雷克萨斯等汽车品牌。P1+P2构型约4款车型,主要为吉利汽车。

(4)增程式混合动力汽车以P1+P4构型为主,发动机作为增程器通过P1电机为电池进行充电,通过主驱电机驱动车辆,实现电动车辆的驾驶感受。国内在售车型约有47款,主要包括理想、赛力斯、零跑、合众、阿维塔、长安深蓝、东风岚图、东风猛士、奇瑞星途等汽车品牌。

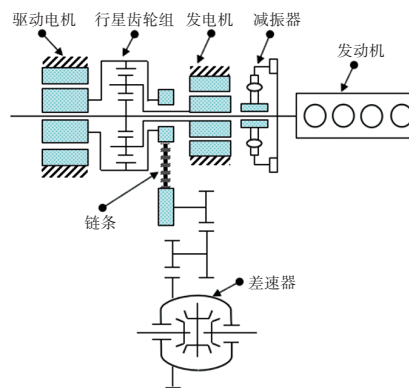
综上所述,汽车制造商根据自身技术积累呈现出多样化的技术路线,以实现节能减排、提升客户驾驶体验的目标。丰田汽车主要基于PS构型混动驱动单元发展HEV及PHEV。本田汽车主要基于P1+P3构型混动驱动单元发展HEV及PHEV车型。通用汽车和福特汽车采用PS构型混动驱动单元发展HEV及PHEV车型。奔驰、宝马、奥迪、沃尔沃以及大众等欧洲汽车制造商,普遍在现有自动变速箱(8AT、9AT、6DCT、7DCT、8DCT)基础上,通过增加P2或P3电机研发混合动力车辆。在国内汽车市场,比亚迪、长城、东风、奇瑞以及上汽通用使用的混合动力驱动单元以P1+P3构型为主,吉利汽车使用的混合动力驱动单元以P1+P2构型为主。

2 混动驱动单元主要发展历程

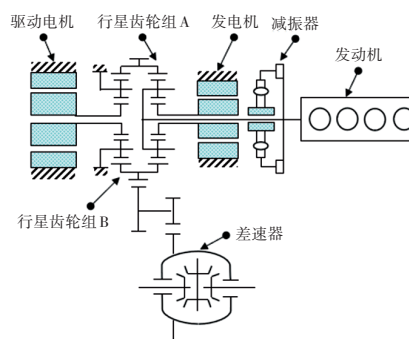
2.1 PS构型混动驱动单元

丰田汽车与通用汽车的混合动力驱动单元均以PS构型为主。1997年,丰田汽车推出其第一代混动系统(Toyota Hybrid System, THS),并应用于量产车型普锐斯。最初该车型仅在日本本土销售,经过改款后,2000年正式出口至北美和欧洲市场,该款车型全球累积销售12.3万辆^[22]。2004年,普锐斯第二代混合动力汽车上市。混动驱动单元代号为P112,电机工作电压由274 V提升至500 V^[23]。2009年,普锐斯第三代混合动力汽车改款上市。混动驱动单元代号为P410,发动机排量由1.5 L升级为1.8 L,电机工作电压由500 V提升至650 V^[24-25]。2015年,普锐斯第四代混合动力汽车上市,混动驱动单元代号为P610,适配2.5 L发动机,应用于凯美瑞、荣放等车型^[26]。针对紧凑车型及中高级车型,丰田先后推出10余款PS构型混动驱动单元,如图1所示,其中经历了3次重要升级: P111升级至P112,逆变器增加升压模块,电机工作电压升至500 V;P112升级为P310与P410,电机工作电

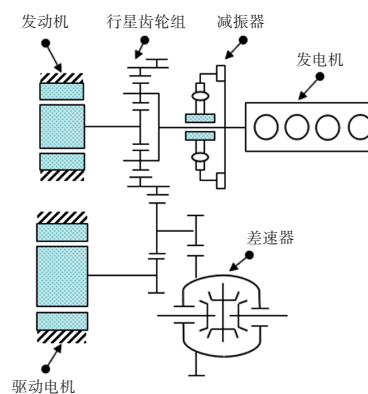
压升至650 V、增加电机减速机构、主减速齿轮副由链传动改为齿轮传动;P410升级至P610,电机采用平行轴布局,电机减速机构由行星齿轮副调整为平行轴齿轮副。2001年,丰田在THS基础上,配合无级调速自动变速箱,开发一款适合中大型车辆的THS-C混动系统(P210)^[27];此后推出P210、L110、L110F、L310等混动驱动单元,其主要区别在于L110可以实现电机两级减速,L110F在L110基础上增加了辅助驱动,L310可以实现电机四级减速^[28-30]。



(a) P111/P112 驱动单元^[22]



(b) P310/P311/P313/P314/P410/P510 驱动单元^[25]



(c) P610/P710/P810 驱动单元^[26]

图1 丰田PS构型混动驱动单元结构示意图

通用汽车的混动驱动单元也是较为具有代表性的PS构型。20世纪初,通用汽车与奔驰汽车、宝马汽车开展合作,开发双模混合动力专用变速箱。该双模混动系统主要分为2种工作模式:低速模式以电机驱

动为主、发动机驱动为辅；高速模式以发动机驱动为主、电机驱动为辅^[31]。此次合作之后，通用汽车陆续推出多种混合动力驱动单元，包括2MT70、4ET50、5ET50等型号^[32-34]。通用汽车对第二代Voltec增程混动变速箱进行适当改动，适配1.8 L发动机。其中主减齿轮副由链及行星齿轮副组成，速比范围为2.64~3.50，使用独立高压电子油泵，去除单向离合器。2016~2017年间上市的雪佛兰迈锐宝、别克君越、别克君威等车型均搭载该混动驱动单元^[35]。2016年，通用汽车推出凯迪拉克CT6插电混动车型，该混动驱动单元主要由2个电机、3个行星齿轮组、5组离合器、液压系统以及逆变器组成，通过功率分流实现无级调速，通过固定速比实现混动运行，并在不同速比组合下进行纯电驱动^[36]。2020年，上汽通用对5ET50混动驱动单元进行了国产化开发，针对插电混动车型需求进行改进，适配1.5 L自然吸气发动机，搭载蔚蓝6插电混动车型在中国市场销售。

2.2 P1构型混动驱动单元

1999年，本田为了改善思域车型的油耗及排放，开发了一款集成电机的辅助混合动力系统(Integrated Motor Assist, IMA)，该系统以发动机驱动为主、电机驱动为辅，直流无刷三相同步电机置于发动机与变速箱之间，实现减速能量回收、加速助力、怠速停机等功能^[37]，如图2所示。

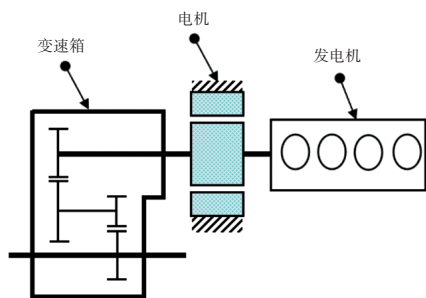


图2 本田IMA混动系统结构示意图^[37]

此后十余年，本田通过一系列技术迭代，如增加电机定子厚度、增加电机线圈直径、增加电机尺寸、采用内置永磁体(IPM)型转子、使用高磁通密度磁铁、定子采用高空间因子的扁平线圈结构以及电机极对数由6改为8，不断拓宽IMA与无级变速箱(CVT)、自动变速箱(5AT)、手动变速箱(6MT)的组合应用，先后应用于思域、CR-Z、FREED等车型^[38-39]。

2.3 P2或P2+P4构型混动驱动单元

2014年，本田针对小型车辆推出智能双离合混动驱动单元SPORT HYBRID i-DCD(intelligent Dual-Clutch Drive)，电机直接连接在7速双离合变速箱主轴

的后端，适配1.5 L自然吸气发动机，主要应用于FIT、CITY、JAZZ等车型^[40]。该混动系统为P2结构形式，如图3所示。

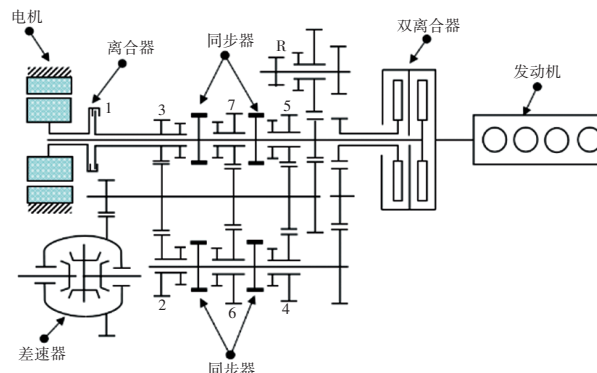


图3 本田i-DCD混动驱动单元结构示意图^[40]

2015年，本田在RLX车型上推出SPORT HYBRID SH-AWD(Super Handling All-Wheel Drive)混动系统，匹配3.5 L V6发动机，前轮由内置电机的7速双离合变速箱提供动力，后轮由内置双电机的纯电驱动单元独立驱动左右轮，以实现前轮驱动、后轮驱动以及四轮驱动^[41]；2016年，本田针对第二代NSX跑车，使用了SPORT HYBRID SH-AWD混动系统，前轮由内置双电机的纯电驱动单元驱动，后轮由内置电机的9速双离合变速箱提供动力^[42]。

2019年，大众推出途观L新能源车型，该混动驱动单元是在6挡湿式离合器基础上增加P2电机，将传统双离合自动变速器改造为P2混动驱动单元，随后该套混动驱动单元应用于帕萨特、途观L、迈腾GTE、探岳GTE等混动车型。

同时，在奥迪、宝马、奔驰等汽车公司还使用8速自动变速箱与P2电机组成P2混动驱动单元。

2.4 P1+P2构型混动驱动单元

2008年，比亚迪汽车公司自主研发的中国首款插电混合动力车辆F3DM上市销售。比亚迪F3DM双模电动车使用P1+P2结构的DM双模系统^[43]，驾驶员通过按钮可以轻松实现纯电驱动或混合动力驱动，其所使用的发动机为1.0 L自然吸气发动机，如图4a所示。

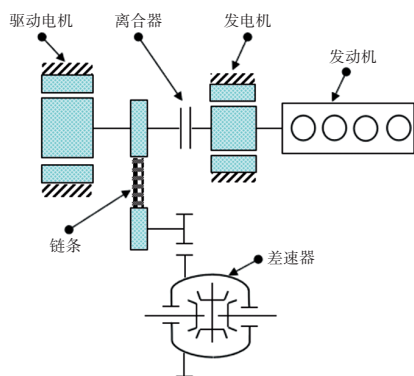
2009年，上汽乘用车开始研发P1+P2构型的双电机混动系统EDU G1，并于2012年实现小批量生产，2013年搭载荣威e550推向市场，2016年及以后实现大批量推广。EDU G1可以匹配不同发动机及齿轮速比，实现纯电、串联混动、并联混动、发动机直驱等多种工作模式^[44]，如图4b所示。

2.5 P3或P0+P3构型混动驱动单元

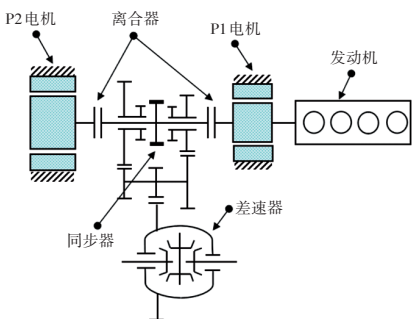
2013年，比亚迪汽车公司发布其第二代混动技术

(DM II), 搭载第二代秦 DM 上市销售。其发动机为 1.5 L 涡轮增压发动机, 混动驱动单元为 P3 结构即在 DCT 双离合变速箱基础上配以 P3 电机。

2018 年, 比亚迪汽车公司发布其第三代混动技术 (DM III), 该混动系统搭载秦 Pro DM 上市销售。DM III 是在 DM II 基础上做适当优化, 混动驱动系统采用 P0+P3 结构, 即在发动机前端增加 P0 电机, 兼顾启动发动机和发电。



(a) 比亚迪 DM 双模混动驱动单元^[43]



(b) 上汽 EDU GEN1 混动驱动单元^[44]

图 4 P1+P2 结构混动驱动单元结构示意图

2019 年, 上汽捷能发布其第二代插电混动系统 EDU G2, 该插电混动系统匹配 1.5 T 涡轮增压发动机, EDU G2 使用的混动专属变速箱是单电机 P3 结构, 可以实现发动机 6 个挡位驱动和电机 4 个挡位驱动, 结构如图 5 所示^[45]。

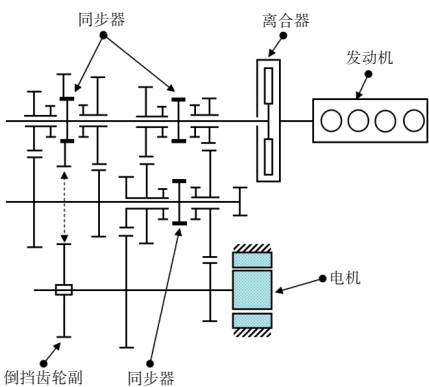


图 5 EDU Gen2 混动驱动单元结构示意图^[45]

2020 年, 由泛亚汽车技术中心与上汽大通联合开发

的 P3 构型混动驱动单元^[46-47]搭载上汽大通 EUNIQ 5、EUNIQ 6 等车型上市销售。

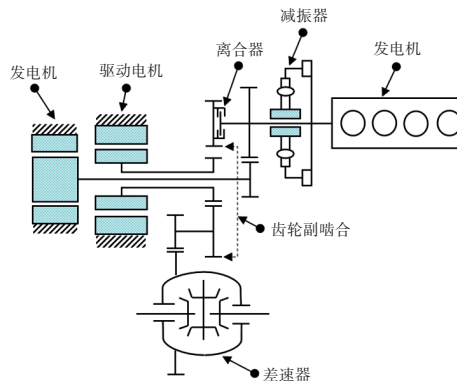
2.6 P1+P3 构型混动驱动单元

2014 年, 本田推出 P1+P3 结构的双电机混动驱动单元, 应用于雅阁车型, 实现纯电驱动、混动驱动和发动机驱动等工作模式。这套混动驱动单元取代传统内燃机驱动的变速箱, 其包括输入轴、中间轴、输出轴、发电机、驱动电机、两个机械泵等, 电机工作电压升至 700 V, 动力控制单元 (PCU) 安装在变速箱上, 实现混动驱动单元高度集成设计, 结构如图 6a 所示^[48]。

2016 年, 本田推出第二代 i-MMD (intelligent Multi-Mode Drive) 混动系统, 首先应用于日本市场的 Minivan 混动车型。为了适配更多车型应用, 研发重点是降低混动驱动单元的空间尺寸, 将电机线圈由圆线改为扁线、线圈两端绝缘结构采用涂层, 电机扭矩增加 2.6%、输出功率增加 8.9%, 电机体积减少 23%, 质量减轻 23%, 效率保持不变^[49-50]。

2017 年, 本田推出第三代 i-MMD 混动系统, 应用于雅阁、CR-V、艾力绅等车型。采用新型转子结构, 设计了适合无重质稀土磁体磁性的磁路, 其抗退磁性能提高了 24%。此外, 利用离心力向转子内部提供冷却液, 实现 23% 的磁铁冷却性能提高。将 12V DC/DC 转换模块, 集成到位于混动驱动单元的 PCU 之中, 降低 IPU 对后备箱空间的占用^[51]。2022 年, 本田推出第四代 i-MMD 混动系统, 应用于思域等车型, 适配 2.0 L 阿特金森循环发动机。

2021 年, 比亚迪汽车公司发布其第四代混动技术 (DM-i 超级混动), 包括 1.5 L 与 1.5T 2 种混动专属发动机, EHS 混动专用变速箱同样采用 P1+P3 结构, 由 2 个电机组成, 包含 EHS132、EHS145、EHS160 3 种型号, 可以实现纯电、发动机直驱、增程和混动等驱动模式, 结构如图 6b 所示^[52]。



(a) 本田 i-MMD 混动驱动单元^[48]

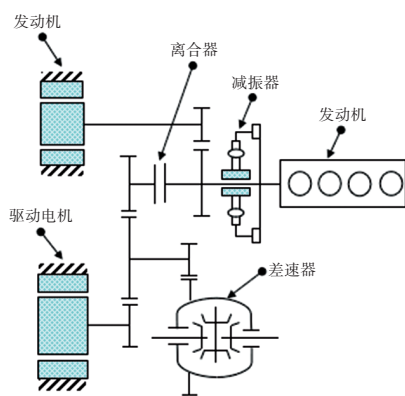
(b) 比亚迪 EHS 混动驱动单元^[52]

图6 P1+P3混动驱动单元结构示意图

2021年,泛亚汽车技术中心联合上海汽车变速器有限公司和上汽通用汽车有限公司联合开发P1+P3构型的双电机混动驱动单元。2024年其搭载雪佛兰探界者plus、别克GL8陆尊PHEV等车型量产。

3 混动驱动单元发展趋势展望

3.1 机电耦合机构

机电耦合机构构成了混合动力驱动单元的基础构型,主要传递发动机动力、电机动力,以及实现发动机与电机动力的耦合。机电耦合机构未来的发展趋势包括以下3点:

(1)双电机平行布置的设计策略,不仅有助于缩减驱动单元的轴向尺寸,还拓宽车型应用范围。相比于丰田THS、本田i-MMD、通用5ET50以及比亚迪EHS等混合动力驱动单元结构,采用双电机结构的机电耦合装置可以增加系统的自由度,大幅提升驾乘舒适性和响应性。在双电机配置下,其中一个电机专注于发电及启动发动机的任务,而另一个电机则全力负责驱动及制动能量的回收,实现了功能的明确划分和高效协同。

(2)简化机电耦合装置的结构是混动驱动单元未来发展的必然趋势。以比亚迪EHS和本田i-MMD为例,二者均采用了电机和发动机单挡位驱动车辆前进的设计,同时配备了1组齿轮副用于发电机的发电过程,该设计简化了齿轮传动系统,不仅有助于减小整体尺寸和减轻质量,还显著提升了产品的可靠性和耐用性。

(3)自动换挡机构可选液压控制或电机控制,企业可结合自身实际情况进行选用。液压自动换挡技术以其成熟度高、控制精度高的特点而著称,但相应地,其对制造精度和系统清洁度的要求更为严格。而电机自动换挡则以其结构简单、环境适应性强以

及成本上的优势,成为了另一种值得考虑的选择。企业可以根据自身的实际情况和技术需求,灵活选择最适合的自动换挡机构。

3.2 电机

电机作为混合动力驱动系统的核心组件,其设计革新标志着混动驱动单元产品的重大进步。展望未来,电机技术的发展将聚焦于高性能、高效率、小型化、智能化以及环保等前沿趋势,引领行业迈向新的高度。

在高性能、高效率与小型化方面,电机设计的优化与新材料的运用将成为关键驱动力。通过创新转子结构、优化磁路布局等设计手段,如本田在第3代i-MMD系统中所展现的,能够显著提升电机的抗退磁性能与功率密度,同时减少材料使用。结合先进的冷却技术,如本田利用离心力实现的高效磁铁冷却,进一步提升电机的运行效率^[53]。此外,新材料的应用,如高性能稀土永磁体钕铁硼,不仅提高磁通密度与抗退磁能力,还使得电机在紧凑的体积内实现更高的输出功率。电阻率低的线材、分段磁钢及粘胶工艺铁心等工艺创新,同样为提升电机效率做出贡献。在转子材料的选择上,铝基复合材料等轻质高强材料的引入,有效减轻电机质量,推动小型化与轻量化设计的进步。

智能化方面,电机技术的发展将更加注重对电机温度、运行工况的精准控制与监测,实现与车辆运行数据的无缝对接。电机控制系统将依据实时数据,动态优化控制策略,提升能效与驾驶体验。未来,电机还将具备自学习与自适应能力,能够根据车辆运行状态及外部环境自动调节,确保始终处于最佳性能状态。

在环保领域,电机技术的发展同样展现出绿色化趋势。高效节能材料,如稀土永磁材料与非晶合金材料的应用,降低电机的能耗与排放。同时,环保型绝缘材料,如生物基绝缘材料与无卤阻燃绝缘材料的推广使用,进一步减少对环境的污染与破坏。此外,通过优化电机设计与制造工艺,有效降低电机的噪声与振动,为创造更加宁静、舒适的驾驶环境做出贡献。

综上所述,电机技术的未来发展将紧密围绕高性能、高效率、小型化、智能化与环保等核心趋势,推动混动驱动单元产品不断迭代升级,为汽车行业乃至整个社会的可持续发展注入动力。

3.3 逆变器

逆变器作为电机的核心控制器,其主要职责在于

控制电机的运转并实现交直流电能的转换。当前,逆变器的的发展正朝向集成化、模块化、智能化以及高效率的方向迈进。

在集成化层面,逆变器正逐步实现电机、逆变器与减速器的三合一高度集成,将其封装于同一外壳之内,从而大幅削减逆变器与电机间的三相线连接,进而在质量、尺寸及成本上展现出集成优势。这一趋势不仅显著提升系统的集成度与性能,更预示着未来可能实现更多关键部件的集成,例如低压直流转换器、车载充电器、混动控制器、热管理系统及故障诊断模块等,旨在构建一个更为全面、高效的系统控制架构^[53]。

模块化设计方面,通过将逆变器细分为多个功能模块,如功率变换模块、电容、电感、控制电路板、驱动电路板等,使得各模块能够独立进行生产与测试。这一策略不仅可以提升生产效率与产品质量,而且得益于标准化设计的引入,生产成本得以有效降低,研发周期大幅缩短。

在智能化方面,逆变器通过融合先进的控制算法与传感器技术,实现对系统更为精准的控制与故障诊断,进而提升系统的稳定性与安全性。此外,逆变器还能够无缝对接车辆的运行工况与状态,确保系统始终处于最优性能状态。

在提升控制器效率方面,SiC(碳化硅)功率模块的应用尤为引人注目。SiC模块凭借其出色的耐温性能、更低的损耗以及更高的开关频率,为提升控制器的效率与性能提供了有力支持。展望未来,随着SiC技术的持续成熟与成本的不断降低,SiC模块有望在新能源汽车电机控制器领域实现更为广泛的应用。同时,逆变器中升压模块的引入也是提升效率的重要手段。例如,丰田THS混动驱动单元通过升压模块将电机工作电压提升至500V及650V,本田更是将其提升至700V。在逆变器中增加升压模块或直接提升电池电压,不仅能够拓宽电机峰值扭矩持续的转速范围,还能显著改善整车的加速性能,进一步提升系统效率。

4 结束语

本文从零部件构成、结构形态以及电机布局等维度,解析混合动力车辆及其驱动系统的核心概念与分类。结合2023年中国市场混动车型的驱动系统现状,详尽阐述不同架构下混动驱动系统的实际应用情况。通过追溯丰田、本田、通用、上汽、比亚迪等汽车公司在混合动力驱动单元领域的演进历程,梳理出混动驱

动单元的迭代脉络。在此基础上,展望混动驱动单元的发展趋势:机电耦合机构未来发展将主要聚焦于双电机构型、机电耦合机构结构简化。在自动换挡机构的选择上,企业可以根据实际需求,在液压控制与电机控制之间做出抉择。电机技术的发展将聚焦于高性能、高效率、小型化、智能化以及环保等前沿趋势。逆变器的发展正朝向集成化、模块化、智能化以及高效率发展。

本文基于现有产品,对混动驱动单元的结构进行了深入对比与分析,旨在提供一个关于混合动力汽车及其驱动单元的全面认知框架。然而,本文缺乏从新产品开发角度对混合动力驱动单元的产品定义、构型设计以及验证过程的详细阐述,这些方面将在后续研究中进一步丰富和完善。

参 考 文 献

- [1] 中国汽车流通协会. 2024年10月份全国乘用车市场分析[EB/OL]. (2024-11-08)[2024-12-15]. <http://www.cada.cn/Trend/info-91-10086.html>.
- [2] 施德华,袁超,汪少华,等. 考虑驾驶风格的混合动力汽车强化学习能量管理策略[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 51-62.
- [3] 毛星宇,蒙艳玫,许恩永,等. 基于DBO-MPC的混合动力汽车能量管理策略[J]. 车用发动机, 2024(3): 50-57.
- [4] 杜爱民,陈垚伊,张东旭. 功率分流式混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 机械设计与制造, 2024, 400(6): 121-127.
- [5] 李东兵,王妮,马涛涛. 混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 机械设计与制造, 2024, 400(6): 193-197+203.
- [6] 戴科峰,胡明辉. 混合动力汽车深度强化学习分层能量管理策略[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(1): 41-51.
- [7] 吴浩东,吴祖仪,赵宁,等. 混合动力汽车瞬时燃油消耗率最小策略研究[J]. 时代汽车, 2024(11): 31-33.
- [8] 王奎俊,张兰春,魏英俊. 基于DynaProg方法的混合动力汽车燃油经济性与排放的动态优化[J]. 江苏理工学院学报, 2024, 30(4): 36-43+62.
- [9] 曾晓帆,胡明辉,徐磊. 基于实车试验大数据分析的插电式混合动力汽车能量管理策略解析[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(2): 11-29+42.
- [10] 蔡杨,王正武,曾育平,等. 基于极小值原理的插电式四驱混合动力汽车能量管理策略[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(8): 55-65.
- [11] 栾怡莹. 混合动力汽车能量管理策略研究进展[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(24): 178-182.
- [12] 张瑞轩,黄晨,王猛猛. 混合动力汽车能量管理策略研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2022,

- 50(10): 50-55.
- [13] 赵斯力根, 王静远, 张晓明. 混合动力电动汽车构型优化设计方法研究[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(1): 60-67
- [14] 张利鹏, 王子健, 任长安, 等. 混合动力汽车增速离合器创新设计与应用研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 253-263.
- [15] 周权, 旷龙, 满兴家, 等. 混合动力汽车集成式两档DHT研究应用[J]. 汽车与新动力, 2022, 5(6): 37-40.
- [16] 杨磊, 胡明辉. 新型双模功率分流机构参数优化及性能分析[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(2): 12-20.
- [17] 罗林, 李鉴松, 伍婷, 等. 并联式混合动力汽车构型分析[J]. 内燃机与配件, 2023(3): 123-125.
- [18] 何斌, 李凯. 混合动力汽车主要技术路线及应用浅析[J]. 汽车制造业, 2023(3): 24-27.
- [19] 吴梅林, 吴天元, 刘志宏, 等. 混合动力汽车产业发展现状及趋势[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(3): 191-195.
- [20] 张立庆, 李旭, 于镒隆, 等. 混合动力汽车动力分配结构及耦合模式分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2020, 49(2): 91-96.
- [21] 许敏, 张亦嘉. 中国混合动力汽车动力总成技术进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(3): 269-294.
- [22] OHSHIMA K, KONDO K, IBARAKI R, et al. Development of Transaxle for Hybrid Vehicle[J]. JSAE Review, 2000, 21(3): 343-347.
- [23] MUTA K, YAMAZAKI M, TOKIEDA J. Development of New-Generation Hybrid System THS II - Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy[J]. SAE Transactions, 2004(113): 182-192.
- [24] MATSUBARA T, YAGUCHI H, TAKAOKA T, et al. Development of New Hybrid System for Compact Class Vehicles[J]. Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, 2010, 41(1): 43-47.
- [25] FURUKAWA T, IBARAKI R, KIMURA H, et al. Development of New Hybrid Transaxle for Sub-Compact-Class Vehicles[C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2012-01-0623, 2021.
- [26] TANIGUCHI M, YASHIRO T, TAKIZAWA K, et al. Development of New Hybrid Transaxle for Compact-Class Vehicles[C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2016-01-1163, 2016.
- [27] OZEKI T, UMEYAMA U. Development of Toyota's Transaxle for Mini-Van Hybrid Vehicles[C]// SAE 2002 World Congress&Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2002-01-0931, 2002.
- [28] ADACHI M, ENDO H, MIKAMI T, et al. Development of a New Hybrid Transmission for RWD Car[C]//SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2006-01-1339, 2006.
- [29] ITO M, ADACHI M, ENDO H, et al. Hybrid Transmission Development for AWD Luxury Cars[C]// Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition. SAE International, SAE Technical Paper, 2007-01-4122, 2007.
- [30] SHIIBA K, OMURO K, TAMACHI T, et al. Development of Multi Stage Hybrid Transmission[J]. Toyota Technical Review, 2018(234): 64.
- [31] GREWE T M, CONLON B M, HOLMES A G. Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission[C]// SAE World Congress&Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2007-01-0273, 2007.
- [32] HENDRICKSON J, HOLMES A, FREIMAN D. General Motors Front Wheel Drive Two-Mode Hybrid Transmission [C]// SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2009-01-0508, 2009.
- [33] MILLER M, HOLMES A, CONLON B, et al. The GM "Voltec" 4ET50 Multi-Mode Electric Transaxle[J]. SAE Int. J. Engines, 2011, 4(1): 1102-1114.
- [34] CONLON B M, BLQOHM T, HARPSTER M, et al. The Next Generation "Voltec" Extended Range EV Propulsion System[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015, 4(2): 248-259.
- [35] CONLON B, BARTH M, HUA C, et al. Development of Hybrid-Electric Propulsion System for 2016 Chevrolet Malibu[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2016, 5(2): 259-271.
- [36] HOLMES A, LIU J, AMES D, et al. General Motors Electric Variable Transmission for Cadillac CT6 Sedan [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2016-01-1150, 2016.
- [37] NAKANO K, OCHIAI S. Development of the Motor Assist System for the Hybrid Automobile -- the Insight[C]// Convergence 2000 International Congress on Transportation Electronics. Detroit: SAE Technical Paper, 2000-01-C079, 2000.
- [38] IJIMA T. Development of Hybrid System for 2006 Compact Sedan[C]// SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2006-01-1503, 2006.
- [39] HOSODA M. Power Train for a New Compact Sporty

- Hybrid Vehicle[C]// SAE 2010 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2010-01-1095, 2010.
- [40] KAWAI N, OHTA K, MASAOKA Y, et al. Development of 7-Speed Dual Clutch Transmission for SPORT HYBRID i-DCD[J]. Honda R&D Technical Review, 2014(26): 28-33.
- [41] ONO K. Electric Drive System for SPORT HYBRID SH-AWD[C]// SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2014-01-1821, 2014.
- [42] TAMURA S, YOSHINARI T. Development of Electric Drive System for New Model Super Sports Hybrid Vehicle [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2016-01-1685, 2016.
- [43] 王传福, 傅景军, 陈伟, 等. 混合动力车驱动装置: 中国, 200610141069.1[P]. 2006-9-29.
- [44] 朱军, 罗思东, 葛海龙, 等. 一种车用离合器动力耦合同步器换挡混合动力驱动系统: 中国, 200910199960.4[P]. 2011-06-08.
- [45] 葛海龙, 朱军, 王健, 等. 混合动力车辆混合动力驱动系统以及变速箱: 中国, 201810327598.3[P]. 2019-01-11.
- [46] 王全任, 张国耕, 蒋彦, 等. 混合动力传统系统和车辆: 中国, 201710546041.4[P]. 2017-07-06.
- [47] 王全任, 张国耕. 混合动力传统系统和车辆: 中国, 201711225224.2[P]. 2017-11-29.
- [48] HIGUCHI N, SUNAGA Y, TANAKA M, et al. Development of a New Two-Motor Plug-In Hybrid System[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2013, 2(1): 135-145.
- [49] INOUE M, TAKAMATSU H, OGAMI M, et al. New-Structure Motor for Full Hybrid Electric Vehicle[C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2016-01-1225, 2016.
- [50] ITO K, SHIBATA T, KAWASAKI T. Development of High Voltage Wire for New Structure Motor in Full Hybrid Vehicle[J]. SAE International Journal of Alternative Power Trains, 2016, 5(2): 272-277.
- [51] 杨冬生, 王春生, 白云辉, 等. 混合动力系统、混合动力车辆及其控制方法、整车控制器: 中国, 202110228793.2[P]. 2021-03-02.
- [52] ITO Y, AOKI T, NAITO T, et al. Development of Motor with Heavy Rare Earth-Free Magnet for Two-Motor Hybrid System[J]. SAE Int. J. Advances & Curr. Prac. in Mobility, 2019, 1(3): 1169-1176.
- [53] KOMATSUZAKI A, HASHINO S. Development of High-Power-Density DC-DC Converter Using Coupled Inductors for Clarity Plug-In Hybrid[C]// WCX World Congress Experience, Detroit: SAE International, SAE Technical Paper, 2018-01-0458, 2018.

(责任编辑 梵玲)