

“双碳”战略下绿色动力与数字技术融合驱动汽车产业高质量发展及其趋势展望

杨东日^{*}, 巩健², 周宝文^{3,4*}

1. 赛迪顾问股份有限公司, 北京 100081

2. 中国电子信息产业发展研究院, 北京 100086

3. 上海交通大学机械与动力工程学院新能源动力研究所, 上海 200240

4. 上海交通大学碳中和发展研究院, 上海 200030

* 联系人, E-mail: yandr@163.com; zhoubw@sjtu.edu.cn

汽车, 是化石能源时代的标志性技术产品之一。汽车通过内燃机燃烧汽油等化学燃料提供动力, 极大地改变了人们的生产生活方式和活动空间半径, 促进了人类文明的进步。然而, 这一过程伴随着二氧化碳和氮氧化物等环境污染物的大量排放, 受到了全球关注。另外, 化石能源不可再生的特性对人类社会可持续发展构成了严重的威胁。能源危机、环境污染和气候变化迫使能源结构转型升级^[1]。近年来, 二次电池、燃料电池、绿氢、电子燃料、人工光合作用、电力多元转化技术(Power-to-X)等新兴能源动力技术方兴未艾, 叠加大数据、高性能计算、物联网、5G通讯、人工智能等数字技术的快速发展, 给汽车产业带来了前所未有的挑战与机遇, 成为培育新质生产力, 推动新型工业化高质量发展, 应对全球气候变化和能源危机的重要手段(图1)。

1 绿色动力技术的内涵与特点

绿色动力指的是在全生命周期内低碳/零碳排放的动力。动力是否绿色取决于动力的来源而非动力装备。当前, 汽车动力的形式主要包括二次电池动力、内燃动力、燃料电池动力和混合动力。不同的动力系统在工作原理和工作方式等方面具有显著的差异, 可满足未来不同的动力需求场景。然而, 在化石燃料为主体能源的背景下, 无论是二次电池、内燃机还是燃料电池, 都在生产-使用-回收全生命周期的不同节点产生二氧化碳等温室气体和其他有害物质的排放^[2]。当前主流的三种动力来源分开来看: 一、内燃动力二氧化碳的排放覆盖燃料的开采、炼制、配送和使用的全过程; 二、我国电力结构仍然以火力发电为主, 2023年火力发电量占比为66.3%(图2), 电动汽车使用过程二氧化碳排放集中在电力供给端(煤炭的开采、运输、燃烧发电); 三、氢燃料电池的二



杨东日 中国科学院大学工学博士, 正高级工程师, 赛迪顾问股份有限公司高级副总裁, 中国计算机学会(CCF)杰出会员, CCF大数据专家委员会委员, 工信部国家重大战略咨询服务专家库专家, 科技部国家科技专家库入库专家, 中国工业合作协会工业科技创新专业委员会智库专家, 中国开发区协会智慧园区建设专家智库成员, 曾主持三十余项省部级和地方政府产业发展规划和产业研究项目。



周宝文 上海交通大学博士生导师, 国家重点研发计划首席青年科学家, 国家海外高层次青年人才, 中国化学会二氧化碳化学专业委员会委员, 中国能源学会专家委员会委员, 中国石油学会碳中和专业委员会智库专家。致力于面向碳中和的能源器件-系统-解决方案的研究。成果入选“2020年世界十大科技进展新闻”。

氧化碳排放主要集中在氢的生产和储运过程。因此, 无论是内燃动力、二次电池动力还是燃料电池动力, 其绿色属性主要取决于能量的来源。近年来, 我国光伏、风电等可再生能源装机容量持续增长, 从2009年的占比24%持续增长到50%

引用格式: 杨东日, 巩健, 周宝文. “双碳”战略下绿色动力与数字技术融合驱动汽车产业高质量发展及其趋势展望. 科学通报, 2025, 70: 2924–2932

Yang D, Gong J, Zhou B. Perspective of integrating green power with digital technology to drive the high-quality development of the automobile industry under the dual-carbon strategy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2924–2932, doi: [10.1360/TB-2024-0745](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0745)



图1 绿色动力融合数字技术驱动未来汽车产业发展示意图

Figure 1 The schematic diagram of green power integrated with digital technology for driving the future development of the automobile industry

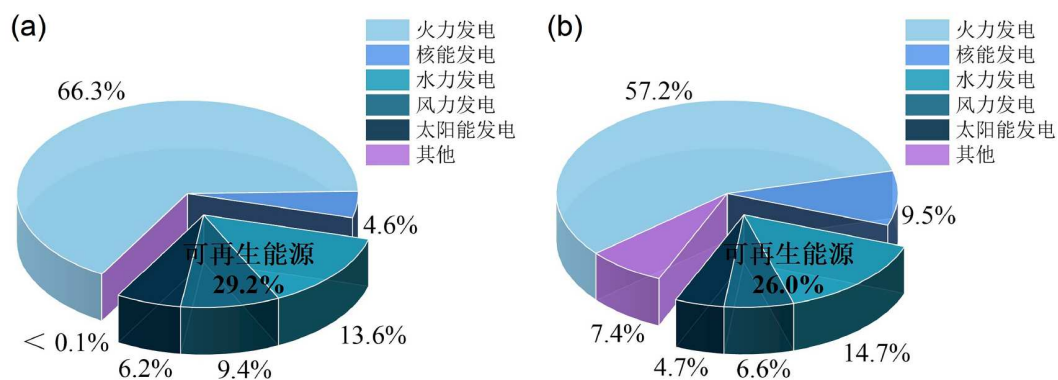


图2 2023年中国(a)和全球(b)发电量构成情况

Figure 2 The composition of China's (a) and global (b) electricity generation in 2023

(图3). 特别是, 截至2022年12月底, 中国可再生能源发电装机容量达到12.13亿千瓦, 首次历史性地超越煤炭发电装机容量. 可再生能源电力价格持续下降, 一次能源结构加速转型, 使汽车产业绿色低碳发展成为可能. 而在能源结构转型过程中, 碳捕获、利用与封存技术(carbon capture utilization and storage, CCUS)+化石能源可以有效克服可再生能源随机性、间歇性和波动性等特点所带来的挑战, 为绿色能源动力技术的发展提供重要保障, 从而确保二次电池、燃料电池、绿氢、

电子燃料、Power-to-X等新兴能源动力技术能够加快人类社会从化石能源时代跨越到可再生能源时代的进程. 这不仅会引发汽车产业的革命, 还将深刻影响其他战略性新兴产业和未来产业的发展, 因此必将会引起广泛深刻的经济社会系统性变革.

1.1 绿色内燃机动力

内燃机(Internal Combustion Engine, ICE)诞生于第一次

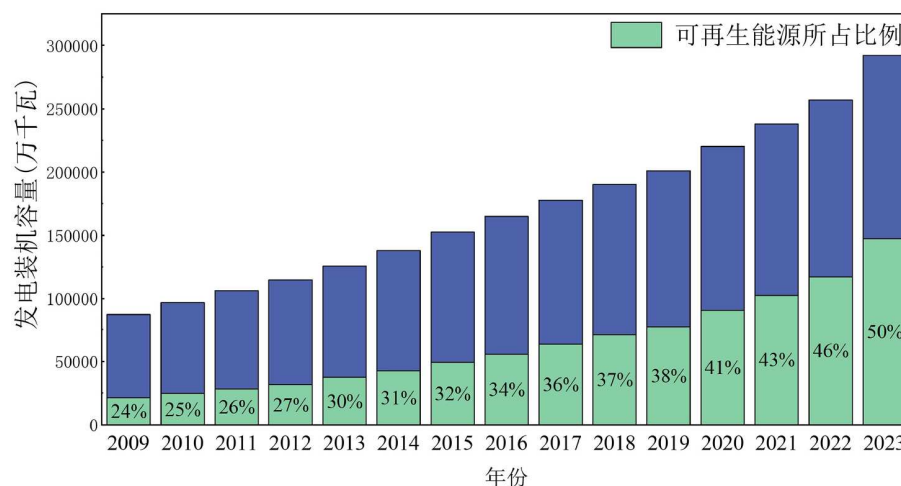


图3 中国2009~2023年可再生能源占发电装机容量比例的变化趋势图

Figure 3 The trend chart of the proportion of renewable energy in the installed capacity of power generation in China from 2009 to 2023

工业革命时代,它是通过燃料在机器内部燃烧释放热能,然后转化成为机械能的动力装备。经过一百多年的发展,内燃机建立了极其完善成熟的产业体系,功率范围从千瓦级到几十万千瓦级,广泛地应用于汽车、船舶、工程机械等领域。截至2023年,我国内燃机保有量超过6亿台,功率为3.3~3.7亿千瓦。从能量利用的角度看,液体燃料能量密度高、便于存储和运输、工作温度区间宽等特点赋予了内燃动力独特的优势。内燃动力功率范围广、稳定可靠、续航里程长、燃料加注快、低温性能好等优点特别适用于大功率长航程重载动力需求场景,比如:重载陆用交通、工程机械、远洋船舶动力等。然而,作为化石能源时代的标志性产物,内燃机蓬勃发展和广泛应用的关键在于石油。目前,全球约有16亿辆汽车,每天消耗液体燃料超过110亿升。在我国,内燃机每年消耗全国60%的石油,二氧化碳排放量约占全社会排放总量的十分之一。同时,由于“富煤、贫油、少气”的资源特征,我国石油资源对外依存度高达70%以上。大国博弈和地缘政治风险导致的能源安全形势十分严峻。依赖化石燃料的传统内燃动力面临着重大的挑战,亟须转型升级。

低碳/零碳可再生燃料替代化石燃料不仅可以实现减排脱碳,而且有助于降低能源系统对化石燃料的依赖,并且实现可再生能源的大规模长时间存储^[3,4],有望赋予内燃动力新的内涵和生命力。2023年3月28日欧盟理事会批准2035净零碳排放禁令,同时支持电动化和电子燃料两条技术路径。包括电子燃料在内的可再生燃料(太阳能燃料solar fuel、生物质燃料biofuel等)与现有的内燃机产业基础设施高度兼容,其推广使用不仅可以充分发挥内燃动力的优势,而且极大地节约经济社会成本。

从分布的角度看,太阳光、风、水、二氧化碳、生物质等可再生资源/能源时空分布高度匹配,通过变革性的能源催

化与存储技术将它们转化成高能量密度的化学燃料是切实可行的。人工光合作用^[5,6], Power-to-X^[7]等前沿研究正聚焦这一重要过程的科学原理和关键技术,并取得了一系列重要的进步。根据英国牛津大学学者的预测:到2050年,将会有42亿吨的二氧化碳被转化成为可再生燃料^[8]。通过化学化工-材料-物理-能源动力的跨学科协同创新,打破可再生能源转化可存储的化学燃料的科学、技术和工程瓶颈,有望建立不依赖于化石燃料的碳中和动力产业体系。

可再生燃料的理化性质、燃烧特性与传统燃油具有显著区别。以氢内燃机(Hydrogen Internal Combustion Engine, HICE)为例,氢气质量轻、易泄漏、氢脆,火焰传播速度快、点火能量低(启动性能好),氢气上述特殊的理化性质对内燃机的核心零部件提出了更高的要求。基于完善的内燃机产业链,开发适用于绿氢和可再生燃料的碳中和内燃机,是实现内燃动力产业变革性发展的关键之一^[9]。

1.2 绿色安全便捷的二次电池动力

二次电池动力指的是以连接自由电网充放电的二次电池作为能量来源,通过电机将电能转换成机械能的电气化动力。1991年,美国通用汽车研发了世界第一款续航140公里的电动汽车EV-1。随着动力电池、电机、电控等核心技术的持续创新和进步,电动汽车的驾乘舒适性、可靠性、经济合理性愈受到消费者的认可,产业链日趋成熟。据乘用车市场信息联席会披露的信息,2024年4月18日我国电动汽车零售渗透率达到50.39%。挪威、冰岛、芬兰等电力资源丰富的国家,电动化渗透率也已经超过50%。

锂离子电池作为目前主流的二次电池技术,其工作原理基于锂离子在正负极之间的移动(图4)。在充电过程中,锂离子(Li^+)从正极材料(通常是锂金属氧化物,如 LiCoO_2 、 LiFe-

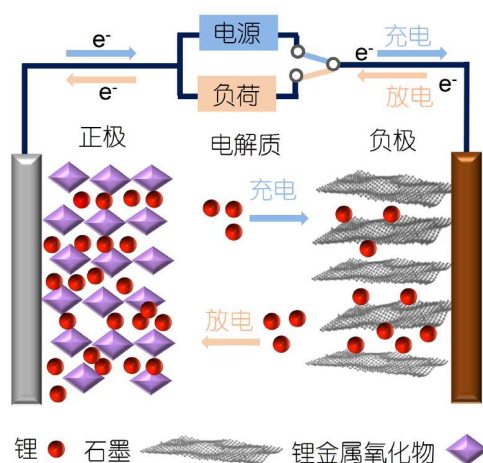


图4 锂离子电池工作原理示意图

Figure 4 Working principle diagram of lithium ion battery

PO₄等)脱出,通过电解质移动到负极(通常是石墨或其他类型的碳材料),并嵌入到负极材料中。这个过程正极失去电子(氧化),而负极获得电子(还原)。在放电过程中,锂离子的运动方向与充电时相反。锂离子从负极脱出,通过电解质回到正极,并在正极材料中嵌入。这个过程导致负极失去电子(氧化),而正极获得电子(还原)^[10]。目前,电动汽车使用最广泛的动力电池是三元锂电池和磷酸铁锂电池。尽管锂动力电池极大地推动了汽车产业的转型发展,目前仍然存在着一系列的问题,包括:能量密度接近理论极限,低温性能衰减快,充电速度慢。同时,使用可燃的有机电解液和高分子隔膜,容易发生漏液、热失控、自燃等风险^[11],严重地限制了锂电池动力在交通运输领域的进一步应用。全固态动力电池以固态电解质传导电子,具有高比能和高安全性的优点,是当前二次电池领域最为活跃的研究方向之一^[12]。提升离子在固态电解质中的传输速度,从而提高电池的功率是这一未来动力技术的难点。由于锂资源储量有限,随着电动汽车保有量和渗透率的进一步提高,未来锂资源的供应或很难满足市场需求。因此,退役动力电池锂资源的回收愈发重要。除此之外,钠具有与锂相似的化学性质,而且资源丰富,分布广泛、成本低廉,成为未来电气化动力的重要发展方向。目前,该领域需要攻克低温运行容量衰减严重、循环寿命短、充电困难等难题^[13]。

相比于锂离子电池,金属空气电池具有能量密度大、充放电过程产生的热量和废弃物少、安全绿色、金属元素储量丰富、成本低以及环境友好等诸多优点。1878年,全球第一个锌空电池问世,迄今已逾146年。锌空气电池的工作原理如图5所示,化学反应方程式如下(SHE,标准氢电极):

空气电极反应:



锌阳极反应:

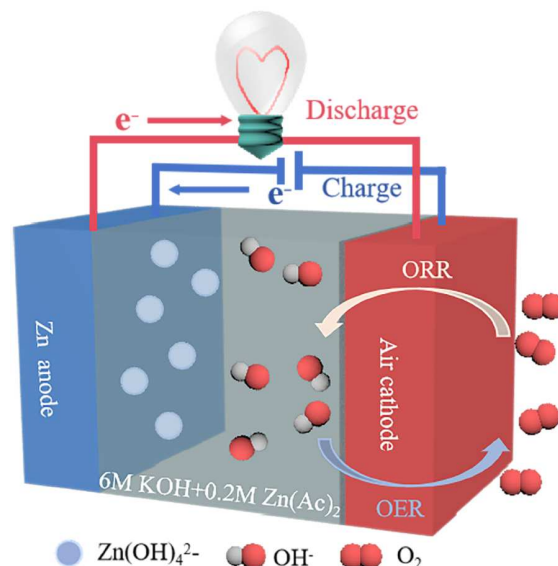
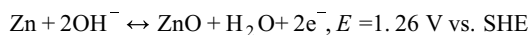
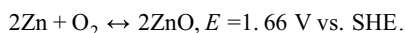


图5 金属-空气电池充放电原理

Figure 5 Charge and discharge principle of metal-air battery

总反应:



根据日经新闻网报道,夏普公司计划在2025年启动锌-空气电池的生产。美国初创技术公司Form Energy拟在美国钢铁重镇-西弗吉尼亚州投资7.6亿美元建造一座新的铁-空气电池制造基地。尽管具有一系列的优势,金属空气电池技术产业依然面临提高金属空气电池功率、可靠性和降低成本等一系列挑战^[14]。

综上所述,二次电池电气化动力功率密度低、低温性能衰减快、充电速度慢,严重地限制了其在大功率重载长航程领域的应用,未来预计将以短途乘用车为主要应用场景。

1.3 基于绿氢的燃料电池动力

燃料电池通过电化学反应将氢气的化学能转化成为电能,然后通过电机和电控系统为车辆提供动力,同时为车载设备提供电能。目前,燃料电池的类型主要包括质子交换膜燃料电池(图6(a))、阴离子交换膜燃料电池(图6(b)),以及固体氧化物燃料电池(图6(c))。

燃料电池工作过程不受卡诺循环限制,具有能量效率高、续航里程长、氢气加注快、零排放等优点,是理想的车载动力装备。经过多年的技术迭代,燃料电池全产业链(电堆、电机、电控及配件等)成本持续下降,整车氢耗、续航里程、低温启动等关键性能指标持续优化。截至2022年底,日本丰田MIRAI氢燃料电池汽车全球累计销量达21864辆。截至2023年底,我国氢燃料电池汽车累计推广约2万辆,位居全球第二,覆盖城市交通、物流、工程、园区、港口等众多场景。尽管燃料电池给氢能的高效利用提供了很好的技术方案,

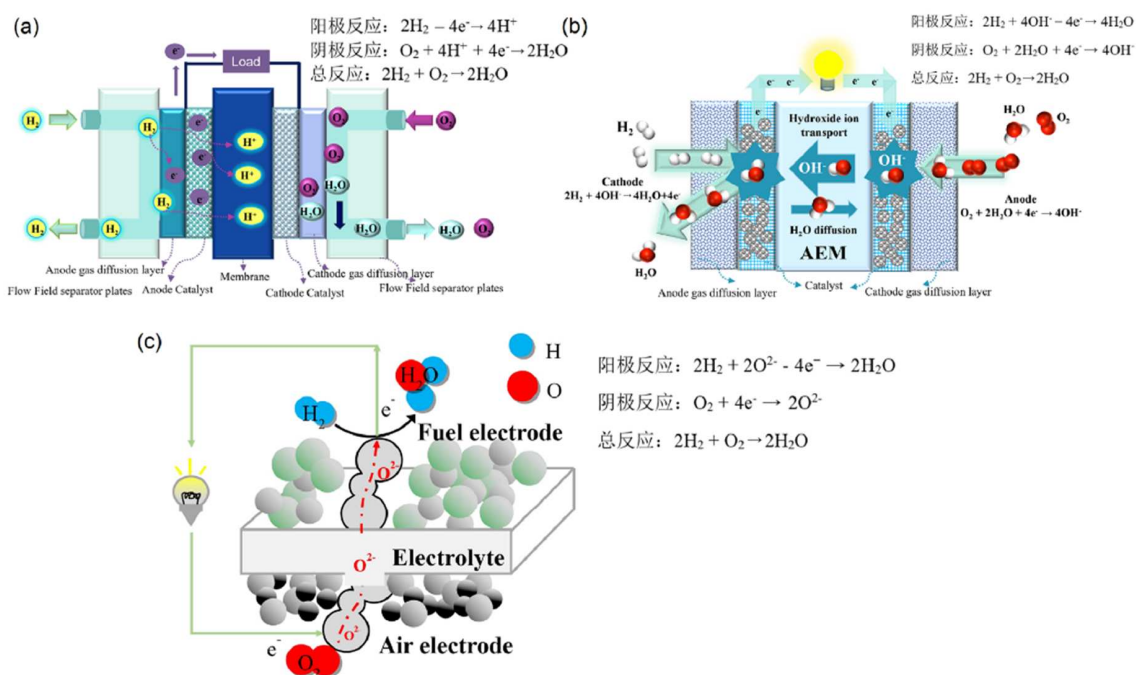


图6 质子交换膜燃料电池(a)、阴离子交换膜燃料电池(b)和固体氧化物燃料电池(c)的工作原理

Figure 6 The working principle of proton exchange membrane fuel cell (a), anion exchange membrane fuel cell (b), and solid oxide fuel cell (c)

但是，基于氢能的燃料电池动力技术的大规模推广应用仍然存在一定的障碍。首先，目前燃料电池动力的燃料以灰氢为主，主要来自化石能源重整和工业副产氢。绿氢的生产成本依旧过高。电解水制氢技术虽然具备商业化的前景，但是仍然面临膜电极成本高昂，电解槽和配套设备复杂，使用强酸或强碱作为电解质等一系列技术、成本和环境方面的挑战。生物质制氢和光解水制氢，作为中长期制氢战略，目前仍处于实验室研究阶段。此外，氢气的分子量小、容易逃逸、体积能量密度低、液化温度低(−253℃)、易燃易爆、容易使金属发生氢脆，这些理化性质使氢能的储运难以兼容现有的化石燃料基础设施，给氢能产业取得实质性突破造成了严重的困难。解决氢气的大规模低成本制备(可再生能源制氢)、存储和运输(固态储氢以及液态储氢载体等)问题是未来打破燃料电池汽车大规模应用瓶颈的关键。得益于光伏、风电等可再生能源的大规模并网，绿电成本的不断下降，以及电解槽技术的逐渐完善，电解水制氢进一步向规模化产业化方向迈进。将绿氢转化成绿色甲醇以及绿氨等液态载氢体，以及开发以绿色甲醇和绿氨等液态载氢体为燃料的高效稳定的燃料电池电堆，有望克服氢气储运带来的各种挑战，使氢能产业最终取得成功。

综上所述，内燃机、氢燃料电池、二次电池各有优势，适用不同场景的需求。二次电池在轻型短途乘用车领域仍在蓬勃发展，保有量和渗透率持续上升。内燃机和燃料电池在重载、大功率、长途领域具有不可取代的优势。随着可再生

能源在能源结构中的占比不断上升，固态电池、金属-空气电池、Power-to-X，电解水制氢、人工光合作用等前沿研究持续取得进步，不论是内燃机、燃料电池还是二次电池都将持续往绿色低碳的方向发展，并在不同的领域发挥独有的作用。油电混合动力充分集成电气化动力和内燃动力的优势，可以提供更加灵活可靠清洁的动力解决方案。

2 绿色动力与数字技术融合发展

汽车工业是工业体系中产业链条最长、覆盖面最广的产业之一^[15,16]。据统计，2023年1~12月，新能源汽车产销分别完成958.7万辆和949.5万辆，同比分别增长35.8%和37.9%；新能源汽车新车销量达到汽车新车总销量的31.6%，其中，新能源汽车出口120.3万辆，同比增长77.6%。2024年1~8月，新能源汽车产销分别完成700.8万辆和703.7万辆，同比分别增长29%和30.9%；新能源汽车新车销量达到汽车新车总销量的37.5%（2024年8月汽车工业经济运行情况，详见工信部网站miit.gov.cn）。随着“双碳”战略的实施，汽车产业转型升级的步伐不断加快，绿色能源动力技术与数字技术的融合也愈发深入。首先，绿色可靠的能源供应是高性能运算的基础。同时，绿色能源动力领域为数字技术的运用和创新提供了海量的数据和丰富的场景。反之，大数据、高性能计算、物联网、5G通信、人工智能等数字技术在绿色动力技术关键材料的设计以及动力系统的管理，智慧能源系统的构建，自动驾驶，平台链接，人机交互等方面为汽车产业升级与变革提供了强有力的技

术保障,重新定义了汽车的商品属性和社会功能,使之从单一的交通运输工具持续转变成成为储能功能单元、智能移动空间乃至数字经济载体等^[17]。

2.1 数字技术提升绿色动力关键材料设计与动力系统管理

新型能源材料是绿色动力技术的基石。目前,无论是二次电池的电极材料/电解质、燃料电池的膜电极,还是制备绿氢和可再生燃料的高效催化剂,都是研究人员坚持不懈的研究成果。人力、时间和资源成本高昂,效率低下,严重影响了产品迭代更新的速度。机器学习、大数据、5G和大规模计算可以极大加速绿色动力技术关键材料的设计与创制。通过指导和优化催化剂的设计,二次电池关键电极/电解质材料的筛选,工艺流程的优化,可以有效提高关键材料的能量效率、功率密度、使用寿命、降低工艺的制造成本等,从而加快绿色动力技术的迭代速度,提高产品的质量^[18]。以能源存储转化过程的关键材料-电催化剂为例,密度泛函理论、高通量计算以及机器学习算法的发展为电催化剂的靶向设计提供了新的工具。目前,机器学习已经能够以接近密度泛函理论的计算精度模拟电化学过程^[19]。

此外,深度学习、大数据技术、人工智能、工业互联网、5G等新一代数字技术给动力电池、燃料电池、内燃机等动力装备的运行状态、系统健康以及排放情况的评估与预测提供了新的工具,进一步赋能动力装备的绿色低碳化发展^[20]。

2.2 智慧能源系统

光伏、风力、水电等可再生能源具有波动性、间歇性、随机性的特点,难以直接满足汽车、飞机、轮船动力装备的用能需求^[21]。构建智慧能源系统,在发电单元-储能系统-电网等不同层级实现能量的高效管理、分配及使用是实现汽车动力脱碳的关键手段之一。大数据、高性能计算等先进的数字技术为此提供了有力的支撑。如此一来,动力电池不仅可以从电网接收电能,为电动汽车提供能量,动力电池集群也可以作为储能单元,与智慧电网有效链接,将能量反馈给电网或者其他设备^[22]。通过源网荷储的全面数字化升级,实现绿电生产与动力电池充-放电的高效协同,既可以实现电气化动力的真正脱碳,也可以提高可再生能源大规模接入后电网系统的可靠性、安全性和有效性^[23]。特别是,5G通讯技术和能源控制器技术的结合,为加快发电单元、电网、储能系统、动力电池的协同响应速度,提高能源利用效率和安全可靠性提供了技术保障^[24]。

同时,以可再生能源为主的未来电网不仅可以为电动汽车提供零碳电力,还可以为绿氢和可再生燃料的合成提供能量来源^[25]。通过耦合Power-to-X等技术,对水、二氧化碳、氮气、生物质等广泛分布的可再生资源进行分子加工,获得高能量密度的氢气、可再生燃料,实现大规模长时储能,并

为内燃机、燃料电池、燃气轮机、航空发动机等动力装备提供绿色零碳燃料,从而构建清洁低碳、安全高效的智慧能源系统,满足经济系统能源动力部门的用能需求。

2.3 智能汽车网联化

智能网联是汽车技术发展的重要方向。经过多年的发展,汽车产业已经逐渐从传统的硬件控制转变为软件控制,汽车产业变革中来自软件和电子电气架构方面的比例日益提高。现代汽车将不仅仅是一个物理交通工具,还是承载着复杂计算系统的智能终端。未来,随着汽车这种移动空间产品个性化需求凸显以及制造工艺流程的改进,软件定义汽车(software defined vehicle, SDV)或将成为主流趋势,汽车的硬件或将逐渐标准化,而核心竞争力将集中在软件开发、网络通信、数据处理与智能算法上^[26]。通过全面融合智能化的车载传感器技术、智能控制技术、自动驾驶技术、边缘计算技术等,有望打造更为完善的汽车智能化体系。尤其是,随着5G技术、边缘计算、大数据、虚拟现实等前沿科技的创新应用与迭代升级,车辆、基础设施、运营平台之间的互联互通将进一步增强,汽车必将快速融入智慧交通和智慧城市的系统之中。智能化、网联化、个性化有望逐渐使汽车成为支撑智慧交通、智慧城市、智慧空间的关键要素。车辆、基础设施、运营平台之间通过数据技术实现互联互通^[27],进一步推动汽车从机械动力产品向智能数字化产品的转变,赋予汽车“交通工具”之外的其他重要社会经济功能,乃至成为智能移动空间、应用终端以及数字经济的重要载体^[28,29]。智能网联汽车的发展离不开变革性能源动力技术的支撑。无论是汽车传统机械动力和制冷加热系统的用能需求,还是智能网联化海量数据处理,都亟须高储能密度、安全可靠的能源动力技术。未来,汽车作为绿色城市、智慧城市的核心节点和关键终端,将为绿色动力和数字经济的发展提供新的增长点和应用场景。这种多产业融合、多产业协同的趋势,不仅推动了汽车技术的快速迭代,还将加速绿色低碳智慧城市和数字经济的建设进程。

2.4 人工智能加速推动汽车产业智能化进入全新阶段

2023年生成式人工智能(artificial intelligence, AI)语言模型ChatGPT的出现,受到学术界和产业界的高度关注。人工智能日渐成为推动汽车产业变革的重要引擎。在此背景下,中国信息科技公司如百度、华为等,以及造车势力如比亚迪、蔚来、小鹏、理想等,都在积极探索将人工智能大模型应用于汽车智能化解决方案中。目前,AI大模型的应用多集中于语音交互领域,在技术难度更大的端到端自动驾驶领域方面仍处于起步阶段。端到端自动驾驶是指车辆将传感器采集到的信息直接输入统一的深度学习神经网络,神经网络经过处理后直接生成自动驾驶汽车的驾驶命令^[30]。这种技术路径省

略了传统自动驾驶系统中的模块化分步处理,简化了信息处理流程,并且为系统的自我学习和适应能力提供了更大的灵活性。然而,在此之前,端到端自动驾驶算法的学习和进化主要依赖于大量的人为干预与数据标注,算法的进步速度相对有限。继ChatGPT之后,专注于智慧交通和智能驾驶的行业垂直大模型的深度开发和应用,为端到端自动驾驶的探索与创新带来全新可能。这些AI大模型不仅能够处理自然语言,还能够通过多模态的输入,如视觉、音频和传感器数据,进行复杂的推理和决策。这一技术进步意味着AI大模型具备了潜力去接管端到端自动驾驶中的核心任务,成为自动驾驶系统中的“大脑”,而不再仅仅依赖于传统的算法。然而,相比语音交互等应用,端到端自动驾驶的技术难度更大,涉及更复杂的感知、决策和执行环节。这意味着,信息科技企业和汽车制造商在这个领域还有很长的路要走。学术界与工业界正持续加码汽车行业垂直领域AI大模型为核心的端到端自动驾驶技术的研究,并积极推动开发AI大模型与自动驾驶系统结合的解决方案。随着理论的进步、技术的不断迭代和实践的深入,以人工智能大模型为基础的端到端自动驾驶技术,未来或将加速推动汽车智能化进入全新阶段。

3 结语

汽车产业兴起于化石能源时代,极大地改善了人类的生产生活方式。如今,在百年未有之大变局下,汽车产业以动力电气化的方式正在改变现有的交通发展格局,并助力能源结构的转型升级。同时,汽车逐渐从传统的机械动力产品成为

数字技术的重要载体和应用终端,为数字经济的发展提供了丰富的场景和强大的动力。作为汽车产业的两大底层技术,绿色动力与数字技术通过基础研究,产业实践,政策引导,市场延伸等方式,实现全链条的持续创新和跨产业的协同发展,并进一步加快能源和产业结构转型升级和绿色低碳智慧经济系统的建设。

特别是碳中和愿景下,二次电池、燃料电池、零碳内燃机将为汽车产业提供多样化的绿色动力解决方案,满足不同用能场景的需求。此外,汽车产业变革性发展牵引的绿氢、电子燃料、太阳能燃料和生物质燃料有望满足未来重载交通、航天航空,以及远洋船舶的零碳动力需求。随着可再生能源获取成本的持续下降,人工光合作用和Power-to-X等前沿研究的持续突破,以及产品绿色溢价的上升,绿氢和可再生能源预计在不远的未来将有效地支撑经济社会的绿色低碳发展。

总之,在能源结构转型升级和“双碳”战略目标的推动下,新兴的绿色动力技术与大数据、高性能计算、物联网、人工智能等先进的数字技术深度融合,将持续推动汽车产业的变革发展,减轻能源动力系统对化石资源的依赖,推动新型工业化实现高质量发展。从人类命运共同体的角度看,二次电池、绿氢、可再生燃料等新兴能源技术与数字技术的融合还有望协同促进大规模储能、智能电网、智慧城市、零碳航空/航运、低空装备等其他新兴战略产业集群的发展,重塑产业格局,化解能源危机和环境污染等问题,促进人类社会的可持续发展。

致谢 感谢国家重点研发计划(2023YFB4004900)、上海市基础研究特区计划(21TQ1400211)和上海市市级重大科技专项课题资助。

推荐阅读文献

- Li W, Zhang J, Yuan X, et al. Perspective on the low-carbon transformation pathways of fossil energy under dual carbon goals (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 990–996 [李婉君, 张锦威, 袁小帅, 等. “双碳”目标下化石能源低碳转化方向探讨. 科学通报, 2024, 69: 990–996]
- Zhang L, Liu Z F, Wang J J. Comparative analysis of life cycle environmental impact between power system of electric and internal combustion engine vehicles (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2013, 33: 931–940 [张雷, 刘志峰, 王进京. 电动与内燃机汽车的动力系统生命周期环境影响对比分析. 环境科学学报, 2013, 33: 931–940]
- Huang Z, Zhu L, Li A, et al. Renewable synthetic fuel: Turning carbon dioxide back into fuel. *Front Energy*, 2022, 16: 145–149
- Zhou B W. Liquid hydrogen carriers: Linking renewable energies for a carbon-neutral future. *Innovation Energy*, 2024, 1: 1000020
- Zhou B, Shao M, Sadaf S M, et al. Toward carbon neutrality by artificial photosynthesis. *Front Energy*, 2024, 18: 54–55
- Li J L, Zhou B W. AuIr@InGaN nanohybrid for artificial photosynthesis of C_2H_4 fuel and H_2O_2 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 1: 3–6 [李景林, 周宝文. AuIr@InGaN纳米线组装体人工光合成 C_2H_4 燃料联产 H_2O_2 . 科学通报. 2024, 1: 3–6]
- Jia S, Ma X, Sun X, et al. Electrochemical transformation of CO_2 to value-added chemicals and fuels. *CCS Chem*, 2022, 4: 3213–3229
- Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. *Nature*, 2019, 575: 87–97
- Chen L, Zurnstein C, Tang R B, et al. Development status and application prospects of global hydrogen internal combustion engines under the background of dual carbon (in Chinese). *China Resour Compreh Util*, 2023, 41: 163–165 [陈雷, Zurnstein C, 唐荣彬, 等. 双碳背景下全球内燃机发展现状及应用前景. 中国资源综合利用, 2023, 41: 163–165]

- 10 Wulandari T, Fawcett D, Majumder S B, et al. Lithium-based batteries, history, current status, challenges, and future perspectives. *Battery Energy*, 2023, 2: 20230030
- 11 Zhang C Y, Ma Y H, Yi Z G, et al. The summarize of current development status of solid state battery technology (in Chinese). *Modern Vehicle Power*, 2023, 192: 1–5 [张春英, 马亚辉, 易正根, 等. 固态电池技术发展现状综述. *现代车用动力*, 2023, 192: 1–5]
- 12 Feng Z H, Qiu X Y, Zhang T, et al. Research progress on thermal safety of all solid-state lithium-ion batteries (in Chinese). *Fine Chem*, 2024, 41: 960–970 [冯振华, 邱祥云, 张涛, 等. 全固态锂电池热安全性研究进展. *精细化工*, 2024, 41: 960–970]
- 13 Mei X X, Shi Z Q. Research progress on low-temperature sodium ion batteries (in Chinese). *Shandong Chem Ind*, 2022, 51: 93–96 [梅晓贤, 史志强. 低温钠离子电池研究进展. *山东化工*, 2022, 51: 93–96]
- 14 Wang Y, Zhou B J, Xu N N, et al. Research progress and challenges of anode for reversible zinc-air batteries (in Chinese). *Mater Rep*, 2024, 38: 23040162 [王越, 周本基, 徐能能, 等. 可逆锌-空气电池锌阳极研究进展及挑战. *材料导报*, 2024, 38: 23040162]
- 15 Yin Z Y, Qin S. An exploration of the development of China's new energy vehicle industry from the perspective of Liszt's national system (in Chinese). *China Market*, 2022, 30: 19–21 [尹宗义, 秦山. 李斯特国民体系视角下中国新能源汽车产业发展探析. *中国市场*, 2022, 30: 19–21]
- 16 China Association of Automobile Manufacturers. 2021 Report on the Economic Operation of China's Automobile Industry (in Chinese), 2021 [中国汽车工业协会. 2021年中国汽车工业经济运行报告, 2021]
- 17 Li W W, Li Y. Collaborative innovation in new energy vehicle industry from the dynamic network perspective (in Chinese). *Sci Technol Prog Policy*, 2024, doi: 10.6049/kjbydc.2023090320 [李文文, 李垚. 新能源汽车产业协同创新演化研究-基于动态网络视角. *科技进步与对策*, 2024, doi:10.6049/kjbydc.2023090320]
- 18 Xie J X, Su Y J, Xue D Z, et al. Machine learning for materials research and development (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2021, 57: 1343–1361 [谢建新, 宿彦京, 薛德桢, 等. 机器学习在材料研发中的应用. *金属学报*, 2021, 57: 1343–1361]
- 19 Chen L, Zhang X, Chen A, et al. Targeted design of advanced electrocatalysts by machine learning (in Chinese). *Chin J Catal*, 2022, 43: 11–32 [陈乐添, 张旭, 陈安, 等. 利用机器学习靶向设计先进电催化剂. *催化学报*, 2022, 43: 11–32]
- 20 Dai G H, Zhang D H, Peng S M, et al. Overview of artificial intelligence in health prediction of power battery (in Chinese). *J Mech Eng*, 2024, 60: 391–408 [戴国洪, 张道涵, 彭思敏, 等. 人工智能在动力电池健康状态预估中的研究综述. *机械工程学报*, 2024, 60: 391–408]
- 21 Teng Y, Zhao D, Yuan T J, et al. Key technology status and outlook for green electricity-hydrogen energy-multi-domain applications coupled network (in Chinese). *Power Gener Technol*, 2023, 44: 318–330 [滕越, 赵骞, 袁铁江, 等. 绿电-氢能-多域应用耦合网络关键技术现状及展望. *发电技术*, 2023, 44: 318–330]
- 22 Chan C C, Han W, Tian H, et al. Automotive revolution and carbon neutrality. *Front Energy*, 2023, 17: 693–703
- 23 Wang Z Z, Xu R S, Lu Y W, et al. Analysis of the development trends and response strategies of modern smart distribution grids (in Chinese). *China High New Technol*, 2024, (4): 19–21 [王自帧, 许若冰, 路英伟, 等. 现代智慧配电网的发展形势与应对策略分析. *中国高新科技*, 2024, (4): 19–21]
- 24 Zhao J X. A study on community-level demand response adopting storage and electric vehicles under a redistribution demand tariff (in Chinese). Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2020 [赵俊雄. 再分配功率电价制度下基于储能与电动车的居民集群响应研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2020]
- 25 Xu H H, Shao G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation (in Chinese). *Power Gener Technol*, 2023, 44: 484–491 [许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究. *发电技术*, 2023, 44: 484–491]
- 26 Zhao F Q, Kuang X, Liu Z W. Research on upgrading of the automotive industry towards the intelligent-connected automotive industry from the perspective of value chains (in Chinese). *Sci Technol Prog Policy*, 2016, 33: 56–61 [赵福全, 匡旭, 刘宗巍. 面向智能网联汽车的汽车产业升级研究. *科技进步与对策*, 2016, 33: 56–61]
- 27 He L. Competitiveness, industry development trends, and policy recommendations for new energy vehicles in the post-subsidy era (in Chinese). *Sci-tech Fin*, 2022, (4) : 16–23 [何琳. 后补贴时代新能源汽车竞争力、产业发展趋势及政策建议. *科技与金融*, 2022, (4) : 16–23]
- 28 Shang X F. Guangdong accelerates the development of new quality productivity in the intelligent connected vehicle industry (in Chinese). *Autom Inform Eng*, 2024, 45: 1–6, 28 [尚学峰. 广东加快发展智能网联汽车产业新质生产力. *自动化与信息工程*, 2024, 45: 1–6, 28]
- 29 Zhang Y W, Yu Q. Research on the development of autonomous vehicles, technology status and innovations in management mode (in Chinese). *J Xinjiang Normal Univ Phil Social Sci*, 2021, 42: 103–122 [张永伟, 俞乔. 无人驾驶汽车发展史、技术现状与创新管理模式研究. *新疆师范大学学报*, 2021, 42: 103–122]
- 30 Wang T H, Luo Y G, Liu J X, et al. End-to-end self-driving policy based on the deep deterministic policy gradient algorithm considering the state distribution (in Chinese). *J Tsinghua Univ Sci Technol*, 2021, 61: 881–888 [王庭喆, 罗禹贡, 刘金鑫, 等. 基于考虑状态分布的深度确定性策略梯度算法的端到端自动驾驶策略. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61: 881–888]

Summary for “‘双碳’战略下绿色动力与数字技术融合驱动汽车产业高质量发展及其趋势展望”

Perspective of integrating green power with digital technology to drive the high-quality development of the automobile industry under the dual-carbon strategy

Dongri Yang^{1*}, Jian Gong² & Baowen Zhou^{3,4*}

¹ CCID Consulting Co., Ltd., Beijing 100081, China

² China Center for Information Industry Development, Beijing 100086, China

³ The Institute of Advanced Energy and Powertrain Technology, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

⁴ Research Institute of Carbon Neutrality, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

* Corresponding authors, E-mail: yang.dr@163.com; zhoubw@sjtu.edu.cn

The exploration and utilization of fossil fuels have significantly promoted the advance of human civilization. At the same time, it has also brought a series of critical challenges that pose great threats to the sustainable development of human society such as climate change, energy crisis, and environmental pollution. As one of the landmark outcomes of the era of fossil fuels, the automobile industry is so far still the dominant consumer of fossil fuels, especially petroleum resources. From the viewpoint of sustainable development, it is of great desire to explore revolutionary technologies to wean the automobile industry off fossil fuels. In addition, with the rapid development of digital technology, the automobile is increasingly becoming an important platform of the digital economy, offering unprecedented opportunities to power the development of the automobile industry. As the two most important basic technologies of the future automobile industry and the important content of new-quality productive forces, the integration of green energy power technology with digital technology is crucial to promote upgrading the automobile industry, new industrialization, and high-quality development of the economy. This integration is critical for the green transformation of the national energy structure and the achievement of dual-carbon strategic goals. This perspective introduces that under the vision of carbon neutrality, the rapid growth of renewable energies such as photovoltaic, wind, and hydropower will accelerate the transition of human society from the era of fossil fuels into the era of carbon neutrality. Of note, owing to the well-matched spatial distribution of water, carbon dioxide, biomass, N₂ and renewable energies on the earth, the constant breakthrough of cutting-edge research such as artificial photosynthesis, power-to-X technologies, carbon capture utilization and storage, will make the sustainable supply of green hydrogen, e-fuel, and other renewable synthetic fuels practically promising, thus addressing the issues associated with the intermittent, fluctuant, and random characteristics of renewable energies. As a result, a promising pathway for the transformation of various power technologies such as internal combustion engines, batteries, and fuel cells toward carbon neutrality can be paved. In this perspective, the connotations and characteristics of different green power technologies based on green electricity, green hydrogen, and renewable synthetic fuels are first demonstrated along with the basic introduction of their operation principles. Then, the status, bottlenecks, application scenarios, and advances of different green power technologies are discussed in detail. Furthermore, the impact of integrating digital technologies such as big data, artificial intelligence, the Internet of Things, and 5th Generation Mobile Communication Technology with green power technologies on the automobile industry is expounded: (1) digital technology accelerates the design of key material for green energy technology and optimizes the energy management of a power system; (2) the establishment of a smart energy system; (3) smart car networking; (4) artificial intelligence accelerates the intelligent automobile industry upward to a new stage. At last, the possibility of integrating green power technologies with digital technologies to coordinate the development of strategic emerging industries such as large-scale energy storage, smart grid, zero-carbon aviation, zero-carbon shipping, and low-altitude equipment is briefly discussed. Overall, it shows a feasible path to take the green and low-carbon transformation of the automobile industry as a valuable opportunity to reshape the industrial pattern, solve the issues of energy crisis and environmental pollution arising from the excessive utilization of fossil fuels, and eventually promote the sustainable development of human society.

carbon neutrality, green power, digital technology, integration, automotive industry

doi: [10.1360/TB-2024-0745](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0745)