

新能源产业链构建： 光伏发电-电化学储能-新能源汽车

杨 涛^{1,2,3}, 严大洲^{1,2}, 温国胜^{1,2}, 李艳平^{1,2}, 韩治成^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

(2. 硅基材料制备技术国家工程研究中心, 河南 洛阳 471000)

(3. 洛阳中硅高科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 以高速路网光伏发电-电化学储能-新能源(电)汽车全产业链为基础, 描述未来新能源生态体系的构筑蓝图: ① 在供给侧, 探讨全面普及清洁能源的战略布局, 打造高速路网光伏超级电站, 依托光伏发电全生命周期低成本的优势, 直接为下游终端提供电力, 大幅降低新能源应用端的使用成本, 推动以新能源汽车为中心的下游产业扩张, 减少传统能源消耗和碳排放, 助推绿色发展; ② 在储能端, 加速液流电池和液态金属电池等电网储能设备的应用以及以硅碳和三元材料为代表的高容量动力电池材料的规模化生产进程, 统一电池和配套设施的制造标准, 并借助互联网战略, 建立电池全生命周期的监测、维护和回收利用网络; ③ 在应用端, 制定新能源汽车的全新制造标准, 全面推行模块化的设计和生产, 用可更换电池模组替代集成式电池模组, 建设替代加油站的配套电池供应网络, 提供电力接入和电池充电、更换、维护服务。另外, 还简述了利用新能源产业中的弃风、弃光发展氢能源, 以氢能作为当下新能源体系的补充。通过新能源产业上、中、下游的同步建设, 希望在未来 30 年内打造一个供给端-储能端-应用端协同发展的产业链, 逐步形成独立于化石能源的、包含光伏和风电等多种能源形式的新能源闭环生态体系, 实现社会能源消费结构转型, 助力“碳达峰、碳中和”战略实施。

关键词: 光伏发电; 电化学储能; 电动汽车; 换电模式; 新能源生态体系

中图分类号: F426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)02-0164-11

引用格式: 杨涛, 严大洲, 温国胜, 等. 新能源产业链构建: 光伏发电-电化学储能-新能源汽车[J]. 中国材料进展, 2024, 43(2): 164-174.

YANG T, YAN D Z, WEN G S, *et al.* Construction of the New Energy Chain along Photovoltaics-Electrochemical Energy Storage-Electric Vehicles[J]. Materials China, 2024, 43(2): 164-174.

Construction of the New Energy Chain along Photovoltaics-Electrochemical Energy Storage-Electric Vehicles

YANG Tao^{1,2,3}, YAN Dazhou^{1,2}, WEN Guosheng^{1,2}, LI Yanping^{1,2}, HAN Zhicheng^{1,2}

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

(2. National Engineering Research Center of Silicon-Based Materials Manufacturing Technology, Luoyang 471000, China)

(3. China Silicon Corporation, Luoyang 471000, China)

Abstract: The “photovoltaics-electrochemical energy storage-new energy (electric) vehicles” industry is taken as an instance in this paper to depict the blueprint of the new energy eco-system. ① As the headstream of the whole industry chain, clean energy source will be first discussed. Taking full advantage of low cost of the photovoltaic lifetime, the super high-way photovoltaic (PV) plant is supposed to be a promising, cheap power supply for new energy vehicles, and to conduce to less

traditional energy consumption and carbon emission. ② In the field of energy storage, more promotion is required in mass production of high-capacity power battery materials like silicon-carbon anodes and ternary cathodes and unified manufacturing standards of batteries and corresponding accessories. Furthermore, with the aid from “Internet Plus” strategy, a network of monitoring, maintenance, echelon use and recovery will be established to cover the batteries’

收稿日期: 2021-08-22 修回日期: 2024-02-01

第一作者: 杨 涛, 男, 1989 年生, 高级工程师,

Email: yangt@enfi.com.cn

通讯作者: 严大洲, 男, 1963 年生, 正高级工程师,

副总工程师, Email: yandz@enfi.com.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202108022

whole life. ③ As for the new energy vehicles, novel manufacturing standards will be formulated including modular design and production. Instead of the integrated battery modules, the exchanging mode will be applied to vehicle batteries, accompanying with the establishment of the gas-station-like battery supply network, which provides power access and battery charging/replacement/conservation. In addition, it is also briefly described that hydrogen evolves from water electrolysis by utilizing surplus photovoltaic and wind power and serves as a significant supplement of the present electricity-dominant new energy system. An ecology is hopefully formed through synergetically developing renewable energy supply, storage and applications in the following 30 years. Thereafter, the energy consumption will be thoroughly changed to achieve “Net Zero CO₂ Emission” via the construction of a closed, fossil-fuel-independent new energy eco-system, supported by photovoltaics, wind power and other clean energy sources.

Key words: photovoltaics; electrochemical energy storage; electric vehicle; battery exchanging mode; new energy eco-system

1 前言

能源发展伴随着人类文明和科技发展,世界能源结构曾经历了煤炭代替薪柴、石油代替煤炭2次重大变革,并正在经历从化石能源向可再生新能源的变革。能源危机和环境污染的压力以及近年来电动汽车产业的蓬勃发展为新能源产业注入了新的动力,正将新能源产业推向一个高峰,同时也对整个新能源行业提出了新的挑战。

2020年,世界主要国家纷纷宣布碳中和目标,国际能源署制定了零碳实施路径里程碑(图1)^[1],中国明确提出“2030年碳达峰,2060年碳中和”目标。为实现这一目标,

立足我国国情、遵循能源发展规律,控制能源生产和消费碳排放是实现全社会碳达峰目标的关键,根本实现路径是以能源生产清洁化、能源消费电气化为方向,着力优化能源结构、提高能源效率、严控化石能源总位,构建清洁主导、电为中心的现代能源体系。

在政策、资本和市场等多重因素的综合作用下^[2],由供给端、储存端和应用端3个板块构成的新能源产业基本格局已经形成。目前,中国新能源应用的主要载体是新能源汽车,所以如何真正实现汽车新能源化是新能源产业发展的重要课题,但是受新能源入网供电成本、动力电池容量和电动汽车行业标准不完善等因素的限制,板块间的协同发展问题日益突出,促使新能源产业各个环节形成完整、统一的生态体系越发重要。

从能量流的角度看,新能源产业的3个板块存在如下亟需解决的问题^[3]:①能源端,新能源占比小,供给能力有限,并且由于新能源(太阳能、风能、水能、生物质能等)供给稳定性差、电站区域分布不均、输送困难等原因,还存在很大比重的弃光、弃风、弃水电量;②储能端,大型储能装置尚未普及,动力电池等移动储能设备容量和效率不能满足市场需求;③应用端,70%以上电能来源于火电而非新能源,电动汽车续航短、充电慢,汽车产业依然以燃油车为主,而目前原油进口依存度依然超过70%^[4],对国家能源安全和环境构成了威胁。

鉴于新能源产业现存的各种问题,作者提出了以“高速路网光伏发电-储能设备-新能源汽车”为例,构建协调发展的新能源生态体系基本框架:通过高速路网超级光伏电站解决新能源供应与输送的难题,通过研发高容量电池、建立电池标准体系突破储能困境,通过汽车标准化和模块化设计以及换电模式推广攻克应用领域的瓶颈,产业链上下游相互联合建立能源、储能、应用三大板块的管理、运维和回收循环利用网络,形成一个新能源产业的闭环生态系统。

2 能源端

新能源供给方面,在全球实现碳中和的背景下,到

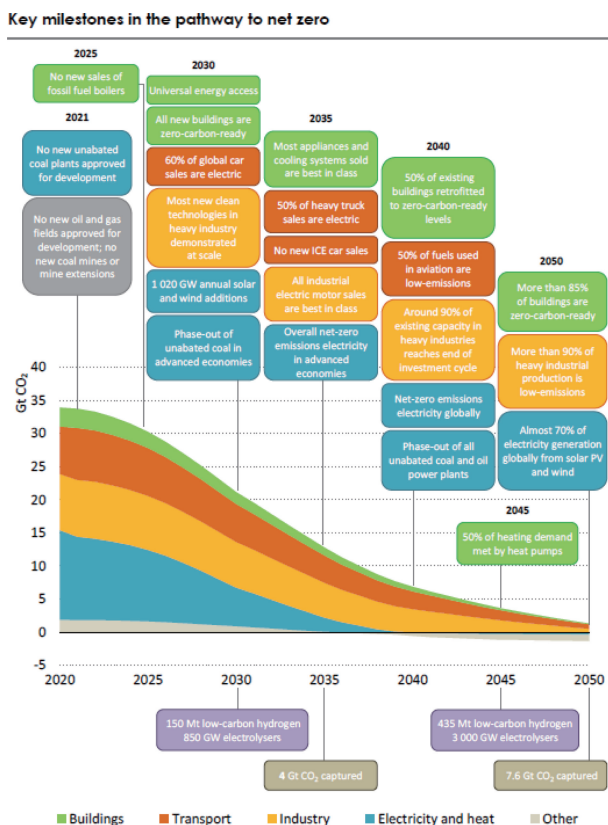


图1 碳中和路线中的关键里程碑^[1]

Fig. 1 Key milestones in the pathway to net zero^[1]

2050 年电力将成为最主要的终端能源消费形式, 占比达到 51% (图 2)^[5]。除了最为传统的水电外, 发展势头最迅猛的当属光伏和风电, 光伏和风电对可再生能源发电的贡献率将超过 63%。其中随着我国多晶硅产业持续的技术进步和规模扩张, 自 2004 年至今, 光伏发电系统成本断崖式下降 (组件和系统价格以及光伏电价分别下降了 92%、87.5% 和 82% 以上), 并且全产业链碳排放极低 (每度电产

生的二氧化碳仅为 43 g 左右, 远低于火电的 1000 g), 成本与环保优势使光伏发电有望成为未来最大的电力来源。并且由于技术的不断进步, 光伏中标电价持续下降, 投资成本和发电成本逐年下降, 2023 年 11 月 18 日, 西藏自治区人民政府办公厅印发《关于进一步优化调整全区上网电价和销售电价引导降低社会用电成本的通知》, 集中式光伏电站上网电价降低至每度 0.1 元^[6]。

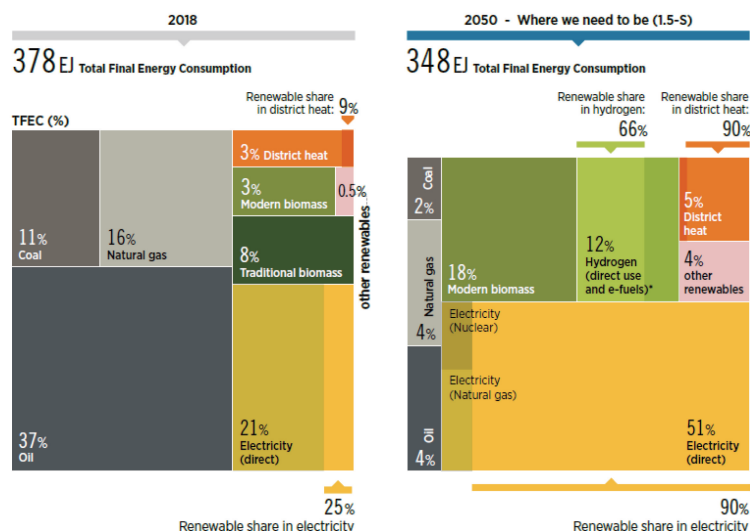


图 2 全球能源消费结构变化预测^[5]

Fig. 2 Changes prediction of global energy consumption^[5]

另一个非常重要的优势是, 光伏发电获得的是直流电, 可以直接供给电动汽车, 从而极大地压缩电动汽车的用电成本。不过, 目前受光伏发电地理位置的限制, 需要逆变交流升压后并入电网, 方可输送至用户端, 到用户端再进行降压整流为直流电, 经历 2 次转化, 不仅能量损失严重, 而且大大增加了投资, 用电成本增幅可达 55%, 对新能源的应用非常不利。

2.1 突破光伏用地困境的探索

光伏发电普遍采用的硅基电池片, 最大实际转化效率为 24% 左右^[7], 需要足够大的安装面积以确保足量的电能供应, 所以光伏用地成为一个棘手的问题。为了避免过高的逆变损耗和输电成本, 光伏电站建设在用电终端附近直接为其供电最为理想, 而用电终端密集地区往往又是土地匮乏的区域。针对这一困境, 不同的分布式光伏电站方案被提出, 总体思路就是跳出传统光伏电站平面布局的思维, 在已有设施上增加光伏组件, 以充分利用立体空间, 比如鱼塘光伏、蔬菜大棚光伏、农田光伏等, 不过, 局限性也非常明显, 分布式方案提供的安装量非常有限, 考虑依附设施本身需要一定的采光度, 光伏组件无法按照最大密度安装, 并且上述几种典型方案都不能确保对最大的用电终端——电动汽车实现有效供电。

于是, 依托公路网建设光伏电站的设想被提上日程, 并且已经有 2 种模式被付诸实践。一种是高速公路非功能区分分布式光伏, 主要是利用高速公路沿线匝道、绿化/隔离带、服务区屋顶、车棚等安装分布式光伏组件^[8]。不过, 发电面积有限的根本问题并没有得到解决, 涉及高架、山地、陡坡等的恶劣环境下不能实现安装, 所以发电量非常有限, 仅仅能满足服务区的普通用电需求, 远远达不到为电动汽车充电的目标。另一项关于高速公路光伏电站的实施方案是承载式光伏路面, 但是仅从材料的使用来看, 路面的建设成本不菲, 而且路基的建设标准也将远远高于普通高速公路; 此外, 从效费比的角度看, 路面需要加装高强度承重耐磨表层, 透光率大大降低, 光伏组件的理论转化效率仅为 5.06%^[9], 当车流量较大的时段, 光接收率和转化率会更低, 完全不具备实用价值; 除了建设效费比, 更重要的是, 路面材料损耗率高, 维护成本将远远超过建设成本。所以, 无论是从成本的角度, 还是发电效率的角度, 该方案都是不可行的。

2.2 高速路网超级光伏电站方案

有了上述 2 种方案的经验教训, 作者团队推荐一种更为大胆但更加实用的方案, 即架空光伏。设想充分利

用高速公路的立体空间,通过承托结构将普通光伏组件架设在路面以上数米的位置,除了安装高度较高以外,与正常光伏电站完全相同,因此可以充分利用现有商用光伏组件和安装、维护、回收体系,实现与正常光伏电站相当的运行寿命,建设与运营成本都可以得到有效控制。当前光伏电站普遍采用的追光技术也可以完全移植,光伏板可自动旋转,充分利用阳光。最重要的是,能够

实现高速路网几乎全覆盖(除隧道区外),解决了用地困境,不占用绿化带,发电量大,直流电经电力变换后直接供给沿途充电站,为电动汽车补充电能,真正实现降低汽车用电成本。并且,可以预期的是,光伏组件的承托机构为将来的电动汽车电磁感应式无线充电技术应用预留了良好的基础设施。因此,这是一项兼顾实用和拓展潜力的路网新能源解决方案(图3)。

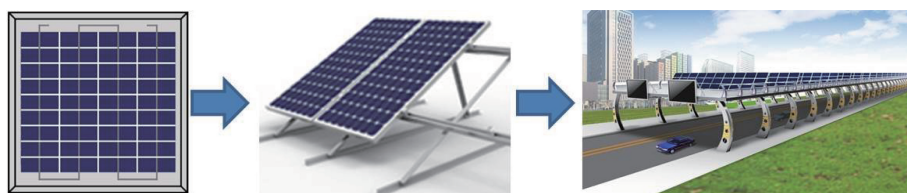


图3 高速路网光伏电站假想图

Fig. 3 Imagination of the highway PV power station

2.3 高速路网超级光伏电站供给能力

为了更加充分地说明架空光伏电站的优势,作者对其供给能力进行了细致的评估:以中国河南省为例,以平均每平米光伏装机量 0.1 kW 粗略估计,在最低标准为路基基本宽度 24 m 双向四车道的高速公路上安装;考虑路面采光等因素,长度方向上 $1/3$ 的覆盖量;综合考虑日照时间、日照强度和组件维护等各方面因素,光伏组件年均接收峰值日照约为 1100 h ;2023年河南省高速公路总里程 8300 km ,那么高速超级光伏电站的年发电量可达 $7.31\times 10^9\text{ kWh}$ 。

对这样规模的供电能力,可以从另一个角度来更直观地理解:电动汽车的百公里平均电耗为 16 kWh 左右,假设车年均行驶 $20\,000\text{ km}$,河南省高速路超级光伏电站的发电量可供 228.44 万辆电动汽车运行1年,而当前(2023年底)河南省私家车保有量超过 1600 万辆,所以仅高速路光伏电站就可满足将河南省 14% 左右的汽车替换为电动汽车后行驶的能源消耗。另外,从能源成本来看,光伏产生的直流电不经过逆变上网,直接供给电动汽车使用,综合用电成本将低于 0.6 元/kWh ,一辆电动汽车一年的电费约为 1200 元,而同级别的燃油车(以百公里油耗 10 L 计)燃料消耗成本将在 $15\,000$ 元以上。这仅仅是以最低标准进行评估,随着光伏技术快速进步,如果正式实施,实际供给能力将显著高于预估值,并且,如果在有条件的普通公路沿线建设光伏电站,将进一步提升光伏在新能源产业中的供给能力,由此加速相关领域的“新基建”进程。

2.4 高速路网超级光伏电站的运行与维护

高速路网超级光伏电站建设完成后,另一项极为重要的工作就是运行与维护,由于发电组件分布里程非常长,单独组织一支运行维护力量所花费的成本将非常

高,因此,高速道路养护平台将被充分利用起来,并借助物联网信息化,实现智能化、高效率、低成本运行与维护。其基本的模式是,电站运营商与高速路政深度合作,采用“现场+远程”相结合的方式以道路养护为基础培养专业的光伏电站运行维护人员,按区域设置线下管理网点,进行定期现场巡检;同时由远程监测系统组成的线上网络进行实时数据采集,连同人工巡检结果一起汇总至运维集中控制中心,建立预防性运维机制,对潜在风险、故障进行分析和防范,以及对突发情况进行快速反应。

3 储能端

太阳能光伏等清洁电力近年来发展迅猛,但稳定性差是其天然属性,且普遍存在弃光现象^[10]。另一方面,电力资源由于地理位置和气候环境等因素差异在全局和局部范围内都存在不同程度的分布不平衡,必须在现有的电力系统中加入关键的储能环节,让电力在空间和时间上得到更合理的再分配。同时,储能装置也充当了能源端与应用端的缓冲环节,以抵消新能源电力供给端不稳定性对用户端的冲击^[11]。作为连接能源端和用户端的纽带,根据储能设备的容量、规模和归属以及是否可移动等,储能系统可以分为供应端储能和应用端储能。

3.1 供应端储能

供应端储能系统最基本的任务是将能源端提供的电能以一定的形式储存起来,能量储存系统的基本任务是克服在能量供应和需求之间的时间性或者局部性的差异,起到削峰填谷的作用。因此,储能系统要求^[12]:①单位容积所储存的能量高,即系统尽可能储存多的能量;②具有良好的负荷调节性,能根据用户需求调节其电能释放量;③能源储存效率要高,储能系统不需过大的驱

动力或过高损耗而以最大的速率接收和释放电能；④ 系统成本低、长期运行可靠，保证推广应用的经济性。

3.1.1 液流电池

在众多电网级储能方案中，液流电池由于其能量、功率分开设计，安全性高且循环寿命长等特点已经成为大规模储能技术中最有前景的技术之一。液流电池通过正负极电解质溶液活性物质的可逆氧化还原反应实现电能和化学能的相互转化(图4)^[13]，从而消纳太阳能和风能等不连续、不稳定的发电，解决弃光、弃风问题，消除其随机性、间歇性和波动性等问题，消除电网冲击，为应用端提供稳定的电能输出。同时，液流电池与传统电池不同，储能介质的存储与反应是分开设计的，安全性非常高，并且电荷转移只涉及电解和电解液界面，不存在固相内部的电荷传递问题，因而充放电应答速度非常快，可以满足大功率输入和输出需求。其中的全钒液流电池，通过钒离子价态的变化实现电能的存储与释放，不会发生电解液降解，并且可以通过在线或离线价态调整技术使系统恢复价态平衡，是持续性强、安全性高、经济性好、环境友好的大规模储能首选技术之一。

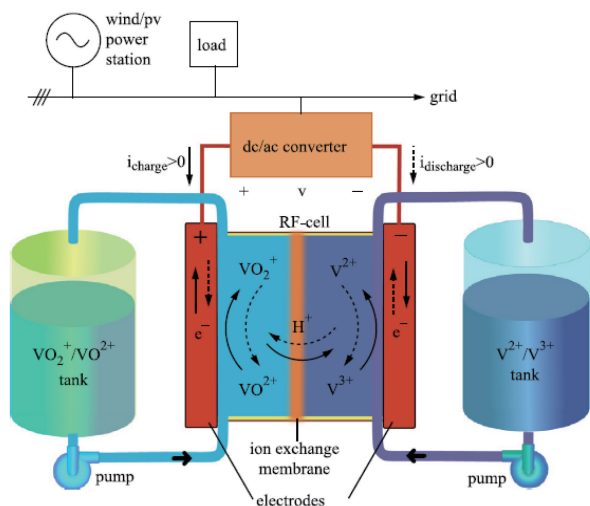


图4 全钒液流电池示意图^[13]

Fig. 4 Schematic of an all-vanadium redox flow battery^[13]

3.1.2 液态金属电池

与液流电池类似的储能解决方案还有液态金属电池(图5)，液态金属电池的结构非常简单，完全依靠介质的密度差异，使用熔盐分隔阴阳极液态金属，没有传统电池复杂的内部结构，最有很长的循环寿命，而且容量十分稳定，整个电池的损耗率也非常低，在每一天都进行充放电的情况下，持续使用10年之后依然能够保持99%的容量。Donald Sadoway 团队成立的 AMBRI 公司计划生产液态金属电池产品的具体信息^[14-16]：体积为

18 m³；储电量 1000 kWh，功率为 350 kW；支持 1000 V 直流电；总重 15 t，合计每千克储能 67 Wh，要比锂电池便宜。当前，液态金属电池唯一的劣势是需要高温和消耗额外的能量来维持介质的液体状态，但未来的室温液态金属电池技术将使它具有与液流电池进行全面竞争的潜力。

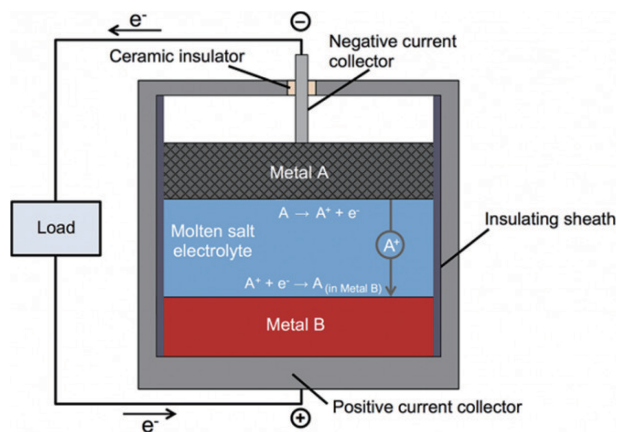


图5 Li || Sb-Pb 液态金属电池示意图^[14]

Fig. 5 Cell schematic of Li || Sb-Pb liquid metal battery^[14]

3.1.3 动力电池梯级利用

储能的另一条路径是梯次利用动力电池，随着新能源汽车产业的蓬勃发展，退役的动力电池数量越来越多，电芯剩余容量多在初始容量的 60%~70%^[17]，其储能能力仍然非常可观。对退役动力电池进行整体诊断和评估后，根据品位不同，将其应用于小型储能、家庭储能、基站备电、微电网系统、中大型电力储能市场等，以充分利用其剩余价值，是十分有成本优势的储能方式^[18]。当然，由于动力电池厂商、用户个体使用习惯以及地区使用环境的差异，每个动力电池的衰减情况各不相同，再利用时的使用寿命(充放电次数)很难评估准确，没有质保或质保期较短(通常不超过2年)，无法将退役动力电池作为电网储能主力，但将它们用于小规模储能或作为电网储能补充设施，依然是非常有前景的发展方向。

3.2 用户端储能

作为新能源汽车的核心零部件，动力电池的性能、产能、价格“三座大山”一直制约着产业升级^[19]。为此，我国先后出台《新能源汽车产业发展规划》^[20]及《节能与新能源汽车技术路线图》^[21]，明确实施电池技术突破行动，包括负极材料在内的电池材料关键核心技术研究，加强高强度、轻量化、高安全、低成本、长寿命的动力电池短板技术，全力推进新型电池材料研发与产业化。国际上，欧盟9国成立欧洲电池联盟，欧盟委员会发布《欧洲2030+电池计划》^[22]，运用先进技术和平台加速新

型电池材料研发; 2021 年美国发布《美国国家锂电蓝图 2021–2030》, 全面布局锂电池资源、材料、电芯、电池包、电池回收以及下一代锂电池技术研发^[23]。2019 年国际可再生能源署制定《全球能源转型 2050 路线》^[24], 明确将开发新型电池材料作为推动能源转型的技术路线之一。

锂离子电池因其能量密度方面的绝对优势, 成为当前最主要的动力电池。整个锂离子动力电池产业包含原材料、电芯、电池制造、电池模组、回收利用等众多环节, 其中电芯材料和电芯制造居于核心地位, 直接影响电池的工作电压、寿命、容量、安全性等。“三座大山”存在的根本原因在于动力电池的性能不够理想, 当下动力电池面临着容量低、充电慢、重量/体积大、续航短等问题, 主流的电动汽车续航里程均不超过 500 km, 成为新能源汽车全面推广的瓶颈之一。此外, 动力电池产业尚未实现标准化, 产品的稳定性和一致性均无法保障。所以, 动力电池发展的方向和目标是高能量密度、高功率密度、长循环寿命和高度标准化。

在推翻上述“三座大山”的任务中, 中国产业界制订了专门的动力电池发展路线^[25]: 近中期在优化现有体系锂离子动力电池技术使之满足新能源汽车规模化发展需求的同时, 以开发新型锂离子动力电池为重点, 提升寿命、安全性和一致性, 同步开展新动力电池体系的前瞻性研发; 中远期在持续优化提升锂离子动力电池的同时, 重点研发新动力电池体系, 显著提升能量密度, 大幅降低成本, 实现新动力电池体系实用化和规模化应用。具体包含以下几个重点发展方向: 动力电池新材料研究、动力电池安全性及长寿命技术研究、动力电池监测系统及控制技术、动力电池仿真及分析测试技术、动力电池梯级利用及资源回收技术; 实现技术路径: 加大新电池体系的研发力度、提升关键材料及装备水平、提高电池的寿命、安全性和一致性、加速动力电池标准体系建设和电池回收再利用技术研究。力争在 2020、2025、2030 这 3 个关键时间节点上达到表 1 所示的技术指标。

表 1 中国动力电池技术路线^[23]

Table 1 Target specifications of EV batteries in China^[23]

Property	2020	2025	2030
Energy density/(Wh·kg ⁻¹)	300	400	500
Cycle number	4000	4500	5000
Cost/(¥·Wh ⁻¹)	1.0	0.8	0.6

3.2.1 动力电池电极材料

在锂电池的成本中, 四大核心材料(正极、负极、电解液、隔膜)的占比接近 40%, 是产业发展中需进行

重点技术攻关的环节。电池正极和负极材料作为充放电过程中的储锂介质, 是决定电池容量的关键部分, 是核心中的核心。目前应用最广的石墨负极材料的比容量已达到 370 mAh·g⁻¹, 已经接近碳材料的理论容量极限 372 mAh·g⁻¹(表 2), 因此新型的高容量负极材料是负极领域的发展方向^[26]。与碳同族的硅在常温下能与锂形成 Li₁₅Si₄ 合金, 理论容量高达 3579 mAh·g⁻¹, 是极具前景的下一代负极材料。国内电池材料龙头企业贝特瑞新材料集团股份有限公司已有小批量相关产品上市, 最高容量可达 1500 mAh·g⁻¹ 以上, 首次库伦效率高于 90%。总体来说, 负极材料特别是硅碳负极材料的研发空间还非常大, 目前其倍率与循环寿命等性能指标依然远远没有达到大规模应用的标准, 需要持续开发更为先进和高效的硅基纳米化和硅碳复合化技术。

表 2 石墨负极与硅负极对比^[26]

Table 2 Comparison between graphite and silicon anode materials of lithium ion batteries^[26]

Anode materials	Lithiated phase	Theoretical specific capacity/(mAh·g ⁻¹)	Cost/(¥·kg ⁻¹)
Graphite	Li ₆ C	372	20~50
Silicon	Li ₁₅ Si ₄ (RT)	3579	212
	Li ₂₂ Si ₅ (HT)		
		80~100	

Notes: ① RT: room temperature; HT: high temperature.

② The specific capacity of commercial graphite materials already reaches 370 mAh·g⁻¹, close to the theoretical capacity.

③ Silicon anodes suffer from severe volume change (more than 300%), leading to fast degradation of mechanical and electrochemical performances.

除了负极, 正极材料的性能是更难突破的环节。由于安全性高, 磷酸铁锂长期以来是主要的正极材料, 但是随着动力电池对能量和功率密度要求的快速提升, 诞生了结合钴基和镍基高容量以及锰基安全性的三元正极材料。镍钴锰 3 种元素之间具有良好的协同效应, 相比于磷酸铁锂电池, 它拥有更高的比能量和比功率(表 3), 并且具有长循环寿命、低毒和廉价的特点, 更符合乘用车的需求, 将取代磷酸铁锂成为下一代主流技术路线^[27–29]。其中, 镍是三元材料储能的主要成分, 通过提高材料中镍的含量以有效提高材料的比容量, 是动力电池正极材料再往前迈进的关键问题。

3.2.2 动力电池标准化

尽管动力电池面临着容量瓶颈的问题, 但是受新能源需求的推动和政策的鼓励, 众多企业和研究机构投入力量积极开展研发, 使得电池材料产业获得了快速发展, 基本可以满足商用电池的要求。不过, 产业体量的扩张

表 3 正极材料主要性能指标^[27-29]Table 3 Properties of different cathode materials^[27-29]

Parameters	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	LiNi _{1-x-y} Co _x Mn _y O ₂
Theoretical gravimetric capacity/(mAh·g ⁻¹)	148	170	280
The highest actual capacity/(mAh·g ⁻¹)	120	160	150
Average discharge voltage/V	3.70	3.20	3.60
Cycling number	≥300	≥1500	≥600
Price/(10 ⁴ ¥·t ⁻¹)	6~10	15~18	20~30

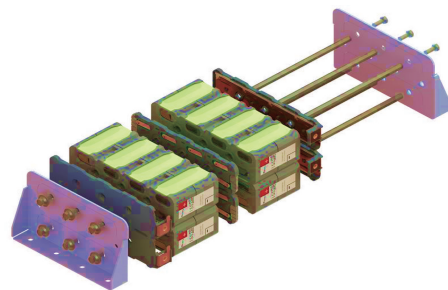
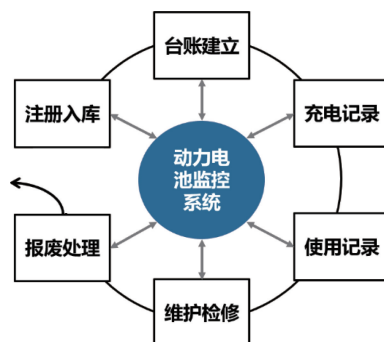
却带来另一个问题,就是动力电池标准化^[30]。单体电芯的规格尺寸不统一一直是主机厂和动力电池企业合作的主要矛盾之一,也是阻碍动力电池产业进一步发展的重大障碍。目前国内虽然有相关国家标准与行业标准,但由于代表性不足,抑或考虑尚需完善等问题,可执行性差,我国动力电池行业还处在电池路线各不相同、电池型号繁杂、产量分散的较为无序的状态。

电芯制作基本形成规范化的流程,标准化建立比较容易。比较困难的部分在于电池装配,传统电池装配采用的是焊接法,不仅存在焊痕表面凸起、气孔、炸火、内部气泡等问题,最为重要的配套的设备、环境和操作成本高,并且电池退役后也不利于回收利用。于是,催生了模块化的电池装配技术,比如美国波士顿能源公司(Boston-Power)开发的新型压力连接方法^[31],实现电池模组的快速装配和拆卸,原始设备制造商(original equipment manufacturer, OEM)标准测试结果表明该技术的装/拆时间比传统方法大为缩短,并有着与传统方法相当的组装密度、可靠性以及热力学性能。这种标准化和规范化的电池组装技术,将单一续航里程的动力电池变成标准化组件的模块化电池组,给汽车制造商或者电池组供应商们提供一种较为简单、成本较低廉的方法来进行大容量电池组的快速生产和装配,省去大量从概念验证到市场化的时间,减少了前期投资、项目风险、人工成本等等(图6)。

3.2.3 动力电池管理

动力电池良好的运行性能,除了依靠材料与标准外,还有赖于先进的管理系统^[32]。搭乘物联网发展的快车,建立一套全面开放、深度互联的电池智能管理系统,覆盖动力电池“注册入库-台账建立-充电记录-使用记录-维护检修-报废处理”全生命周期,可实现供电、储能、安防全方位实时在线监测(图7)^[33, 34]。带来的直接好处就是实现电池的安全监控,结合物联网和人工智能,对电池状态进行预判和预警,频发的电动汽车自燃事故也更

加说明了智能管理系统的必要性。虽然开发更加安全的电池材料和电池结构才是根本的解决方案,管理系统只是一种被动式的方案,但是考虑新型材料的研发周期以及多重保险策略,主动和被动双管齐下才是实现零风险的最佳组合。此外,电池管理系统也是动力电池回收利用系统的重要一环,整车厂和电池供应商可以充分利用电池管理系统的大数据,研判用户动力电池状态,提供主动回收服务。

图6 压力连接电池模组组装示意图^[31]Fig. 6 Illustration of the pressure connection method for battery module assembly^[31]图7 电池管理系统框架^[33, 34]Fig. 7 Framework of the battery management system^[33, 34]

4 应用端

在新能源的应用端,电动汽车的续航能力是仅次于安全性的最为重要的指标,动力电池容量只是其中的一个决定性因素,而实用中电能补充往往才是更关键的限制因素。由于充电速度慢和充电站尚未普及,即便动力电池能量密度如预期达到 500 Wh·kg⁻¹ 以上,若不能及时充能,电动汽车也无法达到如燃油汽车般的长距离续航能力,取代燃油车实现能源消费转型的目标也就无从实现,所以必须着力解决这一问题^[35, 36]。基于现有的快充技术水平,充电速度与燃油车加油速度相去甚远,充电模式还无法与电动汽车需求与产业发展速度匹配,所以借鉴燃油车产业的发展经验,发展与加油站功能类似的配套设施无疑是一条非常好的解决方案,而电池更换

模式(简称换电模式)成为一个可行性非常高的选项,其基本策略就是以“换”代“充”,即与加油站一样,建设换电站对续航不足的车辆直接进行动力电池更换,以达到电能补充的目的。

4.1 电动汽车标准化

换电模式实施的一个重要前提就是标准化,前面的内容已经论述了动力电池标准化与智能管理,这就为换电模式的推广奠定了基础^[37]。此外,电动汽车的制造也需要全面标准化,除了整车设计模块化、动力电池模组标准化(统一安装位置、安装方式、充电接口)以便于形成换电的统一操作规程,还需要基于智能互连的通信接口标准化,以实现车辆管理系统与电池管理系统的兼容互通,为换电站充电与电池维护提供足够的基础数据。

4.2 换电运营模式

换电模式在运营机制上,将至少涵盖汽车厂商、用户、换电服务商、电池企业4个基本的板块,分别进行

电动汽车生产销售、使用、电池租赁-更换-维护+换电网络建设、电池供应。目前特斯拉(Tesla, Inc.)(图8)、北京汽车集团有限公司、奇瑞汽车股份有限公司和上海蔚来汽车有限公司已经在开展换电模式试点^[38, 39],一旦论证通过,也需要建立起一套标准化的换电网络构架,从发电到用电,进行整体规划和调度。表4从换电服务商的角度罗列了一些代表性的换电运营方式,并比较了各自的优劣^[40]。从各方劣势来看,建立标准化的网络构架显得尤为重要,无论哪种模式,运营商在统一的行业架构中进行合理配置,才能实现利润和公共效益的最大化。而鉴于目前电动汽车换电市场的需求现状和换电模式推广的难度,综合来看,以供电企业为主导的电动汽车换电合作运营模式是一种比较理想的选择。同时,这对能源端(光伏电站)是一个良好的机遇,新能源上游企业将有更多机会参与应用端建设,从而在新能源使用的推广中掌握更大的主动权,对提高能源消费中新能源的占比非常有利。

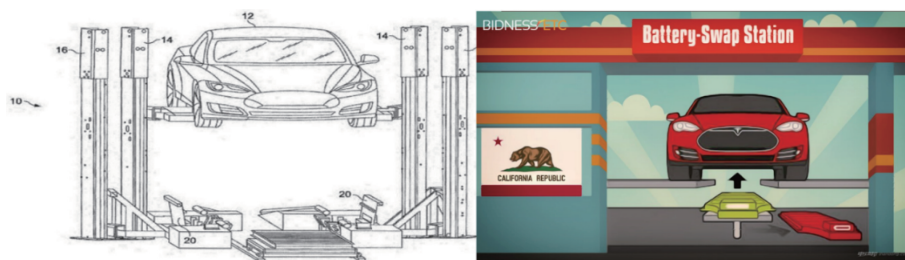


图8 特斯拉换电系统^[38, 39]

Fig. 8 The battery exchanging scheme from Tesla^[38, 39]

表4 几种典型换电模式运行方式对比^[40]

Table 4 Comparison of typical battery exchanging modes^[40]

运营方式	所有权归属	建设、运营方式	盈利方式	优劣势分析
自建自营	供电企业	供电企业负责换电设施/网络的投资、建设、运维	供电企业向用户提供换电服务及其他增值服务	易占据市场主导权,但需要独立承担巨大的投资、技术、市场、运营管理风险
租赁	供电企业	供电企业负责投资、建设和维护,租赁给用户使用	供电企业向用户提供换电设施租赁服务并承担维护工作	易推广换电模式,满足市场对换电设施的租赁需求;但需要承担先期的投资建设风险以及后期的合同、信用和管理风险
融资租赁	金融机构	金融机构负责投资、建设,供电企业负责融资中介和运行维护,租赁给用户使用	供电企业提供融资中介服务和换电设施运维服务	解决了换电设施建设融资问题,降低用户一次性支付压力,易于换电模式推广;但供电企业不参与市场运营,不利于获取市场主导权
代维代管	政府	政府负责投资、建设,供电企业负责管理运维,政府公益运营	供电企业提供换电设施维护和管理服务	供电企业无需承担换电设施投资、市场和运营等风险,对换电设施统一维护、管理和调度,对输电网有利;但是供电企业无法深入电动汽车市场及拓展电力价值链
	用户	用户负责投资、建设,供电企业负责运维管理,用户使用或运营		
委托第三方运营管理	供电企业	供电企业负责投资、建设,委托第三方专业机构运营、维护和管理	供电企业向第三方支付委托费用或者收益分成	供电企业对第三方专业机构的资质和能力要求较高,换电设施运营、维护和管理不善易给电网企业造成损失

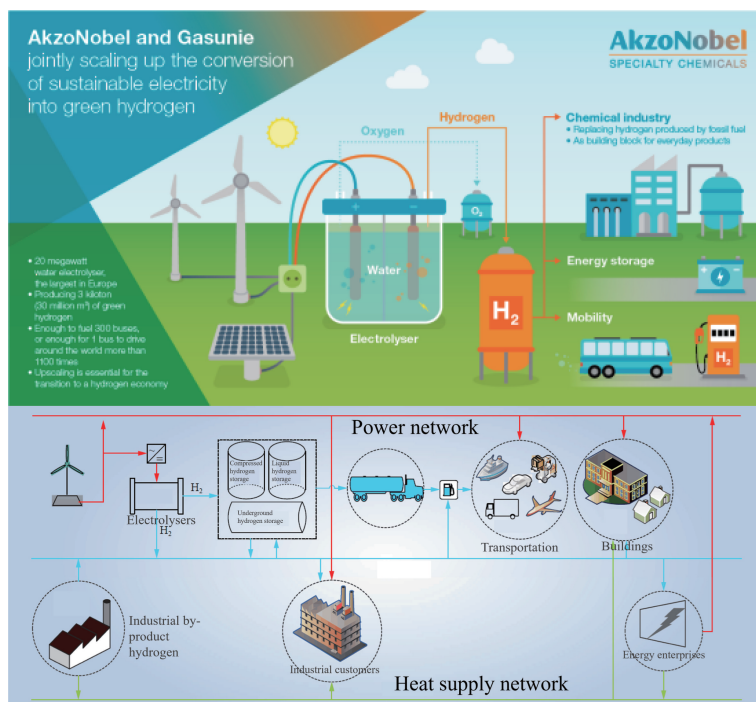
续表

运营方式	所有权归属	建设、运营方式	盈利方式	优劣势分析
承包加盟	供电企业	供电企业负责投资、建设、运维、管理,采用内部承包和社会加盟的形式拓展业务网络	供电企业收取承包加盟费	吸引企业内部员工、社会团体和个人承包加盟并运营换电设施,易于短期内完善换电服务网络;但增加了供电企业对承包加盟商的管理难度和运营管理成本
合作运营	供电企业 在内的多方	多方共同投资、建设、运营、维护、管理,充分整合各方资源	合作共赢	共同投资、共同参与,各方资源得到有机整合,可以实现电动汽车产业链良性运转和市场快速发展;但对供电企业自身战略决策和市场主导权产生较大约束

5 氢 能

在新能源领域,除了最为常见的电能,不得不提及的便是氢能。氢能是一种清洁的二次能源,作为 21 世纪的“终极能源”,具有能量密度大、燃烧热值高、来源广、可储存、可再生、可发电可燃烧、零污染、零碳排放等优点。而氢能的应用上,除了直接作为燃料燃烧外,燃料电池是高效利用氢能的最佳方式。以氢燃料电池驱动的汽车,将具有与燃油汽车相当甚至更长的续航里程,而燃料补充时间也可与燃油车比肩。因此,在政策和财政的双重支持下,加快推进可再生能源制氢、氢储能、氢能利用等关键技术协同研究,以使氢能产业逐渐成长为低碳路线的主力军(图 9)^[41, 42]。

不过,由于氢能发展尚不成熟,面临较多问题(制氢、储氢、燃料电池催化剂都面临重大挑战,成本居高不下),但是随着光伏等新能源电力成本持续降低,电解水将成为高纯度氢气的重要来源,所以氢能可以作为纯电新能源体系的补充,也可作为储能介质以充分消纳弃光、弃风、弃水电量。同时推进制氢催化剂、储氢材料和燃料电池催化剂等氢能关键基础材料以及氢能汽车技术开发,将刺激新能源上下游基础研究与产业应用快速进步,配合纯电模式加速新能源产业链的发展与完善。例如,重点推进与间歇性、波动性的可再生能源发电高度适应和匹配的电解制氢系统技术应用;开发资源丰富、成本低廉的催化剂,解决绿色氢能制取依赖稀贵金属的困境;突破超大型质子交换膜电解堆集成技术和高密度

图 9 氢综合能源系统^[41, 42]Fig. 9 Illustration of the hydrogen energy system^[41, 42]

高安全固态储氢技术, 消除绿色氢能制储瓶颈, 奠定绿氢平价供应基础; 同步推进质子交换膜燃料电池和固态氧化物燃料电池等为代表的氢能应用终端技术, 构筑车

载氢能和分布式氢能的应用模式, 为新能源产业从“电驱动”向“氢驱动”转变奠定基础, 从而打通新能源“源-储-荷”全产业链(图10)。

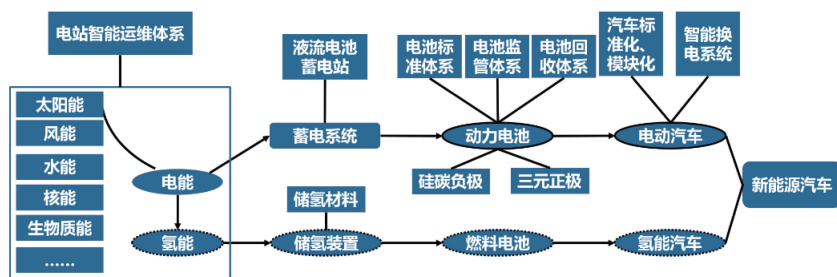


图10 发电-储能-新能源汽车的新能源产业链

Fig. 10 The new energy chain along power generation-energy storage- new energy vehicles

6 展望

围绕新能源产业链生态体系构建的主题, 以新能源汽车(特别是电动汽车)上下游产业为例, 阐述了能源供应、储能系统、车辆制造、充电模式等纯电驱动生态系统各个环节的构建问题, 简述氢能作为当下纯电系统的补充, 将逐步完善和推广新能源产业应用, 最终希望打造“能源-储能-应用”协调发展的、独立于传统能源的生态体系, 改变社会能源消费结构转型, 减少化石能源消耗, 使我国逐渐摆脱能源依赖进口的局面, 保障国家能源战略安全, 助力实现“碳达峰、碳中和”战略目标。

参考文献 References

- [1] JABER A A, AKIMOTO K, ARENT D, *et al.* Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector [R]. International Energy Agency, 2021: 20.
- [2] ZENG M, LI C, ZHOU L. Renewable and Sustainable Energy Reviews [J], 2013, 20: 36-44.
- [3] WU G, ZENG M, PENG L, *et al.* Renewable and Sustainable Energy Reviews [J], 2016, 53: 885-896.
- [4] 中国政府网. 国务院新闻办就 2023 年全年进出口情况举行发布会 [EB/OL]. (2024-01-12) [2024-02-15]. https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6925703.htm. Chinese Government. The Information Office of The State Council held a press conference on imports and exports in 2023 [EB/OL]. (2024-01-12) [2024-02-15]. https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6925703.htm.
- [5] CAMERA F L. World Energy Transitions Outlook: 1.5 °C Pathway (Preview) [R]. International Renewable Energy Agency, 2021: 14.
- [6] 西藏自治区人民政府办公厅. 关于进一步优化调整全区上网电价和销售电价引导降低社会用电成本的通知 [EB/OL]. (2023-11-29) [2024-02-17]. https://www.xzzwfw.gov.cn/xz/zwgk/xxfb/zbwj/202311/t20231129_391193.html.

Tibet Government. Notice on Further Optimizing and Adjusting the Price on-grid and on-sale Electricity in Tibet to Guide the Reduction of Electricity Costs [EB/OL]. (2023-11-29) [2024-02-17]. https://www.xzzwfw.gov.cn/xz/zwgk/xxfb/zbwj/202311/t20231129_391193.html.

- [7] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications [J], 2015, 23(1): 1-9.
- [8] 赵奇志. 西部交通科技: 道路工程 [J], 2006, 5: 50-53. ZHAO Q. Western China Communications Science & Technology: Highway Engineering [J], 2006, 5: 50-53.
- [9] 电脑报. 光伏高速公路看起来很好看, 但这三个问题你可能要多考虑一下 [EB/OL]. (2018-01-12) [2022-09-13]. <http://www.icpcw.com/Information/Tech/News/3306/330661.htm>. Computer Newspaper. The Photovoltaic Highway Looks Wonderful, While Three Questions Need to Consider [EB/OL]. (2018-01-12) [2022-09-13]. <http://www.icpcw.com/Information/Tech/News/3306/330661.htm>.
- [10] HADJIPASCHALIS I, POULLIKKAS A, EFTHIMIOU V. Renewable and Sustainable Energy Reviews [J], 2009, 13(6): 1513-1522.
- [11] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, *et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics [J], 2010, 57(12): 3881-3895.
- [12] HILL C A, SUCH M C, CHEN D, *et al.* IEEE Transactions on Smart Grid [J], 2012, 3(2): 850-857.
- [13] ALOTTO P, GUARNIERI M, MORO F. Renewable and Sustainable Energy Reviews [J], 2014, 29: 325-335.
- [14] WANG K, JIANG K, CHUNG B, *et al.* Nature [J], 2014, 514: 348-350.
- [15] 杨晓红. 都在期待电池技术突破, 听麻省理工电化学专家 Donald Sadoway 怎么说 [EB/OL]. (2018-01-30) [2022-09-13]. <https://www.d1ev.com/news/jishu/61890>. Breakthroughs in Battery Technologies are Highly Looked Forward, and What is the Opinion of Donald Sadoway, the Electrochemical Expert from MIT [EB/OL]. (2018-01-30) [2022-09-13]. <https://www.d1ev.com/news/jishu/61890>.
- [16] AMBRI. Ambri's Liquid Metal Battery Technology [EB/OL]. (2019)

- [2022-09-13]. <http://www.ambri.com/technology/>.
- [17] MA Z, JIANG J, WEN F, *et al.* Automation of Electric Power Systems [J], 2014, 38(3): 106-117.
- [18] YU H J, ZHANG T Z, YUAN J, *et al.* Advanced Materials Research [J], 2013, 610-613: 2170-2173.
- [19] OMAR N, DAOWD M, HEGAZY O, *et al.* Energies [J], 2012, 5(1): 138-156.
- [20] 新能源汽车产业发展规划(2021-2035 年) [R]. 国务院办公厅, 2020.
- Interpretation of the New Energy Vehicle Industry Plan 2021-2035 [R]. General Office of the State Council of the Peoples Republic of China, 2020.
- [21] 节能与新能源汽车技术路线图(2.0 版) [R]. 中国汽车工程学会, 2020.
- Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles 2.0 [R]. China Society of Automotive Engineers, 2020.
- [22] EDSTRÖM K, DOMINKO R, FICHTNER M. Battery 2030+ Roadmap [R]. European Union, 2020.
- [23] US National blueprint for lithium batteries 2021-2030 [R]. U.S. Department of Energy, 2021.
- [24] CAMERA F L. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 (2019 Edition) [R]. International Renewable Energy Agency, 2019.
- [25] 中国制造 2025 [R]. 国务院, 2015.
- Made in China 2025 [R]. The State Council of the Peoples Republic of China, 2015.
- [26] ASHURI M, HE Q, SHAW L L. Nanoscale [J], 2016, 8(1): 74-103.
- [27] FERGUS J W. Journal of Power Sources [J], 2010, 195(4): 939-954.
- [28] NITTA N, WU F, LEE J T, *et al.* Materials Today [J], 2015, 18(5): 252-264.
- [29] 袁健聪, 敖翀, 拜俊飞, 等. 单晶三元正极材料龙头, 钠电业务静待花开 [R]. 中信证券, 2022.
- YUAN J C, AO C, BAI J F, *et al.* Leading Enterprises of Single-Crystal Ternary Cathode Materials are Waiting for the Initiation of Sodium-ion Battery Industries [R]. CITIC Securities, 2022.
- [30] AYOB A, MAHMOOD WMFW, MOHAMED A, *et al.* Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology [J], 2014, 7(2): 364-373.
- [31] Boston-Power. Boston-Power Lithium-Ion Battery Solutions [C]. Toronto: Proceedings of the Benchmark World Tour, 2017.
- [32] CHENG K W E, DIVAKAR B, WU H, *et al.* IEEE Transactions on Vehicular Technology [J], 2010, 60(1): 76-88.
- [33] RAHIMI-EICHI H, OJHA U, BARONTI F, *et al.* IEEE Industrial Electronics Magazine [J], 2013, 7(2): 4-16.
- [34] LIAN Z, SHI X, KE X, *et al.* Power System Protection and Control [J], 2014, 42(12): 137-142.
- [35] LIN J, ZHOU W, WOLFSON O. Transportation Research Procedia [J], 2016, 12: 508-521.
- [36] CHENG L, CHANG Y, LIN J, *et al.* IEEE Transactions on Sustainable Energy [J], 2013, 4(4): 1034-1042.
- [37] BROWN S, PYKE D, STEENHOF P. Energy Policy [J], 2010, 38(7): 3797-3806.
- [38] GAFFOGLIO E O, CLARKE A, BROWN M L. Battery Swapping System and Techniques: CA20160107619 [P]. 2019-12-24 [2022-09-13].
- [39] 蔚来汽车官网. 大定用户免费换电权益调整方案 [EB/OL]. (2020-10-10) [2022-09-13]. https://app.nio.com/content/2095881625?load_js_bridge=true&show_navigator=false&content_type=article.
- NIO Auto. Adjustment of Free Battery Exchange Rights for High-Intention Customers [EB/OL]. (2020-10-10) [2022-09-13]. https://app.nio.com/content/2095881625?load_js_bridge=true&show_navigator=false&content_type=article.
- [40] LING Y, WANG M, SHE G, *et al.* Jiangsu Electrical Engineering [J], 2015, 34(3): 19-24.
- [41] Green-Car-Congress. AkzoNobel and Gasunie Investigating Large-Scale Production of Green Hydrogen: 20 MW Facility for 3000 tons Per Year [EB/OL]. (2018-01-09) [2022-09-13]. <https://www.greencar-congress.com/2018/01/20180109-akzo.html>.
- [42] 蒋东方, 贾跃龙, 鲁强, 等. 中国电力 [J], 2020, 53(5): 135-142.
- JIANG D F, JIA Y L, LU Q, *et al.* Electric Power [J], 2020, 53(5): 135-142.

(编辑 张雨明)