



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



中德能源与能效合作

Energiepartnerschaft

DEUTSCHLAND - CHINA

中德能源转型研究项目

创新型分布式发电与储能

德国与欧洲的经验及对中国的展望



dena
德国能源署

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

版本信息

《创新型分布式发电与储能》报告介绍了能源转型对于创新技术的需求和政策在推动创新方面起到的关键作用以及中国在清洁能源创新方面的潜在角色。该报告在中德能源转型研究项目框架内发布，项目受德国联邦经济和气候保护部(BMWK)委托，在中国国家能源局(NEA)的支持下，致力于在中德两国在低碳能源政策的深入交流合作。作为中德能源与能效合作伙伴的一部分，项目结合德国能源转型的优秀实践经验及遇到的问题和挑战，为中国能源领域的政治决策者和能源政策研究相关的智库提供政策领域的参考建议。德国国际合作机构(GIZ)、德国智库 Agora 能源转型论坛和德国能源署(dena)受 BMWK 委托，与中方相关合作伙伴共同实施该项目。作为一家德国联邦企业，德国国际合作机构为德国政府实现可持续发展国际合作目标提供相应支持。

发布方

中德能源转型研究项目
受德国联邦经济和气候保护部 (BMWK) 的委托
北京市朝阳区亮马河南街 14 号
塔园外交办公大楼 1-15, 邮编 100600
德国国际合作机构 (GIZ)

Torsten Fritsche
Köthener Str.2
Berlin 10963

项目管理

Christoph Both
德国国际合作机构 (GIZ)

作者

蒂姆·门纳尔 (TIM MENNEL)
利昂·波德尔 (LEON PODEHL)
珀西·舒尔茨-布希霍夫 (PERCY SCHULZE -
BUSCHHOFF)
丽莎·斯特普真 (LISA STRIPPCHEN)
威克托瑞亚·威腾 (WIKTORIA WITAN)

设计

edelman.ergo (受德国联邦经济与气候保护部委托)

图片

德国联邦经济和气候保护部/封面

© 北京, 2023 年 1 月

本报告全文受版权保护。截至本研究报告发布前，德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。本文件中的观点陈述不代表委托方的意见。对于图例是否最新、正确或者完整，以及由其使用造成的任何直接或间接损害，德国国际合作机构概不承担任何责任。

目录

1	概要：能源转型离不开创新型分布式发电	4
2	分布式发电、分散式灵活性以及对创新的需求	5
2.1	分散式发电和分散式灵活性的角色	5
2.2	对创新的需求和现有技术的成本下降	6
2.3	政府和创新中的角色	7
2.4	欧盟和德国的研发政策	7
2.5	与中国的相关性	9
3	创新型发电技术——超越传统光伏	11
3.1	创新型分布式发电技术的概况	11
3.2	中国的潜在角色	12
4	创新型储能——超越锂离子电池	13
4.1	创新技术的概况	13
4.2	中国的潜在角色	15
5	结论：创新对分布式发电的未来至关重要	16
6	附录：创新储能技术的概况介绍	17
6.1	电能储存	17
6.2	热能储存	22
6.3	机械能储存	23
6.4	化学能储存	25

1 概要：能源转型离不开创新型分布式发电

要实现《巴黎协定》设定的减排目标，就必须扩大可再生能源的利用规模，包括在配电网层面上（分布式发电）对可再生能源的利用。实际上，分布式发电资产——尤其是光伏——近年来在中德两国都变得更加重要，以后也势必会取得进一步增长。大多数此类发电技术都会造成馈入量的可变性，因此要将这种资产整合到系统中并确保整体的供应安全性，不论是输电系统运营商还是配电系统运营商，都必须采取专门的措施，以应对由这种可变性引起的挑战。除了电网扩张外，激发灵活性也很重要，即出于市场及电网目的，使用电力储能技术（主要是电池）和需求侧管理（DSM）。尽管目前分布式发电和灵活性技术已经存在，但进一步的技术创新仍然至关重要，其原因有二：首先，光伏和电池等技术的成本下降将有助于提升能源转型的成本效率，使这种技术在工业化及非工业化经济体中的应用变得可行。其次，创新的技术有可能解决现有技术的多项挑战，例如过度的土地使用、制造中的环境污染以及能源效率低下。

要推动创新，政府就要推行创新政策。欧盟和德国都在能源转型技术领域，启动了支持研究与开发的全面计划，涵盖了发电、灵活性和电网管理。此外，德国有一个能源研究机构的网络，涵盖了从基础研究到产业研究的整个研究领域。目前，中国是光伏设备的主要生产国，也在电池生产领域进行了投资。中国在这些领域的创新取得过令人瞩目的成绩。但是，考虑到分布式发电的挑战及其对碳中和未来的重要性，建议中国扩大关注点，将新的发电、储能和 IT 技术也纳入到创新工作的范围内。尤其是，要实现雄心勃勃的全球减排目标，能源转型就需要摒弃了稀有原材料的电池技术，藉此满足未来的全球需求。未来的系统运行应基于可以控制负荷与发电的新型软件。除了实验室研发之外，通过部署新资产，往往也会带来技术的进步（实践中学习）。中国宜在分布式发电和分布式储能领域推行创新技术，依赖现有能力，不断谋求技术改进。

2 分布式发电、分散式灵活性以及对创新的需求

目前，在德国分布式可再生能源在可再生能源的总装机容量中占比巨大。光伏技术尤其重要。因为发电量的波动性，系统需要更多的灵活性，才能确保电力供应的稳定。一个重要的灵活性选项是使用储能设备。尽管在配电层面上已经存在各种储能技术，但推动创新可能有助于解决当前问题，进一步降低成本，加速能源转型。过去二十多年间，中国系统层面的可再生能源发电容量取得了突飞猛进的增长。但是，分布式发电仍有巨大的潜力有待挖掘。创新有助于推动分布式发电的应用，可帮助中国实现其减排目标。

2.1 分布式发电和分散式灵活性的角色ⁱ

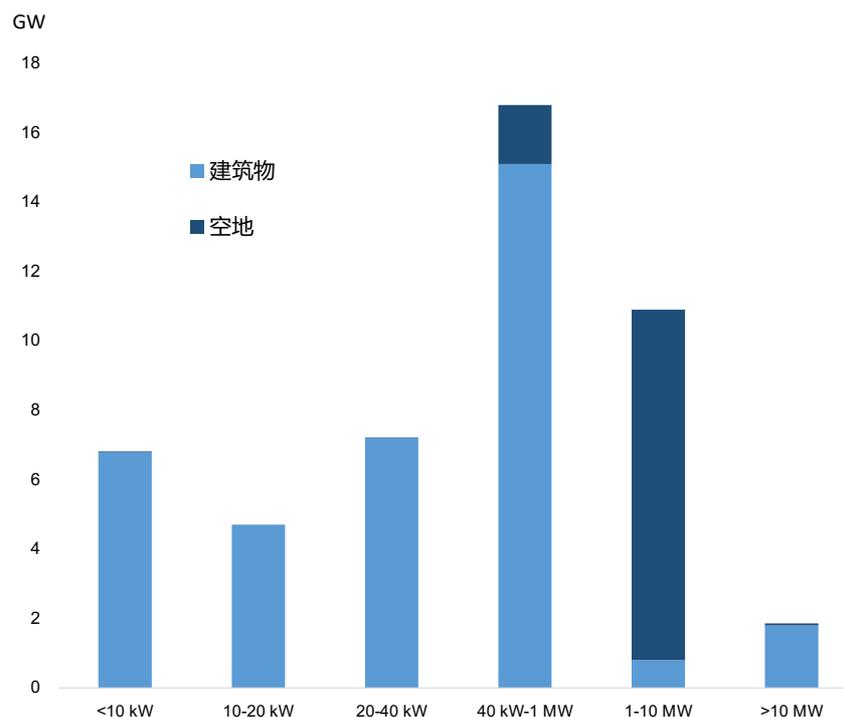
德国致力于在 2045 年之前实现气候中和。在电力系统中，联邦政府的目标是在 2030 年之前，实现可再生能源（RES）占比 80% 的目标。目前，风电和光伏是在电力系统中占主导地位的可再生能源技术。要实现 2030 年目标，就必须进一步扩大这两类技术的部署规模。具体来说，政府计划在 2030 年之前实现 215 吉瓦光伏、30 吉瓦海上风电以及 115 吉瓦陆上风电的装机容量。

截至 2021，德国已经实现了 138 吉瓦的可再生能源装机容量：64 吉瓦的陆上及海上风电和 59 吉瓦的光伏。2022 年上半年，可再生能源在发电中的总计占比大约为 51%。ⁱⁱ

目前，在可再生能源发电领域，分布式可再生能源设施占到了很大的比例，其中又以光伏为主导。最常见的应用是屋顶光伏系统和空地光伏。2019 年，德国安装了大约 200 万套系统。容量低于 10 千瓦的光伏系统贡献了大约 7 吉瓦的总装机容量。容量低于 1 兆瓦的小型光伏系统在总装机容量中占到大约 60%。空地光伏系统仅在小规模光伏的装机容量中占到一小部分，如图 1 所示。

在未来的低碳供电系统中，分布式发电将发挥更加重要的作用。现如今，产消者已经开始在发电所在地直接消费电力。

图 1：2019 年的光伏发电装机容量ⁱⁱⁱ



2.3 政府在创新中的角色

创新自上世纪九十年代能源转型刚开始时就是推动转型的重要支柱。目前，推动电力部门能源转型的两项主要技术就是基于风能和太阳辐射的技术。这两项技术能实现在不少国家的经济性部署得益于此前的诸多创新成果。过去几百年间，风电的应用一直在发展进步：历史研究表明，古代的埃及和中国是最早使用风能为各种机械提供动力的国家。在中世纪，人们建造风车作为一种研磨谷物的农具，而风车也成为沿海地区的一道风景线，例如在荷兰。19 世纪末，苏格兰、丹麦和美国几乎同步发明了用于发电的风车。在电气化的早期阶段以及中期阶段的大部分时间里，风车都是一项利基技术，主要应用于尚未接入电网系统的地区。但是，多个国家仍在持续推进创新研究。在经历了 1970 年代的能源危机之后，德国联邦政府于 1979 年决定委托建造一个风电试点项目，以期改进现有技术，实现其在电力系统中的部署。当时的电力系统还是以褐煤、硬煤和核能为主。德国在北海附近建造了风力涡轮机 GROWIAN。此涡轮机额定功率 3,000 千瓦峰、涡轮机室高为 100 米，于 1983 年投入运行，是当时规模最大的涡轮机。尽管此项目是政府赞助的研发项目的绝佳范例，但它在产量及可靠性方面并未达到预期。因此，直到 1991 年，当法律允许商业开发商将其风车接入网络以换取固定电价之后，这种技术才开始具有技术可行性，成为经济性越来越高的电力来源。从 2010 年到 2020 年的这十年间，国际可再生能源署报告称陆上风电的成本平均下降了 40%，海上风电下降了 29%，且未来还有进一步下降的潜力。

风电的历史发展反映了创新经济学中使用的两个范式：基于政府资助之研发、旨在改进技术的创新；和通过在实践中学习实现的技术创新，即通过应用不断完善。经济学家说明私营部门在创新方面的投资往往是不够的，因为创新者即使研发出了新的产品或者生产技术，它们也无法获得其全部效益。未承担创新成本的模仿者很快就会攫取市场份额。因此，政府通过建立技术研究所或者通过向产业实验室提供研究补助的方式，支持创新活动。可再生能源领域的 GROWIAN 项目就是一个例子。但是，有些创新是在技术的常规应用过程中，通过相关的逐步完善最终实现的结果，并不是由研究实验室的创新促成的突飞猛进式的发展（“在实践中学习”范

式）。尤其是，随着时间的发展，这些创新可能导致成本的大幅下降。此外，生产设施的规模扩张以及需求的增长也可能导致成本的下降。这说明政府赞助的新技术扶持计划确实应着眼于技术的部署，而非研发。2000 年《可再生能源法》（EEG）的上网电价计划是这种政府干预的一个范例。^x人们普遍认为，此计划在过去二十年间促成了风电和光伏发电技术的大幅成本下降。^{xi}目前，德国的风电和光伏发电被认为是已经发展到了市场成熟期。因此，未来几年间，扶持机制可能会被淘汰。

2.4 欧盟和德国的研发政策

德国和欧盟的政策制定者认可创新对能源转型以及更笼统的经济发展的的重要性。因此，它们落实了多项旨在支持研发与创新的政府资助计划。

对欧盟来说，研发是一个重要的政策领域。著名的“欧洲地平线”框架计划在 2021 年到 2027 年的总预算为 955 亿欧元，这笔资金将以招投标的形式，分配给欧盟境内由超国家团队组织的研究团体。为了推动能源转型研究，欧盟制定了欧洲战略能源技术计划（SET），根据欧盟的整体能源政策目标，协调国家研究工作，推动欧盟国家、公司和研究机构之间的合作。此计划确认了十项行动，涵盖从研究到市场开辟的整条创新链以及融资和监管框架。其中包括将可再生能源技术整合到能源系统中、降低技术成本、提高能源系统的韧性和安全性以及在全球电池行业和电动交通领域的竞争力。此计划有一个衡量关键绩效指标（KPIs）的整体治理结构，旨在实现合作伙伴之间的有效交互。其中囊括了 13 个欧洲战略能源技术计划工作组，这些工作组分别落实不同方面的行动，还有一个欧洲战略能源技术计划指导小组，由欧盟国家以及冰岛、挪威、瑞士和土耳其的高层代表构成。

欧盟还创建了欧洲技术与创新平台（ETIPs），让欧盟国家、工业及核心领域的研究人员参与其中，以此作为落实欧洲战略能源技术计划的进一步工具。欧洲技术与创新平台通过汇集资金、技能和研究设施，推动关键能源技术的市场开辟。尤其是，“欧洲技术与创新平台风电计划”和“欧洲技术与创新平台太阳能计划”推动这两种可再生能源技术的改进和系统集成。

图 3：欧盟欧洲战略能源技术计划的治理结构



在国家层面上，德国政府于 2006 年启动了第一项“高科技战略”，并对该战略进行了多次改进。最新的高科技战略^{xii}是 2018 年发布的 2 高科技战略 2025，旨在支持研究与创新。焦点领域是医疗保健、可持续性、气候保护与能源、交通、城乡区域、安全与保障以及经济与工作 4.0（行动领域一）。

战略中还包括培训和继续教育方面的投资以及社会参与（行动领域二）。在可持续性和气候保护领域，战略包括“现实世界实验室（Realworld Laboratories）”，以支持从研究到论证再到市场引入的转型。

图 4：德国高科技战略 2025



弗劳恩霍夫协会的能源研究

弗劳恩霍夫协会是德国的一个应用研究协会。弗劳恩霍夫协会创立于 1949 年，目前在德国范围内经营着 76 家机构和研究单位。其员工人数超过 30,000，以科学家和工程师为主，每年的研究预算为 29 亿欧元。弗劳恩霍夫协会的研究预算中有 25 亿欧元源自于受委托的合同性研究，其中大部分都是由德国工业界委托的。

弗劳恩霍夫协会有十个机构分布在德国的各个地区，从事能源研究工作，包括弗劳恩霍夫协会系统与创新研究所（ISI）、弗劳恩霍夫协会太阳能系统研究所（ISE）、弗劳恩霍夫协会风能系统研究所（IWES）和弗劳恩霍夫协会能源经济学和能源系统研究所（IEE）。其研究跨度广泛，从实验室研究到技术试点项目的管理，直到经济和技术模拟。

2020 年，弗劳恩霍夫协会创设了 ENIQ，一个位于柏林的能源平台，旨在协调不同机构之间的能源研究。

德国教育和研究部正在制定一项新的全面战略：未来的研究与创新战略。^{xiii} 此项战略经其他部门批准之后，将取代之前的高科技战略。在能源部门，当前草案的重点在于新技术的开发，例如二氧化碳清除（CDR）、作为教育主题的可持续性、国际科技合作、生物多样性的保护以及可持续农业的构建。

此项战略旨在为 2025 年之前的跨部门创新与研究合作奠定基础。此外，此项战略落实了衡量创新与研究发展的指标。例如，草案中提议了 3.5% 的 BIP 研发投入，并提出增加 2025 年之前研发的形成数量。此项战略也包括建立德国创新与技术转让署。欧盟和国际层面上的合作也具有非常重要的意义。

德国在科学、研究与开发领域拥有雄厚的实力。其大学院系中有大量的特别研究机构。德国的大专院校数量众多。德国最重要的公共研究机构包括非大学机构 弗劳恩霍夫协会（Fraunhofer-Gesellschaft）、亥姆霍兹德国研究中心协会、莱布尼茨协会、德国马克斯·普朗克学会机构以及承担研究任务的联邦机构。此处还应提及大量学术机构以及由联邦政府和城市资助的机构。

2.5 与中国的相关性

和德国与欧盟一样，中国也致力于推动能源转型。中国决心在 2030 年之前实现碳达峰，并在 2060 年之前实现碳中和。中国设定的目标是：在 2030 年之前，实现非化石燃料在一次能源消费中的占比达到大约 25%，并实现 1,200 吉瓦的太阳能发电和风电容量。根据中国的计划，到 2060 年，非化石

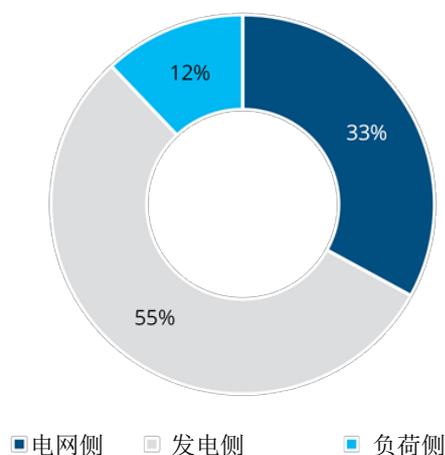
燃料在总能源消费量中的占比应该达到 80%。要实现这些远大目标，就必须大幅扩大可再生能源的规模，实现低碳技术的重大突破。

截至 2021 年底，中国的可再生能源装机容量达到 1,063 吉瓦，位居世界第一。仅去年一年，中国新增的风电和太阳能发电装机容量就与德国的总装机容量一样多。尤其是，中国目前正在大规模扩建太阳能发电设施（2021 年总新增容量的 31.1%）。^{xiv} 2021 年，中国连续第九年成为世界上光伏装机容量增量最大的国家。^{xv} 但和德国一样，具有波动性的可再生能源的数量一直在快速增长，中国要顺利地将这种能源整合到电力系统中是一项艰巨的挑战。因此，迫切需要更高水平的灵活性，以降低电网压力，确保供应安全性。

如我们在前一份分布式能源报告中所述，^{xvi} 自 2016 年起，中国分布式光伏发电的占比就开始逐步提高。^{xvii} 但是，截至目前，它在中国太阳能总装机容量中仅占到较小的比例。户用光伏依然是一个相对较新的理念，目前在中国的发展正在缓慢加速。直到目前，户用光伏的大部分增长都得益于中国的光伏扶贫计划，此计划的目的是推动分布式光伏在农村地区的使用。从 2017 年到 2021 年，中国屋顶光伏的总装机容量从 19.4 吉瓦增加到了 27.3 吉瓦。^{xviii}

2021 年底，中国电池储能的装机容量已超过 4 吉瓦。其中 1.2 吉瓦位于电网侧，剩余的大部分容量则位于发电厂内。

图 5：新型储能，按位置列示



来源：德国国际合作机构，2022^{xix}

中国会继续大力投资发展电池储能技术。根据中国电力规划设计总院（EPPEI）最新发布的一份报告，在“十四五”规划（2021 年到 2025 年的五年规划）期间，中国预计会在电网中并入 55 吉瓦的电池储能容量。^{xx}中国的目标是在 2030 年之前实现 100 吉瓦的储能容量。^{xxi}在用户侧储能方面，到目前为止，安全顾虑和经济考量限制了储能技术在中国的长足发展。

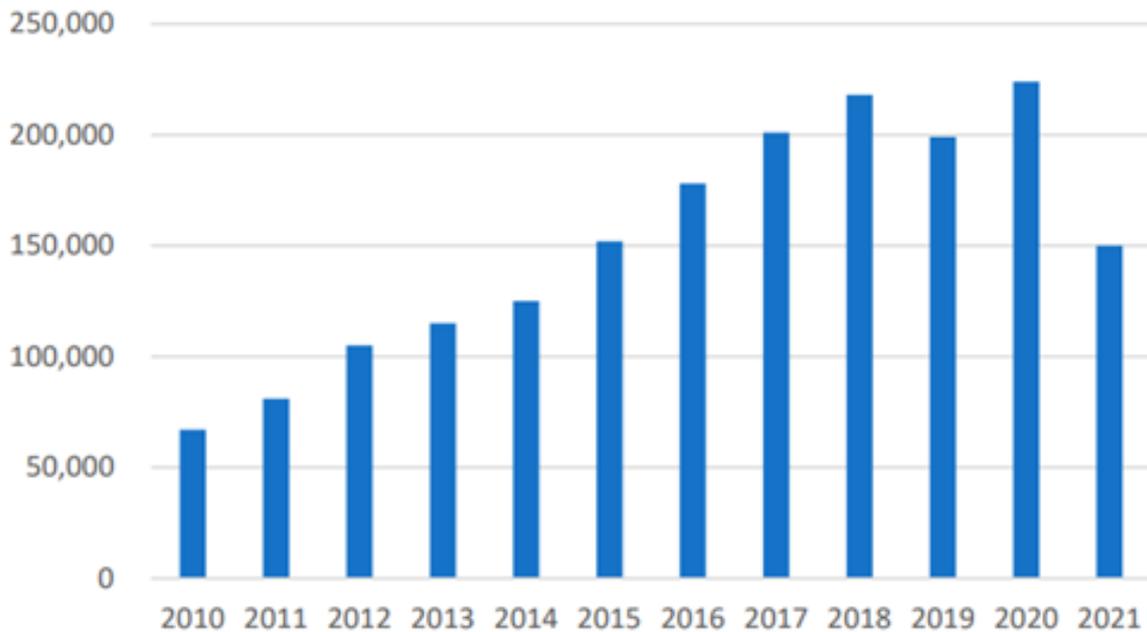
因此，此领域的创新，包括成本下降和安全改进，可能帮助中国更大规模地应用分布式能源技术，并藉此加速中国的能源转型。

过去二十年间，技术创新已成为中国发展的一个战略支柱。同时，中国也在多个关键能源技术领域处

于世界领先水平，包括光伏、风力涡轮机和电池储能技术。未来，大力推进创新（尤其是研发）预计依然会是中国政府工作的重中之重。^{xxii}这是中国当前“十四五”规划中最突出的主题之一，其中包括在 2025 年之前，研发经费投入年均增长大于 7% 的目标。在最近的中国共产党第二十次全国代表大会上，中国再一次重申了科技领域创新的远大目标。

尽管并非极其准确，但专利注册数量确实是衡量一个国家创新活动的一种方式。在此方面，中国无疑已发展成为可再生能源领域的重要创新贡献国。

图 6：中国绿色专利申请的数量（2010-2021）



来源：Wang 2022^{xxiii}

3 创新型发电技术——超越传统光伏

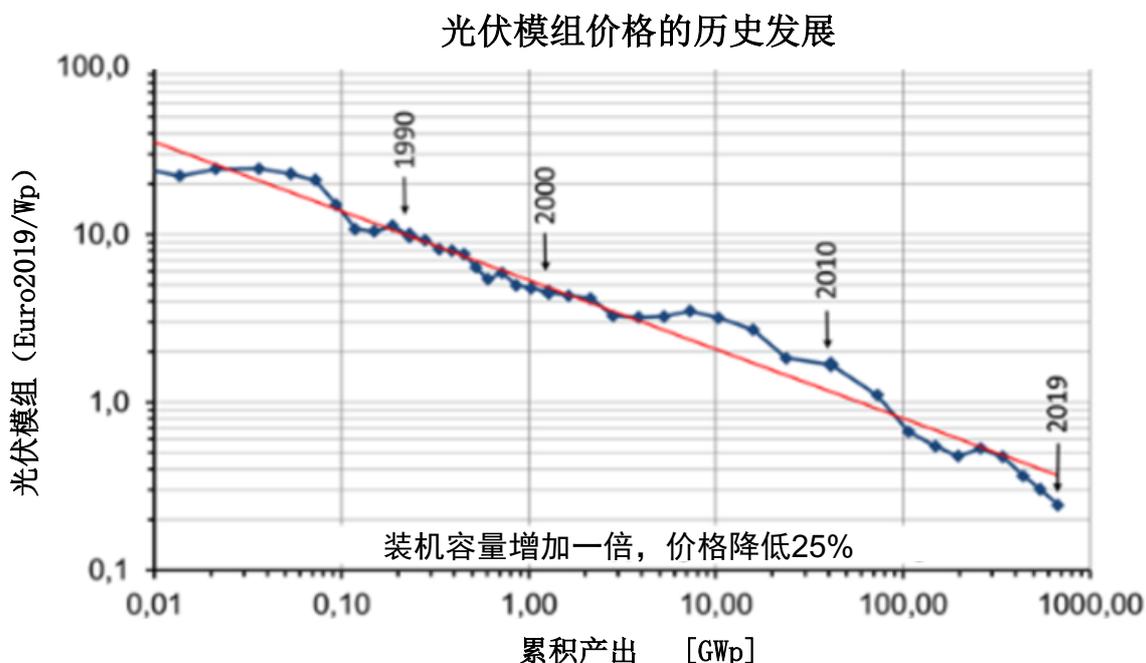
在发电技术领域，各种新技术目前都正在开发当中。发电技术的创新包括对大规模技术的改进，例如风电和太阳能发电等分布式发电资产，以及钙钛矿（Perovskite）太阳能板或者潮汐能等新型发电技术。这些新的解决方案可以提高效率，降低成本，解决传统可再生能源发电技术的问题。目前，中国在光伏模组制造领域处于世界领先地位，推动了技术的发展。扩大这种方式，将更多分布式发电技术囊括在内，将惠及中国市场以及全球市场。

3.1 创新型分布式发电技术的概况

通过各种创新型发电技术可以提高可再生能源发电量，而这些技术已经处于各种不同的开发阶段。这些创新型技术主要是风能和光伏的新应用，但也包

括其他技术，例如潮汐能或者联合解决方案。尤其是，因为过去几十年间涌现的新技术和创新，光伏的成本大幅下降，^{xxiv}如下图7所示。配电层面上也有其他可能从成本下降中受益的发电技术，例如小规模生物质。

图7：光伏模组价格的历史发展^{xxv}



创新发电技术的范例包括：

钙钛矿太阳能板是能够提高能效的创新性光伏电池。这种电池可能达到超过 20%的能效水平。

农业光伏实现了农业土地使用和光伏发电的联合使用。这种双用途提升了土地使用的效率，因此可能有助于降低土地使用冲突。德国在农业光伏方面拥有巨大潜力。其范围既包括特定作物和密集种植作物与专用光伏安装系统的配合种植，也包括使用土地进行大规模放牧，在光伏侧进行边际调整。

漂浮式光伏指的是在水面上漂浮的光伏板。水面的冷却效果也可使其发电量高于陆地光伏板。

建筑一体化光伏指的是将光伏模组集成到简直结构中。建筑物结构被额外用于近消费端的电力生产。

道路集成光伏是将太阳能模组集成到铁路或道路中及附近区域，尤其是高速公路。这种光伏可以采用屋顶或者隔音屏障的形式，或者置于铁路轨道之间。

天帆 (Skysails)^{xxvi}指的是约 200 到 400 米高度上的动力风筝。这种风筝以风能为动力，在风筝达到适当的高度后，风筝的绳索会拉动固定在地面上的卷扬机，再由卷扬机带动发电机，最终完成发电。

组合式屋顶光伏和风能^{xxvii}指的是光伏和风能的混合系统。这种系统小规模地存在于屋顶应用中。

潮汐水力发电^{xxviii}的工作方式与风力涡轮机类似。潮汐推动叶片转动，带动发电机的转子旋转。这种系统可以安装于有强劲潮汐流的海底。

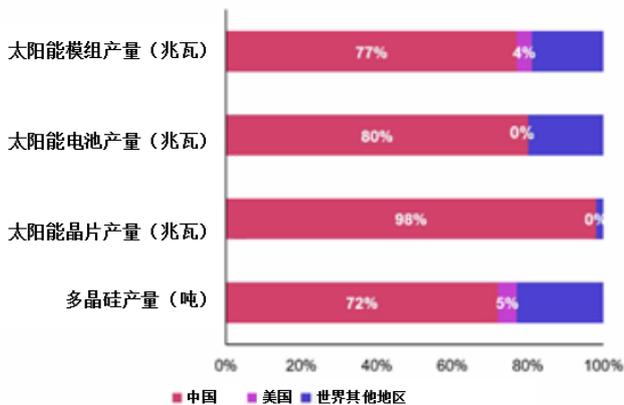
3.2 中国的潜在角色

在光伏制造领域，中国是无可辩驳的世界领军者。全球太阳能供应链完全依赖于中国：中国在太阳能板所有制造阶段（例如多晶硅、铸块、晶片、电池和模组）的全球占比都超过 80%，世界顶尖的光伏设备供应商中有 10 家位于中国。^{xxix}2021 年，中国出口太阳能板及其他设备的价值超过 280 亿美元。^{xxx}

最重要的是，中国在压低全球光伏成本方面发挥着十分重要的作用，对全球能源转型产生了巨大的影响。多年以来，中国也逐渐从纯粹的光伏技术制造商转变为前沿的创新者。多种因素促成了这种转变，包括中国特有的创建合资企业及公司伙伴关系的方式、巨大的国内市场、公司之间的技术竞争以及扶持性的政府政策和研究基础设施。^{xxxi}

图 8：太阳能组件产量，按国家列示

太阳能组件产量，按国家列示，在全球产量中的占比%，2020年



来源：能源部（2022）太阳能供应链报告

来源：能源部，2022^{xxxii}

过去十年间，中国已成为光伏电池和模组创新的主要来源，且其在全球专利申请中所占比例也在不断提高。自 2011 年起，在持续创新的帮助下，中国光伏生产的排放强度下降了一半。^{xxxiii}

“十四五”规划期间及之后，中国的政策制定者阐明其有意继续成为顶尖光伏生产国以及创新光伏技术的领军者。下一代的光伏设计已经成为中国政府实验室和大学的研究重点，越来越多的行业实验室也开始沿用相同的路径。^{xxxiv}

如上文所述，有多项分布式发电的创新技术未来可以作为光伏的补充。鉴于本国部署的巨大潜力以及

未来全球市场可能对这种技术的需求，建议中国拓宽其产业方法，包括在研发上的努力以及政策驱动的新技术推广，以顺着部署学习曲线改进这些技术。

范例：中国的光伏供应商

隆基绿能科技股份有限公司 2000 年创立于西安（陕西）的太阳能发电技术公司

2021 年，隆基绿能科技股份有限公司被称为世界顶尖的太阳能设备制造商。其产品组合包括创新型解决方案，例如漂浮式光伏或者农业光伏。隆基被认证为太阳能晶片、电池、模组及其他光伏解决方案的国家企业研发创新实验室。2021 年 12 月 31 日，公司的授权专利数量为 1,387 个，研发投入总额达到人民币 123.6 亿元。

公司的技术创新包括金刚石线晶片切割技术（给整个行业带来了至少每年 300 亿人民币的生产成本节约）、RCZ 硅晶体生长技术（特点是高速的硅生长、多装载及高充电容量）以及大规模 PERC 太阳能电池技术（解决了单晶硅产品的初始衰减问题，提高了电池效率）。最近，其 P 型异质结电池的效率（26.12%）创下了新的世界纪录。

隆基也为屋顶光伏扩容的推广起到了示范带头作用。隆基新近发布了一个微信小程序，用户可以通过这个小程序获得一站式屋顶太阳能发电服务，包括购电、安装、维护和负荷应用。

4 创新型储能——超越锂离子电池

储能可能为系统尤其是电网提供一系列灵活性服务。配电层面上最常见的类型是电池储能。尽管已有一系列小型电池和储能解决方案，但仍然需要创新以促进成本下降，提高能效，并解决资源可用性受限等现有问题在光伏方面，中国也建立起了重要的锂离子电池制造能力。未来，中国必须扩大其产业方法，以促进更多的创新储能技术的开发，为国内和出口使用。

表 1：不同类型蓄电技术的概况及其接入电网的情况

	配电电网			输电电网
	家庭/小企业	贸易和服务		工业
	微型储能 <100 千瓦	小型储能 1-10 兆瓦	中型储能 10-100 兆瓦	大型储能 100-1000 兆瓦
月				电转气
日/周			抽水蓄能	抽水蓄能 电转气
小时/天	电池	电池	抽水蓄能 压缩空气储能 电池	抽水蓄能 压缩空气储能
分钟/小时	电池	电池	电池	抽水蓄能 压缩空气储能
秒/分钟	超级电容器 线圈	飞轮发电机 电池	(抽水蓄能) (压缩空气储能) 电池	(抽水蓄能) (压缩空气储能)

来源：彭博新能源财经，2022

4.1 创新技术的概况

第 2 节解释了部署灵活性技术的根本原因。取决于储能类型，它们可以为电网提供不同的服务（参见报告“[分散式灵活性和可再生能源的整合](#)”了解具体信息）。^{xxxv}最重要的去中心化储能服务包括：

- 大型能源服务，包括套利和供电容量
- 辅助服务，包括黑启动和电压支持
- 消费者能源管理服务，包括电力质量和增加的光伏自用消费量

- 脱网，包括家用太阳能系统和微型电网服务^{xxxvi}
- 配电基础设施服务，包括配电升级延后和电压支持

尽管很多参与者都在探索创新型储能技术，但在德国，传统电池储能是最受欢迎的选择。随着成本的下降和产品选择的增加，德国的分布式储能系统在过去两年间取得了指数级增长。截至 2022 年，德国已经安装了超过 500,000 套光伏储能系统，总储能容量约为 4.4 吉瓦时，储能输出容量约为 2.5 吉瓦。^{xxxvii}这些储能系统可以通过增加自用消费比例、

减少峰值负荷及峰值太阳能发电馈入量，为分布式电力的整合做出巨大贡献。

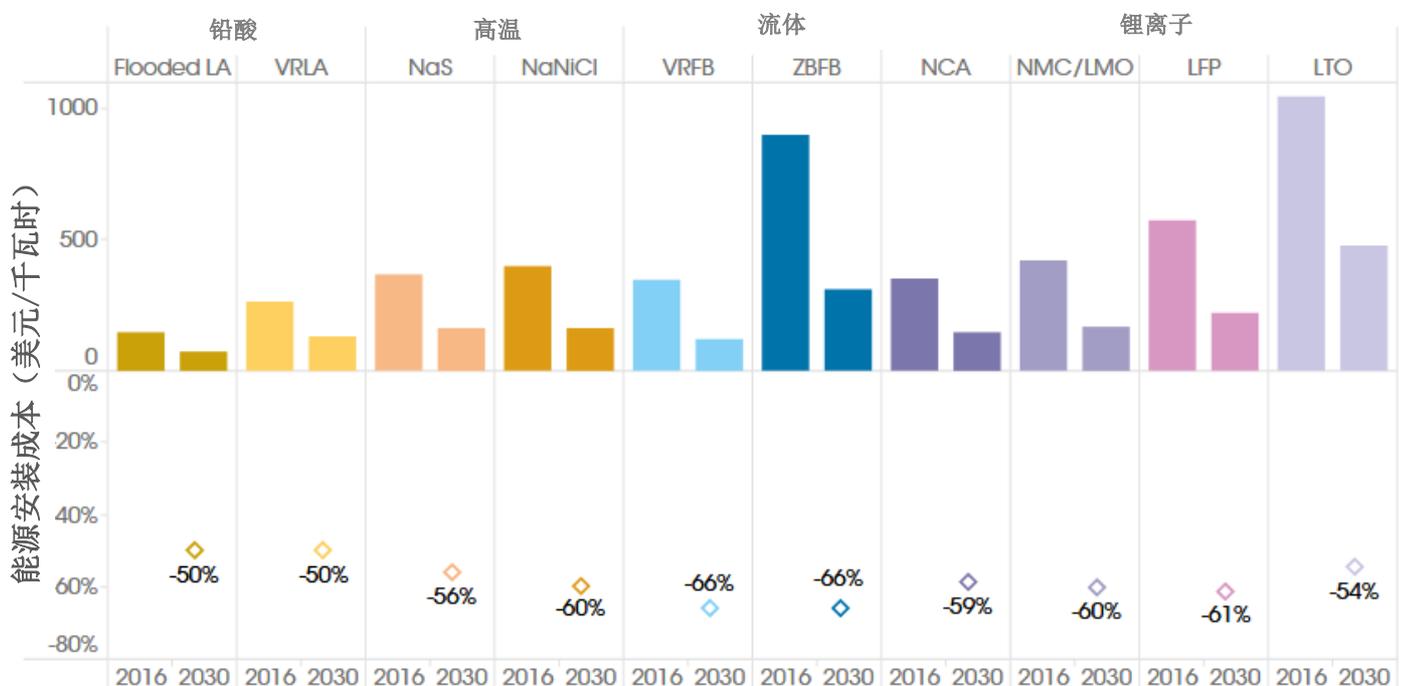
最常见的小型储能系统类型是电池。电池储能可持续数秒至数天。传统电池是锂离子电池、零排放电池、氧化还原液流电池、铅酸电池和钠硫电池。这些类型的电池都可以在市场上买到。镍镉蓄电池仍在使用之中，但欧盟法规禁止新的应用，只有少数例外。电池主要是能够提供较高的效率，但因为运行温度高，所以在安全风险方面存在一定的劣势。

目前，各种创新型解决方案都在开发当中。在2030年之前，新解决方案的潜在成本下降幅度至少为50%。不同技术的潜力各有不同（参见下图

9）。比如，2030年液流电池的成本相比2016年会下降66%。

此外，这些创新解决方案将有助于解决当前的挑战。挑战之一就是电池生产对能源和资源的需求。随着电池在电力系统中重要性的提高，电池生产的资源和能源需求也会提高。电池的生产具有高能源密集性。新的解决方案可以延长使用寿命，因此有助于降低能源需求。此外，传统电池离不开特定的有限原材料，例如锂。此外，铜、钴和镍等原材料具有各种环境影响，例如富营养化、人类毒性和生物毒性。

图 9：电池储能系统——已安装能源成本下降潜力^{xxxviii xxxix}



注：LA = 铅酸；VRLA = 阀控式密封铅酸；NaS = 钠硫电池；NaNiCl = 钠氯化镍；VRFB = 钒氧化还原电池；ZBFB = 锌溴液流电池；NCA = 镍钴铝；NMC/LMO = 镍锰钴氧化物/锂锰氧化物；LFP = 磷酸铁锂；LTO = 钛酸锂。

智能电网

为了充分发挥灵活性在电力网络中的潜力，需要智能电网。智能电网由通信媒介和智能电表等硬件构成，用以收集数据，实现组件之间的通信。智能电网也需要使用软件，包括设备与系统之间进行数据交换的通信程序。

智能电表领域也在进行研究，以期实现能效的提高，并改进电动汽车的双向充电等目的。研究包括针对硬件和软件两方面。强大的人工智能软件工具预计会在未来高比例可再生能源系统的匹配供需方面发挥重要作用。

当前的研发聚焦于现有锂离子电池的改进以及锂基电池的替代品。锂离子和未来的锂基电池被称为高能电池技术，因为它们具有高能源密度（电池单位重量中可以储存的能量数量）。值得在以下方面投资进行有针对性的研究——改进锂离子电池以外的已安装储能技术，探索具有固定应用潜力的替代技术。^{xlxi xlii} 了解与当前新电池技术创新与研究有关的更多信息，参见附录 6.1。

除了电池以外，还有其他前景可观的储能技术正处于不同的开发阶段。其中包括：

- 热储能，例如卡诺电池
- 重力储能，例如与风电设备配合使用
- 小型氢蓄能

附录 6.2 到 0 详细描述了这些技术。这些技术发展完善后，将在供电系统中发挥不同作用——重力储能可以提供辅助服务，热和氢储能可以提供发电/负荷转移。

4.2 中国的潜在角色

中国最新的“十四五”规划前所未有地强调了储能的发展。到目前为止，高成本一直是储能系统大规模发展的阻碍。因此，战略规划中提出的主要目标之一就是到 2025 年，实现单位储能成本下降 30%，以提高储能技术的成本竞争力。这将会让储能成本

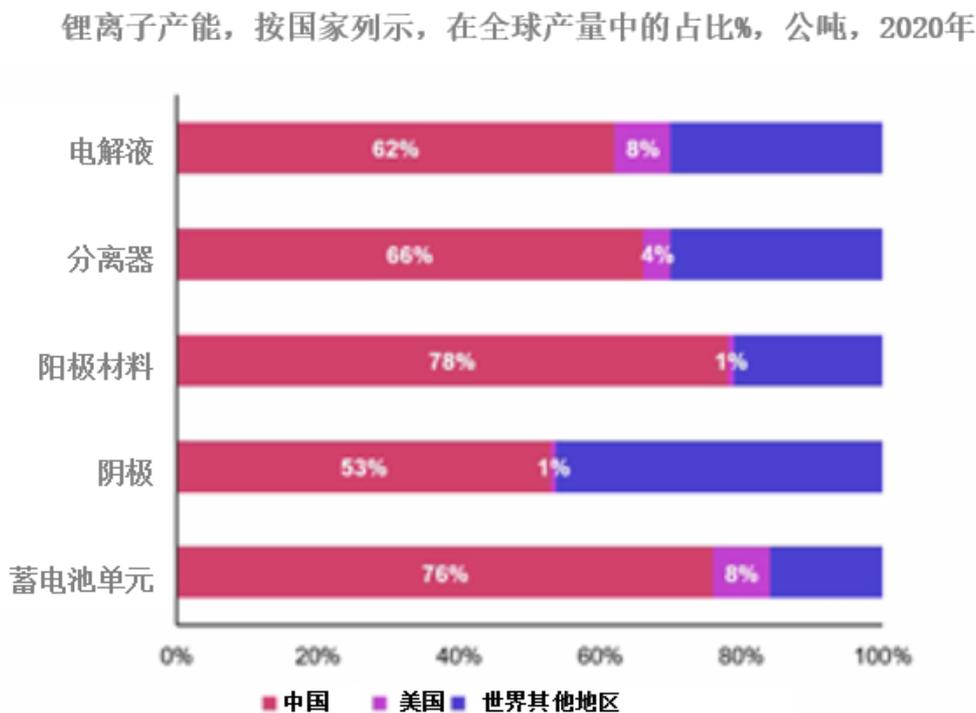
自 2025 年起大幅下降。根据规划，除抽水蓄能外的所有新型储能系统的商业化应该在 2030 年之前完成。延长储能系统的使用寿命是中国创新工作的另一个战略重点。2022 年 8 月，中国还成立了国家储能产业创新联盟，致力于推动储能行业的技术创新。^{xliii}

规划中的成本下降和技术创新不仅对中国碳中和目标的实现至关重要，也对储能行业在全球范围的竞争力和更广泛适应性具有巨大影响。

目前，全球锂电池供应严重依赖于中国。中国储能锂离子电池市场的价值达到 6000 亿人民币（830 亿欧元），电池的产能在 2021 年就达到 32 吉瓦时。^{xliv}根据彭博社（Bloomberg）的报告，全球 90% 左右的蓄电池产自中国。^{xlv}

在“十四五”规划期间，中国计划进一步推动各类电池储能系统的发展，包括钠离子、新型锂离子、铅炭和氧化还原液流。^{xlvi}

图 10：锂离子产能，按国家列示



来源：Bloomberg NEF (2021)，能源部 (2022) 太阳能供应链报告

来源：彭博新能源财经 (2021)，能源部 (2022) ^{xlvii}

在分布式发电技术方面，要满足能源转型的需求，只靠一种占主导地位的技术是不够的。为了满足自身的未来储能需求、开辟新的出口机会，中国应该

拓宽其在此领域的研发方式。鉴于《巴黎协定》提出了雄心勃勃的目标，技术和市场方面都可能具有广阔的前景。

5 结论：创新对分布式发电的未来至关重要

创新是能源转型的重要驱动力。光伏成本的快速下降以及——在较低程度上——风力发电技术促进了过去十年间这种技术应用的加速。必须通过更多的创新进一步降低转型成本，解决目前显而易见的多项挑战，包括原材料短缺、环境污染（碳排放除外）和空间规划顾虑。

这一点尤其适用于分布式发电和储能技术。很多基于情景的未来供电研究发现，这些分布式发电技术将在碳中和能源系统中发挥重要作用，用于满足本地需求。储能技术则需要用来适应与多种可再生能源相关的波动性馈入量。基于研发的推进和加速的学习曲线，光伏及锂离子电池等成熟技术的成本将进一步下降，从而降低在工业化国家的应用成本，促进技术在新兴的发展中国家的部署。

除了不断下降的成本以外，创新型发电和储能技术可以优化空间的使用，改进现有技术的毒害性，替代或者补充基于稀有原材料的其他技术。因此，它们有促进及加速分布式发电扩张的潜力。

范例包括：

- 钙钛矿太阳能板优化了空间的使用，因为它们可以附着于其他并未使用的表面，例如建筑物外立面或者用于围护财产的墙壁。
- 农业光伏板可在发电的同时，将土地用于农业生产目的。
- 氧化还原流电池使用的是钒等材料，与锂离子电池中广泛使用的锂相比，这种材料有更加广泛的原材料基础。
- 重力电池临时储存由提升质量产生的重力势能，即使用电网的过剩能量提升质量，之后将质量放下重新转化为电能。这种类型的储能避免了稀有和有毒材料的使用。

在创新方面，政府发挥着重要作用：经济学家提出因为溢出效应，行业的研发工作可能效率低下。在清洁能源技术方面，这一问题必然更加严重，清洁能源技术的市场性往往依赖于政府政策，即政府必须打造可促成这种技术发展及应用的监管环境。在欧洲，欧盟和德国都推行目标远大的研发政策，旨在形成有利于能源转型的创新。其中包括提供大笔的科研补助金。

在落实方面，德国的研究机构网络致力于支持能源转型，包括 10 家弗劳恩霍夫协会机构。但是，除研发以外，创新还包括多个阶段。支持创新技术部署的计划有助于推动技术的扩张和成本下降：十年前用于推广光伏及其他可再生能源技术的上网电价政策体现了这种影响。除了这种初期扶持以外，市场设计必须允许小规模可再生能源的馈入，允许将其整合到市场和电网中。同样的，储能的经济可行性也极大地依赖于监管选择，例如网络电价和辅助服务的设计，必须通过改进监管环境，充分发挥电池在能源转型中的潜力。很明确的一点是，新的创新技术极有可能离不开初期的扶持计划和市场网络的调整。

中国建立起了规模庞大且令人印象深刻的光伏和储能设备制造产业，为全球能源转型做出了重要贡献。此外，大量的专利证明了中国在此领域的研发中取得了值得称道的成就。在能源转型的这一阶段，中国宜拓宽其视野：通过投资研发前景可观的新技术，并完成其在本地的部署，能够提供更多可推动能源转型的重要技术，最终满足全球市场上不断增长的需求。除了研发工作以外，还应该对这种技术提供初步扶持，推动技术的上市。这种政策有助于实现《巴黎协定》中设定的远大的减排目标，包括在中国境内以及通过出口延伸到中国境外。

6 附录：创新储能技术的概况介绍

6.1 电化学储能

概况介绍 1：金属-氧气/空气电池

名称 金属-氧气/空气电池

基本信息	金属-氧气/空气电池利用空气中含有的氧气作为阴极“材料”。而在其阳极所使用的金属方面，存在不同的理念，例如锂、钠、锰、铝或锌。因为相对较高的电池电压以及较低的锂重量，锂-空气电池是研究的焦点。其瓶颈在于使用空气所造成的污染使其可逆性变得复杂。此外，锂阳极的稳定性损害了功率密度。 ^{xlviii}
技术就绪水平	要实现金属-空气电池的可逆性，必须在研发方面取得重大突破，很多组件都要形成颠覆性的解决方案。实验室锂-空气模型的功率密度低。必须大幅提高反应的动力学。 ^{xlix}
潜力	金属-氧气/空气电池的理论能量密度高，因为它对主体材料没有自重要求（理论上，锂-空气系统可以实现 3,450 瓦时/千克的能量密度）。因为无需使用昂贵的阳极材料，这种电池可能价格低廉。专家预计到 2030 年，锂-氧气电池的市场准入标准为大于 300 瓦时/千克和充放次数大于 500 次。 ⁱ
应用	所涉及反应的缓慢动力学使得金属-空气/氧气电池不太可能被用于车辆中。金属-空气/氧气电池一开始可能用作固定储能系统（ESS），因为 BMS、压缩器或者储氧器（锂-氧气）等附加设备不会产生负面影响。缺乏循环稳定性是将其作为固定储能系统尚存的顾虑。理念是可行的，因为它具有超高的储能容量和低循环率，与抽水蓄能的运行类似。 ⁱⁱ
试点项目	e-Zinc 公司将在美国德克萨斯州 Bull Creek 打造一个试点项目，使用锌-空气电池系统来储存过剩的风力发电容量。这是 e-Zinc 公司即将开展的实地示范项目之一，还有一个示范项目是 Zinc 公司与加利福尼亚州能源委员会合作开展的备用服务项目，此项目投入为 130 万美元。 ⁱⁱⁱ Form Energy 公司预计将在 2023 年之前，在明尼苏达州的公用事业机构 Great River Energy 试点安装一个 1 兆瓦/150 兆瓦时的锂-空气系统。 ⁱⁱⁱⁱ

概况介绍 2: 金属-硫电池

名称 金属-硫电池

基本信息	金属-硫电池利用了金属阳极和硫阴极的氧化还原电势。所考虑的最适宜的金属，按适宜程度排序，分别是锂（金属锂）、钠和锰。也存在使用硅/碳阳极的理念，这种材料可以实现充放电次数的增加。 ^{liv}
技术就绪水平	在各种金属-硫系统中，锂-硫的开发程度最高，已经进入测试阶段，小批量地作为技术原型使用。广泛的商业化尚未成形，技术开发仍处于应用研究领域。在实验室阶段，已存在充放电数千次的高循环性原型，而预商业化生产阶段的电池在能量密度为 350 瓦时/千克时实现了大约 100 次充放电。 ^{lv} 钠-硫电池作为一种具有熔融活性材料的高温变体在固定应用中已经使用了一段时间。出于安全原因，宜开发在室温下运行的系统，但目前仍然需要进行基础研究。 ^{lvi} 金属-硫可能受益于其他金属-硫化学的发展，但仍然需要进行广泛的研发。 ^{lvii}
潜力	锂-硫电池的长期愿景是实现超过 500 次的充放电次数、600 瓦时/千克或者 600 瓦时/升。钠-硫电池和锰-硫电池预计将从锂-硫电池的研究成果中受益，因此会沿用锂-硫电池的发展路径。对于钠-硫室温电池而言，2030 年之后的市场准入标准预计为 200 瓦时/千克。中期内，这种室温钠-硫电池可以达到 300 瓦时/千克以上，并低于 80 欧元/千瓦时；长期内，将达到 500 瓦时/千克以上，超过 500 次充放电。对锰-硫电池而言，长期愿景（2045 年以后）是 400 瓦时/千克，电池寿命为 15 到 20 年，充放电次数 1,000 次，低于 80 欧元/千瓦时。 ^{lviii}
应用	因其单位重量的高能量密度，锂-硫原型已被用于飞行领域。它也可用于汽车领域，但需要解决低功率密度和体积能量密度的问题。室温钠-硫和锰-硫电池主要用于固定储能领域，因其相对较低的体积能量密度和低预期成本。 ^{lix} 高温钠-硫系统的主要应用包括负荷调平、调整电网的供需不平衡、稳定可再生能源的整合以及提供备用电力。 ^{lx}
试点项目	Zeta Energy 从 Moore Strategic Ventures 投资公司筹集了 2300 万美元资金，用于其锂-硫（Li-S）电池系统的开发和商业化（2022）。 ^{lxi} 例如，日本工业陶瓷公司 NGK Insulators 的高温钠-硫电池系统已经被巴斯夫公司用于与风电制氢匹配（2020），并用于支持日本宇宙航空研究开发机构电力系统的稳定运行，或消减蒙古国一个 5 兆瓦光伏项目的波动性（2021）。 ^{lxii}

概况介绍 3：钠离子电池

名称 钠离子电池

基本信息	<p>工作原理与锂离子电池类似。通过使用有机溶剂或含水电解质，使钠离子在阴阳极之间穿梭。^{lxiii}</p> <ul style="list-style-type: none"> • 阳极材料：碳、锡 • 阳极材料：普鲁士蓝类似物、层状金属氧化物、钠（Na）超离子导体（NASICON） <p>钠基电池化学的一个重要方面是资源可用性高，和相比于锂更低的价格。</p>
技术就绪水平	<p>这项技术被视为具有相对较高的市场成熟度。</p> <p>欧洲汽车和工业电池制造商协会（EUROBAIT）预测的 2023 年性能参数为：回收利用率为 50%、日历寿命为 15 年、能量吞吐量为 4000 FCE、快速充电时间为 30 分钟、体积功率密度为 500 瓦/升、重力功率密度为 300 瓦/千克、体积能量密度为 310 瓦时/升、重力能量密度为 160 瓦时/千克。^{lxiv}</p>
潜力	<p>欧洲汽车和工业电池制造商协会（EUROBAIT）预测的 2030 年性能参数为：回收利用率为 90%、日历寿命为 30 年、能量吞吐量为 6,000 - 12,000 FCE、快速充电时间为 5 分钟、体积功率密度为 600-850 瓦/升、重力功率密度为 380-700 瓦/千克、体积能量密度为 350 - 700 瓦时/升、重力能量密度为 200 - 450 瓦时/千克。^{lxv}</p> <p>在商业化方面预计要投入相对较大的开发努力，但远低于其他后锂离子技术。其性能参数的长期发展被认为会与锂离子电池的发展相同，预计与锂离子电池的相应数值有 70% 以上的趋同性。可以使用现有的锂离子生产线，钠离子电池科技发展完善后，预计可以实现比锂离子电池更低的成本。在 2050 年之前，能实现 60 欧元/千瓦时的价格，如果锂变得稀有，其相比锂基系统的价格优势可达到 20%。^{lxvi}</p>
应用	<p>因为低价格及相对较低的能量密度，其应用主要集中于固定储能系统以及低成本消费领域。^{lxvii}</p>
试点项目	<p>悉尼水务公司（Sydney Water）的邦迪污水泵站（Bondi Sewage Pumping Station）采用了与可再生能源发电耦合的定制能源管理系统，“能源智能钠储能系统（S4）”项目通过内置的电池管理系统，将钠离子电池单元集成到 5 兆瓦时的模块中。^{lxviii}</p>

概况介绍 4: 氧化还原流电池

名称 氧化还原流电池

基本信息	氧化还原流电池（RFB）是基于使用离子渗透膜分隔的两种液体电解质。两个单独回路中存在的电解质彼此之间形成了电势，可以通过渗透膜的离子交换进行还原或氧化。钒基氧化还原流电池（VRFB）利用了不同价钒离子的稳定性。在阳极端，四价硫酸氧钒可能被氧化，而在阴极端 V（III），硫酸盐被还原。另一类钒基氧化还原流电池使用锌和溴（Zn/Br）的氧化还原反应。原则上，可以通过电解质（罐体）的体积和经由电解质和渗透膜接触区域的可用功率，改变系统中储存的能量。 ^{lxxix}
技术就绪水平	小规模上市，35 欧分/千瓦时的储能成本。 ^{lxx}
潜力	<p>未来几年：大规模市场准入，寿命周期 10 年（锌/溴）-15 年（钒基氧化还原流电池），能效 75%，储能成本 15 欧分/千瓦时^{lxxi}</p> <p>2030 年之后：寿命周期 15 年（锌/溴）-20 年（钒基氧化还原流电池），能效 85%，储能成本 5-10 欧分/千瓦时^{lxxii}</p>
应用	<p>应用不受空间和重量的限制，因为氧化还原流电池具有低能量密度。因其系统的可扩展性，可能应用于各种级别的固定储能（套利、EE 集成、黑启动、备用、微型电网、脱网运行等）^{lxxiii}：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 充电/放电时间：> 1 小时-1 周 • 功率：10 千瓦-20 兆瓦 • 能量：100 千瓦时 - 800 兆瓦时
试点项目	此技术已经应用于地方层面上的峰值负荷转移（时间）或者用作家庭储能。用于家庭储能的氧化还原流电池的生产商为 Schmid 和 Volterion 公司。 ^{lxxiv}

概况介绍 5：铅-碳蓄电池/铅碳电池

名称 铅-碳蓄电池/铅炭电池

基本信息	在铅碳电池中，铅碳结构的组合被用作阴极。其工作原理可描述为铅酸电池和不对称超级电容器的组合。电解质/碳双层电极中离子沉积的可能性使其充电速率高于传统的铅酸系统。铅和碳的混合防止了阴极的硫酸化，让电池能够在无均衡充电的情况下长期存放，且在更高的循环次数下可以进行更深层次的放电。当前可用电池的能量密度在 25 到 30 瓦时/千克之间，或 70 到 80 的寿命下大约 2,000 次充放电。相对而言，作为铅原材料受到的争议相对较小，而且可以通过铅酸电池的回收利用（回收率 > 95%）直接提取铅。天然石墨（阳极）的资源可用性与锂离子电池中锂的情况类似。 ^{lxxv}
技术就绪水平	市场就绪。 少数制造商已经在市场上出售铅碳电池。
潜力	性能优化，尤其是在阳极的碳量方面。在 2025 年可实现广泛的市场准入，价格为 90 欧元/千瓦时，能量密度超过 35 瓦时/千克。预计技术还会进一步优化，有性能参数的优化，但主要还是成本的下降，原则上，成本可以降至 50 欧元/千瓦时，低于锂离子电池的目标值。 ^{lxxvi}
应用	固定储能系统、频率调节、负荷调平、微混合 ^{lxxvii}
试点项目	Axion Power International 公司的铅炭电池看起来与传统的汽车电池类似，但它们提供 12 伏和 16 伏的版本，重量轻了大约 30%-35%。该公司将这种电池打造成 480 伏的电池架以及名为“PowerCube”的应用级蓄电器。这种系统的响应时间为 55 毫秒，被用于频率调节。 ^{lxxviii}

6.3 热储能

概况介绍 6: 卡诺 (Carnot) 电池

名称 卡诺电池

基本信息	卡诺电池 (CB) 的循环包括电转热和/或冷、热能储存 (TES) 和热力循环。卡诺电池还实现了在充和/或放电过程中加入热量流 (热集成), 以期改进电池的整体性能。卡诺电池领域提出的最突出的热动力循环为: 布雷顿泵送热能储存 (Brayton PTES)、兰金泵送热能储存 (Rankine PTES)、液态空气蓄能 (LAES)。 ^{lxxix}
技术就绪水平	知名的技术工艺和设备。
潜力	此技术可用于电网规模的储能, 因为卡诺电池采用了大储能容量的设计。卡诺电池的使用没有地理限制, 与其他电池相比, 它们提供了电热耦合的可能性。在卡诺电池中, 兰金泵送热能储存的能量转换效率最低, 仅为 61.6%, 平准化储能成本为 230 美元/兆瓦时左右。液态空气蓄能和布雷顿泵送热能储存类似, 能量转换效率分别为 52.8%和~48%, 平均平准化储能成本分别为 330 和 369 美元/兆瓦时。液态空气蓄能与外部工艺的集成可以改进系统能量转换效率, 大幅压低平准化储能成本。但是, 内部集成泵送热能储存的盈利性尚不明确, 因为专门针对工业流程废热回收而设计的理念与之形成了竞争。 ^{lxxx} 卡诺电池也有可能重复利用现有的兰金蒸汽循环, 以卡诺电池取代之之前由化石燃料供应的蒸汽循环, 从而逐步淘汰燃煤电厂。 ^{lxxxi}
应用	不论单独运行还是与煤、天然气、聚光式太阳能或者核电厂结合运行, 卡诺电池都能提供: 供电和热服务、可再生能源集成、电厂灵活性、套利、辅助服务、峰值调节和脱网运行。 ^{lxxxii} 卡诺电池也可以帮助避免电网阻塞及加强输电线路。 ^{lxxxiii}
试点项目	丹麦的埃斯比约市安装了 50 兆瓦时的二氧化碳热泵机组, 以取代中型区域供热设备。 ^{lxxxiv} Highview Power 项目正在西班牙的阿斯图里亚斯、坎塔布里亚、卡斯蒂利亚--莱昂自治区和加那利群岛开发七个 50 兆瓦/300 兆瓦时的液态空气蓄能系统。 ^{lxxxv} 西门子歌美飒公司已分别于 2014 年和 2019 年, 在汉堡建造了两个兰金泵送热能储存试验工厂。试验工厂利用难以驾驭的供热气体作为传热流体, 以火山岩作为热储存介质 (最高 600 摄氏度)。其动力循环中包含一个蒸汽轮机, 可能的产物有电力、用于工业流程的工艺蒸汽以及用于区域供热或供冷的水。工厂的能量转换效率为 45%, 提供最高 1,400 千瓦的电功率以及 12,000 千瓦时的容量。西门子公司宣称最早在 2025 年, 可以进行一个 1 吉瓦时储能项目的试运行。 ^{lxxxvi}

6.4 物理储能

概况介绍 7：结合抽水蓄能使用的风力涡轮机

名称 结合抽水蓄能使用的风力涡轮机

基本信息	<p>集成了储水罐和蓄水池的风力涡轮机能够同时生产和储存电力。抽水蓄能可以用作灵活的短期储能设施，有助于平衡电网的波动性。与常规的抽水蓄能发电设备相比，它所需的空間更少，对景观的影响更低。</p> <p>大型抽水蓄能发电设备可以储存的电量得多，但小型储能设施也足以补偿风电场产量的短期波动。</p>
技术就绪水平	<p>试点项目已安装并运行。</p>
潜力	<ul style="list-style-type: none"> • 类似项目的适当选址很少：风力涡轮机与抽水蓄能发电设备要组合使用，其选址就必须提供至少 150 米的高度差——从水塔到山谷内的蓄水池。 • 但是，因为对景观的影响较低，所以未来的项目在当地遇到的阻力可能会比较小。
应用	<p>只结合陆上风电场打造了试点项目。</p> <p>水电池可以吸收电网的过剩电能，并在必要的时候再次释放。它与变电站相连接。</p>
试点项目	<p>巴登-符腾堡盖尔多夫的试点项目。由四个容量总计为 13.6 兆瓦的涡轮机构成。</p> <p>上水池分成四个小水池，直接汇入到风力涡轮机中。蓄水池（有源水池）建造在地基内，而水塔竖立在所谓的无源水池中。再通过管道，将它们与 200 米之下的下水池相连接。下水池的容量为 160,000 立方米。抽水蓄能发电设备可储存最多 70 兆瓦时。</p>

概况介绍 8：重力电池

名称 重力电池

基本信息	重力电池是以提升质量产生的重力势能的形式，临时储存电能。重力电池使用电网的过剩能量提升质量，产生重力势能，然后放下质量，通过发电机将势能转化为电能。重力电池与普通传送系统的决定性差别在于重力电池中储存的能量在向下移动的过程中，被转化为传统制动系统内的热能，但之后又重新转化为电能。
技术就绪水平	已安装试点项目。已开始打造第一个市场化项目。
潜力	<ul style="list-style-type: none"> • 此技术使用简单便宜的材料，相比传统的抽水蓄能和电池技术，具有环保方面的优势，也让系统具有价格竞争力。所使用的砖块由回收的废品制成。 • 抽水蓄能潜力巨大，未来会有旺盛的需求。 • Energy Vaults 公司的 EVx 储能发电技术被认为可以将摩擦损失降低到 15%到 20%。使用锂电池储能，充放电之间用电量的损失率在 10%到 13%之间。 • 与锂离子电池不同，此系统的性能不会随着时间的发展而下降。
应用	<p>到目前为止，重力电池都是与太阳能或风能发电设备协同使用。重力电池尤其适合要求稳定供电的应用，放电时间在两小时到十二小时之间。</p> <p>Energy Vault 的澳大利亚项目终将接入电网，因此未来将接入维多利亚州的地方电网。</p>
试点项目	试点项目包括苏格兰爱丁堡的 <i>Gravitricity</i> 项目和瑞士阿尔贝多-卡斯蒂奥内的 <i>Energy Vault</i> 项目。 <i>Gravitricity</i> 使用了一个 15 米、250 千瓦的重力电池。 <i>Energy Vault</i> 使用一台升降混凝土块的起重机储存电能。 <i>Energy Vault</i> 公布了梅多克里克太阳能发电场向其签发的项目中标通知，此项目是在澳大利亚维多利亚部署一个接入电网的 250 兆瓦/500 兆瓦时的电池。

6.5 化学储能

概况介绍 9：小型氢蓄能

名称 小型氢蓄能

基本信息	<p>电解槽使用光伏系统的过剩电能，从工艺用水中分离出氢和氧。氢气可以储存在储罐内，延迟一段时间后重新转化为电能和热能。燃料电池也可用作发电的加热器，逆转电解过程，生成电能和热能。</p> <p>氢能的优势在于可以储存在储罐内，长时间储存的能量损耗低。</p>
技术就绪水平	<p>市场化且可获取。</p>
潜力	<p>Picea 系统被证明具有接近 90%的能效水平，因为它利用了废热。</p> <p>Lavo 系统提供 30 年的保修期。</p> <p>系统价格高。</p>
应用	<p>针对独户住宅、公寓大楼和小企业。</p> <p>储能系统的设计目的是为了自给自足，但也可以接入电网。</p>
试点项目	<p>多个试点项目。</p> <p>Picea: 家庭用电解决方案（HPS）</p> <ul style="list-style-type: none"> • Picea 是用于独立式和半独立式住宅的系统，融合了储能、供热支持以及居住空间通风功能。 • 使用一个 20 千瓦时的锂离子电池储存能量，满足短期用电需求。 • 光伏系统生成的能量可以转化并最多储存 2400 到 3000 千瓦时的电能量。使用集成的电解槽制氢。使用燃料电池将氢能重新转化成电能。 • 储存系统可以独立运行或者接入电网。 • 此系统将能量转换的废热用于供热。 <p>Lavo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 使用屋顶太阳能设备和绿氢相结合的集成混合氢电池屋顶的产消者加氢站。 • Lavo 将氢储能、燃料电池和电解整合到一个配有 40 千瓦时储能系统的紧凑系统中，可以为一个家庭供能两到三天。 • Lavo 系统的尺寸和价格远低于 Picae 系统。同时，因为缺少废热转换器，其能量转换的效率较低。

概况介绍列表

概况介绍 1: 金属-氧气/空气电池	17
概况介绍 2: 金属-硫电池	18
概况介绍 3: 钠离子电池	19
概况介绍 4: 氧化还原流电池.....	20
概况介绍 5: 铅-碳蓄电池/铅碳电池.....	21
概况介绍 6: 卡诺 (Carnot) 电池.....	22
概况介绍 7: 结合抽水蓄能使用的风力涡轮机.....	23
概况介绍 8: 重力电池	24
概况介绍 9: 小型氢蓄能	25

图片列表

图 1: 2019 年的光伏发电装机容量.....	5
图 2: 太阳能电池效率的发展	6
图 3: 欧盟欧洲战略能源技术计划的治理结构	8
图 4: 德国高科技战略 2025	8
图 5: 新型储能, 按位置列示	9
图 6: 中国绿色专利申请的数量 (2010-2021)	10
图 7: 光伏模组价格的历史发展.....	11
图 8: 太阳能组件产量, 按国家列示	12
图 9: 电池储能系统——已安装能源成本下降潜力	14
图 10: 锂离子产能, 按国家列示	15

表格列表

表 1：不同类型蓄电技术的概况及其接入电网的情况（来源：BFE 2022）	12
---	----

参考文献

-
- ⁱ 德国能源署 (Dena), “配电网研究”, <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/flexibilitaet-und-speicher/>
- ⁱⁱ <https://strom-report.de/strom/>
- ⁱⁱⁱ 欧洲共同体的数字 – 2019, 联邦网络机构, 2020, 参见 https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institution/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEGinZahlen_2019_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=3#:~:text=EEG%20in%20Zahlen%202019%201%20Vorwort%20%2F83%2031.12.2019,%28Anzahl%29%207.222%20602%2015.122%2011%2028.363%201.467%201.868.1561.920.943.
- ^{iv} 有关灵活性措施的更多信息可参见报告“德国电力系统的灵活性技术和措施”：
https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/Flexibility_Technologies_and_Measures_in_the_German_Power_System.pdf
- ^v 有关数据中心灵活性潜力的其他信息可参见报告“德国和中国数据中心的灵活性”：
https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/EnTrans/Data_centre_flexibility_in_Germany_and_China.pdf
- ^{vi} 德国能源署, “分散的灵活性和可再生能源的整合”,
https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/2022/Decentralized_Flexibility_and_Integration_of_Renewable_Energy_EN.pdf
- ^{vii} 有关配电网层面的灵活性措施的更多信息, 参见报告“分散的灵活性和可再生能源的整合”：
https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/2022/Decentralized_Flexibility_and_Integration_of_Renewable_Energy_EN.pdf
- ^{viii} 国际可再生能源机构 (IRENA), “储能成本”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- ^{ix} 弗劳恩霍夫协会, “关于创新能源技术的简短报告”,
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Fraunhofer_I SE_final.pdf
- ^x Mennel (2012), 可再生能源法 - 成功案例还是成本陷阱? 经济服务 92 (13)
- ^{xi} Benekin (2021), 我们从可再生能源法征税中得到了什么: 骄傲!, PV 杂志
- ^{xii} 德国联邦教育与研究部 (BMBF), “高科技战略 2025”,
https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/31538_Forschung_und_Innovation_fuer_die_Menschen_en.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- ^{xiii} 德国联邦教育与研究部, “未来战略”,
https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/zukunftsstrategie/zukunftsstrategie_node.html
- ^{xiv} Arendse Huld, “中国的能源转型和去碳化承诺的现状”, 中国简报, 2022 年 4 月 22 日, 参见
<https://www.china-briefing.com/news/earth-day-2022-whats-the-state-of-chinas-energy-transition/>
- ^{xv} “中国清洁能源联合体 2022 第 26 卷”, 能源冰山 (Energy Iceberg), 2022 年 9 月 28 日.
- ^{xvi} “分散的灵活性和可再生能源的整合”, 德国能源署和德国国际合作机构, 2022 年 8 月, 参见
https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/2022/Decentralized_Flexibility_and_Integration_of_Renewable_Energy_EN.pdf
- ^{xvii} 关于中国的分布式能源定义差异, 参见我们的报告“分散的灵活性和可再生能源的整合”第 25 页.

- ^{xviii} “隆基安装更多的家庭屋顶太阳能设备”, 中国日报, 2022 年 7 月 8 日, 参见 <https://www.chinadaily.com.cn/a/202207/08/WS62c785c4a310fd2b29e6b34a.html>
- ^{xix} 德国国际合作机构, “中国能源简报”, 第 62 期, 2022 年 9 月.
- ^{xx} 德国国际合作机构, “中国能源简报”, 第 62 期, 2022 年 9 月.
- ^{xxi} “China Plans for Cheaper, Longer Lasting Energy Storage by 2025”, 彭博新闻, 21 March 2022 年 3 月 21 日, 参见 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-21/china-plans-for-cheaper-longer-lasting-energy-storage-by-2025>
- ^{xxii} “追踪清洁能源创新: 聚焦中国”, 国际能源署 (IEA), 2022 年, 参见 <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-innovation-focus-on-china>
- ^{xxiii} Ye Wang, “中国是否建立了绿色专利制度? 专利法中绿色原则的实施”, 可持续性 2022, 14.
- ^{xxiv} 弗劳恩霍夫协会, “创新能源技术简短报告”, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Fraunhofer_I_SE_final.pdf
- ^{xxv} 弗劳恩霍夫协会, “创新能源技术简短报告”, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Fraunhofer_I_SE_final.pdf
- ^{xxvi} <https://skysails-power.com/how-power-kites-work/>
- ^{xxvii} <https://www.pv-magazine.com/2021/12/07/hybrid-wind-solar-generator-for-rooftop-applications/>
- ^{xxviii} <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/tidal-power.php>
- ^{xxix} “中国清洁能源联合体 2022 第 26 卷”, 能源冰山 (Energy Iceberg), 2022 年 9 月 28 日.
- ^{xxx} “中国在清洁能源领域的主导地位可能面临电池方面的挑战”, 彭博新闻, 2022 年 2 月 17 日, 参见 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-02-17/china-s-clean-energy-dominance-may-face-challenge-in-batteries>
- ^{xxxi} “追踪清洁能源创新: 聚焦中国”, 国际能源署 (IEA), 2022 年, 参见 <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-innovation-focus-on-china>
- ^{xxxii} “光伏发电”, 美国能源部 (DOE), 2022 年 2 月 24 日, 参见 <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Solar%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>
- ^{xxxiii} “光伏全球供应链”, 国际能源署 (IEA), 2022 年 7 月, 参见 <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>
- ^{xxxiv} “追踪清洁能源创新: 聚焦中国”, 国际能源署 (IEA), 2022, 参见 <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-innovation-focus-on-china>
- ^{xxxv} 德国能源署, “分散的灵活性和可再生能源的整合”, https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/2022/Decentralized_Flexibility_and_Integration_of_Renewable_Energy_EN.pdf
- ^{xxxvi} 国际可再生能源机构 (IRENA), “储能成本”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- ^{xxxvii} Jan Figgenger 等人, “德国电池存储系统的发展: 市场回顾 (2022 年状况)”, 2022 年 3 月 15 日, 参见 <https://arxiv.org/abs/2203.06762>
- ^{xxxviii} 国际可再生能源机构 (IRENA), “储能成本”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- ^{xxxix} 国际可再生能源机构 (IRENA), “储能成本”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- ^{xl} Thielmann, Axel, 等人. “储能路线图 (2017 年更新)” (2017).
- ^{xli} Thielmann, Axel, 等人. “储能路线图 (2017 年更新)” (2017).
- ^{xlii} Edström, Kristina. “电池 2030+ 路线图” (2020).
- ^{xliii} “成立联盟以提升储能”, 中国日报, 2022 年 8 月 9 日, 参见 <https://www.chinadaily.com.cn/a/202208/09/WS62f1c199a310fd2b29e711dd.html>

- xliv “2021 年中国锂电池产量激增”, 新华社, 2022 年 2 月 27 日, 参见 http://english.www.gov.cn/archive/statistics/202202/27/content_WS621b6715c6d09c94e48a58a4.htm
- lv “中国在清洁能源领域的主导地位可能面临电池方面的挑战”, 彭博新闻, 2022 年 2 月 17 日, 参见 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-02-17/china-s-clean-energy-dominance-may-face-challenge-in-batteries>
- lxvi “根据五年计划, 中国将削减工业储能系统的成本, 以便到 2030 年跃居世界前列”, 南华早报 (SCMP), 2022 年 2 月 24 日, 参见 <https://www.scmp.com/business/article/3168078/climate-change-china-slash-costs-energy-storage-systems-industry-leapfrog>
- lxvii “光伏发电”, 美国能源部 (DOE), 2022 年 2 月 24 日, 参见 <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Solar%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>; “新能源展望”, 彭博新能源财经, 2021.
- lxviii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxix Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- l Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- li Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lii “e-Zinc 公司与丰田通商加拿大公司签署试点项目协议”, 雅虎财经, 2022 年 6 月 1 日, 参见 <https://finance.yahoo.com/news/e-zinc-signs-pilot-project-130000579.html>
- liii Ryan Kennedy, “多日铁空气电池达到商业化”, PV 杂志, 2021 年 8 月 5 日, 参见 <https://www.pv-magazine.com/2021/08/05/multi-day-iron-air-batteries-reach-commercialization/>
- liv Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lv Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lvi Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lvii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lviii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lix Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lx Andy Colthorpe, “依赖煤炭的蒙古的第一个太阳能加储能项目将使用 NGK 公司的钠硫电池”, 储能新闻, 2021 年 3 月 25 日, 参见 <https://www.energy-storage.news/coal-dependent-mongolias-first-solar-plus-storage-project-will-use-ngks-sodium-sulfur-batteries/>
- lxi Cameron Murray, “综述: 加州包含钒氧化还原液流电池 (VRFB) 的微电网试验完成, 阿驰奥纳 (Acciona) 公司尝试溴化锌电池, 锂硫初创公司 Zeta 获得 2300 万美元融资”, 储能新闻, 7 February 2022, at <https://www.energy-storage.news/roundup-california-vrfb-microgrid-trial-complete-acciona-tries-zinc-bromide-batteries-lithium-sulfur-startup-zeta-nets-us23m-financing/>
- lxii Andy Colthorpe, “依赖煤炭的蒙古的第一个太阳能加储能项目将使用 NGK 公司的钠硫电池”, 储能新闻, 2021 年 3 月 25 日, 参见 <https://www.energy-storage.news/coal-dependent-mongolias-first-solar-plus-storage-project-will-use-ngks-sodium-sulfur-batteries/>
- lxiii “2030 年电池创新路线图”, 欧洲蓄电池制造商协会 (EUROBAT), 2020.
- lxiv “2030 年电池创新路线图”, 欧洲蓄电池制造商协会 (EUROBAT), 2020.
- lxv “2030 年电池创新路线图”, 欧洲蓄电池制造商协会 (EUROBAT), 2020.
- lxvi Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxvii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxviii Shi Xue Dou, “智能钠存储解决方案 (S4) 项目 - 最终项目报告”, 伍伦贡大学, 2022, 参见 <https://arena.gov.au/assets/2022/07/smart-sodium-storage-system-final-report.pdf>
- lxix Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxx Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxxi Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxxii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.
- lxxiii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与 innovation 研究所, 2017.

-
- lxxiv Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所, 2017.
- lxxv Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所, 2017.
- lxxvi Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所, 2017.
- lxxvii Thielmann, Axel, 等人.“储能路线图 (2017 年更新)”, 德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所, 2017.
- lxxviii Paul Dvorak, “先进的铅碳 (PbC) 电池运动对电网稳定的优势”, 风电工程与发展, 参见 <https://www.windpowerengineering.com/advanced-lead-carbon-pbc-battery-sports-advantages-grid-stability/>
- lxxix Vecchi, Andrea, 等人.“卡诺电池的发展: 系统性能、应用和商业现状回顾.”, 储能杂志, 2022.
- lxxx Vecchi, Andrea, 等人.“卡诺电池的发展: 系统性能、应用和商业现状回顾.”, 储能杂志, 2022.
- lxxxI Geyer, D. D. M., 等人.“在智利将现有的燃煤电厂重新利用为可再生能源的蓄热电厂.”, 德国波恩: 德国国际合作机构 (GIZ), 2020.
- lxxxii Vecchi, Andrea, 等人.“卡诺电池的发展: 系统性能、应用和商业现状回顾.”, 储能杂志, 2022.
- lxxxiii “储能--为能源转型充电”, 西门子歌美飒公司, 于 2022 年 11 月 3 日访问 <https://www.siemensgamesa.com/en-int/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>
- lxxxiv Vecchi, Andrea, 等人.“卡诺电池的发展: 系统性能、应用和商业现状回顾.”, 储能杂志, 2022.
- lxxxv Vecchi, Andrea, 等人.“卡诺电池的发展: 系统性能、应用和商业现状回顾.”, 储能杂志, 2022.
- lxxxvi “储能--为能源转型充电”, 西门子歌美飒公司, 于 2022 年 11 月 3 日访问 <https://www.siemensgamesa.com/en-int/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>

网站



微信

