

数字化转型和人工智能在电力系统转型中的应用

G7的未来展望



除非另有说明，本出版物中的材料可自由使用、共享、复制、再制作、印刷和/或存储，但需注明IRENA为资料来源和版权所有。本出版物中归第三方所有的材料可能适用单独的使用条款和限制，在使用此类材料前可能需要获得这些第三方的适当许可。

ISBN : 978-92-9260-690-9

引用：IRENA (2025), *数字化转型和人工智能在电力系统转型中的应用：G7的展望*
国际可再生能源机构，阿布扎比。

关于IRENA

国际可再生能源署 (IRENA) 是一个政府间组织，支持各国向可持续能源未来过渡，并作为国际合作的主体平台、卓越中心和可再生能源政策、技术、资源和金融知识的宝库。IRENA促进各种形式的可再生能源的广泛采用和可持续利用，以实现可持续发展、能源 access、能源安全、低碳经济增长和繁荣。

此报告可从此处下载：www.irena.org/publications

如需更多信息或提供反馈，请联系：publications@irena.org。

致谢

这份报告由阿德里安·戈麦斯、阿丽娜·吉尔马诺娃、阿克·肖恩劳、伊内斯·雅各布、拉扬·丹卡尔、丽贝卡·比桑瓜和西蒙·本马拉兹撰写，由诺雷拉·康斯坦丁塞库（国际可再生能源署创新与技术中心代理主任）指导。

受益于专家的输入和评论，包括Marcio Venicio Pilar Alcantara（巴西，ANEEL）、Alena Profit（西门子）、Siddesh Gandhi（ENTSO-E）、Ulrich Mans（Quantum Delta）、Liesbeth Switten（AIB-发行机构协会）、Kilian Daly（EnergyTag）、Semih Tetik（CharIN）、Yunshu Li（IAEA）、Marcia Poletti（Octopus Energy）、Deger Saygin和Joseph Cordonnier（经合组织）、Mari Angeles Major-Sosias（美国电力研究所）、Seong Choi（NREL，全球PST联盟）、Julie Evans（英国，DESNZ）、Kentaro Oe（日本，METI）、Maximilian Schuelling（德国，BMW）、Vincent Berrutto（欧洲委员会，DG ENER）、Martina Lyons（国际能源署）、Peter Markussen（Energinet）、Karoline Steinbacher、Katja Eisbrenner和Romain Capaldi（指南针咨询公司）。

IRENA的同事也提供了宝贵的意见，包括Paul Komor、Toyo Kawabata、Zafar Samadov、Samah Elsayed、Celia García-Baños、Diala Hawila、Gayathri Nair、Thierry Odou、Arina Anisie、Yasuhiro Sakuma、Bilal Hussain、Francisco Gafaro、Binu Parthan、James Walker和Luis Janeiro（前IRENA成员）。

出版和编辑支持由弗朗西斯·菲尔德和斯蒂芬妮·克拉克提供。报告由费尔·迈基进行校对，技术审查由保罗·科默提供。平面设计由凤凰设计援助提供。

国际可再生能源署（IRENA）感谢加拿大政府为生产此报告提供的支持。

免责声明

本出版物及其中的资料按“原样”提供。国际可再生能源机构已采取一切合理预防措施，核实本出版物中资料的可靠性。然而，国际可再生能源机构或其任何官员、代理人、数据提供者或其他第三方内容提供者均不提供任何形式（明示或暗示）的担保，也不对使用本出版物或其中资料造成的任何后果承担责任或负有责任。

此处包含的信息不一定代表IRENA所有成员的观点。提及特定公司或某些项目或产品，并不意味着IRENA优先认可或推荐它们，而非提及的同性质的其他公司、项目或产品。此处采用的设计称谓和材料展示不表明IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的法律地位，或其当局，或对其边界或疆界的划定有任何意见。

目录

缩写.....	5
执行摘要.....	6
数字化电力系统呼吁	6
数字化解决方案带来的增值的定性评估	7
G7和国际伙伴的行动议程	8
1. 简介.....	10
2. 数字优势：数字化电力系统的增值.....	14
2.1 价值集聚.....	15
2.2 电力系统数字化：以效益为导向的方法	22
2.3 高效益的实现——案例研究	26
3. 实施数字解决方案：挑战与战略响应	40
3.1 实施障碍：理解挑战以确定行动	42
4. 七国集团和国际社会的建议	52
4.1 通过定制化数字化转型策略释放系统价值。	52
4.2 通过系统范围的协同加速数字化统筹。	53
4.3 基础优先：数据采集与管理、互操作性与网络安全.....	53
4.4 重塑技能与培训：教育主题与数字素养的整合。	54
4.5 促成因素：长期规划、激励投资与支持创新。	54
4.6 加强（国际）合作以支持电力系统转型，包括在新兴和发展中经济体。	55
参考文献。	56
附件.....	64
术语表.....	64
调查方法	66

图例

图1.1 国际可再生能源署的1.5°C情景.....	11
图1.2 BNEF在电力部门跟踪的数字项目和合作伙伴数量，2017-2023 ..12	
图1.3 按技术领域划分的电力行业数字化，2023年和2024年.....13	
图2.1 价值簇.....15	
图2.2 量化数字化为可再生能源开发商创造的价值（在一个 50 GW 投资组合中）.....21	
图2.3 电动汽车智能充电以降低电费成本.....28	
图 2.4 高级智能充电形式。.....29	
图 2.5 预测性维护的基础构件。.....31	
图2.6 比较替代的电源资产维护方法。.....31	
图2.7 人工智能增强型可变可再生能源发电预测。.....33	
图 2.8 在FLISR技术中自动化的步骤.....38	
图3.1 数字化转型用例的预期影响时间表。.....40	
图3.2 能源领域数据实施感知到的障碍.....42	
图 3.3 能源领域数字化解决方案的感知障碍.....45	
图3.4 支持数字能源解决方案的全球优先事项.....48	
图A.1 一个电力系统数字化框架64	
图A.2 按行业分的调查受访者.....67	

表格

表2.1 价值集群用例和数字化收益.....25	
表2.2 智能充电部署的启用步骤.....28	
表2.3 实施预测性维护的步骤.....32	
表2.4 部署人工智能增强型虚拟现实预测的启用步骤.....34	
表2.5 实现能源属性证书部署的启用步骤。.....36	
表2.6 部署FLISR的启用步骤.....39	

盒子

2.1框 通过数字化创造价值。.....21	
2.2 节 Energinet项目.....22	
2.3 箱 智能充电.....30	
框 2.4 数字化如何助力更多可再生能源的整合：案例研究.....34	
2.5 栏 现实生活实例：细分证书如何为客户增加价值37	
2.6 编箱 现实世界的FLISR应用.....39	

缩写

3DEN 数字需求驱动型电力网络	FSC 未来技能中心
人工智能 人工智能	G7 七国集团
AMI 高级计量基础设施	GO 来源保证
APUA 非洲电力公用事业协会	GW 吉瓦
BEMS 建筑能效管理系统	GWh 吉瓦时
BESS 电池储能系统	IEA 国际能源署
BNEF 彭博新能源财经	物联网 物联网
CRA 网络弹性法案	IRENA 国际可再生能源机构
DERs 分布式能源	MASE 环境保护与能源安全部
丹麦克朗 丹麦克朗	mFRR 手动频率恢复储备
DLR 动态线路额定值	运维 运行与维护
DR 需求响应	PAYGO 按量付费
DSO 配电系统运营商	PMUs 相量测量单位
EAC 能源属性证书	研发 研发
西非经济共同体 西非国家经济共同体	RE 可再生能源
ECREEE 西非经济共同体可再生能源与能效中心	REC 可再生能源证书
EDF 法国电力公司	RETA 监管能源转型加速器
人权事务委员会 加拿大人力资源部电力	SAIDI 系统平均中断持续时间指数
EIF 欧洲互操作性框架	SAIFI 系统平均中断频率指数
EMDEs 新兴和发展中经济体	scada 监控和数据采集
EMS 能源管理系统	ToU 分时电价
ENTSO-E 欧洲电力输电系统运营商网络	TWh 太瓦时
ESG 环境、社会及公司治理	UE 联合能源
欧盟 欧洲联盟	联合国 联合国
EUR 欧元	美元 美元
EV 电动汽车	V2G 车网互动
事实 灵活交流输电系统	VRE 可变可再生能源
FEMS 工厂能源管理系统	WAMPACS 广域监测保护控制系统
FLISR 故障定位、隔离、服务恢复	XAI 可解释人工智能

执行摘要

数字解决方案拥有巨大的潜力来加速 **电力系统变换**，为了贡献 **能源安全**，**可负担性**，**可持续性** 和 **可靠性**，并因此支持全球社区在其通往 **人人繁荣**。在本报告中，国际可再生能源机构（irena）探讨了数字化，即使用传感器、智能电表和数据平台——以及新的、基于人工智能（ai）的应用程序，用于预测或自动化——如何可以 **创造价值** 为系统内所有演员。

电力系统正在进行的转型特点是日益复杂。随着到 2050 年电力在终端能源消费中的占比达到 52%（国际能源署 [国际能源署，2024a] 预测当前电气化率将翻倍），数字化将变得至关重要，以管理前所未有的规模。不断增长的需求和发电的波动性，以及分布式能源资源的数量不断增加，都需要对电力系统进行数字化转型，以在降低可再生能源带来的成本削减的同时保持服务可靠性。

七国集团（G7），代表着一组发达经济体和欧盟的非正式组合，在应对需求方面发挥着重要作用 **全球电力系统转型**。关键步骤是解决数字解决方案部署和整合的障碍，以及支持新兴和发展中经济体使用数字解决方案来 **提高能源获取** 在全球范围内创造社会经济机会。

数字化电力系统呼吁

一个数字化的电力系统不再是一个好的选择，而是一个 **电制化和脱碳的关键推动因素**。实际上，为了在2030年实现阿联酋共识的倍增目标，加速可再生能源装机容量的部署需求，可以通过数字化（IRENA）来催化（2025）。等数字解决方案可以在整个电力供应链中增加价值，特别是通过人工智能的集成，帮助使不同利益相关者受益。为了促进数字解决方案的采用，包括通过必要的政策支持和投资，重要的是要确定其 **具体效益**。

许多国家将数字化视为能源规划中的战略优先事项。¹ 这代表了一个关键 **机遇窗口** 要塑造相应的努力，以加强能源安全，降低成本，并支持更广泛能源转型目标。当前政策发展阶段为协调数字化努力与监管和投资框架提供了一个恰当的时刻。正如本报告所示，电力行业的数字化需要一种整体方法。对G7而言，这个时刻是一个机会。 **精准、雄心勃勃的行动议程，为电力系统转型指明方向**，将解锁消费者和企业的利益（从系统运营商到数据中心），并提升能源安全和可负担性。

¹ 在利益相关者协商中，66%的受访者表示他们将数字化纳入其国家能源战略。只有15%的受访者表示数字解决方案在国家能源战略或规划中未被提及。

数字解决方案带来的价值定性评估

国际 renewable energy agency (IRENA) 提出了一种定性框架，用于评估增值数字化解决方案对电力系统转型的益处。

数字化解决方案的主要优势是：

- **终端用户电费降低** 通过优化运营、市场参与以及低成本发电资产整合，丹麦的AI增强预测减少了10-15%的运行备用成本，为客户每年节省了超过900万美元（Bjørn Godske, 2025）。
- **改善供给安全性** 通过确保在压力条件下、停电期间或极端事件期间持续可靠的电力输送，并实现更快的干扰恢复。与传统电网相比，配备自动化技术的电网已被证明在受控试验中可将供电中断减少高达45%，并将停电持续时间缩短超过50%（T&D World, 2019）。
- **进一步提高可再生能源的整合** 通过有效管理发电组合中的可变性。人工智能增强的预测和自动化可以有效地最大限度减少可再生能源消纳。人工智能可以使电网运行超越其传统运营极限（IRENA, 2025a）。来自澳大利亚、印度和英国的例子展示了人工智能如何使预测精度比传统方法高45%，从而更好地预测风能和太阳能的波动性并减少消纳（Solcast, 2025；Sustainable Future Australia, 2025）。
- **终端用户增值**，帮助它们体验更大的舒适度，并拥有更多控制和意识来把握优化机会。除了成本之外，舒适在能源相关决策中扮演着重要角色，特别是在需求响应计划中，数字化可以避免权衡。智能能源技术（智能恒温器、电动汽车充电器、家庭能源管理系统使得约70%的美国消费者能够更好地控制他们的能源消耗，同时使他们的家居环境更加舒适（智能能源消费者合作组织, 2025）。
- **提升业务表现** 能源公司以及其他行业，这些行业展现出更高的运营和经济效率，更高的资产利用率和更强的竞争力。在德国，42%的制造企业表示能源节约是最近数字化项目的动机（ZEW, 2023年）。人工智能驱动的优化可以减少建筑、制造和物流行业的10-60%能源消耗（WEF, 2025年）。

IRENA 将 **数字解决方案的附加值** 在监控、预测、运营优化、终端自动化和透明度方面。即使是简单的措施，如果有助于这些价值主张，也可能导致 **在数字化编排的系统中达成强大的成果**：

- **监控** 是电力系统数字化的基础层；它通过提供智能决策、自动化和优化所需的数据来使所有其他解决方案成为可能。
- **预测** 它是当今人工智能的突出应用之一。持续机器学习预测天气和消费模式，有助于更高效地规划和操作系统。得益于这些进步，今天的短期预测平均绝对百分比误差低于5%；结果是有助于更高效的调度和备用规划（GET.t ransform, GIZ, 2024）。
- **运行优化** 通过电网运营商部署的数字设备减少损耗和拥堵，平衡系统并提高可靠性。这些先进技术可以提供更高的粒度和速度，使纠正措施能够在传统的运营时间表之外的所有系统级别进行。

- **最终用户自动化** —利用数字市场工具、需求侧管理平台和能效技术—降低消费者成本。在系统层面，它们促进现有电网资产的更高效利用，并通过移峰填谷帮助缓解电网压力。

- **透明度** 实现能源价值链的可见性，并促进电力系统所有参与者的创新。

为利用数字解决方案赋能电力系统，全球社会将不得不克服一套实施障碍。基于与IRENA成员国及全球专家的磋商，IRENA在先进经济体、新兴及发展中国家均确定了四个关键挑战。

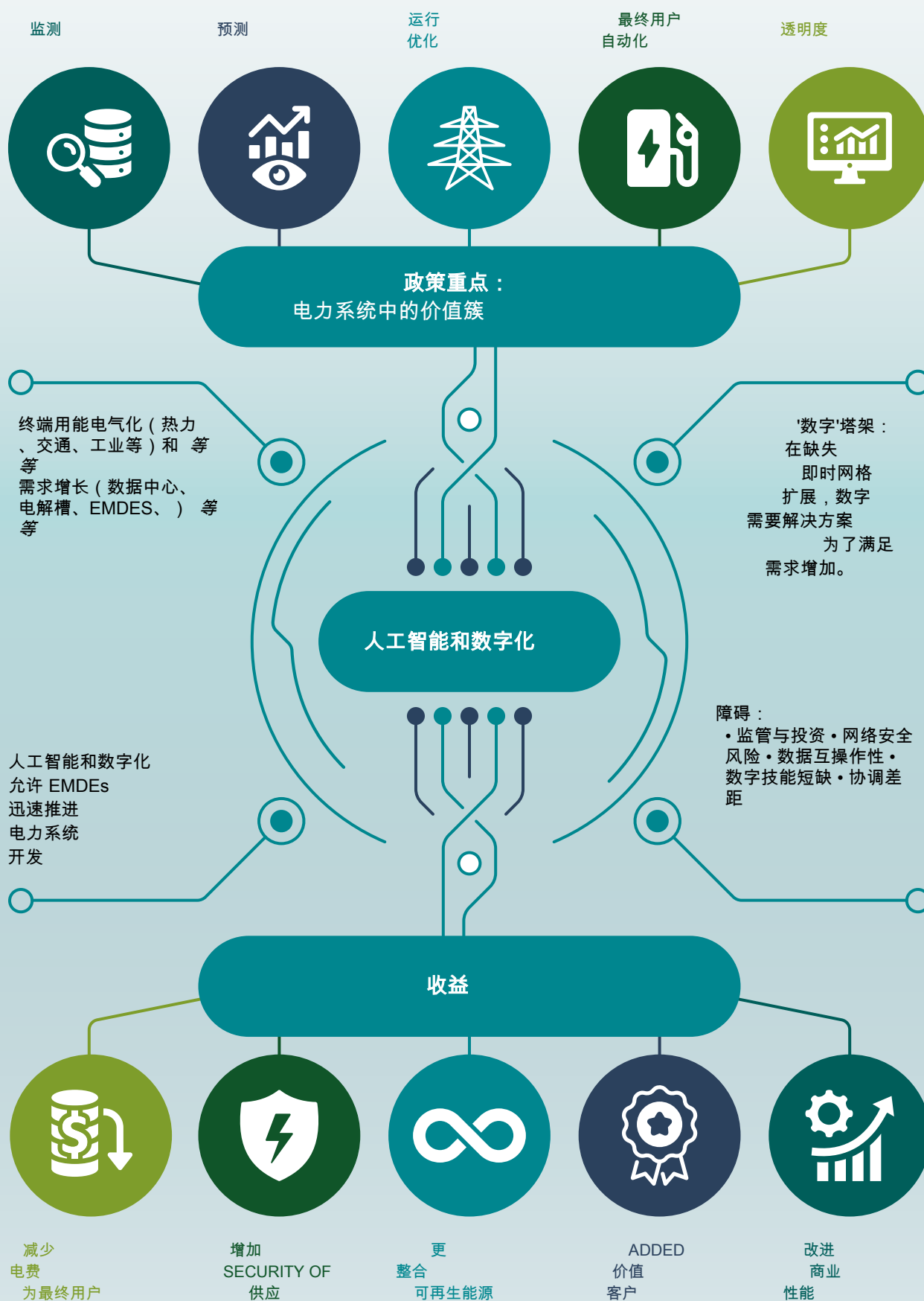
G7和国际伙伴的行动议程

国际可再生能源署对以下方面有如下建议：**G7行动议程** 支持使用数字解决方案进行全球电力系统转型并促进普遍繁荣的：

- **数据和互操作性**：支持改进数据的收集、处理和交换，并辅以适当的网络安全措施，为数字解决方案奠定基础。
- **数字技能**：支持措施，旨在培养全球劳动力的日常应用数字技能，为他们适应电力系统的新时代做准备。
- **有利因素**：鼓励为电力系统应用（其交付周期和生命周期各异）的数字解决方案集成所需创新监管，即便在优先考虑能源安全的同时。电力部门和数字部门的长远规划对于有效实施数字化工作至关重要。
- **协调**：改善利益相关者的协调，支持专门的本地、区域和全球计划，正如本报告中的许多成功计划所示。电网运营商、成员国、数字创新者、数据中心和监管机构之间的合作对于加速数字化时代的电力系统转型至关重要。

国际可再生能源署已准备好支持七国集团和其成员国，通过数字解决方案，走上创造更经济、更安全、更可靠电力系统的光明道路。

数字优势



1. 简介

在日益增长的全球电气化努力下，有效管理电力系统以提供负担得起、可靠和可持续的能源正变得愈发重要。在这种情况下，无论是发达市场还是新兴和发展中经济体（EMDEs）都能从创新的数字解决方案中受益，这些解决方案由人工智能（AI）的革命性进步所支持，为实现负担得起、可靠和可持续的供应提供了新的途径。

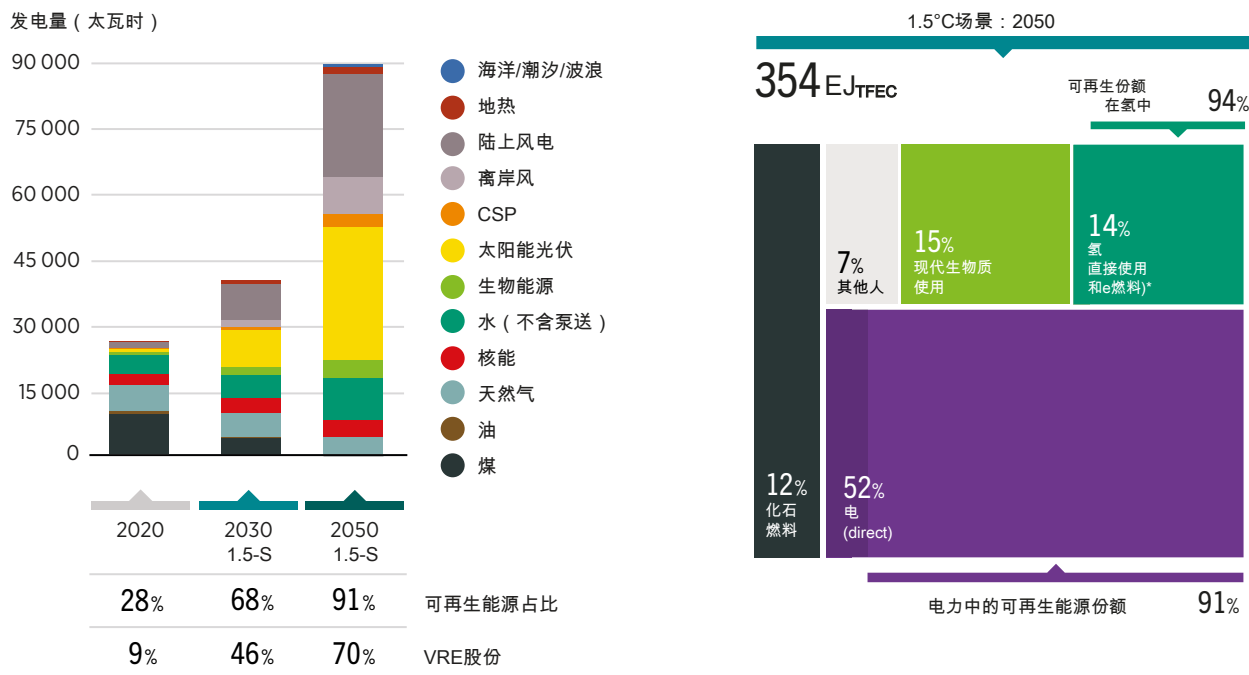
七国集团（G7）已强调数字化在加速能源转型中的关键作用——特别是在提高能源系统灵活性、改造电网以及整合可再生能源方面——这一点在其关于电网数字化、通过整合需求响应和储能来提升灵活性以及国际数字能源解决方案合作（G7，2024）的声明中得到体现。加拿大2025年的轮值主席国致力于加速这一发展并推动电力系统转型，认识到其对更广泛的能源、经济和国家安全战略的重要性，通过推进G7能源与人工智能工作计划来应对人工智能带来的能源挑战、发挥其创新潜力，并推动数字技术融入能源领域，以加强全球获得可负担、安全、可靠能源的能力。

基于对七国集团（IRENA，2024b，2024c，2024d，2024a）的既定咨询建议，能源系统创新（IRENA，2019a，2020，2023a）及其全球跟踪工作（IRENA，2024a；IRENA，2025）等
国际可再生能源署（IRENA）拥有来自全球的170个成员国，致力于支持G7推进电力系统转型，以造福全球社区。

终端用电电气化（交通、供暖和制冷）预计将推动电力增长 例如

未来几年的需求。可再生能源在这种背景下具有巨大的潜力。强大的经济推动力正在促进可再生能源容量的增加。在2024年，91%的所有新投产的大型可再生电力项目发电成本低于最便宜的新建化石燃料发电替代方案（IRENA，2025b）。可再生能源占有容量增加的92.5%（2023年为85.8%），其中亚洲占72%的增量。七国集团国家（不包括欧盟）占新增可再生能源容量的14.3%。IRENA的1.5°C情景表明，到2050年，最终能源中电力的占比将达到52%。在此情景下，电力系统可靠性和成本效率是能源安全性和可负担性的基础，这意味着需要更大的数字化作用来实现这些结果（图1.1）（IRENA，2024a）。在某些国家，数据中心额外消费预计将激增。例如，爱尔兰的数据中心预计到2030年将消耗该国年电力生产的31%，而美国的数据中心预计到2028年将消耗7-12%（Berkeley Lab，2024；EirGrid，SONI，2024）。其他因素，如交通电气化和许多国家的供暖，有助于提高全球能源效率和可持续性，但也可能对电力系统造成潜在压力。这些可能性进一步强调了在技术、监管和运营层面利用数字化和人工智能收益的必要性。

图1.1 国际可再生能源署的1.5°C情景



注意： 可再生能源主导供应端，电力需求主导需求端。可再生能源目前已明确推动全球电力供应的扩张；仅太阳能光伏就占2023年所有新增可再生能源容量的约73%。该图说明了到2050年全球发电量的预测，其发电量接近90万兆瓦时，并且越来越多地由风能和太阳能主导，与《巴黎协定》的目标一致。右图描绘了电力在需求端日益上升的重要性。电力占比预计将从目前的约20%增长到2050年的52%，突出了电气化在可持续能源未来中的关键作用（IRENA，2023b，2024a）。CSP = 集中式太阳能；EJ = 艾焦；PV = 光伏；TFEC = 总终端能源消费；TWh = 兆瓦时；VRE = 可变可再生能源。

本报告将数字化视为电力系统转型的关键推动力。在电力系统的背景下，数字化被定义为数字技术在系统规划、运行和管理中的集成。这包括使用传感器、智能电表、通信网络、数据平台和自动化工具，使电网更加可靠、高效和灵活，并增强客户参与度。能源系统中的AI是指能够分析能源环境数据，并在能源价值链的各个运营环节进行监控、预测、优化和自动化（部分自主）的计算模型和算法。术语“数字解决方案”涵盖了数字化以及AI应用（欧洲委员会，2018）。

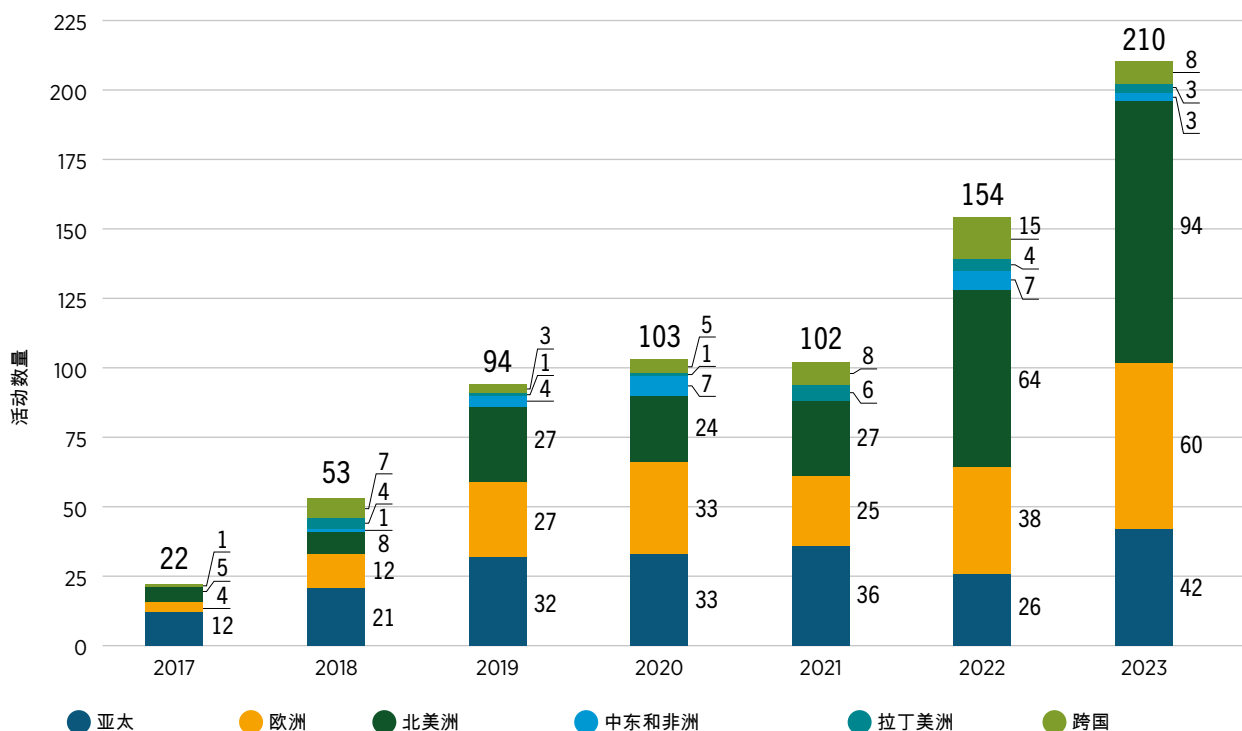
虽然效率提升对系统管理来说本身是可取的，但也帮助适应可变可再生能源日益增长的部署，从而放大低成本技术的效益。数字解决方案通过自动化重复性任务或涉及大量数据的任务，实现更快速、更高效的系统响应。从智能电网和预测性维护到实时数据分析以及人工智能，数字化可以驱动效率提升，使电网更具灵活性，改进系统规划，提高有效网络容量并优化能源消耗。与此同时，需要实施更协调的方法，才能充分发挥数字解决方案加速能源转型的潜力。

能源数字化的发展也带来了自身的风险。对数字基础设施的日益依赖引发了数据隐私问题，使基础设施面临网络攻击的风险，并可能导致弱势群体被落下。本报告探讨了数字化的复杂性，为能源行业的数字化转型提供了一个平衡的视角。

G7通过其全球领导力，可以支持和加速能源转型中全球数字解决方案的采用。数字解决方案可以带来能源效率提升，并使能源系统更具韧性和可持续性。在努力现代化和扩大其能源系统的EMDEs中，利用它们为公众利益服务具有巨大潜力。

发达经济体和新兴市场与发展中国家的经济体在部署数字解决方案方面面临的主要挑战相似——技能、投资、监管差距和缺乏协调是主要障碍，IRENA发现。然而，北美洲和欧洲能源部门部署的数字项目数量和实施率高于世界其他地区。BloombergNEF对公开可用的项目信息的分析表明，2023年，北美洲和欧洲部署的数字项目数量是亚太地区的3.5倍以上，是世界其他地区的10倍以上（图1.2）。

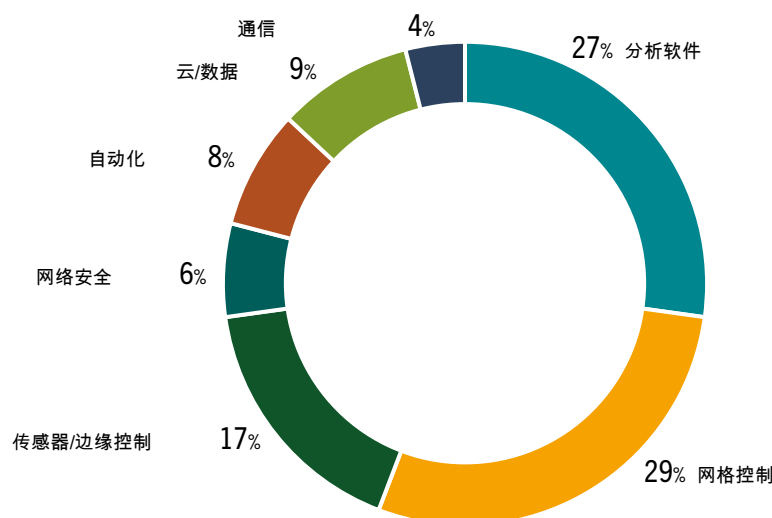
图1.2 BNEF在电力部门跟踪的数字项目和合作伙伴数量，2017-2023



来源：(BNEF, 2024).

除了地区差异和全球趋势之外，对项目重点的评估可以了解哪些领域正获得更多关注（图1.3）。

图1.3 按技术领域划分的电力部门数字化，2023年和2024年



源文件：

(BNEF, 2024).

注意：BNEF追踪了2023年和2024年在电网控制、自动化、分析软件、云/数据、通信、传感器/边缘控制以及网络安全领域中的353个项目。总体而言，由于分布式能源资源管理系统、虚拟电厂、高级配电管理系统、车辆到电网、需求响应和数字化变电站，电网控制活动占所有活动的近三分之一。

超越区域差异，在新兴市场和发展中经济体中，挑战在规模上存在差异，并且可能因一个未能充分支持这些技术的薄弱生态系统而加剧。基础设施覆盖率低（撒哈拉以南）¹⁰

截至2023年，非洲占全球无电力人口总数的85%¹¹ [IEA, 2025]，以及¹²

在研究与开发（R&D）上的支出。尽管北非和西亚在2023年的R&D支出略有增加，但他们当年仅获得了全球R&D支出的4%（Bonaglia, 2024）。¹³

低收入国家的私人投资违约可能性是高收入国家的2.5倍（Galizia和Lund, 2024）。IRENA发现，2024年，欧洲发电项目的加权平均资本成本约为3.8%，而非洲为12%（IRENA, 2025b）。总体而言，这些挑战减缓了数字解决方案的采用。

同时，国际可再生能源署认识到新兴市场和发展中国家是一个国家构成多样、结构和挑战差异巨大的群体。其中一些国家在社会许多领域而非仅仅是能源领域正在实现数字化成就，并且其数字化渗透率比更发达的经济体要深得多。例如，刚果民主共和国、塞拉利昂和孟加拉国已实施创新的按使用付费商业模式和集成数字化解决方案，例如物联网（IoT）、智能电表和移动支付，以提高清洁电力获取途径（国际可再生能源署，即将出版）。本报告旨在分析新兴市场和发展中国家面临的挑战，但这并不意味着这些挑战适用于所有新兴市场和发展中国家，或意味着特定途径能同等程度地使所有国家受益。相反，本报告展示了在新兴市场和发展中国家电力系统转型方面的几个成功、创新的举措，并鼓励全球范围内最佳实践、学习与创新经验的分享。

报告以电力系统转型中数字解决方案的五个价值集群——监控、预测、运行优化、终端自动化和透明度为讨论起点，随后探讨数字解决方案的具体效益，并列出与每个集群相关的用例（第二章）。在第三章中，报告将识别并讨论实施数字解决方案的障碍，并讨论克服这些障碍的创新举措。基于IRENA的创新工作流、利益相关者调查和多次访谈，报告旨在勾勒出一个以行动为导向的路线图，以加速在G7和国际社会部署数字解决方案，以实现能源安全、经济性和可靠性的电力系统转型。

2. 数字优势：数字化电力系统的增值

数字化转型是一个广义的概念，它超越了简单的模数替代，涵盖了利用计算能力实现的自动化和智能系统的多样化、演变应用。因此，数字化转型并非一项有始有终的任务，而是利用信息技术创新来提升其应用系统的变革性过程。

电力系统中的数字化举措并非新鲜事。诸如监控系统与数据采集（SCADA）系统和相量测量之类的例子已被公用事业公司使用了数十年。然而，扩展和提升这些传统能力的规模（数百万个端点）、需求（从可变性到拥堵再到灵活性的日益增长复杂性管理）和工具（先进的和普遍的传感器/计量器、人工智能和量子计算等革命性的计算能力）在今天比以往任何时候都更加相关。

数字技术能够通过优化预测、运行和维护等方式，支持具有复杂多样资产能源系统的运行；这有望通过提高系统的可靠性和韧性来提升效率和支持能源安全（IRENA，2025a）。

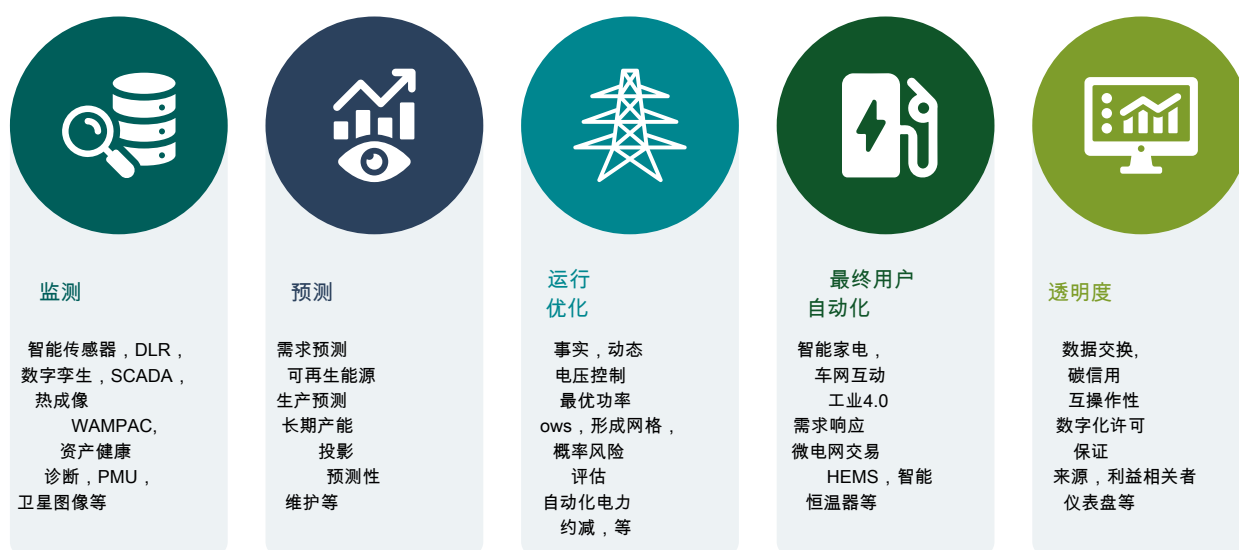
分类是整理数字化对电力系统所带来的不断增长和发展的倡议和解决方案的必要步骤。以下各节按附加价值和效益对数字解决方案进行分类。基于短期实施潜力描述了选定的用例，重点介绍了能够尽快提供的解决方案，尤其是在合适利益相关者的支持下。



2.1 价值簇

在电力系统数字化范畴内包含的倡议或解决方案可以根据多种方法进行分类。本报告将价值主张视为特定用例的起源。这种理解意味着数字技术、政策措施和商业模式可以被划分为价值集群的 **监控**，**预测**，**运营优化**，**终端用户自动化**和**透明度**。这些是根据以下理由被选出的：即使是数字化商业模式或政策行动的最简单价值主张也可以专门解决其中一组。这些组共同导致电力系统的数字协调，以实现本章后面描述的多样化效益。图 2.1 说明了电力系统数字化的价值组。

图2.1 价值簇



注意：dlr=动态线路额定功率；facts=柔性交流输电系统；hems=家庭能源管理系统；pmu=相量测量单元；scada=监控和数据采集；wampac=广域监测、保护和控制系统。

2.1.1 监控

监控是电力系统数字化基础层。所有其他数字化解决方案都依赖于监控，它为智能决策、自动化和优化提供了必要的原始、结构化及上下文数据。没有强大的监控，就无法有效实施预测、运行优化、终端用户自动化和透明度。

监控涵盖从发电系统、输电到配电网和最终用户的整个能源供应链中数据的获取、传输和处理。它依赖于实时和历史电气参数、资产状况、环境因素和用户行为等数据。

这项价值集群包括几种基础技术：

- **传感器**：这些是主要的数据采集工具。它们收集物理和环境参数的数据，如电压、电流、温度、振动和湿度。先进的传感器，包括纳米级和人工智能增强型，能够实现高分辨率、情境感知的监控。

- **智能电表**：安装在用户端，智能电表提供细粒度的用电数据，并支持与公用事业机构进行双向通信。它们构成了高级计量基础设施 (AMI) 的核心，并有助于对需求产生洞察，并相应地应对灵活定价方案 (EPICO, Guidehouse, 2025)。
- **scada系统**：它们通过整合现场设备、通信网络和中央处理器来监控和控制电网运行，以及发电机和通用电力资产。它们对于实时态势感知和远程资产管理至关重要。
- **相量测量单元 (PMU) 和广域监测保护和控制系统 (WAMPACS)** 提供跨大面积电网的同步、高频测量。它们提高可见性，并能够快速响应中断。
- **数字孪生**：这些物理资产的虚拟副本持续地接收传感器数据来模拟行为、检测异常并预测退化。它们越来越多地用于设计阶段测试数字系统、进行预测性维护和优化资产生命周期，以及用于系统监控和辅助操作。

监控是电力系统数字化转型中最首要的一步。基于全面、高质量数据（获取和管理）的监控，能够实现和实施其他价值集群中设想解决方案。它是构建更智能、更具韧性、更可持续能源系统的基础。

正在监控的具体用例包括系统参数的高粒度监控、资产健康的实时监控、广域态势感知 (WAMPACSS/PMUs)、系统通信和网络安全的异常检测，以及环境和天气状况的监控。

2.1.2 预测

先进的数字解决方案和技术 (AI) 通过其增强功能强化电力系统 *例如* 通过结合高度精确的数据与不断发展的分析能力，能够产生具有意义的洞见的预测能力。多维度预测建模和持续机器学习，作为人工智能应用中最知名领域之一，能够预测天气和消费模式。借助这些应用，发电和需求及其扩展等方面可以高效地调度和管理。更好的预测能力可以实现更好的系统规划和运行。它依赖于先进的算法来处理专业数据集。

预测在执行单元承诺（调度发电机连接）中至关重要 *即* 在每个时间段和管理储备金(安排备用电源的量来处理 *即* 发电需求变化)和电网拥堵。随着可变可再生能源 (VRE) 和其他分布式能源资源的份额增长，电力系统必须适应快速变化；这可能需要额外成本来确保可靠性。更好的预测通过减少储备需求、减少可再生能源消纳和失衡来有效降低系统成本。一个跨越美国和加拿大的试点项目表明，整合概率性太阳预测可以节省10-25%的调节（储备）采购成本，体现了先进预测在降低成本方面的巨大潜力。 *即* 并提高可靠性 (约翰斯·霍普金斯大学, 2022)。

具体用例可以分类如下：

- **人工智能增强的需求预测**：高级分析（机器学习、神经网络）利用天气数据、历史使用数据、社会事件和模式的数据以及实时数据，比传统方法生成更准确的电力需求预测。高级分析模型

不断用新数据重新训练以捕捉不断变化的模式（电动汽车 [EV] 充电） 例如

消费者行为、工业负荷、供暖或制冷惯性，甚至烹饪时间）。更精确的预测使发电机、电网运营商和聚合商能够优化调度和储备。研究表明人工智能可以显著提高负荷预测和需求响应规划；例如，线性回归和机器学习算法可以有效地预测系统和区域级别的电力需求。

- **AI增强型可变可再生能源发电预测：** 人工智能和统计模型分析天气预报和历史数据来预测风能和太阳能发电。一种称为先进人工智能技术的 或 现在可以生产高度精确的短期 集成学习卷积神经网络 预报（分钟到小时）。更精确的VRE预报使运营商能够增加其他资源并正确管理储备。另一方面，基于天气的、具有高时间和地理粒度的、高精度预报，可以改进负载平衡和可再生能源整合，使运行更可靠和高效经济。

- **短期市场价格预测：** AI模型可以通过结合需求和发电预测来预测短期电力价格。这使得动态定价成为可能，支持市场运营，并使消费者能够做出成本效益高的决策——无论是通过利用套利机会的计量后自动化，还是通过选择实施这些先进预测以提供较低价格的供应商。

- **预测性维护：** 人工智能和机器学习算法处理电力系统资产的状态和状况的实时数据，从而实现预测性维护，减少设备停机时间，最大限度地提高系统可靠性并延长资产寿命。

2.1.3 运行优化

更高效地（和更安全地）运营现有资产可最大程度减少损失和拥堵，有助于平衡系统，促进可靠性，并提高有效电网容量。现代数字解决方案增加了输配电层面遵循的既定实践（状态估计、最优潮流、随机规划）的粒度，并加快了其速度，同时使故障纠正时间少于人工操作员所需的时间。此外，数字化赋能的运营优化支持可靠离网解决方案的发展。虽然监测有助于发现损失，但数字减损解决方案侧重于根据实时分析、智能管理的潮流和电压以及运行储备的优化来重新配置电网的具体行动。

- **潮流优化：** 高级优化工具（实时最优潮流、柔性交流输电系统[FACTS]控制器、分布式算法）调整电压和电流以最小化损耗并最大化电网利用。智能控制电容器组、分接头转换器和移相器使功率因数接近1。状态估计器和机器学习持续改进潮流模型。在配电网中，智能逆变器和控制设备重新平衡相负荷。在过去的十年里，美国能源部多样化的研究表明，使用无功功率的实时控制和平衡可以减少配电网损耗高达30%（美国能源部，2015年，2024年）。

- **概率评估：** 数字化使随机规划方案得到赋能。随机规划特别适用于具有大型水电站水库的系统，例如加拿大和巴西，在这些地方，水流入和蓄水水平会引入重大不确定性。数字化还使量化破坏性事件（设备故障、需求激增、天气波动）成为可能。操作人员利用先进的AI解决方案，而不是使用最坏情况的不确定性规则，可以通过可再生能源和负荷的数据驱动预测运行不确定场景的多次模拟。扩展的模拟能力提高了操作人员识别脆弱线路和更灵活地设置储备的能力；这减少了电力

损失。此外，此类分析使规划者能够在成本之间权衡微小失效概率，并帮助他们找到更具成本优化的运营方式。

• **量子计算** 被探索作为解决电力系统（潮流分析和电网重构）中日益复杂的优化问题的一种手段，这些问题需要越来越多的计算。例如

分布式可再生能源源和灵活负荷被集成。通过以前所未有的速度进行系统级仿真，量子算法能够高效地识别潮流和防止及缓解故障的最优解，进而实现实时行动，例如提高供应安全性和可再生能源集成（托马斯·莫斯特恩，2022年；TNO，量子三角洲，2025年）。

• **分布式能源资源（DERs）的协调/聚合：**聚合服务将多个小型资源聚合为一个资源。例如，聚合器或虚拟电厂将分布式能源如屋顶光伏、电池、可控负荷和电动汽车充电器捆绑在一起，然后通过云控制优化其组合输出或消耗。聚合意味着多个分布式资源可以被观察并最终被集体控制；这使系统能够实现最大可见性，以维持供能效率和安全，并实现更智能的系统运行。

2.1.4 最终用户自动化

这个集群包括数字市场工具、需求侧管理平台和能效技术，这些有助于降低消费者的成本。在系统层面，需求侧自动化可以削峰填谷，将需求转移到最小化可再生能源消纳，缓解拥堵，提高现有电网资产利用率并保持电网可靠性，直到得到加强。

这些是面向用户或市场集成的解决方案，它们将需求响应中的系统效率转化为终端用户的直接经济利益，通常通过智能定价或利用能源使用洞察来实现。但是，尽管能够提供这些服务的设备很有效，但它们通常有很长的更换周期（十年或更长时间）。因此，这需要对相关政策进行及时实施 例如

并制定相关法规，以支持使用缺乏需求响应能力的传统设备，采用这些智能替代方案。

• **设备与设备的自适应需求：**数字化家居/楼宇系统（智能恒温器、物联网电器）可以自动——自行或通过聚合器——将负荷转移到批发市场价格较低或可再生能源较高的时段。例如，智能洗碗机可能会推迟洗涤，直到电价下降（当太阳能光伏发电丰富时）。这是因为智能 例如

电器（一个智能冰箱）可以智能地调整它们的功能时间或热滞后以适应这些 例如

因素，对性能没有任何影响。这种需求响应，借助实时价格信号，可以大幅降低账单。研究显示，除了热泵等设备外，仅依靠其智能行为就能实现相关的峰值需求削减。广泛实施这些峰荷转移措施，不仅可以帮助住宅消费者，还可以帮助所有用户节省高达25%的账单，从而避免运行极其昂贵的尖峰发电厂（IRENA, 2024e）。

• **电池储能系统（BESS）和电动汽车的自适应行为：**电池和电动汽车的智能充放电使其成为电网平衡的积极参与者。电动汽车可以在非高峰时段或太阳能丰富时充电，甚至在高峰时段向电网馈电（车辆到电网）。家用电池可以储存夜间廉价电力以供白天使用。这些设备根据数字信号（实时价格或聚合器指令）决定充电速率。鉴于智能充电避免了增加峰值负荷并使智能家电能够充当分布式存储资源，其超出标准用途的应用显著提高了灵活性。

• **行业自适应需求：**工业4.0被定义为智能数字技术（物联网、人工智能和大数据分析）融入制造业和其他工业流程中的集成 例如

实现机器的智能运行（电电机）。例如，公司可以使用 *例如* 短期定价和调整运营的信号（在高峰时段减慢非关键流程或 *例如* 将工厂中的并行 workflow 改编成利用动态关税且不影响交货时间的批量作业，或使用热能储存系统为利用热能的过程服务）。在工业硬件数字化方面存在多种机会。例如，只有少数大型工业电机使用变频调速器，但该技术却可将电机能耗降低高达60%并响应价格信号。这种智能控制可带来显著节约：研究估计，基于价格响应使用高效电机和驱动器每年可使美国工业节省850吉瓦时（GWh）（弗劳恩霍夫ICT，2023）。



2.1.5 透明度

透明解决方案不会直接影响技术性能，但对于治理至关重要。它们对于建立利益相关者之间的信任和做出明智的决策至关重要。它们实现了能源价值链的可见性，并促进了创新。由于电力网络和大多数电力市场都受到监管，透明度和信息获取是促进公平竞争并使消费者获得更佳结果的设计原则。

数字平台（公开数据平台、可视化仪表盘、可再生能源可追溯性工具） *例如* 证书为监管机构、规划者、开发者和投资者提供可操作的资讯。对于用户，通过网络平台或数字显示访问明确指标（电力小时消耗数据） *例如* 仪表盘——连同高效的用能建议，显著影响着他们向节能转变的行为。在这些平台上定制自动化可以帮助生成用户友好的洞察，并实现透明度，使这些信息对非技术利益相关者也易于获取和理解。

透明解决方案不会直接优化能源流动或技术性能；相反，它们通过提高可见性来改善治理、建立信任和提升决策能力，这也激发了创新并推动了能源价值链上的演变。

能源属性证书 (EAC)，根据地区不同，被称为可再生能源证书 (RECs) 或原产地保证 (GOs)，是提高透明度的另一种工具。它们是独特的数字证书，用于核实电力来源，特别是来自可再生能源的电力。能源属性证书 (EACs) 通过允许消费者和企业追溯其能源来源并做出明智的选择，使能源市场更加透明。数字平台简化了能源属性证书的发行、跟踪和交易，支持自愿性绿色采购，帮助消费者做出明智的选择，并确保法规合规。然而，如今的能源属性证书通常缺乏确切的发电时间。随着电力系统向实时绿色电力平衡过渡，这是需要的关键升级，而区块链等数字技术可以实现这一目标。

数字许可 指的是利用数字工具来简化和自动化能源基础设施项目的审批流程。通过数字化工作流程、整合地理空间数据以及实现利益相关者的实时协作，数字审批能够减少管理瓶颈，并加快项目进度。例如，人工智能可以通过加速环境影响评估的审批来缓解管理瓶颈——这是一个常见的因重复工作导致效率低下的案例，但辅助系统分析可以显著加快流程。数字审批还通过允许开发商和公众更广泛地获取审批标准、进度和决策来提高透明度。

市场交易和零售： 数字平台改进竞标，并使结算和计费透明化。反过来，它们减少了零售商和市场运营商的争议和成本 (G7公报，2024)。

此外，可解释人工智能 (XAI) 技术使人工智能模型更具可解释性和透明性。反过来，利益相关者能更好地理解可再生能源系统中人工智能驱动决策的依据 (发电调度、维护计划、储能充放电模式)。例如，这培养了信任和问责制，特别是在电网规划、市场预测和资产管理 (Ukoba，2024)。等

2.1.6 电力系统价值量化

国际可再生能源署 (IRENA) 提出的五项价值集群阐述了在不同领域实施数字解决方案如何在系统层面增加价值。然而，对这些集群中的价值进行量化预测本质上很复杂。这取决于利益相关者的视角——无论是公用事业公司、开发商、消费者还是监管机构——以及市场结构、监管框架和数字采用的成熟度。运营和资本支出节约、可靠性提升、收入增长、避免停电 (供应连续性) 或消费者成本降低等指标在不同背景下差异很大。

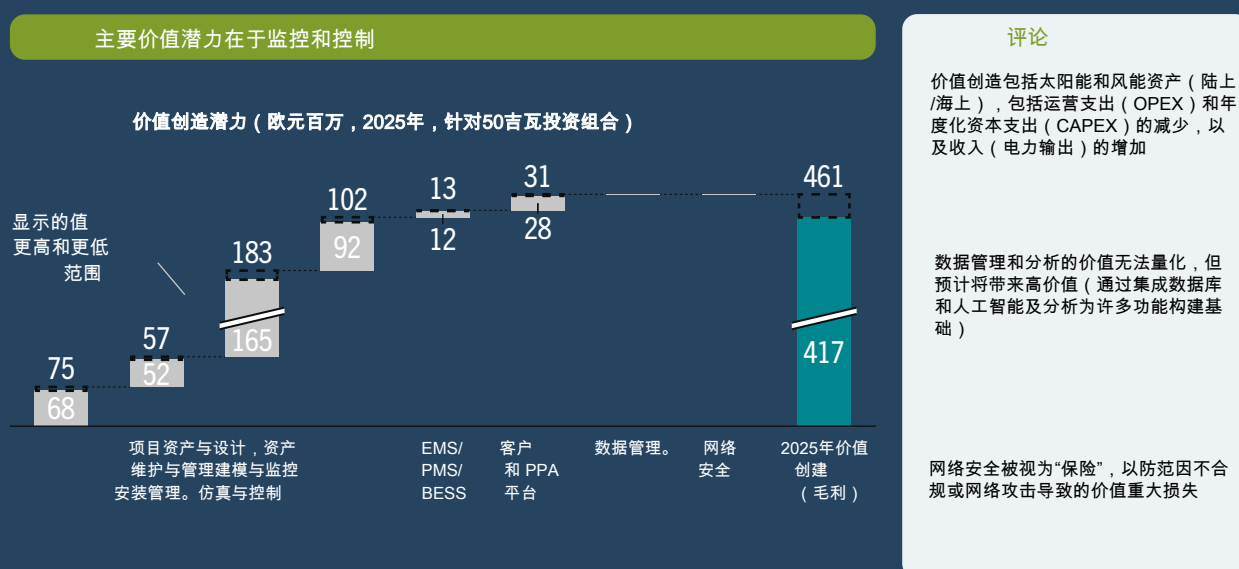
为了说明如何从特定利益相关者的角度量化价值，图2.2展示了主要来自欧洲、美国和中东的成熟可再生能源开发商的汇总数据。该图呈现了每种数字平台的综合最低和最高节省额。它同时展示了通过运营成本 (和年化资本成本) 的效率来降低成本的潜力，以及额外收入的潜力，对于这个示例投资组合，总计达4.17-4.61亿欧元 (通过减少维护时间来最大化能源产出)。例如

在范围方面，对于大多数地区 (不包括能源管理系统[EMS]/电力管理系统[PMS]/电化学储能系统[BESS])，与均值的差异为4.6%-5.2% (整体投资组合为5%)，这为成熟开发商提供了一个良好的预期参考。根据Guidehouse的数据，这些数据更为保守，基于已成熟开发商的项目，这些项目已正式化并实施运维 (O&M) 流程，并组织了运维架构，但可能对成熟度较低的用户或新兴市场和新兴经济体 (EMDEs) 产生更显著的影响 (Guidehouse，2025)。这里未体现数据管理和分析的价值，但对于数字解决方案的运行是基础性的。

2.1 通过数字化创造价值

图 2.2 展示了一个由多个开发商组成的聚合投资组合（50吉瓦 [GW]；太阳能 [60%] 和风能 [40%，陆上和海上]）。投资组合各领域的总价值创造潜力差异很大；在能源管理系统、电力管理系统和电池储能系统（1200万-1300万欧元）中相对适中，并在资产监测和控制中增长至相当显著（1.65亿-1.83亿欧元）。数据管理和网络安全未被计入，但特别是网络安全被视为防范因不合规或网络攻击导致的价值损失的“保险”。

图2.2 量化数字化为可再生能源开发商创造的价值（在一个50吉瓦投资组合中）



来源：（指南屋，2025）。

注意：© 2025 指导屋公司。所有权利保留。根据版权所有者的声明，本内容仅供一般信息参考，不得用作替代专业顾问咨询。AI = 人工智能；BESS = 电池储能系统；CAPEX = 资本支出；EMS = 能源管理系统；GW = 吉瓦；mgt = 管理；OPEX = 运营支出；PMS = 功率管理系统；PPA = 购电协议。

在一个价值创造的例子中，丹麦系统运营商Energinet从2025年开始削减成本，通过实施人工智能增强的天气预报来转变其传统的运营备用采购方式。该模型利用气象数据进行改进的预测，并为日前备用采购提供信息。在2025年初的测试阶段，Energinet报告称，与传统的采购方式相比，第一周的运营备用节省了10-15%，相当于每周节省110万丹麦克朗，或每年节省约6000万丹麦克朗（超过900万美元）；预计将进一步提高（Bjørn Godske，2025）。比利时Elia集团早在2020年就启动了动态维度测试阶段，并为Energinet项目提供了灵感（详见框2.2）。Elia集团的测试阶段展示了通过同行学习成功推广创新解决方案的方法（Elia集团，2023）。

2.2 能源网项目

Energinet 的新型手动频率恢复备用的 (mFRR) 采购利用了基于人工智能的天气预报。在引入这种方法之前, Energinet 每天购买900兆瓦 (MW) 的次日备用容量 (分布在两个主要电网大贝尔特[DK2]东部的600兆瓦和西部的大贝尔特[DK1]300兆瓦)。改进的天气预报可以帮助Energinet限制其次日mFRR的采购。在测试阶段, 无论如何预测都不允许采购低于800兆瓦的, 尽管实际上, 在所有测试阶段的每一天都达到了800兆瓦的阈值。预计与测试阶段的结果相比, 节省可以进一步增加。

所提供的例子说明, 数字化带来的增值如何转化为特定利益相关者的实际财务收益。虽然将其推广到其他环境可能需要谨慎, 但它为价值集群框架提供了一个有力的结论, 突出了数字解决方案的现实影响。

2.2 电力系统数字化：面向效益的方法

在评估数字化解决方案真实潜力之前, 需要理解数字化对电力系统不同方面的增值作用; 而要使投资决策得以解冻, 则需识别最终效益。任何能源价值链的参与方都需要能够进行定性和定量的成本效益分析。

电力系统数字化可以带来许多好处, 包括社会经济好处, 这超出了本报告的范围。在当前分析的背景下, 国际可再生能源机构 (IRENA) 关注其对电力系统的直接影响, 已经确定了几项数字化可以有效带来的关键好处:



降低终端用户的电费： 通过提升运营效率、优化分布式资源的市场参与以及整合基于可再生能源的低成本发电来降低消费者和企业的最终电费成本。



供应更安全： 确保在压力条件下、停电期间或极端事件期间, 持续可靠地输送电力, 并从中断中更快地恢复。



可再生能源的大规模整合： 通过实现灵活整合和有效管理可变性, 提高可再生能源在发电组合中的份额。



客户增值： 为最终用户在使用上提供更大控制权, 更高舒适度, 以及更多关于优化成本和减少排放的机会的意识和知识。



提升业务表现： 我 提高运营和经济效率
提高能源行业或与其直接相关的公司的资产利用率, 增强竞争力。

为了确定每个价值簇中包含的不同数字解决方案在多大程度上提供这些效益，需要进行额外的子分类；用例源自价值簇，并涉及它们的技术特异性。

IRENA确定的用例如下。

在监控值簇：

- **对系统参数进行精细化监控：** 高精度实时测量电压、电流、频率等关键电网参数。这包括用于精细计费、故障检测和灵活性信号的智能计量基础设施。
- **实时资产健康监控：** 持续监测电网资产（变压器、线路和 *例如* 使用先进传感器检测substations的早期故障迹象并优化维护。
- **广域态势感知 (WAMPACS/PMUs):** 在大型电网区域中利用所谓同步相量技术进行协调的实时监控，使WAMPACS得以实现，这些系统有助于协调区域内的安全。
- **系统通信与网络安全异常检测：** 对关键能源系统进行持续的数字监控，以检测、分析和应对网络威胁。
- **环境与天气状况监测：** 监测影响电网运行和资产性能的气象和环境条件，使用先进的天气和气候传感器、无人机传感器和卫星图像。

在预测值簇中：

- **人工智能增强的需求预测：** 使用机器学习进行更精确的电力需求预测，覆盖不同的时间范围。
- **AI增强型可变可再生能源发电预测：** 利用人工智能预测风能和太阳能输出，以更好地将发电与需求相匹配。
- **预测性维护：** 预测设备故障并安排预防性干预以减少停机时间和成本，利用大数据和基于人工智能的建议来组织维护行动，不仅要考虑资产状态，还要考虑资源的可用性和最佳电网条件，以有效地规划停电。
- **短期市场价格预测：** 基于批发电价预测，利用机器学习模型优化电力市场交易策略，模型输入为跨部门数据集中细颗粒度的从小时到天的时间数据（停电、天气、行为需求模式）。 *例如*
- **早期对电网约束的认识：** 早期检测潜在的网络瓶颈和稳定性参数的违反，利用基于多因素算法的先进且持续的有功功率计算，以防止过载和低效的纠正措施。

在运营优化价值簇：

- **潮流优化：** 调整电气流量以最小化损耗、避免拥堵并提高系统效率。
- **概率风险评估：** 使用基于概率的模型来评估运营风险并确定减轻措施的优先级。

- **虚拟电厂**：聚合分布式发电、储能和灵活负荷，以作为一个可调度单元运行。
- **未来控制中心及自动故障定位、隔离和服务恢复 (FLISR)**：故障检测、隔离和服务恢复能够在人类操作员所需时间之内实现纠正措施，最大限度地缩短停电时间和级联效应。
- **动态线损率 (DLR)**：基于温度、风速和其他因素实时计算输电线路容量，使系统运营商能够确定每根导线的不断变化的热限制。与年度或季节性评级不同，这意味着每条线路可以在高于通常容量的情况下安全运行，防止不必要的限制，如可再生能源削减或其他与电网拥堵相关的昂贵措施。

在最终用户自动化价值集群：

- **设备/装置的自适应需求**：自动调整设备使用时间，根据价格或电网信号调整电力消耗。
- **BESSs和EVs的自适应行为**：利用BESS和电动汽车动态充放电，受益于其作为电网灵活性服务提供者的作用。
- **行业自适应需求**：将工业能源使用转移以降低成本并支持电网稳定，并能够自动为电网提供灵活性服务。
- **终端用户能源管理系统 (即 家庭能源管理系统 ([家庭])，楼宇能源管理系统 ([商业建筑]) 和工厂能源管理系统 ([工厂])**：智能系统优化家庭或商业设施的能量消耗和生产。

在透明度值簇中：

- **改进利益相关者之间的信息流**：提升电网运营商、发电厂、供应商和消费者之间的数据交换与协调。
- **颗粒状可再生能源证书**：通过数字平台发行的安全且可追溯的可再生电力证书，并实施区块链等可追溯技术。
- **数字化许可**：通过数字平台简化许可和审批流程。
- **用户友好的仪表盘**：直观界面帮助消费者理解和管理他们的能源消耗。
- **开放数据平台**：提供能源系统透明信息的公开可访问数据枢纽，支持互操作性。

通过审视所提出的用例和定义的利益，可以绘制出一条全面的联系，表明哪些用例擅长提供哪些目标利益。

在表2.1中，IRENA根据其对所列五个益处的（完整圆圈代表）主要催化剂或（半圆圈代表）相关贡献者的相关性，对每个数字化应用场景进行标签。该表格是广泛研究的结果，包括对全球利益相关者的专家调查和访谈。虽然一些已识别的应用场景在某些地区可能处于成熟采用阶段，但它们对其他地区（尤其是新兴市场经济体或小岛屿发展中国家）可能具有变革性意义，或者因其与人工智能集成带来的潜力增加而值得重新关注。

表2.1 价值簇用例与数字化效益

价值簇	用例/数字化收益	降低用电量 更多可再生能源 终端用户渗透成本 () 供应更安全					客户增值 舒适, 控制) 改进业务性能	
 监测	系统参数的高粒度监控	○	●	○	○	●	○	●
	实时资产健康监测	○	●	○	○	●	○	●
	广域态势感知 (WAMPACS/PMUs)	○	●	○	○	○	○	○
	系统通信与网络安全异常检测	○	●	○	○	○	○	○
	环境与天气状况监测	○	○	●	○	○	○	○
 预测	人工智能增强的需求预测	○	○	○	○	○	○	○
	人工智能增强型可变可再生能源发电预测	○	○	●	○	○	○	○
	预测性维护	○	●	○	○	○	○	○
	短期市场价格预测	●	○	○	○	○	○	○
	早期对网络约束的认识	○	●	○	○	○	○	○
 运行优化	潮流优化	○	○	○	○	○	○	○
	概率风险评估	○	○	●	○	○	○	○
	虚拟电厂	○	○	○	○	○	○	○
	未来控制中心和自动化FLISR	○	●	○	○	○	○	○
	动态线损率	●	○	○	○	○	○	○
 最终用户自动化	来自家电/设备的自适应需求模式	●	○	○	○	○	○	○
	来自BESSs和EVs的自适应行为	●	○	○	○	○	○	○
	行业适应性需求	○	○	○	○	○	○	○
	终端用户能源管理系统 (HEMS/BEMS/FEMS)	○	○	○	○	○	○	○
 透明度	加强能源利益相关者之间的信息流通	○	○	○	○	○	○	○
	颗粒式可再生能源证书	○	○	○	○	○	○	○
	数字许可	○	○	○	○	○	○	○
	客户友好型仪表板	○	○	○	○	○	○	○
	开放数据平台	○	○	○	○	○	○	○

注意：● 长直接提供该效益。与获得此效益相关。它对○的贡献是副作用。AI = 人工智能；BEMS = 建筑能源管理系统；BESS = 电池储能系统；EV = 电动汽车；FEMS = 工厂能源管理系统；FLISR = 故障定位、隔离和服务恢复；HEMS = 家庭能源管理系统；PMU = 相量测量单元；WAMPACS = 广域监测保护和控制系统。

这项分析为价值集群和收益提供了可操作的见解，涉及数字化用例，为不同的利益相关者提供参考。政策制定者可以根据国家或地区的背景确定要优先考虑哪些价值集群。

例如，旨在提高供应安全性的地区应专注于基础监测解决方案，这些解决方案也能使其他价值集群受益。监测系统的推广，特别是智能电表，是捕捉与需求侧管理及其他客户需求优化策略相关的效益的前提条件，延误将危及其他领域的进展。

与此同时，拥有成熟监测系统的地区，例如已大规模部署智能电表和先进电网可观性的地区，可以专注于通过增强预测和终端用户自动化来降低电费成本。

客户增值主要来自数字化解决方案，包括智能家电/设备、自适应需求、能源管理系统以及可追溯和细分的能源属性证书。这些对于在利益相关者之间建立信任和为能源政策提供可见性特别相关。

电力行业的公司可以通过实施实时资产健康监测和未来控制中心及FLISR来实现内部效率，而不同行业则能从数字化许可中获益匪浅，并利用短期市场价格预测。

能够提升可再生能源渗透率的应用案例包括，例如，环境与天气状况监测、AI增强型可变可再生能源发电预测、概率性风险评估和数字化许可。导致可再生能源渗透率提高的数字化举措存在于所有价值集群中，并且它们倾向于对其他所追求的效益产生次要的积极影响。

一套说明性的案例研究有助于识别这些数字化转型效益是如何实现的。

2.3 高效兑现福利的领先者——案例研究

电力部门的数字化已经在不同环境中带来了切实的利益。本节介绍了高性能用例，展示了数字解决方案如何为所概述的五个核心利益做出贡献——降低终端用户的电力成本、提高供应安全、实现更高的可再生能源渗透率、增强客户价值以及提升业务绩效。

每个子章节通过详细介绍其架构和运行机制，解释用例如何实现预期效益，并对其2026年至2030年间的演变提供前瞻性视角，来探讨一个特定的用例。这些案例不仅用于说明影响，还用于指导政策制定者、监管机构和市场参与者识别可扩展、可复制的数字化转型路径。

此外，从每个值簇中（但不包括监控，它是所有其他值簇的首要步骤）各选择一个示例。

2.3.1 降低终端用户的电力成本：插电式电动汽车的自适应行为（智能充电）

智能充电是指根据电力系统的状况和车辆用户的需求来调整电动汽车的充电周期。因此，智能充电基于实时数据（如电网约束数据、本地可再生能源生产、价格信号和用户偏好）进行优化。

数字技术——包括但不限于AMI和智能电表、基于云的平台和物联网、通信基础设施，以及用于预测能源需求和预测VRE发电的机器学习算法——构成了对EV等终端用户负荷进行智能充电的基础。与此同时，电动汽车、充电器和电网系统之间的互操作性仍然是一个挑战。标准化的通信协议和开放的应用程序编程接口（API）对于跨制造商和平台的无缝集成至关重要。

智能充电的应用包括将充电自动转移到能源成本较低时，以最小化能源的批发成本（客户可以按设备支付固定低价费率）或在电力价格通常较低的低谷时段充电（通过利用分时电价）。自动负载转移和削峰填谷以参与辅助服务市场（例如，平衡）或本地灵活性市场也是常见的现有应用。

如何通过数字化实现智能充电以帮助终端用户降低电费

存在多种智能充电方法。在供应商/零售商管理电动汽车的解绑市场中，他们可以为设备消耗的电量提供非常低的每千瓦时价格；这显著降低了车辆拥有成本。在电力公司提供分时电价的电力系统中，智能充电系统可以自动安排在价格较低的平峰时段充电。因此，终端用户能够从整体降低的价格中受益，同时仍能为其电动汽车充电并保持所需移动性。

如果电动汽车作为第三方灵活性提供者参与需求响应市场或辅助服务市场以换取收入，终端用户成本也会降低（ICCT，2025）。

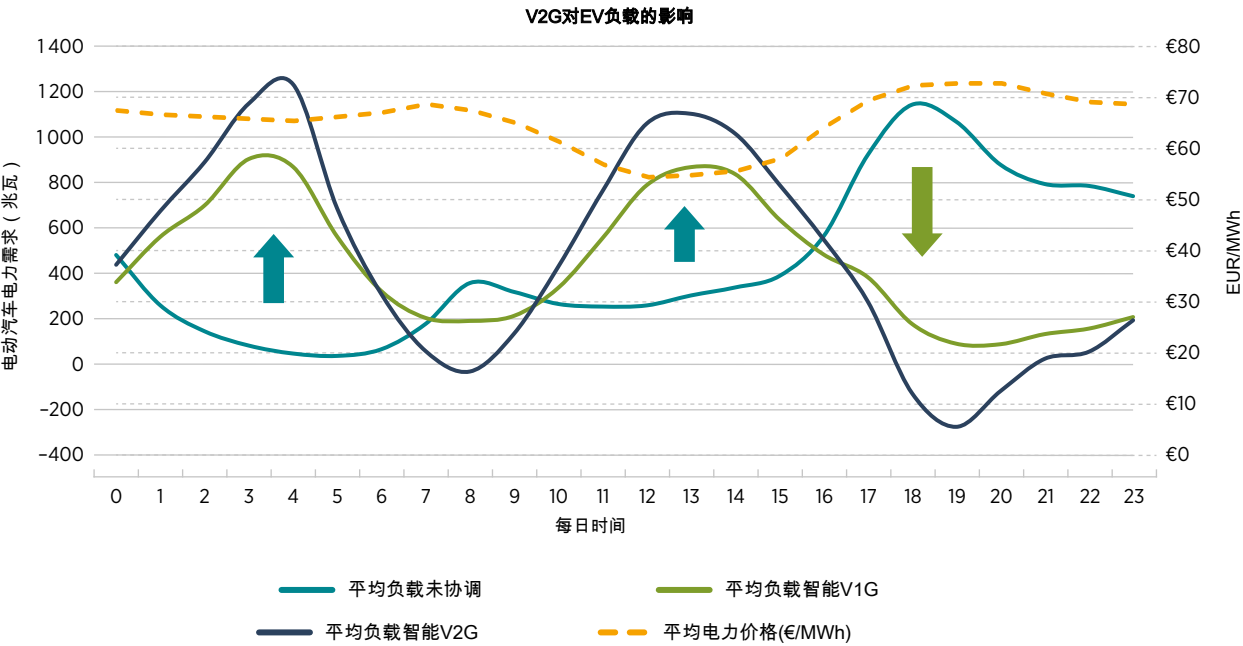
智能充电和车辆到电网（V2G）可将欧洲（EY，2025年）电动汽车的拥有总成本降低7%至29%。最近研究表明，在比利时和德国将充电时间转移到电价较低的时段，当电力仅从电网流向车辆时，可降低电动汽车用户的年电费15%（30欧元至35欧元），当车辆将电力回输至电网时，可降低25%（50欧元至55欧元）（IRENA，2023b）。

表2.2 智能充电部署的启用步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	- 大规模推广电动汽车（EVs）。 - 智能充电基础设施。 - 智能电表和能源管理系统。 - 快速充电的电网连接升级。
技术和运营方面	- 电动汽车、充电器和管理平台之间的互操作性。 - 通用标准与通信协议。 - 智能充电的数据隐私和网络安全法规。 - 标准的开发，包括计量和合格程序（即一个高质量的基础设施系统），从而生产出更可靠的产品。
政策和法规	- 对广泛实施分时电价和动态定价的政策支持。 - 使电动汽车能够参与辅助服务的监管框架通过允许收入来源来激励智能充电。 - 城市和农村地区公平获取智能充电基础设施并与设计激励措施，以支持低收入电动汽车用户采用灵活充电行为。 - 简化充电设施许可程序。 - 定义车辆到电网的代码以允许双向充电。
消费者承诺	- 消费者教育和意识宣传活动。 - 计费流程、价格和隐私的透明度。 - 弹性激励和补偿计划，以便轻松参与能源市场。

基于：国际可再生能源署（IRENA）（2023）。

图2.3 通过智能充电电动汽车降低电费



源文件：
(ENTSO-E, 2021).
注意：EUR = 欧元；EV = 电动汽车；MWh = 兆瓦小时；V2G = 车网互动。

Outlook 2026-2030

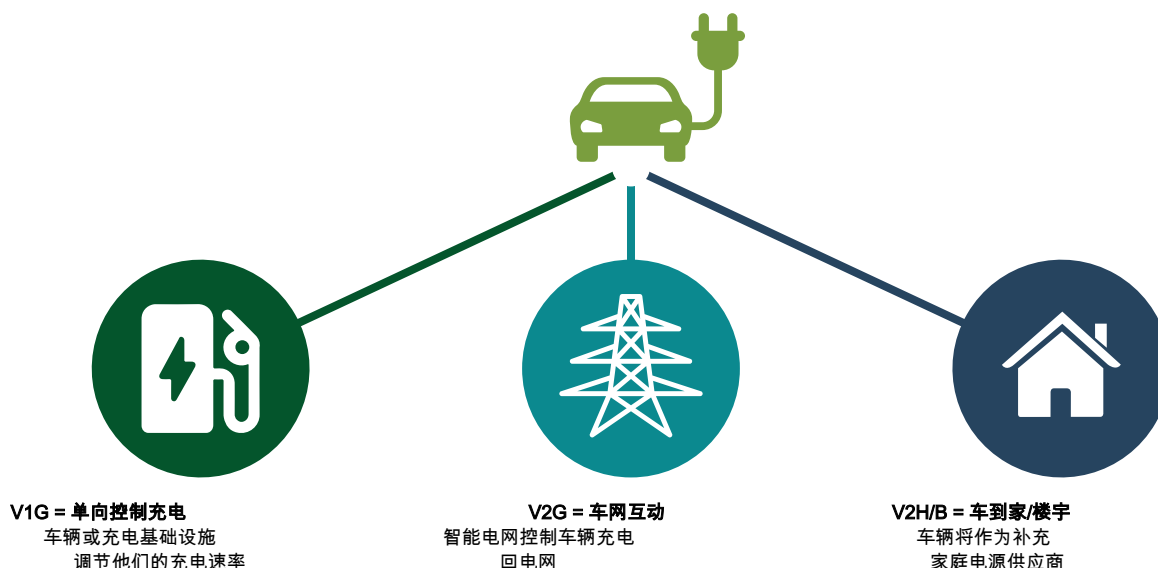
未来的数字技术进步将实现更精细的本地优化（优化电动汽车充电、太阳能发电和本地电网条件）。具有V2G功能的电动汽车的更高渗透率将使低压网络具有更高的动态响应能力，有助于确保受限电网的可靠性，并改善电压管理。其他与监测和预测相关的进步将推动电动汽车实现更优化和准确的适应性行为。

支持更广泛电动汽车普及的高级智能充电形式包括单向控制充电（V1G）和双向充电（车辆对电网或车辆对建筑），利用车辆作为电源，为电网和/或建筑提供灵活性。

V1G，它利用标准智能充电器，具备基本计量和相对简单的电网集成，已经是一项在许多地区受到法规约束的成熟且广泛使用的技术。然而，双向充电仍处于早期发展阶段，面临着挑战，包括其对高级双向充电器、更强大的通信基础设施以及能够管理反向功率流的高级计量系统的要求；双向充电的广泛采用需要升级电网安全和保护协议，并制定监管和市场框架（新标准、电网服务收入方法，例如以及促进V2G技术标准化和互操作的明确指南）。

尽管V2G比V1G（电网灵活性服务）能提供更多好处，但它也更昂贵和 例如需要进一步的技术和监管发展。单向受控充电，利用低谷时段充电，允许终端用户支付更少费用，同时提供削峰服务。因此，通常采用迭代方法更为合适；在没有针对V2G的特定监管的经济体中，可以在V2G的监管框架逐步完善的同时，尽早利用V1G提供的优势（IRENA，2023a，2025c）。

图 2.4 智能充电的高级形式



来源：(IRENA, 2019b)。

2.3 智能充电

市场参与者已使用智能设备管理：通过制造商连接到汽车、热泵或充电设备，系统能够管理设备的消耗。AI根据设备的灵活性和充电行为对设备进行集群，聚合的资产组合可以参与平衡、容量和本地灵活性市场，以及最小化电力成本（为电动汽车用户提供显著的成本节约——充电成本降低高达70%）。

例如，八爪鱼能源——以其旗舰产品智能八爪鱼Go——通过将充电时间从高峰时段转移，优化了电动汽车充电。八爪鱼能源声称智能八爪鱼Go可降低成本高达70%，同时支持电网稳定。到2025年，智能八爪鱼Go拥有超过270000名客户，管理超过2吉瓦的电力，已成为欧洲最大的虚拟电厂；它参与批发套利市场、配电系统运营商市场和平衡机制，提供需求灵活性服务并参与容量市场。智能八爪鱼Go于2024年底在西班牙推出。目前，它在那里管理着超过1500辆电动汽车。它还已在新西兰（2023年）、美国（2023年）、德国（2023年）、法国（2025年）和意大利（2025年）推出。

这种数字解决方案可以解锁需求灵活性，减少对化石燃料的依赖，并加速可再生能源的全球整合。然而，必须解决并谨慎管理网络安全问题，以保护用户隐私，并确保设备不会被恶意操作以破坏电力系统。

在欧洲联盟，智能充电预计到2040年每年可为区域能源系统节省220亿欧元（230亿美元）。电动汽车车主每年也可节省高达780欧元（813美元）的电费（或超过平均年电费的半数）。此外，智能充电有助于减轻配电网的压力，支持优化网络强化投资。

来源：(Octopus Energy, n.d.; IRENA, 2024e, 2025a)。

2.3.2 加强供应安全：预测性维护

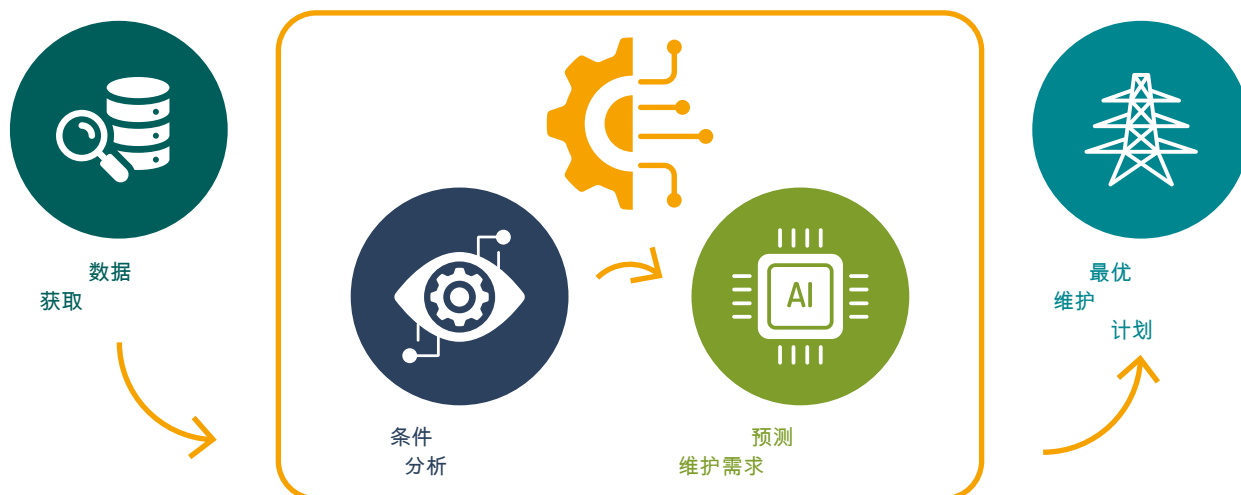
预测性维护利用数字监控设备（传感器和具有物联网功能的设备）收集的、与特定电力系统资产和组件相关的实时状态和条件相关数据。AI- *例如*

并且基于机器学习的这些数据处理产生了设备故障风险预测，并触发即时维护；这反过来最小化了停机时间，优化了系统可靠性（确保电力供应的连续性）并延长了资产寿命（平台执行官，2025年）。

预测性维护架构包括用于数据采集（传感器、物联网）、通信（5G、边缘）、分析（云）和运营可视化仪表板以提供可操作的洞察（IEA，2025；IRENA，2019c；Righetto），2021）。但尽管预测性维护依赖于基础监控等技术，其核心是利用数据分析来预测资产故障，并安排即时维护。

在电力行业中，预测性维护的应用多种多样，对于确保可靠性和效率至关重要。这包括对旋转机械，如涡轮机、发电机和泵进行振动分析；持续监测温度以检测过热；分析变压器中的水分含量和溶解气体以评估绝缘健康状况；检测高压部件中的局部放电；以及实时监测断路器、开关设备和其他关键设备的状况（Mazi Hosseini，2024；WorkTrek，2025）。

图2.5 预测性维护的基本构建块

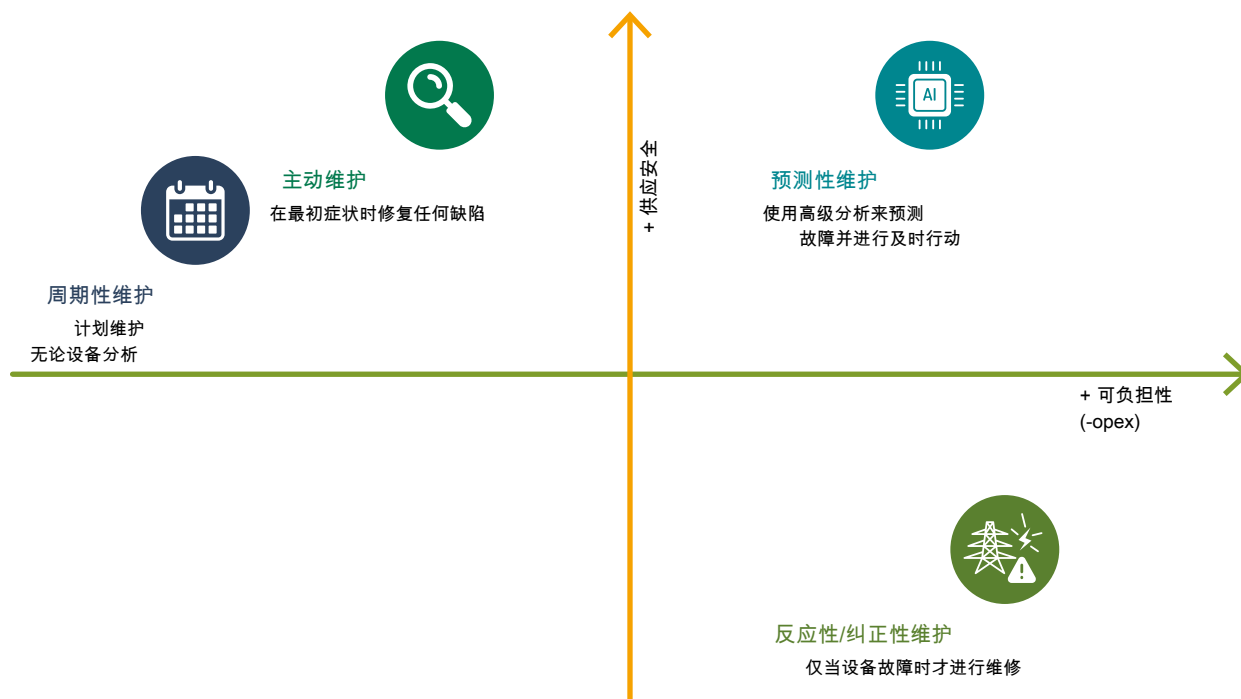


基于：(Righetto, 2021). 等

如何预测性维护提升供应安全

通过早期检测故障或异常，预测性维护可以通过主动维护计划显著减少停机时间。通过大量物联网互联传感器对电力系统设备进行持续的数据收集、分析、监控和报告，可以实现发电、输电和配电资产维护计划的安排和及时维护。这可以防止级联故障，并提高整个电力系统的供电安全性（CademiX 技术学院，2024年；IRENA，2019c；平台高管，2025年）。此外，由于避免了低效性（早期更换 例如 缺乏高级分析的替代方法通常包含健康组件）

图2.6 替代方法在电源资产维护方面的比较



2019年，恩埃勒意大利公司启动了一个使用预测性维护提高其输电线路可靠性的项目。安装了传感器以收集数据，并使用机器学习算法分析以在问题发生前检测潜在问题。结果，恩埃勒成功将停电减少了15% (Clou, 2023)。

表2.3 预测性维护部署的启用步骤

分类	关键步骤和要求	
硬件和软件	支持数字更广泛采用的研究与开发物联网传感器、AMI和数字孪生等技术。	
政策和法规	- 促进可互操作且更受青睐的数据格式的法规跨多个系统标准化的通信协议制造商。 - 国家及地区电网编码，其中包括了相关规定和指导预测性维护	
技术和运营方面	激励公用事业间数据共享的政策和程序，原始设备制造商，以及关键服务提供商 (平台) ，同时严格执行网络安全协议和标准以保护敏感的电力系统运行数据 (Won Shin)	例如基于云的等

Outlook 2026-2030

将数字孪生应用于预测性维护，可以通过不断更新的、反映电力系统物理状态的实时数据，在故障和异常检测及其他分析方面带来显著改进。

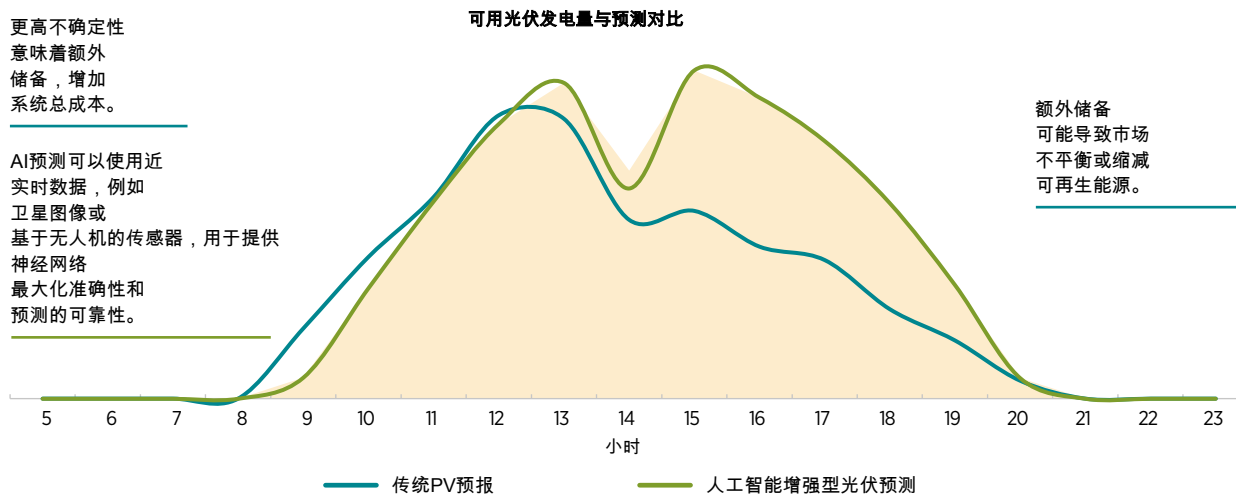
使用边缘计算进行预测性维护可能是一个未来的步骤，因为它可以减少延迟，提高安全性和可靠性，降低云存储成本，并通过消除过载的集中式数据系统来实现在业务扩展性。

预防性维护通过基于预测性维护输出的最佳行动方案的数字化建议来增加价值，超越了仅仅预测故障，而是推荐解决方案。

2.3.3 更高的可再生能源渗透率：AI增强型VRE预测

基于人工智能的VRE预测利用了相关的AI算法（神经网络，集成） 例如或其它混合方法）用于分析历史和实时气象数据以及电厂特性数据，以更精确且具有更高时间粒度地预测（从预测到临近预报）VRE发电功率水平。气象数据通过先进的气象和气候传感器收集，包括基于无人机的传感器，这些传感器能够收集不同参数的高分辨率测量数据，例如温度、气压，甚至高空风速 (NIPR, 2025)。与仅使用经典数值模型相比，人工智能模型和机器学习技术能够处理卫星图像，以生成关于太阳辐射和云层覆盖等参数的更好预测。

图2.7 AI增强型可变可再生能源发电预测



注意：AI = 人工智能；PV = 光伏。

VRE预测有助于电厂运营商有效规划运营，最大限度减少削减，并优化参与辅助市场的资源利用，支持频率调节和储备功能（Arosio和Falabretti，2023）。

如何人工智能增强的VRE预测有助于提高可再生能源渗透率

人工智能增强的VRE预测在更小的时间粒度（短期至长期预测）下提高了预测精度。对运行备用需求的减少以及随之而来的发电调度效率的提高，使电力系统管理更有效。更精确的预测还允许更多可再生能源发电厂参与电力市场，从而减少潜在的削减量以及/或不平衡惩罚（IRENA，2020）。

近期研究表明，通过将地球静止卫星图像与循环神经网络相结合，可以改进临近预报算法，以预测光伏电站未来四小时的云量。该研究在中国五个光伏电站进行了试点系统测试，并显示出预测的无云率与实际发电量之间存在强相关性（ ≈ 0.8 ）。这使得短期预测更加准确，使电网运营商能够优化备用调度，并减少对保守削减缓冲的需求。该研究强调，基于卫星的临近预报如何通过实现即时平衡，并最小化由于预测不确定性导致的削减，从而显著提高太阳能光伏的并网。（2024）。等

表2.4 AI增强型VRE预测部署的启用步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	广泛部署用于收集气象数据的创新解决方案，例如基于无人机的传感器和利用人工智能与机器学习的卫星图像。
技术和运营方面	- 开发者、资产所有者和系统之间的协议开发互操作性操作符。 - 打开天气数据数据库(例如哥白尼)可以启用资产所有者更快地实现人工智能增强型可变可再生能源预测。
政策和法规	通过市场激励提高预测精度(例如可靠奖励预测和偏差的处罚(不平衡的成本)，访问灵活性市场和支持聚合投标。

Outlook 2026-2030

上游数字技术的未来进步，这些技术构成了预测工作的基石，预计将使预测更加准确。这些进步包括开发先进的 AI 算法和代理，用于在高 VRE 比例下的 AI 驱动的能源和电网管理 (Enlitia, 2025)，云和边缘计算的普及，以及创建可扩展和可转移/可适应的 AI 模型，这些模型对于更广泛的采用和影响至关重要 (Ukoba, 2024)。等

量子计算的最新进展为改进风能预报开辟了新的可能性。量子计算机被用于模拟流体动力学方程，如纳维-斯托克斯方程，这些方程控制大气过程，但需要巨大的经典计算资源来管理。这项新能力使得短期天气预报更加准确，使风力涡轮机制造商能够优化发电，降低能源成本并提高电网稳定性。结合经典深度学习和量子神经网络的混合模型在短期风速预测中显示出更高的准确性。这些模型利用了量子计算识别复杂模式的能力；反过来，它们产生了更稳健的预测，尽管风速数据存在季节性变化，从而提高了能源产量和集成 (Hong, 2023)。等

2.4 数字化如何促进更多可再生能源的整合：案例研究

像 Solcast 和 RisingStack Engineering 这样的公司正在利用卫星图像和人工智能来预报太阳能辐照度和太阳能光伏输出，具有高空间和时间分辨率。Solcast 的三维云模型和实时卫星数据流每 5-15 分钟更新一次。电网运营商可以利用云模型和实时卫星数据流来预测太阳能波动，并适时调度备用容量。RisingStack 的深度学习模型基于 MSG-SEVIRI 卫星数据训练，在 150 分钟时间范围内实现了 7.72% 的归一化平均绝对误差。这些系统使更精确的备用容量规划成为可能，减少了保守的削减缓冲需求，并提高了太阳能光伏的整合能力 (Boros, 2025; Solcast, 2025)。

在南澳大利亚州的霍恩代尔风电场，可以找到另一个实际案例，那里的人工智能预测系统分析风模式、大气条件和涡轮机性能数据，以优化能源生产和电网集成。与传统的预测方法相比，这些系统实现了高达45%更高的准确性，使操作员能够更好地预测风能变化并减少限电。通过将实时气象数据与历史性能指标相结合，人工智能模型支持动态储备调度和更高效的调度决策 (澳大利亚可持续未来, 2025)。

2.3.4 客户增值：颗粒化可再生能源证书

能源属性证书，例如欧洲的来源保证和其他地区的可再生能源证书（REC或国际可再生能源证书[I-REC]），证明电力来自可再生来源。它们允许公司和家庭展示绿色能源的使用。如今大多数能源属性证书是每月或每年签发的。因此，验证可再生发电是否与消费同步很困难，这对于实现全天候清洁能源目标是一个重要方面。

颗粒证书，每小时发行，可促进发电与使用之间的更紧密匹配。这增强了可信度，支持需求灵活性和存储，并能够提供自动每小时报告（AFRY，2024；EnergyTag，2025）等

数字化可以提升能源属性证书系统的效率和透明度。区块链可以通过创建防篡改、带时间戳的记录；自动化流程；以及让小规模生产者参与其中来增加价值。当机构能力有限或需要跨境协调时，区块链尤其相关。区块链还支持实时监控和社区能源共享等功能，同时促进去中心化和平等获取（IRENA，2019d，2019e）。这些能力也可以通过其他技术实现，但区块链将它们嵌入到一个分布式透明的框架中。

然而，区块链能源属性证书的更广泛采用取决于监管更新和与现有注册系统之间的互操作性。在成熟市场，对中央注册系统的信任度高，因此，区块链通常是补充而不是取代这些注册系统。在新兴市场，加密验证有助于弥补较弱的制度框架，前提是认可的系统（如I-RECs）的集成得到保持。

如何能源属性证书为客户增值

基于粒度证书的智能系统设计通过融合精确性与透明性为顾客增值，建立信任。粒度化、带时间戳的GO/REC——匹配每小时消耗——赋予买家透明、不可篡改的清洁能源使用证明，使它们能够证实其环境、社会和治理方面的声明并保护声誉。区块链通过减少管理负担以及降低市场摩擦，进一步简化了GO发行和交易，使生产者、能源社区和工业用户能够直接高效地获取证书。这些功能提升了消费者的信任，增加了市场参与度，并将GO从单纯合规工具提升为战略资产，用以区分品牌和工业消费者，支持脱碳化进程，并使国内客户参与其中且得到赋能（Powerledger，2023）。为确保与现有GO/REC系统的兼容性，平台必须支持与遗留注册系统的集成，并实现跨国家区域性系统的无缝数据交换。

表2.5 能源属性证书部署的启用步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	- 包括但不限于区块链的软件平台的部署。 - 国家注册表之间的互操作性及新的数字解决方案。
技术和运营方面	用于数据存储和智能合约的开源标准。
政策和法规	- 激励小时级来源/可再生能源保证的法规证书（GO/REC）系统。 - 跨不同行业鼓励或强制使用能源证书。 - 新兴市场中的飞行员，数字工具可以填补市场空白基础设施。
消费者承诺	- 消费者教育和意识宣传活动。 - 通过试点项目与消费者互动。

Outlook 2026-2030

到2026年，颗粒化证书预计将超越试点项目进入定向部署，特别是在可再生能源渗透率高和电力交易自由化的市场中。早期采用可能会集中在工业企业电力购买协议上，在这些协议中，精确、可审计的溯源需求已经很高。基于区块链的系统的监管认可将是规模化采用颗粒化证书的决定性因素。

2026年至2030年间，可能会出现三大主要趋势。第一是细粒度证书与需求响应、储能项目等灵活性服务相结合，使工业和居民消费者能够通过将消费与可再生能源的可用性相匹配来最大化财务和环境价值。第二是能源社区的扩展，当地合作社和市政府采用细粒度证书系统来认证、交易和消费当地产生的可再生能源，这将加强社区内的参与并使价值留在当地经济中。第三是细粒度证书在企业采购标准中的普及化，在区块链和其他数字赋能工具的支持下，领先的多国公司可能会将其作为可再生能源采购的合同要求，建立新的市场规范（AFRY等人，2024年；WRI，2023年）。

2.5 真实案例：颗粒证书如何为客户增加价值

法国电力公司在新加坡的一家电动汽车充电站测试了自动化代币化可再生能源证书（RECs）。新加坡的电动汽车车主，他们通常倾向于使用可再生能源为车辆充电，可以购买RECs。

充电站连接到一个微电网，概念验证还收集了微电网产生的绿色能源数据，除了发行可再生能源证书（REC）。这种安排是为了确保微电网的绿色能源生产与电动汽车充电的消耗相匹配（Ledger Insights，2023）。

在智利，谷歌与iREC标准合作，测试了位于该国的数据中心每小时可再生能源发电与其消耗的匹配情况。试点表明，粒度证书增加了透明度和可信度，因为它们显著提高了与可再生能源发电相匹配的消费份额（国际跟踪标准基金会，2022年）。美国CleanCounts（前身为M-RETS）注册中心在数据库框架内支持每小时可再生能源证书；它为生产商提供了选择每小时或每月可再生能源证书的选项（CleanCounts，无年份）。

在南非，Fuel Switch启动了非洲首个基于区块链的REC交易系统。它与国际REC系统相集成，允许企业和租户实时跟踪和交易证书；这反过来减少了成本，并在中央注册系统发展不完善的市场中建立了信任（非洲新闻社，2025）。

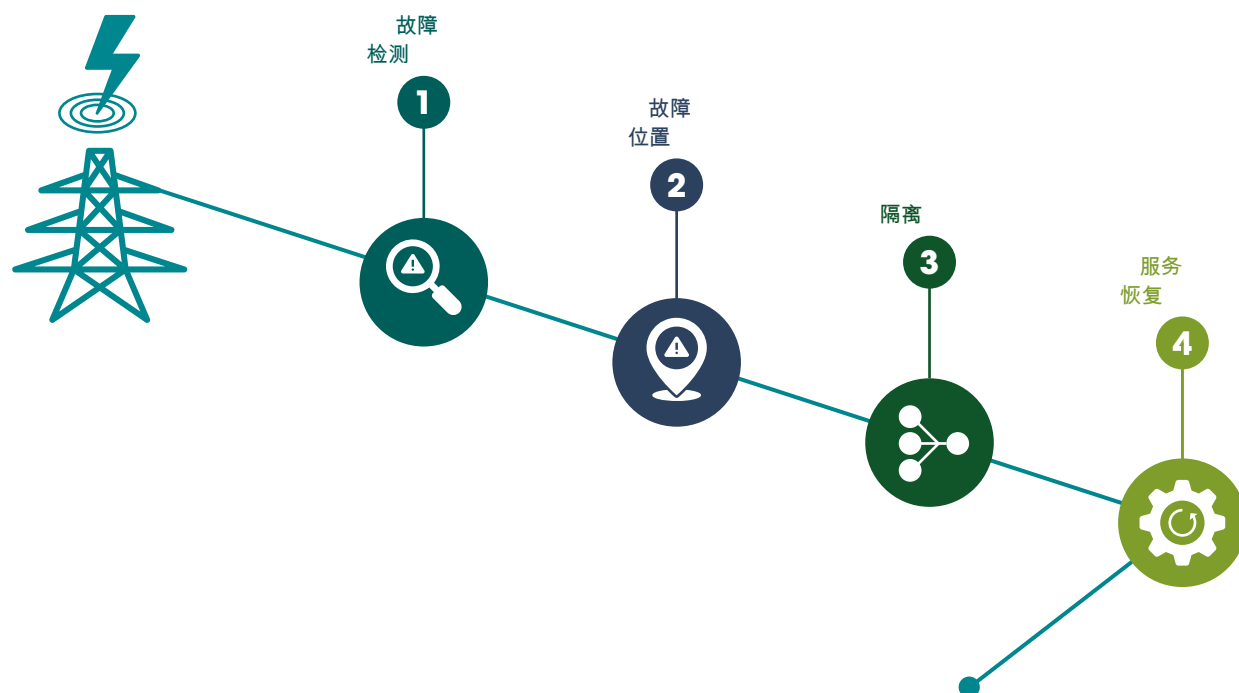
2.3.5 提升业务性能：未来控制中心及自动故障定位、隔离、服务、恢复（FLISR）

在运营优化价值集群中，所谓的未来控制中心——即集成先进分析、自动化和人工智能时管理电力系统的节点——正在重新定义系统操作员和公用事业公司如何管理日益复杂的电力系统。随着新的监控技术从传感器、相量测量单元和智能电表产生大量数据流，出现了提取有意义见解和自动执行最优和即时运营操作的机会。

在这种环境下，自动化FLISR是一项核心技术。其操作涉及四个自动步骤：

1. **故障检测**：智能算法持续分析从scada系统、中继器和现场传感器接收的数据，以识别表明故障的异常情况（g-pst, 2023）。
2. **故障定位**：这些算法将多个传感器输入与网络拓扑模型相关联，以确定故障位置，而无需等待现场确认。
3. **隔离**：切换指令自动发送到远程控制断路器或开关，包含受影响区域并防止设备损坏。
4. **服务恢复**：该系统动态地重新配置网络。电力通过备用馈线重新路由，并为未受影响的区域恢复供电，通常在几秒钟内完成。

图 2.8 FLISR 技术中自动化的步骤



这种实时闭环流程是“未来控制中心”举措的有机组成部分，代表着根本性的运营转变：决策和执行在几秒钟内完成，人工操作员仅在必要时进行监督和干预，而不是控制每一步（G-PST，2024）。

如何自动化FLISR提升业务绩效

自动化FLISR消除了故障排查和切换中的许多手动步骤，减少了人员调动、差旅和加班的需求。动态网络重构避免了不必要的设备压力，平衡了网络负载，并使维护计划更加精准。这有助于推迟对新基础设施的资本投资。更短的停电时间最大限度地减少了未供电量，保证了收入流。达到或超过可靠性目标还有助于避免基于绩效的框架中的监管处罚，进一步增强了财务表现（T&D World, 2019）。

这种方法超越了传统监控。洞察被转化为即时、自动化的行动。这意味着以更低成本更可靠地运行，因为公用事业公司可以在不按比例增加人员或成本的情况下扩展运营复杂性，并能从这些自动化中受益。通过在几秒钟内而不是几小时内恢复服务，FLISR不仅提高了可靠性指标（系统平均中断持续时间指数和系统平均中断频率）*例如*索引），但它也增强了抵御极端天气和高比例分布式电源（DER）场景的韧性。

表 2.6 FLISR 部署的启用步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	广泛部署高性能分析和人工智能驱动自动化，可以解释每百万个数据点 二发并实施安全可靠的控制动作（ G-PST，2023 ）。
技术和运营方面	- 互操作性标准及通信进展无缝集成现场设备、控制软件和操作界面。 - 通信冗余。 - 为解决网络安全问题所做的努力，正如示威者所证明的那样构建数字弹性电网的必要性和益处（ 代尔夫特理工大学，2022 ）。 - 操作员的培训计划。
政策和法规	激励公用事业改善可靠性指标的法规框架不应按比例增加运营支出。
消费者承诺	消费者教育和意识宣传活动，亦即通过实地验证影响：效用试验表明，FLISR（故障定位、隔离和服务）恢复）可以将客户经历的干扰减少高达45%并减少停机时间超过50%，这直接转化为避免成本和更高的服务质量(T&D World, 2019)。

Outlook 2026-2030

到 2026 年，领先的公用事业公司将通过在下一代控制中心广泛部署 FLISR，展示运营支出和停电指标的明显降低。

在2026年至2030年间，FLISR与DER管理系统的集成将实现协同故障恢复和DER调度，在统一的操作工作流程中运行。在本十年末，基于云的、AI增强的控制室平台将把这些能力带给更小的运营商，将成本效益和可靠性提升作为该行业的标准做法。

在2030年以后，量子计算在解决大规模非线性优化问题（如潮流计算和事故分析）方面比经典方法具有显著的性能优势，使其成为未来控制中心的理想候选者。传统算法在处理高维实时电网数据时往往难以扩展和收敛。相比之下，量子退火器可以同时探索巨大的解空间，并更快地识别最优或近优配置。在自动FLISR和控制中心运营的背景下，这意味着更快的故障隔离、更高效的电力重新路由以及分布式资源的更好协调。研究表明，量子增强优化可将计算时间缩短几个数量级，即使在未来高度复杂的电网场景下也能实现近乎即时的决策（Quantum Quants, TNO, 2024）。

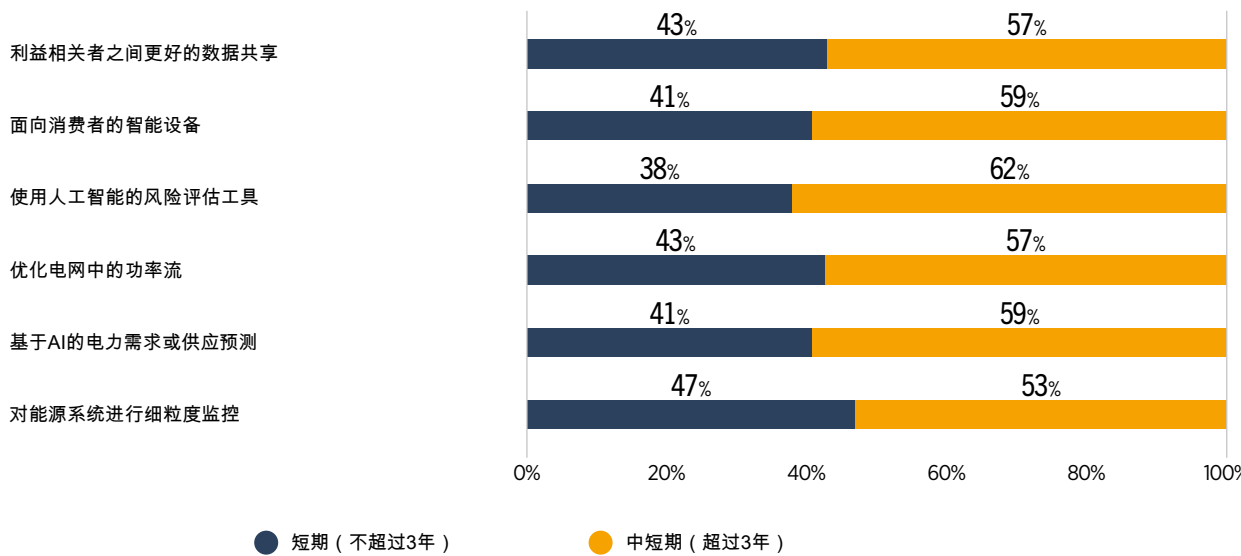
2.6 FLISR的现实应用

澳大利亚联合能源公司实施了一项以FLISR为中心的全面配电自动化战略，并将该战略与其先进的计量基础设施和停电管理系统集成起来。这创造了一个高度响应的自动化电网控制系统。联合能源公司报告称 **10倍的回报** 从其五年前的FLISR实施中。这家澳大利亚电力分销商报告说，FLISR的实施使其能够 **减少** 通过修复故障的平均时间缩短30分钟（Oracle，2022）。

3. 实施数字解决方案：挑战与战略响应

如前一章所述，数字解决方案显著降低了电力成本，并提高了系统可靠性和可再生能源渗透率，并带来了其他诸多好处。因此，电力系统的数字解决方案是加速能源转型、在所需规模上缓解气候变化的关键杠杆，同时通过节省开支或改善全球能源获取为人们、企业和公共预算创造经济机会。尽管数字解决方案通过已验证的应用案例越来越受到人们的重视，但实施障碍依然存在。根据IRENA在2025年对成员国进行的调查（参见附注了解调查方法），大多数受访者并不相信在接下来的三年内，他们所在的国家会出现任何所描述的应用案例示例（如图3.1所示）。

图3.1 数字化用例影响的预期时间线



注意：AI=人工智能。

现有的几项实施障碍通常相互关联。在IRENA的2025利益相关者咨询中确定的关键障碍² 过程、调查和文献综述包括：

- **基础优先——数据、互操作性和网络安全：**

负 高质量、可访问和标准化的数据 为电力系统运行和相关活动提供的数据收集相关的新角色和责任的相关结构变化日益受到重视（必须要有明确的数据所有权和访问控制角色）。*例如* 由于敏感性和安全问题，系统运营商等利益相关者对数据和模型的可访问性受限，可能会延误数字孪生等数字解决方案的开发和试用。

网络安全问题。 数字化转型与网络安全问题密切相关，因为将更多系统和设备连接起来，为恶意行为者提供了更多的入口点。对数字系统和人工智能的依赖程度越高，网络中断事件对社会和经济生活可能造成的潜在影响就越大。

- **能力建设与信任：**

– **技能。** 解决数字化需求所需的技术工人短缺日益严重。创新的速度超过了教育和劳动力发展的步伐，这一趋势在数字化和能源等领域的确令人担忧。

– **利益相关者意识低或缺乏信任。** 因为对数据隐私、设备可靠性以及人工智能的“黑箱”性质存在的恐惧，怀疑很普遍。

- **支持环境：**

– **规则** 数字化能源系统通常存在碎片化、适应缓慢，或在某些情况下根本不存在的问题。针对电网运营商和公用事业公司的监管激励往往优先考虑传统硬件，例如输电线路或变压器，而非数字解决方案，因此有必要考虑更全面的监管方案和技术中立方法。

– **有限的财政激励。** 许多地区要么没有专门针对数字化转型项目的融资机制，要么即使存在融资机制，也仅限于试点项目。此外，在某些情况下，激励措施是针对部署某项技术或某项基础设施——被认为是问题的解决方案——而不是针对期望的服务或结果；这限制了数字化创新。

– **基础设施准备不足。** 物理信息技术系统和数据网络，需要支持数字解决方案，是不够的，特别是在农村和偏远地区。传统基础设施需要更新和转型。

² 本节介绍了源自全球调查（参见附件中的方法论）、专家访谈和基于文献的研究的见解。这些来源共同提供了世界各地为在能源转型背景下改进协调而确定的关键优先事项的全面概述。

3.1 实施障碍：理解挑战以定义行动

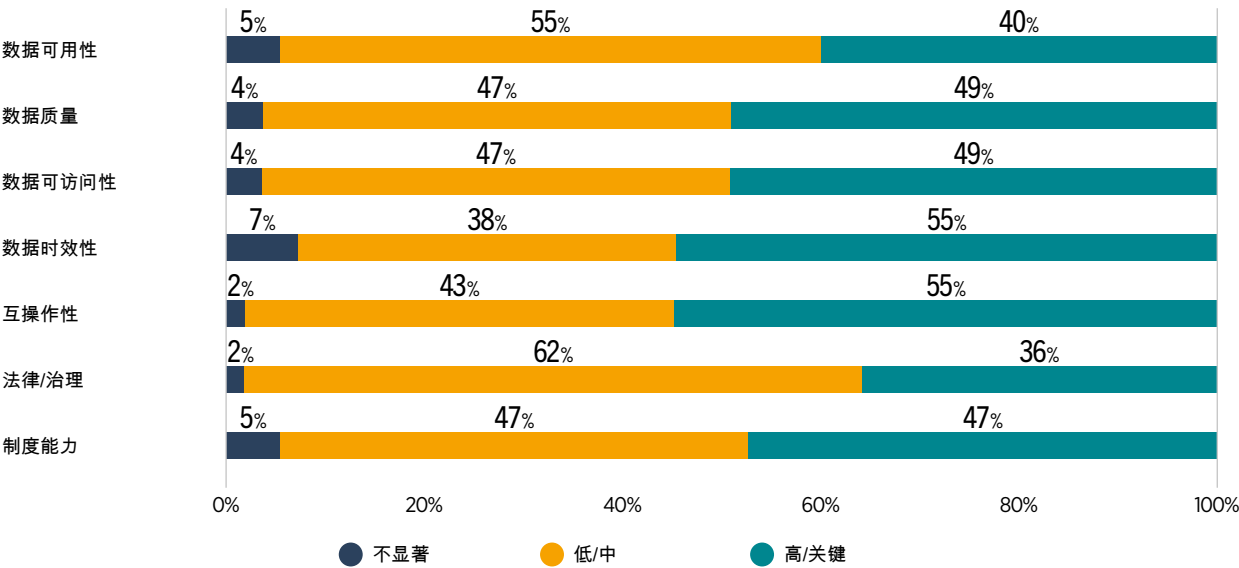
3.1.1 数据和互操作性

电力系统中的数字解决方案需要数据以对新技术进行精确监控、分析和集成。然而，有时挑战并非数据本身不足，而是查找、清理和组织数据所需的工作量。这些步骤可能占据从业者80%的时间，只留下20%的时间来分析数据（实用学院，2022）。

此外，糟糕的数据治理加剧了其他挑战（技能和资金差距），这进一步证明了 例如 其系统性质。根据近期研究（El Zein和Gebresenbet，2024年；G7，2024年），数据缺乏及时性和互操作性是能源行业实施数字化解决方案的重要障碍——55%的受访者同意（见图3.2）。

互操作性是指不同设备、平台和组织能够通过标准化协议和格式无缝交换、解释和使用数据的能力（ENTSO-E，2019）。互操作性是又一个实施障碍。

图3.2 能源领域实施数据的感知障碍



另一个挑战是偏见。在具有系统性偏见的能源数据集上训练人工智能模型，这些数据集不成比例地代表了某些地区、人口或技术，会导致不准确或不公平的决策。例如，如果数据集主要是在城市数据上训练的，那么它们可能会低估农村人口的需求（沈，2025）。

关键操作： 制定数据互操作性区域框架；为任何类型的跨机构或跨组织数据共享定义原则、标准和层次（法律、组织、技术、语义）。明确数据所有权和访问控制的规则也至关重要。同样，应明确外部方的角色；这将通过为数据共享定义透明的边界来维护合规性。

示例：一些国家已制定了一个专门框架，解决多层互操作性问题：例如欧洲互操作性框架（EIF），旨在为成员国公共部门和欧洲共同能源数据空间之间的信息交换建立框架，旨在促进能源价值链中关键参与者的无缝数据交换。建立数据空间的工作正在进行中，正如欧盟能源系统数字化行动计划（欧洲联盟，2022年）所规定的那样，主要是因为目前开发的框架解锁了灵活能源资源参与电力市场的可能性。加拿大（数字标准）、美国（网络中心操作产业联盟）和其他国家也已建立了类似的框架（Berkhout，2023）。等

虽然这些通用框架为电力系统数字化奠定了基础，但针对特定行业的举措在实践中证明了它们的影响。以下是一些互操作性项目为能源行业带来的效益超越效率提升的示例：

- **创建更动态的能源市场：**丹麦能源网的DataHub互操作平台，它使客户、供应商和其他第三方之间能够进行数据交换，为消费者创造了竞争性的能源市场。
- **从分布式能源（DER）中释放电网灵活性：**一个例子是能源网的“数字脊柱”，它实现了从分布式能源资源（DERs）解锁灵活性的实时通信，如在澳大利亚的EDGE项目中所证明。另一个例子是CharIN项目，该项目基于车辆与电力基础设施提供商之间的互操作性测试，确保电动汽车可靠地并入电网；其目标是验证通信和充电服务。
- **提升电网规划与运行** 智能电网平台（E.ON One），作为一个智能电网技术平台，将多样化的电网数据整合到一个平台上，以数字化和自动化从电网影响研究、短期和长期电网规划到电网监控的过程。结合AI驱动电网规划软件解决方案，该平台评估电网扩展措施的影响，并帮助加速网络规划流程。

这些例子共同表明，互操作性是实现电网先进数字解决方案、推进能源市场并优化电网管理等多项目标的关键推动因素。

网络安全—隐私

电力系统数字化在应对网络威胁时，对数据安全和隐私保护带来了严峻挑战。随着系统日益互联并依赖实时数据流，从运营指标到消费者使用模式的数据量和敏感度大幅增加。这引发了关于数据未经授权访问、数据泄露以及个人信息滥用问题的担忧，尤其是在数据保护框架薄弱的司法管辖区。

尽管发达经济体通常拥有更强的监管和技术保障，但由于制度能力有限和网络安全治理碎片化，新兴市场和发展中经济体（emdes）可能面临更大的风险。在一项由...进行的调查中... **非洲电力公用事业协会（APUA）**，大约85%的协会会员公司报告已经遭受了网络攻击。将近40%的公司报告每年被攻击多次。调查中69.3%的公司每年在信息安全上花费不足300000欧元，平均营业额为713百万欧元，或0.04%（APUA，2022）。应对这些挑战需要协调的政策行动、强大的加密标准和在整个数据生命周期中的明确问责机制。

“随着广泛数字化，针对公用事业系统的网络攻击在非洲正日益成为关注焦点，导致一位受访者说。”因服务中断和重大经济损失，

关键操作： 在为本报告进行的IRENA利益相关者调查中，约71%的受访者表示需要紧密 **不同行为者在制定网络安全措施中的协调** 确保电网安全，同时防止网络安全标准成为数字化道路的障碍。

响应示例包括：

- **区域响应中心：** APUA正积极推动建立 **区域虚拟响应中心** (在佛得角、肯尼亚或毛里求斯)以保障数据并在发生时提供快速响应 *例如* 网络事件。
- **产业主导型应对：** 可以通过产业主导的倡议——可信能源互操作性联盟来说明，该联盟的创始成员包括E.ON、Intertrust、JERA和Origin Energy等。零信任描述了一种网络安全方法，在这种方法中，每个交互（用户、设备、应用程序）都进行持续验证，无论其来源地如何。

网络安全——物理基础设施

数字化转型也使物理电力基础设施更容易受到网络威胁。随着操作技术与数字控制系统更加集成，远程操控、破坏或中断的风险正在增加。这对于变电站、输电线路和分布式能源资源等关键基础设施尤其令人担忧，这些设施越来越多地通过自动化系统进行管理。针对工业控制系统的网络攻击表明，数字漏洞如何转化为实际影响，包括运营故障和大规模服务中断。

关键操作： 虽然网络隔离和入侵检测系统等缓解策略在某些情况下已被证明是有效的，但它们的部署在不同地区是不均衡的。发达经济体通常拥有更成熟的网络安全协议和事件响应能力，而新兴市场和发展中经济体可能因基础设施陈旧和技术专业知识有限而面临挑战。威胁暴露程度和制度准备情况的地域差异意味着网络安全策略必须是针对性的，需要在数字创新和强大的风险管理之间取得平衡。

监管示例： 在欧洲，网络安全责任主要由市场参与者承担，而监管机构制定关键标准。每家公司或系统运营商都有责任开发符合欧盟通过网络安全指令（NIS2）、网络弹性法案和特定行业网络规则等框架所概述的通用监管指南的网络安全解决方案：

- The **NIS2指令** 要求成员国应对关键部门的网络安全，包括电力系统。它强制要求建立严格的风险管理、事件报告和业务连续性标准。
- 欧盟的 **网络弹性法案** 它补充了尼斯2指令，并为所有数字产品设定了区域性的网络安全要求。它确保数字产品在设计 and 功能上是安全的，在上市出售前会定期更新并符合CE标志。
- **网络安全代码欧盟电力部门** ,于2024年发布，在电力部门建立了一个网络安全风险评估的循环流程（欧洲委员会，2024）。

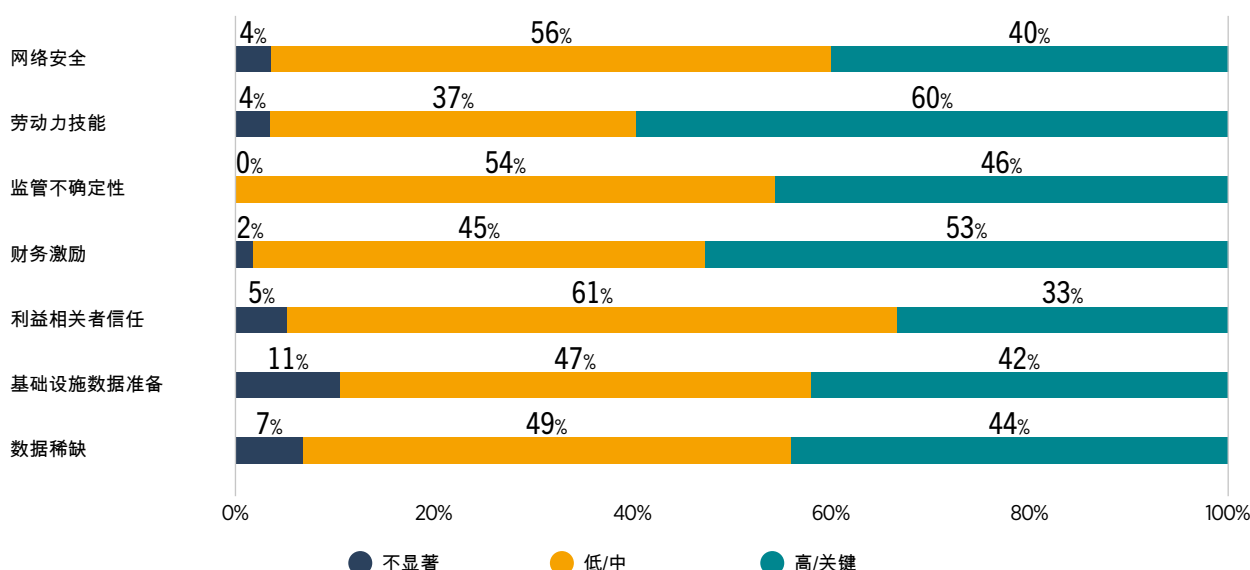
公共采购示例：一种更具体行动可以是针对网络安全问题的公共采购规则的完善。这种方法的例子是美国（ NASEO，2024年）开发的关于太阳能资产国家采购中应考虑的网络安全问题的工具包。

3.1.2 数字技能

在为这份报告开展的IRENA利益相关者调查中，60%的受访者认为专业人才短缺是电力系统数字化的一项关键或高度障碍（图3.3）。与IRENA的发现一致，英国能源系统推进署和欧盟委员会的最新调查也强调了对能源领域数字化构成阻碍的显著技能和技术差距（尤其是在人工智能、大数据和网络安全方面）（Catapult UK, 2023；欧洲委员会, 2025）。

在他们的《利用人工智能促进繁荣》声明中，七国集团认识到以人为本的AI方法的重要性，并承诺促进跨境人才交流，以更好地将AI专业知识与商业相结合（七国集团，2025年）。然而，这种认识应超越这七个国家，并推动更广泛的国际合作。基于这种认识，调查、访谈和案头研究的证据突出了需要解决的几个实际挑战。

图3.3 能源行业对数字解决方案的认知障碍



根据当地情况提升技能和再技能将确保电力系统各级都有足够的人力资源来推动转型。 向技能提升和培训方面的投资被确定为政府可以采取的最重要的政策行动，以推动能源部门更公平的数字化（70%的受访者同意这一点）。公共部门和私营部门对教育的资助带来了具体的好处：一项研究发现在人力资本投资得分上增加一个百分点，会导致一家公司的创新能力和数字化适应能力显著提高（库兹明，2024年）。虽然未来某些能源系统的工作可能需要基本的信息 等 技术培训以及仅限于能源方面的中等培训，将会有许多员工——从非常高技能到低技能——需要某种形式的数字素养和应用知识。

在EMDEs，技术领域缺乏专业技术人员是一个主要问题（Pereira，2025）。有 等 一个技能差距没有一劳永逸的解决方案。微中小型企业必须实施全面的培训政策框架

那些考虑当地环境（IRENA行动联盟，2023年）。随着数字化加速，确保数字技术不会扩大发达国家和发展中国家之间的差距至关重要，而应作为弥合这一差距的推动者。许多国家所谓的“公正转型基金”可能是确保能源部门公平包容性数字化转型的金融机制之一，特别是对于那些依赖化石燃料的地区和工作岗位。

关键操作： 资助或共同资助的培训项目对支持技能提升很重要。将能源领域的现有财政激励措施与专注于数字化方向的技能提升相结合，也能够促进额外的私人部门投资。除了开发用于再培训的职业技能培训和专项计划之外，捐赠者或政府可以考虑将数字基础设施投资与强制性或激励性培训相结合。这可以加强技术采纳和劳动力准备。因此，此类项目的设计需要包括当地参与者。

示例： 西非国家经济共同体（ecowas）的可再生能源和能源效率中心以及非洲电力卓越中心网络已经提供能源行业的数字化培训，以及其他相关主题，但他们的目标是不同的利益相关者。这些组织清楚地说明了区域行为者与国际机构合作，不仅可以为能源行业提供数字设备支持，还可以将这种支持直接与培训和能力建设联系起来。

“我们做了许多关于能力建设和数据协调的地区项目，现在各国需要”
- 塞迪科·杜卡，基础设施能源专员 采用区域政策并相应更新。”
数字化，西非经济共同体。

将数字技能需求映射到分析以强化和实施与行业相关的项目

伴随着清晰的政策和能源规划，将支持能源行业的成功数字化。对区域和全球技能需求的共同理解可以促进专业人士的跨国流动。这种方法将有助于提高效率，促进知识交流，并确保技能与需求的更好匹配。

关键操作： 在进行下一步之前，所有国家都应评估正在发展的技能是否与新兴需求和未来目标相一致。国际可再生能源署（IRENA）的“能源转型技能提升行动计划”（IRENA，2025d）旨在通过展示全球范围内的技能提升和工作力发展努力，推动国际合作，并利用集体专业知识，为可持续能源未来做出贡献。该平台正在努力建立一个更加完善的全球技能格局意识，鼓励复制有前景的倡议，激发更雄心勃勃的行动，并邀请跨国合作。

示例： 加拿大人力资源部（EHRC）与未来技能中心合作，启动了一项计划，以评估和应对人工智能对加拿大电力工作队伍的变革性影响（EHRC，2025）。

满足能源部门不断增长的需求需要提升数字技能和扩大劳动力池。**社会劳动力参与率需要扩大** 为该行业扩大可用劳动力池（经合组织，2025年）；需要提高女性劳动力的参与率（目前在可再生能源领域为32%，在数字经济领域为26% [卡罗尔，2025年；国际可再生能源署，2019年]）。鼓励年轻女性参加数字技能计划，使她们能够更广泛地获得科学、技术、工程和医学（STEM）领域的机遇，包括信息技术。这有助于构建规模更大、更具创新力的劳动力。

关键操作： 虽然许多项目分别关注数字化或可再生能源中的女性，但很少将这两个领域整合到一个单一的培训计划中。应进一步收集性别分解数据（联合国，2025年）。

示例： 当地倡议，例如远程能源和太阳能姐妹组织，将数字培训与可再生能源相结合，并专门为女性设计（远程能源，2025年；太阳能姐妹组织，2025年）。

电力系统转型，包括分布式能源的增加和更远的远程访问，将需要 **提升劳动力的数字素养以及整个人口的数字素养**。数字化在能源和交通领域的应用可以强化既定参与者的影响力，限制社区和被排除群体从中受益 (Sareen, 2023年)。若不注意这些方面，数字化转型工作可能导致 等电阻、低吸收率以及拒付或窃电等问题。从能源规划中可知，忽视用户行为和偏好会导致解决方案无效 (IRENA, 2025)。

改变对大多数人来说并不容易，因此适应新技术，如智能计量，一直很缓慢但受访者指出。现在终于显示出一些好处，这些改变了人们的看法，”

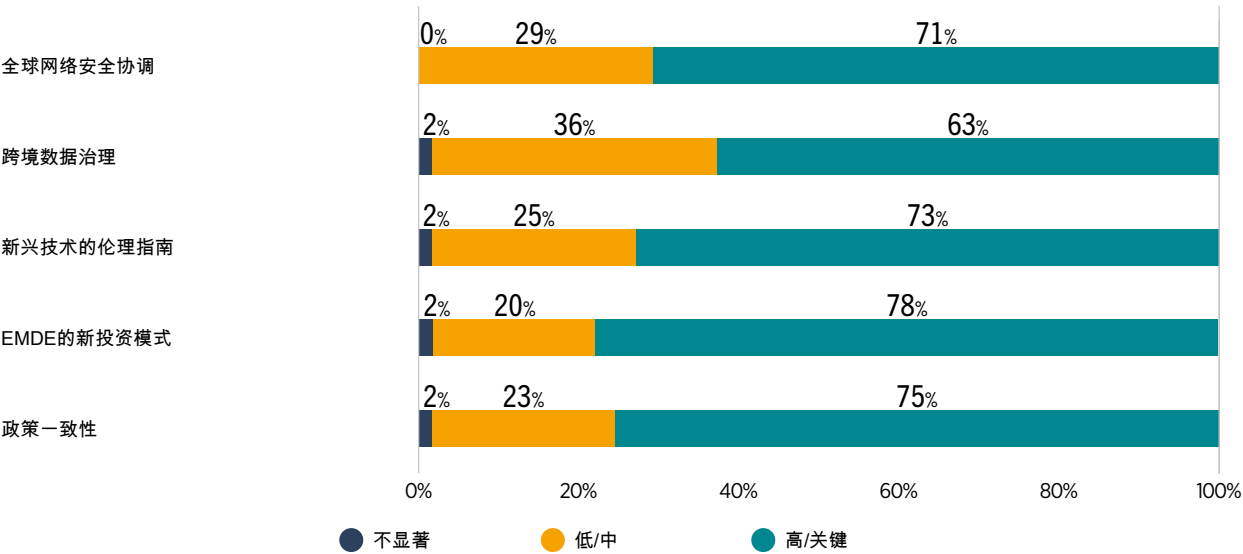
关键操作： 需要加强同最终用户以及公民教育的沟通，以建立他们的信任和理解，并促进他们在数字化进程中的参与。关键领域包括提高公众意识、透明度（人工智能作为“黑箱”）、减少对人们潜在的负面影响以及公平发展。早期教育也可以从长远上支持社会转型和公众接受（通过正式和非正式途径向儿童和青年展示）。即教育）。

示例： 一个例子是“AI for Good”，这是一个由国际电信联盟（ITU）与联合国伙伴共同领导的全球性运动，它推动利用人工智能应对全球性挑战，包括公共信任 and 用户包容。

3.1.3 促进因素

数字化转型和人工智能驱动的电力系统效率提升需要技术和商业模式创新方法以及投资。大约53%的受访者和许多国际 renewable energy agency (IRENA) 调查的访谈对象报告说，数字解决方案的实施受到缺乏足够的财政激励和市场采用数字技术的规模准备情况的阻碍（图3.3）。在访谈中，利益相关者指出不明确的投资回收机制是一个挑战，这造成了不确定性并导致了延误。此外，如图3.4所示，当被问及支持数字能源解决方案的全球优先事项时，78%的受访者同意EMDEs（经济最不发达国家）需要新的投资模式。

图3.4 支持数字能源解决方案的全球优先事项



对数字解决方案的投资回报的不确定性，可能会导致人们倾向于更换或加固正在老化的传统电网资产，例如。虽然加固通常受益于清晰且受监管的还款，但能够实现优化（直接线性评级系统）的数字创新往往面临 例如 由于其未包含在网格补偿计划中，因此存在不确定的回报。许多与新技术不兼容的旧系统的逐步淘汰进一步延长了过渡期并提高了成本。

“我们面临着严重的资金限制，因为主要依赖国内消费的电网无法一位EMDE受访者解释说。 从关税中产生足够的收入，”

提供数字创新服务（如需求响应、虚拟电厂和增强客户体验）等新收入增长机会的创新方法，为投资创造了商业案例。以下几例说明了这些创新方法。

基于绩效的激励 为实现数字解决方案，根据其预期成果（提高效率或为电网运行提供附加价值）的绩效对公用事业进行补偿 例如 (de Olivera , 2025). 绩效激励也可以被视为补充性措施 等 传统的服务成本环境 (Joskow, 2024)。激励将与服务电网的可量化关键绩效指标挂钩，这些指标可以根据预定义的目标单独开发。

示例： 对澳大利亚绩效激励计划的一项评估显示，它在提升效率和降低成本方面取得了成功（AER，2023）。

监管沙盒 允许在真实世界环境中，在有限（时间）框架内测试数字解决方案和商业模式。这些测试是为了发现解决方案和模型中的差距，结果将为制定适当的监管措施提供信息，以实现市场准入。

示例： 到2025年，德国启动了其面向多个行业（经济事务与能源部，2025）的监管沙盒创新门户的试点运行。摩尔多瓦（欧盟候选国）于2025年2月启动了专门的能源沙盒机制（能源部，

摩尔多瓦共和国，2025年）。联合国亚洲和太平洋经济社会委员会和联合国经济及社会部与哈萨克斯坦政府合作，开发了一套专门用于能源行业数字化转型的沙盒工具包（UN ESCAP和UN DESA，2024年）。

示例：马来西亚的国家技术和创新沙盒涵盖10个行业，包括能源。自2020年以来，在900多个申请中，有133个获得了资助。该沙盒在创新的不同阶段陪伴企业，并促进产业与政府之间的交流（科学、技术和创新部，2024）。

支持邻近/社区聚合模式的监管框架——允许社区或邻近消费者和生产者共享和优化能源资源可以解锁显著的效率提升和成本降低。当监管允许集体自我消费或本地能源共享，如在社区内或通过连接附近的微电网时，数字化转型变得不可或缺：智能计量、结算和价格响应平台等应运而生，为报告中早先探讨的多样化效益提供支持。集体自我消费框架使没有屋顶接入（如公寓居民）的消费者能够参与，他们原本无法成为产消者；*例如*在葡萄牙的研究中显示，社区项目使被动消费者能够节省高达48%的成本，同时也减少了配电网的压力（Belmar，2023）。等

微型电网是技术的绝佳入口。它们本质上是农村和分散的，你必须
受访者指出。*形成集群。然后，它们需要一个公司来管理这个集群，”*

示例：贝克勒（2024）探讨了在埃塞俄比亚通过互联微电网集群的影响。等
针对三个独立的系统，然后进行技术经济分析。通过对比独立运行和集群式微网发现，尽管互联增加了成本，但集群系统在技术、经济和可靠运行方面的效益与独立微网相当（Bekele，2024）。等

示例：西班牙最近一项允许在5公里半径范围内进行集体自消费的法规，为社区能源聚合设立了全球基准。安装了智能电表的居民和企业被允许共享太阳能发电、储能和需求响应等资源。这种资源共享解锁了加速本地可再生能源整合的数字商业模式（MITECO，2025）。

长期能源规划是一个有效工具，用以解决能源转型中的关键投资缺口。数据驱动的清晰能源规划，它能够缓解投资风险，增强能源安全，并引导资本流向可持续能源和基础设施，因被视为弥合这一缺口至关重要而受到再次关注。2024年，随着巴西担任G20轮值主席国，全球能源规划联盟应运而生，旨在支持各国完成其转型之旅。

能源规划也能帮助政府明确未来技术需求，并确保及时得到满足——例如通过改进协调机制，如前一节所示。与数字部门更好的交流，包括通过质量保证和透明机制，可以改进采购流程，并加强规划流程。世界银行表示，新兴和发展中经济体中的机构不仅在管理智能电网服务方面缺乏能力，而且在为私营部门采购它们方面也缺乏能力（ESMAP，2018）。国际电信联盟的一份报告强调了等
如何通过投资协调来帮助弥合数字基础设施的投资差距，并为各国提供一个现成的框架（ITU，2025）。

关键操作： 将数字化纳入能源规划，以促进投资和各行业之间的更好协调。

示例： 在印度，电力网公司在其输电线路旁部署了光地线电缆，实现了电网的远程监控，并为商业电信使用提供了宽带连接（ITU，2021）。

将数字化目标纳入电网 **国家自主贡献 (NDCs)** 可能是发出信号的一步，即人工智能在减排方面的应用是国家优先事项。各国越来越多地将电网升级/现代化纳入其气候变化减缓措施中，如《国家自主贡献》文件第三版（NDC 3.0）所示。此外，IRENA还提倡与其他国家能源和气候计划保持一致，在这些计划中，数字解决方案可能已被考虑在内。

关键行动： 考虑在NDC修订中解决数字解决方案的纳入问题。

示例： 阿拉伯联合酋长国的NDC 3.0 提到了人工智能和大数据等数字解决方案作为向净零经济转型的高级技术。马尔代夫的NDC 3.0 也提到了人工智能和物联网作为实现高效气候行动的技术。

3.1.4 协调

能源领域是一个多方利益相关者的环境。将人工智能解决方案数字化并整合到该领域中，为该领域带来了另一群参与者，并具有非常快的进度时间表。虽然每个参与者都扮演着至关重要的角色，但他们的不同目标、风险偏好和时间表可能导致采用缓慢和错失机遇。为了有效推动能源领域的数字化转型，不同的参与者（公用事业公司、政府、数字化和能源公司、消费者和其他人）需要更好地协调。虽然数字化转型旨在管理电力系统日益增长的复杂性，但改进利益相关者的协调和最佳实践分享至关重要。 **国际可再生能源署建议以三个支柱为基础开展这项协调工作**，如下所述。

1. 对齐政策优先事项和行动

在许多国家，能源部门、创新、数字发展和教育的责任分散在各个部委，正如利益相关者访谈中强调的那样。因此，在能源和数字技术交叉领域的私营部门参与者必须与不同的重点部门合作。这种日益增加的复杂性需要更大的协调。特别是在大型电力系统中，一些挑战需要跨境协调。各国和地区正以多种方式应对这些挑战：

国家示例： 在认识到数字化的重要作用以及当前缺乏协调方法的背景下，英国能源监管机构Ofgem于2024年提出了创建“数字化协调人”的建议。数字化协调人是一个独立机构，负责协调能源部门的共享数字能源系统基础设施（ARUP，2024）。在本地，像“净零”这样的平台等“场所”支持位于英国的创新型公司测试其新产品，并为地方政府提供访问创新生态系统的途径，以加快其能源规划（Catapult Energy Systems, 2023）。

区域示例： 生态与社区发展组织（ECOWAS）将公私合作伙伴关系（PPP）作为区域基础设施发展采购模式。 **ECOWAS 公共私营伙伴关系在线平台** 作为一个知识管理平台，为政府与私营部门之间的交流服务。它是一个全面的区域

公私合作伙伴关系的方法促进了监督控制与数据采集（SCADA）系统的协调，这进一步允许了14个大陆ECOWAS国家之间的跨境能源交易（ECOWAS，2022）。

2. 确保在国家、区域和全球层面的系统技术互操作性

组建专家小组： 欧洲委员会在“数字化能源系统——欧盟行动计划”（欧洲委员会，2022）下设立了“智能能源专家小组”，以协调不同国家的利益相关者，包括电网运营商、数字技术提供者、监管机构和消费者，以加速能源部门的 secure and inclusive digital transformation。作为行动计划的一部分，欧洲电力传输系统运营商网络（ENTSO-E）和欧盟配电系统运营商（DSO）正共同开发一个框架，用于开发和部署欧盟电力网的互操作数字孪生。该提案包括开发智能电网 KPI（关键绩效指标），以使投资集中于智能电网并帮助追踪欧盟成员国取得的进展。

全国范围内，德国开始在电力系统的不同层面追踪数字化。追踪工作显示，输电运营（E-Bridge和FGH，2025年）的数字化率更高。具体而言，在发展中地区，电信等额外领域必须实现更高的数字化率：许多地区，尤其是偏远社区，缺乏（可靠）的互联网接入，但连接（无论是互联网还是卫星）对于处理数据以改善能源获取和能源安全至关重要。需要加强能源和电信部门之间的协调（采购带天线的智能设备）^即可以解决这个差距。

在国际合作方面，MENALINKS计划为埃及采用首个专门针对智能微电网的监管框架提供了监管和技术支持（MENALINKS，2025）。

3. 支持激励合作的倡议和商业模式

示例： 像Electron Vibe这样的专业平台有助于将公用事业与解决方案提供者匹配，以解决它们的具体问题。该过程是协作的：气候集体基金会（CCF）与电力公用事业合作定义问题陈述，然后通过全球公开征召选拔能够解决这些问题的初创公司。选定的初创公司随后创建商业案例，其中他们评估运营、技术和商业可行性以及监管可行性。基于这种可行性，公用事业决定推进试点项目，这些项目展示出实实在在的经济和运营效益（Electron Vibe，2025）。

*我们需要一个平台，让TSO、DSO和监管机构坐在一起，共同推动创新
一名受访者指出。一起，”*

全球平台 如净零联盟的公用事业（UNEZA 数字净零学院不仅有助于更好的协调，还有助于劳动力技能提升。它们促进公用事业部门的学习，并帮助他们提高数字技能。此外，**监管能源转型加速器（RETA）** 寻求促进全球监管机构之间的知识共享和点对点学习（RETA，无日期）。此外，**数字需求驱动电网（3DEN）** – 意大利环境与能源安全部、国际能源署和联合国环境规划署的合作 – 支持通过数字化、智能电网解决方案和需求侧资源整合加速电力系统现代化（环境与能源安全部（MASE），2024年）。这些例子说明协调已经在从地方到全球的不同层面发生，突显了全球对这些平台日益增长的需求。

4. 对七国集团和国际社会的建议

4.1 通过定制化数字化战略解锁系统价值

通过数字化价值集群棱镜评估国家电力系统状态（监测、预测、运营优化、终端自动化和透明度）以确定可以通过具体政策行动解决差距和机遇。

促进灵活电力系统投资框架 能够使数字解决方案提供电网拥塞管理、资产管理等服务，而不指定特定技术。在输电和配电等受监管的行业采用技术中立的方法，鼓励创新和采用高效的数字解决方案，同时保持系统可靠性。

支持开发提升可见性、协调性和自动化水平的数字平台和工具 在电力系统中，包括互操作数据枢纽、实时分析引擎以及面向用户界面，这些都能赋能消费者和运营商。

鼓励在国家能源规划和采购流程中纳入数字化。
在能源规划、采购和监管框架中纳入数字优先事项有助于确保一致性并创造长期价值。

4.2 通过全系统协调加速数字化编排

促进国家和次国家级战略，以协调各系统层级（从传输到分配和最终用途）的数字化工作。 这意味着数字解决方案需要与物理基础设施升级一起考虑，并为电力系统的长期需求做出贡献。

支持互操作数字生态系统的发展 那些促进发电机、电网运营商、聚合商、数字部门和消费者之间协调的东西。共享数据平台、通用标准和开放数字框架可以降低交易成本并促进创新。

促进包容性数字市场设计，允许开发能源服务的模块化构建模块，包括但不限于分布式能源资源和灵活负荷运行。 这包括启用聚合、简化对灵活性市场的访问，并确保数字服务的公平补偿。

通过分享参考架构、工具包和能力建设计划，促进数字化领域的国际合作。 在避免资本投资重复的同时，这有助于新兴市场和 developing economies 大幅推进传统系统并采用适合其自身情况的经过验证的数字解决方案。

4.3 基础优先：数据收集与管理、互操作性与网络安全

改进数据收集和质量。 基于相关高质量数据集进行数字化转型是必然的。此类系统可以逐步建立。智能电表和其他智能设备的推广至关重要，其早期部署的雄心勃勃的目标为数字化转型以及实现相关数字解决方案的收益开辟了多样化的机会。此外，在技术援助和升级过时基础设施（模拟控制系统、*例如* 碎片化网络（尤其是在需求增长和可靠性问题突出的地区）

通过国际合作伙伴促进互操作性框架。 互操作性可以释放创新潜力，并改善跨平台和地区的數據交換。國際協調可以減少碎片化，促進開源倡議或應用程序，這些倡議或應用程序致力於可負擔性。鼓勵成立互操作性和標準制定工作組。

提高终端用户对智能设备的认知度并支持其早期采用，帮助他们应对漫长的更换周期 对于家用电器、车辆和工业机械等项目。及时部署具有代表性的、响应需求的元素，可以防止或减轻电力系统中的压力，并允许终端用户受益——否则可能被忽视的——智能功能。

促进不同行为者在制定网络安全措施方面的跨部门协调 那些在电力系统中控制风险，同时防止网络安全标准成为数字化障碍的措施。对所有电力价值链要素采用和加强“设计式”网络安全，可以建立利益相关者之间的信任，有可能释放倡议和投资。威胁暴露和制度准备力的区域差异意味着网络安全战略必须是针对具体环境的，在数字化创新和强大的风险管理之间取得平衡。

4.4 重思技能与培训：教育主题与数字素养的整合

将能源部门的再培训和技能提升投资与数字技能相结合，可以提高与电力部门转型的契合度。 电力行业的转型需要所有行业具备新技能。在IRENA的调研中，60%的受访者将熟练专业人员的短缺视为电力系统数字化发展的关键障碍。这种技能再培训和技能提升必须跟上转型步伐，确保相应的技术不会扩大发达经济体和新兴经济体之间的差距，而是作为桥梁来弥合这一差距。

分析技能差距并了解行业需求有助于为快节奏的环境培养合适的员工。 这需要进行价值链分析和技能要求的变更。为了让培训产生最大影响，它应该与行业共同设计，根据当地环境进行定制，并具有较低的入门门槛。

认识到多样性和非专业数字素养对于满足行业需求的重要性。

未来电力系统将需要社会各界所有参与，既专业也融入日常生活。需要设计帮助代表性不足的群体更广泛地参与到劳动力中去，并提升数字素养。

4.5 使能因素：长期规划、激励投资和支持创新

引入基于绩效的激励措施，可以吸引对资金不足的电网的创新数字解决方案的投资。 鼓励实现可量化的关键绩效指标（绩效提升的百分比）将吸引对数字解决方案的投资。 *即*

为了进一步推动此类创新，数字能源交叉领域的监管沙盒可以帮助在快节奏的环境中，将想法转化为市场适用的解决方案。 创新应用，特别是在电网等敏感环境中，需要允许测试和适应的环境。推动电力系统转型的创新只能在合适的生态系统中发挥作用。

长期能源规划通过增强投资者的信心，有助于将投资引导至电网基础设施。在这些计划中考虑数字解决方案可以使投资更具吸引力。 包括经过验证的数字解决方案，并得到用例和国际经验的支撑，早期规划不仅能够提升这些解决方案对电力系统的总体效益，还能在这些解决方案本身调动资金。例如巴西在cop30的领导下发起的全球能源规划联盟等支持平台。³ 总统任期，以及长期的能源规划倡议（如IRENA的倡议）提供了一个协调主要全球论坛议程、促进能力建设和鼓励最佳实践分享与同行间学习的机遇。

将数字解决方案纳入国家自主贡献，并与其他国家能源和气候计划保持一致，有助于全球投资者对各国电力部门转型战略规划建立信心。 在国际合作模式下解决数字化目标很重要，及其与其他目标（技能发展或 *例如*

³ 2025年11月在巴西贝伦举行的联合国气候变化会议。

为融资雄心，创建更连贯的计划。支持跟踪工作（IRENA的），以便政策 即 制造商对计划、抱负和执行有更多的可见性。

作为国际金融机构的合作伙伴，鼓励为能源部门应用提供更广泛和有针对性的数字解决方案资金。 这可以包括担保、混合融资和优惠融资，以降低数字能源项目的初期成本，尤其是在回报不确定的背景下，同时促进承认社会和环境价值（获取、排放）的金融框架。 例如 减少、社会包容），以实现更公平的投资决策。

4.6 加强（国际）合作以支持电力系统转型，包括在新兴和中等收入经济体

加速电力系统转型需要鉴于日益增长的系统复杂性，在能源、数字和公共部门之间加强合作。 负责能源、创新、数字化和教育等领域的部委的政策重点和行动必须保持一致，以便能源和数字技术交叉领域的私营部门参与者能够更好地适应更协调的框架。协调方法（英国提出的数字化协调员）可以支持 例如 共享基础设施并促进试验。在区域层面，欧盟的智能能源专家小组等举措可以促进跨境合作和进展跟踪。UNEZA和R ETA等全球平台进一步改进协调和能力建设，而3DEN等伙伴关系则展示了国际合作如何推动电力系统的数字化和现代化。此外，IRENA的合作框架在成员间（涵盖从海上风电到关键材料等各种主题）的知识交流和国际化协调方面拥有成功记录，这些都可以复制到数字化和人工智能领域。

国际可再生能源署（IRENA），拥有170个国家和欧盟的成员，以及公用事业联盟UNEZA、行业联盟AFID、其合作框架、能源规划全球联盟及其技术和经济社会工作小组，具备 **与G7及其他所有成员国就电力系统转型数字解决方案举办全球对话**。

参考文献

阿比索耶, B.O., 孙, Y.和曾辉, W. (2024), "可再生能源预测人工智能方法的综述：方法论和见解", 第48卷, <https://doi.org/10.1016/j.可再生能源焦点.ref.2023.100529>

AER (2023), "研究发现激励计划提高能源网络效率并降低支出", <https://www.aer.gov.au/news/articles/news-releases/review-finds-incentive-schemes-drive-energy-network-efficiency-and-expenditure-down>

非洲新闻社 (2025), "Growthpoint与Fuel Switch合作推出非洲首个区块链支持的绿色能源证书交易市场", 非洲新闻社 www.africannewsagency.com/growthpoint与燃料转换合作推出非洲首个区块链支持的可再生能源证书交换 (访问于2025年10月1日)。

AFRY (2024), "全天候碳免费能源(CFE)交易", https://afry.com/sites/default/files/2024-07/mcd_gl_247_july_webinar.pdf 等 (访问于2025年10月14日)。

APUA (2022), 《APUA成员网络安全调查结果》, 非洲电力公用事业协会 (APUA), 未发表。

Arosio, M.和Falabretti, D.(2023), "DER参与辅助服务市场：对当前趋势和未来机遇的分析", , 第16卷/第5期, <https://doi.org/10.3390/en16052443> 能量

ARUP, (2024), "推动能源行业数字化。数字化协调者的作用", 等 <https://www.neso.energy/document/323266/download>

贝凯莱, A., (2024), "微网集群的最优规划和规模优化以提高性能", 等, 第14卷/1期, 第26653页, 自然出版集团, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75906-z> 科学报告

贝尔马尔 (2023), 等 建模可再生能源社区：评估不同, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s13705-023-00397-1.pdf> 配置, 技术和参与者类型

伯克利实验室 (2024), <https://escholarship.org/uc/item/32d6m0d1> 美国数据中心能源使用报告2024

Berkhout, V. (2023), 欧盟委员会：总局- 等 欧洲通用能源数据空间 能源通用, 弗劳恩霍夫系统与创新研究所ISI, 指南针集团, 麦肯锡公司, TNO, Trinomics, 乌得勒支大学。

博尔恩·戈德斯克 (2025), "Energinet：AI可以使我们的供应安全更便宜、更好[Energinet：AI可以使我们的供应安全更便宜、更好]", www.ing.dk/artikel/energinet-ai-kan-give-os-更便宜-更好的供应安全 工程师 (访问于2025年9月2日)。

博纳利亚, D. (2024), "年底特刊——尽管困难重重, 全球研发已增长近美元", 等 "2023年3万亿", 世界知识产权组织。

波罗斯, A. (2025), 《精确的太阳能预测: 实时临近预报解决方案》 <https://blog.risingstack.com/solar-power-prediction-nowcasting/>

卡迪米克斯理工学院 (2024), “人工智能驱动的输电系统预测性维护” www.cademix.org/ 高压电力系统中的维护

发射机能源系统 (2023年), “调查揭示能源部门数字与数据技能差距 - 能源系统发射机” <https://es.catapult.org.uk/news/survey-reveals-digital-data-skills-gap-in-the-energy-sector/> (访问于2025年8月7日)。

CleanCounts (n.d.), 《CleanCounts: 构建通往低碳经济之路》, www.cleancounts.org

E-Bridge, 以及FGH (2025), “关于电力配电网能源转型能力和网络服务质量的质量监管咨询报告” www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2024/GBK-24-02-1%234_Q-Reg/Downloads/Gutachten_E-Bridge_Consulting_FGH.pdf?__blob=publicationFile&v=4

ecowas (2022), “启动ecowas公私伙伴关系在线平台” <https://ppp.ecowas.int/launch-of-the-ecowas-ppp-online-platform/>

EirGrid, SONI (2024), <https://cms.eirgrid.ie/sites/default/files/publications/19035-EirGrid-Generation-Capacity-Statement-Combined-2023-V5-Jan-2024.pdf> 爱尔兰未来十年发电容量声明 2023–2032

埃尔齐因, M., 和 格贝塞奈特, G. (2024), “可再生能源领域的数字化”, 第 17/9 卷, 能量第1985页, 多学科数字出版研究所, <https://doi.org/10.3390/en17091985>

电子律动 (2025), “电子律动”

Elia Group (2023), “DARE – 动态每日储备需求计量” <https://innovation.eliagroup.eu/en/projects/dare-dynamic-daily-dimensioning-of-reserve-needs>

EnergyTag (2025), “EnergyTag首次认证颗粒级证书发行方, 标志着每小时清洁能源跟踪的重大里程碑” https://energytag.org/wp-content/uploads/2025/06/EnergyTag-Press-Release-June-25-2025_Publication.pdf (访问于2025年10月28日)。

Enlitia (2025), “人工智能如何变革可再生能源”, www.enlitia.com/resources-blog 恩利蒂亚文章/6种人工智能正改变可再生能源 (访问于 2025年7月9日)。

ENTSO-E (2019), 欧洲网络与能源联合组织, <https://annualreport2019.entsoe.eu/cybersecurity/> 年度报告互操作性-数据/

ENTSO-E (2021), 欧洲网络与能源联合组织, https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/210331_Electric_Vehicles_integration.pdf 电动汽车并入电网立场文件

EPICO, guidehouse (2025), https://epico.org/uploads/files/EPICO-灵活性议程_FINAL.pdf 为德国电力系统制定灵活性议程的优先事项

ESMAP, (2018), , [https:// documents1.worldbank.org/curated/zh-cn/363151595914878255/pdf/创新性智能电网PPP方法.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/zh-cn/363151595914878255/pdf/创新性智能电网PPP方法.pdf)

欧盟委员会 (2018) , 高级 人工智能的定义 : 主要能力和科学学科
人工智能专家组 [https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/ai_hleg_definition_of_ai_18_december_1.p
df](https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/ai_hleg_definition_of_ai_18_december_1.pdf)

欧洲委员会 (2022年) , "COM (2022) 552 final", [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/ PDF/?uri=CE
LEX:52022DC0552](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/ PDF/?uri=CELEX:52022DC0552)

欧盟委员会 (2024年) , "欧盟委员会授权法规 (EU) 2024/1366 (2024年3月11日发布) 通过建立关于跨境电力
流动网络安全方面的特定行业规则的网路码, 来补充欧洲议会和理事会法规 (EU) 2019/943\ [http:// data.europa.
eu/eli/reg_del/2024/1366/oj/eng](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/1366/oj/eng) (访问于2025年9月29日) 。

欧盟 (2022), "数字化能源系统 - 欧盟行动计划\ [https://eur-lex.europa.eu/legal- content/EN/TXT/?uri=CELEX%3
A52022DC0552&qid=1666369684560](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0552&qid=1666369684560)

EY (2025), "智能充电和V2G对成本节约、电网稳定性和可再生能源并网至关重要", EY
www.ey.com/en_gl/newsroom/2025/03/智能充电和v2g对于节省成本、电网稳定性和可再生能源整合至关重要 (访
问于2025年8月5日)。

联邦经济和能源部 (2025年) , "监管沙盒——创新与监管的测试环境\ [www.bundeswirtschaftsministerium.de/Red
aktion/zh-CN/Dossier/regulatory- sandboxes.html](http://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/zh-CN/Dossier/regulatory-sandboxes.html)

弗劳恩霍夫信息通信技术研究所 (2023) 研究变频调速电机节能潜力
, [www.zvei.org/fileadmin/user_upload/联盟/专业协会/自动化/电气_ 欧盟
Antriebe/Cemep_Studie/Cemep_Fraunhofer_study-motor-saving-potential-with-VSD-20231215.pdf](http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/联盟/专业协会/自动化/电气_ 欧盟Antriebe/Cemep_Studie/Cemep_Fraunhofer_study-motor-saving-potential-with-VSD-20231215.pdf)

G7 (2024), , 都灵, [www.g7italy.it/wp- 气候、能源与环境部长会议公报
content/uploads/G7-气候-能源-环境部长公报_Finals.pdf](http://www.g7italy.it/wp-content/uploads/G7-气候-能源-环境部长公报_Finals.pdf)

G7公报 (2024) , 气候变化、能源与环境部长会议公报 - G7意大利2024
www.g7italy.it/wp-content/uploads/G7-气候变化能源环境部长会议公报_最终版.pdf

加里齐亚, F., 和伦德, S. (2024年) , "重新评估新兴市场放贷中的风险 : 来自GEMs联盟统计数据的见
解", 国际金融公司。

GET转换, GIZ (2024) , , [https://get- 太阳能和风能预测的国际最佳实践
transform.eu/wp-content/uploads/2024/01/GET.transform-简介_VRE-预测-太阳能-风能.pdf](https://get-transform.eu/wp-content/uploads/2024/01/GET.transform-简介_VRE-预测-太阳能-风能.pdf)

G-PST (2023), "未来控制室愿景\ [https://globalpst.org/wp-content/uploads/XM- Control-Room-of-the-Future-Gaps
-and-Actions_public_V3_Ingles.pdf](https://globalpst.org/wp-content/uploads/XM-Control-Room-of-the-Future-Gaps-and-Actions_public_V3_Ingles.pdf)

G-PST (2024) 未来 XM 控制室路线图。输电运营的未来愿景
, [https://globalpst.org/wp-content/uploads/XM-Control-Room-of-the-Future-Gaps-and- 在哥伦比亚
Actions_public_V3_Ingles.pdf](https://globalpst.org/wp-content/uploads/XM-Control-Room-of-the-Future-Gaps-and-Actions_public_V3_Ingles.pdf)

指南针 (2025), \"指南针专家访谈及来自可再生能源开发商的数字化量化价值创造案例

红 (2023), \"一种鲁棒的混合经典和量子模型用于短期风速预测\" 等
预测\ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10227289>

ICCT (2025) , , 欧洲智能充电电动汽车和卡车节省成本 : 2040年法国的案例研究
国际清洁交通委员会 <https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/03/RAP-ICCT-Hildermeier-Jahn-Schmidt-Bernard-Ragon-Basma-Savings-from-smart-charging-electric-cars-trucks-in-Europe-Mar-2025.pdf>

IEA, (2025), , 国际能源署, 等 追踪可持续发展目标7: 能源进展报告2025
国际可再生能源机构、联合国统计司、世界银行和世界卫生组织, 日内瓦, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jun/IRENA_POL_跟踪SDG7能源进展_2025.pdf

IEA (2025) , 国际能源署, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/601eaec9-ba91-4623-819b-4ded331ec9e8/EnergyandAI.pdf> 能量和人工智能

国际 renewable 能源署 (IRENA) (2018) , , 国际 区块链 : 加速全球能源转型的新工具
可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/news/articles/2018/Nov/区块链赋能电力物联网 (访问于2025年7月29日)。

IRENA (2019a) , , 可再生能源驱动的未来创新格局 : 整合可变能源的解决方案
国际可再生能源机构, 阿布扎比, <https://www.irena.org/publications/2019/可再生能源2月/可再生能源未来的创新景观>

IRENA (2019b) , , 国际可再生 能源 创新展望 : 电动汽车智能充电
代理机构, 阿布扎比, 阿联酋, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Innovation_Outlook_EV_smart_charging_2019.pdf

IRENA (2019c) , , 国际可再生 创新格局简报 : 人工智能与大数据
能源署, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_AI_Big_Data_2019.pdf?la=zh&hash=9A003F48B639B810237FEEAF61D47C74F8D8F07F

国际可再生能源署 (IRENA) (2019d) , , 国际可再生能源机构, 阿布扎比 创新格局简报 : 区块链
达希 www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA区块链示范应用2019.pdf?la=en&hash=FAE6EBFE616C1F0511BEAA6F2B8ABCDE44209C1F

IRENA (2019e), \"IRENA创新格局报告: 区块链在电力部门中不断演变的作用\", 演示文稿, 气候技术中心与网络 www.ctc-n.org/sites/default/files/ctcn_webinar_展示_irena最终.pdf

IRENA (2020), , 创新格局简报 : 可变可再生能源发电的先进预测
国际可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf

国际可再生能源机构 (IRENA) (2023a) , , 智能电气化创新格局 : 通过
国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/files/IRENA/机构/出版物/2023/06/IRENA_智能电气化创新格局_2023.pdf

IRENA (2023b), , 国际可再生 能源 世界能源转型展望 2023 : 1.5°C 路径
代理机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jun/世界能源转型展望-2023

IRENA (2024a), , 国际可再生 能源 全球能源转型展望2024 : 1.5°C路径
代理机构, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2024/nov/世界能源转型展望-2024

IRENA (2024b), , 到2030年将可再生能源乘三 : G7在将目标转化为行动中的作用
国际可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/publications/2024/Apr/tripling-renewable-power-by-2030-the-role-of-the-g7-in-turning-targets-into-action

IRENA (2024c), , 国际 用可再生能源脱碳难减排部门 : 七国集团的前景
可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/Publications/2024/Apr/利用可再生能源实现难减排部门的脱碳-Perspectives-for-the-G7

IRENA (2024d), 非洲的能源转型 : 聚焦于国际合作的机遇
国际可再生能源机构, 阿布扎比, <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/G7-非洲能源转型——聚焦G7的国际合作机遇>

IRENA (2024e), , 国际 终端用能智能化电气化 : 配电网效益
可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/Publications/2024/Sep/终端用能领域的智能电气化-对配电网的益处

IRENA (2025a) , , 国际可再生能源机构, 阿布扎比 创新周2025 : 总结报告
达希 <https://innovationweek.irena.org/#summary-report-and-recordings>

IRENA (2025b), , [https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/ 2024年可再生能源发电成本](https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/2024年可再生能源发电成本)
2024年可再生能源发电成本

国际可再生能源署 (2025c) , , 国际 推动道路运输基于可再生能源电气化的政策
可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/Publications/2025/Jun/推进道路运输基于可再生能源电气化的政策

国际可再生能源署 (IRENA) (2025d) , 《关于能源转型技能建设的行动呼吁》 https://survey.eu.qualtrics.com/jfe/form/SV_5AUaDfCC3VtyCmW (访问于2025年10月22日)。

IRENA (即将出版) , , 国际 由可再生能源驱动, 实现可持续发展的创新格局
可再生能源机构, 阿布扎比 www.irena.org/出版物

IRENA, (2025), 等 落实阿联酋共识 : 追踪实现可再生能源翻三番的进展
国际可再生能源署, COP30 能源容量和到2030年使能源效率翻倍
主席, 全球可再生能源联盟, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2025/Oct/阿联酋-共识-2030-可再生能源翻三倍-效率翻两倍

itu (2021), \“与传输和能源 (电力和石油及天然气) 基础设施协同部署。执行摘要。 \ https://itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2021/ASP%20Regional%20Dialogue%20on%20Digital%20Transformation/The-ASP-Regional-Dialogue-on-Digital-Transformation-Gearing-Up-for-Inclusive-and-Sustainable-Development-RDDT-%20Executive%20Summary_Session2_Co-deployment.pdf

约什考夫 L. (2024), \“美国电力分配和输电激励性(基于绩效)监管的扩张 \ , 65, pp. 455–503. 工业组织评论

库兹明, E., (2024), “能源部门向可再生能源转型中的数字化转型：一个角色” 等
信息通信技术与人力资本”, 能源战略评论, 第53卷, 第101418页 <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101418>

账本洞察 (2023), “EDF 在 Hedera 公共 DLT 上试验代币化可再生能源证书”, [www. 账本洞察 ledgerinsights.com/edf-tokenized-recs-hedera-dlt/](http://www.ledgerinsights.com/edf-tokenized-recs-hedera-dlt/) (访问于2025年8月13日)。

马齐·霍塞尼 (2024年), “电力变压器的预测性维护：确保电网可靠性” 阿尔松
, [www.arshon.com/blog/电力变压器预测性维护-确保电网-技术
可靠性/#:~:text=关键预测性维护技术&text=它涉及取样和分析、电弧或绝缘降解](http://www.arshon.com/blog/电力变压器预测性维护-确保电网-技术可靠性/#:~:text=关键预测性维护技术&text=它涉及取样和分析、电弧或绝缘降解) (访问于2025年7月10日)。

MENALINKS (2025), “知识库 / MENALINKS 项目” <https://www.menalinks.org/resources/knowledge-base> (访问于2025年10月10日)。

摩尔多瓦共和国能源部 (2025), “能源沙盒机制现已启动。” <https://www.energie.gov.md/en/content/energy-sandbox-mechanism-now-operational-applications-can-be-submitted-online>

科技、创新与发明部 (2024年), “国家级技术与创新沙盒”
<https://sandbox.gov.my/>

环境与能源安全部 (2024), “3DEN行动计划——数字化需求驱动型电力网络” <https://www.mase.gov.it/portale/3den-demand-driven-electricity-networks-initiative>

MITECO (2025), “MITECO通过审查现行法规推动集体自用 (MITECO promotes collective self-consumption with a review of current regulations)”, 皇家法令7/2025, 2025年6月24日, [https://www.miteco.gob.es/es/pr
ensa/ultimas-noticias/2025/octubre/el-miteco-impulsa-el-autoconsumo-colectivo-con-una-revision-de-l.html](https://www.miteco.gob.es/es/prrensa/ultimas-noticias/2025/octubre/el-miteco-impulsa-el-autoconsumo-colectivo-con-una-revision-de-l.html)

NASEO (2024), , [https://www.naseo.org/ 国家采购太阳能资产的安全考量
Data/Sites/1/documents/tk-news/catss采购_v2.pdf](https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/catss采购_v2.pdf)

NIPR (2025), “利用无人机作为气象工具赋能数值天气预报” 国家
, www.nipr.ac.jp/zh_CN/info/notice/20250123.html (访问于2025年7月9日)。 极地研究所

章鱼能源 (n.d.), “智能章鱼的增长” <https://octopus.energy/blog/The-growth-of-Intelligent-Octopus/>

经合组织 (2025), “性别平等与数字化转型” 经济合作与发展组织
, <https://www.oecd.org/en/topics/gender-equality-and-digital-transformation.html> 开发, 巴黎
(访问于2025年9月28日)。

德·奥利维拉, L.G.S., (2025), “向巴西配电系统运营商转型：功能、等
收益, 战略途径。” [https://www.raonline.org/wp-content/uploads/2025/05/rap-oliveira-addepalli-saenz-gom
ez-hernandez-transitioning-to-dso-in-Brazil-may-2025.pdf](https://www.raonline.org/wp-content/uploads/2025/05/rap-oliveira-addepalli-saenz-gomez-hernandez-transitioning-to-dso-in-Brazil-may-2025.pdf)

甲骨文 (2022), , [www.oracle.com/a/ocom/docs/ 澳大利亚联合能源公司开采深层ADMS价值
industries/utilities/utilities-united-energy-case-study.pdf](http://www.oracle.com/a/ocom/docs/澳大利亚联合能源公司开采深层ADMS价值 industries/utilities/utilities-united-energy-case-study.pdf)

平台高管 (2025), 人工智能驱动的发电和输电预测性维护 (2025 – www.platformexecutive.com/insight/energy-research/ai-driven-predictive-maintenance-for-power-2029)
发电和输电-2025-2029/#用于预测性维护的AI模型

Powerledger (2023), *Powerledger轻文献: Powerledger推出其多用途区块链, 基于*
Powerledger, <https://powerledger.io/company/power-ledger-whitepaper/> 在高销量和低费用上
(访问于2025年10月7日)。

实用主义学院 (2022), 《克服数据科学中的80/20法则》, 实用主义学院 <https://www.pragmaticinstitute.com/resources/articles/data/overcoming-the-80-20-rule-in-data-science/>

量子量化, TNO (2024), , <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.12032> 基于量子计算的电网优化

远程能源 (2025), “远程能源——太阳能行业中的妇女赋权” <https://www.remoteenergy.org/programs-for-women>
(访问于2025年9月28日)。

里热托, S. B., (2021), “预测性维护4.0: 概念、架构和电力\ 等
“系统应用” *CIREN 2021 - 第26th 国际电力会议及展览会*
, 第2021卷, 第1722–6页, <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1845> 分布

沈, Y. N. (2025), “人工智能中的偏见对未来能源的影响” <https://www.byteplus.com/en/topic/496623?title=what-bias-in-ai-means-for-the-future-of-energy>

新 (2021), “人工智能辅助可再生能源预测性维护” *W., 韩, J. 和 Rhee W.*
系统\ , 第221卷, 119775, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119775> 能量

智能能源消费者协作 (2025), <https://smartenergycc.org/wp-content/uploads/2025/03/SECCs-2025-消费者状况全面报告.pdf> 2025 消费者趋势

太阳能姐妹 (2025), “赋能地方女性企业家经济机会”, , 太阳能姐妹
<https://solarsister.org/> (访问于2025年9月28日)。

Solcast (2025), “用于运营和分析太阳能资产、电网和市场的辐照度与天气数据”, DNV, www.solcast.com/ 实时与
预报

可持续未来澳大利亚 (2025), “人工智能预测使太阳能和风能比以往任何时候都更可靠”
<https://biomassproducer.com.au/alternative-renewable-energy/ai-forecasting-makes-solar-and-wind-power-more-reliable-than-ever/>

T&D World (2019), 《FLISR的多种面貌》 <https://www.tdworld.com/smart-utility/article/20972125/the-many-faces-of-flisr>

国际追踪标准基金会 (2022), “I-REC标准支持谷歌在美国和欧洲以外的首次24/7匹配测试” www.trackingstandard.org/the-i-rec-standard-supports-googles-first-24-7-matching-test-outside-of-the-us-and-europe/ (访问于2025年10月1日)。

约翰霍普金斯大学 (2022) 协调爬坡产品及调峰备用物资采购
, [https://www.osti.gov/biblio/1873393#:~:text=协调加速能源产品及法规储备采购,\(能源效率与可再生能源办公室\)、可再生能源电力办公室。太阳能技术办公室](https://www.osti.gov/biblio/1873393#:~:text=协调加速能源产品及法规储备采购,(能源效率与可再生能源办公室)、可再生能源电力办公室。太阳能技术办公室)

托马斯·莫斯特因 (2022年), "基于退火的组合最优电力流量量子计算", <https://ieeexplore.ieee.org/document/9863874> IEEE

TNO, 量子三角洲 (2025), 《为了更好的量子》 <https://quantumforgood.eu/use-cases/quantum-technology-energy-transition/>

代尔夫特理工大学 (2022年), "未来控制室使电网数字化韧性增强" <https://www.tudelft.nl/en/2022/tu-delft/tu-delfts-control-room-of-the-future-makes-power-grid-digitally-resilient>

乌科巴 (2024), "通过人工智能优化可再生能源系统：综述 等和未来展望", 第35卷/7期, 第3833–79页, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0958305X241256293> 能源与环境

联合国经济和社会事务部与联合国社会发展部 (2024年), "关于可持续发展数字技术的政策试验和监管沙盒的全球研讨会" <https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/KAZAKHSTAN%20Richard%20Stace%20-%20TOOLKIT%20Presentation%20for%20Bangkok%20Workshop%20FEB24.pdf>

联合国 (2025), 支持性政策简报 可持续能源性别指标：行动呼吁
联合国高级别政治论坛2025年 <https://www.esmap.org/sites/default/files/2022/2025/2025-SDG7-Policy-Brief-on-SDG5.pdf>

美国能源部 (2015), 美国电力输配电中节能改进的机会
, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f22/QUER%20Analysis%20-%20配电系统能源效率提升的机会%20%E%20US%20电力%20输配%20系统_0.pdf

美国能源部 (2024), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/网络现代化战略2024.pdf> 网络现代化战略2024

WEF (2025), https://reports.weforum.org/docs/WEF人工智能能源悖论_2025.pdf 人工智能的能源悖论：平衡挑战与机遇

worktrek (2025), "不同行业的预测性维护示例", www.worktrek.com/WorkTrekblog/predictive-maintenance-examples/#能源行业的用例 (访问于2025年10月7日)。

世界银行 (2020), , 世界银行, 使用区块链支持能源转型和气候市场
华盛顿特区 <https://doi.org/10.1596/35371>

WRI (2023), "全天候无碳能源的现状：近期进展与关注点", 洞察, www.wri.org/insights/247-carbon-free-energy-progress (访问于2025年10月28日)。

夏 (2024), "利用地球同步卫星对太阳能光伏电站云量的精准临近预报" 等
卫星图像 <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44666-1.pdf>

zeroinstrument (2025), "传感器：数字化转型的驱动力", <https://zeroinstrument.com/驱动数字转型的传感器力量/> (访问于2025年8月5日)。

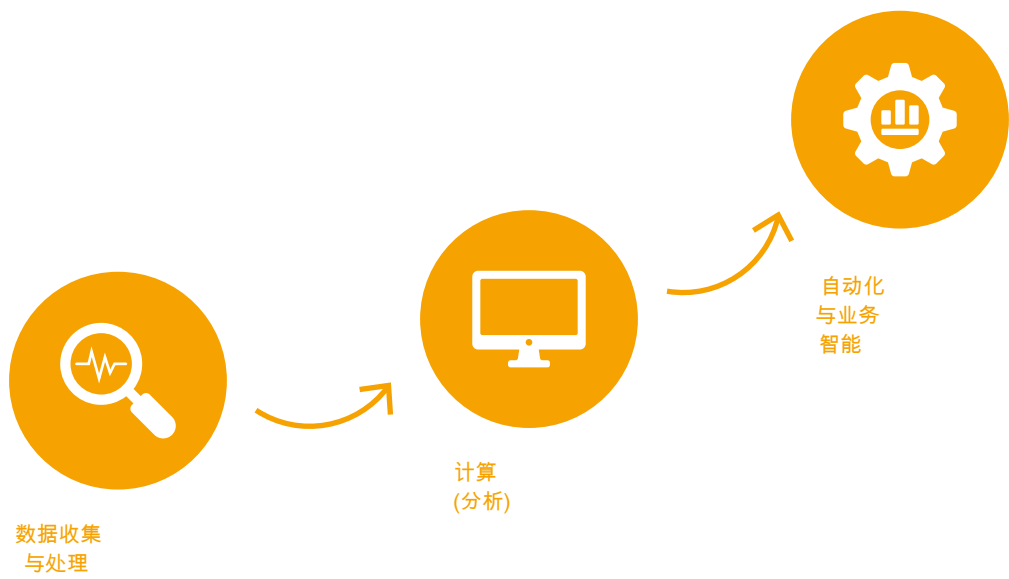
zew (2023), "节能作为数字化项目的动力", <https://www.zew.de/en/press/latest-press-releases/energy-savings-as-motivation-for-digitalisation-projects>

附件

术语表

本术语表包含一些在电力系统数字化中具有多种应用的基本技术的说明。数字化依赖于使用传感器、智能电表、监控与数据采集（SCADA）系统以及先进监控系统等技术收集的大量数据。人工智能（AI）和物联网（IoT）等技术利用这些数据（这些数据可以与资产、天气、可再生能源资源、市场与系统运行以及消费者行为等相关），实现各种用例的数字化。本附件描述了对数字化至关重要的数据收集技术和数字技术。

图A.1 电力系统数字化框架



传感器

传感器是数字化的基本组件。它们充当物理系统与数字平台之间的桥梁。传感器测量物理和环境参数，例如温度、光线、运动和声音，并以数字信号传输，这些信号可以进行处理和分析（zeroinstrument, 2025）。

作为物联网的核心使能器，传感器促进数据驱动应用在能源、制造、医疗保健和交通等各个领域的发展。对自动化和智能系统的日益增长的需求加速了传感器技术的创新，包括柔性、纳米级和人工智能驱动传感器。这些进步使更精确、情境感知和自适应的数据收集成为可能，从而实现实时监控、提高安全性和提升运营效率。

物联网

物联网指的是嵌入传感器、电子设备和软件的物理设备，这些设备连接到互联网并交换数据。这些智能设备可以通过基于云的控制系统实现远程监控和控制。物联网设备可以根据价格信号或电网状况自动调整热泵和水加热器等电器的能耗，从而优化运行并为电网提供灵活性（国际能源署，2023a）。

智能电表

智能电表是先进的电子设备，它们记录并向公用事业公司和消费者回传能源消耗的近实时测量值（千瓦时、电压、电流、功率因数）*例如*通过双向通信（无线射频、电力线通信、蜂窝网络或网状网络）。它们构成了高级计量基础设施（AMI）的骨干。重要的是，它们实现了频繁的抄表（每15分钟一次），而不是每月人工抄表，并支持功能*例如*如远程连接/断开、分时电价和停电检测。

高级监控系统

高级监控系统集成了多种类型或来源的数据（高级仪表，相量*例如*测量单位[PMUs]和实时气象数据)以改善电网运行。它们支持广域监测系统的发展，该系统提供对关键系统要素的整体和地理详细视图；反过来它们提高了电网态势感知。

scada系统

scada系统是用于监控和控制关键电力系统组件的数字平台，从发电机和特定的电气设备到变电站和输电网络。它们从现场设备（如传感器、执行器和计量表）收集实时数据，并将这些数据传输到集中式仪表板供人交互。从现场技术人员到控制中心操作员，他们使用scada界面来可视化系统状态，发出控制指令，并响应故障或异常。这些系统能够观察电力系统。它们促进远程监控、自动切换，并与更复杂的计算环境中其他数字工具集成，这些环境能够提供多样化的洞察和自动化。

数字孪生

数字孪生是物理电力系统资产或网络段的动态虚拟副本。它们利用人工智能和机器学习算法分析从嵌入式传感器或捕捉温度、振动、局部放电和负载等电气参数的相量测量单元（PMU）持续接收的高频实时数据，从而实现早期异常检测、退化预测和主动维护计划。反过来，它们有助于防止意外故障并优化资产生命周期管理。

尽管数字孪生在文献中提及的频率不如区块链等技术（El Zein和Gebresenbet，2024年），但它们代表了更广泛数字化转型中的强大工具，能够提升智能电网中的态势感知能力、运营效率和决策能力。持续的数据集成和高级分析体现了数字化作为一项持续增值的创新过程的核心，推动着现代电力系统的演进。

区块链

区块链是一个用于验证交易的分布式、数字账本。它提供了一个共享、安全和透明的环境，所有交易都在此进行记录、存档和处理（IRENA，2019a）。

该技术使能源领域数字化转型得以实现，包括点对点交易、电动汽车充电管理、自动化电网服务的智能合约以及可再生能源证书核验等应用。同时，它为应对能源领域日益复杂的状况提供了解决方案。区块链的透明性和不可篡改性能够增强信任、降低交易成本，并支持新的商业模式，例如去中心化能源市场和代币化融资。公用事业公司和市场参与者已试点基于分布式账本技术结算/账单和证书的发行，提升了可审计性并减少了管理负担（IRENA，2018；世界银行，2020）。

云计算和边缘计算

云计算将来自不同能源资产的大量数据集中化，提供可扩展的存储、高级分析和实时监控。这些集中的数据有助于优化运营、提高效率、整合可再生能源并通过预测性维护和自动化改善电网管理。

边缘计算另一方面在网络的边缘本地处理数据。数据的本地处理能够对电网范围内的波动和需求做出即时响应。这减少了延迟；确保了关键操作保持不间断；并支持对电网可靠性、停电管理和太阳能、风能等分布式能源资源的集成做出快速决策。

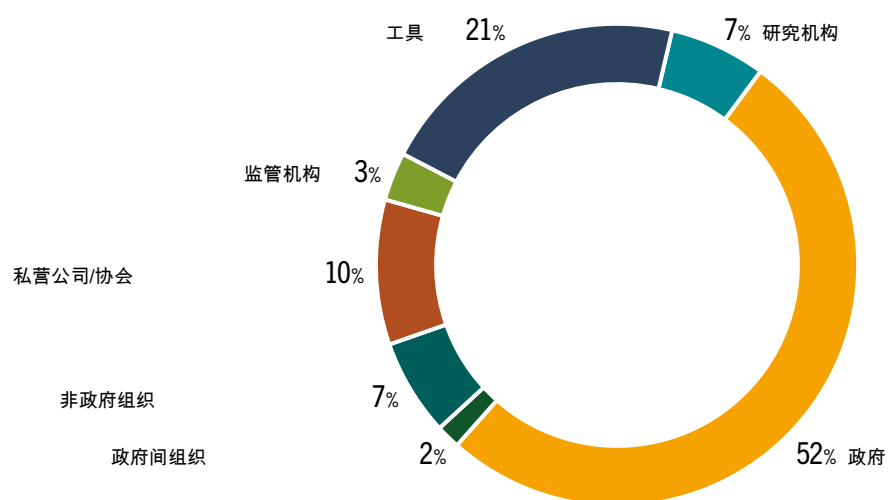
电力行业的AI应用

人工智能是一种变革性的数字技术，通过基于大数据的智能分析和决策，使可变可再生能源融入电力系统成为可能。人工智能系统处理通过传感器和物联网设备收集的大量数据（与资产、天气、可再生能源资源、市场运营和消费者行为相关），进而提高（可再生能源发电和需求的）预测；帮助管理电网稳定性；并实现高效的Demand-side Management、优化的储能运营以及改进的市场设计和运营（IRENA，2019a）。人工智能还可以利用来自传感器、电表和其他数字设备的 datasets 来提高异常检测和资产管理，并实现分布式能源资源的自主控制（IRENA，2019c）。机器学习和大数据分析等人工智能技术支持能源系统中的自动化和优化。

调查方法学

为深入了解能源行业当前的数字化水平、具体挑战以及潜在的政策解决方案，国际可再生能源署（IRENA）开展了一项调查，覆盖了所有170个IRENA成员国的IRENA各国家重点机构。由于时间限制，收到了61份回复，其中大部分来自政府机构和公用事业部门。受访者来自许多国家，包括发达经济体、新兴市场和发展中经济体。此外，IRENA还与14位专家进行了详细访谈，以进一步推进本报告的分析。

图 A.2 按行业划分的调查受访者



该调查还评估了受访者对数字化程度的了解程度。其中，28%的人略了解，33%的人比较了解，39%的人非常了解该主题。

