

数字化转型与人工智能推动 电力系统转型

G7的展望



除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、共享、复制、再制作、印刷和/或存储，但需注明IRENA是来源和版权所有者，并提供适当的认可。本出版物中归第三方所有的材料可能受不同的使用条款和限制约束，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

国际可再生能源机构（IRENA）是一个政府间组织，支持各国向可持续能源未来转型，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识库。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、能源获取、能源安全以及低碳经济增长和繁荣。

本报告可从以下网址下载：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 Adrian Gonzalez、Alina Gilmanova、Anke Schoenlau、Ines Jacob、Rayan Dankar、Rebecca Bisangwa 和 Simon Benmarraze 在 Norela Constantinescu（IRENA创新与技术中心代理主任）的指导下撰写。

它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（量子 delta）、Liesbeth Switten（AIB-发行机构协会）、Kilian Daly（EnergyTag）、Semih Tetik（CharIN）、Yunshu Li（国际原子能机构）、Marcia Poletti（奥克塔斯能源）、Deger Saygin 和 Joseph Cordonnier（经济合作与发展组织）、Mari Angeles Major-Sosias（美国电力研究院）、Seong Choi（美国国家可再生能源实验室，全球PST联盟）、Julie Evans（英国，英国能源与气候变化部）、Kentaro Oe（日本，经济产业省）、Maximilian Schuelling（德国，联邦能源署）、Vincent Berrutto（欧盟，能源总局）、Martina Lyons（国际能源署）、Peter Markussen（丹麦能源署）、Karoline Steinbacher、Katja Eisbrenner 和 Romain Capaldi（指南针）。

IRENA同事们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）。

出版物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·梅凯编辑，技术审核由保罗·科莫尔提供。平面设计由凤凰设计援助提供。

国际可再生能源署对加拿大政府为生产此报告提供的支持表示感谢。

免责声明

本出版物及相关材料按“原样”提供。国际可再生能源署（IRENA）已采取一切合理措施核实本出版物中材料的可靠性。然而，国际可再生能源署（IRENA）及其官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的保证，无论是明示的还是默示的，并且他们对使用本出版物或相关材料的任何后果不承担任何责任或责任。

此处所含信息不一定代表IRENA全体成员的观点。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，而非提及的其他类似性质的公司或项目或产品。此处采用的设计名称和材料的呈现方式，并不表示IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的法律地位，或其当局，或对其边界或界限的划定有任何意见的表示。

目录

缩写词.....	5
执行摘要.....	6
一个关于电力系统数字化的呼吁.....	6
对数字解决方案所带来的增值进行定性评估.....	7
七国集团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 价值集群.....	15
2.2 电力系统数字化：一种以效益为导向的方法.....	22
2.3 在实现效益方面表现优异——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：理解挑战以定义行动.....	42
4. 对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战略解锁系统价值.....	52
4.2 通过全系统协调加速数字化协同.....	53
4.3 根基先行：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融合.....	54
4.5 支撑要素：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

图1.1 IRENA的1.5°C情景.....	11
图1.2 BNEF在电力行业追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 价值集群.....15	
图2.2 量化数字化为可再生能源开发商带来的价值创造（在50吉瓦投资组合中）.....21	
图 2.3 电动车的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 预测性维护的基本构件。.....31	
图 2.6 比较替代方法在电力资产维护方面的应用31	
图2.7 基于AI的可再生能源发电预测增强。33	
图 2.8 在FLISR技术中自动化的步骤.....38	
图3.1 数字化用例影响预期时间表。.....40	
图 3.2 感知到能源领域实施数据的障碍.....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 电力系统数字化框架64	
图A.2 按部门划分的受访者调查.....67	

表

表 2.1 值集群用例和数字化效益.....25	
表2.2 智能充电部署的启用步骤..... 28	
表2.3 实现预测性维护部署的步骤32	
表 2.4 部署人工智能增强型虚拟现实（vre）预测的启用步骤34	
表2.5 实现能源属性证书部署的步骤 36	
表2.6 部署FLISR的启用步骤..... 39	

箱子

2.1 栏 通过数字化创造价值。.....21	
2.2 编辑 Energinet项目.....22	
2.3方框 智能充电.....30	
2.4 编辑 数字化如何助力整合更多可再生能源：案例研究.....34	
2.5 节 现实生活中的实例，说明细粒度证书如何为客户增加价值.....37	
2.6 编号框 现实中的应用FLISR.....39	

缩写

3DEN 数字化需求驱动电力网络

人工智能 人工智能

AMI 高级计量基础设施

APUA 非洲电力公用事业协会

BEMS 建筑能源管理系统

BESS 电池储能系统

BNEF 彭博新能源财经

CRA 网络弹性法案

DERs 分布式能源

丹麦克朗 丹麦克朗

DLR 动态线损

DR 需求响应

DSO 配电系统运营商

EAC 能效标识

ecowas 西非经济共同体

ECREEE 西非经济共同体可再生能源与能效中心

EDF 法国电力公司

人权事务委员会 加拿大人类资源部电力

EIF 欧洲互操作性框架

EMDEs 新兴和发展中经济体

EMS 能源管理系统

ENTSO-E 欧洲电力输电系统运营商网络

ESG 环境、社会及管治

欧盟 欧盟

欧元 欧元

电动汽车 电动汽车

事实 柔性交流输电系统

FEMS 工厂能源管理系统

FLISR 故障定位、隔离、服务恢复

FSC 未来技能中心

G7 七国集团

GO 产地保证

GW 吉瓦

吉瓦时 吉瓦时

IEA 国际能源署

物联网 物联网

国际可再生能源署 国际可再生能源机构

MASE 环境保护与能源安全部

mFRR 手动频率恢复储备

运维 运行和维护

PAYGO 按需付费

PMUs 相量测量单位

研发 研发

RE 可再生能源

REC 可再生能源证书

RETA 监管能源转型加速器

SAIDI 系统平均中断持续时间指标

SAIFI 系统平均中断频率指数

SCADA 监控和数据采集

ToU 分时电价

TWh 兆瓦时

UE 联合能源

联合国 联合国

美元 美元

V2G 车网互动

VRE 可变性可再生能源

WAMPACS 广域监测保护控制系统

XAI 可解释人工智能

执行摘要

数字解决方案具有巨大的潜力来加速 **电力系统变换** 为...做贡献

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，国际可再生能源署（irena）探讨了数字化、利用传感器、智能电表和数据平台——以及基于人工智能（ai）的新应用，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以日益复杂为特征。随着到 2050 年电力占终端能源消费的比例达到 52%（根据国际可再生能源署的预测 [IRENA, 2024a] 将当前的电气化率翻倍），数字化将成为管理空前规模的关键。不断增长的需求和发电的变动性，以及分布式能源资源的数量不断增加，要求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，并支持新兴和发展中经济体使用数字解决方案来 **提高能源获取率** 在全球范围内创造社会经济机会。

数字化电力系统倡议

一个数字化的电力系统不再是一个不错的选择，而是一个 **electrification 和脱碳化的关键推动因素** 事实上，为满足阿联酋共识到2030年实现可再生能源装机容量三倍增长的目标而加速部署所需的能源，可以通过数字化转型（IRENA）来催化。（2025）。等

数字化解决方案可以为整个电力供应链增加价值，尤其是在人工智能的整合方面，有助于使各类利益相关者受益。为了促进数字化解决方案的采用，包括通过必要的政策支持和投资，确定其 **具体收益**。

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** 为了塑造相应的努力，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及时的时机。正如本报告所示，电力行业的数字化需要采取整体方法。对G7而言，这是一个机遇。 **精准雄心勃勃的行动议程，为电力系统转型设定方向**，将解锁消费者和企业的利益（从系统运营商到数据中心）并提升能源安全性和可负担性。

¹ 在利益相关者协商中，66%的受访者表示他们正在将其国家能源战略中融入数字化。只有15%的受访者表示数字解决方案未在其国家能源战略或规划中提及。

对数字解决方案所增加价值的定性评估

国际可再生能源署（IRENA）提出一个定性框架，用于评估增值数字化解决方案在电力系统转型中的效益。

数字解决方案的主要优势是：

- **终端用户电费降低** 通过优化运营、参与市场和整合低成本发电资产。丹麦的AI增强预测减少了运行备用成本，降低了10-15%，为客户带来了每年超过900万美元的节省（Bjørn Godske, 2025）。
- **供应安全改进** 通过确保即使在压力条件下、停电期间或极端事件期间也能持续可靠地供电，并实现更快的故障恢复，来实现。与传统电网相比，配备自动化技术的电网已在受控试验中证明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）。
- **更大规模地整合可再生能源** 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地减少可再生能源消纳。人工智能可以使电网超越其传统的运行限制（IRENA, 2025a）。来自澳大利亚、印度和英国的实例表明，与传统方法相比，人工智能实现了高达45%更准确的预测，从而能够更好地预测风能和太阳能的可变性，并减少消纳（Solcast, 2025；Sustainable Future Australia, 2025）。
- **终端用户增值**，帮助他们体验到更大的舒适度，并拥有更多控制和对优化机会的感知。除了成本之外，舒适度在能源相关决策中起着重要作用，特别是在需求响应计划中，而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、家用 例如 能源管理系统使约70%的美国消费者能够更好地控制他们的能源消耗，同时使他们的家庭更加舒适（智能能源消费者合作组织，2025）。
- **提升业务性能** 在能源公司和其它行业，这表明更高的运营和经济效率，更高的资产利用率以及更强的竞争力。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）。人工智能驱动的优化可以降低建筑、制造和物流行业的能源消耗10-60%（WEF, 2025）。

IRENA将 **数字解决方案的增值** 在监控、预测、运营优化、终端自动化和透明度方面。即使能促进这些价值主张的简单措施也能导致 **在一个数字编排的系统中取得强大的成果**：

- **监控** 是电力系统数字化基础层；它通过提供智能决策、自动化和优化所需的数据来使能所有其他解决方案。
- **预测** 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，帮助更有效地规划和运营系统。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%；结果是更高效的调度和备用规划（GET.transform, 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，使所有系统层面的纠正措施超越传统运营时间表。

- **终端自动化** —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** 能够在能源价值链上实现可见性，并促进电力系统中所有参与者的创新。

要利用数字解决方案为电力系统带来的好处，全球社会将不得不克服一套实施障碍。基于与IRENA成员国和来自世界各地的专家的协商，IRENA在先进经济体以及新兴和发展中经济体中确定了四个关键挑战。

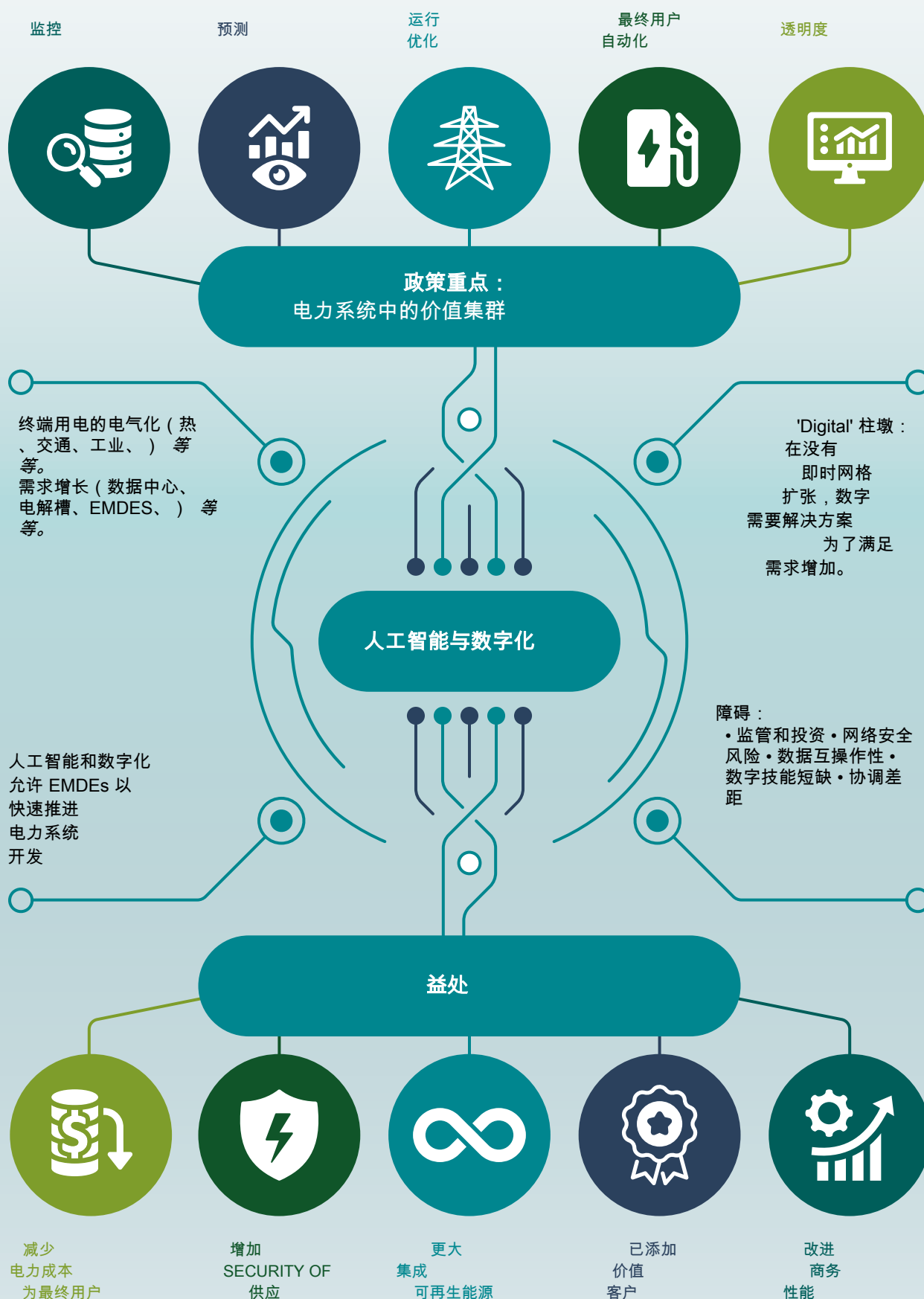
G7和国际伙伴的行动议程

国际可再生能源机构就以下建议 **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，并结合适当网络安全措施，为数字解决方案奠定基础。
- **数字技能：** 支持措施，培养全球劳动力在日常应用中的数字技能，为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不相同）的数字解决方案整合所需的创新监管，即使优先考虑能源安全也是如此。电力和数字两个部门之间的长期规划对于数字化的有效实施至关重要。
- **协调：** 提高利益相关者协调能力，支持专门的本地、区域和全球倡议，正如本报告中的许多成功倡议所示。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是加速数字时代电力系统转型关键。

IRENA已准备好支持G7和IRENA成员国在这条充满希望的道路上，通过数字解决方案，创建更具成本效益、更安全、更可靠的电力系统。

数位优势



注意：AI=人工智能；EMDEs=新兴市场和发展中国家。

1. 简介

在全球不断增长的电气化努力下，为了提供经济实惠、可靠和可持续的能源，对电力系统进行高效管理正变得越来越重要。在这种情况下，无论是先进市场还是新兴市场和发展中经济体（EMDEs），都能从创新的数字解决方案中获益——这些解决方案由人工智能（AI）的突破性进步所支持——它们能够提供实现经济实惠、可靠和可持续供应的新途径。

二十国集团（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、改造电网和整合可再生能源方面——这在其有关电网数字化、通过整合需求响应和储能来提升灵活性的努力以及国际数字能源解决方案合作（G7，2024）的声明中得以体现。加拿大作为2025年的轮值主席国致力于推动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，通过推进一份G7能源与人工智能合作计划来解决人工智能的能源挑战、发挥其创新潜力，并推动数字技术融入能源领域，以增强全球获得负担得起、安全可靠的能源的能力。

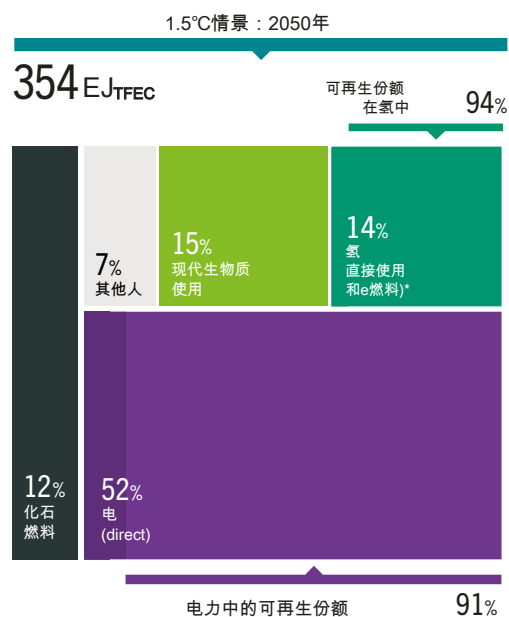
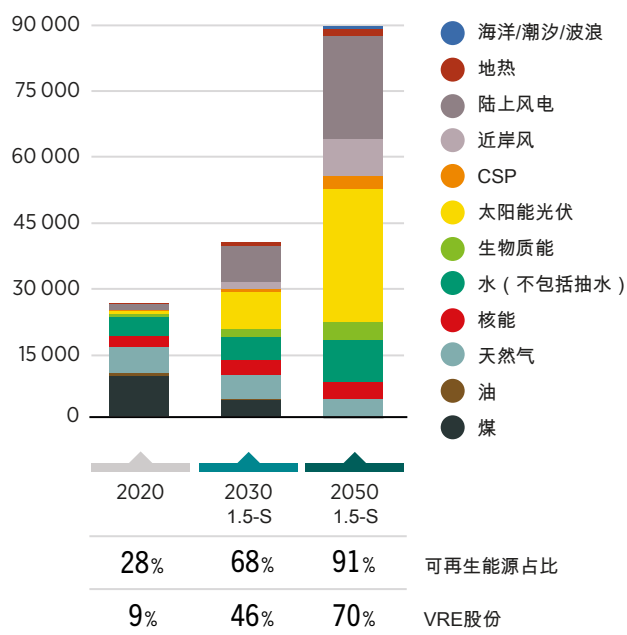
基于对七国集团（IRENA，2024b，2024c，2024d，2024a）发布的既定咨询，能源系统创新（IRENA，2019a，2020，2023a）及其全球追踪工作（IRENA，2024a；IRENA，2025）等
国际可再生能源署（IRENA），拥有遍布全球的170个成员国，致力于支持G7推进电力系统转型，以造福全球社区。

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。在此背景下，可再生能源具有强大的潜力。强劲的经济驱动因素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提供的电力成本低于最便宜的新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%），其中亚太地区承担了这些增加的72%。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，电力在终端能源中的占比将达到52%。电力系统可靠性和成本效率是此情景下能源安全和可负担性的基础，这意味着数字化将在实现这些成果方面发挥更大的作用（图1.1）（IRENA，2024a）。在某些国家，数据中心的需求预计将激增。例如，据预测，到2030年，爱尔兰的数据中心将消耗该国年发电量的31%，而美国的数据中心预计到2028年将消耗7-12%（Berkelley Lab，2024；EirGrid，SONI，2024）。其他因素，如交通电气化和许多国家供暖的电气化，有助于提高全球能源效率和可持续性，但也可能给电力电网带来潜在压力。这些可能性进一步强调了利用数字化和人工智能在技术、监管和运营层面带来的益处的必要性。

图1.1 IRENA的1.5°C情景

发电量 (万亿瓦时)



注意： 可再生能源主导供应端，电力需求主导需求端。可再生能源现在显然正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%。该图表展示了至2050年的全球电力发电预测，其将达到近90万亿千瓦时，并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重要。预计电力占比将从今天的约20%增长到2050年的52%，突显了 electrification 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 = 艾焦耳；PV = 光伏；TFEC = 总终端能源消费；TWh = 太瓦时；VRE = 可变可再生能源。

本报告视数字化为电力系统转型的关键推动力。在电力系统背景下，数字化定义为将数字技术融入系统规划、运行和管理中。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，以提高电网的可靠性、效率和灵活性，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、监测、预测、优化和自动化（具有一定自主性）价值链上操作的计算机模型和算法。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年）。

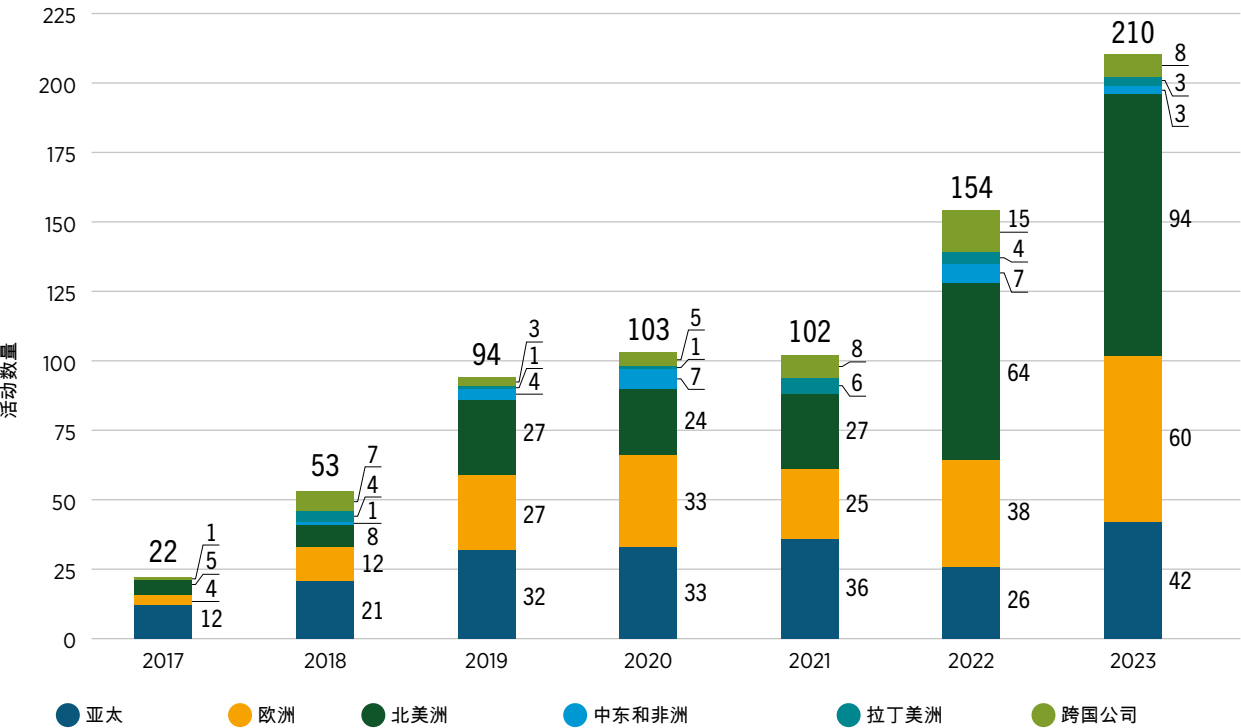
虽然效率提升对于系统管理来说是内在的期望，它们也有助于适应可变可再生能源的日益增长部署，从而放大低成本技术的优势。数字解决方案通过自动化重复性任务或涉及大量数据的任务，实现更快、更高效的系统响应。从智能电网和预测性维护到实时数据分析以及人工智能，数字化可以推动效率提升，使电网更具灵活性，改进系统规划，提高有效网络容量并优化能源消耗。与此同时，实施更协调的方法是充分发挥数字解决方案潜力以加速能源转型的必要条件。

能源数字化的发展也带来了其自身的风险。对数字基础设施的日益依赖引发了数据隐私问题，使基础设施暴露于网络攻击之下，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，为能源部门的数字化转型提供了均衡的视角。

G7凭借其全球领导力，可以支持并加速全球能源转型中数字解决方案的普及。数字解决方案可以带来能源效率提升，使能源系统更具韧性和可持续性。对于致力于现代化和扩展其能源系统的新兴和发展中国家，利用它们来服务公众利益具有巨大的潜力。

发达经济体和新兴市场和发展中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、监管空白和缺乏协调是主要障碍，IRENA发现。然而，北美和欧洲能源部门的已部署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，北美和欧洲部署的数字项目数量是亚太地区的3.5倍多，是世界其他地区的10倍多（图1.2）。

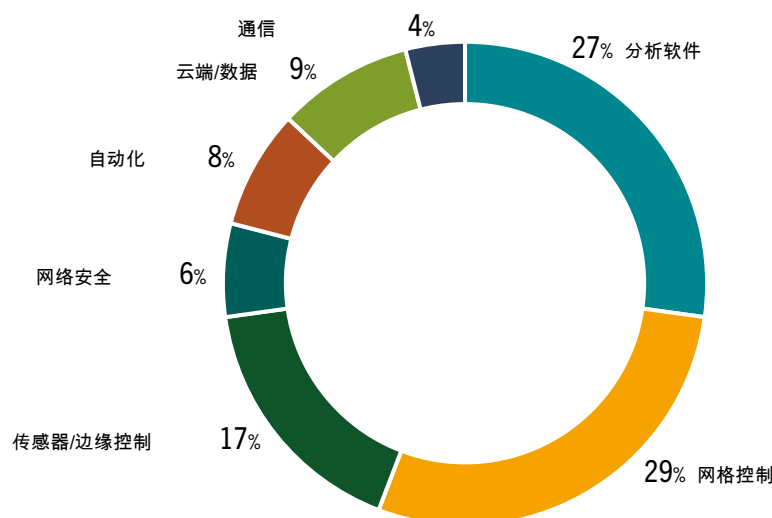
图1.2 BNEF 在电力部门跟踪的数字项目和合作关系的数量，2017-2023



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那些领域正集中更多关注（图1.3）。

图1.3 按技术领域的电力部门数字化，2023年和2024年



源码：

(BNEF, 2024).

注意：BNEF 跟踪了 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/边缘控制和网络安全领域的 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近三分之一。

超越区域差异，在新兴和发展中经济体中，挑战在规模上有所不同，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 47% 非洲截至2023年占全球无电人口总数的85% [IEA, 2025]），以及 等研发支出（R&D）。尽管2023年北非和西亚的研发支出略有增加，但它们那年仅获得了全球研发支出的4%（Bonaglia, 2024）。等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年）。国际可再生能源署（IRENA）发现，2024年，发电项目的加权平均资本成本在欧洲约为3.8%，而在非洲为12%（IRENA, 2025b年）。总体而言，这些挑战减缓了数字解决方案的采用。

与此同时，国际可再生能源署认识到新兴和发展中国家是一个多样化的国家群体，其结构和挑战差异很大。其中一些国家在社会许多领域而非仅仅是能源领域实现了数字化成就，并且其数字化渗透程度比更发达的经济体更深。例如，刚果民主共和国、塞拉利昂和孟加拉国已经实施了创新的按使用付费商业模式和综合数字化解决方案，例如物联网（IoT）、智能电表和移动支付，以增加清洁电力的普及（国际可再生能源署，即将出版）。随着本报告探讨新兴和发展中国家面临的挑战，这并不意味着这些挑战适用于所有新兴和发展中国家，也不意味着特定的路径能够同等程度地惠及所有国家。相反，本报告展示了几个在新兴和发展中国家电力系统转型方面成功、创新的举措，并鼓励全球分享最佳实践、学习和创新。

报告首先讨论了电力系统转型中五个数字解决方案价值集群——监控、预测、运营优化、终端使用自动化和透明度。随后，报告探讨了数字解决方案的具体效益，并列出了与每个集群相关的用例（第2章）。在第3章中，报告将识别并讨论实施数字解决方案的障碍，并探讨创新举措以克服这些障碍。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行动路线图，以加速在G7和国际社会部署数字解决方案——以实现一个提供能源安全、可负担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

数字化是一个广义的概念，它超越了单纯的模数替代，涵盖了多样的、不断发展的应用，通过利用计算能力来实现自动化和智能系统。因此，数字化不是一个终结的任务，而是利用信息技术创新来增强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物。例如，已经使用了数十年的远程监控和数据采集（SCADA）系统以及相量测量。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（先进且普遍的传感器/计量仪表、人工智能和量子计算等革命性计算能力）在当今比以往任何时候都更具相关性。

数字化技术能够支持具有复杂多样资产能源系统的运行；它们可以通过优化预测、运行和维护等途径来实现这一点。这有望通过使系统更加可靠和有韧性来提高效率和支持能源安全（IRENA，2025a）。

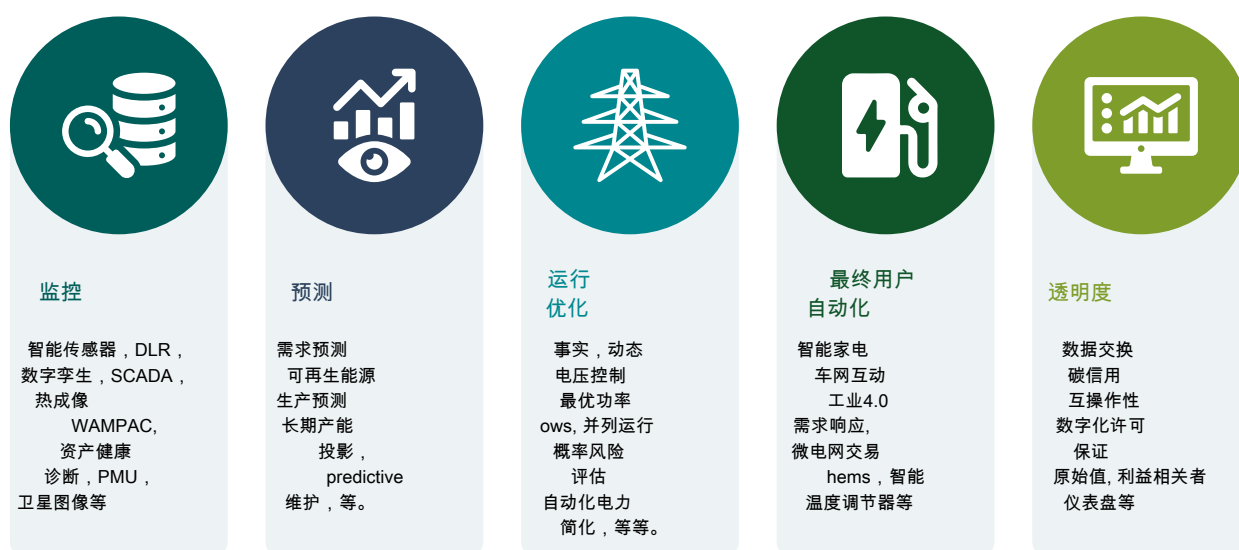
分类是整理数字化对电力系统所带来的不断增长和发展的倡议和解决方案的必要步骤。以下各节根据增值和效益对数字解决方案进行分类。基于短期实施潜力描述了选定的用例，重点介绍了能够尽快交付的解决方案，尤其是得到正确利益相关者支持时。



2.1 价值簇

在电力系统数字化涵盖的举措或解决方案可以按照多种方法进行分类。本报告将价值主张视为具体用例的始创者。这种理解意味着数字技术、政策措施和商业模式可以被归类到价值集群中 **监控**，**预测**，**运营优化**，**端用户自动化** 和 **透明度**。这些是基于这样的理由被选出的：即使是数字化商业模式或政策行动的最简单价值主张也能解决其中之一的具体问题。这些集群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集群。

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、控制和数据采集；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的基础层。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基础数据、结构化数据和环境数据。没有强大的监控，就无法有效实施预测、运行优化、最终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获取、传输和处理数据。它依赖于电力参数、资产状况、环境因素和用户行为等方面的实时和历史数据。

几种基础技术属于这个价值集群：

- **传感器**：这些是主要的数据采集工具。它们收集有关物理和环境参数的数据，例如电压、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变体，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，智能电表提供粒度化的消费数据，并支持与公用事业机构的双向通信。它们构成了高级计量基础设施（AMI）的核心，并有助于产生对需求的洞察，并适当地对灵活定价方案（EPICO，Guidehouse，2025）做出响应。

- **SCADA系统：**它们集成了现场设备、通信网络和中央处理器，以监控和控制电网运行，以及发电机和一般电力资产。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）和广域监测保护控制系统（WAMPACS）** 提供跨大面积电网的同步、高频测量。它们增加可见性，并能够快速响应中断。

- **数字孪生：**这些物理资产虚拟副本持续摄取传感器数据以模拟行为、检测异常和预测退化。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的首要步骤。基于全面、高质量数据（采集和管理）的监控能够实现和实施其他价值集群中设想 solutions，它是构建更智能、更弹性、更可持续能源系统的基础。

监控下的具体用例包括对系统参数进行高度粒度监控、对资产健康状况进行实时监控、广域态势感知（WAMPACSS/PMUs）、系统通信和网络安全异常检测，以及对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，通过将高精度数据与不断发展的分析相结合而产生有意义的洞察力的预测能力。多维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，可以预测天气和消费模式。通过这些应用，发电和需求以及其他方面可以高效地调度和管理。更好的预测能够实现更好的系统规划和运营。它依赖于先进算法来处理专业数据集。

预报在执行单元组合（调度要连接的发电机组）中至关重要 ^[1]

在每个时间段内)和管理储备金(安排备用电源的数量来处理 ^[2]

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，电力系统不得不适应快速变化；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，有效降低系统成本。一个横跨美国和加拿大试点项目表明，整合概率性太阳预测可以节省10-25%的调节(储备)采购，展示了先进预测在降低成本方面的巨大潜力 ^[3]

并且提高可靠性（约翰霍普金斯大学，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、社会事件和模式数据以及实时数据，比传统方法更准确地生成电力需求预测。高级分析模型

持续用新数据重新训练以捕获不断变化的模式（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）。更准确的预测使发电机组、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级和区域级的电力需求。

- **AI增强的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。一种名为先进人工智能技术的 或 现在可以产生高度准确的短期 *集成学习卷积神经网络* 预报（分钟到小时级别）。更精确的可变可再生能源（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，基于天气的高精度预报，具有高时间和空间粒度，能够改善负载平衡和可再生能源并网，使运营更加可靠和高效经济。

- **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价。这能够实现动态定价，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户内自动化，还是通过选择实施这些先进预测以提供更低价格的供应商。

- **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，最大化系统可靠性和延长资产寿命。

2.1.3 运行优化

更有效地（也更安全地）运营现有资产可最大限度减少损失和拥堵，有助于平衡系统，有助于提高可靠性与增加有效电网容量。现代数字化解决方案增加了输电和配电层面所遵循的既有实践（状态估计、最优潮流、随机规划）的粒度，并加快了处理速度，还能够在人类操作员所需时间以下的时间内进行故障纠正。此外，数字赋能的运营优化支持可靠离网解决方案的发展。虽然监测有助于检测损失，但数字减损解决方案则侧重于根据实时分析、智能管理潮流和电压以及运行备用优化，对电网进行重新配置的具体行动。

- **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、抽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优化潮流模型。在配电网中，智能逆变器和控制设备重新平衡相负载。在过去十年中，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：** 数字化赋予权能随机规划解决方案。随机规划特别适用于具有大型水力发电水库的系统，例如加拿大和巴西，其中水流入和水库存量引入了显著的不确定性。数字化还使得能够量化破坏性事件（设备故障、需求激增、天气波动）。除非性质最坏情况下的确定性规则，利用高级人工智能解决方案的运营商可以使用可再生能源和负荷的数据驱动预测运行不确定场景的多个模拟。扩展的模拟能力增强了运营商识别易损线路和更灵活设置储备的能力；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故障的小概率，并有助于找到更具成本优化的运营方法。

• **量子计算** 作为解决电力系统（潮流分析和电网重构）中日益需要更多计算的复杂优化问题的一种方法被研究 *例如*

分布式可再生能源源和柔性负荷被集成。通过以前所未有的速度进行系统级仿真，量子算法能高效地识别电力潮流的优化解以及预防和缓解事件的优化解，进而实现实时行动，例如提高供电安全和可再生能源并网（托马斯·莫斯特恩，2022年；TNO，量子三角洲，2025年）。

• **分布式能源（DERs）的协调/聚合：**聚合服务将多个小型资源聚合成一个资源。例如，聚合者或虚拟电厂将分布式能源资源如屋顶光伏、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总输出或总消耗。聚合意味着多个分布式资源可以被观察并最终集体控制；这为系统运营商提供了最大的可视性，以维持供能效率和安全性，并实现更智能的系统运行。

2.1.4 终端自动化

该集群包括数字市场工具、需求侧管理平台和能效技术，有助于降低消费者成本。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弃风限电，缓解拥堵，提高现有电网资产的利用率并保持电网可靠性，直至得到强化。

这些是面向用户或市场集成的解决方案，将需求响应中的系统效率转化为终端用户的直接财务收益，通常通过智能定价或利用能源使用洞察来实现。但是，虽然能够提供这些服务的设备是有效的，但它们通常具有较长的更换周期（十年或更长时间）。因此，这需要及时实施相关政策 *例如*

以及法规来支持用具备需求响应能力的这些智能替代方案替换缺乏此类能力的传统设备。

• **设备和小工具的适应要求：**数字家居/楼宇系统（智能恒温器、物联网设备）可以自动——独立操作或通过聚合器——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，得益于实时价格信号，可以显著降低账单。除其他设备外，热泵即使凭借其智能行为，也能帮助实现相关的峰值需求削减，正如研究所示。这些峰荷转移措施的广泛实施可以帮助居民用户和所有用户节省高达25%的账单，从而避免运行极其昂贵的高峰发电厂（IRENA，2024e）。

• **电池储能系统（BESSs）和电动汽车（EVs）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。电动汽车可以在低谷时段或太阳能丰富时充电，甚至在高峰时段将电力反馈回电网（车辆到电网）。家用电池可以储存夜间廉价电力供白天使用。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，并使智能家电充当分布式存储资源，其超越标准用途的应用显著提高了灵活性。

• **产业自适应需求：**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）融入制造及其他工业过程。*例如*

实现机器（电电机）的智能操作。例如，公司可以 *例如*
 短期定价和调整运营的信号（在高峰期减慢非关键流程或） *例如*
 将工厂中的并行工作流调整为利用动态费率且不影响交付时间的批量作业，或使用热存储系统为利用热量的工艺提供支持）。工业硬件数字化提供了多个机遇。例如，只有少数大型工业电机使用变频驱动器，但这可以减少电机能耗高达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将帮助美国工业每年节约850吉瓦时（GWh）（弗劳恩霍夫ICT，2023）。



2.1.5 透明度

透明解决方案并不直接影响技术性能，但对于治理至关重要。它们对于在利益相关者之间建立信任和做出知情决策至关重要。它们实现了能源价值链的可视性，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（开放数据平台、可视化仪表板、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屏，可获取清晰指标（电力每小时消耗数据） *例如*
 关于电表的仪表盘——连同高效用能的建议，显著影响他们向节能方向的消费行为转变。在这些平台上进行定制化自动化能帮助产出用户友好的洞察，并实现透明性，使这些信息对非技术人员利益相关者也易于获取和理解。

透明度解决方案并不直接优化能源流或技术性能；相反，它们通过提高可见性来改善治理、激发信任和增强决策，从而触发创新并促进能源价值链的演进。

能源属性证书（EACs），根据不同地区被称为可再生能源证书（recs）或原产地保证（gos），是提高透明度的一种工具。它们是独特的数字证书，用于验证电力发电的来源，特别是来自可再生资源。eac 通过允许消费者和企业追溯其能源的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 eac 的发行、跟踪和交易，支持自愿绿色采购，帮助消费者做出明智的选择并确保监管合规。然而，如今的 eac 通常缺乏确切的发电时间。这是随着电力系统向实时绿色电力平衡发展所需要的关键升级，而区块链等数字技术可以实现这一升级。

数字化许可 指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、整合地理空间数据并支持利益相关者实时协作，数字审批可减少管理瓶颈并加速项目进度。例如，人工智能可以通过加速环境影响评估的审查来缓解管理瓶颈——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速流程。数字审批还通过允许开发商和公众更便捷地获取审批标准、进度和决策，从而提高透明度。

市场交易和零售： 数字平台改善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加可解释和透明。反过来，利益相关者能够更好地理解可再生能源系统（发电调度、维护计划、储能充放电模式）中人工智能驱动决策的依据。例如，这促进了信任和问责制，特别是在电网规划、市场预测和资产管理等领域（Ukoba，2024）。等

2.1.6 对电力系统进行价值量化

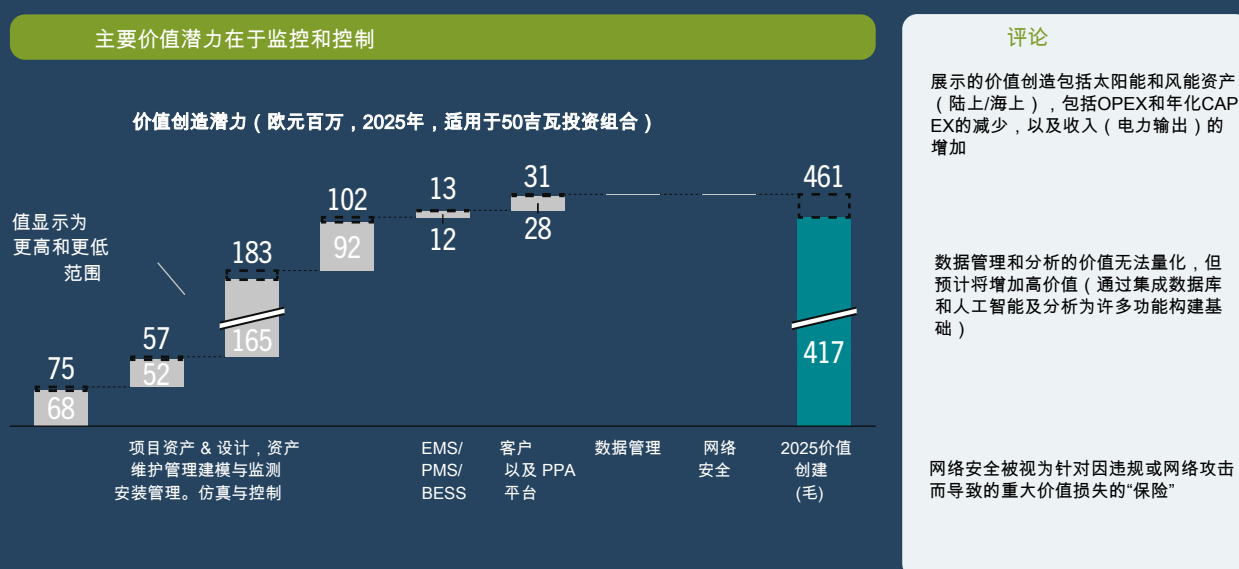
国际可再生能源署（IRENA）提出的五个价值集群阐述了在不同领域实施数字解决方案如何在系统层面增加价值。然而，对这些集群中的价值进行量化预测本质上非常复杂。这取决于利益相关者的视角——无论是公用事业、开发商、消费者还是监管机构——同时也取决于市场结构、监管框架以及数字采用的成熟度。运营和资本支出节约、可靠性改进、收入增长、避免停电（供应连续性）或消费者成本降低等指标在不同背景下差异很大。

为了说明如何从一个特定利益相关者的角度量化价值，图2.2展示了来自成熟可再生能源开发商（主要来自欧洲、美国和中东）的汇总数据。该图展示了每种类型数字平台的合并最低和最高节约额。它同时也显示了通过运营成本（和年化资本成本）的效率带来的潜在成本降低，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）。在区域 例如，对于大多数地区（不包括能源管理系统[EMSs]/电力管理系统[PMSs]/储能系统[BESSs]）与平均值的差异为4.6%-5.2%（整体投资组合为5%），为成熟的开发商提供了良好的预期指示。根据Guidehouse的数据，这些数值更为保守，基于已建立开发商的项目，这些项目已正式化并实施了运营和维护(O&M)流程，并组织了O&M结构，但对于较不成熟的公用事业或新兴市场和发展中经济体(EMDEs)可能具有更显著的影响（Guidehouse, 2025）。数据管理和分析的价值在这里没有体现，但对于数字解决方案的运行是基础性。

2.1 通过数字化创造价值

图2.2描绘了一个由多个开发商组成的综合投资组合（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）中较为温和，而在资产监控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没有被计入，但特别是网络安全被视为对抗因违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吉瓦的投资组合中）



来源：(指南屋，2025)。

注意：© 2025 指南屋公司。保留所有权利。根据版权所有者的规定，本内容仅供一般信息参考，不得作为咨询专业顾问的替代品。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。

在一个价值创造例子中，丹麦系统运营商Energinet从2025年开始降低成本，通过实施人工智能增强的天气预报，将其传统的运营备用容量采购方式进行了转变。该模型利用气象数据进行改进的预测，并为日前备用容量的采购提供信息。在2025年初的测试阶段，Energinet报告称，与传统采购相比，第一周的运营备用容量节省了10-15%，相当于每周节省110万丹麦克朗，或每年约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年就开始了动态维度测试阶段，并为Energinet项目提供了灵感（详见2.2框）。Elia集团的测试阶段展示了如何通过同行学习成功推广创新解决方案（Elia集团，2023）。

2.2 能源联网项目

能源网在采购手动频率恢复储备（mFRR）方面的新方法利用了基于人工智能的天气预报。在引入这种方法之前，能源网每天购买900兆瓦（MW）的次日储备（分布在两个主要电网大贝尔特[DK2]东部600兆瓦和西部大贝尔特[DK1]300兆瓦）。改进的天气预报可以帮助能源网限制其次日mFRR的购买。在测试阶段，不允许购买低于800兆瓦的，无论预测如何，尽管实际上在所有测试阶段天数都达到了800兆瓦的门槛。预计相对于测试阶段的结果，可以进一步增加节约。

所提供的案例说明了数字化带来的增值如何转化为具体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，但它作为价值集群框架的有力结论，突出了数字解决方案的现实影响。

2.2 电力系统数字化：以效益为导向的方法

在评估数字解决方案的真实潜力之前，需要了解数字化对电力系统不同领域的增值，而要解锁投资决策，则需识别最终收益。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，包括社会经济利益，这超出了本报告的范围。在当前分析的背景下，IRENA聚焦于对电力系统的直接影响，已经确定了数字化可以有效地带来的一些关键好处：



为终端用户降低电费： 通过提高运营效率、优化分布式资源的参与市场以及基于可再生能源的低成本发电整合，降低消费者和企业的最终用电成本。



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、可靠地提供电力，并从中断中更快地恢复。



可再生能源更大程度的整合： 通过实现灵活集成和管理有效变异性，提高可再生能源在发电组合中的份额。



客户价值： 为终端用户提供对其消费的更大控制，更大的舒适度，以及对优化成本和减少排放的机会的更多意识和知识。



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

为了映射每个价值簇中包含的不同数字解决方案提供这些利益的程度，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性。

IRENA确定的用例如下。

在监控值集群中：

- **对系统参数进行高度粒度的监控：** 高分辨率、实时测量电压、电流、频率和其他关键电网参数。这包括用于精细计费、停电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：** 持续监控电网资产（变压器、线路和 *例如* 使用先进传感器检测变电站的早期故障迹象并优化维护。
- **广域态势感知 (WAMPACS/PMUs)：** 在大规模电网区域使用所谓同步相量技术进行协调实时监控，使WAMPACS得以协调区域内的安全。
- **系统通信与网络安全异常检测：** 对关键能源系统中的数字持续监控，以检测、分析和响应网络威胁。
- **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，使用先进的气象和气候传感器、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：** 使用机器学习进行不同时间跨度的更准确的电力需求预测。
- **AI增强的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，以更好地使发电与需求相匹配。
- **预测性维护：** 预期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，不仅考虑资产状态，还考虑资源可用性和最佳电网条件，以高效规划停电。
- **短期市场价格预测：** 基于批发电力价格预测，利用机器学习模型优化电力市场交易策略，输入来自跨部门数据集的细粒度小时至数天数据（电网故障、天气、行为需求模式）。 *例如*
- **早期意识到网络约束：** 早期检测潜在的网路瓶颈和稳定性参数违规，利用基于多因素算法的先进且持续的潮流计算，以防止过载和低效的纠正措施。

在操作优化价值集群中

- **潮流优化：** 调整电流以最小化损耗，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优先处理缓解措施。

- **虚拟电厂**：聚合分布式发电、储能和灵活负荷，作为一个单一的可调度单元运行。
- **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，使纠正措施在人类操作员所需时间之内完成，最大限度地缩短停机时间和级联效应。
- **动态线路负荷 (DLR)**：基于温度、风速和其他因素实时计算输电线路容量，允许系统运营商确定每条导线的持续变化的温度限制。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，从而防止不必要的限制，例如可再生资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簇：

- **设备/装置的自适应需求**：自动调整电器使用时间以响应价格或电网信号来转移电力消耗。
- **从BESS和电动汽车中自适应行为**：利用BESS和电动汽车动态充电或放电，受益于它们作为电网灵活性服务提供商的作用。
- **产业自适应需求**：将工业能源使用转移以降低成本并支持电网稳定性和使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]、商业建筑能源管理系统[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、可追溯的可再生能源证书，并实施区块链等可追溯技术。
- **数字许可**：通过数字平台简化许可和审批流程。
- **面向消费者的控制面板**：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**：向公众开放的数据中心提供有关能源系统的透明信息，支持互操作性。

从所提出的用例和定义的收益来看，可以画出一条全面的联系，显示哪些用例擅长提供哪些目标收益。

在表 2.1 中，IRENA 根据其作为（全圆）主要催化剂或（半圆）相关贡献者对所列五个益处的相关性，对每个数字化用例进行标记。该表格是广泛研究的成果，包括对世界各地利益相关者的专家调查和访谈。虽然已确定的一些用例在部分地区可能处于成熟采用阶段，但它们对其他地区（尤其是新兴市场和发展中国家或小岛屿发展中国家）可能是变革者，或者因人工智能融合带来的潜在增加而值得再次关注。

表2.1 价值集群用例和数字化收益

价值域	用例/数字化收益	降低电力使用更多可再生能源 终端用户渗透成本(供应更安全可靠)					客户增值 舒适, 控制) 改进业务性能	
		降低电力使用更多可再生能源	终端用户渗透成本(供应更安全可靠)	降低电力使用更多可再生能源	终端用户渗透成本(供应更安全可靠)	降低电力使用更多可再生能源	客户增值 舒适, 控制)	改进业务性能
 监控	系统参数的高粒度监控	○	●	○	●	○	●	●
	实时资产健康监控	○	●	○	○	○	○	●
	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	○	○	○	○	○	○	○
	未来控制中心及自动化FLISR	○	○	○	○	○	○	○
	动态线路额定值	○	○	○	○	○	○	○
 最终用户自动化	从电器/设备的自适应需求模式	○	○	○	○	○	○	○
	来自BESS和电动汽车的自适应行为	○	○	○	○	○	○	○
	产业自适应需求	○	○	○	○	○	○	○
	终端用户能源管理系统 (HEMS/BEMS/FEMS)	○	○	○	○	○	○	○
 透明度	改善能源利益相关者之间的信息流	○	○	○	○	○	○	○
	颗粒状可再生能源证书	○	○	○	○	○	○	○
	数字化许可	○	○	○	○	○	○	○
	客户友好型控制面板	○	○	○	○	○	○	○
	开放数据平台	○	○	○	○	○	○	○

注意：● 长直接提供该效益。与实现该效益相关。它对● 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 = 广域监测保护控制系统。

这项针对价值集群和利益中数字化应用案例的分析为不同利益相关者提供了可行的见解。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控解决方案，这些方案也能使其他价值集群受益。监控系统的推广，尤其是智能电表的推广，是捕获与需求侧管理及其他客户需求优化策略相关的收益的前提条件，延迟将危及其他领域的进展。

与此同时，那些拥有成熟监控系统的地区，例如已经大规模部署了智能电表和先进电网可观察性的地区，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解决方案，包括能够实现自适应需求的智能家电/设备、能源管理系统，以及可追溯和细粒度的能源属性证书。这些都特别有助于在利益相关者之间建立信任，并为能源政策提供可见性。

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以及FLISR来提高内部效率，而各行业则可以从数字化许可中大大受益，并利用短期市场价格预测。

提升可再生能源渗透率的用例包括，例如，环境与天气条件监测、人工智能增强的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 高效益的福利提供者——案例研究

电力行业的数字化已经在不同背景下带来了切实的利益。本节介绍高性能的应用案例，展示了数字化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、提高供应安全性、实现更高的可再生能源渗透率、提升客户附加价值和提升业务绩效。

每个小节通过详细说明其架构和运行机制，探讨一个特定的用例，解释该用例如何提供目标效益，并为2026年至2030年期间的演进提供前瞻性视角。这些实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、可复制的数字化路径。

此外，从每个值簇中选择一个示例，但监控——这是所有其他值簇的主要步骤。

2.3.1 降低终端用户电力成本：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网状况和车辆用户需求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VR E发电的机器学习算法——构成了电动汽车等终端用户负载智能充电的基础。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顺畅集成至关重要。

智能充电的应用包括自动将充电转移到能源成本较低时，最小化能源批发成本（客户可以按设备享受固定低价电价）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）。自动负荷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，帮助最终用户降低电力成本

智能充电有多种方法。在解绑市场上，供应商/零售商管理电动汽车时，可以为设备消耗的电能提供非常低每千瓦时的价格；这显著降低了车辆拥有成本。在电力系统中，当公用事业公司提供分时电价时，智能充电系统可以自动安排的非高峰时段充电，此时价格较低。因此，用户能够从整体价格降低中受益，同时仍然为其电动汽车充电并保持所需的移动性。

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）。

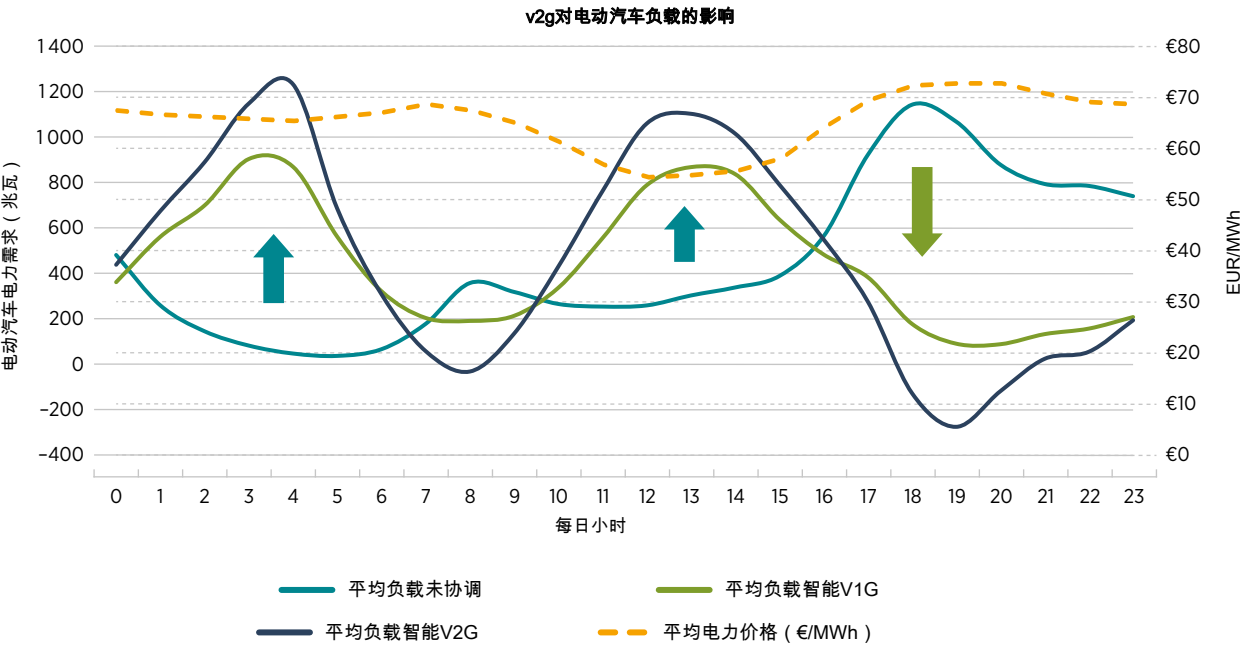
智能充电和车辆到电网（V2G）可将欧洲（EY，2025）的电动汽车总拥有成本降低7%至29%。最近研究表明，将充电时间转移到比利时的电价较低时段，当电力仅从电网流向车辆时，可使电动汽车用户的年电力成本降低15%（欧元30-35）；当车辆将电力反馈回电网时，则可降低25%（欧元50-55）（IRENA，2023b）。

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	• 普遍采用电动汽车（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。
技术和运行方面	• 电动汽车、充电桩和管理平台之间的互操作性。 • 通用标准和通信协议。 • 智能充电的数据隐私和网络安全法规。 • 标准的开发，包括计量和合格性计划（即一个优质的基础设施系统，从而带来更可靠的产品。
政策和法规	• 对广泛实施分时电价和动态定价的政策支持。 • 允许电动汽车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。 • 城乡智能充电基础设施的公平获取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。 • 精简充电设施许可流程。 • 定义车网代码以实现双向充电。
消费者合作	• 消费者教育和意识宣传活动。 • 收费过程、价格和隐私的透明度。 • 适应性和易于参与的激励与补偿方案能源市场。

基于：IRENA（2023）。

图2.3 通过智能充电降低电动汽车的电费



源码：
(entso-e, 2021).
注意：EUR = 欧元；EV = 电动汽车；MWh = 兆瓦小时；V2G = 车辆到电网。

Outlook 2026-2030

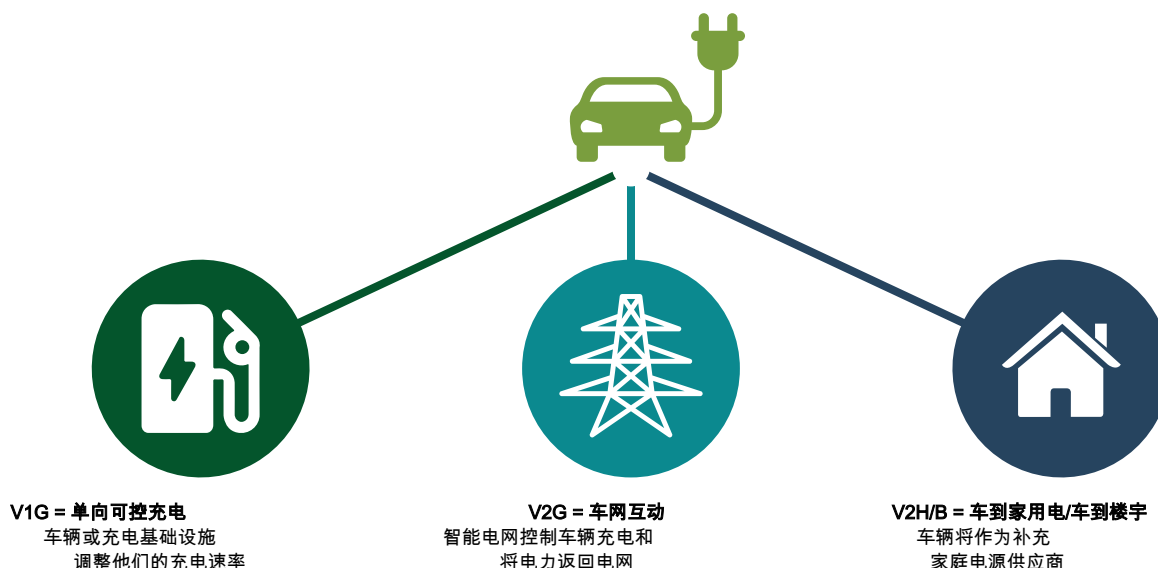
未来的数字技术进步将实现更优化的本地化（优化电动汽车充电、太阳能输出和本地电网条件）。具备V2G功能的电动汽车的更大普及将使低压网络具备更高的动态响应能力，帮助确保受限电网的可靠性并改善电压管理。其他与监控和预测相关的发展将推动电动汽车实现更优化和精确的自适应行为。

更高级的智能充电形式，能够支持更广泛的电动汽车普及，包括单向控制充电（V1G）和双向充电（车辆到电网或车辆到建筑），利用车辆作为电源，为电网和/或建筑物提供灵活性。

V1G，它采用标准智能充电器，具备基础计量功能且相对简单的电网集成，已经是一项在许多地区受到法规管制、应用广泛的成熟技术。然而，双向充电仍处于早期发展阶段，由于需要先进的双向充电器、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，面临着挑战；双向充电的广泛推广需要升级电网安全与保护协议，并制定监管和市场框架（新标准、电网服务的收益方式）。例如和明确的指导方针，以促进V2G技术的标准化和互操作性）。

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。例如需要进一步的技术和法规发展。单向可控充电利用峰谷时段充电，使终端用户支付更少，同时提供削峰服务。因此，通常采用迭代方法；在没有针对V2G的具体法规的经济体，可以尽早利用V1G提供的效益，随着V2G的法规框架逐步完善（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：通过连接汽车、热泵或充电设备制造商，系统能够管理设备的消耗。AI根据其灵活性和充电行为对设备进行集群，聚合的投资组合可以参与平衡、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——通过将充电移出高峰时段来优化电动汽车充电。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。截至2025年，拥有超过270000名客户和超过2GW的管理规模，智能八爪鱼Go已成为欧洲最大的虚拟电厂；它参与批发套利市场和配电系统运营商市场，并在平衡机制中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，在那里它管理着超过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，必须解决和管理网络安全问题，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，智能充电到2040年每年可估计节省区域能源系统220亿欧元（230亿美元）。电动车车主每年还可以节省高达780欧元（813美元）的电费（或超过平均年电费的 half）。此外，智能充电还有助于减少输电电网的压力，支持加强网络投资的优化。

来源：（八爪鱼能源，不详；国际可再生能源机构，2024e，2025a）。

2.3.2 加强供应安全：预测性维护

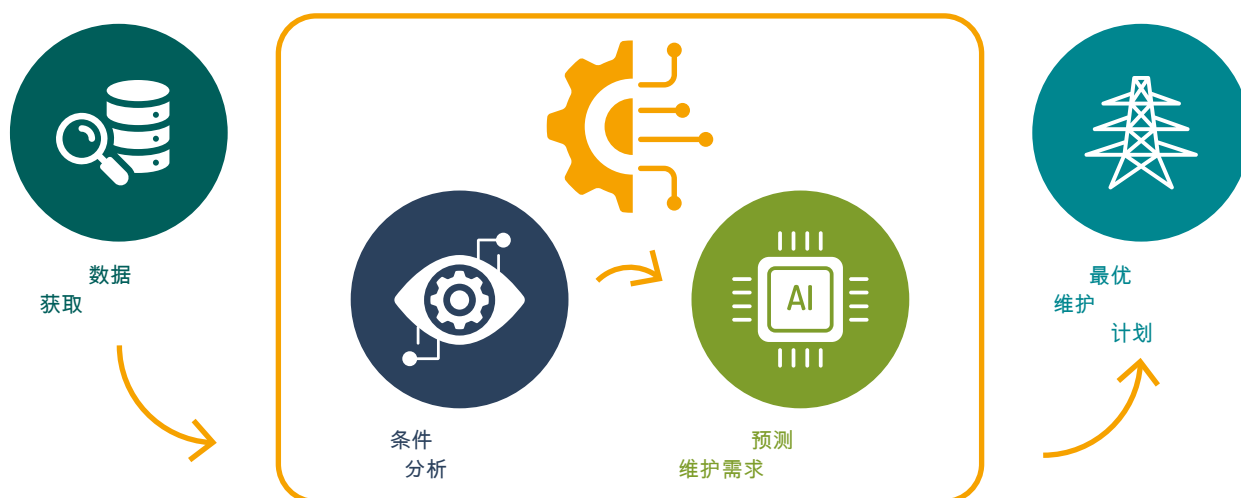
预测性维护利用数字监控设备（传感器和物联网设备）收集的特定电力系统资产和组件的实时状态和条件相关数据，AI- 例如

并且基于机器学习的这些数据处理可产生设备故障风险的预测，并触发即时维护；这反过来最小化停机时间，优化系统可靠性（确保供电连续性）并延长资产寿命（平台高管，2025）。

预测性维护架构包括多层，用于数据收集（传感器、物联网）、通信（5G、边缘）、分析（云）以及针对可行动洞察的操作可视化仪表板（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。

在电力系统中，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。这包括旋转机械（如涡轮机、发电机和泵）的振动分析；连续温度监测以检测过热；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；以及断路器、隔离开关和其他关键设备的实时状态监测（Mazi Hosseini，2024；WorkTrek，2025）。

图 2.5 预测性维护的基本构建模块

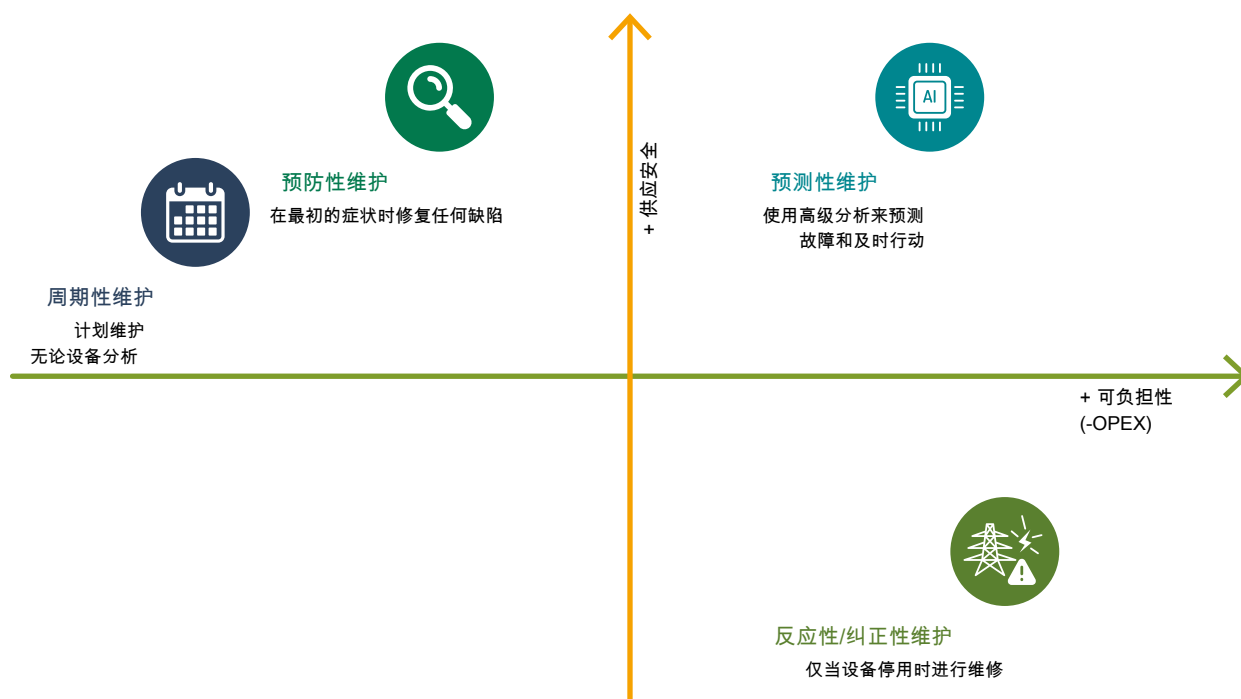


基于：(Righetto, 2021). 等

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。通过大量配备物联网功能的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，可以实现维护计划以及对发电、输电和配电资产进行及时维护。这可防止级联故障，并提升整个电力系统的供电安全性（CademiX研究所，2024年；IRENA，2019c；平台高管，2025年）。此外，由于避免了效率低下（早期更换 例如 缺乏高级分析的替代方法通常需要包含健康组件）

图2.6 替代方法在电源资产维护方面的比较



2019年，恩埃尔意大利启动了一项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，以便在问题发生之前检测到潜在问题。结果，恩埃尔成功将停电减少了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发物联网传感器、AMI和数字孪生等技术的应用。	
政策和法规	- 促进可互操作且有利于跨多个系统标准化了的通信协议制造商。 - 国家和区域电网代码中包含的规定和指导预测性维护	
技术和运行方面	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，以保护敏感电力系统运营数据（ Won Shin ）	例如基于云的等

Outlook 2026-2030

数字孪生在预测性维护中的实施，可能显著提高故障和异常检测及其他分析，因为数字孪生会不断更新关于电力系统物理状态的真实实时数据。

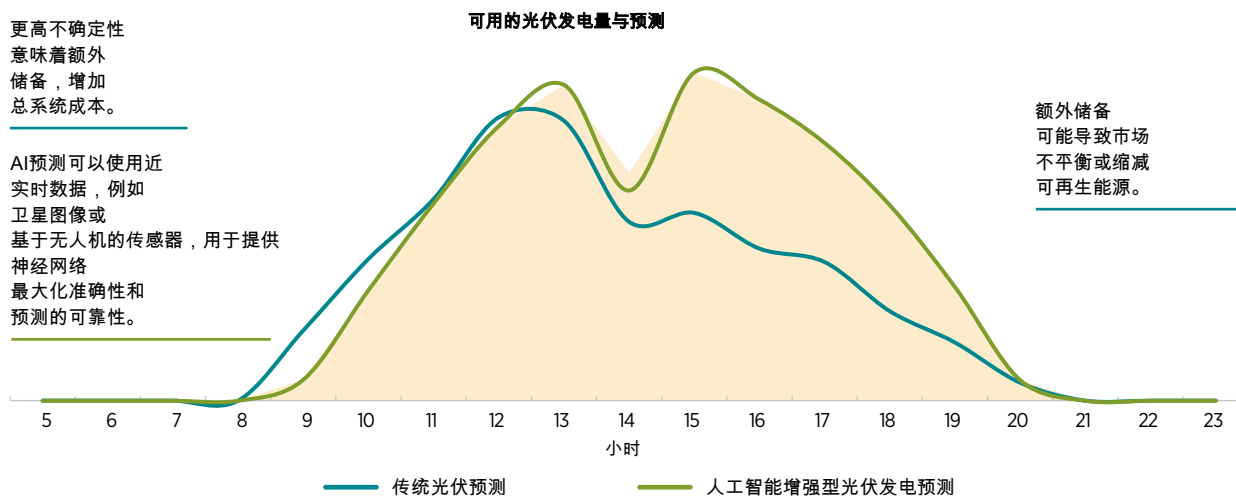
使用边缘计算进行预测性维护可能是一个未来的步骤，因为它可以减少延迟，提高安全性和可靠性，降低云存储成本，并通过消除过载的集中式数据系统来支持业务可扩展性。

预测性维护通过提供基于预测性维护输出的最佳行动建议的数字咨询来增加价值，超越了仅仅预测故障，而是推荐解决方案。

2.3.3 更高可再生能源渗透率：AI增强型VRE预测

人工智能增强的VRE预测利用相关人工智能算法（神经网络，集成学习） 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，以预测(从预测到临近预报) VRE 功率输出水平，提高准确性和时间粒度。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，可以收集不同参数的高分辨率测量值，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可以处理卫星图像，以产生关于太阳辐射和云量等参数的更好预测。

图 2.7 人工智能增强的可变可再生能源发电预测



注意：AI=人工智能；PV=光伏。

沉浸式预测有助于发电厂运营商有效规划运营，最大限度地减少削减负荷，并优化资源在辅助市场中的利用，以支持频率调节和备用功能（Arosio和Falabretti，2023）。

人工智能增强型VRE预测如何促进可再生能源渗透率提高

人工智能增强的可再生能源预测提高了预测精度，时间粒度更小（短期至长期预测）。对运行备用需求的减少，以及相应的高发电调度效率，使电力系统管理更有效。更精确的预测也允许更多可再生能源发电机参与电力市场，从而减少潜在的削减和/或不平衡罚款（IRENA，2020）。

近期研究表明，通过结合地球静止卫星图像和循环神经网络来预测光伏电站云层覆盖，现在casting算法取得了进展，预测提前期可达四小时。一个试点系统在中国五个光伏电站进行了测试，并显示出预测的晴空比与实际发电量之间存在强相关性（ ≈ 0.8 ）。这实现了更精确的短期预测，使电网运营商能够优化备用调度并减少保守的削减缓冲需求。该研究强调了基于卫星的现在casting如何通过实现即时平衡和最小化预测不确定性导致的削减来显著提高太阳能光伏集成（Xia）。等，2024）。等

表2.4 AI增强型VRE预测部署的使能步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	广泛部署用于收集天气数据等创新解决方案 基于无人机的传感器和利用人工智能及机器学习的卫星图像。
技术和运行方面	- 开发开发人员、资产所有者和系统之间的协议互操作性操作符。 - Open weather data databases (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变量可再生能源预测。
政策和法规	市场激励机制以提高预测精度(例如可靠奖励预测偏差的惩罚(不平衡成本)，访问弹性市场和支持打包竞价。

Outlook 2026-2030

上游数字技术的未来进步，这些技术是预测工作的基石，预计将使预测更加准确。这些进步包括开发先进的AI算法和智能体，用于在高VRE渗透率下的AI驱动能源和电网管理（Enlitia，2025年），云计算和边缘计算的普及，以及创建可扩展且可转移/可适配的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

量子计算领域的最新进展正在为改善风能预报开辟新的可能。量子计算机正被用于模拟纳维-斯托克斯等流体动力学方程，这些方程控制大气过程，但管理起来需要庞大的经典计算资源。这项新能力使得短期天气预报更加精确，允许风力涡轮机运营商优化发电，降低能源成本并增加电网稳定性。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方面已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结果，尽管风数据存在季节性变化，从而提高了能源产量和并网（Hong，2023）。等

2.4 数字化如何帮助集成更多可再生能源：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测高时空分辨率的太阳辐照度和太阳能光伏发电量。Solcast 的三维云模型和实时卫星数据流每 5-15 分钟更新一次。电网运营商可以使用云模型和实时卫星数据流来预测太阳波动并及时调度储备。RisingStack 的深度学习模型在 MSG-SEVIRI 卫星数据上训练，在 1 50 分钟的预测范围内实现了 7.72% 的均方根误差。这些系统使储备规划更加准确，减少了保守的削减缓冲需求，并提高了太阳能光伏的集成度（Boros，2025年；Solcast，2025年）。

在南澳大利亚州的霍恩代尔风电场，有一个实际应用案例，其中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%的更高精度，使操作员能够更好地预测风力变化并减少限电。通过将实时天气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 为客户增加的价值：颗粒化的可再生能源证书

能源属性证书，例如欧洲的原产地保证以及其他地区的可再生能源证书（可再生能源证书[RECs]或国际可再生能源证书[I-RECs]），证明电力来自可再生资源。它们允许公司和家庭展示绿色能源使用情况。如今大多数能源属性证书每月或每年签发。因此，难以核实可再生能源发电是否与消费同步，这对于实现全天候清洁能源目标是一个重要方面。

颗粒状证书，每小时发行，使发电和使用之间更紧密地匹配。这增强了可信度，支持需求灵活性和存储，并使自动化每小时报告等服务成为可能(afry)，2024; EnergyTag, 2025) 等

数字化可以使能源属性证书系统更快、更透明。区块链可以通过创建防篡改、带时间戳的记录；自动化流程；并使更小的生产者能够参与来增加价值。当制度能力有限或需要跨境协调时，这一点尤其相关。区块链还支持实时监控和社区能源共享等特性，同时促进去中心化和平等访问。（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分布式和透明的框架中。

但是，基于区块链的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机构的互操作性。在成熟市场中，对中央注册机构的信任度高，因此，区块链往往是补充而不是取代这些注册机构。在新兴市场中，加密验证有助于弥补较弱的制度框架，前提是认可的体系（如I-RECs）的整合得以维持。

能量属性证书如何为客户增加价值

基于粒度证书的智能系统设计通过融合精度和透明度，为客户增加价值，建立信任。粒度化、带时间戳的GO/REC——匹配小时用电量——赋予买家透明、不可篡改的清洁能源使用证明，使他们能够证实其环境、社会和治理声明，并保护其声誉。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 and 工业用户，支持脱碳化，并使国内客户参与并赋权（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表的集成，并实现跨国家和区域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。 - 国家级注册机构之间的互操作性以及新的数字解决方案。
技术和运行方面	数据存储和智能合约的开源标准。
政策和法规	- 激励每小时原产地/可再生能源保证的法规证书系统 (GO/REC) 。 - 跨不同领域的激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。
消费者合作	- 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，颗粒状证书预计将超越试点项目进入精准部署阶段，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。早期采用很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、可审计的溯源已经需求旺盛。基于区块链的系统的监管认可将是规模化采用颗粒状证书的关键因素。

在2026年至2030年期间，可能会出现三大主要趋势。第一是粒度证书与需求响应和储能项目等灵活性服务相结合，使工业和住宅消费者能够通过可再生能源的可用性相匹配来消费，从而最大化财务和环境价值。第二是能源社区的发展，当地合作社和城市采用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保持在当地经济中。第三是粒度证书在企业采购标准中的主流化，得到区块链和其他数字化工具的支持，领先的跨国公司可能会将其作为可再生能源采购的合同要求，从而建立新的市场规范 (AFRY等人，2024年；WRI，2023年)。

2.5 真实案例：粒度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的记名可再生能源证书（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，而概念验证还收集了微电网产生的绿色能源数据，除了发行绿色能源证书（REC）。这种安排是为了确保微电网的绿色能源生产与为电动汽车充电的消耗相匹配（Ledger Insights, 2023）。

在智利，谷歌与I-REC标准合作，测试了该国基于数据中心对小时级可再生能源发电与其消费的匹配。试点显示，细颗粒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匹配的消费份额（国际跟踪标准基金会，2022年）。美国CleanCounts（原名M-RETS）注册机构在数据库框架下实现小时级REC；它为生产商提供了小时级或月度REC的选择（CleanCounts，无日期）。

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；这反过来降低了成本，并在中央登记系统发展不完善的市场中建立了信任（非洲新闻社，2025）。

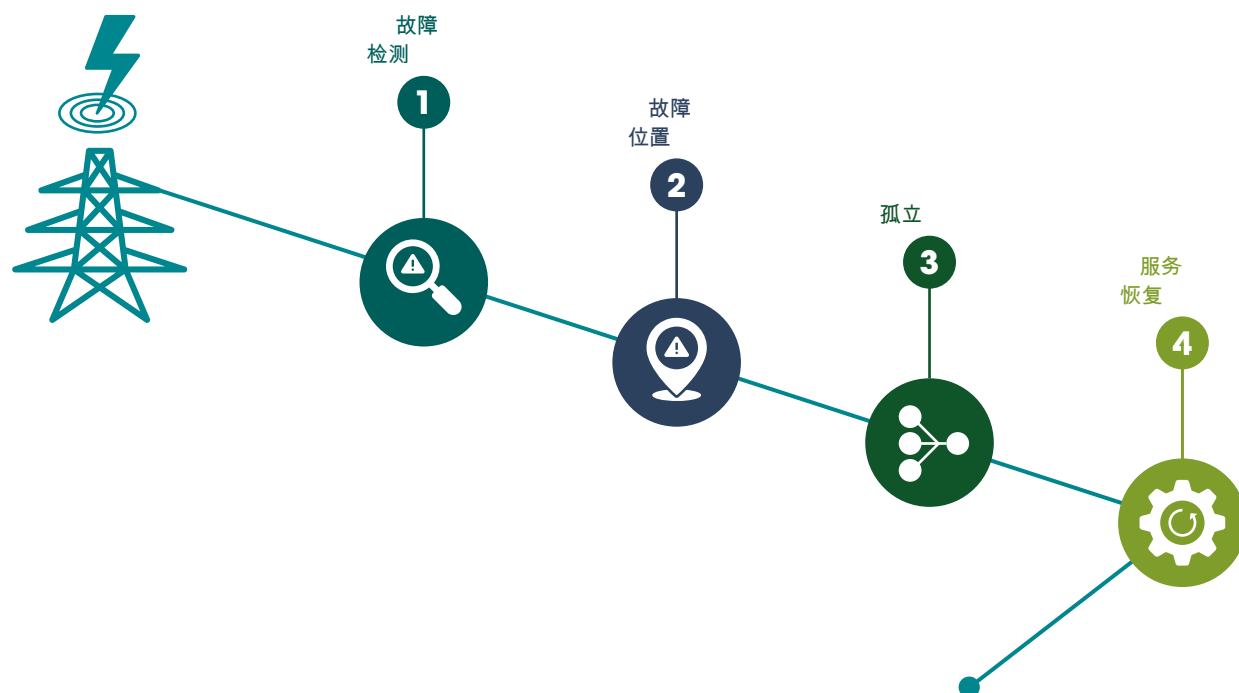
2.3.5 提升业务性能：未来控制中心以及自动故障定位、隔离、服务和恢复（FLISR）

在运营优化价值集群中，被誉为未来控制中心——即整合高级分析、自动化和人工智能时管理系统节点的地点——正在重新定义系统运营商和公用事业公司如何管理日益复杂的电力系统。随着新的监测技术从传感器、相量测量单元和智能电表生成海量数据流，出现了提取有意义见解和自动执行最佳和即时运营操作的机会。

在这种环境下，自动化的FLISR是一项核心技术。其操作涉及四个自动步骤：

1. **故障检测**：智能算法持续分析来自scada系统、继电器和现场传感器的数据流，以识别表明故障的异常（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，以便在等待现场确认的情况下精确确定故障位置。
3. **隔离**：切换命令自动发送至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，并向未受影响地区恢复供电，通常在几秒钟内完成。

图 2.8 FLISR 技术中自动化的步骤



这个实时闭环流程是“未来控制中心”计划的重要组成部分，代表着一项根本性的运营转变：决策和执行在几秒钟内完成，人类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消除了故障查找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，并实现了更精准的维护计划。这有助于推迟对新建基础设施的投资。较短的停电时间最大限度地减少了未供电量，保护了收入来源。满足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。洞察力转化为即时、自动的行动。这意味着以更低的成本更可靠地运行，因为公用事业公司可以在不按比例增加员工或成本的情况下扩展操作的复杂性，并能够从这些自动化中受益。通过在几秒钟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），但它还增强了抵御极端天气和高比例分布式能源（DERs）场景的韧性。

表 2.6 部署 FLISR 的启用步骤

分类	关键步骤和要求
硬件和软件	- 高性能分析和人工智能驱动的大规模部署自动化，能够每秒解析数百万个数据点 - 第二，发出安全、可靠的控制动作（G-PST, 2023）。
技术和运行方面	- 互操作性标准和通信进步，无缝地集成现场设备、控制软件和操作界面。 - 通信冗余。 - 解决网络安全问题的努力，就像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年）。 - 操作员培训计划。
政策和法规	激励公用事业提高可靠性指数的监管框架不按比例增加运营支出。
消费者合作	消费者教育和意识宣传活动，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）可以减少客户经历的干扰高达45%并且将停机时间缩短超过50%，这直接转化为避免成本和服务质量更高(T&D World, 2019)。

Outlook 2026-2030

到2026年，领先的公用事业公司将通过网络部署在下一代控制中心中的FLISR，在运营支出和停电指标方面展示出明显的降低。

2026年至2030年期间，FLISR与DER管理系统集成将实现协调故障恢复和DER调度，以统一的操作流程进行。在本十年末，基于云的、AI增强的控制系统平台将为小型运营商提供这些能力，并将成本效率和可靠性提升作为该行业标准的惯例嵌入其中。

在2030年之后，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，相较于传统方法具有显著的性能优势，使其成为未来控制中心理想的候选技术。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，量子退火法则能同时探索广阔的解空间，并更快地识别出最优或近优配置。在自动化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降低几个数量级，即使在未来高度复杂的电网场景下也能实现近乎瞬时的决策（Quantum Quants, TNO, 2024）。

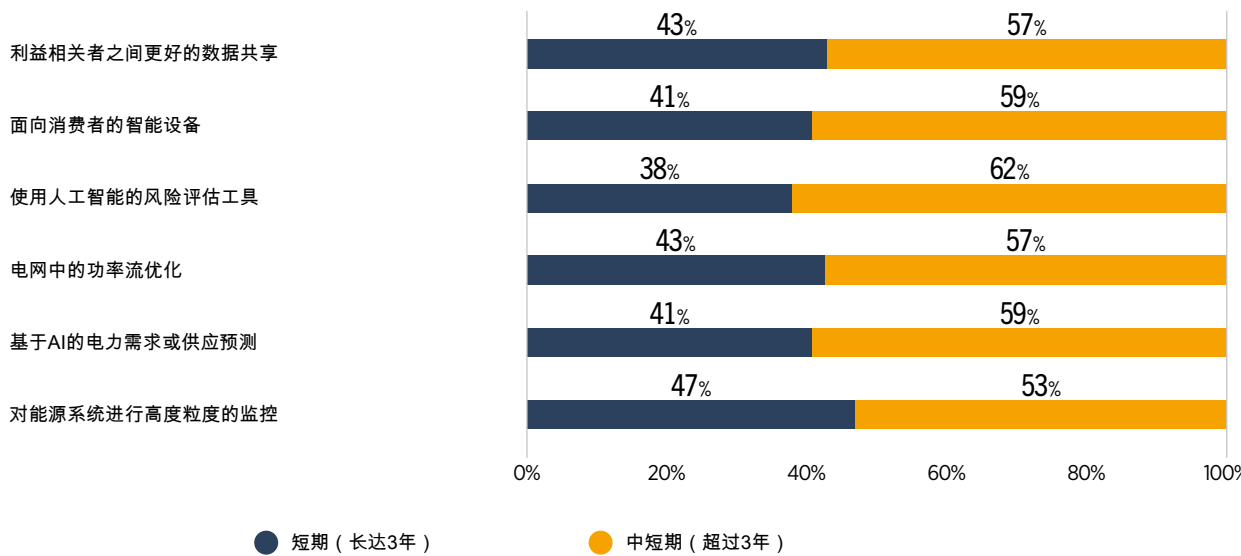
2.6 FLISR的实际应用

澳大利亚的联合能源实施了以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相结合。这创造了一个高度响应、自动化的电网控制系统。联合能源报告称 **10倍投资回报** 从其五年来的FLISR实施中。这家总部位于澳大利亚的电力分销商报告说，FLISR的实施使其能够 **减少** 将故障修复的平均时间缩短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电费，并提升系统可靠性和可再生能源渗透率，除此之外还带来其他好处。因此，针对电力系统的数字解决方案是加速能源转型（以所需的规模来减缓气候变化）的关键杠杆，同时通过节省成本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证明的应用案例获得了日益增长的认识，但实施障碍依然存在。在IRENA针对其成员国进行的2025年调查（见附录了解调查方法）中，大多数受访者并不认为图3.1所示的所有描述的应用案例示例将在未来三年内在他们的国家可用。

图3.1 数字化用例影响预期时间线



注意：AI = 人工智能。

现有的几种实施障碍往往是相互关联的。在IRENA的2025年利益相关者磋商中确定的关键障碍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：**

- **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缺乏。此外，与数据收集的新角色和职责相关的结构变化正受到越来越多的重视（数据所有权和访问控制必须有明确的角色）。*例如* 因敏感性及安全问题，系统运营商等利益相关者对数据及模型的访问受限，可能延缓数字孪生等数字解决方案的开发与试验。

网络安全问题。 数字化转型与网络安全问题密切相关，因为连接更多系统和设备会为恶意行为者带来更多入口。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造成的潜在影响就越大。

- **能力建设与信任：**

- **技能。** 解决数字化转型需求的技术工人短缺问题正在加剧。创新的速度超过了教育和劳动力发展的步伐，这一趋势在数字化转型和能源等领域的确令人担忧。

- **低利益相关者意识或信任。** 由于数据隐私、设备可靠性和人工智能的“黑箱”性质带来的恐惧，怀疑很普遍。

- **使能环境：**

- **规则** 对（数字）能源系统而言，其管理通常呈现碎片化、适应缓慢，或在某些情况下根本不存在。针对电网运营商和公用事业公司的监管激励措施往往倾向于推广传统硬件（如输电线或变压器），而非数字解决方案，这使得考虑更全面的监管方案和技术中立方法成为明智之举。

- **有限的财政激励。** 许多地区要么没有专门针对数字化项目的融资机制，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，激励措施是为了部署某项技术或基础设施——被认为是问题的解决方案——而不是为了预期的服务或成果；这限制了数字创新。

- **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 本节介绍了来自全球调查（参见附件中的方法），专家访谈和基于文件的研究所获得的见解。这些来源共同为世界各地为改善能源转型背景下的协调所确定的关键优先事项提供了全面的概述。

3.1 实施障碍：理解挑战以定义行动

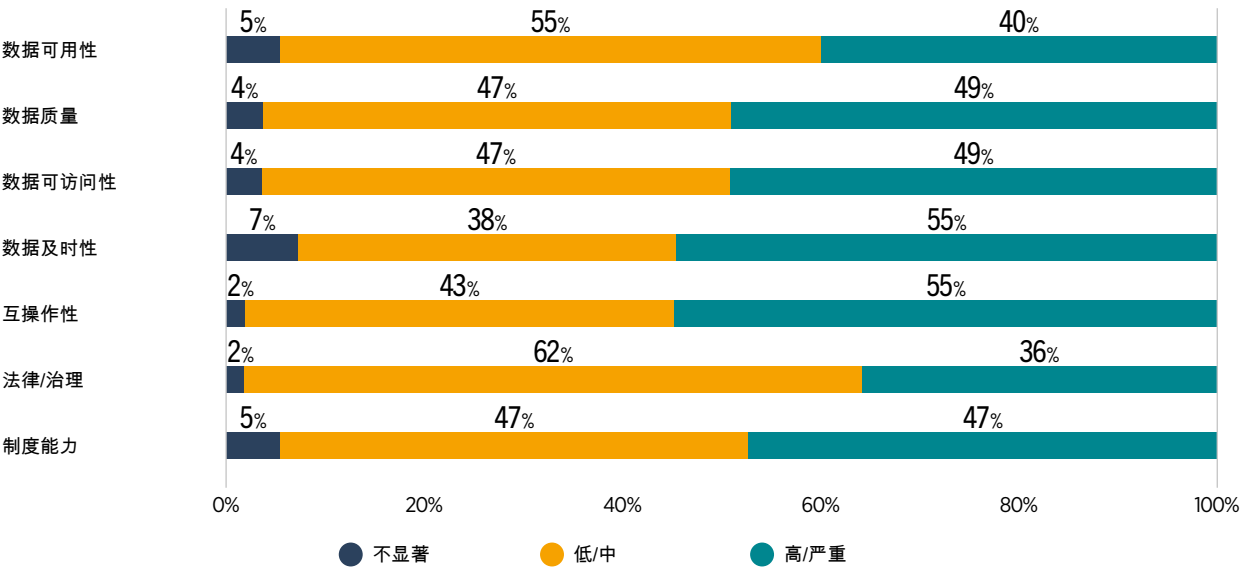
3.1.1 数据和互操作性

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的缺乏，而是查找、清理和组织数据所需的工作量。这些步骤可能占用从业者高达80%的时间，使他们只剩下20%的时间来分析数据（实用主义学院，2022年）。

此外，糟糕的数据治理加剧了其他挑战（技能和资金差距），这突显了 例如 其系统性质。根据近期研究（El Zein和Gebresenbet, 2024; G7, 2024），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)。互操作性仍然是一项实施障碍。

图 3.2 能源领域中数据实施感知到的障碍



另一个挑战是偏见。基于存在系统性偏见的能源数据集训练人工智能模型，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，如果数据集主要基于城市数据训练，那么它们可能会低估农村人口的需求（Shen，2025）。

关键操作： 制定区域数据互操作性框架；为任何类型的跨机构或跨组织数据共享定义原则、标准及层级（法律、组织、技术、语义）；建立明确的数据所有权和访问控制规则也至关重要。同样，需清晰界定外部参与方的角色；这将通过为数据共享定义透明的边界来维护合规性。

示例：一些国家已经建立了一个特殊的框架，该框架针对多个互操作性层面：例如欧洲互操作性框架（EIF），旨在建立一个框架，以便其成员国公共部门与欧洲共同能源数据空间之间进行信息交换，其旨在促进能源价值链中关键参与者之间的无缝数据交换。建立数据空间的工作正在持续进行，因为欧盟关于数字化能源系统的行动计划（欧盟，2022年）对此有规定，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（网络中心运营行业联盟）和其他国家也已建立了类似的框架（伯克霍特）。，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的影响得到了证明。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实例：

- **构建更动态的能源市场：**丹麦Energinet的数据中心互操作平台，该平台使客户、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（Energy Web）的“数字脊柱”（Digital Spine），它实现了从分布式能源资源（DERs）解锁灵活性的实时通信，这一点已在澳大利亚的EDGE项目中得到验证。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（EVs）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），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测的过程。结合基于人工智能的电网规划软件解决方案，该平台评估电网扩展措施的效果，并有助于加快网络规划流程。

综合这些例子表明，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个目标的关键推动力。

网络安全-隐私

电力系统数字化在应对网络威胁时，给数据安全和隐私保护带来了严峻挑战。随着系统日益互联互通并依赖实时数据流，从操作指标到消费者使用模式的数据量和敏感性大幅增加，这引发了人们对数据未经授权访问、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。

虽然发达经济体往往拥有更严格的监管和技术保障措施，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称已经遭受过网络攻击。近40%的公司报告称每年被攻击多次。在被调查的公司中，共有69.3%的公司每年在信息安全上花费低于300000欧元，平均营业额为713百万欧元，即0.04%（APUA, 2022）。应对这些挑战需要协调的政策行动、强大的加密标准以及在整个数据生命周期中清晰的责任制。

“随着普遍的数字化转型，针对非洲公用事业系统的网络攻击正日益成为关注焦点，导致“受访者说。”因服务中断和重大经济损失，

关键操作： 在为这份报告进行的IRENA利益相关者调查中，约71%的受访者表示需要密切 **不同行为者在定义网络安全措施方面的协调** 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。

示例响应包括：

- **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事件时提供快速响应 *例如* 网络安全事件。
- **行业主导应对：** 这可以通过行业主导的倡议可信能源互操作性联盟来说明，该联盟有 E.ON、Intertrust、JERA 和 Origin Energy 等作为创始成员。零信任描述了一种网络安全方法，其中每个交互（用户、设备、应用程序）都进行持续验证，无论其来源何方。

网络安全——物理基础设施

数字化也使物理电力基础设施更容易受到网络威胁。随着运营技术与数字控制系统更加集成，远程操控、破坏或中断的风险在增加。这对于变电站、输电线路和分布式电源等关键资产尤其令人担忧，这些资产正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物理影响，包括运营故障和大规模服务中断。

关键行动： 尽管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，而新兴和发展中经济体可能面临基础设施陈旧和技术专长有限的问题。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因地制宜，在数字创新与强大的风险管理之间取得平衡。

监管示例： 在欧洲，网络安全责任主要在于市场参与者，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《网络和信息安全指令》（NIS2）、《网络弹性法案》和特定行业网络准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领域的网络安全，包括电力系统。它规定了对风险管理、事件报告和业务连续性建立严格的要求。
- 欧盟的 **网络弹性法案** 补充了NIS2指令，并为所有数字产品设立了全地区的网络安全要求。它确保数字产品在上市前具备设计安全性、定期更新并获得CE标志的合规性。
- **网络安全领域欧洲电力行业的网络代码**，于2024年发布，建立了电力行业网络安全风险评估的循环流程(欧洲委员会,2024)。

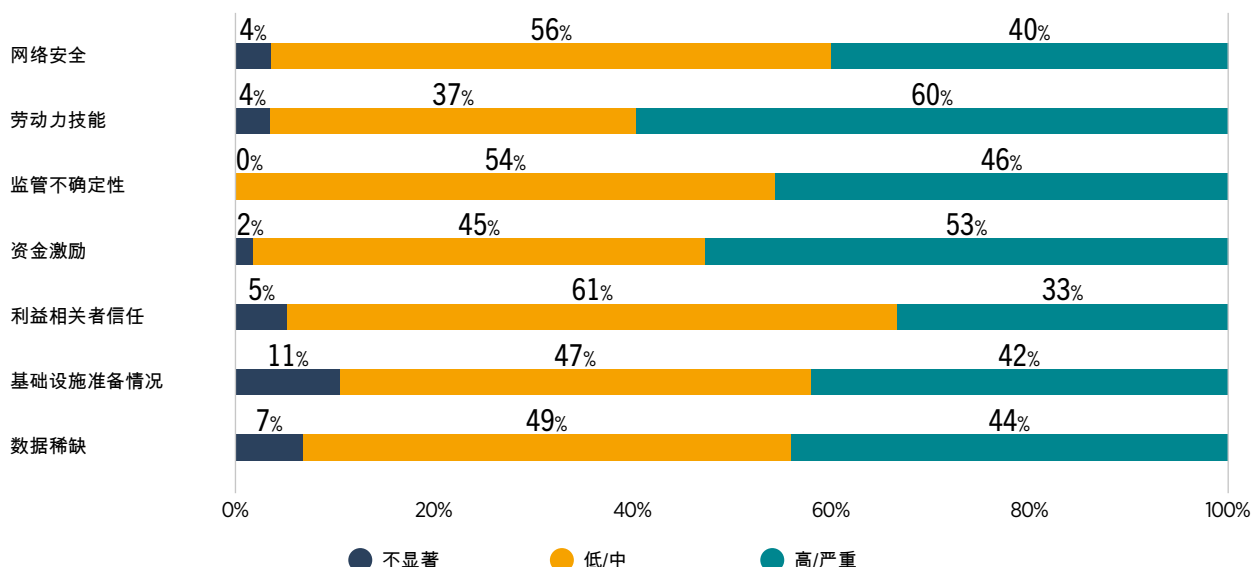
公共采购示例：一个更具行动力可以是关于网络安全问题的政府采购规则的加强。这种方法的例子是美国开发的关于太阳能资产国家采购中网络安全考量的工具包 (NASEO, 2024)。

3.1.2 数字技能

在为这份报告进行的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大关键或高障碍（图3.3）。与IRENA的发现一致，英国能源系统加速器和欧盟委员会最近进行的调查也强调了阻碍能源部门数字化的重要技能和技术差距（尤其是在人工智能、大数据和网络安全方面）（Catapult UK, 2023；European Commission, 2025）。

在他们关于“人工智能助力繁荣”的声明中，G7国家承认了以人为本的方法对人工智能的重要性，并承诺促进跨境人才交流，以更好地将人工智能专业知识与商业联系起来（G7, 2025）。然而，这种认识应该超越这七个国家，并促进在该主题上更广泛的国际合作。在此基础上，来自调查、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 能源领域对数字解决方案的认知障碍



根据当地情况提升和重置技能，将确保电力系统各层级都有充足的劳动力来推进转型。对提升技能和培训的投资被确定为政府可以向能源部门实现更公平的数字化转型所采取的最重要政策措施（70%的受访者同意这一点）。公共和私营部门对教育的资金投入带来了具体的好处：一项研究发现在人力资本投资评分上增加一个点会导致公司创新能力 digitally adaptation 显著提升（Kuzmin, 2024）。虽然未来某些能源系统工作可能需要基本的信 等 技术培训以及仅限于能源的中学培训，将会有许多员工——从非常高的技能到低技能——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关键问题 (Pereira, 2025年)。等 没有适用于所有情况的技能差距解决方案。EMDEs必须实施全面的培训政策框架

那些考虑了当地环境 (IRENA行动联盟, 2023)。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, 而是成为弥合这一差距的推动力至关重要。许多国家所谓的“公正转型基金”可能是确保能源行业实现公平包容性数字转型的金融机制之一, 特别是对依赖化石燃料的地区和工作岗位而言。

关键操作： 资助或联合资助的培训项目对支持技能提升至关重要。将现有能源领域的财政激励措施与以数字化为重点的技能提升相结合, 也可能促进额外的私营部门投资。除了开发职业培训和再培训专项计划之外, 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能力。因此, 此类项目的策划需要纳入当地参与者。

示例： 西非经济共同体 (ECOWAS) 的可再生能源与能效中心以及非洲电力卓越中心网络已经提供能源部门数字化以及其他相关主题的培训, 但他们针对不同的利益相关者。这些组织是区域行为者与国际机构合作如何不仅为能源部门提供数字化设备支持, 而且将这些支持直接与培训和能力建设挂钩的明确例证。

我们开展了许多关于能力建设和数据协调的区域项目, 现在各国需要 - 谢迪科·杜卡, 基础设施能源专员 采取区域政策并相应更新。”
数字化, 西非经济共同体。

将数字技能要求映射到分析加强和实施与行业一致的方案

伴随清晰的政策和能源规划, 将支持能源领域的成功数字化。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。

关键行动： 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发展目标相一致。国际 renewable energy agency 的《为能源转型开展技能提升行动的呼吁》(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, 为可持续能源未来进行技能发展。该平台正致力于建立一个增强的全球技能格局意识, 鼓励复制有前景的倡议, 激励更雄心勃勃的行动, 并邀请跨国合作。

示例： 加拿大人力资源和技能发展部 (EHRC) 与未来技能中心合作, 启动了一项评估和应对人工智能对加拿大电力劳动力转型影响的项目 (EHRC, 2025)。

满足能源领域日益增长的需求需要提高数字技能和拥有更广泛的劳动力库。 **社会劳动力参与需要扩大** 为了扩大该行业可用的人才库 (经合组织, 2025年); 需要提高女性劳动力的参与度 (目前可再生能源领域为32%, 数字领域为26% [卡罗尔, 2025年; 国际可再生能源机构, 2019年])。鼓励年轻女性参与数字技能项目, 使她们能够更广泛地接触到科学、技术、工程和医学 (STEM) 领域的机会, 包括信息技术。这有助于建设一个更大、更具创新力的人才库。

关键操作： 尽管许多项目分别关注数字化或可再生能源中的女性，但很少有项目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： 地方倡议，例如远程能源和太阳能姐妹，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，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 **提高劳动力以及整个人口的数字素养**。能源和交通的数字化可能增强既定参与者的影响力，限制社区和被排斥群体从体验其带来的利益（Sareen，2023）。若不注意这些方面，数字化努力可能会导致 **等** 电阻、低吸收率以及不付款或窃电等问题。能源规划表明，忽视用户行为和偏好会导致无效的解决方案（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，一直缓慢。受访者指出。现在终于显示出一些效益，这改变了人们的观念，”

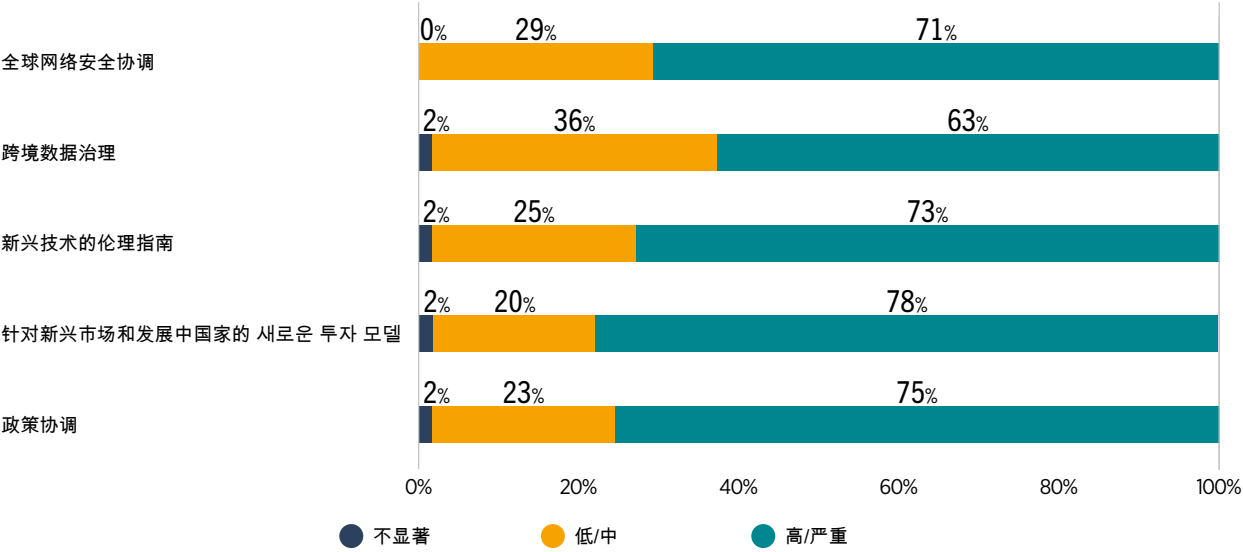
关键操作： 需要更好的与终端用户沟通和加强公民教育，以建立他们的信任和理解，并促进他们融入数字化进程。需要解决的关键领域包括提高公众意识、透明性（人工智能作为“黑箱”）、最小化对人们的潜在不利影响以及公平发展。早期教育也可以从长远来看支持社会转型和公众接受（通过正式和非正式途径使儿童和青年接触）。*即* 教育）。

示例： 一个例子是AI for Good，这是一个由国际电信联盟（ITU）领导的全球运动，与联合国伙伴合作，促进利用人工智能应对全球挑战，包括公众信任和用户包容。

3.1.3 使能因素

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%的调查受访者和许多IRENA调查中的访谈对象报告说，数字解决方案的实施受到缺乏足够的财政激励和市场全面采用数字技术的准备情况的影响（图3.3）。在访谈中，利益相关者将投资回收机制不明确视为一项挑战，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



注意：EMDE = 新兴市场和发展中经济体。

围绕数字化解决方案投资回报的不确定性，可能会导致人们倾向于替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（一个直接线性评级系统）的数字化创新却常常面临 *例如* 由于未包含在网格补偿方案中，所以存在不确定的回报。传统系统的逐步淘汰，其中许多与新的数字技术不兼容，进一步延长了过渡期并增加了成本。

“我们面临严重的资金限制，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，”

能够为数字创新服务（例如需求响应、虚拟电厂和提升客户体验）创造收入新机遇的创新方法，为投资创造了商业案例。下述几个例子说明了这些创新方法。

基于绩效的激励 为实现数字化解决方案，根据其对未来结果（提高效率或为电网运行增加价值）的绩效对公用事业进行补偿 *例如* (de Olivera, 2025)。基于绩效的激励措施也可以被视为补充性措施 等 传统的服务成本环境（Joskow, 2024）。激励将与智能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表明，它在提高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）框架内对数字解决方案和商业模式进行测试。这些测试旨在发现解决方案和模型中的差距，测试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，德国启动了其跨多个行业（联邦经济和能源部，2025）的监管沙盒创新门户的试点运行。摩尔多瓦（一个欧盟候选国）于2025年2月启动了一个专门的能源沙盒机制（摩尔多瓦能源部，2025）。

摩尔多瓦共和国，2025年）。联合国亚洲及太平洋经济社会委员会和联合国经济及社会事务部与哈萨克斯坦政府合作，开发了一套用于能源行业数字化转型的专用沙盒工具包（联合国亚太经社委员会和联合国经济及社会事务部，2024年）。

示例：马来西亚的国家技术和创新沙盒涵盖10个行业以上，包括能源。自2020年以来，在900多个申请中，有133个获得了资助。该沙盒在公司不同创新阶段提供支持，并促进产业与政府之间的交流（科学、技术和创新部，2024年）。

支持邻近/社区聚合模型的监管框架 – 允许社区或邻近消费者和生产者群体共享和优化能源资源能够实现显著效率提升和成本降低。当监管允许集体自用或本地能源共享，如在邻里之间或通过连接邻近微电网时，数字化就变得不可或缺：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优势提供支撑。集体自用框架使没有屋顶安装条件的消费者（如公寓居民）能够参与进来；这 例如在葡萄牙的研究中所示，社区计划使被动消费者能够将成本节省高达48%，同时减少配电网的压力（Belmar，2023）。等

微型电网是科技的一个绝佳切入点。它们天生具有农村和分散的特性，你必须受访者指出。形成一个集群。然后，他们需要一家公司来管理这个集群。”

示例：贝凯莱（2024）探索了通过互联对埃塞俄比亚微电网集群的影响 等对三个独立的系统进行分析，然后进行技术经济分析。将独立运行与集群式微电网进行比较后发现，尽管互联成本有所增加，但集群系统在技术、经济和可靠运行方面的效益与独立式微电网相当（Bekele，2024）。等

示例：西班牙最近一项允许在5公里半径内进行集体自消费的规定，为社区能源聚合设定了全球基准。安装了智能电表的居民和企业可以共享太阳能发电、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 是用来应对能源转型关键投资缺口的得力工具。在数据支持下、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的清晰能源规划，因其在弥合这一缺口方面的作用被视为至关重要，从而获得了 renewed attention。2024年，在巴西担任G20轮值主席国期间，全球能源规划联盟应运而生，旨在支持各国在能源转型方面的进程。

能源规划还可以帮助政府清晰地定义未来的技术需求，并确保其及时得到满足——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度机制，可以改进采购流程，并加强总体规划流程。据世界银行称，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这些服务方面也缺乏能力（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缩小数字基础设施的投资差距，并为各国提供一个现成的框架（国际电信联盟，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（ITU，2021）的使用提供了宽带连接。

将数字化目标纳入电网 **国家自主贡献 (NDCs)** 这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，正如《国家自主贡献》第三版（NDC 3.0）所示。此外，IRENA还倡导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经被考虑在内。

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： 阿联酋的第三份国家自主贡献文件3.0中提到了人工智能和大数据等数字解决方案是向净零经济转型的高级技术。马尔代夫的第三份国家自主贡献文件3.0也提到了人工智能和物联网作为实现有效气候行动的技术。

3.1.4 协调

能源行业是一个多方参与的环境。将人工智能解决方案数字化并整合到该行业，为新参与者带来了非常迅速的进度时间表。虽然每个参与者都扮演着关键角色，但它们不同的目标、风险偏好和进度时间表可能导致采用缓慢和错失机会。为了有效推动能源行业的数字化转型，不同参与者（公用事业公司、政府、数字化和能源公司、消费者和其他人）需要更好地协同。虽然数字化转型旨在管理电力系统的复杂性增加，但改进利益相关者协调和最佳实践分享至关重要。**IRENA建议以三个支柱为基础进行这项协调**，如下所述。

1. 对齐政策重点和行动

在许多国家，能源部门、创新、数字发展和教育等领域的职责分散在各个部委和机构，正如利益相关者访谈中所强调的那样。因此，在能源和数字技术交叉领域的私营部门参与者需要与不同的重点部门合作。这种日益增长的复杂性需要更大程度的协调。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年提议创建“数字化协调者”。数字化协调者是一个独立组织，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“净零排放”这样的平台等“场所”支持位于联合王国创新型公司测试其新产品，并配备地方当局访问创新生态系统，以加速其能源规划（Catapult Energy Systems，2023）。

区域示例： 生态和经济联盟促进公私合作(PPP)作为一种采购模式，用于区域基础设施发展。**西非经济共同体PPP在线平台** 作为政府与私营部门交流的知识管理平台运作，其具有全面的区域

在公私合作方面的方法促进了监控与数据采集（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、区域和全球层面系统技术互操作性

专家小组的创建： 欧盟委员会在“数字化能源系统——欧盟行动计划”（欧盟委员会，2022）下成立了“智能能源专家组”，以协调不同国家的参与方，包括电网运营商、数字技术提供商、监管机构和消费者，以加速能源部门的安全和包容性数字化转型。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）和欧盟配电网运营商（DSO）正在共同开发一个框架，用于开发和部署欧盟电力网格的可互操作数字孪生。该提案包括开发智能电网KPI（关键绩效指标），以将投资集中于智能电网，并帮助跟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跟踪数字化转型。跟踪工作显示，输电运营的数字化率更高（E-Bridge和FGH，2025年）。具体在发展中地区，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、以提高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）⁴⁰可以解决这个问题。

在国际合作方面，MENALINKS计划为埃及制定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. 支持能够激励合作的倡议和商业模式

示例： 诸如Electron Vibe等专业平台有助于将公用事业与解决方案提供者相匹配，以解决它们的实际问题。该流程是协作性的：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企业。被选中的初创企业然后创建商业案例，其中它们评估运营、技术商业和监管可行性。基于这种可行性，公用事业决定推进展示切实经济和运营效益的试点项目（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。
一位受访者指出。一起，”*

全球平台 例如净零联盟的公用事业（UNEZA）数字零碳学院不仅有助于更好地协调，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）**旨在促进全球监管机构之间的知识共享和点对点学习（RETA，n.d.）。此外，**数字需求驱动电力网络（3DEN）** – 由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共同合作 – 通过数字化、智能电网解决方案和需求侧资源整合支持电力系统现代化的加速（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上发生，突显了世界各地对这些平台日益增长的需求。

4. 七国集团和国际社会的建议

4.1 通过定制数字化战略解锁系统价值

通过数字化转型价值集群棱镜评估国家电力系统现状（监测、预测、运营优化、终端自动化和透明度）以识别可以通过具体政策行动解决的差距和机会。

促进灵活电力系统投资框架 能够使数字解决方案能够提供电网拥堵管理和资产管理等服务，同时不指定具体技术。在输电和配电等受监管的行业中采取与技术无关的方法，可以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 横跨整个电力系统，包括可互操作的数据中心、实时分析引擎和面向用户界面，这些都能赋能消费者和运营商。

鼓励将数字化纳入国家能源规划采购流程。
在能源规划、采购和监管框架中融入数字化优先事项有助于确保一致性和长期价值创造。

4.2 通过全局协调加速数字编排

促进符合各层级系统传输、分配和终端用能数字化工作的国家和次国家战略。 这就意味着数字解决方案要与物理基础设施升级一同考虑，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工具。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。

推广包容性的数字市场设计，允许开发能源服务模块化组件，包括但不限于分布式能源资源的参与和灵活负荷运行。 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。

通过共享参考架构、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发展中国家实质性地推进传统系统并采用适合其自身情况的有效数字解决方案。

4.3 基础先行：数据收集与管理、互操作性与网络安全

提升数据收集和质量。 基于相关、高质量数据集的数字化是不可避免的。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目标为数字化和实现数字解决方案的相关效益开辟了多样化的机会。此外，在技术援助和投资升级过时基础设施（模拟控制系统、*例如* 碎片化网格），特别是在需求增长和可靠性问题严重的地区。

通过国际合作伙伴促进互操作性框架。 互操作性可以解锁创新并改进跨多个平台和司法管辖区的数据交换。国际合作可以减少碎片化，促进致力于提高可负担性的开源计划或应用程序。鼓励制定互操作性和标准化工作组。

提高终端用户对智能设备的认知和支持早期采用，帮助他们解决漫长的更换周期 对于家电、车辆和工业机械等物品。及时部署具有代表性的需求响应元素可以防止或减轻电力系统中的压力，并使终端用户受益于——否则可能被忽视——的智能功能。

促进不同参与者在定义网络安全措施方面的跨部门协调 那些在电力系统中保持风险受控，同时防止网络安全标准成为数字化障碍。采用和加强所有电力价值链元素的网络安全“设计时考虑”建设利益相关者之间的信任，有可能释放举措和投资。威胁暴露的区域差异和制度准备情况意味着，网络安全战略必须是特定于环境的，平衡数字化转型和强大的风险管理。

4.4 重新思考技能与培训：教育主题与数字素养的整合

将能源领域的再培训和提升技能投资与数字技能相结合，有助于与电力行业转型保持一致。 能源部门的转型需要所有行业具备新技能。在IRENA的调查中，有60%的受访者认为技术专业人才短缺是电力系统数字化面临的关键障碍。这种技能再培训和技能提升必须紧跟转型步伐，确保相应的技术不会扩大发达国家和发展中国家之间的差距，而是作为弥合这一差距的推动者。

识别技能差距和理解行业需求将有助于为快节奏的环境培养合适的人才。 这涉及价值链分析和技能要求的改变。为了让培训产生最大影响，它应该与行业共同设计，根据当地环境进行调整，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。

未来电力系统需要社会各界所有环节参与，既包括专业领域也包括日常生活。需要设计有助于代表性不足的群体更广泛地参与到劳动力中并提升数字素养的项目。

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%），将吸引对数字解决方案的投资。 *即*

为了进一步促进这种创新，数字能源交叉点的监管沙盒可以帮助在快节奏的环境中，将想法转化为市场解决方案。 具有创新应用，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。

长期能源规划有助于通过增强投资者的信心来引导对电网基础设施的投资。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，这些方案有案例应用和国际经验作为支撑，早期规划不仅能够提升这些解决方案对电力系统的整体效益，还能为此类解决方案本身调动资金。例如巴西在COP30的主导下发起的全球能源规划联盟等支持平台³ 总统任期，以及长期能源规划倡议（例如IRENA的倡议）为协调主要全球论坛的议程、促进能力建设并鼓励最佳实践和点对点学习提供了机会。

在国家自主贡献中纳入数字解决方案，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跨国电力部门转型战略规划获得信心。 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。

为了实现融资雄心，创建更连贯的计划。支持追踪工作（IRENA的），以便政策 即 制造商对计划、抱负和实施有更多的可见性。

作为国际融资机构的合作伙伴，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融资。 这可能包括担保、混合融资和优惠资金，以降低数字能源项目的初始成本，特别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 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，包括在新兴和中小企业

加速电力系统转型需要鉴于系统复杂性的增加，在能源、数字和公共部门之间进行更好的合作。 负责能源、创新、数字化和教育的部门及机构的政策重点和行动必须协调一致，以便处于能源和数字技术交叉点的私营部门参与者能够在更连贯的框架内进行导航。协调的方法（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。区域性地，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。像UNEZA和RETA这样的全球平台进一步改进协调和能力建设，而像3DEN这样的合作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的合作框架在知识交流和国际协调方面（涵盖从海上风电到关键材料等各个主题）具有成功经验，这些经验可以复制到数字化和人工智能方面。

国际可再生能源署（IRENA），拥有170个成员国和欧盟，以及公用事业联盟UNEZA、行业联盟AFID、其合作框架、全球能源规划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

阿比苏耶, B.O., 孙, Y. 和 曾辉, W. (2024), "可再生能源预测中人工智能方法的调查：方法论和见解", , 第48卷, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100529> 可再生能源焦点

AER (2023), "综述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赋能的绿色能源证书交易市场", 非洲新闻社 www.africannewsagency.com/ 增长点与燃料转换合作启动非洲首个区块链支持的 可再生能源证书交换 (接入于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 (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：当前趋势与未来机遇分析", 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转型。数字化转型协调者的作用\
<https://www.neso.energy/document/323266/download>

贝凯莱, A., (2024), "微网集群的最优规划与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、技术和参与者的类型

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

贝尔霍特, V. (2023), , 欧洲委员会：司局- 等 欧洲能源数据空间
能源通用, 弗劳恩霍夫系统工程与创新研究所ISI, 指南针, 麦肯锡公司, TNO, Trinomics, 乌特勒支大学。

博尔恩·戈兹克 (2025年), "Energinet：AI可以为我们提供更便宜和更好的供应安全"[Energinet：AI可以为我们提供更便宜和更好的供应安全], www.ing.dk/artikel/energinet-ai-kan-give-os-mer-billig-og-better-forsyningssikkerhed 工程师
更便宜—更好的供应安全 (访问于2025年9月2日) 。

邦纳利亚, D. (2024), "年度终版 – 尽管困难重重，全球研发已接近增长至美元 等
2023年3万亿", 世界知识产权组织。

波罗斯, A. (2025), “精准太阳能预测：一种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年), “基于AI的高压电力系统预测性维护” www.cademix.org/ 高压电力系统的维护

Catapult能源系统 (2023), “一项调查揭示能源行业的数字化与数据技能差距——能源系统Catapult” <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：构建通往脱碳经济之路”, www.cleancounts.org

E-Bridge, 以及FGH (2025), 《关于电力分配网络能源转型能力和网络服务质量监管的评估报告》 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> 爱尔兰十年世代容量声明 2023–2032

埃尔·泽因, M., 和盖布雷斯贝特, G. (2024), “可再生能源领域的数字化”, 卷. 17/9, 能量第1985页, 多学科数字出版社 <https://doi.org/10.3390/en17091985>

电子律动 (2025), “电子律动”

elia集团 (2023年), “DARE——动态每日维度确定储备需求”, <https://innovation.eliagroup.eu/en/projects/dare-dynamic-daily-dimensioning-of-reserve-needs>

能源标签 (2025), “能源标签认证首批颗粒状证书发行商, 标志着小时级清洁能源追踪的一个重大里程碑” 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), “人工智能如何改变可再生能源”, www.enlitia.com/resources-blog-Enlitia 帖子/6种方式人工智能正在改变可再生能源 (访问于2025年7月9日)。

ENTSO-E (2019), 欧洲能源传输系统运营商联盟, <https://annualreport2019.entsoe.eu/cybersecurity-年度报告互操作性-数据/>

ENTSO-E (2021), 欧洲能源传输系统运营商联盟, https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/210331_Electric_Vehicles_integration.pdf

EPICO, 指导者 (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/创新性方法：智慧电网的PPP.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/zh-cn/363151595914878255/pdf/创新性方法：智慧电网的PPP.pdf)

欧洲委员会 (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.pdf

欧盟委员会 (2022年) ,\COM (2022) 552 final\ <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日通过, 补充欧洲议会和理事会法规 (EU) 2019/943, 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络编码\", [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%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/zh_cn/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并网至关重要 (访问于2025年8月5日)。

联邦经济事务和能源部 (2025) ,\监管沙盒——创新与监管的测试环境\ 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), 对采用变频驱动器的电动机节能潜力的研究
, www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Verband/Fachverbaende/Automation/Elektrische_Antriebe/Cemep_Studie/Cemep_Fraunhofer_study-电机节能潜力与变频器-20231215.pdf 欧盟

G7 (2024) , 都灵, www.g7italy.it/wp-content/uploads/G7-气候-能源-环境部长公报_Final.pdf

G7公报 (2024) , 气候、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公报_最终.pdf

加利西亚, F., 和伦德, S. (2024), \重新评估新兴市场贷款中的风险：来自GEMs联盟统计数据的洞察\", 国际复兴开发银行。

GET变换, GIZ (2024) , , https://get-transform.eu/wp-content/uploads/2024/01/GET.Transform-Brief_VRE-Forecasting-Solar-Wind.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

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-actions_public_V3_chinese.pdf 在哥伦比亚

指南针公司 (2025年), "采访指南针专家及从可再生能源开发商处数字化量化价值创造案例"

红 (2023), "一种鲁棒的短期风速混合经典量子模型" 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案例研究: 2040年法国
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: 2025年能源进展报告
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/能源与人工智能.pdf>

IRENA (2018), , 国际 区块链: 加速全球能源转型的新工具
可再生能源署, 阿布扎比 www.irena.org/news/articles/2018/Nov/区块链赋能电力互联网 (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/可再生能源二/面向可再生能源未来的创新格局>

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

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2019.pdf?la=en&hash=AE6EBFE616C1F0511BEAA6F2B8ABCDE44209C1F

国际可再生能源署 (IRENA) (2019e), 《IRENA创新格局报告: 区块链在电力部门中的演变作用》, 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

IRENA (2023a), , 智慧电气化创新格局: 通过减少终端用能部门的碳排放
国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/files/IRENA/机构/出版物/2023/六/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年 : 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

国际可再生能源署 (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/World-Energy-Transitions-Outlook-2024

IRENA (2024b) , , 到2030年可再生能源翻三番 : 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 使用可再生能源脱碳难减排行业 : G7的前景
可再生能源署, 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-七国集团的前景

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

IRENA (2024e) , , 国际 终端用能智能化电气化 : 配电电网的效益
可再生能源署, 阿布扎比 www.irena.org/Publications/2024/Sep/终端用能领域智能电气化-配电电网的效益

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>
2024年可再生能源发电成本

IRENA (2025c), , 国际 促进道路运输基于可再生能源电气化的政策
可再生能源署, 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) , 《关于能源转型技能提升的行动号召》 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 由可再生能源驱动的可持续增长创新格局
可再生能源署, 阿布扎比 www.irena.org/publications

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 能源容量并在2030年前将能源效率提高一倍
总统, 全球可再生能源联盟, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2025/Oct/阿联酋-共识-2030-三倍可再生能源-加倍效率

itu (2021), \“与传输和能源 (电力和石油和天然气) 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

约瑟克 L. (2024), \“美国电力分配和输电激励(绩效导向)监管的扩展 \ , 65, 第455-503页。 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：一个作用” 等
信息和通信技术与人本资本\, 能源战略评论, 卷.53, 第101418页, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101418>

账本洞察 (2023) , “EDF 在 Hedera 公共分布式账本技术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.账本洞察ledgerinsights.com/edf-tokenized-recs-hedera-dlt/) (访问于2025年8月13日) 。

马兹·霍塞尼 (2024), \“电力变压器预测性维护：确保电网可靠性\ 阿尔松
 , [www.arshon.com/blog/电力变压器预测性维护-确保电网科技
可靠性/#:~:text=关键预测性维护技术&text=它涉及采样和分析,%2C电弧,%2C或绝缘降解](http://www.arshon.com/blog/电力变压器预测性维护-确保电网科技可靠性/#:~:text=关键预测性维护技术&text=它涉及采样和分析,%2C电弧,%2C或绝缘降解) (访问于2025年7月10日)
。

MENALINKS (2025), \“知识库 / MENALINKS计划\ <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) , \“能源沙盒机制现已运行。 \ <https://www.energie.gov.md/en/content/energy-sandbox-mechanism-now-operational-applications-can-be-submitted-online>

科技、工业与创新创业部 (2024年) , “国家科技与创新创业沙盒”
<https://sandbox.gov.my/>

环境保护与能源安全部 (2024年) , \“3DEN计划-数字需求驱动型电网\ <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号, 2025年6月24日 <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/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虑
Data/Sites/1/documents/tk-news/catss-procurement_v2.pdf](https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/catss-procurement_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

八爪鱼能源 (无日期), \“智能八爪鱼的增长\ <https://octopus.energy/blog/The-growth-of-Intelligent-Octopus/>

OECD (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)。

奥利维拉, L. G. S. (2025), \“向巴西配电网运营商转型：功能 , 等
益处 , 战略途径。 <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/#用于预测性维护的人工智能模型

Powerledger (2023), *Powerledger白皮书: 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 (访问于2025年10月7日)。

实用机构 (2022), 《克服数据科学中的80/20法则》, 实用机构, <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> 由量子计算驱动的电网优化

远程能源 (2025), 《远程能源——太阳能行业中的女性赋权》 <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\ *CIRE2021 - 第26th 国际电力会议和展览会*, 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源意味着什么\ <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-消费者状态-完整报告.pdf> 2025 消费者状态

太阳能姐妹 (2025), “用经济机会赋能当地女性创业者\ , *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气象数据\”, DNV www.solcast.com/live-and-forecast

可持续未来澳大利亚 (2025), “人工智能预测让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年), “I-REC标准支持谷歌在美国和欧洲以外的首次全天候匹配测试” www.trackingstandard.org/the-i-rec-standard-supports-googles-first-24-7-matching-test-outside-of-the-us-and-europe/ (接入于2025年10月1日)。

约翰霍普金斯大学 (2022) *协调加速能源产品及调峰备用采购*, <https://www.osti.gov/biblio/1873393#:~:text=协调启动产品和法规储备采购在,%28EERE%29%2C%20可再生能源办公室。太阳能技术办公室>

托马斯·莫斯特因 (2022), “基于退火量子计算的组合最优电力流” <https://ieeexplore.ieee.org/document/9863874> / *EEE*

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), “未来控制室使电网实现数字化韧性” <https://www.tudelft.nl/en/2022/tu-delft/tu-delft-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/第7期, 第3833–79页, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0958305X241256293> 能源与环境

联合国经济和社会理事会和联合国社会发展部 (2024年), “关于可持续发展的数字技术政策实验和监管沙盒全球研讨会” <https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/KAZAKHSTAN%20Richard%20Stace%20-%20TOOLKIT%20Presentation%20for%20Bangkok%20Workshop%20FEB24.pdf>

联合国 (2025), 支持政策简报 可持续能源性别指标：一项行动呼吁
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), 美国电力输配中的节能改进机会
, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f22/QR%20Analysis%20-%20提高能源效率的机会%20in%20the%20US%20电力%20输配%20系统_0.pdf 配电系统

美国能源部 (2024), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/network-modernization-strategy2024.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案例”, www.worktrek.com/blog/预测性维护实例/#能源行业的用例 (访问时间：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年), “全天候无碳能源的现状：近期进展与需要关注的事项”, 洞察报告 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进行云覆盖精确临近预报” 等
卫星图像”, <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44666-1.pdf>

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

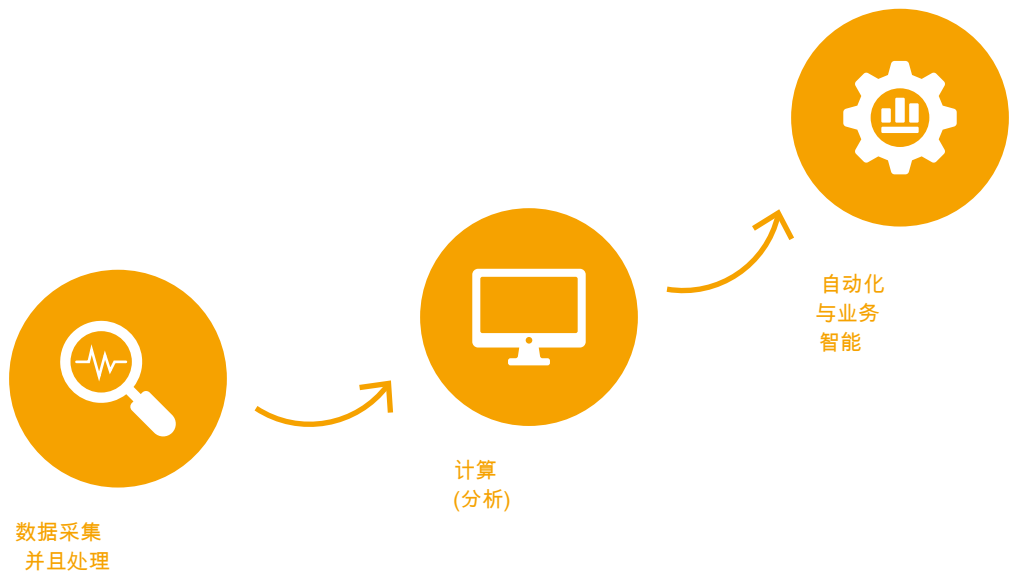
zew (2023), “节能作为数字化项目动机”, <https://www.zew.de/en/press/latest-press-releases/energy-savings-as-motivation-for-digitalisation-projects>

附件

术语表

本词汇表包含了一些在电力系统数字化中有多种应用的基本技术的解释。数字化依赖于使用传感器、智能电表、监控系统与数据采集（SCADA）系统以及先进的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），在各种用例中实现数字化。本附件描述了对数字化至关重要的数据采集技术和数字技术。

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成部分。它们是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、运动和声音，并将它们作为数字信号传输，这些信号可以被处理和分析（zeroinstrument，2025）。

作为物联网的核心使能器，传感器促进跨能源、制造、医疗保健和交通等各个领域的数据驱动应用。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采集成为可能，从而实现实时监控、提高安全性和增强运营效率。

物联网

物联网是指嵌入传感器、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，从而优化运营并为电网提供灵活性（IRENA，2023a）。

智能电表

智能电表是一种先进的电子设备，可以记录并向公用事业公司和消费者传输近实时能耗测量数据（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）实现。它们是高级计量基础设施（AMI）骨干。重要的是，它们能够实现频繁的计量读数（每15分钟一次），而不是每月手动读数，并支持功能例如像远程连接/断开连接、分时电价和停电检测。

高级监控系统

先进监控系统整合多种类型或来源的数据（高级电表、相量 例如

测量单元[PMUs]和实时气象数据)以改进电网运行。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细节视图；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，从发电机组和特定电气设备到变电站和输电网络。它们从现场设备（如传感器、执行器和计量器）收集实时数据，并将其传输到中央化仪表板以供人机交互使用。从现场技术人员到控制中心操作员，他们使用scada接口来可视化系统状态、发出控制指令以及响应故障或异常。这些系统提供观察电力系统的能力。它们促进远程监控、自动切换，并能与其他更复杂的计算环境中的数字工具集成，以提供多样化的洞察力和自动化功能。

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全生命周期管理。

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），但它们代表了更广泛的数字化转型中的一个强大工具，能够提升智能电网中的态势感知能力、运营效率和决策水平。持续的数据集成和高级分析体现了数字化作为一种持续增值的创新过程的核心本质，推动着现代电力系统的发展。

区块链

区块链是一种分布式、数字化的交易验证账本。它提供了共享、安全且透明的环境，所有交易都在此环境中登记、记录和处理（IRENA，2019a）。

该技术使得在能源领域的数字化应用得以实现，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的验证。反过来，它为管理能源领域日益增长的复杂性提供了一种解决方案。区块链的透明性和不可篡改性增强了信任，降低了交易成本，并支持了新的商业模式，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经试点了所谓的基于分布式账本技术的结算/账单和证书发行，提高了可审计性并减轻了行政负担（IRENA，2018；世界银行，2020）。

云计算和边缘计算

云计算将来自各种能源资产的巨大数据量进行集中化管理，提供可扩展的存储、高级分析以及实时监控。这些集中的数据有助于优化运营，提高效率，通过预测性维护和自动化整合可再生能源并改善电网管理。

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整个电网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；并支持了为电网可靠性、停电管理和如太阳能和风能等分布式能源的集成而进行的快速决策。

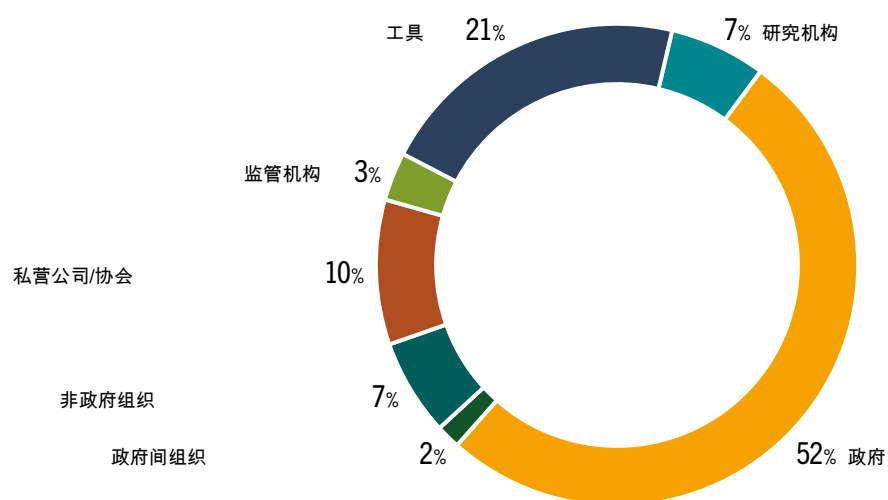
电力行业中的AI应用

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）预测；帮助管理电网稳定；并实现高效的Demand-side管理、优化的储能运行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、计量器和其他数字设备的数据集，以改善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的自动化和优化。

调查方法学

为了深入了解能源部门当前的数字化水平，以及具体的挑战和政策解决方案潜力，国际可再生能源署（IRENA）进行了一项涵盖所有170个IRENA成员国，直至各国IRENA联络点的调查。由于时间有限，收到了61份回复，其中大部分来自政府机构和公用事业公司。受访者来自多个国家，包括发达经济体，以及新兴市场和发展中国家。IRENA还对14位专家进行了详细访谈，以进一步分析报告背后的内容。

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的熟悉程度。其中，28%的人稍微熟悉，33%的人有点熟悉，39%的人相当熟悉这个话题。

