

Deloitte.

Together makes progress

众行致远

德勤



能源领域的人工智能

解码可持续人工智能
以实现具有韧性的能源转型

目录

序言	03
简介	04
1. 引言	06
2. 能源领域的人工智能	07
2.1. 人工智能在能源系统中的主要应用	08
2.1.1. 系统优化与控制	09
2.1.2. 资产全生命周期管理	11
2.1.3. 用能终端能效管理	13
2.2. 人工智能应用的相互关联性	15
2.3. 衡量人工智能的影响	15
3. 主权人工智能	18
3.1. 能源系统中的主权人工智能考量	19
3.2. 人工智能对能源系统韧性的提升	20
4. 解锁可持续的主权人工智能	21
4.1. 主要考虑因素	22
4.2. 创造包容性的人工智能未来	23
附录	25
附录1. 人工智能应用在能源系统中影响的计算	25
作者	28
联系我们	29
尾注	32

序言

全球能源系统正处于一个转折点。能源行业的许多领导者正在应对一场规模庞大且复杂深刻的转型，在不确定的环境中，他们需要平衡不断增长的需求、环保因素以及增强运营韧性的迫切要求。这些交织的挑战也带来了机遇：通过负责任且战略性地应用人工智能 (AI)，重构能源的未来。

人工智能正在迅速成为推动能源系统取得可观进展的关键驱动力。行业领导者正在部署人工智能引领的解决方案，以优化运营、增强系统可靠性，并实现显著的经济和环境效益。从可节省数十亿美元且同时减少排放的自动化甲烷泄漏检测，到 AI 赋能的兼具成本节约与电网灵活性的需求预测，种种证据表明，人工智能已在帮助能源利益相关方更高效、更可持续地实现目标。

人工智能对能源系统可能产生的影响十分深远——到 2030 年，通过战略性地利用人工智能，有望实现远超其自身能耗的节能效果，预计每年可节省数千亿美元成本，并有助于减少碳排放。然而，这些效益并不会自动实现，可能需要在整个能源生态系统中采取相应行动才能达成。能源生产商和工业制造商、科技公司、金融服务机构以及政策制定者都各自发挥着重要作用。

此外，随着人工智能日益融入关键基础设施，领导者们必须致力于维护主权、透明度和问责制等原则。加强本地能力建设、治理机制以及符合伦理的人工智能实践，有助于为人工智能成为安全与韧性的可信赖推动者奠定基础。

本报告为组织的领导者们提供了一份及时且可操作的路线图，旨在介绍利用人工智能推动能源系统在效率、可持续性和长期韧性方面的发展。通过深入探索这些话题，了解其他领先组织如何应用这些由人工智能赋能的解决方案，并思考您及您的组织如何助力塑造一个可持续且由人工智能驱动的未来。



Jennifer Steinmann

德勤全球可持续发展服务
领导合伙人



Costi Perricos

德勤全球生成式人工智能
服务领导合伙人

简介

能源系统正面临日益严峻的挑战,尤其是需求增长、环境因素考量以及对增强韧性的迫切需要。¹ 人工智能(AI)具有巨大的变革潜力,能创造可观机遇,助力优化运营、提升可靠性,并释放显著的经济与环境效益。^{2,3} 目前, AI 已为能源系统在效率、可靠性和可持续性方面带来了显著提升,而其更大潜力仍有待进一步挖掘。⁴

人工智能在能源系统中的应用可分为三类,每类包含三个子类别,涵盖众多应用⁵

1

系统优化与控制

- 提升实时网络运行能力
- 供需预测与优化
- 加强市场与交易运营

2

资产全生命周期管理

- 规划与决策支持
- 运营提升和维护
- 加速设计、研发与创新

3

用能终端能效管理

- 优化建筑物能源管理
- 提升交通运输领域能效管理
- 优化工业流程

需要认识到,在实际应用中,系统优化、资产全生命周期管理以及终端能效管理往往相互重叠并相互促进,许多成功的 AI 应用整合了不同领域的功能,形成了强大的回馈机制。例如,需求预测不仅支持电网优化,还为建筑管理和投资决策提供依据,体现了人工智能的互联价值^{6,7}。

多个实际的案例研究展示了人工智能驱动的方案在经济和环境方面的切实效益。例如,自动化甲烷泄漏检测——利用先进

的机器学习和遥感技术,对管网进行持续监控,能够减少排放和运营成本并实现更快的维修,每年可为全球节省近 60 亿美元(见方框 1)。此外, Emerald AI 研发的 Conductor 平台可使人工智能数据中心根据电网负荷压力动态降低功耗。在一次实地试验中,这些系统在高峰需求期间的三个小时内将电力使用量减少了 25% (见方框 2)。与此同时,人工智能辅助的审批系统、数字平台和自动化审查工具已实现审查时间和成本最高降低 50% (见方框 3)。

在能源系统中部署人工智能解决方案,可以从一开始就提供可扩展的价值,从长远来看,可以实现显著的节能、成本降低和减排效果。德勤全球分析表明:

- 到 2030 年,人工智能赋能带来的节能潜力可能超过 3,700 万亿瓦时 (TWh),远高于该技术可预计的能耗^{8,9}。到 2050 年,预计节能范围将达到 9,500 至 12,000 万亿瓦时,相当于净零排放情景下最终能源消费量的 10% 以上^{9,10}。
- 到 2030 年,人工智能每年可带来超过 2000 亿美元的成本节约,到 2050 年则接近 5000 亿美元。根据不同情景,到 2050 年累计节约额可达 11 万亿美元⁹。
- 到 2030 年,由人工智能驱动的减排量可达约 6.6 亿吨二氧化碳当量 (MtCO_{2eq})⁹,对全球温室气体 (GHG) 减排工作具有重要意义。¹¹ 然而,随着系统中终端使用和能源生产相关排放的持续降低,这种减排效果将呈现递减趋势,到 2050 年降至约 1 亿吨二氧化碳当量。⁹

随着人工智能越来越多地融入关键基础设施,AI 主权问题——对数据、算法和决策的控制——变得日益突出。¹² 主权人工智能原则强调透明度、问责制、本地能力建设以及保护敏感数据,以确保人工智能系统保持可信并符合公共利益。相反,人工智能本身也可以成为增强主权的有力工具。通过减少对能源进口的依赖,它可以增强能源基础设施的可靠性和安全性¹³,使各国能够更加独立地运营其能源系统。

将人工智能融入能源系统有望帮助企业提高效率、支持可持续发展并建立长期韧性,从而带来切实的经济效益。

- **能源和工业企业**作为运营数据的最终用户和所有者,是推动人工智能应用的主要力量。通过投资规模化的应用,如人工智能驱动资产优化、预测性维护和实时系统平衡,这些企业能够实现快速回报并增强韧性。通过优先确保高质量的标准数据、强大的网络安全和有效的数据治理,它们能够推动人工智能的可靠实施,并着眼于利用云计算和边缘计算进一步释放人工智能的潜力。最后,通过与相关公共部门机构和技术公司开展合作与数据共享,它们能够促进特定行业人工智能解决方案的开发以及监管框架的协调统一。

- **科技公司**是人工智能领域创新的重要推动力量,在将人工智能技术适配能源行业需求方面发挥着关键作用。通过应用物联网 (IoT) 和数字孪生等互补性技术,科技公司能够为能源行业的核心挑战提供先进解决方案,例如电网稳定性、需求预测和预测性维护。通过与能源企业和工业制造企业密切合作与直接参与,科技公司可确保其解决方案具备明确的应用针对性。为了进一步促进可持续性和韧性发展,技术提供商可重点关注以下几个关键领域:优先采购高性价比且低碳的电力,并为数据中心实施需求侧管理策略;同时,在其解决方案中融入主权人工智能原则,例如可解释性、伦理规范以及开源集成。

- **金融服务提供商**对于扩大可持续且具有韧性的 AI 驱动创新至关重要。通过部署创新融资工具,如绿色债券和与可持续发展挂钩的债券、优惠贷款以及中间层信贷融资机制,他们可以在能源领域部署可持续的主权人工智能,如采用领先能效标准的项目和智能电网项目。作为终端用户,他们可以利用人工智能来帮助提升运营的关键方面,包括风险评估、财务工作流程和资产评估。

- **政府和政策制定者**可以在为能源系统中负责任且具有主权的人工智能应用创造条件方面发挥重要作用。通过制定标准、协调安全的数据共享框架,并创建高质量、可互操作的数据集,政府和政策制定者能够加速人工智能领域的协同创新,并优化区域能源系统。全球范围内已观察到不同的政策路径。对许多国家或地区而言,经济激励措施 (如补贴、税收抵免和拨款) 对于降低人工智能应用风险和支持创新至关重要;部分国家及地区则采用了更为简化的监管方式以实现这些战略目标。此外,政府和政策制定者还可通过教育、培训以及社会资本参与 (PPPs) 来加强本地能力建设,从而帮助弥补能源领域日益扩大的人工智能人才缺口。最后,基于技术演进和行业反馈而制定的灵活监管框架,有助于确保随着人工智能技术的成熟,其治理机制依然有效且具备适应性。

人工智能将助力能源系统革命,提升其韧性、效率和可持续发展能力。为实现这一目标,公共部门与企业或个人的利益相关方可以携手合作,共同克服在数据获取、人才技能、基础设施及治理相关的障碍。通过这一方式,人工智能的优势将得以发挥,助力实现安全、包容且可持续的能源未来。

1. 引言

由于地缘政治、金融和环境方面的压力，能源系统面临着错综复杂的利益权衡。¹ 这些挑战通常需要以高质量数据和先进分析技术为基础，从而制定稳健高效的规划与运营方案。

随着能源需求的增长——特别是电气化程度的提高以及安全、经济的能源供应的增加——能源系统正在经历快速转型。过去十年中，全球能源需求增长了约 15%¹⁴。能源系统正变得更加电气化，并越来越多地整合太阳能、风能和电池储能等分布式能源资源¹⁵。并网设备（如电动汽车、屋顶太阳能和智能电器）的广泛应用，通常要求能源系统能够管理双向电力流动，以及实时信息交换、自动化和协调控制。预计到 2050 年，可再生能源将占全球一次能源供应的 71%，占发电量的近 90%¹⁴。同时，电气化水平也将达到显著高度，占终端能源消费的 53%，并在大多数行业的能源消费中占据主导地位。例如，在道路交通领域，到 2050 年电力预计将占终端能源需求的四分之三¹⁰。

同时，人工智能（AI）正在成为全球经济中的一股变革性力量，在医疗、金融、制造和交通等领域赋能自动化、高级分析和快速决策²。AI 正在改变日常生活的许多方面，从单纯的流程自动化到实现复杂问题的解决，AI 可以从各方面模仿人类推理过程，但速度更快、规模更大³。AI 系统在处理大型复杂数据、识别模式和预测行为方面表现出色。在能源领域，AI 正在迅速改变规划和运营方式，在效率、可靠性和可持续性方面取得了显著进展⁴。

人工智能的日益普及也可能带来新的挑战。作为支撑云计算和高级分析等数字基础设施核心的数据中心，其电力需求可能大幅上升，有研究估计到 2050 年将达到约 3,500 万亿瓦时（TWh）⁸。这种增长可能带来额外的成本，若无法通过清洁能源供应来匹配，还可能加重环境负担。然而，通过提高效率和系统优化等方式负责任地部署人工智能，可在一定程度上抵消这些影响^{3,4}。

其他挑战则可能涉及数据隐私，因为人工智能系统通常需要大量数据进行训练。此外，由于可能更加依赖能源和技术进口，安全也成为一个重要问题³。主权人工智能的概念旨在通过增强本地人工智能能力，以及确保对关键技术与资源的获取，来帮助应对这些问题¹。这种方法有助于保护国家利益，管理供应链风险，并加强能源主权¹²。

本报告探讨了人工智能在支持可靠且可持续的能源未来方面的变革潜力。通过采用数据驱动、基于模型的方法，结合现实案例和实证分析，阐述了人工智能如何提升能源系统的规划与运行能力，带来可量化的经济效益、环境效益以及能源节约。本报告的研究发现旨在为人工智能在能源领域的潜在应用与影响提供一个客观、可循证的视角。

2. 能源领域的人工智能




现代能源系统构成日益复杂, 这源于可再生能源与传统能源品种的融合、电气化的广泛普及以及各行业间联系的日益紧密, 因而对系统管理和控制提出了更复杂的要求⁴。人工智能能够快速处理大量数据、识别任务并生成可靠、准确的预测, 为满足这些要求提供了更多可能²⁴。

2.1. 人工智能在能源系统中的主要应用

人工智能在能源领域的应用涵盖三大主要类别(图 1):系统优化与控制、资产全生命周期管理,以及用能终端能效管理。

这些类别中的每一项都包含大量应用场景,通过推动价值链各环节的效能,已经带来了显著的经济和环境效益。⁴

图 1. 人工智能在能源系统中的应用

	应用方向	实例
系统优化与控制 	提升实时网络运行能力	甲烷泄漏自动检测 减少了甲烷排放以及降低了检测和维修成本,全球可实现节约成本约58亿美元(见方框1)。 ^{4,16,17,18}
	供需预测与优化	动态载流量计算 在美国的一条输电电路上,将输电拥堵成本降低了约6,500万美元。 ¹⁹
	加强市场与交易运营	数据中心的削峰填谷 Emerald AI 的 Conductor 平台使人工智能数据中心在用电高峰期间的三小时内将电力消耗减少了 25%。 ^{20,21}
资产全生命周期管理 	规划与决策支持	人工智能赋能审批流程简化 缩短了许可审批时间,促进能源产能提升。 ²³
	运营提升和维护	数字孪生技术助力稳健能源系统规划 使撒哈拉以南的非洲地区的通电识别率提高了80%。 ²⁴
	加速设计、研发与创新	用于水泥制造的人工智能增强热解工艺 该工艺使捷克的水泥制造企业的燃料成本在2024年降低了4.1%,同时企业能耗降低了2.2%。 ²⁵
用能终端能效管理 	优化建筑物能源管理	固态电池材料的自主发现²⁶ 预计到2030年,通过利用人工智能(AI),自主从大量科学文献中分析和提出新型候选材料更高效的电池技术,每年可减少能源消耗,实现约110亿美元成本节约。 ²⁷
	提升交通运输领域能效管理	韩国商业楼宇建筑的能源需求预测 由于降低了集中式电力需求,实现了98%的预测准确率,并使月度电费降低了8-19%。 ²⁸
	优化工业流程	嵌入人工智能的电池管理系统 可使美国的电动汽车(EV)维护成本降低20%,能源效率提高12%。 ²⁹
		基于人工智能的风力发电转换系统故障检测与预测性维护 可使故障检测时间减少60%,并提高10%的精度。 ³⁰

来源:德勤全球分析整理

2.1.1. 系统优化与控制

人工智能可通过对电网更智能、灵敏的管理，支持能源领域的系统优化与控制。借助先进的预测技术，人工智能能够提高供需预测的准确性，使运营商能够实时调整资源配置情况，并应对可再生能源发电的波动性挑战。由人工智能驱动的实时网络监控与控制可增强电网的稳定性与韧性，从而快速检测并应对中断事件。此外，人工智能驱动的工具可通过支持更高效的交易、定价和资源配置来优化市场运营，最终构建一个更灵活、可靠且具有成本效益的能源系统。

实时网络运行与灵活性

人工智能通过持续处理来自能源网络中数百万个传感器的大量实时数据流，能够支持网络的实时运行和灵活性。这将有助于

快速检测异常情况，精确预测缓解系统失调，并主动进行拥塞管理，以帮助维持电网稳定。由人工智能驱动的自动化还能支持部门耦合——协调电力、供热、交通和工业领域——以优化能源流动并提升整个系统的灵活性。目前，电网运营商已经开始利用人工智能进行实时预测，并快速应对电网失衡³¹。同样，诸如 Nostradamus³² 和 GridFM³³ 等平台可以改进负荷预测、可再生能源发电预测、停电预测以及电力流优化。重要的是，这些人工智能的能力不仅限于电力网络，还可延伸至其他类型的能源系统。例如，实时数据分析有助于检测并减少天然气网络中的甲烷泄漏（见案例 1）。通过实现更精确和自主的决策，人工智能能够加强新型能源设施的整合，并减轻能源互联网中传统基础设施的运行压力。

案例 1. 甲烷泄漏自动化检测与减排

作为一种强效温室气体 (GHG)，在未来的 20 年内，甲烷的全球变暖潜势约为二氧化碳 (CO₂) 的 80 倍。^{34,35} 每年，由于石油、天然气和煤炭的生产和使用，全球约排放 1.4 亿吨甲烷，相当于 36 亿吨二氧化碳当量 (Gt CO₂eq)。⁴

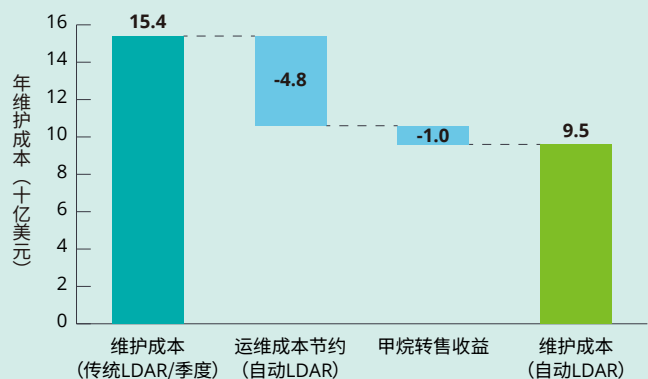
传统的泄漏检测依赖于定期的人工巡检，这种方法往往耗费大量人力、成本高昂，且发现渗漏通常较为滞后。³⁶ 相比之下，基于人工智能的光学气体成像 (OGI) 系统利用固定摄像头、无人机或卫星实现自主、连续的监测。先进的模型（例如利用大数据训练的卷积神经网络）能够实现实时泄漏检测，例如 GasNet 系统在各种条件下的准确率超过 95%，对于大型、近距离泄漏的准确率高达 97%。¹⁶

采用不间断的、由人工智能支持的泄漏检测与修复 (LDAR) 技术可以带来显著的好处：

- 减少每年 200 万吨的甲烷排放量，使总泄漏量从传统 LDAR 措施下的约 1.45 亿吨降低至 1.43 亿吨。^{4,37}
- 基于 2024 年全球天然气平均价格每百万英热单位 (MMBtu) 11.3 美元，预计每年将增加约 10.5 亿美元的收入。¹⁷

- 可将检测和维修成本从传统工艺的每百万英热单位 2.3 美元降低至约每百万英热单位 1.6 美元，⁴ 降幅可达 30%，年总甲烷泄漏量可节省 48 亿美元。³⁸

甲烷泄漏检测系统的维护成本



来源：德勤全球分析预测

综合来看，减少的甲烷排放、节约的运营成本以及以 2024 年平均每百万英热单位 11.3 美元的价格进行甲烷转售，全球每年总计可节省近 60 亿美元。¹⁸

供需预测与优化

人工智能正越来越多地被用于采矿业中的勘探和生产活动的自动化,包括钻探和开采锂、稀土元素等不可再生能源及关键矿物。在矿产勘探中,人工智能可通过分析地质和地球物理数据,加快目标区域的识别过程。^{39,40} 石油和天然气开采中,应用了人工智能的自动化技术可提高钻井精度并减少损耗⁴¹。此外,利用地球物理和地质数据训练的人工智能模型,在降低运营成本和提升地热发电厂生产效率方面也具有显著成效。⁴²

除上述实践之外,人工智能通过分析天气、卫星和消费数据,能够实现更准确的供需预测,从而更有效地利用发电能力。例如,Entek Elektrik 公司开发的基于人工智能的水文预测模型,使土耳其的水电站能够维持更高的水库水位,减少水资源浪费并优化发电,同时显著提高了预测的准确性和时效性⁴³。除了更精确的预测和规划之外⁴⁴,人工智能模型还可以通过调节电厂运行水平和资源分配,优化发电与需求(见案例 2)。

市场优化与交易

人工智能加持的价格预测、风险评估和自动化交易,可以赋能各行各业的组织,从而提升市场效率,打造更灵活的能源系统。机器学习模型能够准确预测电价,支持更稳健的交易和套期保值策略^{45,46}。例如,人工智能可以提供实时市场模拟与预测,从而根据价格信号实现动态需求响应,帮助市场参与者优化运营,同时降低价格波动带来的风险⁴⁷。人工智能的应用不仅仅只是预测和自主决策,还涵盖了复杂问题的求解。例如,它可以帮助电网运营商更快、更准确地确定最优潮流(OPF)^{48,49}。通过更迅速的复杂计算及结果分析,人工智能有助于提高运行效率,降低燃料成本,整体系统效率提升将高达 5%²²。

案例 2. 需求预测与响应

管理用电高峰需求对能源系统而言正日益成为一项挑战,高峰负荷使电网承压、推高成本并增加温室气体排放——尤其是在需要依赖化石能源作为备用发电的情况下。基于人工智能的削峰策略将有助于应对这些问题,通过精准预测短期用电需求识别用电类型与用户集群,协调消费者和数据中心的实时节能方案。

数据中心的削峰

Emerald AI 的 Conductor 系统可使人工智能数据中心在电网压力增大时动态降低功耗。在亚利桑那州凤凰城开展的一次实地试验中,该系统在一次用电高峰事件期间,对由 256 块英伟达(NVIDIA) GPU 组成的模块进行工作负载调度,在三小时内将功耗降低了 25%,同时未影响算力质量^{20,21}。Emerald AI 的软件可通过使数据中心更灵活地利用现有电网,帮助电网运营商应对快速增长的电力需求,释放高达 100 GW 的潜在电力容量²¹。

2.1.2. 资产全生命周期管理

人工智能可以在资产全生命周期的各个阶段创造价值，其关键应用涵盖规划与决策支持、运维与网络安全，以及设计、发现与创新等领域。

规划与决策

人工智能可通过模拟复杂的能源情景、评估长期基础设施需求，利用数字孪生等解决方案识别大规模异构数据集中的模式，从而助力战略规划和投资决策⁵⁰。这一能力有助于加快能源系统的规划进程，并使规划更具稳健性、适用性和经济合理性。通过自动化流程，人工智能还可以为行政流程提效，进而推动能源基础设施项目（如可再生能源项目）的及时投资（见案例 3）。

数字孪生是目前最广泛用于规划和决策支持领域的 AI 工具之一⁵¹。它们是物理资产、系统或流程的虚拟副本，通过实时数据持续更新，以反映实际状况和性能。通过模拟各种场景，数字孪生能够在不干扰现实世界运行的情况下，支持稳健的决策制定和未来规划。目前，数字孪生技术已在能源领域得到应用，以帮助管理分布式能源资源并规划面向未来的基础设施。新加坡国家电网采用数字孪生技术，通过模拟设备状态和电网情景来提升电网规划能力和韧性⁵²。德勤澳大利亚开发的 Optimal Reality 平台则可以帮助企业创建数字副本，通过模拟长期基础设施和供应链情景，支持战略投资与运营决策⁵³。

案例 3. 利用人工智能简化监管流程

人工智能赋能的许可流程简化

许可审批是能源产能扩张的重要环节，以确保项目符合特定的监管标准和要求。然而，在许多国家，这一过程因复杂且分散的监管体系而变得冗长。例如，在欧盟许可审批程序可能耗时 7-9 年，有时甚至超过 10 年，导致项目延误，总成本可能因此增加多达 35%⁵⁴。这些延迟可能阻碍可持续发展目标的实现。

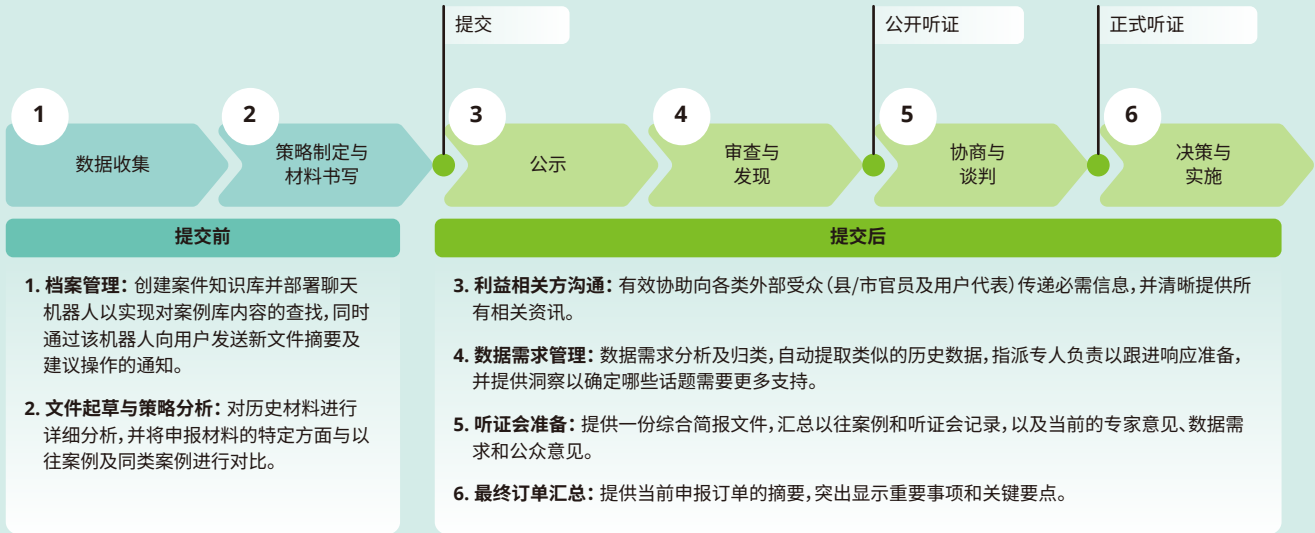
加载人工智能的许可审批系统可以通过行政事务自动化加快审批流程并减少人工操作，从而帮助突破这些瓶颈。丹麦环境保护局 (EPA) 使用一个由人工智能辅助的数字平台，以协助简化多个机构和利益相关方之间的决策和协调工作。该系统还通过利用历史数据和先进的分析工具，减少了许可证审查过程中的错误。因此，对于海上风电等大规模可再生能源项目，其许可审批预计时间缩短了 50%²³。

假设由于审批流程加快，陆上风电和太阳能发电的安装速度提高了 50%⁵⁵，到 2035 年，由人工智能辅助的审批流程相比传统审批方式，可使陆上风电新增装机容量提高最多 25%，光伏发电装机容量提升最多 13%⁵⁶。

Rate Case Assistant: 一款由人工智能驱动的解决方案

德勤咨询的“Rate Case Assistant”是一款由人工智能驱动的解决方案，旨在帮助简化能源行业监管费率管理的复杂流程。⁵⁷ 通过自动化数据收集、文件分析和起草工作，该工具可节省时间，减轻合规和法律团队的工作负担。该平台将监管数据集中管理，实现快速访问，并支持基于数据的同业分析，提高申报材料的准确性，减少代价高昂的返工。此外，该工具还能通过将申报文件和证词与历史案例及同业案例进行基准比对，支持策略制定。这些功能有助于提升运营效率，增强投资合理性，并加快监管合规领域的数字化转型。

费率申报流程及“Rate Case Assistant”的价值



来源:德勤咨询

运维和网络安全

人工智能赋能的平台有助于优化工业运营,提高燃料效率和产品质量²⁵。人工智能能够快速分析工艺流程和操作手册,识别关键运行限制,并为能源资产的运营和维护提供快速支持。这种支持可以表现为基于 GPT 平台的简单聊天机器人或助手(见案例 4),也可以是预测性维护系统等高级工具。由人工智能驱动预测性维护可通过减少非计划停机、延长资产使用寿命以及降低维护成本,从而提升运营效率。德勤此前一项关于人工智能在增强基础设施系统韧性中作用的研究表明,海上风电发电机组应用了人工智能支持的预测性维护后,可使停机时间减少 15%,平均维修成本降低 20%,同时使市场收入增加 6%²。人工智能还可通过监控和检测网络威胁并自动响应,来加强网络安全防护⁵⁸。

案例 4. 人工智能辅助维护

工业环境中的运维团队通常依赖快速、可靠的技术信息访问,以确保设备平稳、安全地运行。由人工智能驱动的 GPT 平台通过自然语言查询,使员工能够即时查找操作规程、手册和故障排除指南,从而显著提升这些流程的效率⁵⁹。这种方法不仅有助于减少停机时间和人为错误,还能支持多语言团队,提升运营效率⁶⁰。

此类平台的一个实例是 Entek 的 Maintenance Assistant 系统,这是一款利用先进自然语言处理技术的人工智能应用程序⁶¹。该系统能够即时查询调用天然气发电厂的涡轮机的数千份维护手册,快速提供相关答案⁶¹。该系统已实现运维效率提升 62%,减少错误,加快干预速度,延长设备使用寿命,并提高系统可靠性⁶¹。

设计、发现与创新

人工智能可以重塑新技术和新材料的设计与发现方式,使这些过程显著加快并更加高效⁶²。这在能源领域的应用十分广泛,包括对空气动力学相互作用进行快速分析,以改进风力涡轮机的设计⁶³,以及实现太阳能组件、电池和碳捕集吸附剂与膜材料的自主发现提速(见案例 5)。

案例 5. 自主材料发现

生成式人工智能(GenAI)正在通过分析来自材料科学、化学和物理学的大量数据,以高精度预测材料的结构、物理和化学性质,从而彻底改变材料发现领域。因此,人工智能驱动的方法能够显著减少传统实验室实验和模拟所需的时间和成本。

例如:

- 钙钛矿太阳能电池(PSC)正成为传统光伏技术的一种经济高效且实用的替代方案⁶⁴。但由于材料组分与工艺条件之间存在复杂的相互作用,优化其性能仍然具有挑战性,传统上这一过程需要耗费大量时间且结果往往难以预测⁶⁵。人工智能模型能够利用实验数据,通过系统性地调整前驱体浓度、温度等制造参数,从而加速优化进程。例如,研究人员仅测试了0.36%的可能材料组合,便实现了21.4%的光电转换效率,超过了人工筛选组合所达到的效率(20.5%),同时提高了实验的可重复性⁶⁶。
- 与目前广泛使用的锂离子电池相比,固态电池(SSBs)能够储存更多能量并以更高的效率运行⁶⁷,但合适的固态电解质发现进展缓慢,阻碍了其大规模应用⁶⁸。一种新型的人工智能引导方法通过结合先进模拟与云计算,在不到80小时内筛查了超过3,200万种材料,从而突破了这一限制²⁶。这种加速筛选过程确定了50万个稳定的候选材料以及18种有前景的固态电解质,提高了固态电池广泛应用的可能性,到2030年每年可减少高达110亿美元的能源损耗^{26,27}。
- 碳捕集与封存(CCS)指从电力和工业生产中捕获二氧化碳并将其封存于地下以防止向大气层释放。人工智能技术可以帮助加速发现高性能的溶剂、膜和吸附剂,通常可将材料鉴定速度提高至多五倍,并降低研究成本⁶⁹。

这些案例表明,生成式人工智能正在加快先进材料的开发,支持太阳能、电池和碳捕集领域的突破,并为更高效、更可持续的能源技术铺平道路。

2.1.3. 用能终端能效管理

人工智能可使家庭和工商业用户等用能终端以更高的精度和灵活性优化其能源消耗⁴。通过利用先进的分析技术和实时自动化,人工智能能够实现更智能的建筑管理,优化交通与物流,并提升工业运营效率。这些应用反过来亦有助于推动各行业实现更可持续且更具成本效益的能源使用。

智慧建筑与能源管理

由人工智能驱动的智慧建筑系统正在通过先进的供暖、通风和空调(HVAC)系统、自适应照明、预测性控制以及实时负荷转移和削减,重新定义能源管理的方式⁷⁰。在瑞典进行的测试表明,采用人工智能优化的HVAC系统在降低区域供热和电力需求方面效果显著,既节约了成本,又减少了排放⁷¹。

交通运输管理

人工智能在交通运输领域的应用将有助于优化交通流量、改进路线规划、实时物流追踪、实现自动驾驶,并延长电池寿命和提升性能,从而有助于缓解交通拥堵并降低燃料消耗⁷²。例如,主要的物流企业已开始部署人工智能解决方案,以优化配送路线,每年减少数百万英里的不必要行驶,显著降低燃料成本和二氧化碳排放⁷³。

案例 6. 嵌入人工智能的电动汽车电池管理系统

电池管理系统 (BMS) 对于电动汽车中充电电池组件的实时控制和安全至关重要。BMS 监测每个电池单元的电压、温度和电流, 估算充电状态 (SOC) 和电池健康等关键指标, 平衡电池单元的充电, 统筹热管理系统, 并主动规避危险事故的发生⁷⁴。

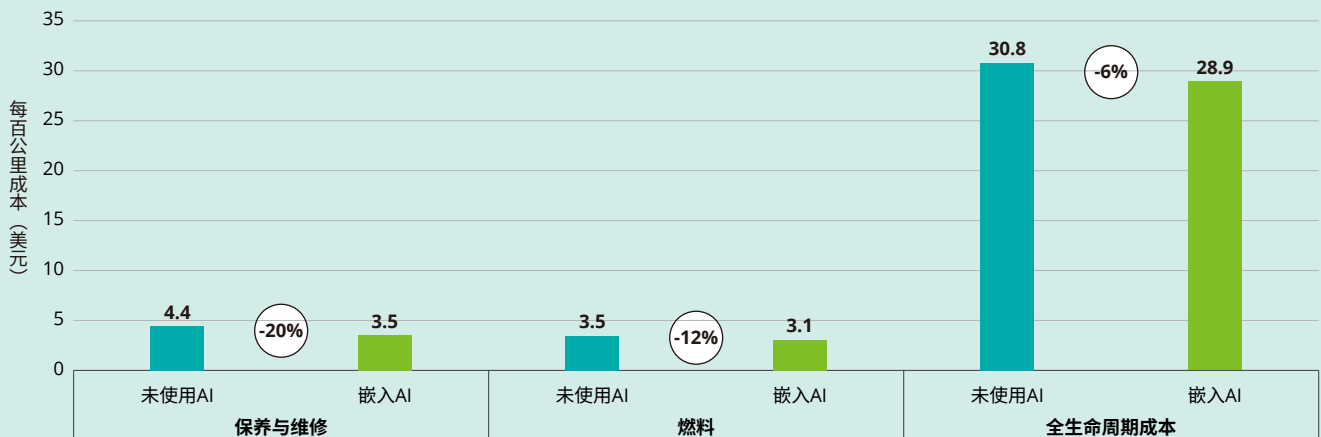
传统系统通常依赖于基于固定规则的方法, 这些方法优先考虑安全性, 而非效率和其他需要。将人工智能集成到电池管理系统 (BMS) 设计中, 引入了能够分析历史数据和实时数据的机器学习算法, 以实现以下目标:

- 充电和电池健康状态的估算精度最高提升 15%, 从而增加可用电池容量²⁹
- 通过检测并缓解不良使用模式, 电池损耗减少约 15%²⁹
- 通过基于驾驶行为和环境条件的优化热管理系统和自适应充电, 能效提升约 12%²⁹

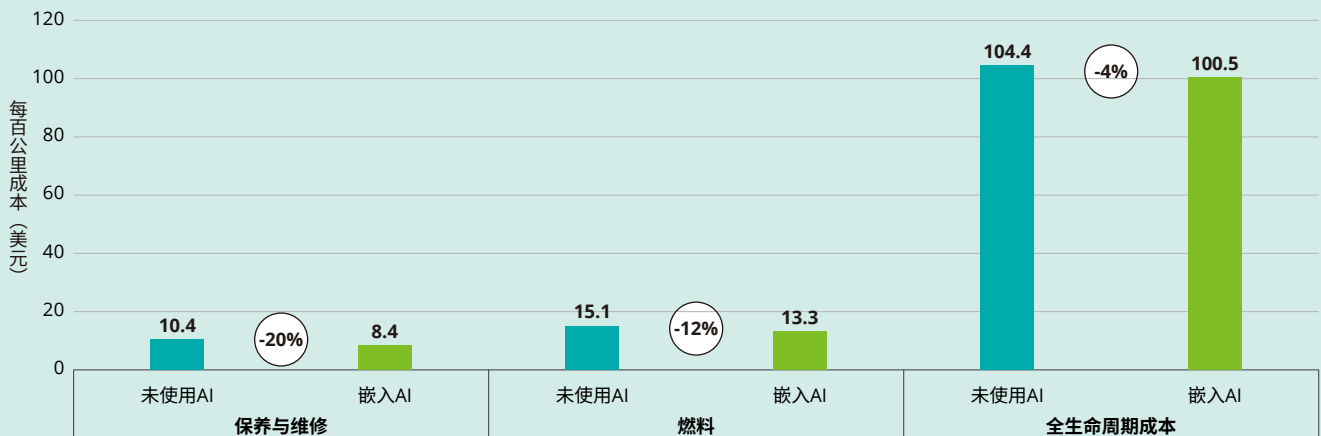
这些技术改进可以带来显著的成本和能源节约, 如下所示。

嵌入 AI 的 BMS 平均成本节约

a) 美国电动轿车



b) 欧盟重型卡车



来源: 德勤全球, 基于 Briggt 和 Johansson²⁹ 估算成本减少数据, ICCT⁷⁵ 和 Atlas Public Policy⁷⁶ 的估算车辆相关成本。

工业流程优化

人工智能还被广泛应用于各类工业场景中,以帮助优化运营、降低能源消耗并减少资源浪费⁷⁷。例如,在流程控制环节嵌入人工智能,结合数字孪生和智能清洗系统,已被证实可将材料浪费减少近 50%,同时降低温室气体排放并提升能源效率⁷⁸。在先进制造业中,由人工智能驱动的自动化和预测性维护使得单位产品电力消耗降低了约 24%,生产废料减少了高达 48%³。

2.2. 人工智能应用的相互关联性

如图 1 所示和上文所述,能源系统中人工智能(AI)应用的类别和子类别为不同用例的归类提供了一个框架。然而,AI 应用通常在功能和领域上存在重叠和相互依赖性。例如,实时系统优化(如电网管理)不仅依赖于资产生命周期管理(如预测性维护和故障检测)的稳健数据,还依赖于终端用户行为和系统层面的洞察,如来自建筑物变化的用电需求数据^{79,80}。

需求预测和实时定价同样依赖于来自运营领域、供应预测以及终端用户活动(如智能建筑控制流程自动化⁷⁰)的准确信息。因此,许多成功的人工智能应用实现了跨多个领域的功能整合,形成了强大的反馈循环,持续提升预测准确性、运营协调性以及整体系统韧性。

重要的是,人工智能应用之间的相互关联性往往会增加潜在收益,并增强其商业可行性。例如,通常被归类为系统优化与控制的复杂需求预测,同时也支持终端能效管理,以及规划和投资决策^{6,7}。

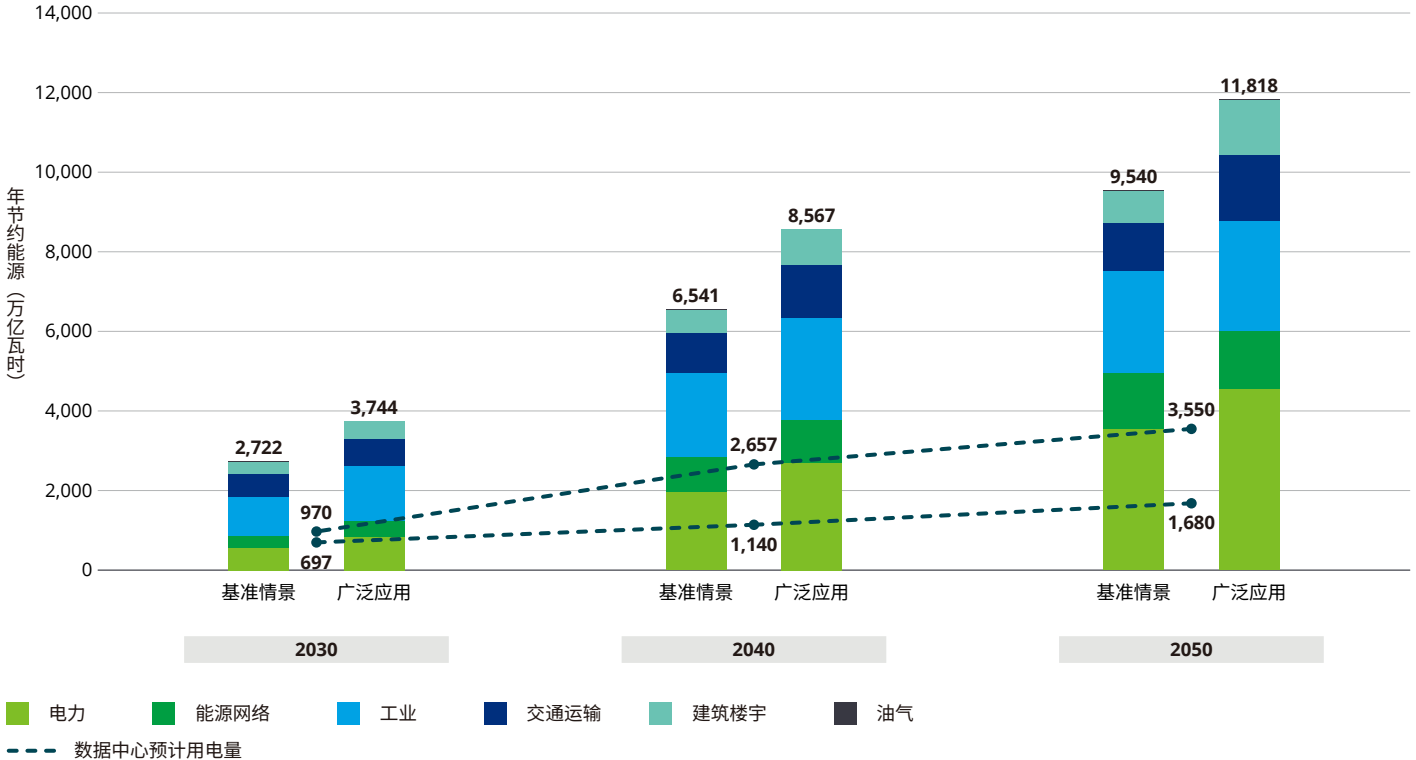
2.3. 衡量人工智能的影响

2.1 章节中的案例展示了人工智能通过具体应用和项目为能源系统带来的切实价值。这种价值可量化为:通过优化资源配置、减少损耗和改善需求侧管理所带来的能源效率提升;通过运营成本节约和延长资产使用寿命所带来的成本降低;以及通过减少对非可再生能源的消耗、提高可再生能源的并网率和降低能源需求所带来的温室气体排放减少。

为评估人工智能可能带来的全球影响,本文研究探讨了两种可能的未来情景:一种是遵循当前趋势的基准情景,另一种是设想人工智能在全球范围内大规模普及的广泛应用情景⁸¹。在基准情景中,发达经济体在采用人工智能方面没有明显的障碍,而其他市场则面临一定制约。广泛应用情景则假设通过国际支持,新兴市场和低收入国家在人工智能准备方面达到更高水平⁸¹。有关该方法的更多细节见附录 1,其中包括了人工智能采用指数的详细说明,该指数反映了各地区在人工智能准备、获取和接触方面的不同水平。

无论是基准情景还是广泛应用情景,均表明人工智能从一开始就可节省比其自身运行所消耗的更多的能源,预计到 2030 年可节省约 2,720 至 3,740 万亿瓦时(图 2)⁹,远高于预计的人工智能能耗(略低于 1,000 万亿瓦时)^{4,8},尽管这与当前全球能源供应量仍不可比(约占 2023 年能源供应的 1% 至 2%)¹⁴。但从中长期来看,其效益可能更高,在基准情景和广泛采用情景下,节能幅度将显著超过人工智能的能耗⁸,分别达到约 6,540 万亿瓦时和 8,570 万亿瓦时^{8,9}。在广泛采用情景下,到 2050 年节能可能接近 12,000 万亿瓦时,在基准情景下约为 9,500 万亿瓦时(图 2)⁹,而预计人工智能的能耗峰值约为 3,550 TWh⁸,节能效果显著。尽管上述节能量仍仅占近年来能源供应总量的 5% 左右,但在 2050 年净零排放情景下,它们相当于预计世界能源消耗的 10-12% (以及一次能源供应的 6-7%)¹⁴。

图 2. 人工智能在能源价值链中实现的节能效果



来源：德勤全球基于本文附录 1 中关于人工智能的节能数据以及德勤《Powering AI》报告中关于人工智能能耗的数据分析

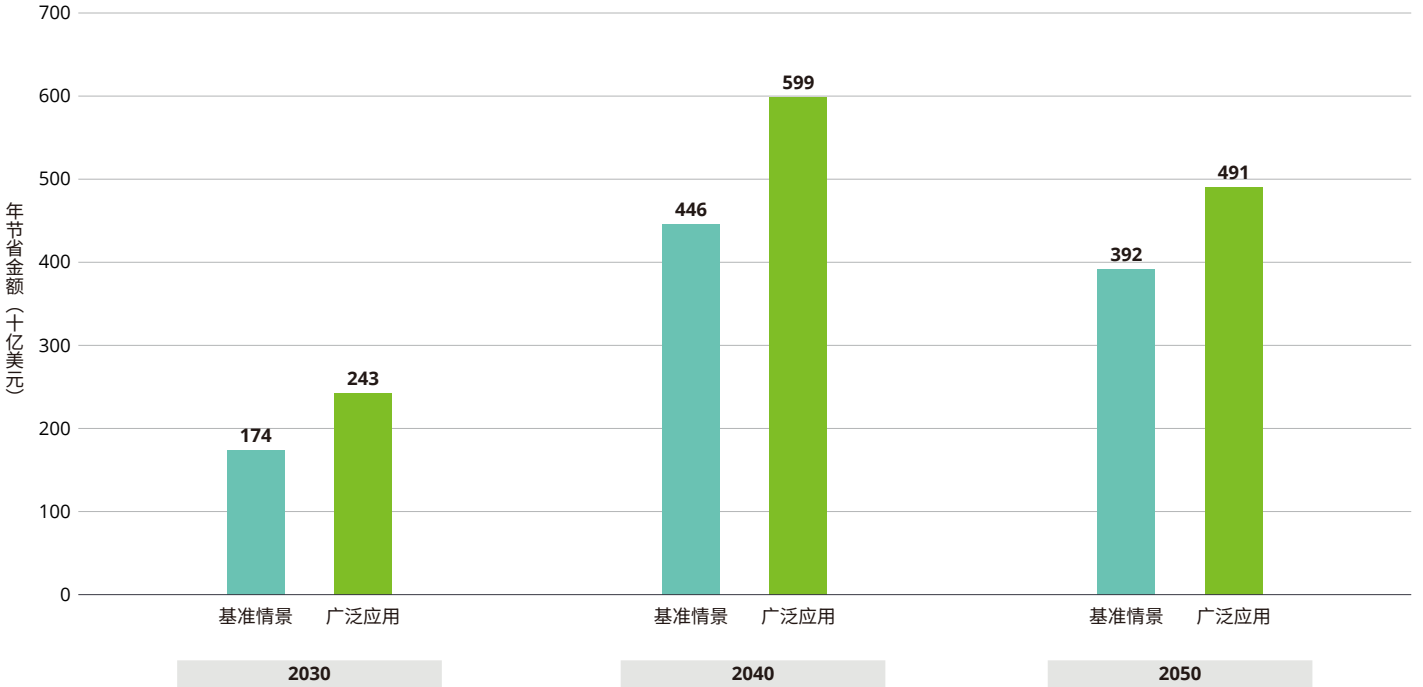
短期内，预计这些节能效益的将主要来自工业和电力领域，到 2030 年两者合计可达 1,550 十亿瓦时至 2,210 十亿瓦时(图 2)，约占总节能量的 60%。从长期来看，尽管工业、交通和建筑领域的节能效果显著增长，但电力领域将处于领先地位，这主要得益于材料效率提升、需求侧管理、电厂设计、资源管理和运行时间的优化。到 2050 年，基准情景下电力领域的节能量预计将达到 3,540 十亿瓦时，广泛应用情景下则将达到 4,530 十亿瓦时(图 2)，分别占总节能量的 37% 和 38%。

将人工智能融入能源规划与运营还可带来显著的经济效益。到 2030 年，年度节省金额将超过 2,000 亿美元，并在 2050 年达到近 5,000 亿美元(见图 3)。尽管这些数值仅占所需人工智能总投资的一小部分，但远高于数据中心所需能源相关投资的预算(预计到 2030 年约为 500 亿美元)。⁴ 因此，即使在短期内(2030 年)，人工智能带来的经济效益仍显著超过为其提供动力所需的能源投资。⁴ 将图 3 所示的节约金额加总，2030 年至 2050 年间人工智能带来的经济效益总额累计可达 8.3 万亿至 11 万亿美元。这可能使预计接近 200 万亿美元的能源转型总成本降低最多 5%。⁸²

在广泛应用情景下，预计成本节约将从 2040 年的约 6,000 亿美元略微下降至 2050 年的约 4,900 亿美元。这一下降趋势预示着 2040 年后电力部门的投资将减少，这既反映了单位成本的降低，也反映了新增装机容量的放缓，即 2040 年至 2050 年期间预计新增装机容量为 9 万亿瓦，而 2030 年至 2040 年期间新增装机容量为 15 太瓦¹⁴。此外，随着人工智能在能源部门的应用接近饱和，新增的成本节约可能会减少，从而导致 2040 年以后的边际效益增幅减小。

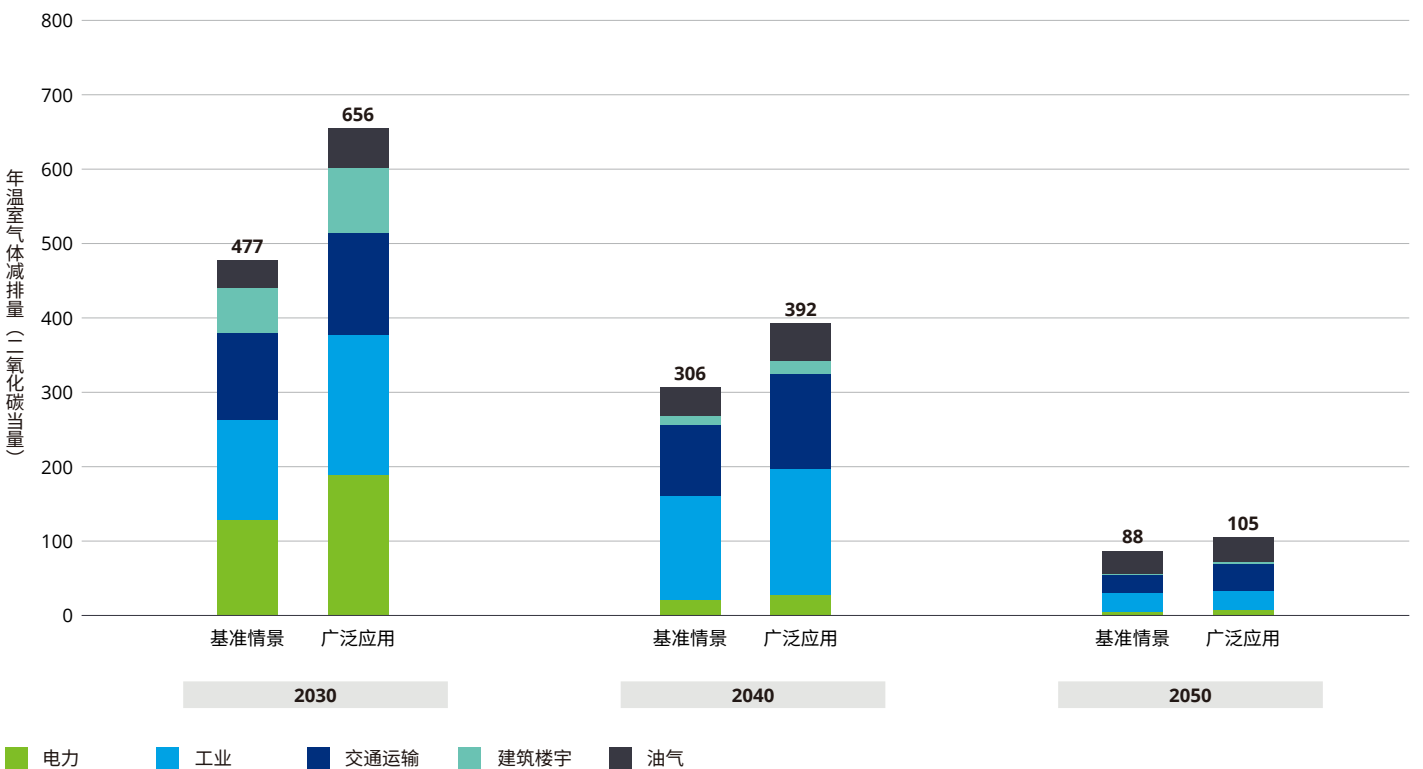
通过采用人工智能实现的节能效果可直接转化为显著的减排成果，到 2030 年累计减排量接近 660 百万吨二氧化碳当量(图 4)，这一水平与高度工业化国家的年度温室气体(GHG)排放量相当¹¹。然而，随着能源系统日益高效和低碳化，人工智能对减排的额外影响预计将逐步减弱，到 2040 年减排量预计将降至 400 百万吨二氧化碳当量以下，并在 2050 年趋于稳定，约为 100 百万吨二氧化碳当量(图 4)。

图 3. 人工智能应用在能源供应、交通和消费领域的经济效益



来源: 德勤全球根据本文附录 1 中所述方法论分析

图 4. 人工智能在能源价值链中应用的环境效益



来源: 德勤全球根据本文附录 1 中所述方法论分析

3. 主权人工智能

通过主权人工智能, 各国和地区可以掌握其 AI 基础设施和决策过程的自主权。

3.1. 能源系统中的主权人工智能考量

主权人工智能 (Sovereign AI) 是指在特定国家或地区内对智能计算系统进行设计、部署和治理。其目标是确保人工智能技术体现本地价值观, 遵守国家和 (或) 地区法规, 并在司法管辖区内安全地维护数据。⁸³ 通过主权人工智能, 各国和地区能够掌握自身人工智能基础设施和决策过程的自主权, 这可能减少对国外技术的依赖, 并有助于保护敏感数据。⁸⁴

在能源系统中, 主权 AI 基于四个核心原则: 安全与韧性、数据与技术自主、本地能力与创新, 以及伦理与合规 (见图 5):

图 5. 实现可持续、可靠和安全的 AI 驱动能源系统的主权 AI 原则



来源: 德勤全球分析, 基于世界经济论坛¹²、Oracle,⁸³ NVIDIA⁸⁴ 以及 Shrier 等 (2025)⁸⁵

- **安全与韧性:** 强大且易用的人工智能的兴起, 加剧了网络犯罪和欺诈行为的复杂性与规模。2020 年至 2022 年期间, 针对电力行业的网络攻击数量翻了一番, 仅 2022 年欧洲就报告了 48 起此类攻击⁸⁶。这凸显了健全的网络安全防御对能源安全的重要性。随着生成式人工智能加剧了新型威胁, 各国和国际组织应考虑加强并更好协调其网络安全战略, 以保护能源基础设施⁸⁵。
- **数据与技术自主:** 主权人工智能需要先进的数字基础设施, 例如现代化的数据中心和数据本地化政策, 以确保数据处理和存储在司法管辖区范围内进行。国家和(或)司法管辖区层面对人工智能的控制对于维护战略自主至关重要, 因为它能够最大限度地减少对外部技术的依赖, 并降低受外部影响的风险。通过优先发展本地能力, 各国可以更好地保护敏感数据, 并使其人工智能政策与国家和(或)区域的利益及价值观保持一致⁸³。
- **本地能力与创新:** 人工智能的应用有助于提升全球 GDP, 同时改善本地经济增长。仅生成式人工智能在未来十年内就可为全球经济贡献约 7 万亿美元⁸⁷。为实现这一潜力, 各国可培育本国的人工智能产业, 这将创造就业机会、吸引投资, 并推动现有及新兴行业发展, 从而推动本地经济增长和提升国家竞争力。
- **伦理与合规:** 人工智能系统可能因将敏感的个人数据暴露给未授权用户或助长滥用行为, 而引发隐私或其他风险。投资主权人工智能可使各国利用本地数据、优先事项和价值观来构建和训练人工智能系统。

尽管主权至关重要, 但同样重要的是要认识到, 人工智能系统的质量和稳健性通常取决于用于训练模型的数据的多样性和规模²。高质量的人工智能输出得益于对大规模且多样化数据集的访问, 而这可能需要跨境合作, 这有助于获取更丰富的数据集, 并促进最佳实践的共享²。然而, 任何合作项目中的参与者都应遵守区域数据存储要求, 遵循数据隐私标准, 仅使用适当数量的数据, 并仅保留必要部分⁸⁸。

3.2. 人工智能对能源系统韧性的提升

人工智能还能增强韧性和自主性。如 2.1 节所述, 人工智能驱动的系统可通过精准预测和实时检测, 协助应对外部风险, 例如设备故障、供应中断或网络威胁。此外, 人工智能在提升能源效率方面的进步有助于降低总体能源需求, 而人工智能支持的电网管理和系统优化则可促进更多能源品种的整合。这些进步能够减少对能源进口的依赖, 从而加强能源安全 and 经济独立性¹³。这些能力有助于增强能源基础设施的可靠性和安全性, 同时使各国能够更加独立、高效地运营其系统, 直接支持关键领域主权目标的实现。

高度依赖能源进口的国家和地区可以通过采取人工智能(AI)赋能的措施来提高其能源独立性。以欧盟为例:⁸⁹ 如果 2023 年人工智能应用的潜力在能源领域得到充分发挥, 欧洲的石油和天然气消费量本可分别减少约 226 太瓦时(TWh)和 230 太瓦时(见附录 1)。这些水平分别相当于 2023 年欧洲天然气和石油进口量的约 7% 和 5%⁹⁰。除了减少在非可再生能源上的支出外, 消费量的下降还可以降低对外部供应中断和价格波动的暴露程度, 从而加强欧盟对能源安全和经济韧性的追求, 自 2022 年 2 月俄乌冲突爆发以来, 这一直是欧盟的首要任务⁹¹。

4.解锁可持续的 主权人工智能

各利益相关方之间协调一致、果断行动,对于释放可持续的主权人工智能在能源领域的变革潜能至关重要。

人工智能有望成为能源领域的变革性力量，推动整个能源价值链的效率提升、可持续发展和韧性增强。从实时优化电网运行和能源交易，到全生命周期的资产管理（包括规划、维护和设计创新），再到提升建筑、交通和工业等终端用能效率，人工智能提供了诸多变革性机遇。

尽管人工智能本身需要大量用电，但由此带来的节能效果预计将远超其消耗，到 2050 年可能接近 12,000 万亿瓦时（参见图 2）。这相当于全球净零排放中总能源需求的 12%，同时到 2050 年每年可节省近 5,000 亿美元，累计至 2050 年总节省额可达约 11 万亿美元（参见第 2.3 节）。这些进步还将增强能源主权，预计人工智能驱动的效率提升将减少能源进口。

为了在不损害韧性的前提下实现这些益处，人工智能的发展应遵循主权人工智能关键原则：安全与韧性、数据与技术自主、本地能力与创新，以及伦理与法律合规。

4.1. 主要考虑因素

人工智能——特别是可持续的主权人工智能——具有巨大潜力，有助于提升效率、加速可持续增长并建立长期韧性，从而带来切实的经济效益。实现这一潜力需要关键利益相关方群体之间开展跨领域的协调合作，各方均发挥独特而重要的作用：

能源公司和工业制造商在实施人工智能解决方案方面处于领先地位，通过利用其资产、数据和技能，推动全系统的转型和价值创造，具体方式包括：

- **投资建设高质量的数据基础设施，并优先开展准确、高质量的运营和市场数据的采集、整理与整合。**为有效支持人工智能模型的训练与部署，能源和工业企业可能需要建立跨资产和业务部门的、可互操作的标准化数据格式。这些数据格式应辅以强大的网络安全措施和数据治理政策，以确保业务持续运行、敏感数据得到保护，并符合不断演变的合规标准。
- **通过投资提升员工在各层面的人工智能素养以及开展专项培训项目，培养人工智能人才并提升团队技能水平。**在 2018 年至 2024 年期间，能源和采矿行业的人工智能人才占比在各行行业中处于最低水平，平均比教育、金融服务、专业服务以及科技、信息和媒体行业低 40%⁴。能源行业在培养和维持一支具备娴熟人工智能技能的团队方面，预计将面临来自其他行业的竞争⁹²。建立内部能力有助于确保团队能够有效解读人工智能的输出结果，管理人工智能系统，并推动持续改进。

- **从高影响力的应用入手，这些应用能够快速带来可衡量的效益，并可在整个组织范围内推广。**已被验证的应用包括预测性维护、效率提升⁹³、高级预测和电网优化，这些应用可部署于多种资产之上，从而产生累积性的经济效益⁹²。
- **借助云计算和边缘计算提升人工智能能力的利用率，同时保障数据安全。**云平台能够处理大规模数据并训练复杂的 AI 模型，从而实现运营全过程的强有力信息分析⁹⁴。与此同时，在靠近传感器或变电站等设备的边缘端部署人工智能，可实现实时数据分析和更快速的决策⁴。这还能有助于减少数据传输延迟，利用设备端处理器提升效率，并在多个设备之间分散能源消耗⁸。结合使用云计算与边缘计算，可帮助企业提取战略性洞察，快速应对运营挑战，同时最大限度降低能耗。
- **通过研究与技术合作、公私合作伙伴关系 (PPPs) 以及全行业的数据共享实践，促进跨学科和跨领域的协作。**这可以使企业获得先进的人工智能技术、定制化的部署与开发能力，并在监管合规方面获得支持，同时利用准确、可靠且经过匿名化处理的数据，以满足数据隐私要求。

科技公司在推动行业革新方面发挥着重要作用，能够弥合前沿人工智能技术能力与能源行业独特运营需求之间的差距。它们具备以下显著能力：

- **引领人工智能技术的开发与创新，专门针对能源行业面临的挑战（如电网稳定性、需求预测和预测性维护）提供解决方案。**技术领导者可识别并评估特定行业（如能源和工业领域）中人工智能的应用场景。持续投资于研究工作，特别是在人工智能与物联网、数字孪生、云计算等互补技术交叉融合的领域，对推动行业持续发展和加快技术应用至关重要。这通常包括构建面向行业的优化模型、可扩展的平台以及参考架构。
- **主动与能源领域的利益相关方合作，以改善数据共享并制定行业特定的解决方案。**包括提供有关数据中心运营的透明、及时的信息，并共同开发可靠的电力需求预测方法。通过此类合作，能源供应商能够更好地应对人工智能日益增长的用电需求，而技术供应商则可协助能源行业领导者更有效地规划基础设施，支持电网可靠性，并加快在灵活运营和清洁能源整合方面的创新步伐。
- **采用先进且因地制宜的数据中心清洁能源采购策略。**科技企业可通过优先采购可靠、具有成本效益且低碳的电力，率先应对数据中心能源消耗快速增长的挑战。具体措施包括更多地采用长期电力购买协议 (PPAs)⁴，以及将数据中心与清洁能源设施协同布局⁸。这些举措不仅有助于实现企业可持续发展目标，还能提升当地电网的韧性。

• **确保负责任的人工智能，特别是通过将可解释性、伦理规范和强合规融入人工智能系统。**这可能包括提供透明的算法、数据主权以及清晰的文档，以支持可信且透明的人工智能决策¹²。德勤的可信人工智能™ (Trustworthy AI™) 等框架在开发此类负责任且安全的人工智能模型和资产方面可发挥有效作用⁹⁵。此外，开源工具和知识共享举措有助于与现有基础设施及多样化数据源实现无缝集成，推动全行业参与，并降低中小企业的准入门槛。一些政府已开始支持此类工具和倡议，例如美国的人工智能行动计划 (AI Action Plan)⁹⁶ 即为明证。

金融服务提供商，包括贷款机构、股权投资者和保险公司，在支持和扩大能源领域由人工智能驱动的创新方面发挥着重要作用。他们不仅作为金融支持方，同时也是人工智能的使用者，可以通过以下方式提供帮助：

- **优先考虑并支持那些在可持续性、灵活性和韧性方面展现出潜在效益的人工智能驱动能源和数字基础设施项目。**这可能包括部署创新融资工具，如与绿色债券、优惠贷款和夹层融资机制⁸²，以支持数据中心建设、电网升级以及更多能源的整合。
- **制定并实施适当的风险评估框架，以应对能源领域人工智能带来的特定机遇与挑战，包括网络安全、监管变化和运营韧性等方面。**保险公司应考虑开发新的承保模式，以应对人工智能特有的风险⁹⁷，并通过保险定价和产品创新激励韧性提升²。此外，金融机构可利用人工智能加强内部风险识别和信用评分流程，实现尽职调查等财务流程的自动化，并提升资产估值能力⁹⁸。基于人工智能的金融模型，例如按使用付费模式，也可以提供定制化的融资解决方案，以增加对可再生能源项目的资金流入⁹⁹。
- **主动与政策制定者、科技公司、公用事业公司及能源运营商合作，确定投资重点领域，例如针对数据中心的灵活性激励措施和标准化报告。**通过参与公私合作 (PPPs)，金融服务提供商可帮助降低早期人工智能项目的风险，并为构建一个稳健、负责任且富有创新性的人工智能驱动能源生态系统奠定基础。

政府和政策制定者在推动人工智能于能源系统中的应用方面发挥着重要作用。他们的影响力有助于通过以下方式为主权人工智能奠定基础：

- **在基础设施项目中建立人工智能透明度和问责制的标准并明确相关定义，或消除人工智能发展的障碍。**
- **协调安全的跨行业和跨境数据共享框架，以推动人工智能模型的稳健协作开发以及区域能源系统的优化。**对高质量、可互操

作的科研数据集进行持续的公共投资，对于推动跨行业、跨国界的协作式人工智能驱动创新至关重要⁴。欧盟的 Enershare 平台便是一个典型案例：这一广受欢迎的数据共享框架为高效且安全的跨行业数据交换提供了统一平台¹⁰⁰。

- **提供有针对性的经济和金融支持，例如补贴、税收激励、拨款及其他机制，以帮助降低人工智能创新与应用相关的财务风险。**尽管政府对人工智能研发和创新的投入有所增加，但现有数据显示，人工智能在能源领域的应用仍然相对有限⁴。这可能需要广泛发展支持机制，例如荷兰的 Wet Bevordering Speuren Ontwikkelingswerk (WBSO) 税收抵免政策，该政策对企业基于人工智能的预测性维护、智能交通系统和能源优化方面的研发相关投资提供部分补偿¹⁰¹。
- **通过教育、培训、区域创新中心以及学术界、产业界和公共部门之间的合作，投资于本地能力建设并培养本土人工智能人才。**在人工智能人才缺口可能进一步扩大的背景下，职场中对人工智能的应用正日益增加^{102,103}。由政府支持并结合产业专家参与的培训，对于克服人才制约、满足企业内部对新技术日益增长的需求具有重要意义。一些政府已开始通过各类举措应对不断增加的技能提升与再培训需求，例如欧盟《人工智能法案》推动的人工智能普及教育项目¹⁰⁴，以及美国《劳动力创新与机遇法案》提供的资助，旨在促进公共部门内部的人工智能普及¹⁰⁵。
- **推广灵活的政策，以适应人工智能技术的快速发展以及能源市场的需求变化。**鉴于人工智能技术进步的速度往往超过各利益相关方的跟进能力，采用适应性政策有助于降低监管过时的风险，并实现人工智能治理的有序演进。²

4.2. 创造包容性的人工智能未来

人工智能有潜力应对可持续发展和医疗可及性等重要的全球性议题，但只有当多数国家和组织能够获取、调整并根据自身独特需求定制人工智能解决方案时，这一潜力才可能成功实现。这可能需要针对基础设施发展提供定向支持，投资于本地能力建设，并建立尊重主权和隐私的、健全、可互通的数据生态系统¹²。因此，各国政府和多边机构应考虑优先为服务不足的地区（包括国家内部的地区）提供数字和能源基础设施的资金支持与技术援助，同时促进本地创新，并推动其参与全球人工智能研究网络的条件建设¹⁰⁶。

公私合作伙伴关系 (PPPs) 可作为缩小这些差距的有力杠杆。通过结合公共部门的监管洞察力和组织协调能力, 以及私营部门的技术专长和创新能力, 公私合作伙伴关系有助于加快包容性人工智能解决方案的部署¹⁰⁷。成功的合作应积极吸纳民间资本和本地社区的参与, 融合多元视角, 确保人工智能的设计与应用能够反映社会、伦理和文化方面的优先事项。新加坡国家人工智能战略 2.0 版 (NAIS 2.0) 便是一个典型案例。该战略在设计之初就明确考虑了包容性与伦理问题, 包含多项举措, 旨在帮助大型和小型公用事业机构均能便捷使用人工智能能源管理工具, 并推动广泛劳动者群体接受人工智能素养与应用培训¹⁰⁸。

此外, 包容性的人工智能发展应解决偏见问题, 并促进公平获取⁹⁹。这意味着需要投资于多语言人工智能模型, 并构建反映本地实际情况的数据集^{84,99}。持续的监测、审计和透明报告对于建立和维护信任与问责制至关重要。

最后, 在社会各个层面推进人工智能普及并提升人工智能技能至关重要。政府、教育机构和产业界可以携手设计培训项目和宣传推广活动, 帮助人们理解、使用并塑造人工智能技术。通过为劳动力和广大公众提供重要的数字技能, 可以确保全社会对人工智能驱动的能量经济的广泛参与。

各利益相关方协调一致且果断的共同努力, 对于解锁可持续主权人工智能在能源领域的变革至关重要。通过协同合作, 各国政府、私营企业 (包括技术提供商、能源企业、工业企业和金融服务机构)、民间组织及其他群体可将人工智能作为战略工具, 全面融入能源系统的规划与运营之中, 从而帮助能源行业不仅应对未来挑战, 更能引领迈向可持续、公平且具有韧性的未来之路。

附录

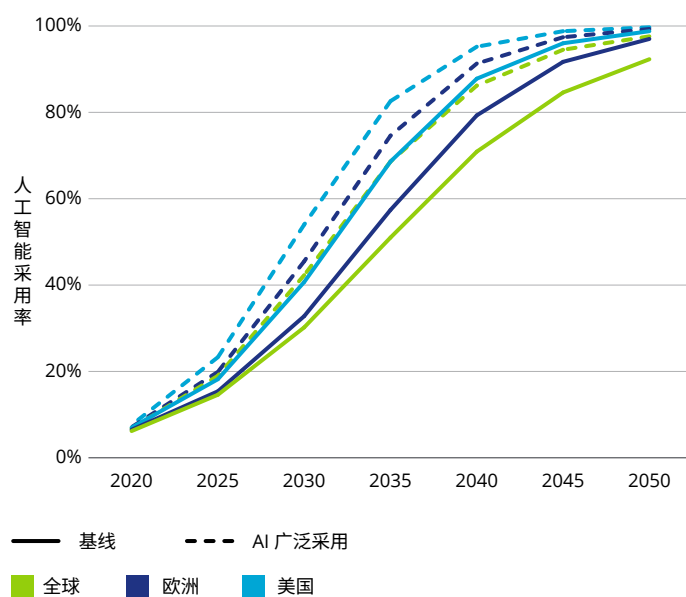
附录 1 人工智能应用在能源系统中影响的计算

评估人工智能对能源领域的全球影响，需要分析每种人工智能应用对成本、能源消耗和排放的影响。该分析与行业预期发展趋势保持一致¹⁴，并考虑了不同地区的独特特征。各国被划分为以下区域：北美、中南美洲、欧洲、欧亚大陆、中东和北非（MENA）、非洲、中国、印度、东南亚以及其他亚太地区（如澳大利亚、日本、韩国等）。

不同地区的人工智能采用率可能存在显著差异，这主要源于社会经济因素的差异。这些采用率的估算基于国内生产总值（GDP）和人均 GDP¹⁰⁹，人工智能领域的投资，以及区域专利申请数量等其他可获得的指标¹¹⁰。这些参数的预测延伸至 2050 年，采用线性回归与指数趋势函数相结合的方法，并参考了关于人工智能区域潜在影响的宏观经济研究⁸¹，以及德国和欧盟等特定地区制定的当前及中期目标¹¹¹。该方法借鉴了国际货币基金组织（IMF）提出的人工智能采用情景：基准情景、有限采用情景和强化部署情景。每种情景均根据对人工智能技术的可及性、数据限制、地缘政治因素、先进处理器和基础设施的可用性等参数进行定义，并应用于包括发达经济体、新兴市场和低收入国家在内的不同区域分组。在美国、中国、欧洲及其他发达经济体中，人工智能的影响可能更为显著，这体现在基准情景与强化部署情景之间的差异相对较小；在这两种情况下，人工智能在 10 年后对 GDP 的冲击预计均约为 4.5%。相比之下，新兴市场和低收入国家整体上预计将经历较小的人工智能对 GDP 的影响⁸¹。然而，这些地区在两种情景之间的差距更大，10 年后 GDP 相对于稳态的平均偏离幅度在基准情景下为 2.8%，在强化部署情景下则为 3.3%⁸¹。

本报告定义了两种主要情景：一种是基准情景，反映当前人工智能在能源领域的应用水平；另一种是广泛采用情景，假设人工智能的采用率更高。采用逻辑函数（即 S 型曲线）来模拟人工智能随时间推移的普及过程（见图 6）。这种方法反映了新技术普及的典型轨迹，即初期快速增长，随后随着普及趋于饱和而进入平稳期。例如，全球互联网的普及就呈现出类似的 S 型曲线模式。

图 6. 不同情景下的 AI 采用曲线



来源：德勤全球假设，基于国际能源署和国际货币基金组织的数据

人工智能的效益因具体应用行业的不同而有所差异。潜在的节能效果涵盖了电力生产、交通（包括公路、铁路、航运和航空）、工业（包括钢铁、化工、水泥及其他）以及建筑（包括住宅和商业建筑）等领域。报告第 2.1 节中确定的相关人工智能应用，根据其普及程度、技术成熟度和数据可获得性进行了优先排序。图 7 展示了各行业中选定的人工智能应用示例以及每项应用所节约的能源。

图 7. 在特定应用中采用人工智能可实现的节能效果



来源：德勤全球根据图中示例所引用资料进行的分析

这些应用的影响,结合区域人工智能(AI)采用率,直接应用于净零排放前景数据,并在必要时辅以其他资料,以进一步提高区域和行业的精确度^{121,122,123}。输入数据包括按能源来源划分的能源生产演变、按子行业划分的能源消耗以及技术和商品成本。例如,在电力行业,陆上风电场中改进的尾流转向和叶片优化可使能源产量提高多达12%¹¹³。这一效率提升被应用于基于不同区域

前景估算的新增装机容量^{14,122},并结合各地区具体的AI采用率进行调整。在海运领域,自主导航技术的采用预计将对新建和现有船队均产生影响,预计可使燃料消耗减少约5%¹¹⁶。各地区自主导航技术的采用率基于行业预测进行细化,2040年低自动化和高自动化情景下的采用率分别介于17%至50%之间^{124,125}。年度节能效果根据以下公式计算:

$$\text{节能效果}_{y,r} = \text{人工智能采用率}_{y,r,s} \times \text{能源消耗量}_{y,r,s} \times \text{人工智能影响系数}_{app,s}$$

包含:

- 节能效果 $_{y,r}$:即应用人工智能所产生的年节能量,单位为吉瓦时(GWh)。如果人工智能应用影响了当年新增装机容量,则将上一时期的节能量加入当年计算的节能量中。
- 人工智能采用率 $_{y,r}$:按年计算的应用率百分比,依据附录1中所述的方法进行计算。
- 能源消耗量 $_{y,r}$:根据人工智能应用的不同,指现有容量或新增容量的年度能耗(单位:GWh)。该变量取自区域展望报告^{14,122}。
- 人工智能影响系数 $_{app}$:以百分比形式表示AI应用的影响程度。
- y 表示应用该方程的年份。
- r 表示方程所应用的地理区域。
- s 表示方程所应用的行业领域。
- app 指人工智能应用。

关于节能的经济效益,可以通过不同方式转化为成本的降低,具体取决于人工智能应用的类型:

- 通过直接降低燃料消耗(例如,路线优化和自主导航)实现的燃料成本节约。此类节约是根据人工智能应用所节省的燃料量以及相应避免的燃料购买成本计算得出的^{14,121,122}。
- 避免了过度投资,特别是在电力行业(例如,通过扩大可再生能源的应用以及降低电网升级需求,正如动态线路额定应用中体现的那样)。通过广泛使用人工智能减少电力需求,预计将降低资本支出,节约程度取决于各地区预期的能源结构。

- 运营和维护(O&M)成本节约(例如,预测性维护或提高风力涡轮机性能)。例如,在电力领域,发电厂的预测性维护可使O&M成本降低5%至10%⁴。这些百分比降幅应用于各地区电力结构相关的O&M成本,以计算相应的成本节约。

减排量是通过燃料的排放强度以及发电来源的年平均排放足迹来计算的,反映了减少不可再生能源消耗和增加可再生能源并网的双重影响。

作者



Prof. Dr. Bernhard Lorentz

德勤可持续发展卓越中心
创始主席
德勤全球
blorentz@deloitte.de



Dr. Johannes Trüby *

德勤经济咨询合伙人
德勤法国
jtruby@deloitte.fr



Dr. Behrang Shirizadeh *

德勤经济咨询总监
德勤法国
bshirizadeh@deloitte.fr



Dr. Freedom-Kai Phillips

德勤可持续发展卓越中心总监
德勤全球
fphillips@deloitte.ca



Geoff Tuff

可持续发展行业领导人
德勤全球
gtuff@deloitte.com



Beth McGrath

政府及公共服务行业领导人
德勤全球
bmcgrath@deloitte.com



Melissa Smith

政府及公共服务行业 GenAI 领导人
德勤全球
melissasmith@deloitte.com



Charbel Bou Issa *

德勤经济咨询经理
德勤法国
cbouissa@deloitte.fr

以下来自德勤法国的专家为本报告的撰写提供了支持, 他们精心构思并撰写了部分见解:



Anoushka Hooda *

德勤经济咨询
anhooda@deloitte.fr



Antoine Museur*

德勤经济咨询
amuseur@deloitte.fr

* 表明该个人并非德勤全球或其他德勤核心实体的受雇员工, 而是受托参与本报告的编写或贡献

联系我们

中文报告联系人



吕岩

德勤中国能源、资源及工业行业

主管合伙人

德勤中国能源及化学品子行业

主管合伙人

sanlv@deloittecn.com.cn



谈亮

德勤中国可持续发展服务主管合伙人

德勤中国工业产品及建筑子行业主管

合伙人

kutan@deloittecn.com.cn



张杰

德勤中国电力、公共设施及可再生能源

子行业主管合伙人

mickzhang@deloittecn.com.cn

英文报告联系人



Dr. Freedom-Kai Phillips

德勤可持续发展卓越中心总监

德勤全球

+1 647 529 6621

fphillips@deloitte.ca

* 表明该个人并非德勤全球或其他德勤核心实体的受雇员工，而是受托参与本报告的编写或贡献

特别感谢以下各位人士提供的支持 使本报告得以完成：

Ashish Gupta, Deloitte Global

Ashley Capern, Deloitte Global

Blythe Aronowitz, Deloitte Global

Carolyn Amon, Deloitte Services LP

CJ Smith, Deloitte Consulting LLP

Elif Dusmez Tek, Deloitte Türkiye

Gavin McTavish, Monitor Deloitte, Canada

Grzegorz Jurczyszyn, Deloitte Poland

Ines dos Santos Costa, Deloitte Portugal

Jose Maria Losada, Deloitte Global

Josh Sawislak, Deloitte Consulting LLP

Kate Hardin, Deloitte Services LP

Katie Gibson, Deloitte Consulting LLP

Khalid Behairy, Deloitte Consulting LLP

Louise Cooper, Deloitte UK

Michelle Varney, Deloitte Global

Pradeep Philip, Deloitte Australia

Rachael Ballard, Deloitte Global

Rebekah Susan Thomas, Deloitte Global

Richard Longstaff, Deloitte Consulting LLP

Sean McClowry, Deloitte Australia

Stuart Kerr, Deloitte Global

Thomas Schlaak, Deloitte Global

Tracey McQueary, Deloitte Global

德勤可持续发展卓越中心

[德勤可持续发展卓越中心\(DCSP\)](#)致力于通过推动适应和减缓措施、塑造韧性以及指导能源转型路径,识别机遇并帮助应对挑战,以推进可持续发展优先事项。德勤可持续发展卓越中心汇聚杰出领袖和创新思想家,探索有效且具有开创性的解决方案,并开展合作,以推动应对人类面临的全球挑战的行动。德勤可持续发展卓越中心不向外部客户提供服务。

尾注

1. World Economic Forum, "[Fostering Effective Energy Transition 2025](#)", June 2025.
2. Deloitte Global, "[AI for infrastructure resilience](#)", June 2025.
3. World Economic Forum, "[Artificial Intelligences Energy Paradox](#)", January 2025.
4. International Energy Agency, "[Energy and AI](#)", April 2025.
5. Deloitte Global analysis based on the sources highlighted in Figure 1.
6. National Energy System Operator, "[Demand Flexibility Service](#)", August 2023.
7. Adil Ahmed and Muhammad Khalid, "[A review on the selected applications of forecasting models in renewable power systems](#)", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 100, pp. 9-21, 2019.
8. Deloitte Global, "[Powering artificial intelligence: A study of AI's environmental footprint—today and tomorrow](#)", November 2024
9. Deloitte Global analysis based on the methodology explained in Appendix 1. Calculation of the impact of AI applications in energy systems"
10. International Energy Agency, "[Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – 2023 update](#)", September 2023.
11. European Commission, Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), "[GHG emissions of all world countries – 2024 report](#)", 2024.
12. World Economic Forum, "[Sovereign AI: What it is, and 6 ways states are building it](#)", April 2024
13. European Stability Mechanism, "[Renewable energy can fuel increased energy security](#)", July 2024.
14. International Energy Agency, "[World Energy Outlook 2024](#)", October 2024
15. International Energy Agency, "[Growth in global energy demand surged in 2024 to almost twice its recent average](#)", March 2025.
16. Jingfan Wang, "[Automating the detection and classification of methane pollution: integrating deep learning and techno-economic analysis](#)", Stanford University, December 2019.
17. ANZ Research, "[Commodity Call](#)", January 2024.
18. Net savings are calculated based on Deloitte Global analysis, taking into account operations and maintenance (O&M) cost savings achieved through automated leak detection and repair (LDAR), as well as the resale value of methane emissions avoided. A conversion factor of 46.4 has been used to transform MMBtu to tonne or methane.
19. Factor This, "[Case study: The first US electric utility to integrate dynamic line ratings into real-time and market operations](#)", January 2025.
20. NVIDIA, "[How AI Factories Can Help Relieve Grid Stress](#)", July 2025
21. PR Newswire, "[Emerald AI Launches with \\$24.5M Seed Round to Transform AI Data Centers into Grid Allies](#)", July 2025
22. Arun Sukumaran Nair et al., "[Computational and numerical analysis of AC optimal power flow formulations on large-scale power grids](#)", Electric Power Systems Research, vol. 202, 107594, January 2022.
23. cBrain, "[AI-assisted environmental permitting](#)", 2024.
24. IEA, "[Africa's electricity access planners turn to geospatial mapping](#)", 2024
25. University of Cambridge, "[Heidelberg Materials adopts Carbon Re's AI and ABB Ability™ for improved kiln operations](#)", October 2024.
26. Chi Chen et al., "[Accelerating computational materials discovery with artificial intelligence and cloud high-performance computing](#)", arxiv, January 2024.
27. Deloitte Global analysis based on the assumption that the efficiency of lithium-ion batteries is 89% based on Raphael I. Areola et al., "[Integrated Energy Storage Systems for Enhanced Grid Efficiency: A Comprehensive Review of Technologies and Applications](#)", Energies, vol. 18, issue 7, April 2025; and the efficiency of solid-state batteries is 97% based on Hongming Yi et al., "[Low-Cost Mn-Based Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries](#)", Batteries, vol. 9, issue 5, April 2023. Electricity cost savings is calculated based on the difference in energy loss between these batteries, projected capacity increase from 2023 to 2030 using IEA, "[Batteries and Secure Energy Transitions](#)", 2024; and average electricity cost in 2023 in leading battery markets from IEA, "[Prices – Electricity 2025 – Analysis - IEA](#)", Accessed in October 2025.
28. Kibaek Kim, "[Real-Time AI-Based Power Demand Forecasting for Peak Shaving and Consumption Reduction Using Vehicle-to-Grid and Reused Energy Storage Systems: A Case Study at a Business Center on Jeju Island](#)", Applied Sciences, vol. 15, issue 6, March 2025.
29. Magnus Briggst and Greg Johansson, "[Optimizing Electric Vehicle Performance through Advanced AI-Driven Battery management System \(BMS\)](#)", SSRN, December 2023.
30. D.B. Hulwan et al., "[AI-Based Fault Detection and Predictive Maintenance in Wind Power Conversion Systems](#)", EDP Sciences, E3S Web of Conferences, vol. 591, November 2024.
31. Elia, "[System imbalance forecasts](#)", accessed August 2025.
32. Hitachi Energy, "[Nostradamus AI Energy Forecasting Software](#)", accessed August 2025.
33. Hendrik F. Hamann et al., "[Foundation models for the electric power grid](#)", Joule, vol. 8, issue 12, pp. 3245-3258, December 2024.
34. European commission, "[Methane emissions](#)", accessed in August 2025.
35. Gunnar Myhre et al., "[Anthropogenic and Natural Radiative Forcing](#)", Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
36. Martin Lavoie et al., "[Evaluating the benefits of alternative leak detection programs](#)", Pembina Institute, May 2021.
37. International Energy Agency, "[Global Methane Tracker 2025](#)", May 2025.
38. Deloitte Global analysis using maintenance and repair cost reductions and the total methane emissions.
39. OreFox Exploration, "[Pioneering New Frontiers in Mineral Discovery with AI](#)", accessed August 2025.
40. Earth AI, "[Turbocharging exploration to build the electric future](#)", accessed August 2025.
41. Halliburton, "[LOGIX™ drilling performance](#)", accessed August 2025.
42. Latitude Media, "[Can Zanskar use AI to de-risk conventional geothermal?](#)", June 2025.
43. Entek Elektrik, "Artificial Intelligence in Hydrology Prediction", EDİDER AI Applications in the Energy Sector Conference, Ankara (Türkiye), October 2024.

44. Google DeepMind, [GraphCast: AI model for faster and more accurate global weather forecasting](#), November 2023.
45. Léonard Tschora et al., ["Electricity price forecasting on the day-ahead market using machine learning"](#), Applied Energy, Elsevier, 2022
46. Felix Nitsch et al., ["Applying machine learning to electricity price forecasting in simulated energy market scenarios"](#), Energy Reports, Volume 12, Pages 5268-5279, December 2024
47. Grid Singularity, ["Grid Singularity Technical Approach"](#), accessed August 2025.
48. Optimal Power Flow (OPF) is an important calculation used by grid operators to determine the most efficient and secure real-time operation of electricity generators. It solves a complex optimization problem reflecting the physical limits of the grid (such as power flows, voltage, and equipment constraints) to meet demand at the lowest cost. While the most accurate version (AC-OPF) is computationally intensive, operators often use a simplified version (DC-OPF) for faster decisions—though this can result in less efficient and more carbon-intensive grid operation.
49. Xiang Pan et al., ["DeepOPF: A Feasibility-Optimized Deep Neural Network Approach for AC Optimal Power Flow Problems"](#), arxiv, July 2022.
50. IBM, ["What Is a Digital Twin?"](#), 2021.
51. Mohsen Attaran and Bilge Gokhan Celik, ["Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities"](#), Decision Analytics Journal, Vol. 6, 100165, 2023.
52. National Energy System Operator, ["Energy System Digital Twin - Benchmarking Report"](#), February 2022.
53. Deloitte Touche Tohmatsu, ["Optimal Reality"](#), accessed July 2025.
54. World Economic Forum, ["How permitting processes are hampering Europe's energy transition"](#), September 2024.
55. PACES, ["Introducing the Accelerated Development Framework"](#), February 2025.
56. Deloitte Global analysis based on BNEF, ["1H 2024 US Clean Energy Market Outlook: Moving Past 2030"](#), May 2024.
57. Deloitte Consulting LLP documentation of Rate Case Assistant.
58. Siemens Energy, ["Siemens Energy announces new AI-driven cybersecurity monitor and detection service for the energy industry"](#), October 2020.
59. L2L, ["Artificial Intelligence in Maintenance: How AI Helps Maintenance Teams?"](#), October 2024.
60. MIT Sloan Management Review, ["A Maintenance Revolution: Reducing Downtime With AI Tools"](#), Column, September 2025.
61. Entek Elektrik, "Entek Maintenance Assistant", EDIDER AI Applications in the Energy Sector Conference, Ankara (Türkiye), October 2024.
62. The Economist, ["AI models are dreaming up the materials of the future – Better batteries, cleaner bioplastics and more powerful semiconductors await"](#), March 2025.
63. Gamesh Vijayakumar et al., ["Enabling Innovation in Wind Turbine Design Using Artificial Intelligence"](#), the ARPA-E Energy Innovation Summit, May 2022.
64. Muhammad Noman et al., ["A comprehensive review on the advancements and challenges in perovskite solar cell technology"](#), RSC Advances, vol. 14, issue 8, pp. 5085-5131, February 2024.
65. Fatou Diaw Ndiaye et al., ["Toward More Scalable Processes for Perovskite Solar Cells: A Comparison Between Planar and Mesoporous Architectures"](#), Nano Select, vol. 6, issue 5, March 2025.
66. Naoto Eguchi et al., ["Performance optimization of perovskite solar cells with an automated spin coating system and artificial intelligence technologies"](#), EES Solar, vol. 1, issue 3, pp. 320-330, April 2025.
67. Montree Sawangphruk, ["Solid-State Batteries: Materials, Technologies, and Future"](#), Handbook of Energy Materials, living edition, February 2025.
68. The Faraday Institution, ["Solid-State Batteries: The Technology of the 2030s but the Research Challenge of the 2020s"](#), Faraday Insights, issue 5, February 2020.
69. The National High School Journal of Science, ["AI-Driven Solutions: Quantitative and Case Study Analysis for Transforming CCS Technologies"](#), January 2025.
70. US Department of Energy, ["Grid-interactive Efficient Buildings Technical Report Series: Heating, Ventilation, and Air Conditioning \(HVAC\); Water Heating; Appliances; and Refrigeration"](#), December 2019.
71. Schneider Electric, ["AI-powered HVAC in educational buildings: A net digital impact use case"](#), December 2024.
72. Scalacode, ["AI in Transportation Industry: Everything You Need to Know"](#), June 2025.
73. The CDO Times, ["UPS and Agentic AI: A Case Study in Logistics Innovation"](#), January 2025.
74. Marc A. Rosen and Aida Farsi, ["Battery Technology - From Fundamentals to Thermal Behavior and Management"](#), Chapter 6, Elsevier, 2023.
75. International Council on Clean Transportation, ["A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe"](#), 2023.
76. Atlas Public Policy, ["Comparing the Total Cost of Ownership of the Most Popular Vehicles in the United States"](#), 2024.
77. World Economic Forum, ["How AI is transforming the factory floor"](#), June 2025.
78. World Economic Forum, ["Global Lighthouse Network: Adopting AI at Speed and Scale"](#), December 2023.
79. International Energy Agency, ["Digitalization and Energy – Analysis - IEA"](#), November 2017.
80. GE Vernova, ["Empower Intelligent Grids With AI"](#), 2025.
81. Eugenio M. Cerutti et al., ["The Global Impact of AI"](#), IMF Working Papers, vol. 2025, no. 76, 2025.
82. Deloitte Global, ["Financing the green energy transition: A US\\$50 trillion catch"](#), November 2023.
83. Oracle, ["What Is Sovereign AI?"](#), April 2025
84. NVIDIA, ["What Is Sovereign AI?"](#), February 2024
85. David L. Shrier et al., ["Considerations regarding Sovereign AI and National AI Policy"](#), IMPERIAL Trusted AI Alliance, March 2025
86. Eurelectric, ["Cybersecurity in the power sector"](#), February 2025
87. International Telecommunication Union, ["AI for Good Impact Report: Choices to shape the future"](#), October 2024.
88. RealTyme, ["Why Data Sovereignty Matters for Secure Collaboration?"](#), December 2024.
89. The World Bank Group – Data, ["Energy imports, net \(% of energy use\)"](#), accessed August 2025.
90. Deloitte Global analysis; calculation based on dividing energy savings by natural gas and oil imports, which account for 314 bcm - 3,068 TWh⁸⁸ and around 4,300 TWh⁸⁹ respectively.
91. European Commission, ["REPowerEU - Affordable, secure and sustainable energy for Europe"](#), accessed August 2025.
92. International Energy Agency, ["Why AI and energy are the new power couple"](#), November 2023.
93. World Economic Forum, ["AI's energy dilemma: Challenges, opportunities, and a path forward"](#), January 2025.
94. Orange Business, ["Optimizing artificial intelligence and machine learning with cloud computing"](#), July 2024.
95. Deloitte Netherlands, ["Our joint capabilities. Your trustworthy AI."](#), accessed October 2025.
96. The White House, ["Winning the AI Race: America's AI Action Plan"](#), July 2025.
97. Swiss Re Institute, ["Tech- tonic shifts - How AI could change industry risk landscapes"](#), May 2024.
98. IBM, ["What is artificial intelligence \(AI\) in finance?"](#), July 2025.
99. Operationalising a Just Transition in Africa, ["Harnessing Artificial Intelligence \(AI\) To Propel A Just Energy Transition In Africa"](#), Policy Brief, February 2025.
100. ENERSHARE, ["The Energy Data Space for Europe"](#), accessed August 2025.
101. Business.gov.nl, ["R&D tax credit \(WBSO\)"](#), accessed August 2025.
102. Workday, ["Elevating Human Potential: The AI Skills Revolution"](#), Jan 2025.

103. Staff Industry Analysts, "[Companies face growing shortage of AI skills in the workforce](#)", March 2025.
104. EU Artificial Intelligence Act, "[AI Literacy Programs in Europe – Supporting Article 4 of the EU AI Act](#)", May 2025.
105. US Department of Labor, "[US Department of Labor promotes AI literacy across the American workforce](#)", August 2025.
106. Next Century Cities, "[Closing the Digital Divide is Essential to Achieving Environmental Justice](#)", accessed August 2025.
107. World Economic Forum, "[How public-private partnerships can ensure ethical, sustainable and inclusive AI development](#)", November 2024.
108. Smart Nation – Singapore, "[National AI Strategy](#)", accessed August 2025.
109. The Economist Intelligence Unit, "[EIU Viewpoint](#)", accessed August 2025.
110. Stanford University, "[Artificial Intelligence Index Report](#)", 2025
111. Organisation for Economic Co-operation and Development, "[Artificial Intelligence Review of Germany](#)", June 2024.
112. Dylan Harrison-Atlas et al., "[Machine learning enables national assessment of wind plant controls with implications for land use](#)", Wind Energy, vol. 25, issue 4, pp. 618-618, April 2022.
113. Shumail Sahibzada et al., "[AI-Driven Aerodynamic Design Optimization for High-Efficiency Wind Turbines: Enhancing Flow Dynamics and Maximizing Energy Output](#)", European Journal of Science, Innovation and Technology, vol. 4, no. 6, 2024.
114. Qiang Wang et al., "[Integrating artificial intelligence in energy transition: A comprehensive review](#)", Energy Strategy Reviews, vol. 57, 101600, 2025.
115. World Economic Forum, "[Intelligent Transport Greener Future](#)", January 2025.
116. Orca AI, "[AI could help reduce global commercial shipping CO₂ emissions by more than 47 million tonnes per year](#)", June 2024.
117. World Economic Forum, "[Artificial intelligence can make aviation more sustainable](#)", November 2023.
118. Fero Labs, "[The Convergence of AI and Sustainability in the Manufacturing sector](#)", June 2024.
119. ABB, "[How cement producers are using AI to transform their operations — and future trajectory](#)", February 2022.
120. Po-Ching Hsu et al., "[Comparative study of LSTM and ANN models for power consumption prediction of variable refrigerant flow \(VRF\) systems in buildings](#)", International Journal of Refrigeration, vol. 169, pp. 55-68, 2025.
121. Deloitte Global, "[Low-carbon fuels: The last mile to net zero - The role of synthetic fuels in decarbonizing the skies and the seas](#)", November 2024.
122. DNV, "[Energy transition outlook 2024 – A global and regional forecast to 2050](#)", 2024.
123. Deloitte Global, "[Green hydrogen: Energizing the path to net zero – Deloitte's 2023 clean hydrogen outlook](#)", June 2023.
124. Takuya Nakashima et al., "[Accelerated adoption of maritime autonomous vessels by simulating the interplay of stakeholder decisions and learning](#)", Technological Forecasting and Social Change, Volume 194, 122710, 2023.
125. World Maritime University, "[Transport 2040: Automation, Technology, Employment - The Future of Work](#)", 2019.

办事处地址

- 北京**
北京市朝阳区针织路23号楼
国寿金融中心12层
邮政编码：100026
电话：+86 10 8520 7788
传真：+86 10 6508 8781
- 长沙**
长沙市开福区芙蓉中路一段109号
华创国际广场2号栋1317单元
邮政编码：410008
电话：+86 731 8522 8790
传真：+86 731 8522 8230
- 成都**
成都市高新区交子大道365号
中海国际中心F座17层
邮政编码：610041
电话：+86 28 6789 8188
传真：+86 28 6317 3500
- 重庆**
重庆市渝中区瑞天路10号
企业天地8号德勤大楼30层
邮政编码：400043
电话：+86 23 8823 1888
传真：+86 23 8857 0978
- 大连**
大连市中山路147号
申贸大厦15楼
邮政编码：116011
电话：+86 411 8371 2888
传真：+86 411 8360 3297
- 广州**
广州市珠江东路28号
越秀金融大厦26楼
邮政编码：510623
电话：+86 20 8396 9228
传真：+86 20 3888 0121
- 海口**
海南省海口市美兰区国兴大道3号
互联网金融大厦B栋1202单元
邮政编码：570100
电话：+86 898 6866 6982
- 杭州**
杭州市上城区飞云江路9号
赞成中心东楼1206-1210室
邮政编码：310008
电话：+86 571 8972 7688
传真：+86 571 8779 7915
- 哈尔滨**
哈尔滨市南岗区长江路368号
开发区管理大厦1618室
邮政编码：150090
电话：+86 451 8586 0060
传真：+86 451 8586 0056
- 合肥**
安徽省合肥市蜀山区潜山路111号
华润大厦A座1506单元
邮政编码：230031
电话：+86 551 6585 5927
传真：+86 551 6585 5687
- 香港**
香港金钟道88号
太古广场一座35楼
电话：+852 2852 1600
传真：+852 2541 1911
- 济南**
济南市市中区二环南路6636号
中海广场28层2802、2803、2804单元
邮政编码：250000
电话：+86 531 8973 5800
传真：+86 531 8973 5811
- 澳门**
澳门殷皇子大马路43-53A号
澳门广场19楼H-N座
电话：+853 2871 2998
传真：+853 2871 3033
- 南昌**
南昌市红谷滩区绿茵路129号
联发广场写字楼41层08-09室
邮政编码：330038
电话：+86 791 8387 1177
- 南京**
南京市建邺区江东中路347号
国金中心办公楼一期40层
邮政编码：210019
电话：+86 25 5790 8880
传真：+86 25 8691 8776
- 宁波**
宁波市海曙区和义路168号
万豪中心1702室
邮政编码：315000
电话：+86 574 8768 3928
传真：+86 574 8707 4131
- 青岛**
山东省青岛市崂山区香港东路195号
上实中心9号楼1006-1008室
邮政编码：266061
电话：+86 532 8896 1938
- 上海**
上海市延安东路222号
外滩中心30楼
邮政编码：200002
电话：+86 21 6141 8888
传真：+86 21 6335 0003
- 沈阳**
辽宁省沈阳市沈河区青年大街1-1号
沈阳市府恒隆广场办公楼1座
3605-3606单元
邮政编码：110063
电话：+86 24 6785 4068
传真：+86 24 6785 4067
- 深圳**
深圳市深南东路5001号
华润大厦9楼
邮政编码：518010
电话：+86 755 8246 3255
传真：+86 755 8246 3186
- 苏州**
苏州市工业园区苏绣路58号
苏州中心广场58幢A座24层
邮政编码：215021
电话：+86 512 6289 1238
传真：+86 512 6762 3338 / 3318
- 天津**
天津市和平区南京路183号
世纪都会商厦办公室45层
邮政编码：300051
电话：+86 22 2320 6688
传真：+86 22 8312 6099
- 武汉**
武汉市江汉区建设大道568号
新世界国贸大厦 座49层01室
邮政编码：430000
电话：+86 27 8538 2222
传真：+86 27 8526 7032
- 厦门**
厦门市思明区鹭江道8号
国际银行大厦26楼E单元
邮政编码：361001
电话：+86 592 2107 298
传真：+86 592 2107 259
- 西安**
西安市高新区唐延路11号
西安国寿金融中心3003单元
邮政编码：710075
电话：+86 29 8114 0201
- 郑州**
郑州市金水东路51号
楷林中心8座5A10
邮政编码：450018
电话：+86 371 8897 3700
传真：+86 371 8897 3710

Deloitte.

关于本出版物

This communication's original language is English. Its translation into other languages is provided on an informational basis only. If there is a discrepancy between any of the translated languages and the English version, the original English version controls.

本出版物的原文为英文。其他语言的翻译仅作为参考信息提供。如果任何翻译版本与英文版本存在差异，以英文原版为准。

关于德勤

德勤中国是一家立足本土、连接全球的综合性专业服务机构，由德勤中国的合伙人共同拥有，始终服务于中国改革开放和经济建设的前沿。我们的办公室遍布中国 31 个城市，现有超过 2 万名专业人才，向客户提供审计、税务、咨询等全球领先的一站式专业服务。

我们诚信为本，坚守质量，勇于创新，以卓越的专业能力、丰富的行业洞察和智慧的技术解决方案，助力各行各业的客户与合作伙伴把握机遇，应对挑战，实现世界一流的高质量发展目标。

德勤品牌始于 1845 年，其中文名称“德勤”于 1978 年启用，寓意“敬德修业，业精于勤”。德勤全球专业网络的成员机构遍布 150 多个国家或地区，以“因我不同，成就不凡”为宗旨，为资本市场增强公众信任，为客户转型升级赋能，为人才激活迎接未来的能力，为更繁荣的经济、更公平的社会和可持续的世界开拓前行。

Deloitte（德勤）泛指一家或多家德勤有限公司，以及其全球成员所网络和它们的关联机构（统称为“德勤组织”）。德勤有限公司（又称“德勤全球”）及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，相互之间不因第三方而承担任何责任或约束对方。德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构仅对自身行为承担责任，而对相互的行为不承担任何法律责任。德勤有限公司并不向客户提供服务。请参阅 www.deloitte.com/cn/about 了解更多信息。

德勤亚太有限公司（一家担保责任有限公司，是境外设立有限责任公司的其中一种形式，成员以其所担保的金额为限对公司承担责任）是德勤有限公司的成员所。德勤亚太有限公司的每一家成员及其关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，在亚太地区超过 100 个城市提供专业服务，包括奥克兰、曼谷、北京、班加罗尔、河内、香港、雅加达、吉隆坡、马尼拉、墨尔本、孟买、新德里、大阪、首尔、上海、新加坡、悉尼、台北和东京。

本通讯中所含内容乃一般性信息，任何德勤有限公司、其全球成员所网络或它们的关联机构并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前，您应咨询合格的专业顾问。

我们并未对本通讯所含信息的准确性或完整性作出任何（明示或暗示）陈述、保证或承诺。任何德勤有限公司、其成员所、关联机构、员工或代理方均不对任何方因使用本通讯而直接或间接导致的任何损失或损害承担责任。

© 2026。欲了解更多信息，请联系德勤中国。

Designed by CoRe Creative Services. RITM2453532

