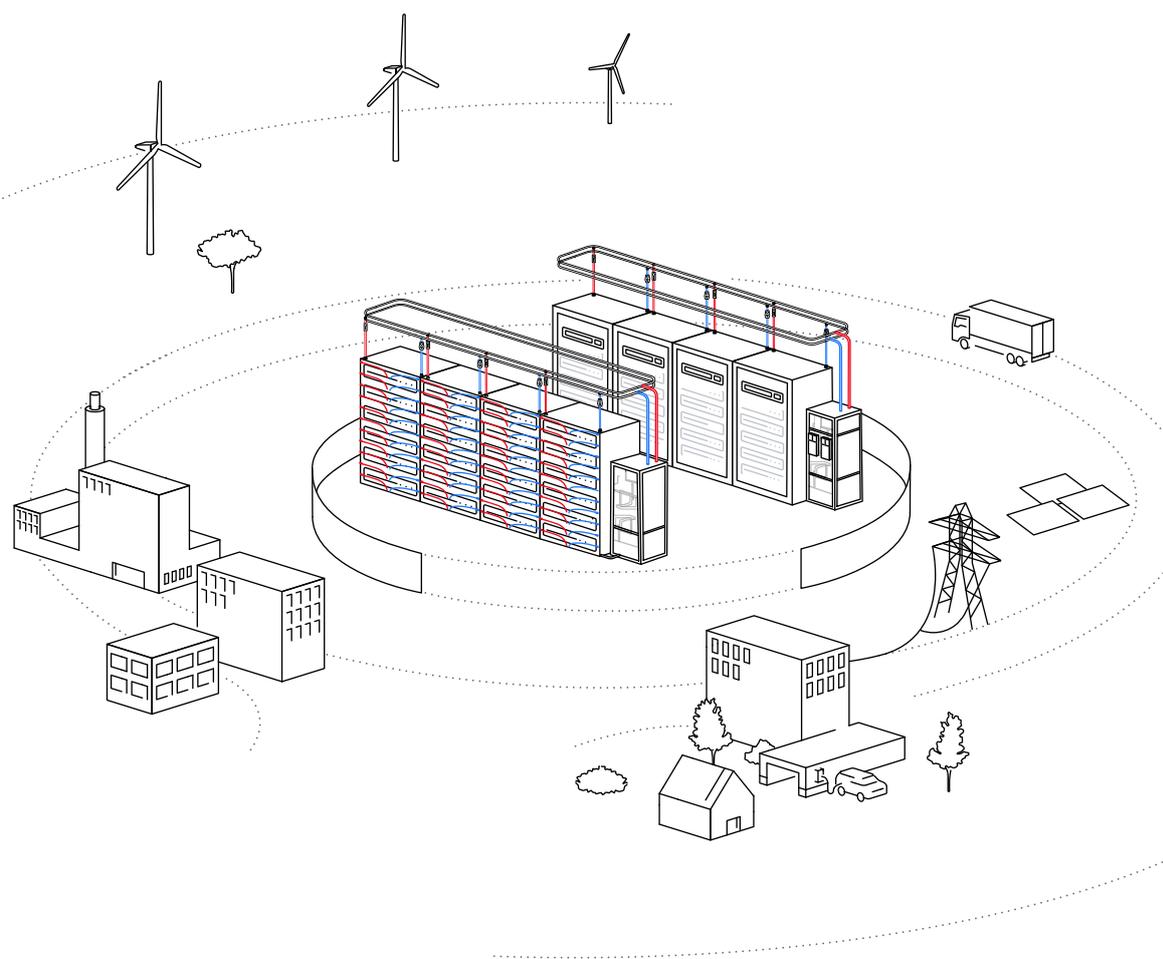




绿色低碳数据中心

有效实现灵活协同、系统融合与能源安全



数据中心何以成为能源系统的宝贵资产

第4页

用于高效数据中心的先进冷却系统

第18页

案例：世界各地如何回收数据中心余热

第29页

将数据中心转化为能源资产的建议

第36页



摘要

基于多方权威机构的实证数据，丹佛斯《影响力系列研究报告》（第八册）系统阐释了数据中心如何从单一的能源消耗者转变为能源系统的宝贵资产。本报告指出，通过提升运营能效、实施余热回收与再利用以及增强运营的灵活性，数据中心可显著提升电网韧性并降低整体系统成本。

同时，报告重点介绍了多项已具备商业化条件、投资回收期短且减排潜力巨大的节能技术——尽管这些技术易于获取，其实际应用仍未普及。文中所称“数据中心用电量”“数据中心能耗”，均指包括 IT 设备、冷却系统、电力输配设施及其他辅助负载在内的全设施总耗电量。若需单独分析特定组成部分（如 IT 负载）的能耗，将另行明确说明。

本研究报告主要面向政策制定者和行业决策者，帮助他们规划数据中心与未来能源体系的融合路径；同时，也为寻求提升效率、灵活性及可持续性，同时实现规模发展的数据中心运营商等行业相关方提供参考。

特别感谢联合国环境规划署哥本哈根气候中心高级顾问 Clara Camarasa、落基山研究所首席专家 Laurens Speelman、落基山研究所经理 Chiara Gulli 以及落基山研究所高级顾问 Yuki Numata 为本文撰写提供的宝贵意见。

本文表达的观点仅代表丹佛斯立场。本文内容的完整性与准确性不应归因于任何外部评审者或机构。

如有意见或疑问，请发送邮件至企业公共事务部负责人萨拉·瓦德·索恩森（Sara Vad Sørensen）的邮箱：sara.sorensen@danfoss.com。

目录

前言	4
内容概要	7
第一章：破解能源困局	8
数据中心可持续部署所面临的挑战	9
数据中心时代	10
第二章：通过效率提升实现可持续增长	12
优化数据中心能效的挑战	13
覆盖整个数据中心的数字化解决方案	16
用于高效数据中心的先进冷却系统	18
直接芯片液冷系统的工作原理	19
采用变频器实现优化控制	21
第三章：作为能源资产的数据中心	22
数据中心作为能源系统重要组成部分所面临的挑战	23
战略规划释放数据中心潜力	24
人工智能可助力全社会节能	24
从能耗大户到热源提供者	27
利用灵活协同增强电网韧性	31
第四章：数据中心未来展望	36
参考文献	38

前言

数据中心何以成为能源系统的宝贵资产

数字化浪潮奔涌向前，人工智能的加速普及正深刻重塑社会运行的方方面面。而这场变革的核心载体，正是数据中心——它所构筑的数字基础设施，已成为支撑现代社会运转的骨干力量。

全球对数据中心容量的需求正以前所未有的速度攀升，其增长速度在多个地区已超越传统基础设施的建设步伐。在此背景下，将数据中心纳入能源系统进行前瞻性规划与深度融合，不仅越发紧迫，还孕育着构建更智能、更具韧性的新型能源体系的关键机遇。

数据中心不仅是未来技术演进的基石，更是实现经济深度脱碳不可或缺的支点。通过赋能交通、重工业等几乎所有高耗能领域，数据中心正显著提升全社会的能源效率。国际能源署（IEA）预测，到2035年，由人工智能驱动的能效提升手段有望减少相当于全球能源相关碳排放总量5%的排放量¹。随着数据中心日益嵌入日常生活并深度参与未来发展进程，其可持续部署已不再仅关乎IT行业自身，而将成为塑造下一代能源系统的核心驱动力。

我们深知，数据中心在支撑社会高度依赖的数字化运行过程中，消耗着大量能源与水资源。据预测，到2030

“若实施得当，数据中心不仅可降低对新增电网的投资需求，还能增强能源系统的韧性，并帮助终端用户抵御电价飙升的风险。”

年，其电力消耗将占全球总用电量的约3%²。从区域层面看，这种集中式负荷可能对局部电网造成显著冲击，甚至影响电网稳定性。值得注意的是，全球新增数据中心电力需求中，约80%将来自中国和美国。

同时，数据中心目前的年耗水量约为5,600亿升，到2030年可能增至1.2万亿升³。若缺乏系统性规划，无法确保其部署的可持续性，数据中心将持续加剧能源与水资源系统的压力，进而影响整个社会的承载能力。

然而，仅将其视为“资源消耗者”的视角显然有失偏颇。事实上，数据中心也是全球能源系统优化中最具潜力的未开发资产之一——它并非发展的掣肘，而是可被激活的战略资源。通过灵活运营、跨产业协同、余热回收利用及全面提升资源效率，这些高耗能设施完全有能力转化为支撑能源转型的重要资产。管理得当的数据中心，不仅能降低自身环境足迹，更能助力构建强韧、高效、响应敏捷的新型能源系统。

因此，亟须采取有针对性的干预措施，释放其潜能并应对建设加速带来的挑战。一方面，通过优化设施设计与提升运营效率，可显著降低资源需求预期，使数字化发

展进程与能源系统承载力保持动态平衡；另一方面，深化跨行业协作，将加速创新技术的研发与规模化应用，推动能效迈上新台阶。

政策制定者可采取系统性规划策略，推动数据中心从单纯的资源消耗者，转变为具备能源供应潜力的关键参与者，从而释放其在能源系统中的深层价值。若能将数据中心有效融入本地能源生态——协同可再生能源发电、响应电网灵活性调节需求——它们便有望从电网的负荷压力源，转型为稳定可靠的系统资产。

我们应以清晰而坚定的共识，共同擘画未来。数字化浪潮正深刻重塑经济与社会的各个领域，这一不可逆转的趋势，正为创新突破与效率提升带来前所未有的机遇。当下，我们既需保持紧迫感，更需秉持远见卓识。我们必须将资源效率作为数据中心运营的坚实基础，通过前瞻性规划，推动数据中心在未来成为能源系统中灵活高效、坚固可靠的重要合作伙伴。

方行健 (Kim Fausing)
丹佛斯集团总裁兼首席执行官

数据中心为强化全球能源系统带来了重大机遇，但这一潜力尚未被充分挖掘。

内容概要

1 人工智能可提升电网可靠性并增强能源系统韧性

尽管人工智能本身能耗较高，但它作为提升能源系统韧性与效率的有力工具，具有不可忽视的价值。根据国际能源署的研究，通过优化交通、建筑和重工业等领域的能效管理，人工智能有望在2035年实现相当于全球能源相关排放量5%的减排目标⁴。

2 能效提升是降低数据中心资源消耗最快捷经济的方式

数据中心的能耗主要集中在服务器和冷却系统上，因此这两者成为节能的关键领域。采用传感器、人工智能辅助控制系统及变频器等手段，可以将冷却系统的能耗降低10%—20%，且投资回收期较短⁵。高效液冷技术的应用可进一步降低冷却相关的能耗达15%以上，并大幅降低用水量⁷。

3 数据中心经本地化整合可释放巨大潜力并节约成本

数据中心消耗的电力最终会转化为热量，但大部分热量在当前条件下无法实现再利用，而被直接废弃。通过合理选址与规划，可以收集这些热量并将其用于周边住宅、商业及工业的供暖。国际能源署预测，到2030年，从数据中心回收的余热可满足欧洲高达10%的室内供暖需求⁸。

4 数据中心有望成为调节电网平衡的重要资产

数据中心能将非紧急计算任务从电网负荷最重的高峰时段移出，以释放整个电网的容量。数据中心甚至可以通过灵活运营削减高达5%的用电成本，并减少40%的碳排放量⁹。倘若数据中心仅在1%的时段内实现灵活运营，当前巨大的并网接入压力也将得到大幅缓解。到2035年，预计所有新建数据中心均可接入电网且不会导致其过载¹⁰。

第一章

破解能源困局

世界正在快速拥抱新兴数字技术与人工智能，二者已成为人们日常生活的一部分。无论是工业界对新产品进行的虚拟测试，还是跨越阿姆斯特丹与上海的实时视频通话，抑或我们正在目睹严重疾病治疗领域不断取得的突破性进展，无不彰显智能计算正在改变人类的生活，人们对其需求的持续增长已是不争的事实。现在，我们面临的重要挑战是如何在支持这种增长的同时，有效管理数据中心对关键资源的需求压力。政府及相关决策者肩负双重责任——既要保障数字基础设施的可持续建设与发展，也要前瞻性地引导其资源使用效率。防止产生能源困局的根本，在于提升能效并将数据中心融入我们的能源系统。

数据中心可持续部署所面临的挑战

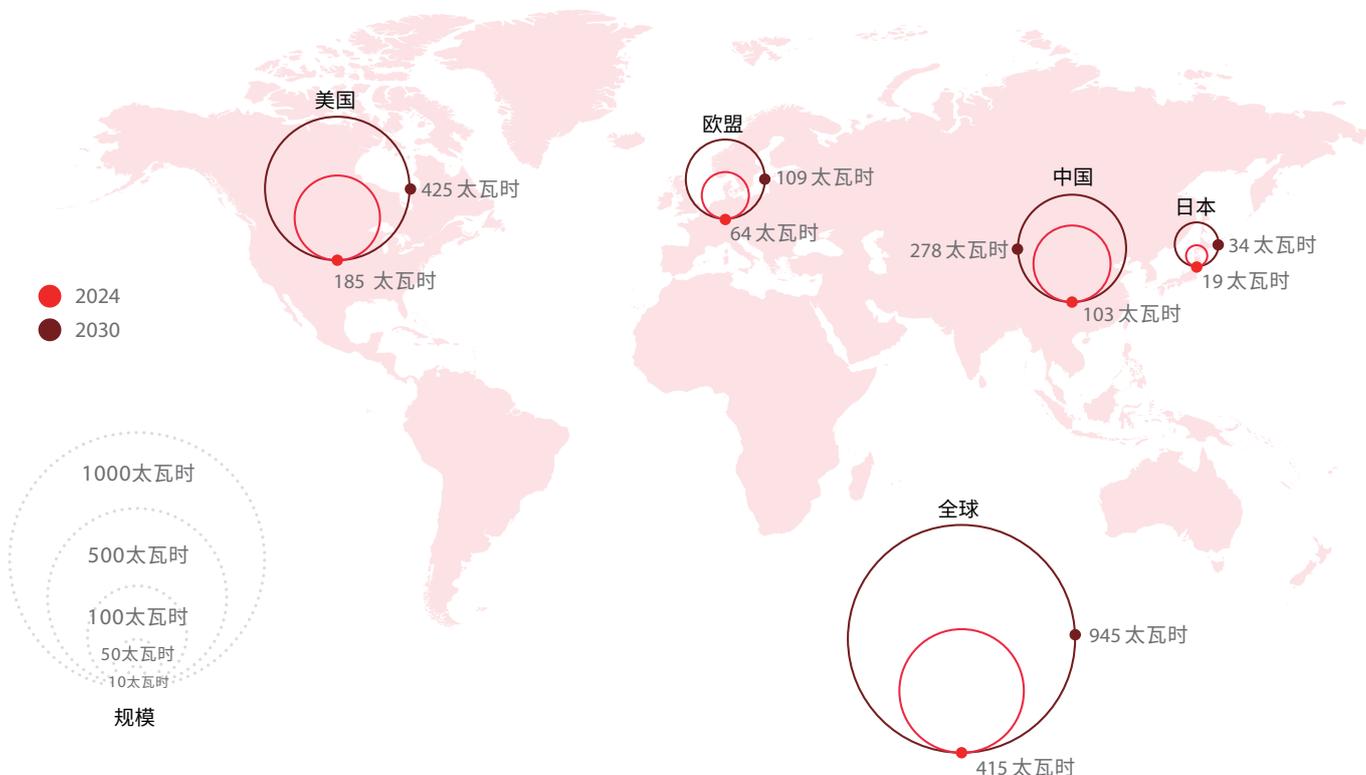
新建数据中心是技术进步的必然产物，而相关技术正持续改善人类生活。从准确的天气预报、自然灾害预测，到推动各行各业的研究与创新，均离不开这些技术的支撑。然而，这一增长也给能源系统带来日益显著的压力，并引发多重结构性挑战。

- **数据中心电力需求的迅猛增长已超出当地电网的供应能力。**
这种设施的耗电增速已超过多个地区的电力供应能力。美国和欧盟已面临显著供电压力，而中国则通过持续增加的发电量在目前总量上暂时缓解了供需矛盾。
- **数据中心对本地资源产生影响。**如果管理不当，数据中心可能带来以下风险：推高居民及工商业用户的电价，当地水资源供应承压，以及在依赖化石能源供电的情境下，增加碳排放，削弱当地脱碳进程。
- **电网接入排队严重，制约数据中心项目落地。**并网排队时间不断延长，在某些地区，排队周期甚至长达十年。这一状况部分源于发电资源不足、本地资源环境制约、审批流程复杂，以及电网扩容成本分摊机制等尚不明确。

克服上述障碍的关键行动：

- **高效的数据中心是减缓电力需求增长的关键杠杆。**虽然这并非万全之策，但多年来，节能技术的应用基本与数据中心规模的扩张保持同步。然而，面对当前数据中心建设速度不断加快的现状，全面提升数据中心内部运营能效已刻不容缓。这关乎在避免能源浪费的同时满足日益增长的电力需求。浪费电力和水资源，不仅会阻碍其他行业的电气化进程，还将对环境造成负面影响，加剧我们对能源进口的依赖，进而削弱产业竞争力。具体案例详见第二章。
- **系统性规划可重塑数据中心的角色定位。**通过前瞻性的整体规划，数据中心不仅能作为能源消费者，更有潜力成为本地能源生态中的价值贡献者。能效的真正内涵，不仅在于“用得更少”，更在于“在合适的时间用对能源”。通过充分发掘“需求响应”潜力，并将数据中心战略性地与其他行业实现协同融合，我们不仅可以回收利用余热，还可以将数据中心对电网的巨大负荷转化为一种电网平衡机制。具体案例详见第三章。

图1
数据中心需求增长（按年用电量估算）¹¹



数据中心时代

随着人类经济活动与日常生活对云服务、人工智能和实时信息的依赖日益加深，数据中心于我们而言已不可或缺。它们既是技术进步的产物，也是现代社会之所以称之为“现代”的先决条件。

在相当长的一段时间里，我们能通过提高能效来限制数据中心对整个能源系统的影响。随着数据中心对经济和生活的影响日益加深，其资源与环境足迹已越来越难以忽视。数据中心在全球终端能源消费中的占比将从目前的1.5%上升至近3%。据国际能源署预测，全球数据中心的电力需求将于2030年翻倍¹²，其他研究显示的增幅甚至更高¹³。这种需求激增的情况预计将集中在美国、中国和欧盟（图1）¹⁴。为此，本报告旨在提出一系列可规模化实施的解决方案，以提升中国、美国和欧盟

等高速增长地区的数据中心的可持续性。然而，数据中心的持续建设是全球性的，因此本报告的内容对中东、非洲和加拿大等同样正面临数据中心建设热潮的其他地区也同样具有参考价值^{15,16}。数据中心的快速建设给电网带来了巨大压力，已使得部分城市甚至整个国家放缓或暂停新的数据中心建设许可^{17,18,19}。

目前尚无任何迹象表明数据中心的发展将放缓。作为世界日益数字化的核心基础设施，数据中心已转变为不可或缺的战略支柱。随着其功能不断拓展、规模持续扩大，社会各界对其影响的关注也日益深入。

打造卓越的数据中心：效率与机遇的交汇点

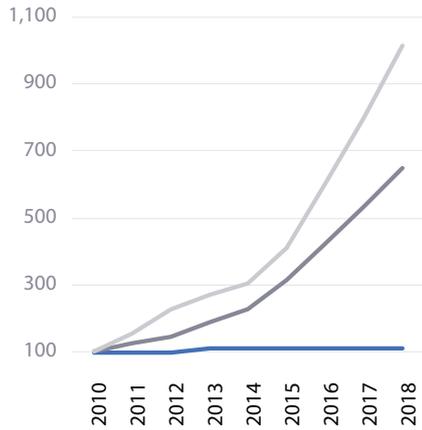
2018年以前，数据中心的快速建设可能还未对电网产生重

图2

自2010年以来全球数据中心规模与能耗趋势

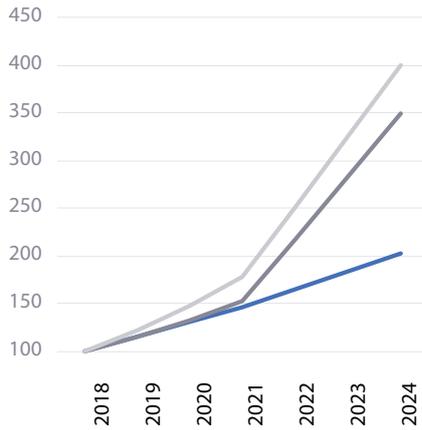
2010年 - 2018年

得益于能效提升，全球数据中心在算力负载增长6倍、IP流量增长10倍的情况下，电力消耗几乎未增加



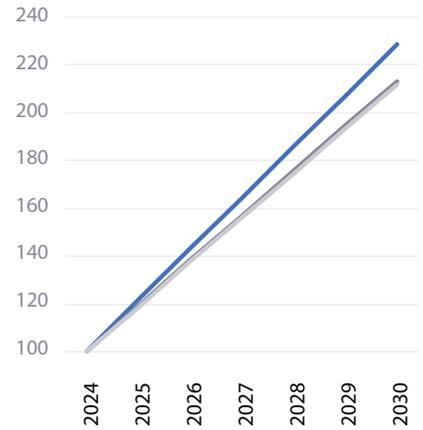
2018年 - 2024年

能效提升速度与数据中心容量扩建速度不匹配，导致电力消耗翻倍



2024年 - 2030年

随着数据中心的持续扩建，到2030年，数据中心电耗将在2024年的基础上翻倍



指数100

- 功耗
- 计算工作负荷
- 流量²⁰

大影响。2010年至2018年间，全球数据中心算力和互联网协议 (IP) 流量增长了数倍，而能耗仅小幅增长 (图2)。其中，对数据中心的大规模能效提升措施起到了关键作用。然而，从2018年到2024年，日益数字化的经济和人工智能持续普及等因素导致计算工作负荷和IP流量激增，致使能效提升未能跟上需求增长的速度。

为跟上数据中心不断增长的电力需求，我们需要抓住更多易实现的机会，建设新的高效数据中心，并将其全面融入能源系统。考虑到数据中心的的增长至少将持续至2030年，我们有明确理由采取双管齐下的方法来管控其能源需求：

1. 首先，数据中心必须采用前沿技术，提升能源利用效率与生产力，以实现更高效的运营。
2. 除了数据中心的运营效率，还需统筹考虑如何充分利用人工智能、余热以及能源系统的灵活性。

通过确保数据中心尽可能高效运行，并将其融入更广泛的能源系统，数据中心将转化为一种机遇。若规划得当，这些措施不仅有助于逐步淘汰化石燃料，还能减少电网投资，并保护消费者免受电价飙升的影响。

第二章

通过效率提升实现 可持续增长

数据中心目前消耗全球约1.5%的电力，受人工智能和云计算迅猛发展的影响，预计到2030年，其电力和水资源使用量将接近翻倍²¹。这一快速增长带来极高风险：若缺乏有效管控，不仅可能给电网造成巨大压力，还将进一步加剧水资源短缺。因此，建设高能效的数据中心不仅涉及成本问题，更是获得项目审批、顺利接入电网并保障能源系统长期韧性的基本前提。同时，提高数据中心资源利用效率还能带来多重协同效益，包括提高周边社区的供电可靠性、降低噪声等。在此背景下，深入理解能源和水资源在数据中心内部的使用环节及方式变得至关重要。值得庆幸的是，相关解决方案已然存在。

优化数据中心能效的挑战

近年来，尽管数据中心效率有所提升，且可改善能源和水资源利用效率的技术解决方案越来越多，但资源透明度或最低性能标准的执行程度仍处于很低的水平。因此，在很多地区，效率仅被视为自发性目标而非硬性规定，这限制了能源和水资源的效能提升进程。冷却系统在高效数据中心中扮演着重要角色，而当前的审批与报告框架却很少将当地水资源压力或当下冷却系统设计的效率纳入考量。

- **缺乏标准化的效率报告。**大部分地区依靠自主报告而非强制披露电能使用效率（PUE）、水资源使用效率（WUE）或能源再利用系数（ERF）等指标，这阻碍了行业间的横向对比以及持续改进。此外，当前的报告也因不同的解释和方法而存在差异。
- **缺乏统一的可持续性评级体系。**目前尚未建立国际公认的框架，这不仅妨碍了基准化分析，也不利于投资于有优良能效表现的领先解决方案。
- **节水导向型政策滞后于创新发展。**水资源友好型政策未获得应有的重视。现行监管框架未考虑用水量与冷却技术之间的重要关联。因为尚未建立对闭环系统和直接芯片液冷系统的认可或奖励标准，所以运营商缺乏明确的动机来采用这些系统。

克服这些障碍的关键行动

- **推行强制性报告制度。**要求新建及现有数据中心（无论规模大小或类型）至少提交关于电源使用效率、水资源使用效率和能源再利用系数的真实数据的披露报告，并基于这些数据制定具有约束力的最低效能门槛。应采用ISO等国际通行标准，确保跨区域数据的可比性。
- **建立可持续评级体系。**为数据中心建立标准化的可持续认证体系，从而制定效能基准，并指导采购、融资和许可相关条款。
- **推广水资源友好型冷却方式。**优先考虑采用闭环冷却和直接液冷技术，尤其对于资源压力较高的区域而言，并用水资源使用情况纳入环境影响评估，以防止当地水资源枯竭。

关键术语： 数据中心效率

政策制定者在评估数据中心效能时需要了解以下几个重要指标：

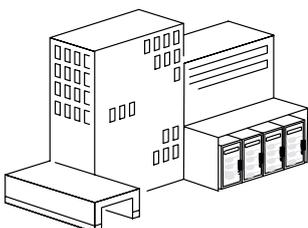
- **电能使用效率 (PUE)** 是衡量数据中心能源使用效率的关键指标，即数据中心IT设备、制冷、供电等辅助设施的总能耗与提供给IT计算设备的能耗之比。数据中心的电能使用效率 (PUE) 数值越低，数据中心整体的能效越高。
- **能源再利用系数 (ERF)** 是指被再利用的能源（如回收的余热）与数据中心总能耗的比率。数据中心的能源再利用率越高，表明该数据中心的能源使用中有更大比例得到了有益的再利用。
- **水资源使用效率 (WUE)** 是指数据中心用水量与IT设备能耗之间的比率。数据中心的水资源使用效率比值越低，其水资源利用率越高。
- **能源再利用效率 (ERE)** 是指用于衡量数据中心对其所产生的热量进行再利用的程度。与量化能源再利用量的能源再利用系数这一指标不同，能源再利用效率反映的是能源再利用如何提升数据

中心的综合能效水平。ERE 值越低，表明能源再利用对整体能效的积极影响越大。

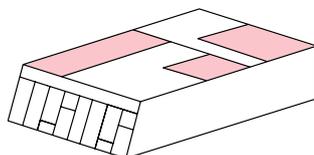
- **碳使用效率 (CUE)** 是由绿色网格联盟 (The Green Grid) 制定的指标，用于从碳排放角度衡量数据中心的可持续性。碳使用效率是数据中心总能耗所产生的二氧化碳排放总量与IT设备能耗的比率。数据中心的碳使用效率数值越低，表明其每单位IT能耗所对应的碳排放量越少。
- **可再生能源因子 (REF)** 表示数据中心所消耗的可再生能源总量占其总能源消耗的比例。与碳使用效率类似，该指标有助于衡量数据中心输入能源的碳排放强度。REF 值越高，表明其能源中来自可再生能源的比例越高。

以上任何指标均可在数据中心的性能评估中通过建模或实时性能评估方式进行评估，协助确定数据中心的财务成本与环境、社会和治理 (ESG) 的影响以及影响的改善程度。

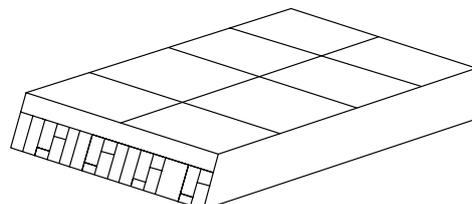
图 3
数据中心的类型²²



企业自建数据中心
由单一企业拥有并运营，主要用于满足自身业务需求

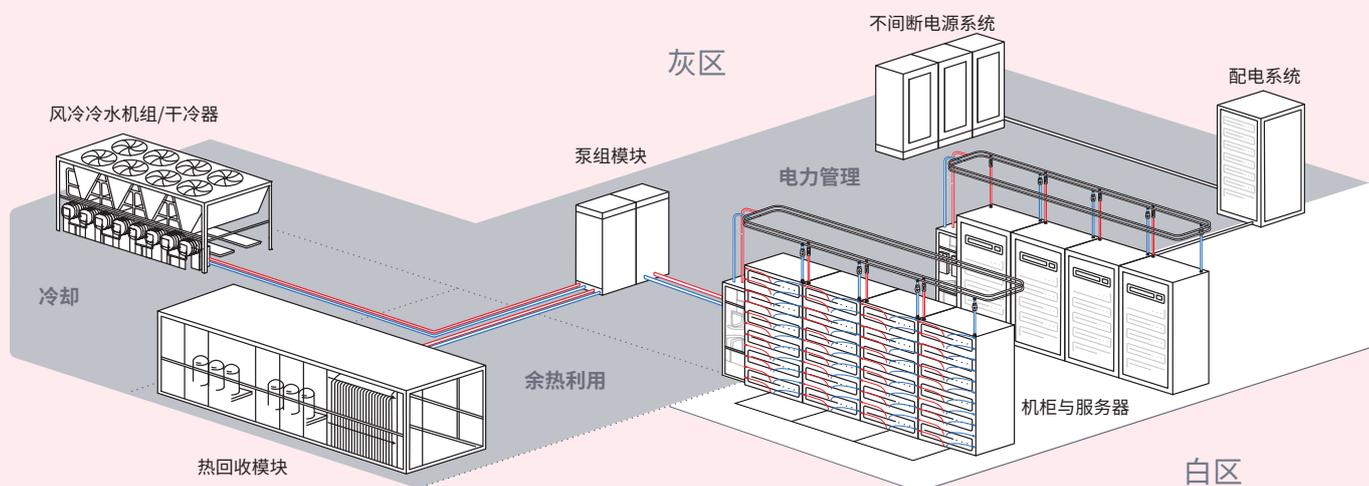


托管型数据中心
由第三方公司建设并运营，租赁给其他企业使用



超大规模数据中心
通常由全球云服务提供商拥有和运营

图 4
数据中心内的灰区与白区



术语解析

数据中心的白区和灰区

数据中心通常分为两大关键区域：白区和灰区。白区是数据中心的核心区域，即实际进行计算的区域。该区域部署着执行数据处理和通信任务的服务器与存储系统，这些IT设备构成了数据中心的核心功能主体。这些组件运行时会大量发热，正如笔记本电脑长时间使用后机身发烫一样，这是计算活动不可避免的副产品。

围绕并支撑着白区的叫作灰区，集中了为IT设备供电和散热的基础设施。典型组件包括不间断电源（UPS）、冷却机组、风机、水泵、压缩机、变压器和备用发电机。

部分冷却系统横跨白区与灰区：一方面，集中式冷却设施通常属于灰区；另一方面，也有冷却单元部署在服务器附近或机柜内部，实现高效的就地散热。

白区高度依赖灰区提供的稳定电力与有效冷却，否则IT设备将因过热导致运行不可靠或发生故障。冷却系统对数据中心至关重要，即使短时间的温控失效也会导致性能下降或硬件故障，造成重大经济损失。

“包括先进冷却技术、系统升级改造以及人工智能驱动运营优化在内的能效解决方案，能够显著降低数据中心的能耗，然而受制于监管政策、资金投入和技术门槛等多重障碍，目前尚未得到广泛应用。”

联合国环境规划署哥本哈根气候中心²³

覆盖整个数据中心的数字化解决方案

数字化解决方案正在成为实现数据中心高效运营的关键。随着人工智能应用的加速和对数据中心需求的扩大，各国政府均面临着双重挑战：既要确保当地社区获得稳定可靠且价格合理的电力供应，又要支持数据中心的发展。如果不采用高效数字化手段优化运营模式，数据中心的持续建设可能会加剧当地压力，如用电成本上升、电网不稳定和噪声污染等问题。为实现更高的运营效率，需广泛应用传感器和由数据驱动的透明化管理等数字化解决方案。

运营商可以通过传感器获取和分析整个数据中心的关键数据。传感器提供实时的温度、气流和压差等信息，这些数据过去只能通过估算获得。这一转变使得运营管理更加精准，真正迈向数据驱动运营模式。

若缺乏此类洞察，运维人员只能基于不完整的信息进行优化，这会增加运营效率低下及不稳定的风险，例如因服务器过度制冷或散热不足导致的能耗增加，冷却系统和IT设备承压，并增加停电和停机的风险²⁴。

英国Three UK公司的数据中心处理着英国约28%的移动数据流量，高数据处理需求带来了大量的冷却需求和用电成本。**在部署传感器和实时优化工具后，Three UK公司在10周内将其4个站点的冷却能耗降低了12.5%²⁵。**

由于冷却系统通常占数据中心能耗的30%—40%，此类优化可显著降低运营成本²⁶。

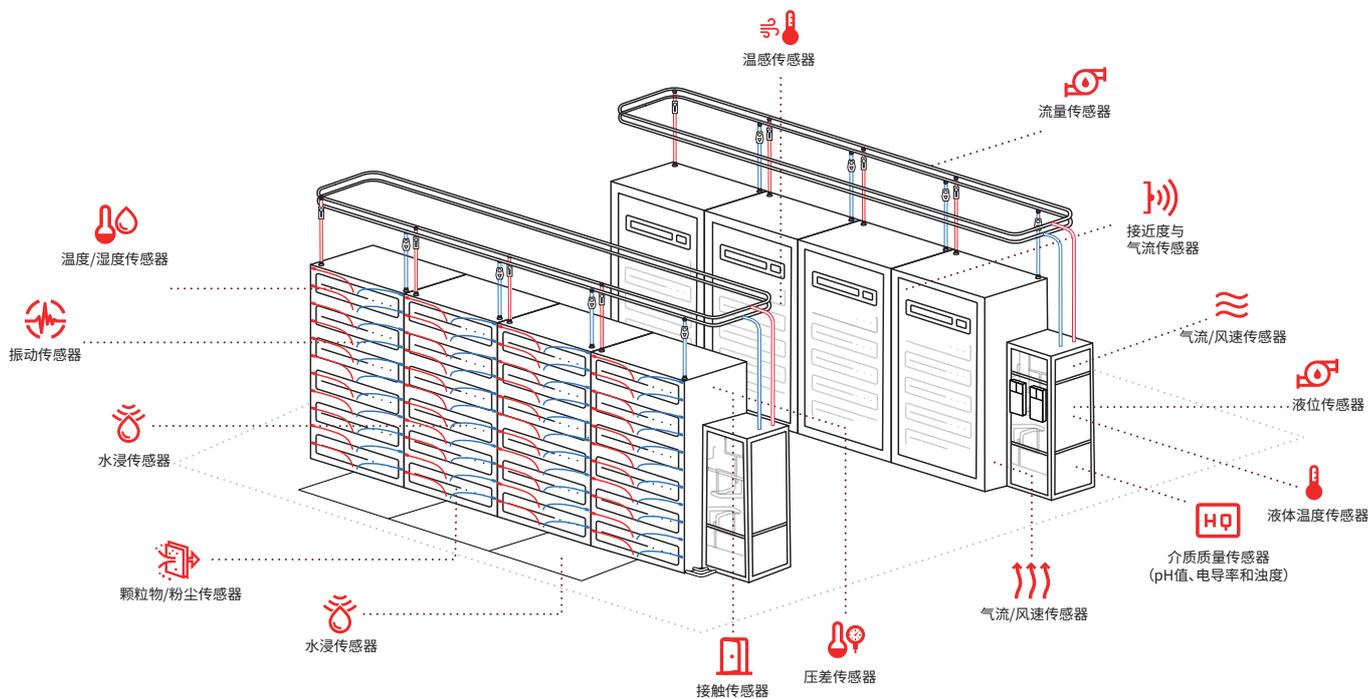
对Three UK公司而言，降低冷却系统所需能耗相当于每年节省了约233,000英镑的运营成本，且随着电价的进一步上涨，这一数字还将增加²⁷。换句话说，相较于未投资于此类数字化升级技术的企业，Three UK公司获得了显著的成本优势。

其他运营商也在利用人工智能工具优化其冷却系统和气流。例如，自2021年以来，美国Meta公司通过基于人工智能的气流优化方案，将散热风机的能耗降低了约20%，同时减少了4%的用水量²⁸。早在2016年，谷歌就曾将DeepMind的机器学习技术应用于数据中心的暖通空调系统，这一举措堪称经典：制冷能耗最高降低了40%，同时电能使用效率提升了15%²⁹。

除了直接的节能效果，数字化解决方案还通过预测性维护提高了运营可靠性。传感器和数据驱动的控制技术使运营商能够及早发现设备问题，减少不必要的设备使用，从而延长组件寿命。预测性维护不仅减少了停机时间，还减少了资源浪费。例如，它可以在需要的时间和位置提供更精确和高效的冷却服务³⁰。

随着数据中心对监控、自动化和数字控件的依赖日益增加，网络安全变得越发关键。保护数据流和控制系统有助于确保数据中心内数字工具连续、安全地运行，为更先进的人工智能驱动的优化措施奠定安全基础。

图 5
数据中心中的传感器



案例

通过传感器提升既有数据中心的效率

位于圣路易斯、由美国联邦政府运营并服务于美国农业部的一座数据中心，展示了部署无线传感器网络以优化其冷却需求的潜力。团队并未更换设备或重新设计冷却系统，而是通过在整个数据中心各处布设传感器以获取实时温度、湿度和压力数据，从而提升运行数据的可见度。除了传感器，运营商还安装了一个集成式软件平台帮助分析数据。

通过上述措施，该数据中心有效将其冷却负荷削减了48%，并将设施总能耗降低17%。尽管该数据中心本身位于电价极低的地区，但这些改造每年仍节

省了约657兆瓦时的电力，将数据中心的电能使用效率从1.83优化至1.51，并将年度运营成本降低近3万美元。整个项目的投资回报期为3.4年，预计每年可减少542吨二氧化碳排放³¹。

该项目证明了运营数据可见性对提升既有数据中心冷却性能的重要性。对于那些面临能源需求增长的数据中心而言，此类数字化升级手段提供了一种切实可行且成本效益显著的路径，即无需大规模基础设施改造即可显著节能。

技术潜力：数字孪生

人工智能能够助推规模化应用的另一项强力解决方案，便是数字孪生——即机器、工艺流程乃至整座工厂的虚拟复刻体。通过在动态的数字环境中实时映射现实世界的运行状态，数字孪生使得我们能够在故障实际发生之前，提前进行场景模拟、性能优化及故障预测。

在暖通空调与制冷等高能耗领域，其成效已清晰可见。全流程赋能的数字孪生数据中心项目数据显示：得益于故障率的显著降低，此类项目实现了高

达20%的节能效果，开发成本降低25%，并将非计划停机时间减少30%—50%。这不仅最大限度地减少了运营中断，还有效降低了维护支出，延长了设备使用寿命³²。

借助持续的人工智能驱动监测，数字孪生能够实时优化能源流向、识别异常状况、提供早期预警并生成可落地的决策洞察。其最终成果，是构建一个更智能、更具韧性且更可持续的运营体系——一个能够每日自我学习、自适应并不断进化的系统。

用于高效数据中心的先进冷却系统

要充分发挥数据中心在推动清洁技术革命方面的潜力，必须大幅提升算力。随着芯片性能持续增强，其在相同物理空间内产生的热量也大幅提升。如今，这种不断攀升的热密度已超出了传统冷却系统所能应对的范围。

为满足增长的算力需求，越来越多的运营商转而采用直接芯片液冷系统，这种闭环系统将冷却液直接输送至处理器。相较传统的冷却方式，闭环直接芯片液冷技术的散热效率更高，耗水量大幅减少，且通常可实现至少15%的节能效果³³。在电网容量和水资源受限的地区，这类能效提升手段的重要性日益凸显，其有助于数据中心在需求增长的情况下减少本地资源消耗，实现更可靠的运营（参见图6：直接芯片液冷系统结构示意图）。

液冷系统还为数据中心的周边社区带来显著的环境效益：其运行噪声显著低于传统风冷系统，有效降低对社区的声环境干扰。此外，该系统更易于实现余热的回收再利用——这一优势的潜力目前远未被充分挖掘³⁴。关于数据中心余热如何再利用的更多信息，请参阅第三章：从能耗大户到热源提供者（第27页）。

除冷却处理器外，液冷系统还能提升数据中心电力电子设备性能。电力电子设备是数据中心内部的电力管理与

输送系统的核心组件，如不间断电源系统等。目前，这些系统多依赖风冷散热，这限制了其功率密度。通过采用比风冷更高效的散热方式，液冷系统可使电力电子设备在更小的物理空间内实现更高的功率密度，从而减少占地面积并节省材料。此外，液冷系统可以有效避免潮湿且有污染的空气侵入，确保电子设备的安全运行。由于液冷无需冷却风扇，因此显著降低了环境噪声。

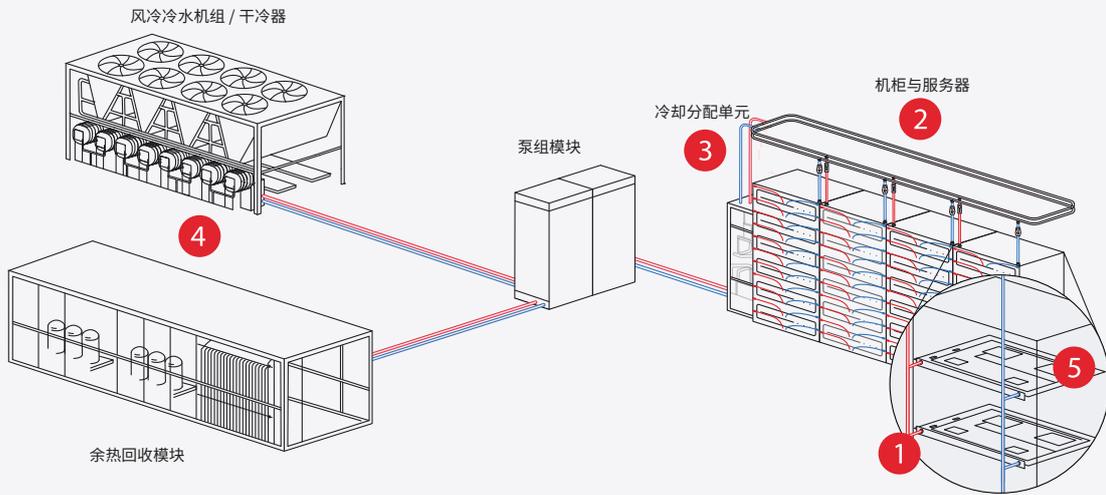
虽然存在其他液冷形式，如“单相”和“双相”浸没式液冷，但其仍处于研发阶段且罕有大规模商业应用。这些技术需要将服务器机柜完全浸入绝缘冷却液中，以维持工作温度。尽管这些方法也具有节能节水的潜力，但其存在一些缺点，如冷却液的高黏度增加了泵送难度，以及使用的冷却液受到严格监管等。

在实际操作中，许多数据中心运营商根据具体的工作负载要求与设施运营环境，灵活结合先进的风冷技术与不同形式的液冷技术，以达到最佳效果。

虽然能效在通常情况下是讨论的重点，但数据中心大量依赖水冷系统，因此水资源消耗同样是一个不可忽视的问题。全球数据中心年耗水量已达约5,600亿升，预计到2030年将增至12,000亿升³⁵，这一数字相当于欧盟2022年淡水总抽取量的6倍³⁶。因此，转向采用闭环直接芯片液冷等节水型冷却技术，不仅有助于降低能源需求，还能显著减少耗水量。

图 6

直接芯片液冷系统结构示意图



直接芯片液冷系统的工作原理

在直接芯片液冷系统中，冷却液双向持续循环，将芯片产生的热量带走，并将冷却后的液体返回芯片。以下步骤描述了冷却液在芯片处吸收热量时开始的整个冷却过程。

1 通过冷板在芯片处吸收热量

冷板直接贴合在芯片的顶盖上。冷却液流经冷板内的微通道，直接在芯片位置吸收热量。

2 冷却液流经机柜内的软管、阀门、接头及集流管

此时已升温的冷却液随后流经由软管、阀门和接头组成的管路网络。这些小型组件遍布白区和灰区，且单台机柜内就有数百个此类组件，因此其效率至关重要。例如，使用更高效的接头可减少不必要的流动阻力，这意味着泵送等量冷却液所需的电力更少。相较于标准解决方案，目前市场上的接头设计可使每台服务器机柜节省 246 千瓦时的电力，主要是因为系统内的流动阻力更小（更多详情参见案例——技术潜力：液冷系统的边际节能效益）³⁷。

3 冷却液分配单元管理冷却回路

来自机柜的所有冷却液均流入冷却液分配单元，该装置将服务器冷却回路（二次回路）与机房供水系统（一次回路）隔离。二次回路在 IT 设备内部循环

冷却液，而一次回路则通过机房供水系统将热量带走。在冷却液分配单元内部，换热器将热量从二次回路传递至一次回路，同时保持温度稳定。

冷却液分配单元还通过控制整个冷却回路中的压力和流量来提高能效。通过确保冷却液以所需的流量水平循环，避免超量泵送，该单元有助于减少不必要的能耗。采用传感器监测温度、压力和流量，保障回路的稳定、高效运行。

4 热量由压缩机驱动冷却机组排出，或被回收再利用

冷却液携带的热量被传递至一次回路，在此热量或被重新利用，或被压缩机驱动的冷水机组排出并释放至室外。不同压缩机技术的选择会影响效率和运行效果。例如，无油压缩机可避免润滑油相关的能量损耗并减少机械磨损，从而有助于延长设备寿命和提升性能稳定性。与传统压缩机相比，它们通常产生的噪声更小，有助于降低局部噪声的影响。

5 冷却后的液体返回芯片

液体经冷却后，通过二次回路返回至芯片上的冷板。由于液体的传热效率远高于气体，这种闭环系统即使在极高机柜密度下仍能保持高效。

技术潜力：液冷系统的边际节能效益

随着数据中心规模扩大，深挖边际效益将产生重大影响。液冷方案存在多种选择，采用最先进的解决方案可实现大幅节能。相较于标准解决方案，选择最高效的解决方案可使每台服务器机柜节省246千瓦时的电力，这主要得益于系统内的流动阻力更小³⁸。一个1吉瓦时的超大规模数据中心可容纳多达8,700台服务器机柜。采用高效液冷解决方案每年可节省190万千瓦时的电力，相当于175个美国家庭的用电量。若按全球最大数据中心枢纽

之一的弗吉尼亚北部地区的电价计算，每年可节省约18.8万美元，且随着电价上涨，通过这一解决方案所节省的成本将持续增长³⁹。

随着数据中心规模持续扩大、耗电量不断攀升，选用高效方案所带来的收益也随之显著提升——这既能降低电费支出，也有益于当地电网。

案例

腾讯采用液冷技术赋能高密度数据中心

随着腾讯云与人工智能业务的快速拓展，其数据中心需承载算力更强、发热量更高的服务器。为此，腾讯引入了直接芯片液冷技术。在该配置方案中，服务器总散热量的75%由制冷液直接带走，从而大大减少了对服务器风扇和机房空调设备的需求。冷却水循环支持入口温度为37°C，因而能够利用室外低温环境实现自然冷却，无须启动机械制冷设备。因此，大大节省了机械和电气成本，也降低了数据中心的运营成本。

与此同时，腾讯同步推进数据中心建设向微模块化架构转型，以便在业务需求增长时快速批量部署。液冷系统也针对模块化部署进行了适配，确保数据中心规模在持续扩展的过程中，仍能维持高可靠性运行与精细化能效管控。

通过将液冷技术与模块化部署深度融合，腾讯不仅大幅降低了冷却环节的电力消耗，提升了整体能效水平，缓解了日益紧张的电力资源对行业发展的影响，还实现了高密度数据中心的快速部署与灵活扩容⁴⁰。

采用变频器实现优化控制

数据中心冷却系统中的压缩机、泵和风机等关键设备均由电机控制，这些设备在维持温度稳定方面发挥着核心作用。通过调整电机的转速以匹配实际需求（而非持续全功率运行），变频器通常可在维持设定温度的同时可将冷却系统能耗降低 15%—40%。除了降低能耗和提升电能使用效率，变频器还能够减少设备的机械应力，从而延长组件寿命，降低维护需求，提高系统整体可靠性。

除基本电机转速调节功能外，变频器正日益成为数据中

心数字化基础设施的关键组成部分。变频器可集成传感器及其他监控系统输入的数据，基于实时运行状态动态调整，并为预测性维护提供关键依据。通过支持预测性维护，变频器有助于及早识别潜在的冷却系统异常，从而保障数据中心的持续稳定运行。对数据中心而言，即便是短暂的停机，也可能引发服务中断、数据丢失，并带来严重的经济和运营后果。

案例

科罗拉多州采用变频器改造数据中心降低能耗

全美各地的数据中心正面临电价持续攀升、脱碳和能效提升压力不断加大的双重挑战。在科罗拉多州，Enabled Energy 公司通过对六座既有数据中心的冷却系统加装变频器，实现了一项简单而高效的改造，节能效果迅速显现。这一项目充分展现了既有数据中心在能效提升方面仍蕴藏着尚未被充分挖掘的潜力⁴¹。

该项目涉及的六座数据中心均采用风冷系统，具体为机房专用空调（CRAC）机组，且长期以恒定转速运行。这种运行方式在冷却需求较低的时段仍消耗大量不必要的电能，不仅造成能源浪费、推高运营成本，还加速了设备磨损。

在加装变频器后，这些风冷机组的风机转速可根据实时冷却需求灵活调节。虽然每个数据中心仅安装了 3 至 6 台变频器，但六座设施均实现了显著的能效提升和成本节约。通过变频器优化冷却系统的能耗，项目整体年节省电费超过 15.7 万美元，平均投资回收期仅为 1.41 年。此外，更精准的气流控制还进一步提升了系统可靠性，减少了碳排放，并延长了现有设备的使用寿命。

这一案例表明，许多既有数据中心无需等待颠覆性的冷却技术或投入巨额资本，即可显著降低能源消耗——关键在于充分应用成熟、高效的现有技术⁴²。

第三章

作为能源资产的数据中心

要将数据中心从单纯的高能耗设施转变为环境与经济的新增长引擎，必须将其视为能源系统的重要组成部分。如果布局在区位条件优越、能与发电侧和用户侧高效衔接的地点，数据中心便可成为提升电力系统灵活性的关键资源，同时成为通过余热回收实现低排放供热的重要资产，不仅可降低自身用能成本、提升产业竞争力，还能强化能源安全。

数据中心作为能源系统重要组成部分所面临的挑战

现行政策与规划框架将数据中心视为孤立的电力用户，而非能源系统中的积极参与者。余热再利用与能源系统整合的技术潜力已得到充分验证，但仍未被系统性开发。这种脱节现象限制了数据中心在脱碳、资源回收和电网稳定性方面所能发挥的作用。

- **余热仍未得到充分利用。** 许可审批和规划往往聚焦于电网接入而非与供热管网或工业用户的地理邻近性，导致大部分余热未能得到利用。
- **灵活性潜力未得到充分利用。** 监管规则和市场规则极少允许数据中心参与需求响应或灵活性市场，限制了其在支持电网稳定和可再生能源并网方面的作用。
- **规划缺乏系统性。** 地方和区域主管部门通常缺乏相应法定职责或协调机制，无法将数据中心纳入能源和基础设施统一规划之中，进而错失协同增效的机遇。
- **社区接受度构成潜在障碍。** 若未妥善管理，将大型电力用户接入电网可能推高电费并给当地电网带来压力。同样，冷却对水的需求也可能对当地造成影响。

应对上述挑战的关键举措

- **推动余热回收与再利用。** 应将余热回收潜力评估纳入新建数据中心的许可审批流程，并优先支持选址靠近区域供热管网或具备稳定用热需求的工业用户项目。条件允许的情况下，数据中心应做到“即装即用”式余热利用——通过预埋标准化管道、电缆，预留安装热泵的专用空间。通过热回收装置和热泵获得的效益应纳入数据中心性能指标，并作为正面评价的依据。
- **实现灵活性与系统集成。** 完善电力市场规则和电价机制，对数据中心参与需求响应和提供电网辅助服务给予合理激励。鼓励建设本地微电网，将数据中心与可再生能源发电、区域供热网络及储能设施有机融合，实现多能协同与资源高效利用。

战略规划释放数据中心潜力

数据中心的加速部署既是挑战，也是使其成为能源系统资产的机遇。如何将数据中心统筹纳入更广泛的能源系统规划之中，将对电网、环境和经济产生巨大影响。相关解决方案已然存在，倘若不转变思路，数据中心或将成为重大社会负担。

我们曾在《影响力系列白皮书（第四册）——能源效率2.0：打造未来能源系统》中探讨过如何打造未来能源系统。

华盛顿特区外围坐落着全球最大的数据中心集群之一，其耗电量堪比整个波士顿的耗电量。这个被称作“数据中心走廊”的区域拥有200多个数据中心。某日，其中60个数据中心曾毫无预警地脱离电网并切换至备用电源。此次断电由行业内普遍采用的一项标准安全机制引发，却导致用电负荷骤降，引发区域性电网危机。所幸电网运营商在最后一刻紧急干预，才避免了大规模连锁停电事故⁴³。类似事件完全可以通过将数据中心更科学、更紧密地融入能源系统加以规避。事实上，合理的系统集成非但不会增加风险，反而能显著增强电网的稳定性。

数据中心的用电需求增长也会导致电价飙升。在美国，预计到2030年，仅数据中心与加密货币挖矿业务扩张所带来的用电需求增长，就可能使全国电价上涨8%。除电费上涨外，还可能产生2.75亿吨的二氧化碳排放，相当于法国整个能源行业一整年的碳排放量⁴⁴。消费者已经开始为这波电力需求激增买单。在数据中心密集建设的地区，当前电价较五年前最高涨幅达267%⁴⁵。电费的增长正转嫁给所有主体，从家庭用户到工业企业，甚至数据中心运营商自身。

另一挑战是接入电网排队过长将延缓数据中心的部署和建设。约20%规划中的数据中心并网项目将推迟至2030年，原因仅是电网负载能力不足。目前新建数据中心的并网排队时间动辄1年以上：美国平均排队时间为1至3年，部分州甚至长达7年；荷兰的等待时间长达10年，日本关东地区的等待时间超过5年⁴⁶。由于电网负载能力不足，城市乃至整个国家都已收紧甚至暂停发放数据中心许可证^{47, 48, 49}。

因此，我们必须以全新视角审视数据中心的定位，这一点至关重要。将数据中心定位为能源系统的组成部分而非单纯能源消费者，可将其从挑战转化为机遇。数据中心所有者和政策制定者均需思考：如何利用发电侧与负荷侧之间的协同效应。

下一节将探讨数据中心如何为社会创造重大机遇。人工智能能够以前所未有的方式优化社会运行的方方面面。通过合理规划、利用余热可为整座城市供暖。此外，由于数据中心用电量巨大，可通过转移部分用电时段，助力实现电网平衡。

人工智能可助力全社会节能

仅人工智能就足以成为构建韧性能源系统的基石。到2035年，仅在工业领域，人工智能便可节省约2,200太瓦时能源，这一数字大致相当于欧盟整个工业部门的能源需求，超过同期全球数据中心的预计总用电量⁵⁰。例如，通过传感器采集高分辨率数据，并应用人工智能驱动的分析与控制技术，便能充分挖掘工业电机系统的能效潜力，同时大幅减少停机时间（参见案例：通过人工智能优化工业电机系统）。另一项可借助人工智能实现规模化推广的解决方案是数字孪生，即对工艺流程或整座工厂的虚拟复刻。它能加速最佳能效方案的落地与流程优化。

除工业节能外，人工智能可在重型卡车领域节省278太瓦时的电力，在公路货运领域节省833太瓦时的电力——后者相当于阿根廷全国总用电量。在建筑领域，通过人工智能驱动的智能控制，可推动暖通空调系统的高效运行与深度电气化，全球范围内有望实现约300太瓦时的节能⁵¹。

除节能外，人工智能还可通过精准预测电力负荷、用电需求和天气变化显著提升能源韧性。用于电网平衡的人工智能可通过早期故障检测将局部停电持续时间缩短30%~50%⁵²。这也是开发新型净零技术的关键。

“到2035年, 仅在工业领域, 人工智能便可节省约2,200太瓦时能源, 这一数字大致相当于欧盟整个工业部门的能源需求, 超过同期全球数据中心的预计总用电量。”

案例

通过人工智能优化工业电机系统

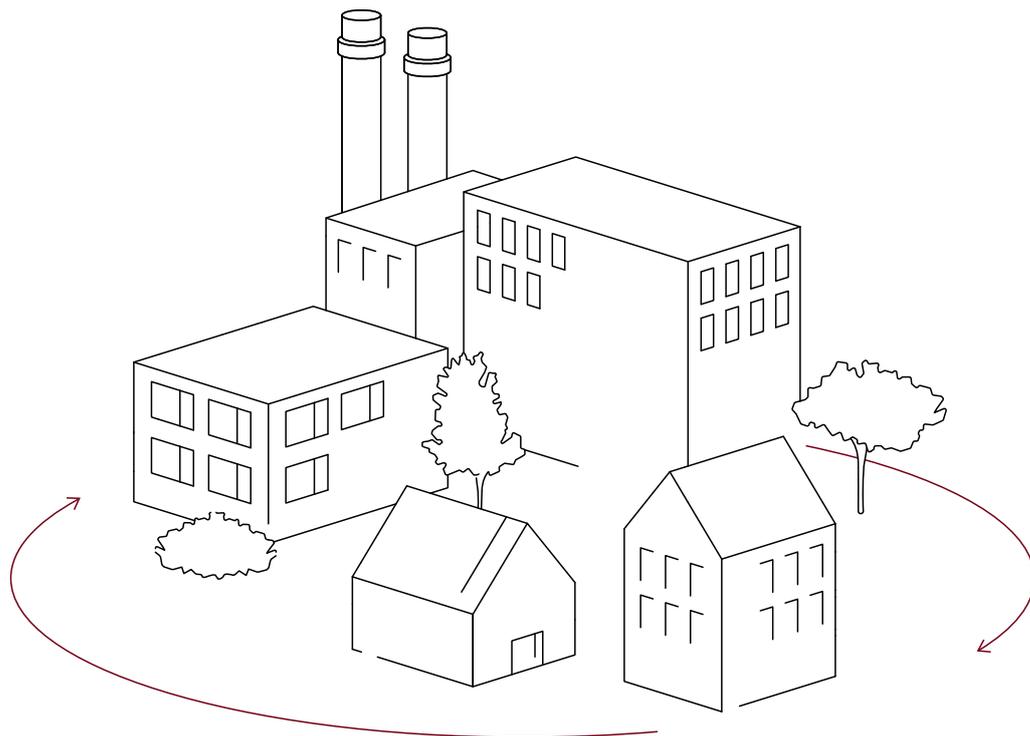
目前, 即使是未配备数字控制的老旧电机系统也可接入云端, 从而深入分析部件效率和整体系统效率。许多当下主流的变频器内置了微处理器, 这意味着它们可作为传感器枢纽收集和處理电机系统数据。简言之, 变频器通过采集振动、压力和温度信息并在人工智能云端进行处理, 可实现整个设施系统的数字化, 并助力企业深度洞察运营优化方案。

国际能源署下属电机能效研究组织 (EMSA) 发布了一份案例集, 展示了变频器等数字技术如何提升工业电机系统的能效⁵³。例如, 瑞士大型医疗设备制造商 Hamilton Bonaduz 在整个空压机系统中全面部署了变频器和传感器, 获得了关于系统进一步优化的深度洞察。通过这一举措, 该公司能够在保持相同产气量的同时, 成功将系统的耗电量降低16%。

除了变频器的数字化功能, EMSA 案例集还着重介绍

了软件和数字控制系统等其他数字工具, 这些工具可进一步实现电机系统的优化。例如, 瑞典宜家通过先进控制结合在线性能监测, 优化冷却机组压缩机和负荷调节, 实现节电20%。奥地利宝马公司建立了一套全面数据采集系统, 用于监测电力和压缩空气的能耗, 其中包括对各生产线用电量的可视化展示。在此基础上, 公司于2016年针对非生产时段设定了电力待机能耗目标, 成功将电力待机负荷降低52%; 2019年又对压缩空气系统设定类似目标, 实现待机能耗降低14%。

在EMSA收录的各类案例中, 数字解决方案被应用于泵系统、通风系统、空压机、冷却机组和生产线所配套的电机, 在所有应用场景中均实现了显著的节能效果。这些证据有力地证明了数字解决方案可进一步提升工业电机系统的能效。



案例

利用人工智能实现供暖自动化

通过数字技术，可对设备或机械的用能方式或时段进行智能调控，从而实现负荷转移及调峰过程的自动化。其核心在于应用一类名为“模型预测控制”的数字化工具。例如，在建筑领域，此类由**人工智能驱动的技术通过整合建筑物、天气及用户数据预测供暖与通风需求，最高可节省20%的能源成本。**借助此类控制技术，建筑物可在供暖高峰时段前进行预热，或在阳光即将照射建筑物立面时降低供暖强度，从而实现节能。对主要分布于芬兰、装配控制技术的10万套公寓所收集的数据显示，最大用电

需求的降幅达10%—30%⁵⁴。同时，系统通过将用电时段转移至最经济时段，在不影响住户舒适度的情况下，最高可降低建筑能耗成本20%⁵⁵。

虽然这些控制技术目前主要面向住宅建筑领域，但其在工业领域的应用也正在快速扩展。**丹佛斯试点初步估算结果显示，工厂供暖能耗有望降低5%。**随着控制技术在工业环境中效能的持续提升，预计节能效果将进一步提高。

“国际能源署估计，到2030年欧洲空间供暖需求中有10%可由邻近区域供热管网的数据中心余热回收利用满足，且成本远低于天然气。”

从能耗大户到热源提供者

数据中心消耗的大部分能源会转化为热量，而这些热量可以再利用。位于芬兰的微软数据中心便是展现这一潜力的绝佳案例，其已证明可实现75%的余热回收⁵⁶。预计到2030年，全球数据中心耗电量将翻倍⁵⁷，其余热利用潜力极为可观。目前这类热量大多直接排放至大气中，造成能源浪费；若能对这种免费能源加以利用，可提供经济实惠而又低排放的供热创造绝佳的机会。

数据中心全年不间断运行，可为用热方提供稳定热源，且热能可实现不同规模的利用。目前已有多个数据中心利用余热为温室^{58,59,60}、养鱼场⁶¹、游泳池等小型设施供暖的案例^{62,63}。余热还可用于藻类培育^{64,65}、饲用昆虫生产⁶⁶、工业流程供热以及微电网邻近用户空间供暖供应^{67,68}。在更大规模的应用中，余热可接入区域供热管网为城市供暖。目前，全球范围内靠近区域供热管网的数据中心可有效回收的热能已达35太瓦时—85太瓦时⁶⁹。国际能源署估计，到2030年，欧洲空间供暖需求的10%可由邻近区域供热管网的数据中心余热回收利用满足，且成本远低于天然气⁷⁰。

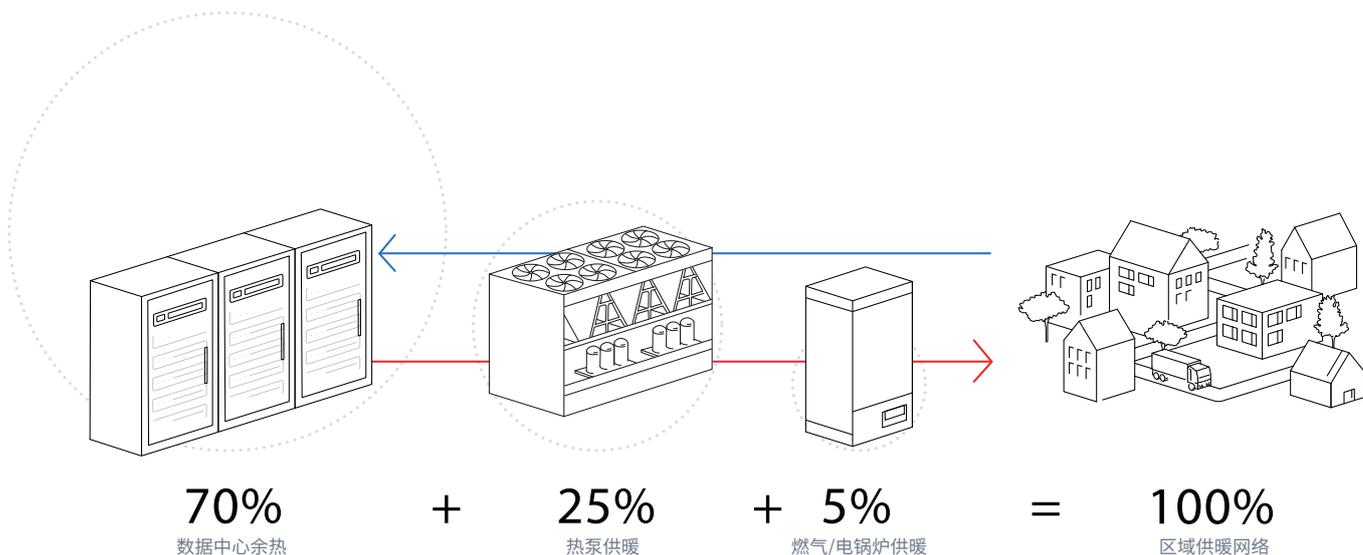
我们来详细梳理数据中心余热回收与再利用的流程。如

第二章所述，服务器通过风冷或液冷方式冷却。风冷通过流经芯片周围的空气间接冷却芯片，而液冷可在不依赖周围空气的情况下直接冷却芯片。

芯片产生的所有热量最终都传递至冷却介质（空气或液体）后排出。在传统配置中，这些热量通过冷却塔等设施直接排放到大气中，既浪费已支付成本的能源，又导致这些能源未能充分发挥其潜力。与此相反，冷却介质可输送至换热器，将热量转移至连接热能用户（如工业微电网或区域供热管网）的二次循环回路。在此环节中，会通过热泵提供热量以满足管网的温度要求。该流程采用液冷时尤为高效，因为借助管道可轻松将服务器产生的热量移出并接入供热管网。

一个关键挑战在于数据中心余热仅在合适的热能用户在附近时才能被利用。数据中心的选址主要由电网接入条件决定⁷¹，而能否获取可再生电力、是否靠近余热消费方等其他因素，影响则相对次要。这并非因为数据中心运营商不愿提供余热，而是涉及的利益相关方与法规体系很复杂。事实上，数据中心运营商有意愿推动余热利用的实现，因为余热对其而言是一种负担。简化余热再利用流程并提升其吸引力符合所有利益相关方（包括热用户）的共同利益。

图 7
余热回收原理⁷²



所回收的废热可在工业集群、微电网及区域供热系统中以多种组合形式加以利用。即便在缺乏区域供热基础设施的地区，建立微电网并发挥跨行业协同效应，依然具备盈利潜力。例如，美国西雅图的一座数据中心为邻近建筑供热，预计在25年内可节省80 GWh能源（详见第29页的案例）。

热回收通过引入多个分布式热源并减少对少数大型电厂的依赖，能够显著提升区域能源系统的韧性。为了回收余热，传感器与控制软件会协同调节水泵、阀门及热泵，将数据中心产生的热量高效输送至用热方。然而，由于这些控制系统均联网运行，不可避免地引入了网络安全风险。此外，热回收项目往往需要与公用事业公司或区域供热运营商建立新的数字连接，从而增加了必须加以防护的接口数量。尽管去中心化架构可能带来更多的潜在攻击入口，但它同时也消除了单一故障点，使得单次事件难以导致整个供热系统瘫痪。除此之外，作为关键设施的数据中心本身具备严格的正常运行时间要

求，其作为热源的高可靠性，也进一步为余热用户增添了额外的韧性保障。

数据中心余热回收是一项常被忽视的效益，在于彻底消除了用于排热的用水需求。数据中心持续用水的主要目的，原本就是为了高效地排出热量。而热回收技术通过“闭环”运行，直接消除了这一排热用水的需求。（阅读丹佛斯《影响力系列研究报告》第七册，了解更多有关水能协同的相关内容）

利用余热的机遇已不言而喻，这一方式有望成为能源体系的重要支柱。运营商可通过余热盈利，城市和国家则可借此逐步淘汰能源结构中的化石燃料。回收的余热甚至有助于实现可再生能源目标⁷³。

尽管利用余热面临着切实的管理层面的难题，但斯德哥尔摩市却是极具代表性的范例——该市通过建立规范化合作模式攻克了这一难题，还成功吸引数据中心落地，并对其产生的余热进行利用（详见第29页案例）。

案例

世界各地如何回收余热

目前，数据中心产生的大量余热仍被白白排放，但这一现状完全可以改变。这些原本直接排入大气的热量，完全可以转化为宝贵的能源资源，用于住宅和商业建筑的供暖。

事实上，数据中心余热既可接入小型本地热网——例如亚马逊在其美国西雅图总部就成功实现了这一模式；也可作为区域供热系统的重要热源，为整座城市提供清洁供暖。后者已在芬兰、瑞典等国家落地实践。

美国西雅图亚马逊总部利用邻近数据中心供热

亚马逊位于西雅图的总部在这一领域的实践展示了如何通过本地热能网络高效回收利用数据中心的余热。园区摒弃了传统锅炉供暖方式，转而依托一套微电网系统，从毗邻的威斯汀大厦数据交换中心（Westin Building Exchange）——一座34层的主机托管数据中心——获取余热，仅依靠原本会被废弃的热能，便实现了办公空间的温暖舒适。系统通过两条管道将18°C的低温水从该数据中心输送至亚马逊园区，从数据中心输送至亚马逊园区，在园区内经提温处理至54°C后，输送至各建筑区域用于供暖。一组总计容量为1500立方米的储水罐作为备用储热设施，可在极寒天气下保障供热稳定性，同时也作为威斯汀大厦的备用水源。该系统设计供热覆盖面积约为50万平方米，预计在25年的运营周期内可节约80吉瓦时的等效电量，不仅有效对冲能源价格上涨风险，还将助力西雅图实现2050年碳中和目标⁷⁴。

中国天津市武清清数科技园余热再利用项目

天津市武清清数科技园为一处综合型多功能园区，建筑面积103,450平方米，位于武清区京津高村科技创新园。创新园内共规划建设9座数据中心，配备超10万台运营服务器机柜。清数科技园距其中1个数据中心集群约400米。

园区将数据中心运行所产生的余热收集起来，通过供冷系统冷冻水取热技术，为清数科技园提供冬季供暖、夏季供冷以及生活热水供应，大大提高数据中心用能效率。即便在园区运营的首个供暖季入驻率尚未达到满负

荷的情况下，其平均供热成本仍比当地商业区域供热价格低约60%。

在园区达到目标入驻率时，该项目预计每年可使邻近数据中心减少用电110万千瓦时，同时每年可减少碳排放约1,659吨。项目因余热回收系统所增加的初期投资，整体回收期不到3年⁷⁵。

芬兰全球最大数据中心余热回收项目

在赫尔辛基近郊，全球规模最大的数据中心余热回收项目正在推进。富腾能源公司将对微软位于埃斯波市赫波科尔皮区、吉尔科努米市科拉巴肯区的两座数据中心产生的余热进行回收。项目投运后，上述数据中心将满足埃斯波市、吉尔科努米市及考尼艾宁市40%的空间供暖需求，并为助力芬兰达成新减排目标贡献2%—3%的减排量。这些余热回收设施已在2025年—2026年供暖季投入运行，据初步统计，已实现了350兆瓦的热能输出⁷⁶。

斯德哥尔摩市已将20个数据中心的余热并入区域供热管网

斯德哥尔摩市依靠全球最大的区域供热管网之一进行城市供暖，其目标是实现整个供热网络的热源100%来自可再生能源和回收的余热。回收数据中心余热是该计划的重要组成部分，2022年已有超过100吉瓦时的能源回收并入区域供热管网——约可满足30,000套公寓的供暖需求⁷⁷。

《斯德哥尔摩数据园区倡议》是实现这一目标的关键。市政府、光纤电缆公司等关键利益相关方建立了一套系统，助力破解数据中心余热共享的各类实操难题，简化在瑞典的落地流程及接入区域供热管网的手续⁷⁸。

这一模式采用公私合营的协作方式：由市属能源公司Stockholm Exergi负责提供基础设施，而各数据中心出资购置热泵，以实现余热回收。在此商业模式下，数据中心可将余热出售给Stockholm Exergi。目前该公司对每兆瓦回收余热的购入成本约为19万欧元，远低于未加碳捕集的天然气的供热成本（约73万欧元/MW）^{79,80}。

政策潜力： 数据中心余热可满足欧盟18%的可再生能源目标

当前数据中心所搭载的高性能计算单元所产生的余热持续增加，也为其他领域的供热需求提供了可回收利用的热源。根据国际能源署预测，到2030年，数据中心产生的余热可满足欧洲10%的空间供暖需求⁸¹。

虽然最大的数据中心远离城市区域，难以有效利用余热，但距离热用户数公里内的数据中心预计可满足300太瓦时的热力需求⁸²。从数据中心回收的余热需通过热泵升温后，才能用于区域供暖，该方式对液冷回收的余热尤为高效。

余热再利用不仅高效，且经济合理。国际能源署的报告显示，数据中心余热接入区域供热网络的成本约为每兆瓦热能19万至25万欧元，而未经减排处

理的天然气热电联产厂每兆瓦热力成本则超过73万欧元⁸³。

到2030年，欧盟必须新增1,214太瓦时的可再生能源装机容量，以达到其可再生能源的约束性目标⁸⁴。由于余热可被计入可再生能源范畴⁸⁵，因此利用数据中心余热可为实现约束性目标作出重大贡献。考虑到通过热泵对风冷系统回收的余热进行升温是必要环节⁸⁶，数据中心对约束性目标的贡献率可达到18%，从而成为实现经济可负担的能源安全和气候目标的关键杠杆。

18%

数据中心余热可满足欧盟18%的可再生能源目标

10%

到2030年，数据中心产生的余热可满足欧洲10%的空间供暖需求

€190-250k

数据中心余热接入区域供热网络的成本约为每兆瓦热能19万至25万欧元，而未经减排处理的天然气热电联产厂每兆瓦热力成本约为73万欧元

“在一天中可再生能源发电量较少的用电高峰时段节约一度电，所带来的减碳效益和环境收益远高于在可再生能源过剩时段节约同等电量。”

尼克·艾尔 (Nick Eyre) 教授《重塑能效实现净零目标》⁸⁹

利用灵活协同增强电网韧性

数据中心在一天中的用电时段与可再生能源生产的时间存在错配。数据中心全天运行，耗电量巨大，而太阳能只在日照时发电，风能也仅在有风时产生。这意味着数据中心的需求与可再生能源的生产不匹配。这种能源消费与生产之间的错配不仅是数据中心面临的问题，也是电力系统面临的主要挑战之一。

当可再生能源发电量不足以满足需求时，需使用化石燃料填补缺口。这会增加二氧化碳排放，也会提高电价，因为化石能源的发电成本更高。另一方面，当可再生能源发电量超过需求时，有时会付费让生产者关停过剩的发电机组。这种做法被称为“弃电”，其成本最终会转嫁给消费者。

由于数据中心给电网造成的压力，美国多个地区的弃电规模屡创新高——自2020年以来，部分区域甚至出现6倍的增长⁸⁷。而中国则通过加强本地网络建设和激励需求响应等措施，在可再生能源占比日益提高的电力系统中有效控制了弃电问题⁸⁸。

在一个无法再依靠启动天然气电厂来应对需求高峰的世界里，我们必须找到更灵活的新型能源管理方式。本节将介绍提升电力系统灵活性的可行性方案，并提供关于

大规模实施需求响应措施所能带来的能源节约和成本效益的新数据。

什么是需求响应

需求响应是指在可再生能源电力供应充裕时用电，而在用电高峰时段降低用电需求。其目的是平衡电力需求，避免出现高需求与低供应同时出现的时段。

实现这一目标的主要方法，要么将电网承受压力的用电高峰时段将用电负荷转移出去，要么通过削减某一功能的用电以服务其他功能的用电需求，以完全避开用电高峰（也称为负荷转移或削峰）。无论采用哪种方法，其目的均是降低用电峰值。虽然该过程在某些情况下可能导致总用电量的增加，但其带来的问题相对较小，有时甚至更经济环保，尤其当使用的能源是可再生能源而非化石燃料时。最大限度地减少高峰时段的用电量可以减轻电网的压力并节省资金。

当与电池等高效储能机制结合时，需求响应解决方案将更加有效。储能过程可实现自动化，在用电低谷时段充电，在用电高峰时段放电。这使得消费者能够在能源价格昂贵且碳排放密集的时段使用价格低廉的可再生能源。

技术潜力：能源管理控制

所有数据中心的冷却系统都应配备智能控制方案——这是释放显著节能潜力的关键所在。通过融合先进的软件算法与人工智能技术，智能控制系统能够动态优化冷却设备的运行策略，从而在保障可靠性的同时，持续降低能耗，实现能效的精细化管理。

然而，能效提升仅是起点。通过智能控制系统，数据中心可深度融入能源生态系统：与电网运营商协同，在需求高峰时段动态调节制冷负载，并将运行

任务转移至可再生能源充足时段。这一转型使制冷系统从单纯的能源消耗单元，升级为支撑电网稳定、平抑波动的灵活资产。

云平台连接进一步强化了这一能力。通过远程集中监控、优化和更新整个冷却设备集群，可确保多站点运行的统一性。这些云解决方案在提供持续优化的同时，依托严格的网络安全标准，既保障关键基础设施免受数字威胁，又实现实时能效提升。

数据中心：灵活电力系统的关键参与者

数据中心为提升电力系统的灵活性提供了重要机遇。根据其在系统中集成方式的不同，数据中心既可能成为系统的巨大负担，也可能成为降低成本和排放的契机。

由于数据中心耗电量巨大，其用电需求的任何突然变化均可能导致电网瘫痪。但反之亦然，如果数据中心能够转移负荷，它们就有潜力平衡电网并带来巨大的系统效益。

实现数据中心灵活性的前提是其与电网深度融合，且始终能获得其正常运行所需的充足电力。将超大规模数据中心接入电网需要进行精确的电力转换。通过这种方式，本地电源和备用设备（如电池等）可有效缓解数据中心对电网的冲击。一旦上述条件满足，数据中心不仅能成为构建韧性、低碳电网的重要杠杆，还能利用自身的储能和发电能力缓解局部供电压力。

美国国家经济研究局近期的一项研究发现，如果数据中心在未采取任何负荷转移和灵活性措施的情况下接入电力系统，将导致电网负荷大幅飙升。

但大多数情况下，数据中心并不会用满全部算力，通常仅以80%的负荷运行⁹⁰。其大量任务无须立即执行，这种特性使其非常适合进行灵活调度。人工智能模型训练和机器学习等任务可在非高峰时段进行⁹¹。仅有流媒体内容等少量任务对数据中心有即时性需求。这在电网压力较低时调整任务执行时间提供了巨大的空间。在实际操作中，这意味着当可再生能源发电量低于用电需求时，任务可以推迟到发电量超过需求的时段执行。

这种“需求侧灵活性”方案可以确保我们最大限度地利用可再生能源，而不浪费任何能源。在许多地区，风能和太阳能在一天中的某些时段供应非常充足，以至于产生的电力无法全部使用。但如果这些电力能够得到高效且充分的利用，这将对传统化石能源具有成本竞争力的替代品。在这些情况下，保持数据中心的灵活性可以更好地利用这些可再生能源，并降低电网成本和排放。

在美国的得克萨斯州，一项雄心勃勃的数据中心灵活性方案的实践表明，此举最多可减少40%的排放，加速淘汰化石能源，并将整个电力系统成本降低5%。即使在灵

“使用直接液冷技术对数据中心进行冷却不仅比传统技术更高效，还显著提升了系统灵活性。”

灵活性措施未直接带来脱碳效果的情况下，其仍能降低系统总成本，因为这使电网得以优先调用成本最低的电力资源，并减少对新建输配电设施的需求⁹²，最终降低所有用户的能源支出。这种情况不仅限于美国，日本的一项案例研究发现，实施数据中心灵活性方案可以将能源系统的总成本降低18%，并显著减少对可再生能源的扩建需求⁹³。值得注意的是，这些是保守估计，且尚未计入液冷技术所蕴含的额外灵活性潜力。

使用直接液冷技术对数据中心进行冷却不仅比传统技术更高效，还显著提升了系统的灵活性。直接液冷通过冷却液体直接带走数据中心的芯片产生的热量，而这些热量又加热了水。水必须重新冷却才能循环用于下一轮冷却，该过程需消耗能源。冷水储存成本低廉且操作简便，有时甚至可跨季节存储⁹⁴，这意味着有大量可再生能源电力可用时，可将水冷却并储存备用。此外，该系统的响应速度非常快，使数据中心能够迅速应对电力供应的短期波动。时下超大规模数据中心将其7%的能源用于冷却，能效显著提升，这在很大程度上归功于液冷技

术⁹⁵。大型数据中心虽能耗巨大，但仅需使其冷却系统具备部分灵活性，即可缓解电网压力，节省能源开支。

国际能源署指出，如果数据中心在运行中具备一定程度的灵活性——即每年仅需灵活调节1%的时间——那么到2035年前，新增的所有数据中心均可顺利接入电网。在中国，新数据中心每年仅需灵活运行0.2%的时间（或每年20小时）⁹⁶。在美国，则需灵活运行1%的时间⁹⁷。即便仅实现这种有限的灵活性，美国也能在无须新建任何发电厂的前提下，满足所有预期新增数据中心的电力需求⁹⁸。此类电网压力事件每次通常仅持续3至5小时，且在大多数情况下，电网仍可为数据中心提供超过一半的可用供电容量⁹⁹。

数据中心提供电网灵活性的方式

- **跨区域任务调度**：将电网紧张区域的数据中心所承担的任务转移至可再生能源电力充足的区域的数据中心执行。
- **时间维度上的任务调度**：将任务调整至电力需求较低或可再生能源发电量较高的时段。在大多数时间，数据中心以80%的负荷运行¹⁰⁰，且很多任务无须立即执行。这为实现任务在时间维度上的调动提供了实质性的机会。
- **液冷系统的灵活性**：液冷技术利用冷水为设备降温，冷却过程中水温升高，需再次冷却后才能循环使用。可以在电价低廉时对水进行冷却，并将其储存在热罐或地下储水设施中。这种冷能可实现及时响应的灵活调节，有时甚至能跨季节储存。
- **电池储能系统 (BESS)**：是管理大型数据中心电力需求波动，避免电网失稳的必要手段。在可再生能源发电过剩时段，电池可以用于储存来自本地或电网侧的绿电。通过这种方式，数据中心就可以在电源供应紧张且价格高的时段使用可再生能源电力。
- **本地发电设施**：可用作数据中心的备用电源或基本负荷电源。发电量可以根据电网供应情况进行灵活调节，从而降低数据中心对电力生产波动的敏感性。通过氢燃料电池，绿氢可提供零噪声、高可用性的备用电力。同样，高效离网式燃气发电机也可作为摆脱石油和煤炭发电厂的可行过渡途径。
- **直流配电**：是超大规模数据中心的未来趋势，即以高压直流电替代传统的低压交流电。这意味着电能将以更直接的形式输送至计算设备，从而提升能效、降低铜材消耗，并更易整合直流型的电池与可再生能源。
- **固态变压器等先进电力转换技术**：能减少从电网到数据中心的电能转换环节，从而避免传统多级变换带来的重复能量损耗。这类变压器使用的材料更少，可灵活接入不同类型的电源，且能够以减轻整个电网压力的方式运行。因此，该解决方案可减少能源浪费，节省铜和铝，最大限度地降低基础设施扩建需求，提升电网稳定性，并简化与电池和可再生能源的集成。对于数据中心而言，这意味着更高的能效、更低的运营成本以及更强的能力参与电网辅助服务，兼具经济效益和可持续发展价值。

图 8
通过人工智能实现超市冰柜灵活调控



案例

通过人工智能实现超市冰柜灵活调控

虽然数据中心本身必须具备灵活性，以保障电网的韧性和经济性，但数据中心的本质及其提供的强大的人工智能计算能力，也可以使其他用电主体实现灵活性调节。超市就是这样一个例子：在工业化国家中，超市的用电量占全国总用电量的3%¹⁰¹。在超市内，制冷系统在总能耗中所占比例最高。然而，可以通过在需求响应事件期间优化或转移负荷，降低超市在高峰时段的能源需求。

借助数字技术，负荷转移可以实现自动化。例如，

在非用电高峰需求时段，将超市冷冻柜冷却到比要求低得多的温度（也称为深度预冷或超冷），使其像一块储能电池一样储存冷能。由此可在用电高峰时段关停冰柜，既缓解电网压力，又为超市节省成本。尽管该系统比传统冰柜系统使用的电力更多，但由于使用的是可再生能源，而且是在其充足时使用，这有助于超市通过削平用电峰值，减少对碳密集型能源的需求。（请参阅丹佛斯案例研究《为世界打造更好的超市》，了解更多信息¹⁰²。）

第四章

数据中心未来展望

将数据中心转化为能源资产的建议

数据中心代表着一股不可阻挡的创新和工程智慧浪潮，目前其发展正与资源可用性、电力供应和电网接入能力等硬性约束限制发生碰撞。人工智能的飞速发展和经济数字化的益处不胜枚举，具有很多变革性意义，不仅大幅提升效率，持续激发创新，更有力推动着可持续发展。

尽管如此，数据中心的进一步发展仍受制于结构性限制，亟需长期解决方案。数据中心的电力消耗增长速度已远超现有能源的供应能力。在许多地区，电力需求已超过供应，美国和欧盟正面临严峻挑战。中国目前尚能跟上需求增长，但也只能通过大幅扩大发电能力来应对。此外，芯片和变压器等硬件和组件供应短缺，显著延长了项目交付周期，这进一步凸显了采取高效解决方案的紧迫性——唯有如此，才能缓解本已紧张的供应链压力。

与此同时，现有的电网基础设施尚不具备提供所需电力的能力，导致电网接入排队时间越来越长，在某些情况下甚至长达十年之久，其背后的原因包括发电能力不

足、本地资源限制以及复杂的行政审批流程。除了这些系统性问题外，数据中心还给当地造成额外压力。如果管理不当，可能会推高终端用户电价，加剧水资源紧张，并在依赖化石能源供电时增加排放。

正如本文所述，这些限制要求决策者采取前瞻性行动，以塑造数据中心的未来发展路径，使其能强化能源系统，而非对其造成压力。这意味着不能仅仅被动接受数据中心的生长，而应主动发挥数据中心的独特潜力，推动各部门协同增效。

两个优先事项尤为重要：首先，将提升数据中心运营能效置于优先地位，以最大限度地减少不必要的能源和水资源的浪费，这对于其他行业的电气化、保护环境、减少对外部资源进口的依赖以及维护产业竞争力至关重要。其次，采用系统性规划思路，将数据中心定位为能源生态系统的积极参与者，而不仅仅是电力消费者。采用需求响应机制，并与其他行业协同对余热进行回收利用，数据中心可转型成为能源枢纽，从而在减轻地方和政策层面的关切的同时增强电网韧性。

优先考虑数据中心自身的运营效率，以最大限度地减少不必要的能源和水资源浪费，维护产业竞争力，并加速整个经济的电气化进程。

- 统一报告要求，并引入最低性能标准。提高用电和用水效率的解决方案已然存在，设定最低电能使用效率和水资源使用效率阈值将加速这些方案的广泛应用。
- 减少淡水消耗，推广闭式循环冷却系统。此类系统对当地水资源的影响更小，冷却效率更高，且有助于高效回收余热。
- 建立与审批许可挂钩的全球可持续性评级体系。明确的绩效指标、透明度与可见性可激发创新与竞争。对符合可持续标准的数据中心实施审批“快速通道”，可激励数据中心竞相采用最先进的技术，并部署余热回收系统，以支持本地供热需求。借鉴国际标准化组织（ISO）等框架，统一报告标准并将许可审批与最低可持续性标准挂钩，同时允许根据区域电网碳强度和水资源压力设定区域阈值。

采用整体规划方法，将数据中心转型为灵活的能源枢纽，优化用电需求，回收利用余热，并与其他行业深度融合，从而增强电网韧性。

- 鼓励从数据中心回收余热。对回收余热并向周边用户供能的数据中心，应给予更高的可持续性评级、加速许可审批及合理的热能补偿予以奖励。这要求将余热回收纳入各类评级体系。
- 推动数据中心成为支撑电网灵活性的资源。为释放其对电网的支撑潜力，数据中心与配电系统运营商必须在灵活用电方面开展协作，并通过加快审批和许可、建立公平合理的电价机制以及对提供需求侧灵活性服务给予合理补偿进行激励。另外，还包括对有助于提升电网稳定性的用户侧（表后）低排放发电和本地储能的认可，这些方面虽具有广泛的社会效益，但其价值目前仍未受到充分重视。

参考文献

- 1 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 2 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 3 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 4 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 5 EkkoSense(2023). 数据中心能源与数据中心可持续性——EkkoSense. 2025 年 11 月 20 日访问。
- 6 Zhou, C 等 (2024) 基于模拟器的强化学习在数据中心冷却优化中的应用——Engineering at Meta. 2025 年 11 月 21 日访问。
- 7 Alissa, H., Nick, T., Raniwala, A. 等 (2024). 运用生命周期评估推动可持续冷云创新. 自然, 641 : 331–338. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08832-3>。
- 8 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 9 Knittel, C. R. 等 (2025) 灵活的数据中心和电网：低成本必然会高排放吗？美国国家经济研究局。 https://www.nber.org/system/files/working_papers/w34065/w34065.pdf. 2025 年 9 月 11 日访问。
- 10 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 11 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 12 Kamiya, G. & Coroamă, V.C.(2025). 数据中心能源使用：模型与结果批判性综述. EDNA——国际能源署高效终端设备技术合作计划 (IEA 4E)。
- 13 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 14 《独角鲸》2025 年专题报道：人工智能数据中心热潮将如何影响加拿大？访问于 2026 年 2 月 11 日。
- 15 《全球数据中心枢纽》(2025) 中东与非洲专题：人工智能与数据中心建设投资突破 750 亿美元 | 访问于 2026 年 2 月 11 日。
- 16 荷兰时报 (2025). 阿姆斯特丹禁止市内再建数据中心. 2025 年 4 月 18 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- 17 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 18 金融时报 (2024). 电网压力增大. 数据中心发展受限. 2024 年 2 月 12 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- 19 国际能源署《能源与人工智能》报告. 该报告阐述了美国、欧盟、中国和日本从 2024 年到 2030 年以太瓦时为单位的用电增长量及增长率 (百分比)。2024 年和 2030 年的能耗推导公式为：2024 太瓦时 = 增长量太瓦时 / 增长率 % * 100, 2030 太瓦时 = 2024 太瓦时 + 增长量太瓦时。
- 20 全球数据中心能耗数据 (2010 年、2018 年) 引用自 Masanet 等 (2020) 的研究, 2021 年及 2030 年数据则基于国际能源署 (IEA 2025) 报告。全球数据中心工作负载的 2010 年数据源自 Masanet 等 (2020), 2018 年与 2021 年数据采用思科 (Cisco 2018) 预测, 2030 年数据引用 Koot 与 Wijnhoven(2021) 模型。全球 IP 流量 2010 年数据依据思科 (2011) 报告, 2018 年及 2021 年采用思科 (2018) 预测, 2030 年数据基于 Koot 与 Wijnhoven(2021) 研究。对于无明确数据点的年份, 其能耗、工作负载及 IP 流量的数值均通过相邻数据点间的线性插值得出。Masanet 等 (2020). 《全球数据中心能耗估算的重新校准》. Science. 367 卷 6481 期. 984-986 页. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>。国际能源署 (IEA 2025). 《能源与人工智能》. 2025 年 4 月发布. 访问于 2025 年 6 月 11 日。思科 (Cisco 2018). 《思科全球云指数：2016–2021 年预测与方法论》。Koot 与 Wijnhoven(2021). 《用户行为对数据中心电力需求的影响：系统动力学预测模型》. Applied Energy. 291 卷. 116798 号. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>。思科 (Cisco 2011). 《思科全球云指数：2010–2015 年预测与方法论》。
- 21 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 11 月 11 日访问。
- 22 Al-Mamun 等. (2022) 基于智能传感器网络的数据中心监控系统综述 IRJSTEM-Volume2_No1_Paper11.pdf. 2025 年 11 月 19 日访问。
- 23 EkkoSense(2023). 数据中心能源与数据中心可持续性——EkkoSense. 2025 年 11 月 20 日访问。
- 24 美国电力研究协会 (2024) 动力智能：人工智能与数据中心能耗分析. 2025 年 12 月 1 日访问。
- 25 EkkoSense(2023). 数据中心能源与数据中心可持续性——EkkoSense. 2025 年 11 月 20 日访问。
- 26 Zhou, C 等 (2024) 基于模拟器的强化学习在数据中心冷却优化中的应用——Engineering at Meta. 2025 年 11 月 21 日访问。
- 27 Shead(2016), 《世界经济论坛》(2016) 谷歌如何深度应用人工智能降低能耗 | 访问于 2025 年 11 月 21 日。
- 28 FEMP (2024) 《节能数据中心设计最佳实践指南》访问日期：2025 年 11 月 20 日。
- 29 美国能源部, 面向数据中心的无线传感器网络 | 美国能源部 访问日期：2025 年 11 月 17 日。
- 30 丹佛斯统计数据。
- 31 Li, Jie & Wang, Xiao(2021). 中国创新型数据中心冷却技术——液冷解决方案——联合国环境规划署哥本哈根气候中心 (UNEP-CCC). 2025 年 12 月 8 日访问。
- 32 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- 33 2022 年欧盟 27 国年淡水总抽取量为 1,970 亿立方米。a 预计到 2030 年数据中心耗水量将达 1.2 万亿立方米, 是欧盟 27 国淡水抽取总量的六倍。a: 欧洲环境署 (2024). 欧洲按来源和经济部门划分的水资源抽取量. 2025 年 8 月 14 日访问。
- 34 结果基于丹佛斯 (Danfoss) 的模拟数据。该结果依据的是现有公开数据——且假设所用液体的性质类似于 25% 浓度的聚丙烯二醇 (Polypropylene Glycol), 密度为 1025 kg/m³; 计算中未考虑软管的弯曲情况, 也未包含其他未提及的压力损失。
- 35 丹佛斯统计数据。
- 36 与标准解决方案相比, 最先进的高效液体冷却每年可为每台服务器机柜节省 246 千瓦时。a 采用 130 千瓦机柜的 1 吉瓦超大规模数据中

- 心可容纳 7692 台服务器机柜 (1 吉瓦/130 千瓦/机柜=7,692 个机柜)。选择高效液冷技术可以每年节省电量 1,892,308 千瓦时 (7,692 机柜 × 246 千瓦时/年/机柜 = 1,892,308 千瓦时/年)。弗吉尼亚州的商业电价为 9.96 美分/千瓦时。b 按此电价计算, 数据中心运营商每年可节省 188,474 美元。2022 年美国家庭年均用电量为 10,791 千瓦时。c 高效液冷技术节省的电能相当于 175 户家庭的用电量。
- ^a 丹佛斯计算数据。
- ^b Energybot(2025). 弗吉尼亚州电价与数据. 2025 年 12 月更新. 2025 年 12 月 8 日访问。
- ^c 美国能源信息署 (EIA)(未注明日期). 美国家庭用电量是多少? 2025 年 12 月 8 日访问。
- ³⁷ 哥本哈根能源效率中心 (2021) Innovative_Data-Centre_Cooling_Technologies_in_China_Liquid_Cooling_Solution.pdf 2025 年 12 月 15 日访问。
- ³⁸ Enabled Energy (2021) 2021-CO-VFD-Case-Study 2025 年 12 月 12 日访问。
- ³⁹ Enabled Energy (2021) 2021-CO-VFD-Case-Study 2025 年 12 月 12 日访问。
- ⁴⁰ 维谛技术“为您打造的数据中心能效解决方案”, 路透社 (2025). 大型科技公司的数据中心热潮给美国电网运营商带来新风险. 2025 年 3 月 20 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴¹ Wade, C. 等 (2025). 数据中心与加密货币挖矿需求增长对电网的影响. 美国开放能源展望报告. https://energy.cmu.edu/_files/documents/electricity-grid-impacts-of-rising-demand-from-data-centers-and-cryptocurrency-mining-operations.pdf. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴² 彭博社 (2025). 人工智能数据中心导致电费飙升. 2025 年 9 月 30 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴³ 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- ⁴⁴ 荷兰时报 (2025). 阿姆斯特丹禁止市内再建数据中心. 2025 年 4 月 18 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴⁵ 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- ⁴⁶ 金融时报 (2024). 电网压力增大, 数据中心发展受限. 2024 年 2 月 12 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴⁷ 国际能源署 (2025). 2025 年能效报告. 2025 年 11 月 20 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴⁸ 国际能源署 (2025). 2025 年能效报告. 2025 年 11 月 20 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁴⁹ 国际能源署 (2025). 2025 年能效报告. 2025 年 11 月 20 日发布. 2025 年 11 月 28 日访问。
- ⁵⁰ Eichin, F. 等 (2024). 电机系统数字化——第四部分: 电机系统数字化造成的能耗. 4E 电机系统工作组 (EMSA). 国际能源署技术合作计划。
- ⁵¹ 丹佛斯. Leanheat——面向建筑业主的解决方案。
- ⁵² 丹佛斯. Leanheat——面向建筑业主的解决方案。
- ⁵³ 开源计算项目 (2025). 数据中心热量再利用参考设计. 1.0 版. 上次更新日期: 2025 年 3 月 3 日。
- ⁵⁴ 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- ⁵⁵ 数据中心动态 (2022). EcoDataCenter 在养鱼场和温室中重复利用热量. 2022 年 10 月 11 日发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁵⁶ Equinix(2023). 利用余热为巴黎 PA10 数据中心的温室提供动力. 2025 年 12 月 15 日访问。
- ⁵⁷ Yuan, X. 等 (2023). 数据中心余热回收: 综述. 可再生与可持续能源评论. 第 188 卷, 113777. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>。
- ⁵⁸ 数据中心动态 (2022). EcoDataCenter 在养鱼场和温室中重复利用热量. 2022 年 10 月 11 日发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁵⁹ Techspot(2025). 数据中心利用余热加热公共水池, 每年节省 24,000 美元. 2023 年 3 月 20 日发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁶⁰ 数据中心知识 (2024). 巴黎 2024 年奥运会: 数据中心余热用于加热奥运会游泳池. 2024 年 7 月 26 日发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁶¹ 巴黎萨克雷大学 (2025). Data4 与巴黎-萨克雷大学基金会将余热转化为藻类生物质. 最后更新于 2025 年 5 月 23 日. 2025 年 12 月 15 日访问。
- ⁶² Brand Eins(2021). Eine Geschichte aus Europa. 2025 年 12 月 15 日访问。
- ⁶³ Vattenfall(2025). 循环创新利用余热生产气候智能型鱼饲料. 2025 年 9 月 19 日发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁶⁴ Yuan, X. 等 (2023). 数据中心余热回收: 综述. 可再生与可持续能源评论. 第 188 卷, 113777. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>。
- ⁶⁵ 亚马逊 (2019). 隐藏在亚马逊西雅图总部下方的超高效热源. 最后更新于 2019 年 8 月 21 日. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁶⁶ Yuan, X. 等 (2025). 数据中心余热用于区域供热网络: 综述. 可再生与可持续能源评论. 第 219 卷. 115863. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115863>。
- ⁶⁷ 国际能源署 (2025). 能源与人工智能. 2025 年 4 月发布. 2025 年 6 月 11 日访问。
- ⁶⁸ Ember(2025). 数据中心电网: 雄心勃勃的电网规划可助力欧洲赢得人工智能竞赛. 第一章: 数据中心电网. 2025 年 6 月 19 日发布. 2025 年 12 月 1 日访问。
- ⁶⁹ 根据修订后的《可再生能源指令》, 如果是不可避免的且源自可再生能源的余热, 可以计入可再生能源的份额。(欧盟 (2023)). 欧洲议会和理事会 2023 年 10 月 18 日关于修订第 (EU) 2018/2001 号指令、第 (EU) 2018/1999 号条例和第 98/70/EC 号指令 (关于促进可再生能源的使用) 并废除理事会第 (EU) 2015/652 号指令的第 (EU) 2023/2413 号指令。))
- ⁷⁰ 亚马逊 (2019). 隐藏在亚马逊西雅图总部下方的超高效热源. 最后更新于 2019 年 8 月 21 日. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁷¹ 这些计算值为丹佛斯自有数据。
- ⁷² Afry(未注明日期). 全球最大的数据中心余热利用项目. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁷³ 欧盟市长公约 (2023). 数据中心余热回收. https://eu-mayors.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-10/2023_CoMo_CaseStudy_Stockholm_EN.pdf. 2023 年 9 月发布. 2025 年 12 月 5 日访问。
- ⁷⁴ 欧盟市长公约 (2023). 数据中心余热回收. https://eu-mayors.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-10/2023_CoMo_CaseStudy_Stockholm_EN.pdf. 2023 年 9 月发布. 2025 年 12 月 5 日访问。

- ⁷⁵ 欧盟市长公约(2023). 数据中心余热回收. https://eu-mayors.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-10/2023_CoMo_CaseStudy_Stockholm_EN.pdf. Published September 2023. Accessed 05 December 2025。
- ⁷⁵ 欧盟市长公约(2023). 数据中心余热回收. https://eu-mayors.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-10/2023_CoMo_CaseStudy_Stockholm_EN.pdf. 2023年9月发布. 2025年12月5日访问。
- ⁷⁶ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁷⁷ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁷⁸ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁷⁹ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁸⁰ 欧盟2030年能效目标是将最终能耗降至7.63亿吨油当量(8,874太瓦时)。^a 欧盟的约束性目标是到2030年可再生能源占最终能耗的42.5%。^b 这意味着到2030年, 最终能耗中必须有3771太瓦时来自可再生能源。2023年, 欧盟最终能源消耗量为8.94亿吨油当量(10,397太瓦时)。^c 同年, 可再生能源的消耗份额为24.6%。这使得2023年可再生能源的最终消耗量为2,558太瓦时。2023年可再生能源最终消耗量(2,558太瓦时)与2030年目标消耗量(3,771太瓦时)之差为1,214太瓦时。
- ^a 欧盟委员会(未注明日期)能效目标. 2025年12月10日访问。
- ^b 欧盟(2023). 欧洲议会和理事会2023年10月18日指令(EU)2023/2413, 修订了有关促进可再生能源利用的指令(EU)2018/2001、法规(EU)2018/1999和指令98/70/EC, 并废除理事会指令(EU)2015/652)。 <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>。
- ^c 欧盟统计局(2024). 2023年欧盟一次能源消耗量下降4%。2024年12月20日发布. 2025年12月10日访问。
- ^d 欧洲环境署(2025). 欧洲可再生能源消耗占比. 2025年11月6日发布. 2025年12月10日访问。
- ⁸¹ 根据修订后的《可再生能源指令》, 若余热不可避免且源自可再生能源, 则可计入可再生能源份额。(欧盟(2023). 欧洲议会和理事会2023年10月18日指令(EU)2023/2413, 修订了有关促进可再生能源利用的指令(EU)2018/2001、法规(EU)2018/1999和指令98/70/EC, 并废除理事会指令(EU)2015/652。 <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>。)
- ⁸² 到2030年, 欧盟的数据中心可以通过区域供热网络满足300太瓦时的热量需求。^a 这些热量的一部分必须来自风冷数据中心, 另一部分来自液冷数据中心。风冷余热回收性能系数(COP)为3, 液冷余热回收性能系数为4-7。^b 这意味着热泵消耗1单位电能可分别产生3或4-7单位热能。假设风冷与液冷可获取的余热各占50%, 且液冷余热COP为5, 数据中心可提供220太瓦时热量, 热量需通过热泵提升, 以提供300太瓦时热量。(风冷: 150太瓦时, COP为3, 产生100太瓦时热量。液冷: 150太瓦时, COP为5, 产生120太瓦时热量)。欧盟必须在2030年前将最终能源消费量增加1,214太瓦时, 实现可再生能源的约束性目标, 220太瓦时余热可贡献该目标的18%。
- ^a 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ^b 丹佛斯计算数据。
- ⁸³ 标普全球(2025). 随着数据中心负载增长对系统造成压力, 电网拥堵仍然是关键问题. 2025年10月16日发布. 2025年12月17日访问。
- ⁸⁴ Ember(2025). 2025年中国能源转型回顾. 第一章: 砥砺前行: 中国电力转型在行动. 2025年12月17日访问。
- ⁸⁵ Rosenow, J. & Eyre, N.(2022). 重塑能效实现净零目标. 能源研究与社会科学. 90。
- ⁸⁶ Knittel, C. R. 等(2025). 灵活数据中心与电网: 降低成本还是增加排放?美国国家经济研究局. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w34065/w34065.pdf. 2025年9月11日访问。
- ⁸⁷ RMI(2025). 快速、灵活的数据中心解决方案. 2025年7月17日发布. 2025年12月9日访问。
- ⁸⁸ Knittel, C. R. 等(2025). 灵活数据中心与电网: 降低成本还是增加排放?美国国家经济研究局. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w34065/w34065.pdf. 2025年9月11日访问。
- ⁸⁹ Naoi, H. 等(2025). 整合100%可再生能源数据中心的位置规划与时空工作负荷转移: 日本案例研究. 能源战略评论. 第61卷. 101823. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101823>。
- ⁹⁰ Winick, J. A. 等(2025). 利用地下热能存储(UTES)降低数据中心峰值冷却需求与能源成本. 第50届地热储层工程研讨会论文集. SGP-TR-229. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SWG/2025/Winick.pdf>. 2025年12月3日访问。
- ⁹¹ RMI(2025). Fast, Flexible Solutions for Data Centers. Published 17 July 2025. Accessed 28 November 2025.。
- ⁹² 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁹³ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁹⁴ Norris, T.H. et al. (2025). Rethinking Load Growth: Assessing the Potential for Integration of Large Flexible Loads in US Power Systems. Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability. Duke University. <https://hdl.handle.net/10161/32077>。
- ⁹⁵ Norris, T.H. 等(2025). 反思负荷增长: 评估美国电力系统中大型灵活负荷的整合潜力. 尼古拉斯能源、环境与可持续发展研究所. 杜克大学. <https://hdl.handle.net/10161/32077>。
- ⁹⁶ 国际能源署(2025). 能源与人工智能. 2025年4月发布. 2025年6月11日访问。
- ⁹⁷ Knittel, C. R. 等(2025). 灵活数据中心与电网: 降低成本还是增加排放?美国国家经济研究局. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w34065/w34065.pdf. 2025年9月11日访问。
- ⁹⁸ 环境调查署与Shecco(2018). 无氢氟碳化物超市制冷能效技术报告, 第10页。
- ⁹⁹ 丹佛斯(2023). 为世界打造更好的超市。
- ¹⁰⁰ Knittel, C. R. 等(2025) 灵活的数据中心和电网: 低成本必然会高排放么?美国国家经济研究局. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w34065/w34065.pdf. 2025年9月11日访问。
- ¹⁰¹ 环境调查署与Shecco(2018). 无氢氟碳化物超市制冷能效技术报告, 第10页。
- ¹⁰² 丹佛斯(2023). 为世界打造更好的超市。

请访问danfoss.com/reports-and-analysis，获取本报告电子版。



《影响力系列研究报告》简介

《影响力系列研究报告》旨在分享我们关于能效和电气化对能源系统转型的潜力的看法。在关于绿色转型的对话中，能效常被忽视。造成这种情况的一个主要原因是，专家和行业领袖没有充分解释能效在加速电气化、以可再生能源驱动未来发展方面的作用。

本系列援引来源可靠的证据，展示各行各业的案例，围绕以经济高效可扩展的方式节能减排，介绍具有巨大潜力的解决方案。本系列还希望展示，快速可持续的绿色转型所需的技术今天已经具备。

节约下来的能源才是最绿色的能源。