



中德能源与能效合作
Energiepartnerschaft
DEUTSCHLAND - CHINA

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

中德能源转型研究项目

中德数据中心灵活性研究

现状和最佳实践



dena
Deutsche Energie-Agentur

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

版本信息

发布方

德国能源署 (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 柏林, 德国
电话: +49 (0)30 66 777 - 0
传真: + 49 (0) 66 777 - 699
电子邮箱: info@dena.de
网站: www.dena.de

作者

卡特琳娜·西穆, 德国能源署 (dena)
科丽娜·博林蒂内亚努, 德国能源署 (dena)

参编

侯安德, 德国国际合作机构 (GIZ)
皮特拉登 博士, 斯图加特大学
叶睿琪, 绿色和平组织东亚区
张素芳, 华北电力大学

日期: 2022 年 3 月

版权所有。任何引用都须征得德国能源署 (dena) 的同意。

引用格式: 德国能源署 (发布方) (dena, 2022) : 中德数据中心灵活性研究——现状和最佳实践

德国能源署(dena)牵头编写的“中德数据中心灵活性研究——现状和最佳实践”报告是中德能源转型研究项目的成果之一, 该项目致力于促进中国智库与德国研究机构之间的交流, 加强中德两国在能源转型方面的合作, 并向中国读者分享德国能源转型的经验。中德能源转型研究项目的目标是推动低碳能源政策发展, 通过国际合作开展互利的政策研究, 帮助中国建立一个更高效的低碳能源体系。项目由德国联邦经济和气候保护部(BMWK)在中德能源合作伙伴框架下提供支持, 中德能源合作伙伴是中德两国政府能源政策对话的官方平台。国家能源局是项目框架下中德能源工作组的中方指导单位。中德能源转型研究项目由德国国际合作机构(GIZ)牵头, 联合德国能源署(dena)和 Agora Energiewende 共同实施。

目录

编者寄语.....	4
执行摘要.....	5
1 德国和中国数据中心的发展现状.....	7
1.1 数据中心和能源转型.....	7
1.2 数据中心灵活性需求的市场化.....	9
1.3 提高数据中心灵活性的障碍.....	10
1.4 对政策支持的需求.....	11
2 数据中心的灵活性选项.....	13
2.1 时间上转移工作负荷.....	13
2.2 负荷转移及缓解电网拥堵.....	17
2.3 释放储能潜力.....	18
2.4 优化服务器使用.....	19
2.5 政策建议——德国.....	19
2.6 政策建议——中国.....	20
3 能效和灵活性措施：余热回收和冷却负荷.....	21
3.1 数据中心余热利用.....	21
3.2 优化冷却系统.....	21
3.3 德国的访谈结果和政策建议.....	22
3.4 中国的访谈结果和潜力.....	24
3.5 中国政策建议.....	25
4 加强参与辅助服务和现货市场.....	26
4.1 政策选择——德国.....	26
4.2 政策选择——中国.....	27
5 促进可再生能源的利用.....	28
5.1 提高可再生能源利用的途径.....	28
5.2 德国数据中心和可再生能源.....	28
5.3 中国数据中心和可再生能源.....	29
5.4 政策建议——中国.....	30
6 增强数据中心系统整合的成功商业模式.....	31
7 结论.....	33
图表清单.....	34

编者寄语

尊敬的读者：

近年来，云服务、新互联网应用和社交媒体平台大幅扩张，这些平台的能耗已引起能源政策制定部门和电力规划部门的关注。随着日常生活数字化的不断提高，对计算和存储能力的需求相应大幅增加，数据中心成为了这种数字基础设施运行的“心脏”。

过去几十年间，尽管信息技术的效率提高了很多，但随着全球数据中心的大幅增长，数据中心对电力的需求还是明显加大了。为了应对这种指数级增长，在中国和德国等数字经济较为发达的国家，需要采用更为清晰的监管框架和更有针对性的激励措施，以推动数据中心的“绿色化”运营。

数据中心的高能耗不仅让电网有所顾虑，也让数据中心运营商忧心重重。电网运营商面临的挑战是容量扩张和如何将数据中心这类大规模电能消费整合到电力系统中；数据中心运营商需要面对的是日益增长的用电成本和绿电消纳的压力。在这种大背景下，对于数据中心而言，除了维持稳定运行提供基础服务之外，提升其自身运行效率和

增加灵活性也变得至关重要。虽然灵活性措施对大部分数据中心来说是具有挑战性的，但这些措施可以满足电网和数据中心运营商当前的需求。

鉴于实现气候中和目标的紧迫性，同时也因为具有能够提升数据中心灵活性的切实可行的方法，加快中国和德国数据中心的高效灵活运行是 2030 的政策重点。本研究的目的是唤起人们对数据中心灵活性潜力、能效改进以及可再生能源使用的关注，并着重强调商业和政策解决方案的重要性，通过研究分析为两国数据中心的发展提出政策建议。

本研究所开展的调查、成果以及为了验证成果而组织的研讨活动等，是中德专家、监管机构和行业代表就绿色数据中心进行交流的基础。关于高效、灵活和可持续的数据中心的研究仍处于起步阶段，希望这项研究能够激发从业者的进一步讨论和探索，推动更清洁、更灵活的数据中心在中国和德国的能源转型中发挥更大作用！

此致

科丽娜·博林蒂内亚努

中德能源转型研究项目，课题负责人
德国能源署 (dena)

侯安德

中德能源转型研究项目，项目主任
德国国际合作机构 (GIZ)

执行摘要

数据中心在能效提升、灵活性和可再生能源利用方面潜力巨大，随着数据中心的容量和电力需求的快速增长，这些潜力会越来越大——因此需要制定有针对性的政策来进一步挖掘这些潜力。研究表明，许多技术和措施都有助于数据中心的可持续运营。通过对中国和德国等先进数字经济体的专家和行业参与者的访谈，我们识别了一些阻碍提升数据中心灵活性和可再生能源利用的障碍，也发现通过政策来提高能效有时会对灵活性产生负面影响。未来，电力批发市场的差异性价格将推动灵活性，但是单纯依靠价格手段是不够的，必须出台一系列有针对性的政策，来提高能源和数据中心利益相关方的意识，改进管理和市场激励措施，进而消除提高灵活性的障碍。

作为当今数字经济的驱动力，数据中心是世界上能源负荷增长最快的行业之一，2020年中国和德国数据中心的能耗分别占到两国年总耗电量的2.7%和2.9%，这一趋势预计还将延续。数据中心正在逐步成为能源转型的关键环节。一些研究表明数据中心在提升能效、为电网提供更大的灵活性、增强新能源的消纳等方面潜力巨大。

本研究总结并讨论了促进数据中心可持续运营的潜在技术和措施：

- 通过储能、工作负荷转移和服务器运行优化实现灵活性；
- 能效改进，例如余热回收或改善冷却系统；
- 数据中心参与电力市场；
- 数据中心与可再生能源利用相结合。

通过对中德两国数据中心专家和行业代表的访谈，我们发现了一些阻碍关键技术和措施实施的障碍，并提出了

相应的政策建议，同时列举了最佳实践案例和相关商业模式。

尽管有些数据中心运营商已经采取措施，在一定程度上提高了运营的灵活性，但还有很长的路要走。数据中心行业最看重的是可靠性——数据中心运营商认为灵活性和为电网提供服务是其核心业务之外的范畴，在某些情况下还具有一定风险。

研究表明，一些数据中心已经采用了提高能效和利用可再生能源的相应措施，数据中心的态度是积极的，因为与灵活性措施相比，提高能效和利用可再生能源对数据中心的影​​响更小。本报告的分析和访谈表明，现有的政策不足以推动数据中心的灵活性或清洁能源的利用。虽然中国最近发布的一些新措施，可能会产生积极影响，但之前的政策缺乏全面的、有针对性的监管和激励措施，无法很好的促进数据中心对可再生能源的广泛利用或改进其灵活性。以下是本报告针对以上问题向政策制定者提出的具体建议：

主要政策建议

1. 提高电网和数据中心运营商之间以及数据中心运营商与客户之间的**透明度和信息共享**，促进能效提升和可再生能源的利用；
2. **简化现有规章**——尤其是德国《可再生能源法》关于税收的部分，推进电池储能的更广泛应用；
3. **建立更有效的激励措施**，包括行政和市场激励措施，鼓励数据中心转变自身的电力消费模式，参与需求响应；
4. 建立进一步推广数据中心高效供热及冷却的**实践和计划**；
5. 发展**中间平台**对灵活性、能效和相关措施进行协调和聚合；
6. 采取**行业碳中和计划**，加速数据中心可再生能源部署；
7. **提供较低的连接成本或上网费**，以激励数据中心的电网友好分配；
8. 对于愿意为电网提供一定程度灵活性的数据中心，**提供优先连网服务**。

1 德国和中国数据中心的发展现状

IT 行业有着巨大的能源消耗和碳足迹，其耗能量在未来几十年可能出现指数级增长。采取一些行之有效的措施可以使数据中心的运行更加绿色和灵活，例如采购绿电、调整工作负荷和提升能效等。这些措施的实施不仅涉及数据中心运营商，还涉及政策制定者、市场监管部门、电网公司和数据用户的共同参与，最关键的是要建立一个可靠的监管体系和激励机制，从而实现数据中心的绿色化之路。

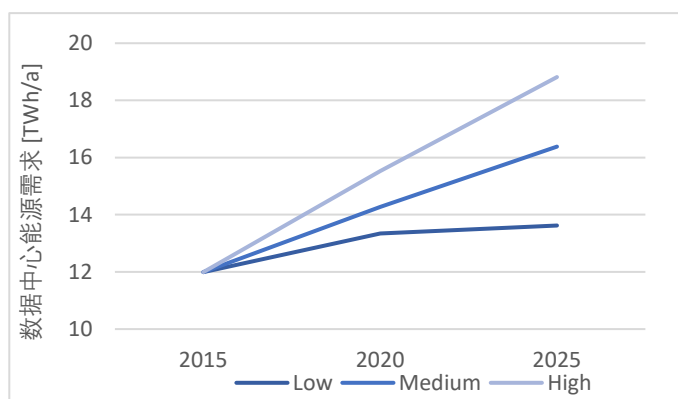
1.1 数据中心和能源转型

德国

德国的数据中心是全世界能效最高的，其电能利用效率（PUE）（数据中心基础设施能效度量单位）——在 2010~2015 年平均增长率为 10%，但这无法抵消数据中心用电量需求的不断增长。¹

德国数据中心的总能源需求量一直稳步增长，2020 年达到 16 TWh，占总用电需求的 2.9%，超出预期。根据亚琛工业大学（RWTH Aachen）的研究，到 2025 年，数据中心的能源需求预计会增长到大约 18.8 TWh，其主要原因是 5G 标准的引入。²

图 1：2015~2025 年的年度能源需求发展预测³



如果以 2020 年数据为基线，当前这些预测可能会被超越。德国联邦环境、自然保护、核安全与消费者保护部表示，由于德国数据中心对计算能力的高需求，服务器能

源需求量增长尤为明显，根据专家预测，2015~2025 年期间增长幅度将达 60%以上。⁴

德国的数据中心大多位于莱茵-美因（Rhine-Main）地区。法兰克福市建有大量的数据中心，主要原因是这里靠近世界最大的互联网交换中心——德国互联网交换中心（DE-CIX），而且作为欧洲大陆最重要的金融中心，法兰克福对快速数据处理的需求较高。数据中心大多建在高能耗的城市区域，如慕尼黑、柏林、汉堡和杜塞尔多夫。

本研究的重点是数据中心的灵活性、能效提升以及可再生能源的利用。目前关于德国的研究和商业应用更多地关注可再生能源利用，但是数据中心的灵活性在未来可能会扮演更重要的角色，灵活的运营有助于降低数据中心的用能成本。

总而言之，数据中心可能成为德国能源转型不可或缺的一部分。德国政府制定了 2030 年可再生能源（RE）发电量占总耗电量 80% 的目标，随着德国能源转型的推进，德国面临的一项重要挑战是：如何在可再生能源发电量较高时充分的加以利用，在可再生能源发电量较低时调整需求侧的用电量。由于德国核电厂和燃煤电厂的关停，如何保障电网的稳定供电可能会成为一个日益严峻的挑战。

可再生能源发电在电力系统中的占比与日俱增，这对电力系统提高灵活性以确保电网稳定性提出了更高要求。

提供足够的平衡能源是保障德国电力系统不间断运行的重要前提，除了电网和发电厂运营商以外，数据中心等电力消费者也具有巨大的灵活性潜力——即通过需求侧管理措施或者参与电力批发市场及辅助服务市场来提高其灵活性。

与中国类似，德国当前的政策主要聚焦在提高数据中心的能效。在 2020 年发布的“环境数字政策议程”¹¹中，德国联邦环境、自然保护、核安全和消费者保护部提出了如何提高德国数据中心能效的相关措施，其中“蓝天使”生态标签将为节能数据中心的运行、气候兼容的异地数据中心、节约资源和节能的软件产品和服务器以及数据存储产品制定标准。⁵此外，德国环境署正计划为数据中心建立一个登记册，以了解大型数据中心的组织方式、能源消耗情况以及如何利用余热。⁶同时，德国环境署正在制定一个评级系统，以评估服务器的能源效率。目前，德国还没有一个全面的立法来解决数据中心的灵活运营或激励数据中心的需求响应。

彭博新能源财经（BNEF）对德国等国家的数据中心到 2030 年的总灵活性进行了预测，虽然 BNEF 预计德国数据中心的潜在灵活能力为 3800 MW，但由于数据中心提供灵活性的意愿不高，预计实际灵活能力仅为 660 MW。⁷为了增加实际的灵活能力，数据中心需要充分利用其现有的灵活性，并投资于经过试验和测试的灵活性改造。这些改造措施可以根据不同类型的数据中心的需求进行调整，同时可以节约成本。

中国

中国数据中心的数量正在快速增长，与互联网应用的蓬勃发展步调一致。据估算，2020 年中国数据中心和 5G 部门的电力消耗大约为 201 TWh，约占电力总需求的 2.7%。⁸根据绿色和平组织东亚区等机构 2021 年的分析，预计到 2035 年中国数字基础设施的电力消耗将达 782 TWh，大约是 2020 年耗电量的 4 倍，预计占总耗电量的

5%~7%。此外，5G 将消耗 297 TWh 电力，相当于当前水平的 5 倍。

目前，中国互联网通讯基础设施带宽密度最大的区域均位于中国最大、最发达的城市附近。数据中心电力消耗主要来自五个省份：河北、江苏、北京、广东和浙江。这些省份代表了中国经济最发达、对数据服务需求最高的地区。⁹

2021 年颁布的几项政策表明，政府将着力将数据中心用电负荷逐渐转移到清洁电力过剩的欠发达省份，如贵州、甘肃和内蒙古。¹⁰这种地理转移可能会更多的消纳清洁的可再生能源电力，但同时要求这些分布广泛、远离大城市的地区加大通讯基础设施的建设，并扩建互联网通信技术设施，以适应数据中心的容量需求。

能效一直是数据中心政策的主要焦点。2015 年，中国制定了试点计划，目标是改善试点数据中心的电能利用效率。¹¹十三五规划（2016-2020 年）为最大的数据中心设定了电能利用效率优于 1.4 的目标。¹²2021 年，中国工业和信息化部发布了一个 3 年目标，要求数据中心的电能利用效率低于 1.3。¹³这一政策有可能激励数据中心向气候较冷的地方迁移，并寻求更高的电能利用效率，这两方面都不利于灵活性或可再生能源的利用，但最终取决于实施方式。

中国的政策制定者也认识到数据中心是一种新型负荷，具有与可再生能源及更灵活的电力市场整合的潜力。2017 年 9 月，国家发展和改革委员会（NDRC）与其他六个部委联合发布了一项关于需求侧管理的政策，概述了需求侧管理的五个维度：节约用电、环保用电、有序用电、绿色用电和智能用电。智能用电强调通过信息和通信技术的融合，支持需求侧管理。¹⁴之后，江苏和山东等省份开展了需求侧管理试点，将数据中心纳入需求响应，下一章节将详细介绍。

目前中国的电力市场改革处于发展中期：大多数地区缺少高流动性的现货电力市场，即便是在有现货市场的省份，大多数电力交易采用的是中长期双边合同，这类合同的周期一般是 1 个月到 1 年不等，通常要求稳定的电力消费——因此对灵活性的重视有限，并抑制用电负荷的波动。2018 年以来，一些省份开展了现货市场试点，但仍处于早期阶段，流动性非常有限。

2021 年年中提出的改革措施提高了电力价格，并为消费可再生电力提供额外的激励措施。2021 年 10 月，监管机构扩大了基准煤电价格波动的监管范围，将煤电基准价格的上浮上限从 10% 提高到 20%。中央政府将不限制高排放、高耗能行业的煤电价格波动，¹⁵ 零售电价目录不再适用。对于小客户或工业园区，电网公司将代其购电并定价，不过终端用户仍可以选择直接进入双边市场。中央政府将数据中心行业列入高排放和/或高能源强度行业类别（称为双高行业），这意味着对能效和能耗的严格配额。然而，使用当地可再生能源的数据中心可以获得更优惠或更灵活的配额，根据 2021 年底发布的一项政策，不断增加的可再生能源消费将不受配额约束，这意味着新的 100% 依赖可再生能源的数据中心将不会占用省内能源配额。¹⁶ 更高且波动较大的煤电价格以及鼓励使用可再生能源的政策，都是激励灵活性措施以提高可再生能源消纳的主要措施。

为了全面实现中国 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标，中国电力部门需要进一步改善发电、蓄电、传输和负荷等各方面的运行灵活性。根据相关研究，预测电力现货价格将在需求侧灵活性方面发挥更重要的作用，数据中心会成为电力现货市场、辅助服务市场和跨省及跨地区交易市场的重要参与者。更高的灵活性可以使数据中心在满足中国对可靠的数据服务迅速增长的需求之外，为绿色电力系统和中国碳中和目标的实现做出贡献，同时还能获得额外收益。

1.2 数据中心灵活性需求的市场化

可再生能源在电力系统份额的日益增加，为电网带来了更清洁、更多变的能源，这使得电力调度实时供需平衡变得越来越复杂。根据 2019 年国际能源署的报告，在某些电力系统中，数据中心可用来平衡电网运行和提供其他系统服务，帮助消纳风电资源，在可以通过价格信号调节的需求侧响应中，发挥着越来越重要的作用。¹⁷

数据中心的形势越来越多样化，这取决于它们的规模（小型或大型数据中心）以及所从事的活动类型（大学和研究中心的数据中心、公司拥有的数据中心、服务器托管数据中心、超大规模数据中心）。由于数据中心具有通过转移工作负荷（无论是空间上还是时间上）实时调整用电需求的潜力，尤其适合用来为电力系统提供必要的灵活性。数据中心需要通过应急发电机和电池维持不间断供电，因此还具备调节电力的巨大潜力。上述所有方面都有助于缓解电网拥堵。然而，正如《德国可中断负荷条例（Verordnung zu abschaltbaren Lasten, AbLaV）》所概述的那样，德国只允许负的而不是正的储备功率。

在德国，需求侧灵活性——亦称为需求侧管理（DSM）——尽管依然是有待开发的资源，但其重要性已经得到了越来越多的认可。Team Consult 预计德国当前的工业需求侧灵活性潜力在 3~5 GW 之间。¹⁸ 德国的潜力预计还会增长，到 2050 年将达到 6.6 GW，其中 76%（5 GW）将加以利用。¹⁹ 但要找到更多的灵活性提供者仍然充满挑战，dena 针对需求侧管理的多项研究表明，大多数工业部门都能够通过调节自身负荷来匹配发电量，从而提供需求侧灵活性。因为数据中心具有灵活的负荷，所以是提供需求响应的最优潜在对象。通过对工作负荷的管理可以提供更高的灵活性。²⁰

中国一般通过静态的峰谷电价制度来激励需求侧灵活性，未来需要扩大电力系统的灵活性来源。系统供求将更多依赖于市场信号，通过价格对电力系统进行更动态的引导。为了激励需求响应，中国也出台了相关政策，但到目

前为止，还没有任何针对数据中心直接进入市场的政策，这降低了数据中心运营商提供灵活性的意愿，数据中心运营商总是将提供可靠的数据服务视作自己的核心能力和主要的利润来源。

1.3 提高数据中心灵活性的障碍

尽管一些研究表明，数据中心可以在需求侧提供很大的灵活性，但仍然存在一些障碍。在 dena 和 GIZ 举办的两场闭门研讨会上，行业专家和业内人士对数据中心灵活性所面临的挑战进行了阐述。以下三个维度是不同类型数据中心所面临的主要挑战，来源于一位与会专家：

- 技术维度：实现数据中心的灵活性在技术上是否可行？
- 组织维度：数据中心运营商在灵活运行数据中心方面是否具备必要的工具和责任？
- 商业维度：在电力市场上销售灵活性对数据中心运营商是否有经济吸引力？

针对以上三个维度的挑战，数据中心的主要业务是向客户提供数据服务，而不是参与电力市场或者与电力和供热部门耦合，确保安全稳定的运行对数据中心来说至关重要，在研讨会上，多位与会者提到了这一点。对于某些类型的数据中心，每停机 1 秒的停机成本大约为 120 万美元。因此，数据中心运营商认为引进能效或灵活性措施是有风险的，因为这些措施会影响数据中心的运行。²¹灵活性和可靠性之间的矛盾是运营商担心的主要问题。

- 运营商认为参与需求响应或者电力市场从管理的角度来说过于复杂，尽管可能带来经济收益，但市场的复杂性和数据中心运营商缺乏经验都阻碍了数据中心进入市场。
- 从电网运营商的角度来看，也存在巨大的挑战。加州理工学院的研究分析了数据中心操控市场价格的可能性，通过对大型数据中心的调研，发现巨大的数据负荷有可能形成市场支配力以及数据中心运营商操控价

格的可能性。因此，对于在一定程度上放宽对数据中心参与需求响应的监管规定，电网运营商也心存顾虑。²²

为了鼓励数据中心运营的可持续性及其灵活性，应在政策上提供适当的激励。在与德国专家的访谈中，发现了以下障碍：

- 关于通过储能实现灵活性，德国数据中心必须支付《可再生能源法》规定的蓄电池充放电费用，而这使得蓄电变得没有什么利润。
- 一位受访者称，对于大多数数据中心来说，利益相关方之间存在一条价值链，例如对于共用场所的设施来说，硬件由硬件出租服务商所有，而建筑物和 IT 基础设施由运营商负责。由于涉及众多的参与方，加之严格的服务协议，使得任何运营的调整都很困难，因为必须在各利益相关方之间达成一致。
- 为了在 2030 年之前实现数据中心的气候中和，欧洲和德国已经在推行一些自我监管倡议。²³但是除了这些倡议之外，在国家层面上缺少综合措施，也缺乏鼓励灵活性和能效投资的激励措施。

多年来，中国一直鼓励各行业的需求侧响应（或者需求侧管理），但在实践过程中也存在诸多障碍。

中国的大多数省份都采用分时计价制度（TOU），典型的峰谷价差为 2:1 或者 3:1。国家发展和改革委员会（NDRC）于 2021 年 7 月发布的一项政策，鼓励各省和地方在峰谷发电量差值高于 40%²⁴的地区将分时计价比例设定为至少 4:1，一些省份已经做出了相应的回应。此外，中国也鼓励发展虚拟电厂融合用电负荷的政策，同时鼓励需求侧参与电力市场。

十多年来，中国一直致力于推动行业需求侧响应，包括能效提升及大型电力消费者的可中断负荷方案。这些方

案存在一个根深蒂固的历史问题，就是政策的推动依赖于地方政府的行政计划和补贴，而不是参与电力市场的收入。因此，即便是能够大幅度节约成本的负荷削峰，也被官方视作代价高昂。

考虑到当前数据中心市场的激励措施更多关注数据服务的可靠性和整体能效（以电能利用效率PUE衡量），根据访谈我们认为当前引进更大的实时电价信号或数据中心参与电力市场或其他市场措施都不足以激励数据中心的灵活性。IT行业可能会等待更直接的行政法规出台，包括各省出台政策要求数据中心达到一定程度的灵活性、高峰时段的现场储能或者电网公司将灵活性作为连网的前提条件等。

可行的做法是由IT行业制定一个国家级别的碳中和总体规划，包括可再生能源消费、调峰以及特定地区通过余热利用提升能效等。考虑到对于数据中心行业缺乏相应的激励措施，若不采取行政干预，仅依靠电力市场价格信号的刺激，不太可能实现计算负荷的时间转移或者空间转移。

1.4 对政策支持的需求

德国

为了更好地理解数据中心参与市场及可再生能源利用等相关问题，我们采访了德国数据中心领域的专家，受访者包括数据中心、研究机构、网络运营商以及其他活跃在该领域的机构。

受访者就德国数据中心在灵活性和能效改进的潜力、实现这些改进所必需的政策、激励数据中心参与电力市场和利用可再生能源电力的政策等阐述了想法。受访者指出数据中心已经配备了高性能电池作为电力故障时期的备用电源，但不清楚是否有任何具体的财政激励政策，能够推动数据中心安装电池为电网提供服务。

采访强调了数据中心为电网提供服务的几种选择。受访者提到以负荷转移和使用应急电源作为平衡电网的方法，但是确保运行安全依然是数据中心运营商最关心的问题。向电网提供服务以获取额外收益被视作一项副业，只有通过相应的更有力的激励措施，才可能对数据中心产生吸引力。

一些受访者指出，这些激励措施应该设计得尽可能简单，以便于数据中心采纳。另一个建议是出台相关政策，确保数据中心和电网之间数据交换的透明，例如电网需要获得数据中心能耗及可用电网容量的数据。公开或者半公开的信息平台有利于获取供需负荷信息，有助于推动数据中心采取更灵活的行动。

关于数据中心参与电力市场，大多数受访者都不认为这是数据中心的主要业务，一些受访者认为任何让数据中心参与的倡议都应该由国家主管部门或者电网公司发起，如果没有这样的倡议，数据中心不太可能自发地提供此类服务，行业受访者还赞成坚持自愿而非强制的激励措施，鼓励数据中心参与辅助服务市场。此外，还探讨了电网运营商在整合数据中心等大型电力用户所面临的挑战。

受访者提到了创新型余热利用案例，例如推广数据中心余热利用的地方激励措施。这个想法适用于柏林等缺少重工业、无法为城市的供热提供余热的城市。当被问及数据中心利用可再生能源的主要动力时，受访者指出两大要点：实现碳中和的企业责任和碳定价。访谈结果表明，德国还没有管理数据中心运营的具体立法，但受访者提到欧洲层面的政策，如《行为准则》和《数字战略》等，这些政策最终也可能被纳入德国的立法。

数据中心所有者和运营商可能会欢迎本研究所涉及的一些具体政策，前提是这些政策不会严重影响与数据服务有关的主要业务。通常数据中心需要确保持续而稳定的运

行，因此数据中心所有者和运营商对灵活性措施会有所顾虑，特别是当这些措施影响其正常运营的时候。

一位受访者提供了一个可能的解决方案，即中间平台承担责任，提供一整套关于灵活性和能效的措施，包括余热利用、参与电力市场和工作负荷管理等。

中国

对中国专家的访谈结果和德国类似：中国数据中心行业在提供需求侧灵活性和整合可再生能源方面发挥的作用仍然很小。受访者提出了各种解释，但都聚焦于一点，即提供可靠而快速的数据服务可以获得巨大且不断上涨的收益，这远远超过参与电力市场可获取的收益。此外，中国受访都提到了参与电力市场的一些障碍：

- 网络物理带宽限制阻碍了地理负荷转移；
- 大容量的现货市场或辅助服务市场的缺乏阻碍了负荷的时间转移或者地理转移；
- 即便现货市场和辅助服务市场发展起来了，也需要进一步的激励和规划措施，因为电力价格差异可能不够大，不足以抵消实现负荷转移的成本。

现行的电力市场激励措施，不仅不能很好的激励数据中心提高灵活性，而且电力市场结构还积极鼓励数据中心

维持稳定的负荷，更注重对提高能效进行奖励。事实上，要达到一个理想的电能利用效率，往往取决于是否能实现稳定而高效的利用率，这本身就不利于像负载转移这样的灵活性操作。²⁵因此，受访者认为数据中心行业可能还在等待更具体的政策措施，包括与灵活性相关的强制要求，在此之前，他们不会采取任何成为灵活负荷的行动。

和德国受访者阐述信息平台的潜在价值一样，提高数据透明度也可能有助于推动中国数据中心更绿色、更灵活的运行。目前，客户对于数据中心的主要评价标准是可靠性、速度和效率。尽管一些数据中心已经开始安装分布式可再生能源或购买可再生能源电力，但这仍然是少数，与数据中心参与电力市场无关。受访者认为冷却或供热的灵活应用在某些地区具有潜力。通过降低供热和冷却的电力消费，可能会显著促进数据中心的需求侧响应。此外，受访者认为数据中心的供热和制冷取决于地方对数据中心和产业园区参与的支持性政策。为了更大规模地整合灵活性和清洁能源实践，中国数据中心行业需要迈出的最大一步就是要纳入碳中和计划——针对企业、行业和各个省市，这样才能促进数据中心向拥有更多清洁能源的省份迁移，或者通过其他方式积极利用可再生能源。

2 数据中心的灵活性选项

将更高比例的可再生能源纳入电网，需要在发电侧和需求侧有更大的灵活性。提高需求侧的灵活性可以改善供需的动态平衡，降低消费者的成本。数据中心可以在需求侧灵活性方面发挥作用，但这种潜力仍远未充分实现，数据中心可以以多种方式提供灵活性，在大多数情况下，它们只需要优化运营就可以做到这点。

本章将探讨数据中心实现负荷灵活性的各种方式：

1. 数据中心的工作负荷是不断变化的，可以在一天内二次调度和转移，以更好地适应电网需求。考虑到其自身转移工作负荷和运行的能力，数据中心尤其适合充当灵活性负荷；
2. 数据中心不间断供电系统的电池也可以促进灵活性；
3. 优化服务器的运行可以实现显著节能，并能改善数据中心的用电负荷管理；
4. 不同数据中心之间的工作负荷空间转移，而不是同一数据中心内工作负荷的时间转移。数据中心集群可以在空间和时间上转移工作负荷，从而有效地将负荷从高需求区域转移到低需求区域，缓解电网拥堵或匹配当地的可再生能源输出。²⁶

值得注意的是，正如在研讨会中讨论的那样，在提高灵活性方面，没有一个放之四海而皆准的解决方案，不同类型的数据中心需要不同的解决方案。以控制领域为例，对于主机托管数据中心来说，采暖、通风、冷却、不间断电源（UPS）和蓄电池（EPS）属于运营商的控制领域；而对于企业数据中心，IT 硬件也属于控制领域。²⁷本章将探讨几种灵活性选择，以及它们如何应用于各种类型的数据中心。

2.1 时间上转移工作负荷

转移工作负荷是一种简单直接的办法，能够提高数据中心的灵活性，促进可再生能源的整合。尽管有一定潜力，

但实际上负荷转移在行业中仍然比较罕见。本章将分享一些文献中找到的关于负荷转移的发现和案例，以及中德相关政策和实践。

数据中心每天的工作负荷就是用户通过不同设备提交的计算服务需求，每一种工作负荷对于计算的要求不同。对于需要在较长时间内处理的工作负荷来说，可以在电价较低或者可再生能源较充沛的时间段处理，或者说为了满足平衡能源或者解决电网瓶颈的目的，可以在时间上转移负荷。除了加强数据中心的灵活性潜力之外，负荷管理也可以通过利用动态电价，为数据中心运营商带来经济优势。从电网运营商的角度来看，应用负荷管理能够更好地管理电网。

各种模型和实验已经显示了负荷转移如何在实践中发挥作用。关于时间转移，通过都铎·席亚拉（Tudor Cioara）等人的模拟，可以看到一个通常在早上和晚上经历峰值负荷的数据中心，负荷转移如何能够发挥作用。²⁸大部分延时容忍的工作负荷可以转移到中午，那时电价较低。劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）2012年完成的一系列实验展现了多个小型数据中心如何能够通过低优先级备用工作负荷的二次调度，将整体负荷减少30%。实验要求手动关停一些服务器阵列，在一个案例中，还要求手动调整冷却定值。尽管这些手动调整可能实现自动化，但必须在设计阶段就进行额外的投资和规划。劳伦斯伯克利

国家实验室的研究也提出了地理负荷转移，但因为缺少自动化控制，所以并没有进行实验。²⁹

在实践应用中，数据中心工作负荷二次调度需要考虑诸多因素，例如工作负荷的服务质量要求、服务器的处理能力限制以及工作负荷二次调度的时间延迟。在某些情况下，例如当服务器具有充分的内存、完整的数据和CPU 冗余时，才有可能将服务器处理负荷从较高工作负荷强度的时间段转移到较低强度的时间段。

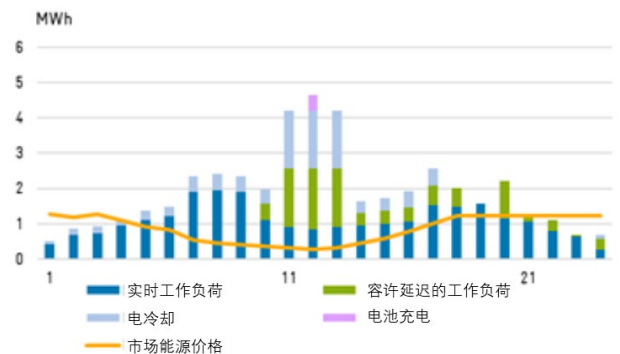
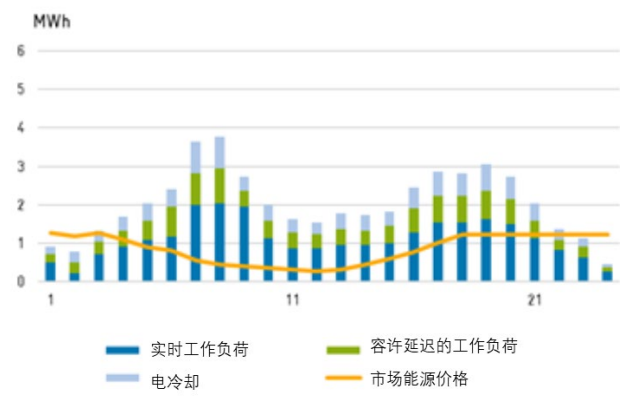


图 2：数据中心能量分布曲线基准线（上图）和基于适中的能源价格进行调整后的数据中心能量分布曲线图（下图）³⁰

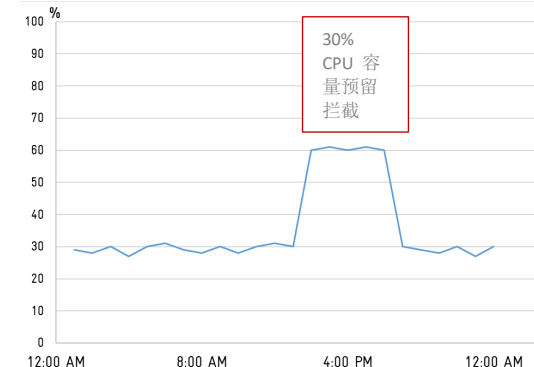
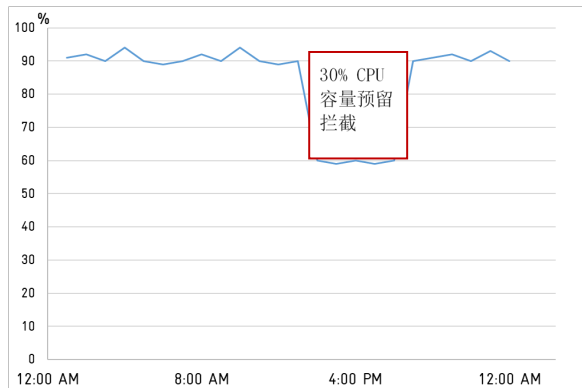


图 3：一个集群的 CPU 利用率下降（上图）和另一个集群的 CPU 利用率上升（下图）³¹

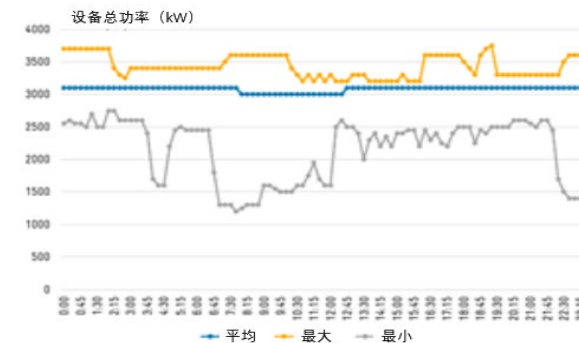
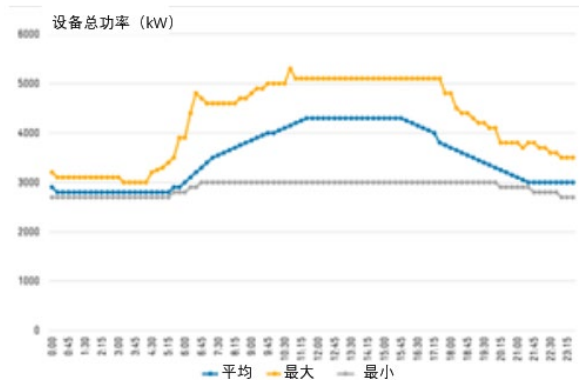


图 4：研究/学术用途的数据中心 2008 年每日负荷形状图（上图）和平均每日负荷系数较低的混合用途的数据中心（下图）³²

数据中心负荷曲线的形状和可预测性一定程度上决定了负荷转移在实践中可能发挥的作用。劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 的研究表明数据中心的负荷曲线存在巨大差异, 这取决于数据中心类型、工作负荷类型以及季节性冷却需求。³³在某些条件下, 或者在较长的时间期限内求平均值, 数据中心的负荷可能波动不大; 但在另一些情况下, 或者按天计量, 则其负荷可能波动较大。在某些季节, 数据中心的冷却负荷与峰值电网负荷重合, 就会导致更高的用电成本, 这可能会使热能储存更具有吸引力。

但是, 某些建模研究存在缺陷, 因为它们假设能够提前很长时间就规划好工作负荷调整。这样做需要先进的预测和全球数据, 但这不是大多数数据中心运营商的真实情况。此外, 很多负荷转移模型本身就要求有很长的计算时间, 并不适合实时调度需求, 最多可能适用于提前一天的计划或者用于评估总体的工作负荷调度。地理负荷转移要求协调不同位置的多个数据中心, 这可能仅对最大型的运营商可行。³⁴

另一个关键问题是关于数据中心灵活调度的研究缺乏与计算领域研究的融合, 对数据任务的规模、光纤带宽以

及云计算网络拓扑结构等问题关注的较少, 这降低了实施灵活性措施的可行性。

数据中心执行的任务复杂多样, 对服务器耗电量有不同的影响。灵活调度要想在实践中发挥作用, 就需要给数据中心的实际运行提供激励, 刺激其调整工作负荷、参与网络平衡以及与可再生能源相结合。根据彭博社新能源财经的一项最新研究, 有强烈的迹象表明, 大型数据中心运营商可能会比其他运营商更快地采用新的灵活性方法, 他们是第一批通过签署电力购买协议 (PPA) 开始利用可再生能源的公司之一, 这一举措随后被主机托管数据中心所效仿。³⁵然而, 主机托管数据中心是否也将成为电力市场灵活性的贡献者仍是一个未知数。

德国的访谈结果和实例

“绿色数据中心自适应计算 (AC4DC)”项目提出了一个数据中心转移工作负荷的案例。以用户为导向的解决方案是“数据中心自适应计算”项目的一个重要方面, 此研究的受访者也强调了同一观点。

引述 1——德国数据中心研究员：“且不论电网稳定性服务如何, 对数据中心而言, 最重要且需要始终保证的是数据中心高水平的系统稳定性。”

AC4DC 项目

“绿色数据中心自适应计算 (AC4DC)”是德国联邦经济和气候保护部资助的一个 3 年期研究项目, 其研究主题包括了工作负荷的时间和空间转移。在此项目的框架内, 分析了数据中心负荷管理的各种可能性, 提出了优化数据中心运行的解决方案。使用项目开发的算法, 探索在数据中心不同服务器之间转移单个服务的潜力——同时需要满足服务质量要求。这使得临时完全关闭部分硬件成为可能, 通过这种方式, 数据中心的能源消耗总体有所下降。

高水平的系统稳定性依然是数据中心运营商最关心的问题。可用性和可靠性至关重要，特别是对关键业务型应用而言。因此，一些受访者对在高性能计算（HPC）数据中心实现灵活性不感兴趣。

引述 2——德国数据中心运营商：“我们的成本密集型高性能计算硬件全天候满负荷运行，处于超额运行状态，无法找出一种让负荷管理有利可图的商业模式。与普通的数据中心不同，在运行超级计算机时，负荷管理几乎是难以想象的。”

然而，一些受访者认为某些任务有可能被转移，这取决于所提供服务的类型。

受访者列举了可能对负载转移感兴趣的数据中心类型，如大学或研究中心、超大规模公司使用的数据中心。另一方面，主机托管提供商一般不采用负载转移，因为它们本身并不运营硬件。一位受访者提出的另一个建议是，将需求拆分到分布式的小型数据中心。

引述 3——德国数据中心专业人士：“（……）日间的服务请求多于夜间。（……）访问网店或者登录邮箱需要立即实现，而备份、视频渲染、科学模型、关键词标记、下载、数据处理等操作更能容忍延迟。可以基于电网情况，把这类任务转移到其他时间计算。”

引述 4——德国数据中心研究员：“例如，大学或研究中心的数据中心尤其适合灵活运行，因为它们要进行的复杂计算并不一定对时间有严格要求，因此可以根据电力市场情况进行转移。当然，这必须有经济上的回报。”

引述 5——德国数据中心研究员：“另一种可能性是在电网状况不同的地点建设分布式数据中心，从而能

够根据电网状况拆分需求：例如白天使用靠近光伏发电厂的地点，晚上使用接近风电场的地点。”

中国的访谈结果

在中国的访谈结果表明，数据中心负荷转移在平衡可再生能源或者提供需求响应服务方面存在很多政策和市场障碍。³⁶第一个障碍是电力市场更偏好稳定负荷，而不是灵活负荷。大型电力用户通常会签订月度或年度用电合同，从而实现电网资源和燃煤电厂等发电资产的高利用率。但是，这种负荷的高稳定性会阻碍储能、负荷管理和电网优化等各种灵活性选择的发展。

引述 6——中国数据中心专业人员：“数据中心对灵活用电方案不太感兴趣，因为目前数据中心的用电相对平稳，是电力系统的优质负荷，数据中心可以获得较低的电力价格。”

引述 7——中国数据中心专业人员：“数据中心负荷是电力系统的优质负荷，电力系统给予了较低的电价。[燃煤]电厂更喜欢这种负荷，因为能减少启停损耗。灵活运行可能导致数据中心无法继续享受当前双边合同中约定的低电价

此外，取决于数据中心的类型，有些数据中心可能具有相对平稳的负荷，而有些数据中心则负荷多变。

引述 8——中国数据中心专业人员：“公司有很多实时业务，用户的需求时间段非常多变，这意味着数据中心的 IT 负荷并不平稳。”

引述 9——中国数据中心专业人员：“我们数据中心的峰谷负荷波动通常不会超过个位数，保持在 10% 以内。”

引述 10——中国数据中心专业人员：“数据中心负荷的优先级是根据负荷类别、排序等复杂的程序来确定的，但各级别负荷的比例并未具体确定。”

中国的访谈显示，缺少帮助电网规划者和能源政策制定者识别数据中心的公开信息，这也妨碍了出台普适性的政策。受访者指出，通信基础设施——带宽使用——是负荷时间转移和地理转移的瓶颈，实际上因为带宽的原因，大多数数据中心都选址在大城市周边（靠近用户），带宽问题阻碍了数据中心向贵州和内蒙古等偏远地区迁移政策的执行。

引述 11——中国电力部门专业人员：“带宽目前尚未达到可以互联互通的状态。跨地区任务调度引起的业务延迟是无法接受的。”

引述 12——中国学术专家：“数据中心主要遵循传统的业务负荷调度。电力市场改革尚不完善，还没有充分的价格信号。因此，目前的调度是基于传统的习惯，而没有考虑电价的时间和空间变化。”

引述 13——中国学术专家：“电网和计算网络将会融合，但提上日程并不容易，因为涉及到标准、保密性和协议等。”

2.2 负荷转移及缓解电网拥堵

跨地域的可再生能源整合通常要求有高压输电线路，但由于可再生能源发电量的波动性，造成实际造价比较高，尤其是当可再生能源渗透率超过 30~40% 的时候。利用数据中心负荷侧灵活性有助于在更大范围内整合可再生能源。但是，不论是欧洲还是中国，一些地区的电网规划者简单地把数据中心归为能源密集型行业，甚至在电网规划过程中没有充分考虑数据中心，这导致数据中心在特定地区更

为集中，进而导致电网拥堵。激励数据中心在不同地区之间灵活地转移工作负荷，可以加强电力和通信网络的有效利用，减少电网瓶颈。而值得注意的是，这种工作负荷的转移可能会导致数据中心的能耗增加。

缓解电网瓶颈的一个重要方法是数据中心之间的负荷转移，将多个数据中心合并成一个虚拟的数据中心网络，可以提供巨大的需求响应。

在“数据中心联盟（DCF）”的各个数据中心之间，根据既定规则，不断地分配或“转移”负荷，例如：可以将数据处理需求分配给附近的数据中心，或者如果该数据中心过载，可以转移到 DCF 中另一个同样适用的数据中心，用户甚至不会察觉。³⁷在单个数据中心内，只能在时间上转移负荷，而在 DCF 中，负荷既可以在空间也可在时间上转移，从而提供必要的灵活性。³⁸通过这种方式，可以在维持数据中心运行可靠性的同时，缓解本地电网拥堵的问题。

在超大规模或云数据中心内，工作负荷可以在场外转移和处理，这就要求必须在可处理的时间范围内，将工作负荷转移到电价更低或者可再生能源更充沛或者有特别处理负荷要求的地区。通过调整处理工作负荷的时间和地理区域，数据中心可以实现更大范围内的最优资源配置。

但是，并非所有的工作负荷都可以实现场外转移，例如：某些工作负荷计算量不大，但却需要检索巨大的数据文件，调度此类工作负荷，必须同时对这些数据进行打包和转移。最重要的是，负荷的差别化调度必须首先对负荷类别及其相对优先级有所识别。

电网主导的地理转移可以激励数据中心运营商，例如向那些选择在拥堵程度较低的地区建立数据中心的运营商提供较低的连网成本或电网成本。这种方法也可能适用于某些类型的数据中心，它们可以选择将业务转移到离数据中心枢纽更远的地方。

德国的访谈结果

在可再生能源比例较高的电力系统中，电力系统运营商在平衡供需方面面临更多的挑战。电力运营商必须管理比过去更为复杂的系统，整合更分散的资产，如数据中心。为了确保电网平衡，数据中心也必须根据电网情况调整其运营。从电网运营商的角度来看，行业的进一步扩张必须基于电网友好性原则，并考虑电网的需求。德国专家的访谈表明，如果根据电网需求布局数据中心，将会激励各类数据中心的迁移，最终形成更有利于电网发展的地理格局。

引述 14——德国数据中心研究员：“另一种可能性是根据不同的电网状况，在不同的地点布局小型分散式数据中心，这样能够实现根据电网状况拆分需求。”

引述 15——德国数据中心运营商：“数据中心不再集中在电力拥堵区域，而是采用更加分散的结构，这可能是更有利的，也可能刺激数据中心的迁移，实现更具电网友好性的分布。”

中国的访谈结果

中国近期将建设数据中心的重点放在资源丰富的地区，所以地理上的负荷转移是进一步研究的重点。对于那些政府已经优先考虑在那里新建数据中心集群的偏远地区来说，情况尤其如此，这些地区将整合大量的带宽连接、数据中心和可再生能源。

2.3 释放储能潜力

储能可以为电网提供辅助服务，确保电网可靠性。除储存能量外，电池还是绝佳的短期电力灵活性提供者：电池可以在几秒甚至更短的时间内从零电力转变为最大充电量或者完全放电，可以在峰值容量下维持充放电 1 小时。

对于电力系统来说，能够快速实现需求响应或适应可再生能源波动性的灵活性资源是至关重要。

大多数数据中心都配有储能系统和备用发电机，在发生电网故障时可以为服务器提供备用电力。数据中心的自控系统已经设置了电池的充电和运行时间，通常可以在数小时甚至跨天切换。除了停电期间使用不间断电源（UPS）作为备用电源外，数据中心还利用 UPS 消除电压扰动。

在数据处理率较低的时段内，数据中心储能系统可以通过调节电力频率和平衡负荷来赚取收益。在 2011 年的一篇文章中，拉胡尔·乌尔冈卡（Rahul Uргаonkar）等人开发了一种在线控制算法，用于优化数据中心不间断电源调度，以降低成本并提高效率。³⁹

2012 年，瓦西里奥斯·科托里米斯（Vasileios Kontorinis）等人展示了利用数据中心储能系统进行峰值负荷均衡可以获取经济收益。⁴⁰ 2016 年，Yuanyuan Shi 等人的研究表明：通过优化数据中心不间断电源运行降低峰值负荷，既可以降低分时电价和电费，也有助于频率调节，有可能降低 20% 的成本。⁴¹ 当从电网中削减电力需求时，由于较低的最大容量和较低的容量价格，可以实现更低的电力和并网成本。由于数据中心的 IT 负荷相对平稳，因此调峰主要在夏季冷却负荷增加时才有意义。

德国的访谈结果和实例

数据中心的电池，无论是独立的大型电池还是虚拟电厂（VPPs），都可以实现负荷的时间转移，从而降低电价较低时段的公共电网负荷。总而言之，电力市场只是利用电池的额外容量而不是满负荷容量。小型电池的成本不断下降，而电价不断升高，这可能成为推动该技术发展的诱因。然而，目前电力市场缺乏针对数据中心采用电池存储作为灵活性资源的激励措施。除了缺乏激励措施外，一些数据中心认为将不间断电源电池用于备份以外的用途，

风险太大。值得注意的是，德国许可制度限制了最大作业时数，通常是每年 200 或 500 小时。

MASTER+ 电池

一个创新型灵活性案例是莱茵集团（RWE）和雷乐士（Riello）公司开发的电池系统，它被集成到一个数据中心，用于增加储能容量，提供一体化的电池监测。通过这种方式，在电网不平衡的时候，Master+ 电池组可以自动从电网取电或者向电网供电。

这种不间断电源电池在能源交易公司莱茵集团的支持下销售，为数据中心从能源市场获取了额外收益。在数据中心逐步扩张的第一阶段，两个不间断电源电池系统（均为“Master+”型，功率 250 KW）和一台功率 1,100 KW 的应急发电机整合，以保障应急供电；之后不间断电源容量增加到 2 MW，并增加 2 台应急柴油发电机。

针对大型电池储能系统（LSB），应建立一个适当的框架，以解决与电池储能系统蓄电税费相关的问题。2017 年《可再生能源法》和欧盟指令 2019/944 的最新修改废除了双重征税的做法，但是免税的不明确性影响了大型电池储能系统的运行，并进而对其商业模式产生质疑。根据德国最新政策，《可再生能源法》中的有关税务会在 2022 年 7 月 1 日完全取消。理想的做法是简化相关法规，广泛实现数据中心电池储能系统的应用。

引述 16——德国数据中心运营商：“因为数据中心采用蓄电池作为备用电源，所有有可能利用蓄电池增加其对电网的灵活性（与电网需求去耦）。此外，储能系统可用于提供电网服务，如果数据中心允许提供电网服务，其运行就可能更加灵活。通过经验可以预测服务时间，例如，访问云应用程序。”

引述 17——德国数据中心专家：“数据中心正在采用电池储能来实现更高的可靠性，所以将蓄电池与电网结合存在巨大障碍，可能会导致在紧急情况下数据中心的电力不足。任何降低可靠性的风险都应当被避

免，所以需要适当的激励措施，来吸引数据中心蓄电池的额外用途。”

2.4 优化服务器使用

另一个可能显著提高数据中心灵活性的措施是优化服务器的利用率。在可持续管理软件的帮助下，可以确定服务器的平均利用率，如果利用率较低，则代表大部分装机计算能力未使用，但是空闲状态下仍然在耗电。⁴²实际能耗应该与服务器的实际利用率成比例（亦称为“能耗成比例计算”）。dena 发布的节能数据中心指南指出：目前还没有普遍认可的程序来确定服务器的能效，即每瓦特的计算能力。但是，美国标准性能评估协会（SPEC）的 SPEC- power_ssj2008 V1.11 基准已经清楚地解释了可见的效率差异。通过 SPEC 测试，可以发现中等性能水平的服务器可以提供最有利的计算能力/能耗比。

尽管通常是基于最大性能配置服务器，但也存在更多动态配置，可以用性能换取更高的效率，并最终有助于调整数据中心的功耗。⁴³通过动态电压频率调节（DVFS），服务器在最低功耗下处理工作负荷；这种技术对于数据中心来说尤为重要，因为它可以在降低能耗的同时提高灵活性。⁴⁴

虚拟化服务器还可以帮助在低利用率时将运行在多个服务器上的多个工作负荷分组到一个服务器上，从而有效地减少运行中的服务器数量。由于每个服务器在空闲模式下的组件都有一个基本负载能耗，因此减少活动服务器的数量可以显著降低数据中心的能耗。

2.5 政策建议——德国

数据中心运营商认为参与需求响应计划有一定难度。尽管有很多可用的负荷转移技术，但数据中心运营商主动优化参与需求响应依然困难重重。⁴⁵

在几次访谈中，数据中心专家提到参与需求响应的一个重要前提是电网和数据中心运营商之间的透明度和信息

共享，因为数据中心需要根据电网的可靠信息来进行负荷调整，并据此提前做好时间安排。政策制定者和电网管理者必须与需求侧参与者合作来制定政策和开发信息平台，以提高透明度，这一点至关重要。

德国的需求侧响应主要采取可中断负荷的形式，由输电系统运营商（TSOs）与大型能源密集型用户直接签订合同。⁴⁶ 然而，小规模的数据中心也可以通过虚拟电厂（VPPs）提供灵活性潜力，从而在需求侧发挥重要作用。通过负荷控制协议，一个小型数据中心可以向配电系统运营商（DSO）转让其有限时间内用电设备电力消耗管理的权限。目前，德国电网规范的要求是最小容量为 5 MW 每分钟的储备和 1 MW 的初级控制。作为提供这一服务的交换条件，数据中心可以获得配电系统运营商的电网费优惠。⁴⁷ 然而，数据中心运营商可能认为这种操作会对其运行安全性造成过大的风险。

电网运营商也可以向数据中心提供优先电网连接，条件是数据中心为电网提供一定程度的灵活性，无论是通过发电、需求侧响应还是蓄电等方式。⁴⁸ 数据中心运营商可能会发现这种激励措施很有吸引力，因为他们希望快速获得电网连接，特别是在电网拥堵地区。然而，关于这个问题仍有很多争论，因为电网运营商的这种做法可能会对数据中心参与电力批发市场产生反作用，并导致对其他申请入网的数据中心的不公平待遇。⁴⁹

分时电价可以更好地反映实际的批发电价，可能激励数据中心将用电时间转移到电价更低、限制更少的时段。正如在研讨会上提到的，电力市场应该发挥核心作用，向数据中心传递这种激励措施以获得更多灵活性。

2.6 政策建议——中国

尽管中国已经执行工业负荷的分时电价，但受访者认为目前电力部门对稳定负荷的重视，严重抑制了灵活性的发展，并加剧了系统峰值负荷问题。鉴于最近中国大多数省份的峰值负荷都在快速增长，政策制定者应该确定并取消稳定负荷的优惠，并加强促进灵活性的政策制定。最新的双峰电价改革旨在提高峰谷价差，这可能有所助益，但可能还需要采取进一步的措施，确保其他激励措施不会与负荷灵活性背道而驰。

和德国一样，信息透明度是需求侧参与电力市场的关键环节，但目前仍旧缺失。关于现货市场的电价信息，包括日内和日前价格，是需求侧功能性参与的先决条件。此外，考虑到数据中心运营商并没有把电力视为其核心业务，数据中心运营商更需要访问虚拟电厂等聚合服务平台和电力市场参与最佳实践的行业数据平台。除了数据中心运营商自行提供的信息外，数据中心客户还缺乏有关数据中心运营商利用可再生能源方面的信息。电网行业信息平台可以帮助弥补这一差距。

中国目前的政策倾向于在电力过剩、气候凉爽的偏远地区建设数据中心，这为能效提升和可再生能源整合带来了显而易见的好处。但是，偏远地区带宽和传输能力不足，这降低了数据中心进行负荷地理转移的潜力，阻碍了消纳地区过剩能源和降低其他地区峰值负荷的能力。能源和 IT 政策制定者应该共同努力，制定一项联合政策，鼓励数据和传输基础设施的灵活使用。

考虑到数据中心运营商目前没有积极性，有必要引入峰值负荷转移的试点项目和配额，以证明其可行性，例如选取夏季超峰值负荷的几天进行试点。在地方电力短缺期间，政府下令切断工业用电时，参与负荷转移可能帮助数据中心提高其在“有序用电”政策下的可靠电力使用优先级。如果地理负荷转移可以缓和单个省份夏季电力短缺的状况，即代表数据中心在需求侧灵活性方面的潜力显而易见。

3 能效和灵活性措施：余热回收和冷却负荷

考虑到数据中心冷却负荷的重要性，冷却和热回收技术以及激励数据中心节能的支持性法规就显得尤为重要。冷却和空调通常占到数据中心基础设施能耗的一半以上，余热回收和冷却负荷的改进不仅有助于提高能效，而且有助于提高灵活性。

dena 最近发布了一份关于节能型数据中心的报告，其中有关于调整数据中心暖通空调（HVAC）系统电力消耗的措施，⁵⁰包括对替代冷却方案和智能调温等方面的考虑。引入这些措施后，暖通空调系统可以作为一个灵活负载，在不影响 IT 负荷或数据助理可靠性的前提下，有效地解决电网的需求。

学术文献中也包含了关于数据中心暖通空调系统灵活性和余热回收的案例和最佳实践。德兰（Tran）等人于 2015 年的一篇论文中研究了暖通空调控制系统和备用电机能源管理为电网提供服务的方法。⁵¹但是，该研究没有建立服务器机房的热模型，没有考虑数据中心服务器机房内部的温度变化是逐时变化的，而并非瞬间改变。暖通空调系统负荷取决于服务器机房空间的大小、通风以及外部温度等因素。

2016 年，辜贝利（Cupelli）等人的一项研究中，利用服务器机房的详细热模型和动态热负荷模型解决了上述问题。⁵²研究展现了暖通空调系统控制和备用柴油发电机如何实现用于频率备用的负荷转移，以及如何在数据中心使用液冷系统来最大限度地减少能源使用和碳排放。在这种情况下，3.5 MW 的数据中心可以节省超过 120 万欧元。Liu 等人的另一项研究表明，液冷系统如何能够在满足服务水平协议的同时，实现更大的灵活性，大幅提高可再生能源的比例。⁵³

3.1 数据中心余热利用

数据中心余热回收对不同场景和规模进行了研究。Qi 和 Ji（2016）的研究表明，数据中心的低温余热可用于发电厂的给水预热，使用该技术可以节省发电厂燃料，将发电厂的效率提高 2.2%。⁵⁴Zhi 等人（2013）的研究表明，对一个 10 MW 的数据中心进行余热回收系统改造的投资回收期可低至 4 到 5 个月。⁵⁵

利用余热，吸收式制冷机也能够吸收并冷却 IT 设备产生的余热，然后在 60°C 以上的温度下回收余热，将冷却后的空气送入服务器机房。Gao 等人于 2020 年的一篇论文评估了芬兰数据中心的能效和余热回收潜力，其结果表明大约有 97% 的电力消耗可以作为余热回收。⁵⁶数据中心产生 1 MW 的余热，可以满足一个面积超过 3 万 m² 的非住宅建筑物一年的用热需求。2012 年，艾克马（Aikema）等人研究了芬兰北部一个数据中心为温泉浴场提供余热的案例，结果表明数据中心的余热可以满足 6 万 m² 的热负荷。Davides Maidment 和 Tozer 的研究展现了如何以数据中心余热取代伦敦城市区域供热系统的燃气供热。⁵⁷

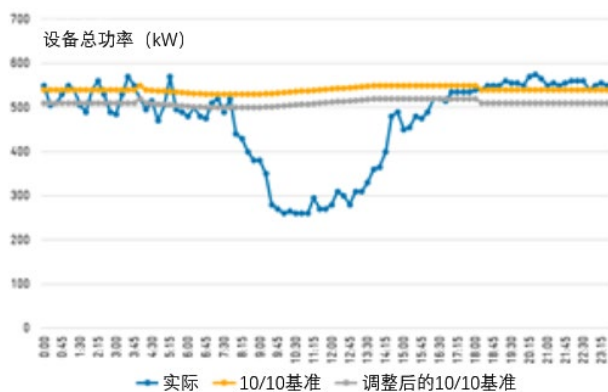
3.2 优化冷却系统

冷却负荷占到数据中心基础设施能耗的绝大部分，冷却负荷主要取决于 IT 负荷，而不是外部温度。前一章讨论过，即使 IT 负荷转移不完全可行，冷却负荷也有时间转移的潜力。劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）2012 年的一项研究显示，在电价较高的时间段，将温度设置点调高几个小时（见图 5），因为冷却系统在较低环境空气温

度下更有效率，因此即便没有更加精密的热能储存系统，预冷却也可能有助于节能。

图 5：服务器和计算机机房空调部分关停期间的基准分析

58



此外，对数据中心冷却系统的调整可能对耗电量产生积极影响。实现数据中心内尽可能最低的热积聚，主要取决于节能型 IT 硬件以及建筑物隔热效果。数据中心的温度降得越低，技术投入和耗电量就越高，建议明确每个数据中心实际上必须达到的温度，在可能的情况下，按照制造商允许的最高温度运行数据中心。

3.3 德国的访谈结果和政策建议

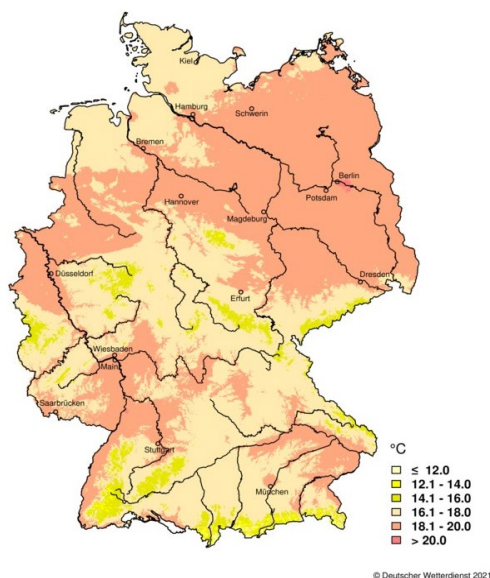


图 6：德国的夏季温差 59

在德国，数据中心密度最高的城市是法兰克福、柏林、慕尼黑、汉堡和杜塞尔多夫。这些地方的夏季温度相对较高（见图 6），可以对冷却负荷所提供的灵活性加以利用。

数据中心产生的余热是一种可持续的资源，如果利用得当，可以为供热行业的脱碳做出巨大贡献。尽管一些德国数据中心已经有余热利用（例如用于建筑物取暖）的成功案例，但因为种种原因，该解决方案尚未得到广泛应用。运行必要的热泵所需要的高额电费（即为热泵供电以将热量提高到合适的温度）受制于《可再生能源法案》税费，使得这种商业模型无利可图。另一个原因是缺少有兴趣使用数据中心余热的客户。

引述 18——德国数据中心研究员：“计算能力与使用余热为建筑物供热的组合听起来很有前途。到目前为止，其应用还是无利可图，因为存在《可再生能源法案》规定的分摊费用，热泵所需的电力成本过于高昂。”

引述 19——德国数据中心专家：“对于余热利用还没有明确的监管制度，每个社区以及每个能源供应商都可以随心所欲的使用。对于从数据中心回收余热，能源提供商或社区都没有特别的兴趣。不过，还是有一定的进展。”

一位受访者提到德国巴登-符腾堡州一个有趣的案例，该地区 100 个最大的社区和城镇正在大范围规划热网，并确定潜在的新热源，其中就包括数据中心余热。随着一项激励措施的出台，数据中心的余热利用得到了极大推动。一位受访者表示，这种方案特别适合柏林这样缺乏余热替代产业的城市。

引述 20——德国数据中心专家：“这个方案是行之有效的，尤其是在拥有大量数据中心的地区，例如法兰克福，以及杜塞尔多夫和柏林等城市。尽管在数据中心数量方面，柏林无法与法兰克福相比，但柏林没

有任何重工业。例如在杜塞尔多夫周边区域，人们可能认为利用炼钢厂余热更为合理，但在柏林等城市，利用数据中心余热确实是一个值得努力的方向。”

引述 21——德国数据中心运营商：“尽管数据中心余热品质较低，但它可用于供热。我们开发了一种方法“回收数据中心服务器余热用于建筑物供热（Gebäudebeheizung mit Serverabwärm）”，且已经通过这个方法利用服务器余热为附近的办公楼供热，不需要热传输。数据中心余热可以供应当地的集中供热，具有成为能源的潜力。”

建立适当的法律制度和激励机制是提高数据中心余热利用的关键。在欧洲层面，修订的《可再生能源指令》显著促进了余热利用。⁶⁰《欧盟数字战略》和《数据中心能效行为准则》是进一步包含余热利用规定的文件。将这些目标和规定纳入德国立法，可能会对已经应用或计划应用余热的数据中心产生巨大帮助。在德国的背景下，以下步骤可以加速余热利用：

- 针对可再生能源和余热为主要份额的创新性热网系统，有一项关键的资助项目“热网 4.0（Wärmenetze 4.0）”。应该扩大这个项目，考虑并评估新余热技术节约成本及能源的潜力。目前，该项目主要针对城市和市政公司，若向非公共供应商开放申请资助的资格，也可以为数据中心投资这类技术提供必要的经济激励。⁶¹
- 随着即将出台的热电联产法案（KWKG）修正案的颁行，可能进一步调整资助计划，为新的热网或现有热网的优化和扩大提供长期支持，促进对数据中心余热的有效利用。⁶²
- 热泵使用的电力不应该被收取高昂的电网费用，应该降低《可再生能源法案》税费。该税费已经在 2022 年 1 月 1 日降低，并很可能从 2022 年 7 月 1 日取消。
- 考虑到化石燃料即将逐步淘汰，余热是满足用热需求的重要来源。如果生成的热量是一种副产品，比如数

据中心这种情况，应该强制要求将这种热量并入热网，前提是有必要的热网基础设施。也可以确立并网和使用责任，责成热网运营商接受数据中心的余热。⁶³

对于冷却过程，许多数据中心运营商正在或已经在低温时间实施免费冷却，即不需要运行冷水机来实现冷却。以下情况可以实现免费冷却：

- 通过使用旋转热交换器，将数据中心内部的热量转移到外部空气中，实现空气对空气的冷却，这通常被称为“京都冷却”。⁶⁴
- 利用水回路将服务器的余热通过冷却回路传递到空气热交换器，将热量释放到空气中。这种热交换器可以是干式热交换器、湿式热交换器（绝热）或湿式冷却塔。

免费冷却要求释放到环境中的热流温度高于外界温度。小的温差需要大的热交换面积或支持水分蒸发，因此即使应用了免费冷却，通常也有一个冷水机作为后备，以确保即使在外部温度较高的情况下也能去除热量。替代冷却的方案，如直接水冷却，使余热温度始终高于环境温度。这些余热也可以被利用到其他过程中，例如生活热水。

引述 22——数据中心研究员：“水冷却的使用应该作为标准手段来强制要求，因为它可以轻易地输送到环境中或者可以利用余热。备用电源可以由热电联产厂（例如氢发电）提供，同时也可以提供冷却负荷。”

引述 23——数据中心研究员：“自动化管理可以非常高效，例如在需要负控制功率时，可以简单地减少冷却，从而让服务器消耗更多能量。”

下文提供了一个余热利用与冷却过程彼此融合的案例：

吸附式冷却系统

慕尼黑的LRZ数据中心是采用创新能效措施的数据中心之一，特别是采用了吸附式冷却系统。华氏（FAHRENHEIT）吸附系统将高性能数据中心计算机产生的余热转化为冷却系统的冷却能源。吸附式制冷剂将水冷却，这些水又可以用于空调房或者冷却服务器等其他设施。

因此，数据中心报告称用电成本大幅下降，同时也节约了能源，减少了二氧化碳排放。目前，制冷容量性能为 600 kW 的华氏吸附冷却系统是欧洲最大的系统之一。

通过使用电能利用效率（PUE）指标来计算各个数据中心的有效性，可以促进旨在提高数据中心能效所需的投资。目前斯图加特大学能源经济和合理用能研究所正代表德国环境署致力于开发一个数据中心登记系统和评分系统（www.peer-dc.de）。这类指标提升了企业在选择数据中心时的透明度，并可能反过来激励数据中心运营商进行这种投资。

冷却和余热利用在减少数据中心能源使用量方面具有巨大潜力。以下是加速数据中心能效改进的建议：

- 在地方热网采用这些解决方案是第一步。现有的热网需要进一步扩大，在规划热网时应认真考虑数据中心的可用余热。
- 总的来说，与自上而下地大规模部署创新型冷却及余热利用理念相比，在地方层面，即城市或者某些地区，小规模地落实推广这一解决方案和试点项目会更加容易。
- 正如在研讨会上所提到的那样，实施数据中心高效运行的强制性要求可能导致这些企业的行为变化。电费的节省可能为数据中心实施这些效率改进提供了足够动力，但强制要求可能是一个更好的解决方案。将数据中心行业纳入高排放和/或高能源强度类别是中国政

府已经实施的一项措施(见章节 1.2)。这导致了对数据中心的能源效率和消费实行严格的配额。

- 如前一章所述，设立一个专门提供一体化解决方案的中介平台----在提高能效方面，就是能源服务公司（ESCO）----也可以增加实施节能措施的数量。

3.4 中国的访谈结果和潜力

鉴于中国幅员辽阔，包含多个气候带，供热和冷却在提升能效以及提高中国可再生能源占比两方面都具有巨大的潜力。鼓励数据中心迁往内蒙古和贵州等偏远地区，可以帮助这些地区将数据中心负荷与可再生能源结合起来，同时减少由于这些地区的气候特征而产生的总体冷却负荷。

日温度变化是冷却负荷时间转移的主要参考指标。在夏季，中国北方地区的温度变化更大。

图 7：年平均日温差（°C）⁶⁶

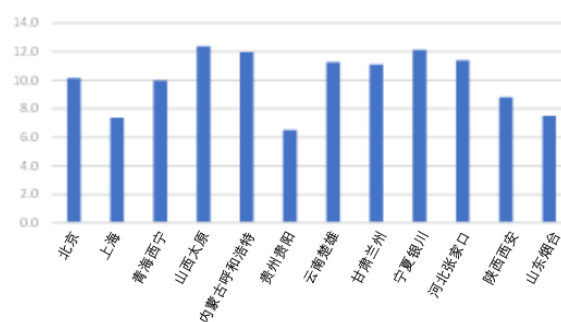
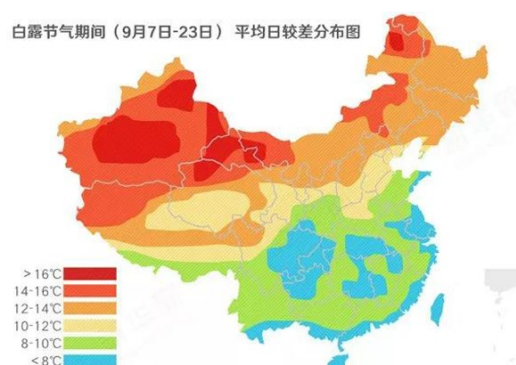


图 8：中国夏季温差⁶⁷



中国主要城市的昼夜温差比较稳定，气温差变化幅度在 7~10 °C 之间，标准偏差在 3~4 °C 之间。大多数北方城市的日平均温度波动在 10 °C 左右，但有些南方地区，比如云南也会出现 10 °C 左右的波动。这会增加这些地区的热能储存或冷却负荷转移的潜力。

中国的数据中心专家认可余热回收及调节冷负荷的潜力，既可以作为节能措施，也可以作为灵活性措施。

引述 24——数据中心专业人员：“数据中心的位置是余热回收的重要决定因素。位于中国北方、配有水冷却塔的数据中心适合提供用于供热和冷却的余热。”

但是，在提高余热利用率或冷却灵活性方面依然存在很多障碍。最常见的问题是需要跨多用户整合能源，并提供更有力的政策指导。数据中心通常位于工业园区，但工业园区可能缺乏回收余热或者调节冷却负荷以改进可再生能源整合的激励措施。相反，工业园区可能有鼓励园区企业提高负荷平稳性的激励措施。

引述 25——数据中心专业人员：“为了满足余热利用的需求，需要提前做好规划，支持全面的工业园政策及分区政策。”

3.5 中国政策建议

在中国，优化冷却负荷在提高能效及促进灵活性两方面都有巨大潜力，但要发挥这些潜力则需要大量的政策支持，才能克服上文描述的障碍。

地方及国家级政策制定者可以采取更多措施，鼓励数据中心与本地热网合作开展余热利用，尤其是在寒冷气候区。在适宜的气候条件下，制定行政目标可能是适当的激励方式。

考虑到许多地区的供热价格较低，且数据中心的核心理业务是提供可靠的数据服务，即便是在余热回收有吸引力的地区，仅仅凭借市场激励措施也不足以刺激余热回收的发展。

打造旨在连接数据中心与数据客户的信息平台，也可能激励数据中心更有效的利用余热或冷却。访谈结果表明，电能利用效率（PUE）不足以让用户或政策制定者借以评估数据中心的总体能源绩效。至少对能源规划者和数据中心用户来说，提供附加措施并强制披露，将激励数据中心在投资和运营阶段的实践。

如前一章节所述，能源服务公司和虚拟电厂应该在数据中心的能源管理中发挥更大的作用。需要聚合商参与其中，一是为了在数据中心运营商和电网之间开展协调，另外可以基于电价、可再生能源的可用性以及外部温度来优化数据中心的负荷。这就要求电网公司、聚合商以及数据中心之间加强信息共享——不仅仅是关于电价和负荷预测的分析，也包括关于不同数据负荷的预测和优先排序，从而实现时间和地理上的负荷转移，并能够依据天气和电网状况来优化冷却。

4 加强参与辅助服务和现货市场

开发实时转移工作负荷的能力，将使数据中心能够提供调峰和频率控制等辅助服务。这种能力也是数据中心调控电力的先决条件。在需要正控制电力时，可以中断某些任务，稍后继续执行。当需要负控制电力之时，可以在工作负荷上增加额外的任务。数据中心可在二级控制能源市场上提供灵活性，在其灵活性被激活的情况下，数据中心有义务调整其负荷。为了提供这种服务，数据中心需要更高层次的自动化和灵活性。

4.1 政策选择——德国

欧洲电力交易所（EPEX）是德国主要的电力交易批发市场之一，根据每种电力产品的交付时间，有不同的电力产品类别。短期交易的电量要么提前一天销售，即日前交易——在发电商或交易商向买方实际交付电力前一天交易，或在电力实际交付当天。⁶⁸要在欧洲电力交易所上交易，市场参与者必须有能力交易至少 100 kW 电力。⁶⁹在这个灵活的市场，尤其是在数据中心使用动态电压频率调节（DVFS）与负荷转移的组合时，预期会有很高的收益。

为了平衡电网的输入输出，输电系统运营商采用三种不同的控制能源产品：

- 一次控制能源或者频率控制储备（FCR）；
- 二次控制能源或者带自动激活的频率复原储备（aFRR）；
- 三次控制能源或者带手动激活的频率复原储备（mFRR）。⁷⁰

一位数据中心受访者称，使用数据中心安装的电池存储容量参与了一次频率响应市场。根据受访者的反馈，二次控制能源也是一个有吸引力的选择。负平衡电力可能是最突出的应用，因为数据中心内安装的电池可以在高发电量时段充电，在高需求量时段放电。

二次控制能源需要在激活之后的 5 分钟之内全部提供，最多提供 15 分钟——这是大多数数据中心都可以满足的要求。竞拍分成一天 6 个时间段，每段 4 个小时，分为正控制能源和负控制能源。⁷¹但是，资格预审过程相当复杂，目前的最低投标规模是 5 MW，这是大多数德国数据中心都无法达到的限值。但是，聚合商可以将这些较小规模的数据中心整合到一个虚拟电厂中，并促进其参与电力市场。⁷²

受访者提到了两种相对简单的方法来帮助数据中心将其业务整合到辅助服务市场中。

由监管机构和电网运营商发起的深度讨论和合作，可能帮助数据中心了解附加收益的潜力，加深对各种辅助服务运行的理解。⁷³因此，这种合作有助于电网运营商了解不同数据中心的负荷情况，能够更好地利用其灵活性，并更有效地将其纳入电网。电网和数据中心运营商可以联合开展活动，如试点项目、差距和潜力分析，以确定可能的协同效应和共同的解决方案。

如前文所述，数据中心的主要业务是向消费者提供数据服务，而不是参与电力市场。能源聚合商可以作为中介平台经营这些服务，在将风险降至最低的同时，也避免给数据中心运营商带来额外的复杂性。

ENERA 灵活性 平台

本地灵活性市场是解决输电网拥堵的关键，因为它可以促进数据中心等分散式客户参与能源市场，以充分利用其灵活性潜力。

一个先进的灵活性市场案例是德国“enera”项目，它是德国联邦经济和气候保护部2017年发起的能源转型智能能源展示议程（SINTEG）计划的一部分。输电系统运营商和配电系统运营商打造了一个共同的灵活性市场，并在该特定市场上进行容量交易，以平衡不同电压等级上的过载情况。系统运营商实时分享其电网容量，并在需要时提供可用和未用的容量。这个项目的结果展示了如何才能加强当地用户（如数据中心）和电力供应商的参与。

4.2 政策选择——中国

近年来，中国出台了一些需求侧管理和微电网并网运行等方面的指导性政策文件，以激励需求侧的灵活性以及参与未来的电力市场。这些指导性文件为形成新的电力系统和市场参与者提供了良好的环境。但是，目前还没有相关政策明确提及数据中心在优化电力系统方面的潜力。

尽管如此，最近陆续出台的政策表明，中央和地方各级政府开始关注能够提供需求侧灵活性的理念和技术。本

章主要讨论近年来国家和地方层面推动数据中心参与电力市场的相关政策。

2018年2月，国家发展和改革委员会和国家能源局联合发布《关于提升电力系统调节能力的指导意见》，提出鼓励储能设备、需求侧资源以及第三方参与并提供电力辅助服务。⁷⁴ 2019年11月，华北能源监管局发布了《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场规则》草案⁷⁵。该方案要求将参与电力辅助服务的范围扩大到储能设备、电动汽车、电供热、虚拟电厂和其他灵活控制装置。

2020年4月，福建省工业和信息化厅等部门共同发布了《关于做好大型数据中心企业电力市场注册工作的通知》，进一步推进大型数据中心企业电力市场注册工作。文件中的大型数据中心企业包括福建省具有一定规模以上的超算中心和数据中心企业。⁷⁶

显然，中国正在努力建设一个充满活力的辅助服务市场，对需求侧参与者开放，并鼓励虚拟电厂的参与。正如前文所述，建立一个向需求侧参与者及聚合商开放、运行良好的辅助服务市场，可能仅仅是激励数据中心参与的一种方式。考虑到数据服务的可靠性具有绝对优先级，有必要先开展一些示范项目，并公布示范结果，这有助于稳定电网和提高参与试点的数据中心的收益。如果没有这些成功示范，数据中心将缺乏参与辅助服务市场的积极性。

5 促进可再生能源的利用

很多全球电子基础设施供应企业正在采购可再生能源，以减少其能源密集型数据中心对环境的影响，并打造环保的企业形象。这些企业面临多种多样的选择，包括自行建设风力和光伏发电厂、购买绿色能源电力证书以及签署绿色购电协议。用电量与可再生能源利用相结合是一项日益重要的挑战，有些公司通过创新型的 24/7 可再生能源采购战略做出回应。

5.1 提高可再生能源利用的途径

美国和欧洲的一些全球 IT 巨头已经制定了净零目标，并开始购买可再生能源为其运营提供动力。为了使数据中心的电力消耗与可再生能源输出全天候不间断（24/7）相匹配，大型 IT 公司开创了采购绿色能源的新方法，并成为自愿绿色能源市场的主要参与者。⁷⁷

很多学术文献提到了数据中心如何提高可再生能源的利用率。Chen 等人在 2013 年对可变的可再生能源发电的电力调度情况进行了研究，通过在数据中心屋顶安装光伏发电，将其电网购电量将至最低。⁷⁸Nguyen 等人研究了在数据中心整合可再生能源的调度方案，提出对数据中心能耗进行动态建模，以切实提高数据中心的能源使用效率。⁷⁹数据中心工作负荷的时间转移可能提高可再生能源的利用率。⁸⁰在 2016 年的一项研究中，Shi 等人分析了数据中心工作负荷与可再生能源在时间和空间上的互补性，提出了一种指导数据中心负荷分配的预测算法。⁸¹

5.2 德国数据中心和可再生能源

数据中心有几种不同方式来购买可再生能源：

- 在自愿购电协议（PPA）框架内直接从可再生能源电厂购买电力；
- 通过供电商购买绿色电力；
- 运行自有可再生能源电厂。⁸²

对德国数据中心专家的采访表明，德国有许多数据中心购买可再生能源电力为其运营提供动力。大多数人对可再生能源供电持积极态度。

对于上述三种采购可再生能源的方式在未来的发展仍然存在相当大的争论。根据德国可持续数据中心发展的路线图，绿色电力证书并不能真正有助于减少二氧化碳排放，⁸³至少在目前这种证书的讨论阶段是这样的。本研究建议数据中心应通过与可再生能源工厂签订自愿购电协议来采购绿色电力。⁸⁴然而，环保生态协会（Eco Association）对欧洲数据中心的一项研究表明，自愿购电协议在德国的应用很有限，这可能主要是因为现存制度无法刺激自愿购电协议的应用。⁸⁵自愿购电协议在未来是否会被越来越多地使用还有待观察。

一些数据中心安装了光伏或风力发电设施，并直接购买自发电。虽然数据中心从自有发电厂购买电力可能获得一些经济收益，但仅仅满足数据中心的电力需求是不够的，数据中心应该提高其灵活性，以适应电网的平衡需求。

WINDCORES

WindCORES 的主机托管数据中心是数据中心全面利用可再生能源的一个创新例子。该项目通过使用现有风力涡轮机作为数据中心的建筑物，可以直接在现场为数据中心持续提供清洁电力，同时也防止了风力涡轮机的不必要退役。

这种数据中心特别适合高性能计算的应用，单个数据中心与法兰克福的数据中心节点 DE-CIX 直接连接。现有电网和数据中心的连接是使用这种设施的另一个好处，在风力涡轮机无法提供电力的时候，两条额外的输电线路可以确保数据中心的电力供应。因为已经有大量现成的建筑物可用，WindCORES 允许新数据中心的快速试运行。

引述 26——数据中心研究员：“从可持续性的角度来看，增加数据中心的灵活性实际上有助于将可再生能源整合到电网中。这种生态效益有助于数据中心从竞争对手中脱颖而出。”

引述 27——数据中心研究员：“与电网分离似乎也是一个有吸引力的选择，未来可能无需接入任何电网，就能实现自主运行。内部发电可以减少对电网的能源需求。光伏发电与夏季额外的冷却负荷息息相关。自愿购电协议是数据中心实现可再生能源利用的良机。”

5.3 中国数据中心和可再生能源

中国只有少数 IT 宣布了净零目标：秦淮数据 (Chindata) 和数据港 (AtHub) 是最早宣布这一目标的公司。⁸⁶2021 年，绿色和平东亚分部 (Greenpeace East Asia) 针对可再生能源利用的大型中国数据中心公司，出具了一份年度报告，报告显示，可再生能源在消费中的平均占比仅为 3%，只有百度达到了两位数 51%。⁸⁷尽管自 2018 年以来，中国互联网云服务公司的可再生能

源采购有所增长，但大多数公司并未做出净零承诺或计划，也缺乏对于国际企业的能源披露。

尽管这种结果令人沮丧，但中国的数据中心行业也越来越意识到未来整合可再生能源的重要性。这种整合有时也被作为能源互联网方案或多能互补的一个要素，包含可再生能源与储能和负荷的整合。中国咨询公司 Guanyin World 总结称，数据中心的未来，特别是云计算，与能源互联网的发展息息相关，指出互联网基础设施与电力部门基础设施具有协同效应，例如电线和互联网线缆的位置、输电塔和 5G 互联网通信塔等。⁸⁸

2016 年，国家发展和改革委员会 (NDRC)、国家能源局 (NEA) 和工业和信息化部 (MIIT) 联合发布了一项推进“互联网+”智慧能源发展的政策，探讨互联网和能源生产、输电、储能、消费及能源市场的整合。根据政策建立了一个国家数据中心，以支持这种整合，并与市场参与者共享信息。⁸⁹

多站融合指的是数据中心、发电厂、变电站、储能及通信基础设施的整合。2020 年，中国最大的电网公司国网信息通信产业集团有限公司宣布，计划建立全国性多站融合基础设施，将传统变电站升级为数据中心站、5G 基站和中继站，特别是在土地使用受限的人口密集区域。⁹⁰

地方政府也积极整合数据中心和能源基础设施，包括可再生能源。2020 年，青岛宣布建设一个整合清洁能源和数据中心的示范园区，以此作为城市的复兴战略。⁹¹山西省大同市的秦淮数据集团是另一个整合数据中心和可再生能源 (尤其是本地风能和太阳能光伏) 的地方性案例，利用新建的循环输电线路连接京津冀 (北京、天津和河北) 地区的可再生能源。⁹²

5.4 政策建议——中国

中国已经开始通过颁行针对数据中心的支持性政策和示范项目来推广可再生能源的利用，例如大同和青岛的案例。但是，尚处于早期阶段，很少有 IT 公司宣布积极的可再生能源利用计划。

和灵活性、余热利用以及冷却效率一样，通过访谈发现，信息平台可以提供更多的激励措施，以促进可再生能源的利用。政策制定者应该鼓励行业不要只关注电能利用效率，而是要提高可再生能源的利用率。

为了避免可再生能源与电网整合问题恶化的风险，应该鼓励数据中心将负荷与本地可再生能源发电量相匹配，直接采购与生产时间挂钩的可再生能源发电量，而不是年度总电量。现在的绿色证书市场几乎不鼓励时间匹配，应该做出相应的调整。

灵活运行与可再生能源的整合密切相关。政策制定者应将旨在提高可再生能源利用率的激励措施和行政措施与能够与电力市场（特别是辅助服务市场）、供热/冷却激励、储能和数据网络优化等充分整合的措施结合起来。强制要求采购一定比例的可再生能源或一定份额的储能，这可以作为实现整合的第一步。

6 增强数据中心系统整合的成功商业模式

Socomec —— 能源管理、灵活储能和不间断电源解决方案

Socomec 是一家在不间断电源 (UPS) 和计量领域持有多项创新专利的公司, 其数据中心客户遍布世界各地, 包括德国和中国。

成功落实负荷管理的一个先决条件是**精确和细致的测量**。因为布线错误和电流互感器 (CT) 的尺寸错误, 目前很多数据中心都无法达到 100% 精确。Socomec 公司的 Digiware 系统可以将注册插座 (RJ) 连接所导致的错误以及电流和电压输入分配的错误降至最低。该产品确保了非常宽泛的测量范围, 这是精确负荷管理的基础。

在**通过管理软件 (EMS 能源管理系统) 控制的 Sunsyst HES L 和 XXL 储能系统**的帮助下, 完成了负荷管理的实际落实。该能源管理软件能够管理调峰, 实现快速响应, 在 20 毫秒的更新速率下维持运行, 继电器输出允许在需求响应合同项下的负荷。使用这种能源管理软件, 储能系统可以完成数据中心的负荷管理, 通过调峰使负荷变得平稳, 尤其是在夏季, 冷却负荷往往与系统负荷重合, 此时储能系统能够缓和峰值功率。总的来说, 与能源管理系统与储能系统的配合使用, 可以实现更稳定的功耗, 从而提高电网的稳定性。

如果数据中心进一步将自身储能提供给聚合商, 这种选择就变得更有意义。数据中心也可以利用能源管理系统确定需求响应合同的时段和可用电力, 然后与聚合商一起设定其范围。向聚合商提供这种储能, 可以帮助吸收全年较高的风电或太阳能发电量, 给锂电池充电。在冬季, 电池系统反过来可以在特定的时间段为聚合商供电, 在电网

高需求时段提供必要的电力, 从而为数据中心运营商带来丰厚的利润。这两方面的好处:

- 对电网运营商来说, 这是一个稳定的杠杆, 因为数据中心的耗电量趋于平稳, 更容易应对电网波动;
- 给数据中心带来额外收益, 从而更快速地收回投资成本。

此外, 该公司专注于**不间断电源系统的适应性和灵活性**。与标准的不间断电源系统相比, 灵活不间断电源系统 (Flex UPS) 可以在数据中心能耗紧张的时段中断自身能耗, 从而优化数据中心的负荷曲线。不间断电源系统的部分能耗将由电池承担, 因此电池的大小必须适当。如果每一台不间断电源系统可以提供 100 kW 的功率, 数据中心配备 10 个不间断电源系统, 就可以快速提供 1 MW 的总功率。但是, 不间断电源提供不间断供电的主要功能依然具有优先级。

Chindata 集团 —— 致力于实现系统整合和碳中和

Chindata 成立于 2015 年, 总部在中国, 是一个聚焦于亚太地区新兴市场的超大规模的数据中心解决方案提供商, 在马来西亚、中国和印度均设有数据中心。Chindata 为数据中心提供终身解决方案, 例如数据中心的设施规划、选址、设计、建设和运营。Chindata 也在绿色电力和智能能源利用领域进行投资。

零碳排放是 ChinData 的核心原则, 也是其主要客户的委托要求。2020 年, Chindata 在中国的超大规模数据

中心的能耗，有 51%源自于可再生能源。公司的目标是，到 2040 年在印度、马来西亚、中国及其他新兴市场，实现集团旗下所有数据中心的碳中和。

在为数据中心选址时，Chindata 不仅关注与数据相关的方面，也关注可再生能源和电网基础设施的可用性。选址面临的挑战之一是，在可再生能源丰富的偏远地区往往缺乏必要的网络基础设施。

Chinadata 目前正在中国投资建设世界上第一个**超级能源复合体**，这是一个零碳排放的数字基础设施产业集群，能打通高性能计算数据中心与各个部门的连接，例如可再生能源储能、城市冰雪运动、冷链物流、制冷、农业和市政供热系统。⁹³数据中心也可以在可再生能源不可用时为电网输电，平衡区域的电力系统。位于山西的项目已经得

到了政府的许可和支持，并有望成为电网和数据中心整合的典范，特别是在城市地区。

客户关注数据中心的电能利用效率，Chindata 一直在通过创新措施对此改进。Chindata 拥有 **HUABC 和建造技术**等专利技术，可在行业平均水准之上将数据中心的电能利用效率提高 30%。此外，通过开发微电网，Chindata 已将能源利用率从 33%提高到了 66.7%。这种微电网已被集成到电力系统中。

除了投资建设可再生能源发电厂以外，为能够直接给数据中心供电的储能设施提供支持也至关重要。这些解决方案与微电网相结合，可以实现**发电、负荷、电网和储能的一体化**，实现数据中心耗电量的动态调整，提高电力系统的运行可靠性。

7 结论

作为数字经济的核心以及高速增长用电负荷，全球数据中心行业在实现碳中和的世界共同目标中发挥着重要作用。对文献、政策文件和行业最佳实践的回顾表明，目前存在许多提高效率、增加灵活性和直接采购可再生能源为数据中心供电的技术和战略。

通过访谈和研讨会，我们发现数据中心行业在能效方面正在取得进展，但灵活性和可再生能源整合方面的障碍比较大，如果没有实质性的政策支持，这些障碍难以克服。德国有先进的电力现货市场，但未设定价格上限或下限，在风力和光伏发电的高峰期还可能出现负电价，数据中心对是否采取灵活性解决方案依然犹豫。尽管一些全球性 IT 巨头已力求通过自愿购电协议购买绿色能源，但实际上，大多数数据中心仍然采用传统的能源供应方式。

通过访谈和研讨会，我们对上述领域的持续讨论和挑战有了大体的了解。行业专家强调，对数据中心来说，稳定运行的重要性是不容置疑的，数据中心对能效措施有着更为积极的评价，这些措施的落实不会对数据中心的运营带来太多干扰。冷却负荷作为一项快速见效的灵活性措施，操作上更简单、具有更广泛的可行性。但研究人员认为 IT 负荷的时间转移更有效、更快捷。数据中心的类型和位置是确定最优解决方案的关键。

在每一章节，我们都针对德国和中国提出了具体建议。一些建议是关于通过信息共享和新合作平台加强现有市场

的激励，另一些建议则需要行政措施和新标准的支持。所有建议都必须进一步讨论，针对各个国家以及数据中心行业每一细分市场的独特环境量身定制。

事实上，本研究最大的发现之一是数据中心行业需要针对数据负荷和数据中心类型，进行更多的研究。尽管对典型的用户而言，不同数据中心运行之间的差别可能显而易见，但隐私限制和网络中立性规则可能使得数据中心运营商无法对数据负荷进行优先排序和转移，以实现更大的灵活性或者可再生能源利用。很多数据中心运营商还没有看到过应用此类解决方案的商业案例，因为停机和不可靠运行的风险太过致命，不容忽视。此外，还应明确由谁负责执行这些措施，并解决落实这些措施所面临的技术难题，尤其是对于涉及不同参与方的数据中心类型，这可能是一项艰巨的任务。有一些障碍可能是无法克服的，但其他障碍可以通过适当的激励和政策措施轻易克服。

我们相信，数据中心能够而且必须为碳中和做出更多的贡献，但数据中心行业也不能孤军奋战，他们需要政策、标准（无论通过最佳实践还是学术研究）和激励措施的支持。某些措施需要行业参与者之间的自愿合作，另一些措施则取决于持续的国际协调。挑战是巨大的，但考虑到数据中心负荷的快速增长以及实现全球气候目标的紧迫性，数据中心运营商和政策制定者应当通力合作，以确保该行业走上通往可持续发展的道路。

图表清单

图 1: 2015 年至 2025 年的年度能源需求发展预测	7
图 2: 数据中心基准能线图 (上图) 和基于适中的能源价格进行调整后的数据中心能线图 (下图)	14
图 3: 一个集群的 CPU 利用率下降 (上图) 和另一个集群的 CPU 利用率上升 (下图)	14
图 4: 一个研究/学术数据中心 2008 年每日负荷形状图 (上图) 和一个平均每日负荷系数较低的混合用途数据中心 (下图)	14
图 5: 服务器和计算机机房空调部分关停期间的基准分析.....	22
图 6: 德国的夏季温差	22
图 7: 年平均日温差	24
图 8: 中国夏季温差 (°C)	24

参考文献

- ¹ Ralph Hintemann, “尽管有新冠疫情, 数据中心的能源需求仍在继续上升”, 博德斯塔普研究院, 2020 年, 网址 https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf.
- ² Tim Höfer 等, “引入 5G 标准时数据中心的额外能耗”, 未来能源消费者需求和行为研究所, 2020 年 3 月, 网址 https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/wp-content/uploads/2020/03/1-Madlener_5G-Standard-und-Rechenzentren.pdf.
- ³ 德国联邦议院, “数据中心能源消耗”, 2021 年 8 月, 网址 <https://www.bundestag.de/resource/blob/863850/423c11968fcb5c9995e9ef9090edf9e6/WD-8-070-21-pdf-data.pdf>.
- ⁴ 德国联邦议院, “数据中心能源消耗”, 2021 年 8 月, 网址 <https://www.bundestag.de/resource/blob/863850/423c11968fcb5c9995e9ef9090edf9e6/WD-8-070-21-pdf-data.pdf>.
- ⁵ Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection, “Digital Policy Agenda for the Environment,” February 2020, 网址 https://www.bmuv.de/en/publication?tx_bmubpublications_publications%5Bpublication%5D=616&cHash=476973a5ac000889cef673634ee36a17.
- ⁶ Till Hoppe, Silke Kersting, “Digitalbranche gerät ins Visier der Klimaschützer”, August 2020, 网址 <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energieverbrauch-digitalbranche-geraet-ins-visier-der-klimaschuetzer/26138858.html?ticket=ST-12312447-Hg2MvmzottlGHDbJ9vFO-ap4>.
- ⁷ “数据中心与去碳化”, 挪威国家电力公司, 伊顿电气公司, 彭博社新能源财经, 2021 年 10 月, 网址 <https://content.eaton.com/en-gb/datacentre-bnef-download?percolateContentId=post:1424691567933983940>.
- ⁸ 叶睿琪等, “2035 年中国 5G 和数据中心碳排放展望”, 绿色和平和赛宝计量检测中心, 2021 年 5 月, 网址 <https://www.greenpeace.org/static/planet4-eastasia-stateless/2021/05/a5886d59-china-5g-and-data-center-carbon-emissions-outlook-2035-english.pdf>.
- ⁹ 叶睿琪等, “2035 年中国 5G 和数据中心碳排放展望”, 绿色和平和赛宝计量检测中心, 2021 年 5 月, 网址 <https://www.greenpeace.org/static/planet4-eastasia-stateless/2021/05/a5886d59-china-5g-and-data-center-carbon-emissions-outlook-2035-english.pdf>.

¹⁰ “关于印发《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》的通知，发改高技[2021]709号”，国家发展和改革委员会，2021年5月24日，网址

https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202105/t20210526_1280838_ext.html；“工业和信息化部关于印发《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023年）》的通知，工信部通信[2021]76号”，工业和信息化部，2021年7月4日，网址 http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/14/content_5624964.htm.

¹¹ Lauro Luo, “中国政府呼吁绿色数据中心迎头赶上”，数据中心动态，2015年3月24日，网址

<https://www.datacentredynamics.com/en/news/chinese-government-calls-for-green-data-centre-catch-up/>.

¹² 王赫和叶睿琪, “数字新基建背后的气候账本”，中国对话，2020年4月15日，网址

<https://chinadialogue.net/en/cities/11960-the-climate-cost-of-china-s-digital-infrastructure-rush/>.

¹³ “工业和信息化部关于印发《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023年）》的通知”，工业和信息化部，2021年7月4日，网址

https://www.miit.gov.cn/jgsj/txs/wjfb/art/2021/art_12cc04dc9daf4d57a7038811a57383b6.html.

¹⁴ “六部委联合发布《电力需求侧管理办法（修订版）》”，国家能源局，2017年9月26日，网址

https://www.sohu.com/a/195273054_99908709.

¹⁵ “国家发展改革委关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知，发改价格[2021]1439号”，National Development and Reform Commission Pricing Department, 27 October 2021, 网址

https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/jgzgg/zcid/202110/t20211027_1301157.html.

¹⁶ “关于印发《完善能源消费强度和总量双控制度方案》的通知”，National Development and Reform Commission, 2021, 网址

https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202109/t20210916_1296857.html?code=&state=123.

¹⁷ George Kamiya, Oskar Kvarnström, “数据中心和能源——从全球头条新闻到当地头痛问题?”，国际能源署，2019年12月，网址 <https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches>.

¹⁸ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”，2021年11月，网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.

¹⁹ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”，2021年11月，网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.

²⁰ Adam Wierman 等, “数据中心需求响应的机会和挑战”，加州大学河滨分校电气工程系，网址

<http://smart.caltech.edu/papers/dcdrsurvey.pdf>.

²¹ Adam Wierman 等, “数据中心需求响应的机会和挑战”，加州大学河滨分校电气工程系，网址

<http://smart.caltech.edu/papers/dcdrsurvey.pdf>.

²² Adam Wierman 等, “数据中心需求响应的机会和挑战”, 加州大学河滨分校电气工程系, 2022 年 2 月 1 日访问, 网址 <http://smart.caltech.edu/papers/dcdrsurvey.pdf>.

²³ “Climate Neutral Data Centre Pact,” n.d., at <https://www.climateneutraldatacentre.net/>.

²⁴ “国家发展改革委关于进一步完善分时电价机制的通知”, 国家发展和改革委员会, 2021 年 7 月 26 日, 网址 http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/29/content_5628297.htm.

²⁵ Paul Mah, “中国如何在数据中心方面实现绿色发展”, 数据中心动态, 2019 年 5 月 14 日, 网址 <https://www.datacentredynamics.com/en/analysis/how-china-going-green-data-centres/>.

²⁶ Mohan Gandhi, “未来的公用事业--数字和能源基础设施的结合点”, 可持续数字基础设施联盟, 2020 年, 网址 <https://blog.sdialliance.org/sdia-report-the-utility-of-the-future-now-available>.

²⁷ Peter Radgen, “数据中心的灵活性潜力”, 研讨会演讲, 23 November 2021 年 11 月 23 日.

²⁸ Tudor Cioara 等, “优化的灵活性管理促成了数据中心参与智能需求响应计划”, 新一代计算机系统 78 (2018): 330-342, 网址 <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.05.010>.

²⁹ Girish Ghatikar 等, “数据中心的需求响应机会和使能技术: 现场研究的发现”, 劳伦斯伯克利国家实验室, 2012 年 8 月, 网址 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1174175>.

³⁰ Tudor Cioara 等, “优化的灵活性管理促成了数据中心参与智能需求响应计划”, 新一代计算机系统 78 (2018): 330-342, 网址 <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.05.010>.

³¹ Girish Ghatikar 等, “数据中心的需求响应机会和使能技术: 现场研究的发现”, 劳伦斯伯克利国家实验室, 2012 年 8 月, 网址 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1174175>.

³² Girish Ghatikar 等, “数据中心的需求响应和开放式自动需求响应机会”, 需求响应研究中心, 2010 年 1 月, 网站 <https://doi.org/10.2172/981725>.

³³ Girish Ghatikar 等, “数据中心的需求响应和开放式自动需求响应机会”, 需求响应研究中心, 劳伦斯伯克利国家实验室, 2010 年 1 月, <https://doi.org/10.2172/981725>.

³⁴ “数据中心和去碳化”, 彭博社新能源财经, 挪威国家电力集团, 伊顿电气集团, 2021 年 10 月 14 日, 网址 <https://content.eaton.com/en-gb-datacentre-bnef-download?percolateContentId=post:1424691567933983940>.

³⁵ “数据中心和去碳化”, 彭博社新能源财经, 挪威国家电力集团, 伊顿电气集团, 2021 年 10 月 14 日, 网址 <https://content.eaton.com/en-gb-datacentre-bnef-download?percolateContentId=post:1424691567933983940>.

³⁶ 在中国, 满足电力系统需要的灵活需求通常被称为需求侧管理 (DSM), 而在其他市场, 这有时会被称为需求响应 (DR)。需求响应聚焦于信息技术设备的控制策略, 这可以分成两个方面: 数据中心工作负荷调度策略和服务器配置方法。

³⁷ Ariane Rüdiger, “数据中心联盟: 数据中心的网络”, ZDNet, 2017 年 10 月 12 日, 网址 <https://www.zdnet.de/88315035/data-centre-federation-ein-netz-aus-rechenzentren/>.

-
- ³⁸ Mohan Gandhi, “未来公用事业——数字和能源基础设施的融合”, 可持续数字基础设施联盟, 2020年, 网址 <https://blog.sdialliance.org/sdia-report-the-utility-of-the-future-now-available>.
- ³⁹ Rahul Uргаonkar 等, “数据中心使用储能的最佳电力成本管理”, ACM SIGMETRICS 计算机系统测量和建模国际会议论文集, 2011年, 网址 <https://doi.org/10.1145/1993744.1993766>
- ⁴⁰ Vasileios Kontorinis 等, “数据中心功率封顶的电池供应和相关成本”, 加州大学圣地亚哥分校, UCSD 技术报告 CS2012-0985, 2012年7月, 网址 <http://www.cse.psu.edu/~jms1257/papers/UCSDTechReport-2012-Batteries.pdf>; Vasileios Kontorinis 等人, “管理分布式不间断电源能量, 达到数据中心有效功率封顶”, 国际计算机结构研讨会, 2012年, 网址 <https://cseweb.ucsd.edu/~vkontori/Papers/ISCA2012-Kontorinis.pdf>.
- ⁴¹ Shi Yuanyuan 等, “利用储能优化新兴电力市场的数据中心电力成本”, 《第七届未来能源系统国际会议论文集》, 2016年, 网址 <https://doi.org/10.1145/2934328.2934346>.
- ⁴² Jens Clausen 等, “提高性能, 降低成本: 数据中心能效”, 能源机构, 2012年, 网址 https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2014/07/Leistung_steigern_Kosten_senken.pdf.
- ⁴³ Rathijit Sen, David A. Wood, “能量比例计算: 新的定义”, 威斯康星大学麦迪逊分校计算机科学系, 2017年3月, 网址 <https://doi.org/10.1145/3046682>.
- ⁴⁴ “动态电压和频率缩放”, ComputerWeekly.co.uk 编辑部, 2019年4月, 网址 <https://whatis.techtarget.com/de/definition/Dynamische-Spannungs-und-Frequenzskalierung>.
- ⁴⁵ Adam Wierman 等, “数据中心需求响应的机会和挑战”, 加州大学河滨分校电气工程系, 2022年2月1日访问, 网址 <http://smart.caltech.edu/papers/dcdrsurvey.pdf>.
- ⁴⁶ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”, 2021年11月, 网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.
- ⁴⁷ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”, 2021年11月, 网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.
- ⁴⁸ “数据中心和去碳化”, 彭博社新能源财经, 挪威国家电力集团, 伊顿电气集团, 2021年10月14日, 网址 <https://content.eaton.com/en-gb-datacentre-bnef-download?percolateContentId=post:1424691567933983940>.
- ⁴⁹ “数据中心和去碳化”, 彭博社新能源财经, 挪威国家电力集团, 伊顿电气集团, 2021年10月14日, 网址 <https://content.eaton.com/en-gb-datacentre-bnef-download?percolateContentId=post:1424691567933983940>.
- ⁵⁰ 德国能源署, “提高性能, 降低成本: 数据中心能效”, 2012年, 网址 https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2014/07/Leistung_steigern_Kosten_senken.pdf.
- ⁵¹ Nguyen H Tran 等, “混合用途建筑物内应急需求响应的协调能源管理”, 2015年电气与电子工程师协会 (IEEE) 国际泛在无线宽带会议 (ICUWB), 2015, 网址 <https://doi.org/10.1109/ICUWB.2015.7324431>.

-
- ⁵² Lisette Cupelli 等, “数据中心”, “数据中心暖通空调系统的辅助服务和备用发电机组”, 2016 年工业电子年会——第 42 届电气与电子工程师协会 (IEEE) 工业电子学会学术年会, 2016, 网址 <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793541>.
- ⁵³ Liu Ning 等, “数据中心使用基于神经网络的电力预测进行调节服务的电力管理”, 2017 年第 18 届 S (ISQED), 2017, 网址 <https://doi.org/10.1109/ISQED.2017.7918343>.
- ⁵⁴ Qi Wenbo 和 Ji Li, “迈向分布式互联网数据中心微电网的最优协调运行”, 2016 年电气与电子工程师协会 (IEEE) 电力与能源学会全体大会, 2016 年 7 月 17-21 日, 网址 <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741732>.
- ⁵⁵ Chen Zhi 等, “分布式大型互联网数据中心的电力需求响应管理”, 电气与电子工程师协会 (IEEE) 智能电网交易, 2013, 网址 <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2267397>.
- ⁵⁶ Gao Jiechao 等, “智能处理可再生能源不稳定性为云数据中心提供支持”, 2020 年电气与电子工程师协会 (IEEE) 国际并行与分布式处理研讨会 (IPDPS), 2020, 网址 <https://doi.org/10.1109/IPDPS47924.2020.00084>.
- ⁵⁷ G.F. Davies, G.G. Maidment, R.M. Tozer, “Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London”, Applied Thermal Engineering, Volume 94, 2016, 网址 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.111>.
- ⁵⁸ Girish Ghatikar 等, “数据中心的需求响应机会和促成技术: 实地研究发现”, 劳伦斯伯克利国家实验室, 2012 年 8 月, 网址 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1174175>.
- ⁵⁹ Deutscher Wetterdienst (2020).
- ⁶⁰ 见指令第 23 条和第 24 条.
- ⁶¹ Robert Spanheimer, “数据中心的废热利用”, 德国信息产业、电信和新媒体协会, 2019 年 7 月, 网址 https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-06/20190703_positionspapier_abwarme_rechenzentren.pdf.
- ⁶² Robert Spanheimer, “数据中心的废热利用”, 德国信息产业、电信和新媒体协会, 2019 年 7 月, 网址 https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-06/20190703_positionspapier_abwarme_rechenzentren.pdf.
- ⁶³ “可持续数据中心指南”, 巴登-符腾堡州可持续计算中心研究协会, 2020 年, 网址 https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/wp-content/uploads/2020/06/2020-06_Nachhaltige-Rechenzentren_Leitfaden_BF.pdf.
- ⁶⁴ How Kyoto Cooling works, 网址 <https://www2.kyotocooling.com/how-kyotocooling-works/>.
- ⁶⁵ “自冷式超级计算机”, 法伦海特公司, 2021 年 5 月, 网址 <https://fahrenheit.cool/en/self-cooling-supercomputer/>.
- ⁶⁶ NREL's PVWatts Calculator, 网址 <https://pvwatts.nrel.gov/>.
- ⁶⁷ China Meteorological Association, 2020

-
- ⁶⁸ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”, 2021 年 11 月, 网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.
- ⁶⁹ Sonja Klingert, Sebastian Szilvas, “点石成金——评估数据中心在电力市场上的灵活性”, 《能源信息学》3 (7), 2020 年, 网址 <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-020-00110-y>.
- ⁷⁰ “德国控制储备市场”, 控制储备分配的互联网平台, 2021 年, 网址 <https://www.regelleistung.net/ext/static/market-information>.
- ⁷¹ 德国能源署, “土耳其和德国的电网灵活性”, 2021 年 11 月, 网址 <https://www.energypartnership-turkey.org/home/>.
- ⁷² Sonja Klingert, Sebastian Szilvas, “点石成金——评估数据中心在电力市场上的灵活性”, 《能源信息学》3 (7), 2020 年, 网址 <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-020-00110-y>.
- ⁷³ David Aikema 等, “辅助服务市场中的数据中心”, 卡尔加里大学电气和计算机工程系, 2012 年 6 月, 网址 <https://www.researchgate.net/publication/261453014>.
- ⁷⁴ “国家发展改革委 国家能源局 关于提升电力系统调节能力的指导意见”, 国家发展改革委, 2018 年 2 月 8 日, 网址 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201803/t20180323_962694.html.
- ⁷⁵ “华北能源监管局关于征求《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场试点方案（征求意见稿）》意见的函”, 国家能源局华北能源监管局, 2019 年 11 月 15 日, 网址 <http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=000000006e69cbf9016e6e4b59700059>.
- ⁷⁶ “福建省工业和信息化厅 国家能源局福建监管办公室 福建省通信管理局关于开展大数据中心企业电力市场注册工作的通知”, Fujian Provincial Department of Industry and Information Technology, 30 April 2020, 网址 http://gxt.fujian.gov.cn/gk/gsgg/202004/t20200430_5257853.htm.
- ⁷⁷ “可再生能源买家联盟 (REBA) 交易跟踪系统”, 可再生能源商业联盟, 2021 年, 网址 <https://rebuyers.org/deal-tracker/>; Ben Gerber, “支持数据驱动的可再生能源市场路径”, 中西部可再生能源跟踪系统 (M-RETS), 2021 年 3 月, 网址 <https://www.mrets.org/wp-content/uploads/2021/02/A-Path-to-Supporting-Data-Driven-Renewable-Energy-Markets-March-2021.pdf>.
- ⁷⁸ Chen Hao 等, “促成数据中心参与电力市场的动态服务器用电封顶”, 2013 电气与电子工程师协会 (IEEE) / 美国计算机协会 (ACM) 国际计算机辅助设计会议 (ICCAD), 2013, 网址 <https://doi.org/10.1109/ICCAD.2013.6691107>.
- ⁷⁹ Nguyen H Tran 等, “地理分布式数据中心如何进行需求响应: 一种对策论方式”, 电气与电子工程师协会 (IEEE) 智能电网交易 7(2), 2015, 网址 <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2421286>.
- ⁸⁰ Sen Li 等, “数据中心和电动汽车一体化电力管理以参与能源和调节市场”, 电气与电子工程师协会 (IEEE) 智能电网交易, 2014, 网址 <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2321519>.

⁸¹Shi Yuanyuan 等, “借助储能优化数据中心在新兴电力市场上的用电成本”, 第七届未来能源系统国际会议议程, 2016, 网址 <https://doi.org/10.1145/2934328.2934346>.

⁸²“欧洲的数据中心——可持续数字化机会”, 环保生态协会, 2020 年, 网址 <https://international.eco.de/data-centre-energy-efficiency/>.

⁸³“欧洲的数据中心——可持续数字化机会”, 环保生态协会, 2020 年, 网址 <https://international.eco.de/data-centre-energy-efficiency/>.

⁸⁴“可持续数据中心指南”, 巴登-符腾堡州可持续计算中心研究协会, 2020 年, 网址 https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/wp-content/uploads/2020/06/2020-06_Nachhaltige-Rechenzentren_Leitfaden_BF.pdf.

⁸⁵同上

⁸⁶Peter Judge, “绿色和平声称中国数据中心的排放量很有可能翻倍”, Data Center Dynamics, 2021 年 3 月 21 日, 网址 <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/chinas-data-center-emissions-set-to-double-says-greenpeace/>.

⁸⁷“清洁云 2021, 追踪中国科技行业的可再生能源使用”, 绿色和平东亚分部, 2021, 网址 <https://www.greenpeace.org/static/planet4-eastasia-stateless/2021/04/03a3ce1a-clean-cloud-english-briefing.pdf>.

⁸⁸“2019 年中国移动互联网营销行业分析报告-行业运营态势与投资战略研究”, ProResearch, 2021 年 4 月 8 日, 网址 <http://baogao.chinabaogao.com/hulianwang/411564411564.html>.

⁸⁹“关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见”, National Energy Administration, 29 February 2016, 网址 http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.

⁹⁰“升级“5G 版”! 传统变电站未来将可能变身数据中心站”, 北京日报, 2020 年 6 月 20 日, 网址 <https://shupeidian.bjx.com.cn/html/20200605/1079041.shtml>; Liu Zhenhua 等, “可持续数据中心的可再生、冷却感知工作负荷管理”, ACM Sigmetrics (美国计算机协会计算机系统测量和建模学会会议) 业绩评审 40 (1), 2012 年 6 月, 网址 <https://doi.org/10.1145/2318857.2254779>.

⁹¹“青岛布局“综合能源+大数据中心”新兴业态示范园区”, 齐鲁壹点, 2020 年 5 月 28 日, 网址 <http://server.ctocio.com.cn/server/2020/0529/22342.html>.

⁹²李玲, “主动融入能源革命 积极探索可再生能源与数据中心融合发展路径”, 中国能源报, 2020 年 6 月 1 日, 网址 <https://mp.weixin.qq.com/s/1ZGx32Nakd7nugpw7STmBQ>.

⁹³For more information see <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/06/30/2255802/0/en/Chindata-Group-Signs-China-s-First-Super-Energy-Complex-Project-to-Develop-a-Zero-Carbon-Digital-Infrastructure-Industry-Chain.html>.

