



看看这个

监管解决方案以实现大型负载的更好预测



作者和致谢

作者

Jeffrey Sward
Lauren Shwisberg
Katerina Stephan
Jacob Becker

所有作者均来自RMI，除非另有说明。

联系人

Jeffrey Sward, jsward@rmi.org
劳伦·施维茨堡, lshwisberg@rmi.org

版权与引用

Jeffrey Sward, Lauren Shwisberg, Katerina Stephan, and Jacob Becker, *看看这个：通过监管解决方案实现大型负载更好预测的方法*，RMI，2025，<https://rmi.org/insight/get-a-load-of-this>。

RMI重视协作，并致力于通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许感兴趣的各方通过Creative Commons CC BY-SA 4.0许可引用、分享和引用我们的工作。<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

所有使用的图片均来自iStock.com，除非另有说明。

致谢

作者们感谢以下个人对本工作的审稿所做的贡献：

Madison Bolton, Oregon 公用事业委员会
爱德华·伯吉斯，当前能源集团
本·迪奇曼，乔治亚公共服务委员会
马克·戴森，RMI
泰勒·菲奇，RMI
安森·贾斯蒂，马里兰州公共服务委员会
泰勒·麦克纳尔，GridLab
Steve Olea, 亚利桑那州公司委员会
玛丽亚·鲁姆帕尼，当前能源集团

此外，作者们想要感谢参与第二次监管合作的教职员工和公用事业委员会工作人员（[监管部门实验室](#)）队列，对潜在负载增长的短期响应。尽管本报告的大部分内容受到该队列中的演示、对话和讨论的启发，但本报告完全由作者负责，并不反映参与者或其组织的观点。



关于RMI

RMI是一个独立的非营利组织，成立于1982年，原名落基山研究所，通过市场驱动的解决方案改造全球能源系统，以适应1.5°C的未来，并为所有人确保一个清洁、繁荣、零碳的未来。我们在世界上最关键的地理区域开展工作，并与企业、政策制定者、社区和非政府组织合作，确定和扩大能够至少在2030年前减少至少50%气候污染的能源系统干预措施。RMI在科罗拉多州的巴斯尔和博尔德、纽约市、加利福尼亚州的奥克兰、华盛顿特区、尼日利亚的阿布贾和北京设有办公室。

目录表

执行摘要.....	5
负载正在增长，预测增长率更快.....	10
监管机构必须寻求降低预测不足和过度预测的风险.....	15
历史性过度预测... .. 15 预测不足和过度预测带来的风险及缓解这些风险的机会.....	17
负载特性对预测至关重要.....	18
老、新、复兴——深入探讨大型电力负荷的终端用途.....	第20页
数据中心.....	20
工业负荷和制造业.....	22
负荷预测最佳实践.....	23
案例研究：预测大量负载的兴起实践.....	25
案例研究：弗吉尼亚州的 Dominion Energy 会议记录.....	25
案例研究：北卡罗来纳州杜克能源公司案例.....	第26页。
案例研究：乔治亚电力公司.....	27
监管机构可采取的措施以改善预测.....	29
确保负荷预测准确反映新负荷驱动程序的独特特征。 . . 30 及时更新：增加更新负荷预测和负荷预测过程频率。 32 已验证：使负荷预测数据和流程对其他利益相关者可见，并创造问责机会.....	32
在预测不确定性下做出投资决策.....	35
结论.....	37
附录：负荷预测发现问题.....	38
脚注.....	40

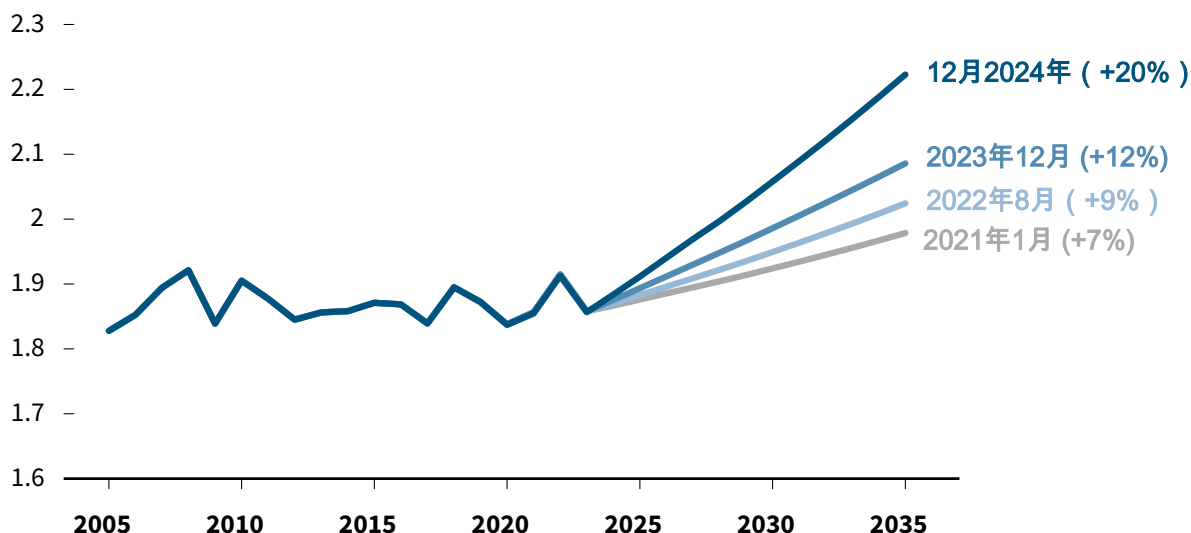
Executive summary

在美国，经过几十年的增长停滞之后，电力需求或负荷已经开始增长。覆盖美国客户销售量48%的公用事业综合资源计划（IRP）预计负荷将从2023年至2035年增长20%，并且公用事业公司持续对其负荷预测进行向上修订（见展品ES1）。

展示 ES1

项目在综合资源计划规划中的电力需求（负荷）

需求（十亿[兆瓦时]）



注意：数据包括来自12个公用事业公司的预测，涵盖美国客户电力的48%。变化覆盖比美国客户获得电力的48%。百分比变化是针对2023年至2035年的。

RMI 图表。来源：RMI 参与 & 行动 <https://rmi.org/our-work/climate-finance/engage-and-act/>

RMI 图表。来源：RMI 参与 & 行动，

负荷预测是指预测负荷将在何时、何地以及以何种规模实现，以及它们将如何运行的过程。本报告主要关注长期（10年及以上）预测，这些预测是公用事业规划所使用的。长期负荷预测是公用事业投资计划的基石。展品ES1中的IRP预测是2023年至2035年间数十亿美元投资计划的基础，包括260吉瓦（GW）的风能和太阳能新增，84吉瓦的天然气新增和74吉瓦的煤炭退役，这些均需接受监管审批。

改进负荷预测可以带来两大主要好处。它可以：

- 减轻可负担性和可靠性风险。良好的预测是管理系统性预测误差主要风险的首次防线。客户可负担性是过度预测的主要风险，而可靠性是预测不足的主要风险。

- 创造一个机会来考虑所有可用的投资选项。当公用事业公司由于预测不足或过度而措手不及，投资选项变得更加反应性强且受限。

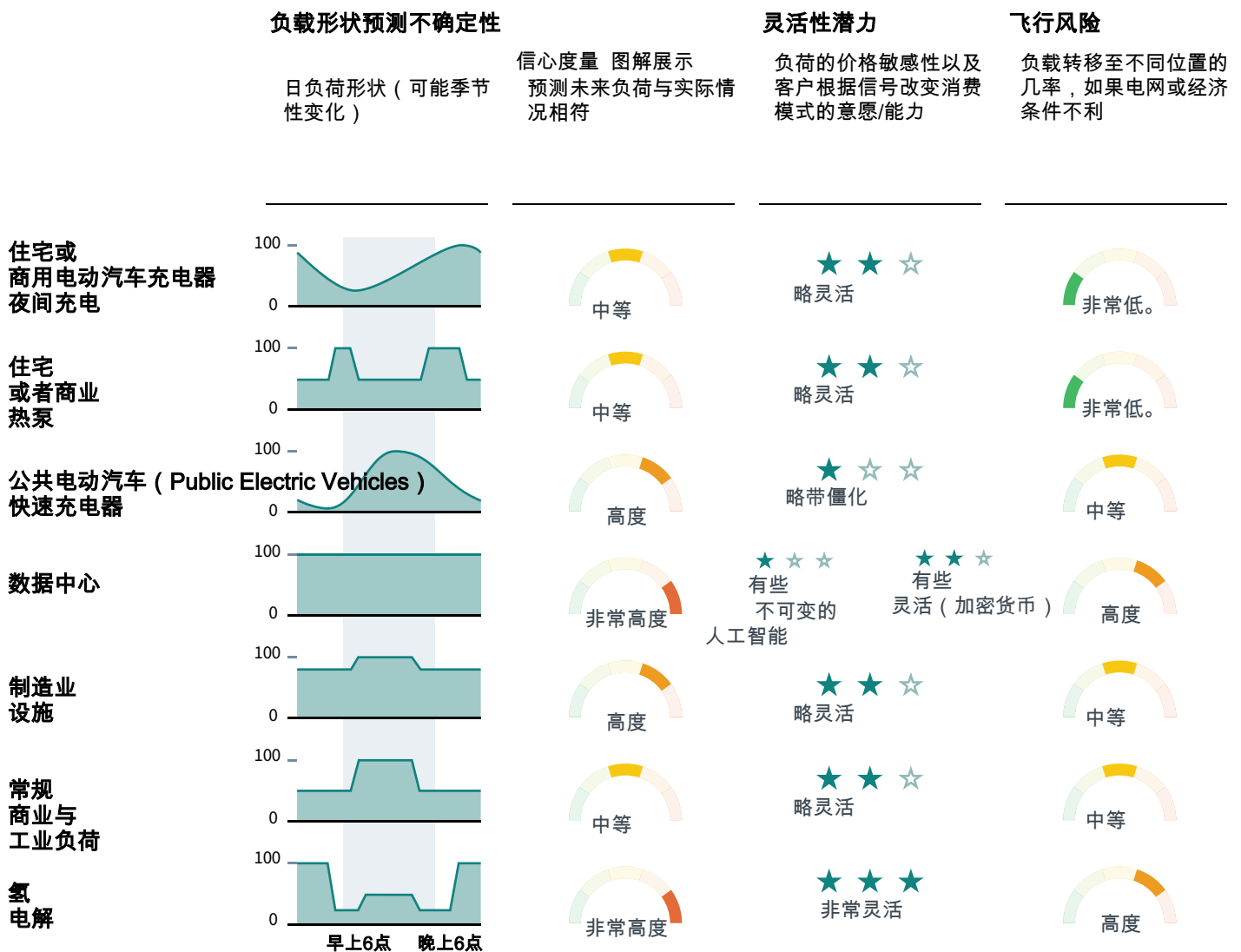
考虑到它们相对于现有系统的快速上升和巨大产能，新大型负荷（例如，数据中心、先进制造、重型运输、工业电气化）具有独特的特征，这些特征应纳入现代预测过程：它们的负荷形状、预测不确定性、灵活性潜力和飞行风险（见附录ES2）。

展示 ES2 并非所有负载都相等：负载类型如何影响关键特性的关键特征

不是所有负载都相同：负载类型如何影响电网的关键特征

电网可以显著变化。

差异显著。负载类型如何影响电网，可能存在显著差异。



RMI 图表。来源：RMI 分析
RMI 图形。来源：RMI 分析

预测员可以应用几种最佳实践来提高预测，无论未来负载的特性如何：

- 采用基于场景或随机负荷预测方法来更好地理解可能未来的范围并确定主要的不确定性来源，而不是依赖于单一预测以获取准确结果。
- 将终端需求预测与计量经济学预测相结合，根据宏观经济趋势和历史数据调整预测。这有助于更充分地捕捉尚未达到市场饱和或与典型宏观经济指标（例如，电动汽车[EV]的采用）不相关的负荷的采用和运行。
- 确保负载预测在规划过程中得到一致应用，以便不同过程中的决策基于相同的基本数据集和假设。

新方法将新的大型负荷整合到预测中尚处于初级阶段，例如在预测快速增长的地区，如乔治亚州、北卡罗来纳州和弗吉尼亚州。新的大型负荷加剧了三个主要的预测挑战，如展品ES3所示。

展示ES3目标，以现代化预测系统以整合大量负载

今日负荷预测的挑战	目标：负荷预测
有限： 负荷预测可能不包括大型负载的相关特征。	彻底的： 确保负荷预测准确反映大型负载的独特特征使其达到最佳状态能力。
过时： 负荷预测更新每年并不符合目前的步伐变化。	最新： 增加更新频率，包括以下内容：负荷预测和负荷预测过程。
模糊不清 负荷预测可依赖于无法访问的数据，导致偏差追踪不可行。不可行。	验证中： 制作负荷预测数据和流程可见于其他利益相关方并创建问责制的机遇。

RMI 图形

在公用事业和电网运营商制定预测时，监管机构在以下三个方面发挥着三个关键作用：预测：（1）建立预测指南，（2）审查和批准公共事业预测，（3）最终批准或拒绝基于预测进行的投资成本回收。

监管机构可以采取多种措施，以确保预测与附录ES4中的目标一致。这些措施是在与监管机构、行业专家以及RMI的第二届监管协作会上的讨论基础上形成的（[监管部门实验室](#)）队列。ⁱ

附表ES4：监管机构行动计划

目标为 负荷预测	监管部门可以采取的行动
彻底的	- 提高佣金并增强对新负载的能源理解，通过启动技术会议、调查程序或通过非正式方式参与与利益相关方。 - 修订规划指南，以纳入新兴的预测实践。新负载，例如建立单独的大负载预测和处理流程为了避免重复计算（见）附录：负载发现问答预测）。 - 协调与州和地方政府以及其他州的关系，以了解激励结构和可能影响大型负载的立法。
最新	- 需要更频繁地报告长期负荷预测，例如季度 - 迭代预测流程，以便随着新实践和终端用途的出现而不断更新。预测保持当前状态。
已验证	- 鼓励公用事业利用透明的外部数据和预测尽可能使用工具，以便利益相关者和委员会可以参与进来。在假设审查中发挥积极作用。 - 制定预测和实际数据，并从过去的预测中学习以评估过去预测准确性及识别误差来源。 - 探索基于预测准确性的货币激励或惩罚。包括将风险转移给特定的大客户的关税增长或至效用。

RMI 图形

ⁱ Reg Lab 是一项队列式倡议，旨在增强监管人员能力并开发针对当今紧迫问题的尖端解决方案。来自15个州的监管人员与来自全国各地的专家一起，在七场虚拟研讨会上探讨了应对潜在负荷增长的近期能选方案。有关之前和未来队列的更多信息，请参阅：<https://rmi.org/reg-lab/>。

即使采用最佳实践，所有预测仍然存在不确定性。然而，随着负载增长的预期，公用事业公司和委员会必须能够在显著的预测不确定性的情况下作出决策。监管机构可以完善他们的决策工具包以减轻预测不确定性的风险。他们可以：

- 优先考虑“最少遗憾”的资本投资，包括目前快速、经济、灵活的投资（例如，能源效率、虚拟电厂（VPPs）、增强电网技术、重导电和清洁更新），这些投资稳健，在各种可能的未来都能提供收益（例如，跨区域输电）。
- 运用关税设计或其他合同承诺来分配风险并减轻不确定性，通过实施关税结构或费率变化将部分风险转嫁给推动增长的大型客户。

这些行动是公用事业和委员会可以采取的第一步，以减轻预测的可行性和可靠性风险，但仍需更多研究。更多公开可获取且易于获取的数据，用以描述这些负载的开发时间线和运行模式，将提高预测准确性。新的研究可以帮助确定更好地去协调宏观经济预测和终端使用预测的方法，并提出超越计量经济学模型的新流程。尽管所有预测都是错误的，但预计的负荷增长规模及其潜在风险，要求确保预测在指导重要监管决策中仍然有用。

负载正在增长，预测的增长速度更快

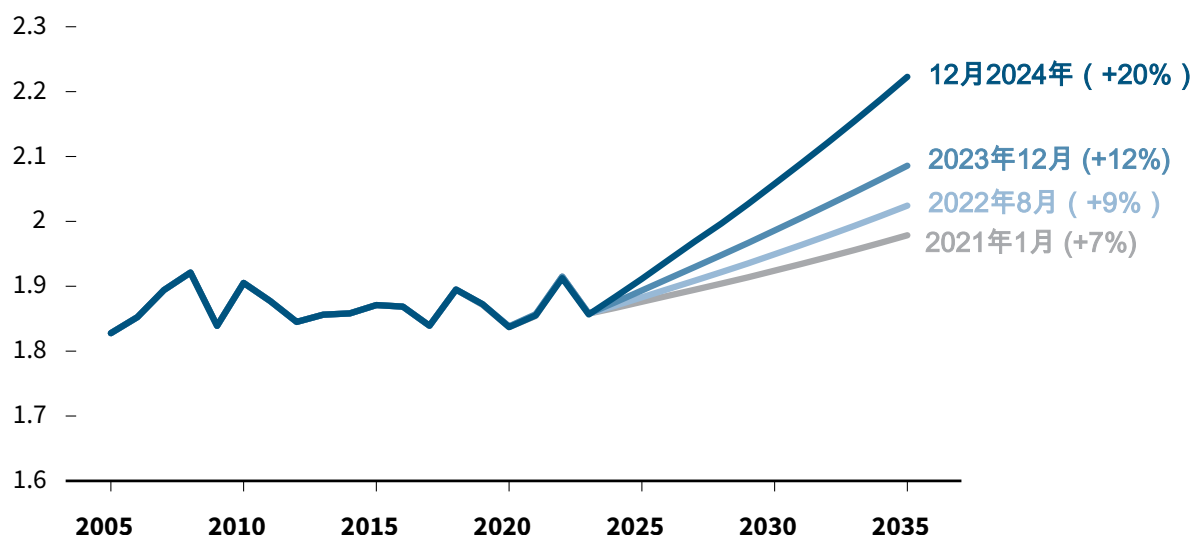
。

在2022年至2024年间，电网规划者将五年峰值负荷预测从预计新增负荷的23吉瓦增加到128吉瓦。截至2024年12月，代表美国48%电力销售的公用事业IRPs预计到2035年负荷将增长20%，较2021年1月的7%有所上升。² 今天的预测颠覆了北美电力可靠性委员会（NERC）的经典风扇翻转。³——在预测中持续向下修订的替代方案中，目前公用事业部门正在对预测进行持续的向上修订（见展览1）。

展示 1

预计在能源资源计划中的电力需求（负荷）

需求（十亿[兆瓦时]）



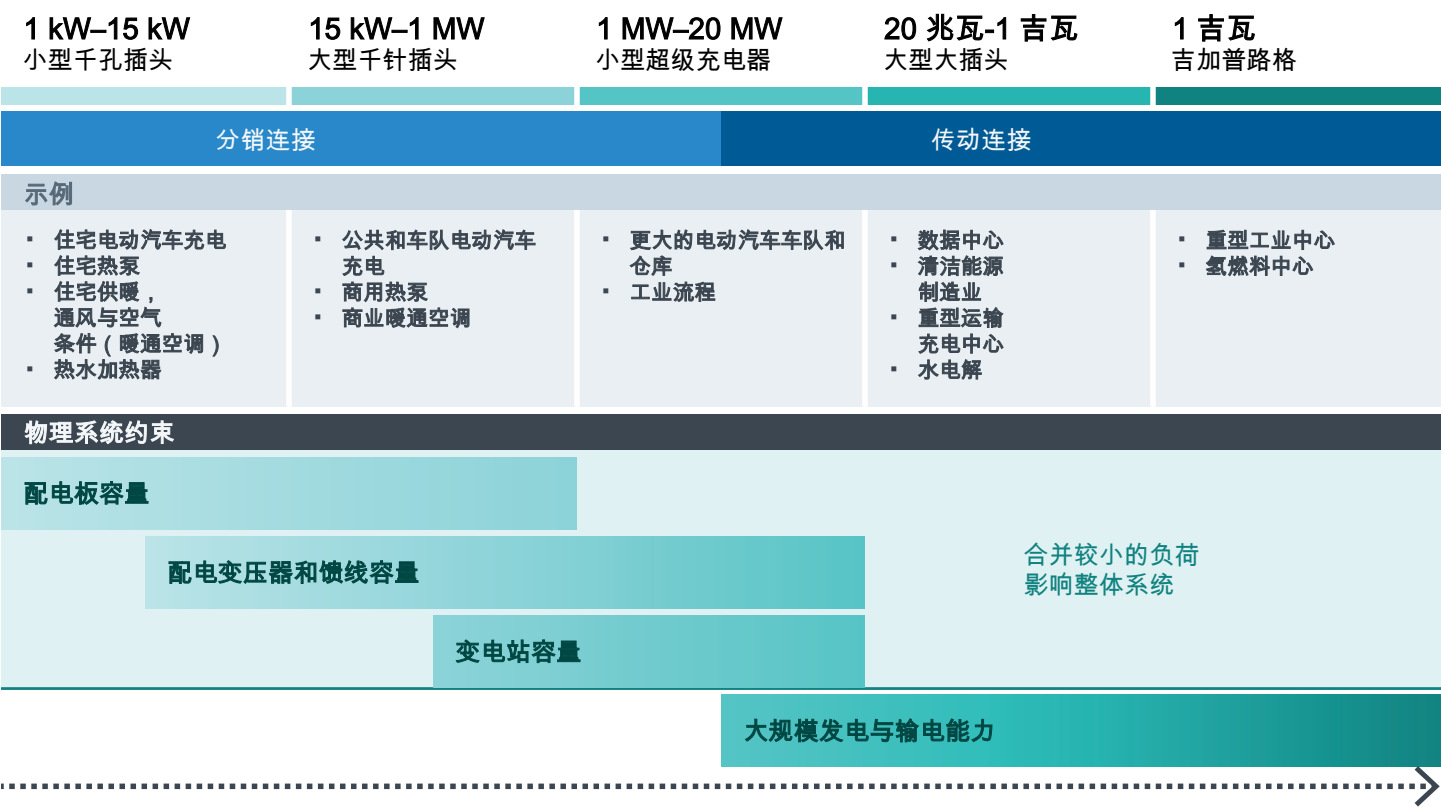
注意：数据包括来自12个独立系统运营商（ISOs）的预测，覆盖了美国客户获得电力的48%。百分比变化是针对2023年至2035年的数据。

RMI 图表。来源：RMI 参与 & 行动，<https://rmi.org/our-work/climate-finance/engage-and-act/>

RMI 图表。来源：RMI 参与 & 行动，

从住宅消费者到公司，所有规模的电力用户都在寻求连接到配电网和输电网，推动预测的负荷增长。图2展示了系统各层面负荷增长的可能影响。在输电系统中，负荷增长的主要驱动力包括新的制造、工业和数据中心设施，以及为电动汽车提供的大规模充电基础设施。在配电网中，电动汽车充电和电气化供暖正成为新的需求和资源。为了支持这些分散的终端用途，需要大规模部署更广泛的基础设施升级。鉴于与传统的终端用途相比，许多新的终端用途具有独特的特性，预测方法必须进步，以便能够确保电网的可靠性和降低成本。

展品2 电网各级均受负载增长影响。
负载增长 这影响电网的所有级别。



RMI Graphic 来源：RMI 分析
RMI 图形。来源：RMI 分析

多种类型的负荷增长驱动力在全国各地的电力计划中显现，如展品3所示。⁴ 在短期内，数据中心和先进制造业是美国东南部、Rust Belt 以及众多技术中心的增长主要驱动力。它们的大负载给公用事业公司和电网运营商带来了独特的预测挑战。

展示3 近期11家大型公用事业公司和独立系统运营商或地区的负荷驱动因素

近期负载驱动因素	数据中心	制造业	电气化
亚利桑那公共服务公司	✓		
加州独立系统运营机构	✓		✓
杜克	✓	✓	
ERCOT	✓	✓	
乔治亚电力	✓	✓	
ISO-NE			✓
MISO	✓		✓
纽约独立系统运营商 (New York Independent System Operator)			✓
太平洋西北部	✓	✓	
PJM	✓	✓	✓
SPP	✓		

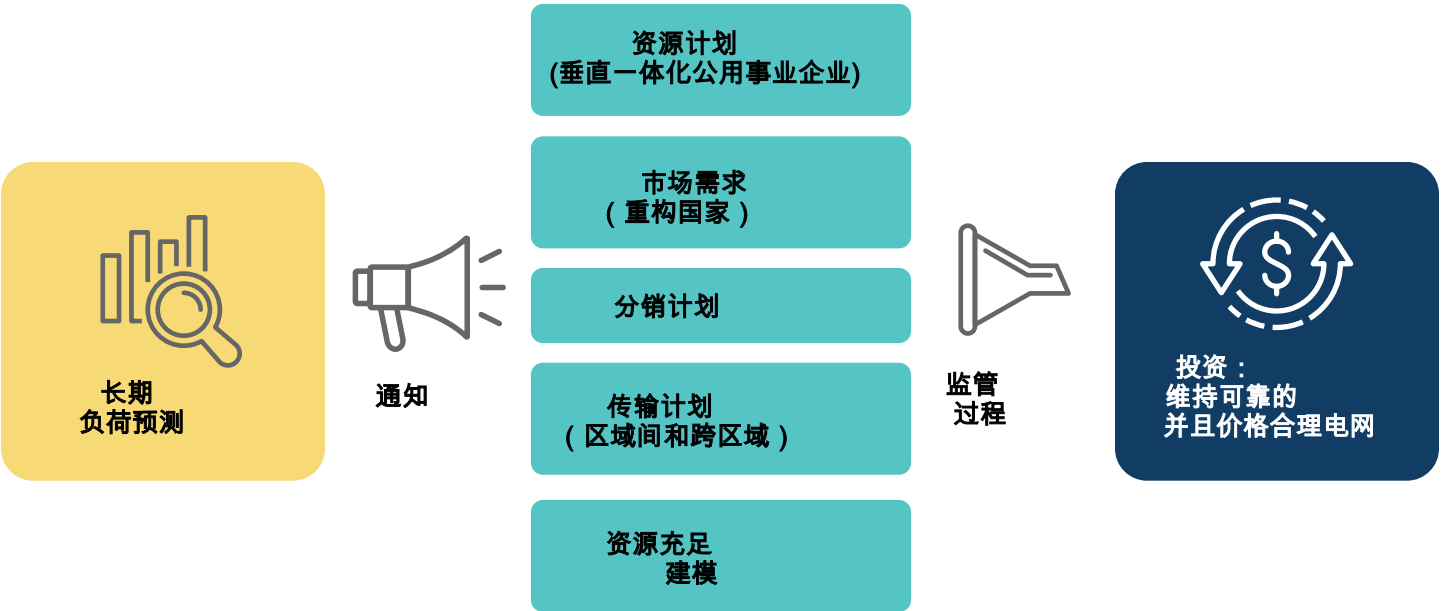
RMI 图表。来源：电网战略， <https://gridstrategiesllc.com/wp-content/uploads/National-Load-Growth-Report-2024.pdf>
RMI 图表。来源：电网战略， <https://gridstrategiesllc.com/wp-content/uploads/National-Load-Growth-Report-2024.pdf>

负荷预测是指预测负荷显现的时间、地点和规模，以及负荷的运行方式。公用事业公司通常会在多个时间尺度上开发多种目的预测。这些预测从每日运营预测到季度销售估算，再到10至20年的长期规划预测。

本报告主要关注长期预测，这是公用事业用于规划的基础。长期负荷预测构成了资源计划的基础，这些计划最终证明了对公用事业基础设施投资决策的合理性，并影响了电力的服务质量——即创造和维护一个能够以公平价格向所有客户提供可靠能源、容量和电网服务的能力。公用事业寻求预测其客户基础的每个部分的电力需求，包括传统的住宅、商业和工业。除了证明新的发电资源组合的合理性外，长期负荷预测还向重新构建的州、配电系统升级、区域输电升级和资源充足度建模（见图4）提供了市场需求的资料。此外，个别公用事业负荷预测通常纳入区域输电组织负荷预测，评估大规模系统输电升级和区域间输电的需求。

展示 4 负荷预测影响关键的监管程序；然而，最终的投资决策必须通过监管过滤。

流程及获得监管批准



RMI 图形

准确、频繁且负责的负荷预测是减轻大型负荷增加带来的主要风险的防御第一线：可行性和可靠性。预测被用于证明数十亿美元的投资。截至2024年12月，美国公用事业资源计划已在2023年至2035年之间提出了260吉瓦的风力和太阳能增加，84吉瓦的天然气增加以及74吉瓦的煤炭退役。⁵ 此外，至2024年，爱迪生电力研究所预测，美国投资者拥有的公用事业公司仅2025年一项就将实现创纪录的1682亿美元资本支出。⁶

尽管有这些投资，但以下几个因素需要更新预测流程：与监管流程的速度相比，企业希望连接新负载的速度，与现有公用事业服务相比，这些负载的规模，它们时间的不确定性，以及它们的运营特性。虽然先进的预测实践已经为较小的分布式负载开始形成，但新兴的大负载驱动因素尚未被系统地整合到许多公用事业计划中。⁷ 积压的互联队列、拥堵的传输系统以及越来越频繁和严重的极端天气事件进一步加剧了可靠性风险，因为负荷增长和退役威胁可能超过新发电设施的部署。

改善大负荷预测可以扩大公用事业和监管机构在服务负荷时可能考虑的选项集。当公用事业因新的负荷而措手不及，选项就会变得有限。2024年至今，这一点已变得清晰：预测的负荷增长目前正在导致公用事业承诺采取快速或熟悉的选项，例如推迟退役和新天然气提案。这些解决方案正在推动未来排放估计值的上升，增加了燃料成本风险，并否认了通过用更新、更高效的设备替换旧设备所能带来的成本节约。

本报告探讨了当前的大负荷驱动因素，详细介绍了主要公用事业公司和独立系统运营商如何将大负荷整合到他们的预测中，并建立了一套现代负荷预测最佳实践，以帮助监管机构应对这一新的发展时代。

进一步阅读

- 为了探讨负载驱动器的快速变化景观以及它们如何复杂化 [电力需求增长及预测变革时代](#) 负荷预测对于公用事业和系统运营商而言至关重要，请参阅。
- [布雷特，2024年5月](#) [平坦动力时代的结束。](#) 对于深入了解最近负载增长驱动因素，请参阅 [电网策略](#)，2023年。

监管部门必须寻求减轻低估和高估的风险。

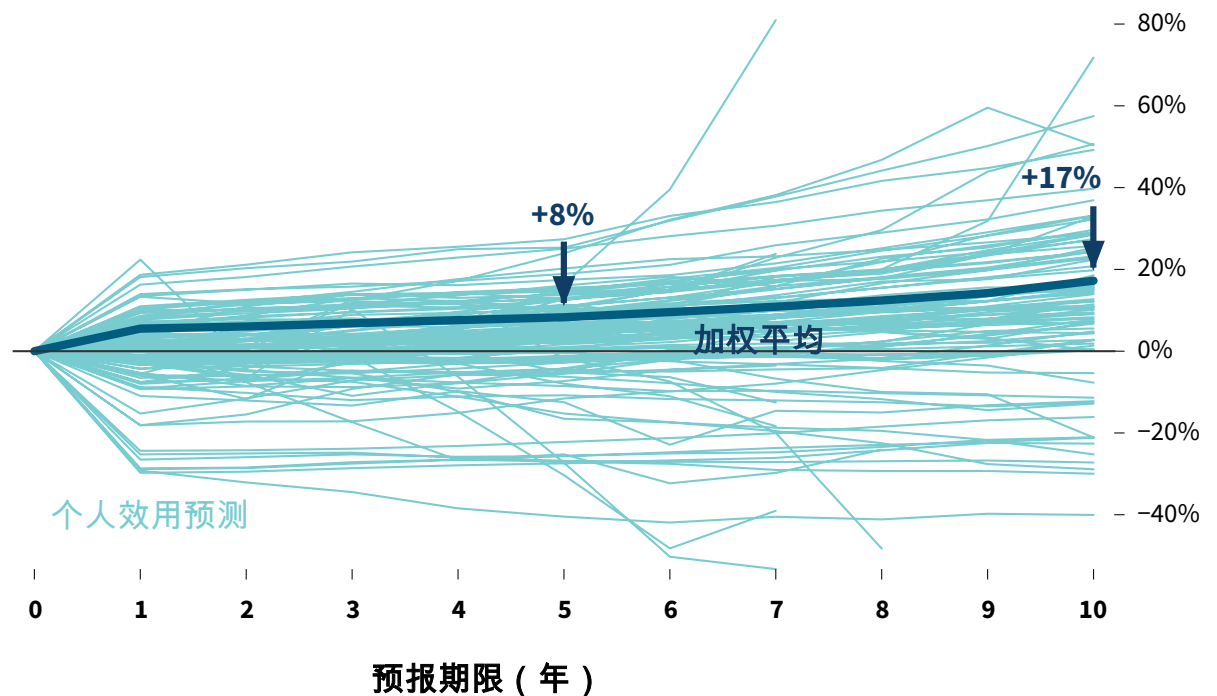
在一个理想的世界里，公用事业公司能够完美地预测负荷，监管机构将具备信心批准那些能够从长远角度为客户节省费用的主动型基础设施投资。然而，在现实中，准确预测未来是一个挑战。因此，监管机构的作用在于理解和减轻与负荷预测错误相关的风险。

历史过度预测

历史上，公用事业公司系统地高估了电力需求，这表明有机会改善预测流程。在2006年至2023年期间，公用事业规划者平均在5年预测中高估了8%的电力需求，在10年预测中高估了17%（参见图5）。对于近年来的预测误差更高：2012年至2023年的数据显示，平均预测值比实际值高出23%。

展示5

电力规划区域峰值需求预测误差 2006-23 电力规划区域峰值需求预测误差 2006-2023



RMI 图形。来源：RMI 分析 联邦能源管制委员会 (FERC) 表格编号 714 数据 <https://www.ferc.gov/industries-data/electric/general->
RMI 图表。来源：RMI 对联邦能源监管委员会 (FERC) 表号 714 数据的分析，

2017年RMI的一项研究回顾了历史负荷预测，突出了三个导致过度预测的系统因素，所有这些因素都与当今的挑战相关：⁸

1. 低估能源效率的提高。许多公用事业公司传统上使用每客户能源消耗量作为衡量标准，这一标准在过去几十年由于能源效率的提高而有所下降。尽管大型新数据中心负荷能源强度较高，但预计整个经济的能源强度将继续下降。预测者应努力在自上而下和自下而上的建模方法中捕捉各个行业的效率趋势。

2. 过度预测与传统公用事业激励措施更为一致。对于没有现代化公用事业商业模式的国家，公用事业公司因资本投资的回报率而被激励去建设更多的基础设施。⁹ 并且，如果允许的回报率高于公用事业公司的资本成本，这种激励作用就更强。尽管保持利率可负担是优先事项，但将利率上涨具体归因于过度预测的情况并不是直截了当的。

3. 预测不足可能导致资源充足性挑战，对此公用事业公司负有责任。在某些情况下，预测不足可能导致极端条件下出现负荷削减、电压降或停电，这将严重影响客户。此外，这类资源充足性问题没有简单的解决方案。过度依赖市场采购和紧急投资可能会产生额外的成本，最终由用户承担。

新建供应侧资源（长达10年）所需时间与某些新大型负荷准备接入的速度不匹配，加剧了这些动态。例如，数据中心的建设速度可以远远快于传统工业设施（即它们可以在一到两年内投入使用）。然而，由于数据中心的硬件更新周期为两年，即使资源计划使用了最新的硬件信息，当计划中的资源到位以满足需求时，它们仍将落后几个周期。鉴于基于人工智能（AI）的应用程序算法效率仍是一个相对较新的领域，软件和底层硬件的效率提升预计将在未来实现。¹⁰



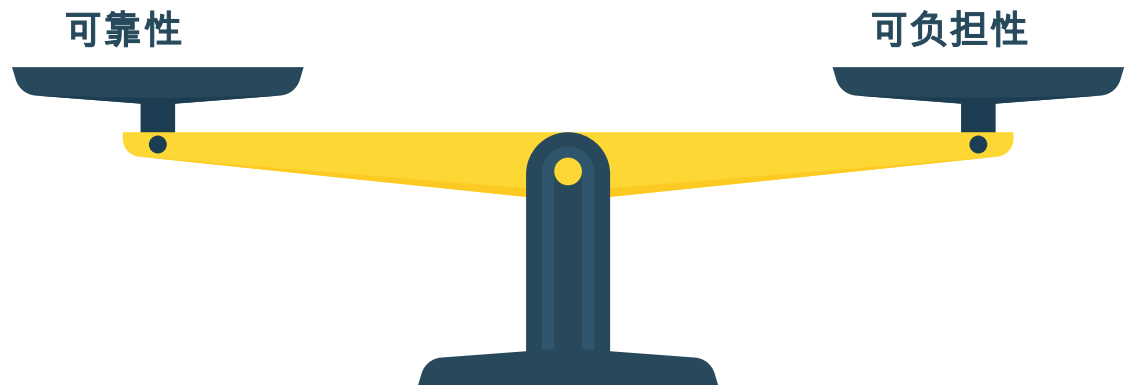
来自预测不足和预测过度所带来的风险以及缓解这些风险的机遇

预测是平衡可负担性和可靠性的风险的机会，而预测不足或预测过高都可能使天平倾斜（见展品6）。

低估主要代表了可靠性风险和实现经济开发等政策优先事项的风险，这影响了公用事业及其投资者、政策制定者和客户。此外，在重组市场中，容量不足会增加客户账单，使他们负担不起（例如，消费者将在2025-26年交付期间为PJM的容量支付147亿美元，而2024-25年交付期间仅为22亿美元）。¹¹

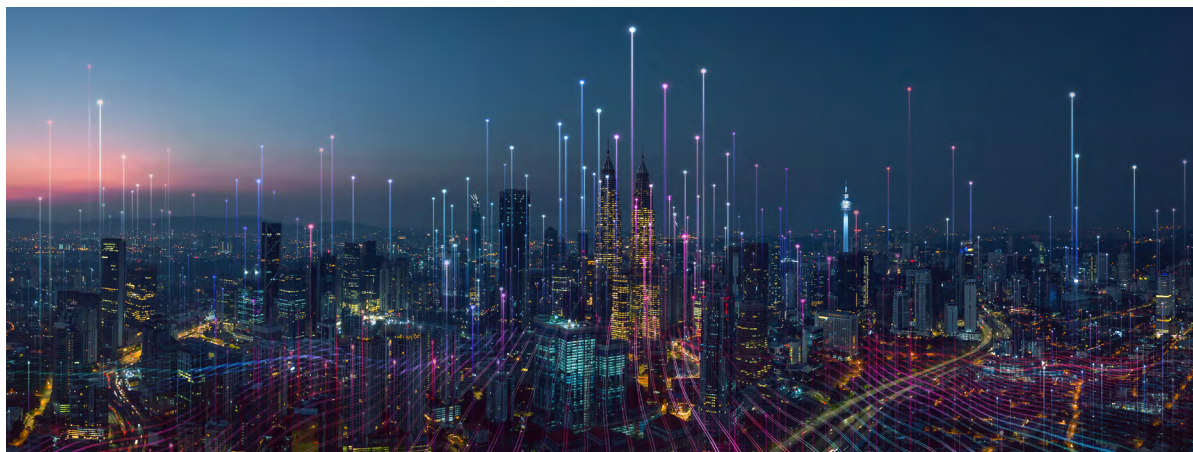
客户可负担性是系统性过度预测导致过度投资的主要风险。当前监管框架中包含了一些对此的检查措施，例如，监管机构有权暂缓批准投资，直至现有基础设施的利用率满足一定标准。在某些情况下，潜在的投资未能通过谨慎性审查。过度预测也可能将关注点或资金从维护转向系统扩张。随着70%的输电线路超过25年，正接近其典型使用寿命的尽头，¹² 对现有系统的维护投资正日益关键。

展示 6 负荷预测是一项在可靠性和可负担性之间实现平衡的练习。



RMI 图形

负载特性对预测至关重要。



新的负荷具有独特特性和时间，这在预测中需要反映出来，因为它们改变了未来资源投资的选项。以下是一个突出特定负荷特性的框架，可以帮助关于负荷增长的规划讨论。

然而，负荷增长影响电网的各个层次，单个负荷的影响则取决于几个定义特性（见展品7）。

- **负载形状：** 在高峰时段运行或在与其它许多负荷同时存在的季节集中的负荷，更有可能需要电网升级或新的发电。负荷随时间的变化，包括是否存在从部分运行到全运行的过程，可以解锁额外的资源选项。

- **预测不确定性：** 未来的负载预测精度取决于天气、经济、客户行为以及设备程序提供和默认设置的变异性。天气和客户行为难以准确预测，导致对未来数小时或数天的预测存在不确定性，更不用说数年的预测了。

- **灵活性潜力：** 许多更多的负荷需要连接到电网中，但所有负荷同时运行的电网会加剧排放和成本挑战。理想情况下，新的负荷驱动器应具有灵活性并愿意在电网压力期间多付费。了解负荷可以提供的灵活性和时间可以减少所需的发电容量，或用于设计新的灵活性激励措施或计划。

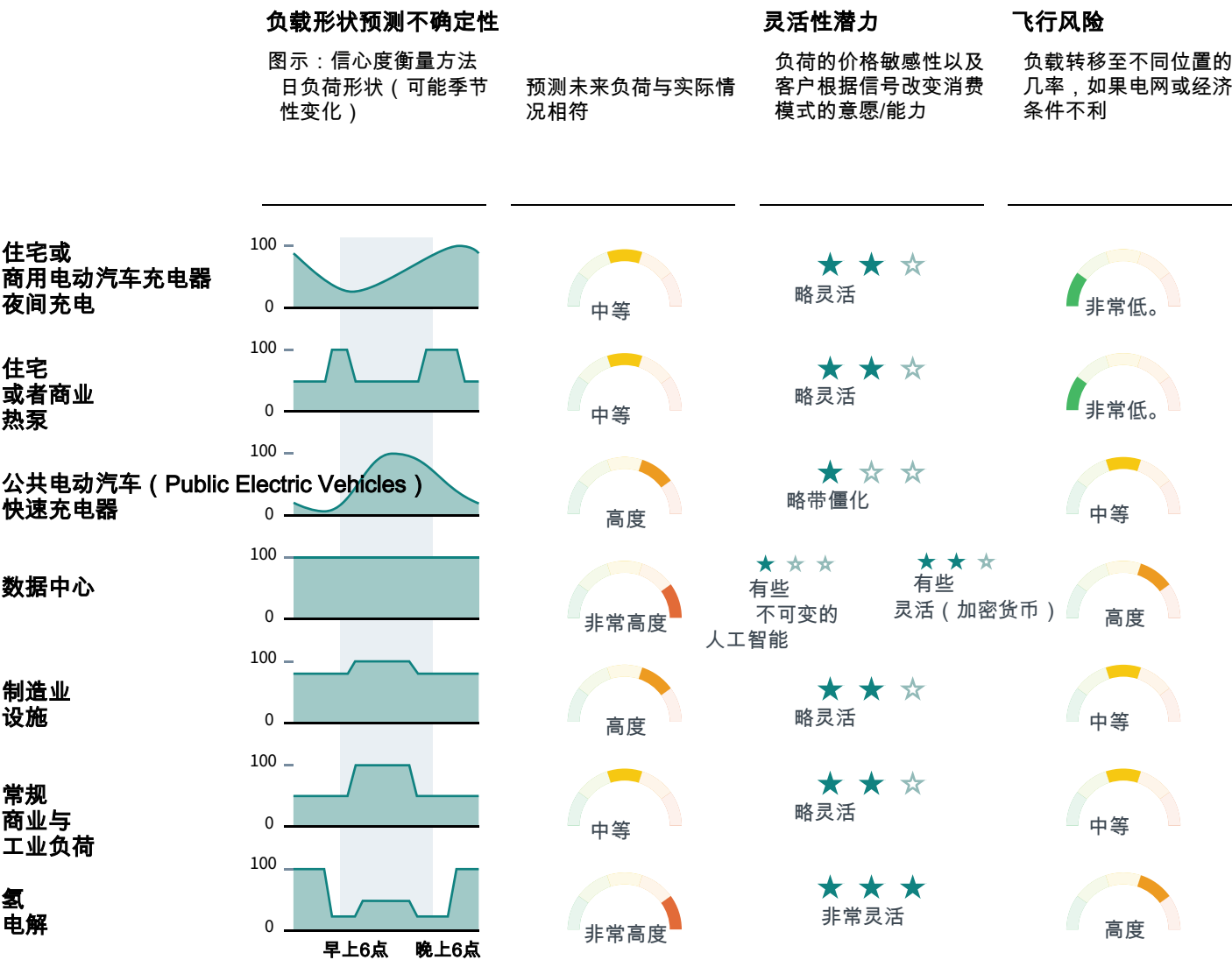
- **飞行风险：** 所有企业都需要电力。有些企业需要大量的电力。有些需要廉价的电力。许多企业需要附近有熟练的劳动力。这些动态影响了负荷驱动器最初选择连接的地方，以及市场或经济条件的变化可能使他们决定缩减或扩大现有业务或将其新业务转移到其他地方的可能性。

展示7 并非所有负载都相同：负载类型如何影响的关键特征

不是所有负载都相同：负载类型如何影响电网的关键特征

电网可以显著变化。

差异显著，负载类型如何影响电网，可能存在显著差异。



RMI 图表。来源：RMI 分析
RMI 图形。来源：RMI 分析

老、新、复苏——对大型电力负荷终端用途的深入探讨

新的大型负荷，尤其是数据中心和工业及制造业负荷，对预测者来说构成了挑战。本节详细介绍了这两种大型负荷的特征。

数据中心

数据中心是一个已建立成熟的应用领域，近期耗能型的大型语言模型和证明工作量型加密货币挖矿的兴起使其变得相关。数据中心负荷的增长在地理上预计将不均匀，这可能会在目前15个州占据了全国数据中心负荷的80%的当地带来挑战。例如，预计到2023年，数据中心将占弗吉尼亚州25.6%的电力负荷，并且更高的增长预测预计到2030年这一份额将增加到46%。¹³

负荷形状和灵活性潜力

有多种类型的数据中心，每种都有独特的灵活性考量。美国电力研究所（EPRI）于2024年发布的一份白皮书综合了几个不同的数据来源，以描绘不同类型数据中心的地理热点。¹⁴ 多租户或共址数据中心（位于同一物理位置并由多个组织共享或租用的数据中心）向客户提供极其可靠的服务。一级数据中心（最低级别）的目标是99.671%的在线时间，这意味着每年只有28.8小时的停机时间。¹⁵ 因此，多租户数据中心提供商以最小化到无灵活性的方式规划和运营，目标是尽可能接近恒定的100%负载系数。

相比之下，由个别科技公司拥有和运营的数据中心可能具有更大的灵活性潜力，因为它们面临的客户驱动限制较少。例如，谷歌正在进行一个试点项目，以确定如何最佳参与其数据中心的需求响应计划。¹⁶

加密货币挖矿运营通常因其对价格更敏感而灵活运作，但它们参与灵活性项目的支付由于需求响应的收益超过核心业务的收益，这引发了争议。¹⁷ 采矿作业可能会加剧排放，同时也会增加当地噪音和空气污染。¹⁸ 此外，美国能源信息管理局的深入分析得出，围绕加密货币挖矿的能源消耗存在重大不确定性。¹⁹ 对这一领域的灵活性潜力进行分析变得更加具有挑战性。

预测不确定性及飞行风险

数据中心的数据增长或许目前具有最高预测不确定性的大型终端使用之一。围绕生成式AI的兴奋情绪推动了当前数据中心的热潮，但如果长期商业模式无法盈利或如果硬件和软件的进步降低了行业所需的电力量，数据中心会面临过剩资产和违约合同的风险。然而，在短期内，已经足够多的投资被用于开发大量新的数据中心，正如在弗吉尼亚北部所经历的那样。

一系列针对大宗货物的关税正在出现，其中一些专门针对数据中心，这有助于缓解预测的不确定性和风险。²⁰ 关税通过如下机制帮助缓解不确定性，例如签订的最大需求合同，这是允许的最大需求负荷。

行动

达成合同下要求的水平，并包括达到该需求的具体爬坡时间。见

监管机构可以采取的措施来改善预测

(第31页) 更多关于关税设计和解决这些担忧的额外选项。

数据中心没有严格的土地利用要求，因此可以基本上在任何具有稳固基础设施（例如，电力、光纤、水源、道路）的地方设立，这导致了选址位置的不确定性。然而，一些数据中心可能会寻求与发电设施共同设立，以降低传输和分配成本或排放。²¹ 数据中心公司通常会与多个公用事业公司协商，争取最优惠的合同价格和条款。作为回应，许多州已经为数据中心创造了税收减免，作为更广泛的经济政策的一部分。²² 尽管数据中心提供的长期就业效益较小，但其中的设备所缴纳的个人财产税和房地产税可以创造成税收意外之财，尤其是在较小的经济体中。²³ 这些激励措施最初使得预测数据中心可能的位置变得更加简单，但随着现有电网在主要市场的空间受限，预测的不确定性可能会增加。

许多数据中心公司（例如，谷歌、亚马逊、Meta和微软）都做出了自愿的气候承诺。这促使他们寻求关税和其他新颖的安排，以提供清洁能源来满足他们的需求。例如，谷歌与NV能源和Fervo签订了清洁过渡关税。²⁴ 并且，微软与康斯坦斯能公司签署了一项电力购买协议以重启三里岛核电站。²⁵ 此类协议可以包括比传统关税更长的期限，为公用事业公司和资产所有者提供了更大的信心，相信他们的长期投资将保持相关性。

国家间沟通、改进分区法律，以及潜在数据中心开发商的财政承诺可以为负载增长预测提供更多确定性。数据中心仍然受制于州和地方的商业分区法律。因此，城市和州可以优先推动它们向棕地和灰地地区发展，这些地区可能符合能源基础设施再投资计划。²⁶ 因此减少了可能的开发地点集合。

进一步阅读

- 对于探讨当前数据中心服务请求的理解以及领先实践，以及将这些请求整合到规划和运营过程中的探索，
[数据中心方面关于用户体验和趋势的2024调查](#)
查看，EPRI, 2024.

工业负荷与制造业

首次在一个世代中，制造业正回归美国而不是向外迁移。²⁷ 这次回流主要由对清洁能源转型做出反应而涌现的新行业推动，并通过通货膨胀减免法案的激励措施得到加速。²⁸ 因为许多工业设施在满载因子下运行大型机器，它们有提供负荷灵活性和电网稳定服务的机会。

负荷形状和灵活性潜力

工业负荷通常具有最“经典”的负荷形状，随着工人班次的变动而变动。换句话说，由更多工人值班的生产班次会经历更高的电力需求。随着工业领域的电气化，工艺热需求可能会在非工作时间外提升负荷系数。然而，新的工业电气化技术可能会为负荷灵活性提供充足的机会。²⁹

此类负荷通常表现出一定的灵活性，这有助于早期需求响应计划的实施。随着需求响应计划的规模和价值不断扩大，公用事业公司可以继续与工业客户合作开展需求响应计划，因为他们的良好记录为这种资源提供了信心。此外，如果绿色氢气更加普及，由于其价格敏感性，它将提供一个近乎理想的工业流程以参与需求响应。电力占氢气生产平均成本的50%至70%。³⁰

预测不确定性及飞行风险

工业客户往往具有较低的需求预测不确定性，因为选址和许可工业设施需要大量时间。³¹ 这通常意味着一旦一座工业设施开门营业，它就很少会留下为其建造的电气基础设施资产。简而言之，工业场所一般需要：

- 获得充足、正确划分区域的土地
- 一个能通过环境审查并获得社区批准的地点。
- 支持运输原材料和成品的基础设施（或创建此类基础设施的能力）
- 一支熟练的当地劳动力队伍
- 经济发展税收优惠
- 廉价电力或经济发展率（例如，通过电解进行氢气生产所需的经济增长率）
- 大容量互连，通常需要升级分配，有时则需要升级传输。

鉴于其对价格的敏感性，工业客户可能在满足其他要求的情况下，战略性地靠近廉价清洁资源进行集中布局。例如，科罗拉多州的Evraz Rocky Mountain钢铁厂最近建设了一个现场太阳能发电设施，以降低净负荷。³² 然而，从历史上看，大多数工业流程都使用化石燃料来产生工艺热量，工业热泵技术正在开始成熟，因此寻求廉价清洁的电力可能为工业部门提供竞争优势。

负荷预测最佳实践

在最近关于大量负载的兴奋之前，一系列预测最佳实践已经被阐述。这些最佳实践现在对电力的实施更加重要。以下是从几个资源中总结的最佳实践概要。³³

采用基于场景或随机负荷预测的方法。 当更少的终端用途需要电力时，发电资源和负荷对天气的依赖性和灵活性都较低，因此使用单一确定性预测就足够了。驱动投资决策的长期规划预测应考虑多种未来情况。

- 将负荷预测以区间而非单一值的方式沟通。采用中位情景（或任何单一情景）可能会掩盖随机方法提供的价值，这些方法旨在鼓励规划者考虑各种风险、其可能性和它们如何影响负荷增长。这种区间可以更好地为下游模型（例如，资源充足性研究）提供信息，以及允许监管机构看到一个更细致的画面，这有助于阐明需求性、最小遗憾、先发制人和鲁莽投资之间的差异。
- 将合理概率分配给每种情景。鉴于大负荷周围的不确定性和猜测，公用事业公司可能会选择关注高负荷情景，并隐含地分配更高的概率给这种情景。规划者应清楚地传达情景或范围的可能性。
- 确定负荷预测不确定性的来源。并非所有的不确定性都以相同的方式影响预测。例如，与天气相关的不确定性可能在下游资源充足性建模中得以考虑。另一方面，一位仍在探索在不同公用事业公司之间选址以确定最有利位置的数据中心潜在客户，代表了未来负荷的潜在大幅变化——因此可以通过与定制概率相关的情景进行处理。
- 将考虑异常政策和经济状况的情景纳入其中。虽然应急计划可以帮助对冲意外事件（例如，乌克兰战争），但考虑州和联邦政策变化以及经济周期的情景可以帮助对冲可能不太可能但会有长期影响的条件。
- 将未来气候数据以及历史天气数据包括在内。这有助于捕捉更完整——因此更具现实性——的未来天气条件分布（例如，First Street Foundation的洪水图使用未来气候数据在北卡罗来纳州的阿什维尔预测了比联邦紧急事务管理署的洪水图更高的风险，后者使用的是历史数据）。³⁴
- 采用长期时间范围来规划预测以捕捉中长期的趋势（即10年及以上）。然而，认识到预测的准确性会随着时间进一步降低。

将终端使用预测与计量经济学预测相结合。通过技术特定的模型，新兴技术和现有技术的采用模式将能够更准确地预测。³⁵ 模型可以逐级上升至区域范围的随机规划预测，并且可能包括它们自身的随机元素。然而，任何混合方法都必须防止重复计算，这在为新负荷进行调整而不考虑其在计量经济学预测中的表现时可能会发生。

- 开发针对关键末端用途的8760负荷分布，这些用途尚未达到市场饱和或尚未与典型的宏观经济指标相关联。一些既定末端用途（例如，居民制冷设备）已达到市场饱和，因此末端用途建模不会提供额外价值，而新出现的末端用途（例如，电动汽车和热泵）的采用和运营模式则存在较大不确定性。此外，开发追踪关键大型负荷客户（例如，数据中心或制造工厂）的负荷分布可以帮助进行回顾性分析，并为改进未来的预测假设提供一种方法。

- 对采用、操作和灵活性进行单独预测。在一些公用事业公司，对新兴终端用途和大型客户的采用和运营进行预测是常见的。³⁶ 预测的灵活性需要更加细致，并且将此类预测纳入下游建模实践（例如，资源充足性）仍然是需要改进的领域。

- 整合新近可用或未充分利用的数据。历史上，回归算法为公用事业提供了一流的预测工具。虽然回归算法在今天的某些应用中仍然表现良好，但人工智能算法可能提供一套更好的工具来捕捉数据中的复杂趋势，从而提高预测能力。这可能使得公用事业能够利用多元化的数据流，例如智能家居设备数据、车辆远程信息处理、天然气使用情况、天气再分析、当地气候、客户倾向性等，为各种终端用途和大负荷客户提供差异化的预测，以便在采用、运营和灵活性方面取得优势。

- 跟踪各种终端用途的持续本地采用情况，以改进终端使用模型。公用事业公司可以与智能家居提供商、虚拟电厂聚合商、大型负荷客户和当地政府合作，他们各自手中拿着描绘当前采用趋势的拼图的一部分。监管或政策行动有助于使此类数据可用于公用事业规划者。

- 寻求对预测的直接客户反馈。特别是对于大型负载，包括制造商、数据中心和电动汽车车队，额外的参与可以导致双方都取得更好的结果。此外，频繁的反馈与回顾性分析可以在公用事业和大型负载客户之间建立一个责任循环，这可能使监管机构对这些客户的预测更有信心。

- 将第三方预测标准进行对比。许多独立组织进行最终用途预测。例如，EPRI的EVs2Scale预测了轻型和中重型电动汽车的采用模式。³⁷ 并且，国家可再生能源实验室的ResStock和ComStock数据集为美国建筑库存提供了终端使用概况。³⁸

确保在不同规划过程中一致地使用负荷预测。 公共事业部门应在所有规划层面——预算规划、配电网规划、输电网规划、综合资源规划、资源充足性评估和应急规划——使用一致的数据和假设进行负荷预测，或者解释为何以及如何他们的负荷预测存在差异。尽管使用单一预测具有内部一致性的好处，但这也加剧了任何预测错误的后果。

进一步阅读

关于制定预测的概述及其相关最佳实践，包括对公用事业负荷、能源效率、需求灵活性、建筑电气化、电动汽车、分布式太阳能、分布式电池存储和公用事业成本的预测，请参阅 **发展预测：基础知识与最佳实践**，劳伦斯伯克利国家实验室，2023年。

案例研究：预测大量负载的兴起实践

尽管目前没有任何一个公用事业公司的负荷预测流程可以成为今天的模范，但负荷预测增长最快的地区的最新发展提供了重要的经验教训。它们还阐明了监管人员、大型负荷客户和其他干预者在提高预测准确性方面所起的作用。本节探讨了弗吉尼亚州的Dominion Energy、北卡罗来纳州的Duke Energy和乔治亚州的Georgia Power的最新档案记录。

案例研究

弗吉尼亚州多明尼克能源公司诉讼程序

一般预测方法

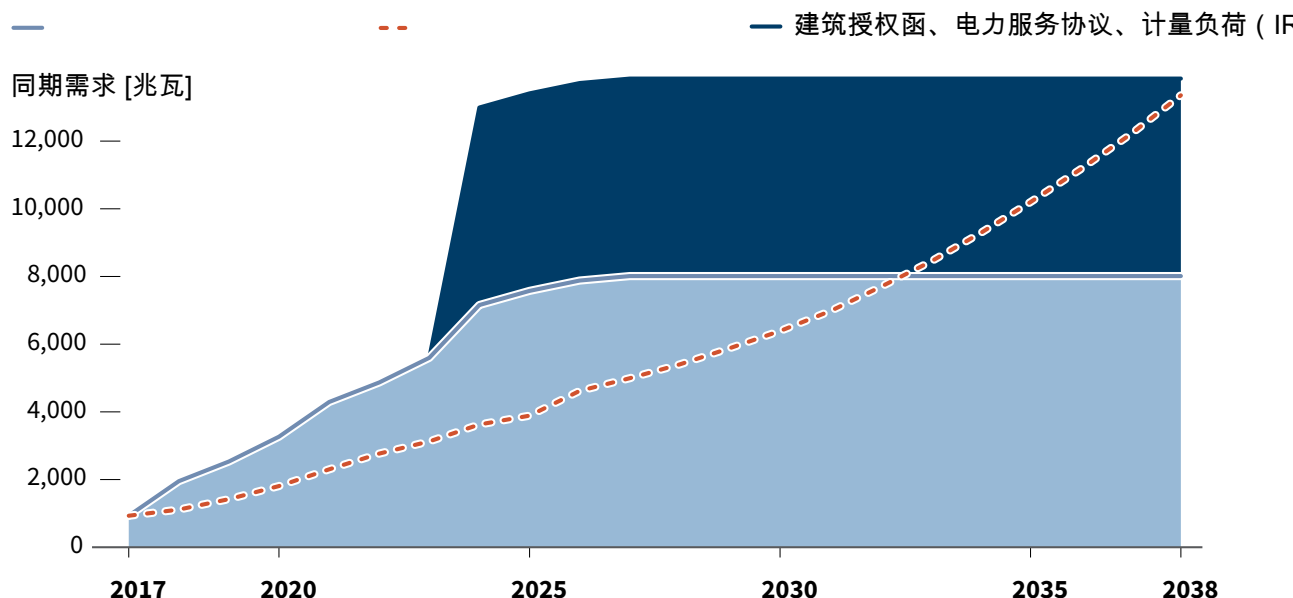
Dominion Energy采用计量经济学方法来预测未来15年内的销售、能源和峰值需求。³⁹ 销售预测按客户类别生成月度值，并分别对供热负荷、冷却负荷和非天气敏感负荷进行估算。在住宅预测中，根据历史趋势动态调整家电饱和度和使用水平。能源预测是通过使用简单回归来提取历史销售与能源消耗之间关系的方法从销售模型中得出的。

历史调整后的每小时负荷用于预测每小时峰值负荷。在此调整后的负荷中，排除数据中心数据，但通过分布式太阳能发电和零售选择添加负荷偏移。峰值负荷预测首先预测非天气敏感的基础需求；然后利用多个天气变量——温度、湿度、风速、云量和降雨量——来预测天气敏感需求。额外变量捕捉每日和季节性时间尺度的变化，并考虑极端或异常事件（例如，飓风或COVID-19大流行）。最后，对数据中心、分布式资源、零售选择和电动汽车的调整在最后进行。

数据中心预测方法

多米尼オン在其数据中心负载预测方面经过多年的改进（见附录8）。首先，它在其服务区域内识别出最大或增长最快的数据中心客户——在最近的迭代中为八家客户——然后将剩余的所有数据中心客户合并为一个额外的“客户”。其次，它通过统计方法（即线性回归）使用公共和机密客户数据混合预测每个客户的负载。这些客户预测合并为一个整体预测，代表“高负载”情景。多米尼オン使用历史计量数据开发了一个数据中心行业的统计模型，并将其作为其“低负载”情景。最后，它将这两种情景的平均值推导出“中等负载”情景，并将其提交给PJM。

数据中心合同容量与实时计量需求对比 数据中心合同容量与实时计量需求对比，在 Dominion Energy 的服务区域内



注：Dominion在2018年之前未审查ESAs，并假定2017年的ESAs等同于实际需求。实际ESA
注：Dominion在2018年之前未审查ESAs，并假定2017年的ESAs等同于实际需求。实际ESA
总金额将高于这个假设。总金额将高于这个假设。

RMI 图形。来源：Dominion Energy, https://cdn.dominionenergy-prd-001.azureedge.net/-/media/pdfs/global-company/irp/2024-irp-w_o-appendices.pdf?rev=c03a50c512024903ae9806a0b0a250e3
RMI 图形。来源：Dominion Energy, https://cdn.dominionenergy-prd-001.azureedge.net/-/media/pdfs/global-company/irp/2024-irp-w_o-appendices.pdf

尽管Dominion的2024年综合资源计划（IRP）仍在干预者和委员会的审查中，但其2023年IRP更新具有指导意义。⁴⁰ 弗吉尼亚委员会工作人员的顾问指出，PJM和Dominion的负荷增长预测新近更为乐观；预测数据中心负荷增长高于ERCOT所有实际负荷增长。⁴¹ 此外，仅五家公司构成了到2030年数据中心总增长预测的80%。换句话说，这些公司中的任何一家策略的轻微调整都可能对多域内意义深远地改变实际需求。最后，工作人员的顾问提醒，预测不仅应考虑预期的未来经济条件，而且还应寻求理解负荷实现的速率（例如，实际建设的数据中心负荷量）与预测之间的差异。

案例研究

杜克能源在北卡罗来纳州的诉讼程序

通用预测方法

杜克能源最近发布的长期负荷预测是在其综合碳计划和综合资源计划（CPIRP）中制定的。⁴² 预测始于穆迪（Moody's）提供的整个服务区域经济预测。杜克（Duke）随后使用统计调整后的终端使用模型，结合关键特征，包括收入、电价、工业生产指数、天气和家电饱和趋势，制作了能源预测。对预测的后期修改考虑了电动汽车、屋顶太阳能和节能项目的增长。最后，杜克从能源预测中推导出夏季和冬季高峰需求预测。

杜克正在开发一个综合系统及运营规划框架，以提升其负荷预测能力。⁴³ 它包括Morecast，这是一个专注于电气化的10年每小时分布系统预报，以及第三方能源强度预报。目前，Morecast集成到IRP流程中仍在开发中。

大型负荷预测方法

尽管经济增长是包含在穆迪经济预测中的基准预测的一部分，杜克在2023年CPIRP中首次手动应用了经济发展调整。这一调整考虑了杜克服务区域内以前预测周期中缺失的特定高级阶段经济发展项目（例如：数据中心）。为了避免与计量经济学模型预测的增长重复计算这些项目，杜克根据项目基础降低了预测的负荷预期，通常会降低30%至60%。

根据CPIRP的证词，⁴⁴ 两个主要标准被用于确定用于经济结构调整的项目：（1）潜在的较大负荷客户已签订协议，表明有意从Duke获得服务，或者正处于达成该目的的后期阶段，或（2）潜在的较大负荷客户已在Duke的区域内开始物理开发活动（例如，获取土地，启动土地重新分区）。对于用于初始2023年CPIRP的2023年春季负荷预测，Duke确定了八个经济开发项目。到了2023年秋季更新时，另外27个项目符合标准。鉴于潜在项目的迅速增长，Duke为2023年秋季开发了额外的经济开发负荷预测，其中包括尚未作出实质性承诺的其他已知大型项目。

北卡罗来纳州公用事业委员会在与杜克能源公司达成的协议中，对负荷预测实践提出了额外要求。⁴⁵ 在协议中，杜克公司同意监控经济发展和大容量输电管线，并每半年向委员会更新其调查结果。在方法论上，协议要求进一步讨论关于不确定性的预测方法，通过客户计划和电网边缘（一种建筑能源效率管理软件）对分布式能源资源的更多考虑，以及考虑加强电网的技术。

案例研究

乔治亚电力

通用预测方法

乔治亚电力公司每三年进行一次全面综合资源规划（IRP）程序。2023年IRP更新于2024年4月获得批准。⁴⁶ 但与2022年IRP相关的基本预测是最新的总预测。

Georgia Power公司进行电力销售和高峰负荷的短期及中长期预测。在更高层次上，短期预测采用的是计量经济学的手段，将经济和人口统计变量输入一个基于回归模型进行分析。1980年到2020年之间的历史天气数据取平均值，以确定一个用于预测的正常天气年份，从而忽略了历史极端数据，也不反映不同、更极端未来天气的可能性。

长期预测的展望期为20年，由IRP法规所驱动。长期预测采用终端使用模型（来自应用能源集团的LoadMAP），预测各种技术的采用情况，并通过客户类别生成长期预测。最后，将得出的短期和长期模型结合，以生成最终的预测，短期预测用于未来3年，而长期预测用于剩余的20年期间。

大型负荷预测方法

乔治亚电力公司也预测了快速负荷增长，主要来自数据中心和清洁制造业。在2023年IRP更新中，公司对其2022年IRP的预测进行了重大调整，因为可能存在大量负荷增加的情况。作为此次更新的一个部分，它建立了一种将已知项目输入整合到其预测中的方法。尽管乔治亚电力公司在其先前计划的预测中已包含大量负荷以考虑已知的重大工业项目，但其2023年IRP更新 filing 显示了这一过程的重大扩展。⁴⁷

干预方强调了几个提高乔治亚电力公司大型负荷预测的机会：

- 加强包含在预测中的负荷的承诺要求：在干预者证词中，微软指出，在包括尚未确定位置和供应商的大型项目中，乔治亚电力公司在同行中独具特色，这可能导致对新大型负荷的过高估计。⁴⁸
- 使用更广泛的预测范围进行建模：微软和几位其他干预方评论说，在增长场景中使用P95负荷预测（代表由蒙特卡洛模拟产生的第95百分位负荷预测）可能是合理的，但在2023年IRP更新中建模所使用的唯一预测并不如此。
- 提高透明度：委员会公共利益倡导小组表示，有必要提高透明度——特别是关于爬坡率和负荷实现假设——以确定大负荷预测的质量。此外，一些干预者表示，经济发展管道中预期负荷的保密性将风险转移到了可能退出管道且后果轻微的公司。

尽管乔治亚州公共服务委员会最终批准了IRP更新中的预测，但它附带了一个条件，即批准并不构成对创建负荷预测所使用方法的批准。此外，它指示乔治亚电力公司提交每季度的大型负荷更新，以帮助2025年的IRP。⁴⁹

乔治亚电力公司现在提交其负荷预测的季度更新，包括其经济发展管道。这些管道更新包括：

- 总管道规模
- 任何与前一个季度相比的变化（例如，项目进入或退出流程、施工更新以及新负载公告）。
- 预测的负荷增长时间表
- 个人项目信息（例如，客户类别和市场细分）

截至2024年9月，到2030年代中期的完整经济发展管道容量达到了36.5吉瓦。⁵⁰ 来自这一经济发展管道的信息预计将流入乔治亚电力公司的负荷实现模型，这是其长期负荷预测过程中的一个组成部分。

监管机构可采取的行动以提高预测能力

监管部门在预测方面可以扮演三个关键角色：（1）建立预测指南，（2）审查和批准公用事业部门的预测，（3）批准或拒绝基于预测的投资成本回收。尽管公用事业部门最终负责制定预测，但监管部门可以影响不同场合预测的质量和适用性。虽然没有任何预测是完全准确的，但理想情况下，预测过程有助于指导重要的监管决策。

监管部门在重组和垂直整合的市场中可以关注三个目标，以在面临大型新负荷提出的挑战时支持更有用的预测实践（参见展品9）。

展示 9

目标：通过整合大量负荷现代化预测

今日负荷预测的挑战	目标：负荷预测
有限： 负荷预测可能不包括相关大负荷的特点。	彻底的： 确保负荷预测准确反映大型负载的独特特征使其达到最佳状态能力。
过时： 负荷预测更新每年并不符合目前的步伐变化。	最新更新： 增加更新频率，包括双方的更新。负荷预测和负荷预测过程。
模糊不清： 负荷预测可依赖于无法访问的数据，导致偏差追踪不可行。不可行。	验证中： 制作负荷预测数据和流程可见于其他利益相关方并创建问责制的机会。

RMI 图形

以下小节探讨每个目标，并提供监管机构为推进负荷预测目标可以采取的具体行动（见图10）。目标和行动是通过与监管机构、行业专家和RMI工作人员的讨论确定的。[监管实验室小组](#) 我们希望通过提供一个可供选择或构建的菜单，各州能够更全面地改进负荷预测，以应对今天的挑战。

展品 10 监管者的行动

目标为 负荷预测	监管部门可以采取的行动
彻底的	- 提高佣金并增强对新负载的能源理解，通过启动技术会议、调查程序或通过非正式方式参与与利益相关方。 - 修订规划指南以纳入新兴的预测实践。 新负荷，例如建立单独的大负荷预测和处理流程 为了避免重复计算（见） 附录：负载发现问题预测 ）。. - 协调与州和地方政府以及其他州的沟通，以了解激励结构和可能影响大型负载的立法。
最新	- 需要更频繁地报告长期负荷预测，例如季度 - 迭代预测流程，以便随着新实践和终端用途的出现而不断更新。 预测保持当前状态。
验证通过	- 鼓励公用事业公司利用透明的外部数据和预测 尽可能使用工具，以便股东和委员会可以参与操作。 在审查假设中发挥积极作用。 - 制定预测和实际数据，并从过去的预测中学习，以评估过去预测准确性及识别误差来源。 - 探索基于预测准确性的货币激励或惩罚。 包括那些将风险转移到特定大型客户以驱动负荷的关税增长或至实用性。

RMI 图形

目标
通过

确保负荷预测精确反映新负荷驱动器的独特特征

理解并整合新型负载驱动器的独特特征以及现代化预测流程可以减少负荷预测中的不必要误差。新兴的大容量负载具有独特特征，使其与过去的使用方式和彼此之间区别开来。忽视包括灵活性潜力和风险规避能力等特点的预测将无法反映未来电网的需求。

监管者选项

提高佣金并加强监管机构对新负荷及其特性的理解和认识：监管机构

可以主动了解他们所在州潜在的大负荷驱动因素，以更好地理解 and 评估即将到来的公用事业预测和其他提议，例如新关税。除了参加会议外，监管机构可以启动他们自己的调查程序、技术研讨会或非正式的学习电话，以增加对他们所在州特有的新负荷的理解。例如，明尼苏达州公用事业委员会在2024年底将其外部规划会议的重点放在该州的数据中心发展上，会议内容包括数据中心代表、系统规划师、州机构和其他利益相关者的演示和问答环节。⁵¹ 同样，面对包括新负荷对电力系统的影响在内的挑战，马里兰州公共服务委员会启动了一场关于资源充足的专题技术研讨会，政策制定者、专家以及其他行业利益相关者提供了具体的建议。⁵²

修订规划指南以纳入大型负荷的新兴预测实践：监管机构

可根据具体情况设定或更新指导方针，以说明公用事业如何将其新的大负荷纳入预测中。根据公用事业在其规划周期中的位置，监管机构可以通过修订和更新规划规则或发布有关先前提交的规划或费率案例的命令，以要求未来进行预测。

负载

改进。指南可能包括所描述的至少一种最佳实践。

预测最佳实践

本报告的部分内容。

此类新指南能更好地捕捉潜在大型负荷的特征。例如，监管机构可要求负荷预测包括每个大型负荷预计达到合同容量所需的时间、每个负荷的灵活性特征以及每个负荷被建设的概率。乔治亚委员会工作人员采取了早期步骤，要求公用事业公司提交每季度的大型负荷更新，其中包括每个潜在负荷的项目状态和预期增长期。⁵³ 乔治亚动力公司的负荷

案例研究：乔治亚电力公司

预测过程在以下部分详细讨论：

此外，监管机构可能需要更新负荷预测实践以防止双重计算。如果公用事业公司创建一个独立的负荷预测，监管机构可以要求公用事业公司解耦其大负荷预测和基准经济预测。监管机构可以设定期望或提出详细的调查问题，以确保公用事业公司对在专用区域出现的较大负荷进行折扣预测。

附录：负荷预测的发现问题

预测（参见）。例如，北卡罗来纳州公用事业委员会指示杜克能源公司监控经济发展，并对大型负荷项目的折扣预期进行监控，以避免对这类负荷的双重计算，并明确考虑项目延误、取消以及其他杜克能源公司无法控制的因素所带来的不确定性。⁵⁴

与州和地方政府以及其他州协调，了解可能影响大型负载的激励结构和立法： 监管机构可以积极与其他州政府机构和邻近州协调，了解可能影响数据中心和其他大型负荷的当前财政和法律环境。截至2025年初，超过60%的州已建立税收优惠政策，以鼓励数据中心在其州内建设。⁵⁵ 理解这些激励措施以及其他国家政策决策能够使监管机构在审查负荷预测时对未来的负荷所有者和公用事业公司提出更明智的问题。例如，如果一个州已经提出或最近通过了鼓励或抑制发展的立法，监管机构可以询问公用事业公司是否以及如何将这些变化整合到他们对大负荷的预测中。

监管部门还可以鼓励公用事业公司调查潜在的较大负荷是否正在考虑州内和州外的地点，并在预测中对如何表示单个大型负荷反映这种“货比三家”。

目标 最新

提高更新负荷预测和更新负荷预测过程的频率

过时的预测和预测过程在管理不确定性方面不够熟练，导致预测准确性降低。当负荷预测显示出高度不确定性，并且有可能随着预测的大负荷的增加或减少而迅速变化时，在IRP中每一年到三年更新一次预测过于频繁。同样，随着新信息和最佳实践的涌现，预测大负荷的工具和流程也在迅速演变。

监管者的选择

需要更频繁地报告长期负荷预测： 监管机构可以帮助确保公用事业公司在规划周期之间持续进行预测的过程中，有一个收集和更新关于大负荷请求信息的过程。如今，尤其是面对大负荷时，监管机构可以为预测的更新频率提供指导，这些更新应在典型的规划周期之外进行。例如，鉴于前所未有的负荷增长，北卡罗来纳州公用事业委员会要求杜克能源公司每半年报告一次关于经济发展和大负荷项目管道的情况。⁵⁶

随着流程的不断演变，监管部门可以考虑要求更频繁的汇报，例如提供最新的、可供公众在线访问的仪表板，用户可以像某些地区访问发电接入排队一样访问这些仪表板（例如，[Interconnect ion.fyi](#)）。⁵⁷ 这样的仪表盘将允许所有相关方了解何时更新预测以及特定项目如何影响预测，并允许第三方验证，简化了利益相关者对档案中预测提出评论的能力。

迭代预测流程，以适应新出现的实践和终端用途： 负荷预测工具和流程正在随着行业对新负荷驱动因素的了解不断涌现。监管部门可以学习其他州的先进经验，了解主要公用事业公司采用什么样的预测实践，并启动旨在聚焦预测最佳实践的调查程序。

目标 验证通过

将负荷预测数据和流程对其他利益相关者可见，并创造问责制的机会。

提高负荷预测过程的可透明度，并增加对预测的责任感，即使由于不确定性而无法保证准确性，也能增加负荷预测的验证性。同样，使过去预测的趋势可用，可以让公用事业公司、监管机构和其他利益相关者从中学习，并确保公用事业公司相应地迭代其方法。

监管者的选择

鼓励公用事业公司尽可能利用透明的外部数据和预测工具：
为确保预测假设无偏见，监管机构可以鼓励公用事业公司使用受信任的第三方

数据和工具在为特定负载类型制定负载预测时得到应用。或者，监管机构可以探索使独立实体，例如州能源办公室或大学，负责编制负载预测的可能性或要求。例如，加利福尼亚能源委员会在12年的时间框架内准备和更新了电力和天然气消费以及峰值需求的详细预测。⁵⁸ 此外，监管机构可以鼓励公用事业公司更新内部预测工具或采用外部工具（例如，GridUp用于电动车负荷预测）。⁵⁹ 更全面、一致地预测新的终端用途。在出版时，不存在追踪大型负载的国家数据集。此类数据应可供监管机构和任何涉及负载预测的诉讼中的干预者使用。

制定预测和实际值，并从过去的预测中学习： 监管机构和公用事业公司可以利用过去的预测来改进预测。要求对预测进行“回溯测试”以评估其准确度，可以帮助公用事业预测员和其他利益相关者评估哪些预测错误导致了哪些计划决策，并识别出改进未来预测的机会。监管机构可以将回溯测试作为现有资源计划实践的一部分，针对纵向整合的公用事业，或者创建一个专门用于理解历史负载预测的案例卷。Puget Sound Energy的2021年电力需求计划案例提供了一个回溯测试的例子：该公用事业公司对其过去五个需求预测与几个关键变量的实际情况进行了回顾性分析，确定了偏差的解释，并将这些经验教训整合到当前的负荷预测中。⁶⁰

对于大型负荷预测而言，监管机构可能要求公用事业公司跟踪和报告不同类型负荷在管道每个阶段掉出的负荷数量。通过这种跟踪，公用事业公司和各州能够更深入地了解不同类型大型负荷的时间表和可能性，这些信息可以随后纳入预测中。如果此类数据以易于获取的格式发布，那么第三方和其他地区也将能够利用这些数据。

在重构的州，区域传输组织内的负荷预报员可以发布各个负荷来源对单个公用事业预报的贡献，这有助于解决公用事业之间可能存在的负荷预报名目双重计算的问题。例如，PJM的负荷分析小组发布的总结报告包括按公用事业划分的细分。⁶¹

探索预测准确性的货币激励或惩罚： 鉴于预测过高或过低的风险，监管机构可以为预测做法或预测本身建立财务激励或处罚，以将风险从所有客户转移到大型负荷客户或公用事业公司本身。要求某些合同协议（例如，电价、费用）可以将部分预测风险从所有客户中转移，并激励大型负荷驱动者进行更准确的预测。例如，俄勒冈州公共事业委员会为需要超过50千瓦的客户设立了两种新的费用：一种是容量储备费，即10%负荷预测缓冲区外的任何未使用的容量每千瓦的价格；另一种是超额需求费，它分担了低估负荷需求风险。⁶²

为了对抗服务成本型公用事业机构过度预测的自然倾向，监管机构可以增加公用事业在更保守的预测和投资策略方面的兴趣。一个选项是要求监管机构在颁发公共利益和必要性证书之前，要求公用事业证明预期的较大负荷已达到特定的确定性里程碑。如果公用事业选择在确保预定负荷确定水平之前建设发电设施，监管机构可以为为此负荷做出的投资提供部分成本回收。

尽管并非专门针对负荷预测，英国的商业计划激励措施是监管机构如何为公用事业公司成为特定流程的良好管理者的一个例子。在这个例子中，监管机构实行了一项商业计划激励措施，根据每个公用事业公司提交的商业计划的完整性和质量提供奖励或处罚。^{63,ii} 监管机构认识到，不完整或质量差的计划阻碍了其期望的成本效益结果，并据此开发了评估标准、流程以及激励上限。在美国，监管机构可以探索类似的机制来激励完成高质量的负荷预测。

ii 英国的商业计划与美国的多年利率计划相似，尽管它们更为广泛，包括电网规划等内容。

在预测不确定性下做出投资决策。

即使采用了最佳实践，所有预测仍然存在不确定性。然而，随着负荷的快速增长，公用事业和委员会必须能够在预测存在重大不确定性的情况下做出决策。决策框架可以包括以下内容：

优先考虑“最小遗憾”的资本投资： 确定构成最小遗憾投资的因素，这是监管机构从更为传统的最小成本决策方式中转变的一个步骤。面对不确定性，最小遗憾的解决方案将迅速、经济且灵活。许多在能源投资组合中代表性不足的选项都符合这些标准，且专注于利用现有基础设施，包括能源效率、虚拟电力购买协议（VPPs）、电网增强技术、重新布线和清洁的翻新。⁶⁴

除了快速、经济和灵活的解决方案外，最不令人遗憾的选项也可能被描述为能够在多种可能的未来情景中表现稳健的选项。⁶⁵ 决策在深度不确定性领域的领域已经研究了这样的稳健方法，水资源规划者已经大规模应用它们。⁶⁶ 区域和跨区域输电，虽然 upfront 资本成本高于此处描述的其他最小遗憾选项，且部署速度较慢，但可能是一种稳健的解决方案。输电能够缓解拥堵成本，并在长期内提供对地理上分散的清洁资源的访问。美国监管机构还可以将单个基础设施投资或投资水平与国外同行进行比较，其中一些国家可能在能源转型方面更先进（例如，英国）。⁶⁷

配电网投资是另一种可能的最低遗憾解决方案的例子，该方案在许多可能的未来情景中都能提供价值。配电网规划通常是反应性的，但前瞻性的投资可以增加灵活应对负荷增长的选择。监管机构可以与公用事业公司合作，确定哪些升级将相关联，并优先考虑那些在许多负荷增长未来都将有用的升级。

例如，针对员工提议，加利福尼亚公用事业委员会发布了一项拟议的决定，该决定对预测实践设定了详细的期望。⁶⁸ 该决策包括在分销规划过程中使用情景规划以改进预测和解耦，并实施一个待定负荷类别。委员会承认了这两项所需额外的工作，并概述了利益相关者参与的计划，以最终确定如何实施这些措施。虽然这些提案针对的是配电层电网影响，但类似的努力也可以在大量电力系统层面管理不确定性。

利用关税设计或其他合同承诺来分配风险，并减轻不确定性：

通过征收关税，公用事业公司可以要求大型负荷用户支付预付款或抵押品，以支付为满足其预测负荷所需的发电和配电基础设施的预订费。关税还可以包含条款，要求数据中心或其他潜在的风险负荷在负荷未能按预期实现或提前几年搬离的情况下支付费用。将服务于某些大型负荷的风险与基本费用率分离可以保护用户利益。对大型负荷请求的确定性提高有助于电网规划者在负荷预测和输电规划中做出决策。监管部门可以，并且应该就大型负荷接入的关税设计提供指导和监管。

印第安纳和密歇根电力公司对工业电力电价表的修改提供了一个例子，这种结构要求大型负荷承诺付款以降低风险。在此电价表上的大型负荷客户，如果容量减少超过20%，则必须支付退出费，并且最低需求费从60%增加至90%。⁶⁹ 此外，公司必须支付一笔保证金，该保证金每年重新计算，至少是其最大预期每月非燃料账单的24倍，从而进一步将风险转嫁给大型负荷用户，而不是电力公司。

另一个例子是2024年10月的AEP俄亥俄州和解。⁷⁰ 在这个协议下，任何超过25兆瓦（MW）的新数据中心必须支付其预计每月使用的至少85%的能源费用。这种按月支付的基准可以防止不确定的时间表和总负荷的担忧。如果项目被取消或合同中的义务未履行，数据中心还必须支付退出费用。

甚至更为直接的是，乔治亚公共服务委员会批准了一项规则，其中大型负载（超过100兆瓦）的账单基于风险计算。⁷¹ 数据中心需要支付其发电所需的任何传输和分配费用，从而保护其他客户免受意外费用的侵害。

鼓励数据中心在负荷中心附近建设新的清洁能源发电厂，可以减轻一些关于不确定性的担忧。这可以激励它们合理估算负荷预测，并防止在输电、配电和容量规划中考虑数据中心的需要。⁷²

结论



本报告突出了公用事业和电网运营商在预测中提高大型负荷代表性的几个机会和新兴实践。它还介绍了一组负荷预测最佳实践，无论预测负荷的大小和规模，公用事业和电网运营商都可以立即应用这些实践以改善预测。尽管大型负荷预测实践仍在发展中，但来自预测最快增长的一些地区（如杜克能源、多米尼恩能源和乔治亚电力）的案例研究表明，需要做出一些改变。

监管部门在缓解所涉及的负担能力和可靠性风险中也扮演着至关重要的角色。他们可以采取行动确保预测更加全面、频繁和经过验证。此外，他们还可以采取补充方法来更新决策框架并应对剩余的不确定性，例如优先考虑最小遗憾投资和采用转移风险并增加大型负载承诺的关税或其他金融结构。

额外研究大负荷及其特征是支持改进预测所必需的。公用事业规划者还需要描述负荷形状、灵活性、爬坡率和不同负荷类型负荷实现概率的标准数据集。需要更多经验来指导调整计量经济学预测以适应大负荷的最佳实践。除了计量经济学预测之外，还需要新、创性的方法来进一步减少预测误差。

尽管所有预测都是错误的，但预计负荷增长规模及其相关风险要求确保预测在指导重要的监管决策中仍然有用。

附录：负荷预测的发现问题的发现

以下是委员会可以要求公用事业公司确保面对显著负载增长而实施稳健的预测实践的询问内容。

假设： 请提供负荷预测的核心组件的详细描述，包括但不限于以下内容：电动汽车的预测、建筑电气化、人口增长、虚拟电厂（VPPs）、绿色电价、需求响应（包括时变费率）、表后发电、能效。此外，请识别并说明关于采用/所有权、运营和灵活性潜力的预测，并解释关于费率、控制和其他可用于塑造负荷的信号假设。另外：

- 对于每个核心组件，使用了哪种方法来制定预测？
- 关于核心组件如何对当地和总体峰值需求做出贡献的假设是什么？关于大型工业负载，在电池备用或现场发电方面做出了哪些假设？
- 对于虚拟电厂（VPPs）、需求响应和能源效率，请提供能源和需求节省。
- 请描述如何对虚拟电厂（VPPs）和需求响应进行建模（例如，将其作为可调度资源或作为负载预测减少的体现）。
- 请提供您输入的文档并附上参考文献。

负载确定性： 对于工业和数据中心负载，请对现有的承诺确定性进行评估，从（1）极具前景的负载至（5）极确定的负载。请解释每个负载得到其分配评分的原因。如果负载被划分为具体类别（例如，技术审核、服务请求），每个类别是如何定义的？此外：

- 以表格形式，每行代表一个项目，请按项目提供详细更新，包括那些延迟或已取消的项目。请包括合同是否已签署以及项目是否已动工。
- 请详细描述该公用事业公司评估每个大型负荷项目在预测中增长步骤的步骤。包括公用事业公司预计合同负荷何时出现并达到特定运行水平，以及是什么驱使这些假设。
- 请提供大型负荷开发者的预期里程碑和承诺。如果此类大型负荷驱动器在公用事业服务区域内并非首次出现，请包括负荷驱动器在满足过往承诺和期望方面所取得的成就或失败。
- 对于任何在上一迭代和现在之间改变确定性水平的大负载，请描述哪些标准导致了重新分类为更低确定性或更高确定性。

- 请记录并分享任何与大型负载代表进行的沟通，这些沟通内容将有助于评估大型负载实现的可能性。
- 请解释按每兆瓦（MW）计算的客户存款要求，以达成能源服务协议，以及客户是否达到了之前的合同里程碑。
- 请核实能源服务协议的设计旨在在项目取消时使公用事业公司收回所有成本。

负载灵活性： 针对工业和数据中心的负荷，请提供这些负荷如何参与能源效率和需求响应计划的信息，包括任何合同要求或确保参与的其他机制。

- 请解释现有或拟议中的能源效率和需求响应项目如何鼓励大型负荷的参与。对于现有项目，请包括每个能源效率和需求响应项目中注册的大型负荷的比例，阻碍大型负荷在每个项目中更大程度参与的挑战，以及公用事业公司打算采取的任何增加参与度的措施。
- 对于每个工业和数据中心负载，请描述任何计划的备用发电。请包括客户如何向公用事业公司提供备用发电运行的可见性细节，以及公用事业公司如何计划对备用发电的存在进行考虑。

场景： 请详细描述为告知负荷预测而开发的哪些情景？请包括：关键假设、公用事业公司如何确定上下限情景，以及公用事业公司将如何利用这些情景来指导投资计划。

回顾性分析： 请提供对过去五年负荷预测如何与实际销售、能源消耗和高峰需求结果进行比较的定量和定性分析。对于任何偏差提供假设或解释。最后，请描述该公用事业公司在当前预测中如何解决这些偏差的来源。

账单影响： 请描述预测负荷及相关的发电、输电和配电投资成本分配如何影响每个客户类别。

洁承诺： 请以表格形式详细记录哪些数据中心和工业负荷已做出公开的清洁能源承诺。对于每一行，包括这些实体是否已在其领地内履行清洁能源承诺。请详细说明，在规划过程中，公用事业公司将如何核算大负荷客户做出的采购清洁能源的承诺。

脚注

1 约翰·D·威尔逊，扎克·齐默曼和罗布·格拉姆利奇，*战略性行业蓬勃发展：推动美国电力需求 电网策略*，2024，<https://gridstrategiesllc.com/wp-content/uploads/National-Load-Growth-Report-2024.pdf>。

2 乔恩·瑞亚和瑞安·福尔斯克，《公用事业规划现状》，2024年第四季度，RMI，2025年，<https://rmi.org/the-state-of-utility-planning-2024-q4/>。

3 查尔斯·R·尼尔森和斯蒂芬·C·皮克，《NERC风扇：对NERC总结预测的回顾性分析》《商业与经济统计杂志》 3, 3, (1985), <https://www.jstor.org/stable/1391589>。

4 威尔逊 *战略性行业蓬勃发展*，2024。

5 Rea,《公用事业规划现状》 2025。

6 *美国的电力公司，交付能源的未来*。爱迪生电气研究所，2024年2月20日，<https://www.eei.org/-/media/Project/EEI/Documents/Issues-and-Policy/Finance-And-Tax/WSB-Presentation.pdf>。

7 T. Bruce Tsuchida 等人，*电力需求增长及变化时期下的预测* Brattle, 2024年5月，<https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2024/05/Electricity-Demand-Growth-and-Forecasting-in-a-Time-of-Change-1.pdf>。

8 马克·迪森和阿历克斯·恩格尔，《预测电力需求的十亿美元成本》，RMI，2017年，<https://rmi.org/billion-dollar-costs-forecasting-electricity-demand/>。

9 卡佳·雷班和卡拉·戈登伯格，《如何重组公用事业激励措施》RMI, 2024, <https://rmi.org/insight/how-to-restructure-utility-incentives-four-pillars-of-comprehensive-performance-based-regulation/>。

10 克里斯蒂娜·希姆，《人工智能与能源效率的未来》，国际商业机器公司，2024年10月17日，<https://www.ibm.com/think/insights/future-ai-energy-efficiency>。

11 Ethan Howland, "PJM容量价格创历史新高，向发电厂发出建设信号"，能源
2024年7月31日，<https://www.utilitydive.com/news/pjm-interconnection-capacity-auction-vistra-constellation/722872/>。

12 美国电网现代化的关键要素？电网部署办公室，美国能源部，2023年10月19日，<https://www.energy.gov/gdo/articles/what-does-it-take-modernize-us-electric-grid>。

13 *推动智慧：分析人工智能与数据中心能耗*，EPRI，2024，<https://www.epri.com/research/products/3002028905>。

14 智能能源，EPRI，2024.

15 Anthony Hatzenbuehler, “数据中心等级分类解析,” CoreSite, [https:// www.coresite.com/blog/breaking-down-data-center-tiers-classifications](https://www.coresite.com/blog/breaking-down-data-center-tiers-classifications).

16 Varun Mehra 和 Raiden Hasegawa, “利用需求响应支持谷歌数据中心电网,” 谷歌, 2023年10月3日, <https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/using-demand-response-to-reduce-data-center-power-consumption>.

17 凯文·武和艾米莉·福克斯霍尔, 《德克萨斯州比特币矿工通过使用更少的电力获利; 倡导者表示所有德克萨斯人应享有同样的机会》《德克萨斯州论坛报》, 2024年1月3日, <https://www.texastribune.org/2024/01/03/texas-bitcoin-profit-electricity/>.

18 Mandy DeRoche, 等人, 《能源炸弹: 工作量证明加密货币挖掘如何加剧气候危机并危害社区》 Sierra Club和EarthJustice, 2022年9月, [https:// earthjustice.org/wp-content/uploads/energy_bomb_bitcoin_white_paper_101322.pdf](https://earthjustice.org/wp-content/uploads/energy_bomb_bitcoin_white_paper_101322.pdf).

19 《追踪美国加密货币挖矿操作的能源消耗》, 美国能源信息管理局, 2024年2月1日, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61364>.

20 安德鲁·萨奇威尔等人, 《电力大负荷电价设计: 演变实践与机遇》劳伦斯·伯克利国家实验室, 2025年1月, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2025-01/electricity_rate_designs_for_large_loads_evolving_practices_and_opportunities_final.pdf.

21 鲁思·波特, 《数据中心和清洁能源增长的新清洁方法》, 谷歌, 2024年12月10日, <https://blog.google/inside-google/infrastructure/new-approach-to-data-center-and-clean-energy-growth/#:~:text=Together%2C%20Google%2C%20Intersect%20Power%20and,and%20fully%20complete%20in%202027>.

22 美国各州数据中心税收激励措施, 《可持续数字基础设施联盟》 [https:// knowledge.sdi.allian ce.org/8d367baa340046029912b1e04cc89ec2](https://knowledge.sdi.allian ce.org/8d367baa340046029912b1e04cc89ec2).

23 Kimberly A. Sarte 等人, “弗吉尼亚州数据中心”, 弗吉尼亚州联合立法审计和审查委员会, 弗吉尼亚州政府, 2024年12月9日, <https://jlarc.virginia.gov/pdfs/reports/Rpt598-2.pdf>.

24 Emma Penrod, “NV Energy Seeks New Tariff to Supply Google with 24/7 Power from Fervo Geothermal Plant,” Utility Dive, June 21, 2024, <https://www.utilitydive.com/news/google-fervo-nv-energy-nevada-puc-clean-energy-tariff/719472/>.

25 “星座公司将推出起重机清洁能源中心, 恢复电网中的就业岗位和零碳电力,” 星座公司, 2024年9月20日, <https://www.constellationenergy.com/newsroom/2024/Constellation-to-Launch-Crane-Clean-Energy-Center-Restoring-Jobs-and-Carbon-Free-Power-to-The-Grid.html>.

- 26 杰西·科恩、大卫·波纳、詹妮尔·威尔逊，《在资源规划中建模能源部基础设施再投资计划》，RMI，2024年，<https://rmi.org/modeling-the-does-energy-infrastructure-reinvestment-program-in-resource-planning/>。
- 27 艾琳·麦克劳克林和达娜·彼得森，《正在进行的本土化复兴》麻省理工学院斯隆管理评论，2023年11月2日，<https://sloanreview.mit.edu/article/a-reshoring-renaissance-is-underway/>。
- 28 Erifili Drakellis和Jeremy Richardson，《社区利益计划：推动公平的清洁能源发展》，RMI，2023年，<https://rmi.org/community-benefits-plans-driving-equitable-clean-energy-development/>。
- 29 詹·罗森诺，塞姆·奥克纳尔，以及伊利安·普斯凯杜，《热门话题：将工业电气化从潜力转化为实践》，监管援助项目，2024年12月，<https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2024/12/rap-rosenow-oxenaar-pusceddu-some-like-it-hot-moving-industrial-electrification-potential-practice-2024-december.pdf>。
- 30 Emily Beagle 等人，《推动转型：加速具有成本竞争力的绿色氢能》RMI，2021，<https://rmi.org/insight/fueling-the-transition-accelerating-cost-competitive-green-hydrogen>。
- 31 解锁绿色工业增长，使命可能伙伴关系，https://3stepsolutions.s3-accelerate.amazonaws.com/assets/custom/010856/pdfs/MPP_US_Hubs_Insights.pdf。
- 32 罗宾·格里格斯·劳伦斯，《全球最大太阳能发电钢铁厂在科罗拉多州破土动工》，公用事业潜水艇<https://www.constructiondive.com/news/worlds-largest-solar-powered-steel-mill-breaks-ground-in-colorado/619381/>。
- 33 本·夏普罗和尼克·佩斯塔，《为电动车准备电网的六个构建模块》，美国罗梅尔公司，2024年10月25日，<https://rmi.org/six-building-blocks-to-prepare-the-grid-for-evs/>；Tsuchida et al., 电力需求增长及变化时期下的预测 2024；电网规划与建筑电气化能源系统集成小组，2024年，<https://www.esig.energy/grid-planning-for-building-electrification>；及 Bruce Biewald 等人，最佳集成资源规划实践 赛博斯与劳伦斯伯克利国家实验室，2024年12月6日，https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2024-12/irp_best_practices_2024_synapse_bnl_24-061_0.pdf。
- 34 Toan Phan, “飓风海伦：揭示洪水风险和保险的差距”，里士满联邦储备银行，https://www.richmondfed.org/research/national_economy/macro_minute/2024/hurricane_helene_flood_risk_and_insurance_20241015。
- 35 Subhes Bhattacharyya 和 Govinda Timilsina，《能源需求模型的政策制定：能源需求模型的比较研究》世界银行，2009年，<https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/0944c86e-3f09-5759-8171-83200ac01870/content>。
- 胡安·帕布洛·卡瓦尔略等人，《在电力公司集成系统中的长期负荷预测准确性》
- 36 资源规划，”能源政策”，2018年8月号：410–22，<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.060>。
- 37 EVs2Scale2030，<https://msites.epri.com/evs2scale2030>

38 Eric J.H. Wilson 等人，*用户端用能负荷概貌（针对美国建筑库存）* 美国能源部，2022年，<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80889.pdf>。

39 案件编号：PUR-2024-00184，“弗吉尼亚电力和公用事业公司2024年综合资源计划报告”，多米尼恩能源，2024年10月15日，https://cdn-dominionenergy-prd-001.azureedge.net/-/media/pdfs/global/company/irp/2024-irp-w_o-appendices.pdf?rev=c03a36c512024003ae9606a6b6a239f3。

40 案件编号：PUR-2023-00066，“弗吉尼亚电力和公用事业公司2023年综合资源计划报告”，Dominion Energy，2023年5月1日，<https://cdn-dominionenergy-prd-001.azureedge.net/-/media/pdfs/global/company/2023-va-integrated-resource-plan.pdf?la=en&rev=6b14e6ccd15342b480c8c7cc0d4e6593>。

41 案号：PUR-2023-00066，“州公司委员会工作人员听证会后的简报”，弗吉尼亚州州公司委员会，2023年10月23日，<https://www.scc.virginia.gov/docketsearch/DOCS/7v%23601!.PDF>。

42 《2023–2024杜克能源卡罗来纳有限责任公司和杜克能源进步有限责任公司的碳计划和综合资源计划》，北卡罗来纳州公用事业委员会，2023年8月17日，<https://starw1.ncuc.gov/NCUC/PS/C/PSCDocumentDetailsPageNCUC.aspx?DocumentId=70c6dc5c-502d-4a62-9743-2e3bcec044cc&Class=Filing>。

43 Jeremy Keen 等人，《杜克能源的集成系统及运营规划：集成规划实践的比较分析》，美国能源部，2023年6月，gmlc_4.2.2_memo_20230628_final.pdf。

44 第NC补充章节：2023-2024年碳计划和综合资源计划补充规划分析，杜克能源卡罗来纳，2024年1月31日，<https://dms.psc.sc.gov/Attachments/Matter/5ff1a1de-c524-44ad-8d5a-e39d20470ce4>。

45 卷宗编号 E-100，子编号 190，“接受约定，部分豁免委员会规则 R8-60a(D)(4)，并为未来规划提供进一步指导”的命令，北卡罗来纳州公用事业委员会，2024年6月24日，<https://starw1.ncuc.gov/NCUC/ViewFile.aspx?Id=cfc6d586-12e4-447f-a552-757d6e73c30e>。

46 《2023年综合资源计划更新》，乔治亚电力公司，2023年10月，<https://www.georgiapower.com/content/dam/georgia-power/pdfs/company-pdfs/2023-irp-update-main-document.pdf>。

47 案号 55378，“2023 年 IRP 更新负荷和能源预测”，乔治亚电力公司，2023 年 10 月 27 日，<https://psc.ga.gov/search/facts-document/?documentId=216166>。

48 案号 No. 55378，“微软就佐治亚电力2023年综合资源计划更新发表评论”，微软，2024年4月1日，<https://psc.ga.gov/search/facts-document/?documentId=218199>。

49 案件编号 55378，“批准和解协议”命令，乔治亚州公共事业委员会，2024年4月4日，<https://psc.ga.gov/search/facts-document/?documentId=218271>。

50 2024年第三季度大型负载经济发展报告，乔治亚电力公司，2024年11月18日。
<https://psc.ga.gov/search/facts-document/?documentId=220461>。

51 外部规划会议——明尼苏达州数据中心开发，明尼苏达州公共事业委员会，2024年10月29日，
https://minnesotapuc.granicus.com/player/clip/2439?view_id=2&redirect=true；及“外部会议议程”，明尼苏达州公共事业委员会，2024年10月29日，
https://mn.gov/puc-stat/documents/pdf_files/2024%20October%2029%20Planning%20Meeting%20Agenda.pdf。

52 “资源充足度PC66技术大会，马里兰公共事业委员会，2024年12月3日”
<https://www.youtube.com/watch?v=eAQq3lOmIQQ>。

53 案件编号55378，“采纳调解令。Trokey证词，”乔治亚公共服务委员会，2024年4月4日，
<https://psc.ga.gov/search/facts-document/?documentId=218271>。

54 案件编号 E-100，副编号 190，北卡罗来纳州公用事业委员会，2024年。

55 杰克·雷明顿和罗德·卡特，《关于州数据中心相关税收激励措施概述》，NAIOP，2024-25
冬季 <https://www.naiop.org/research-and-publications/magazine/2024/Winter-2024-2025/development-ownership/an-overview-of-state-data-center-related-tax-incentives/>。

56 案件编号 E-100，子编号 190，北卡罗来纳州公共事业委员会，2024年。

57 美国1996-2025年联网请求的县地图，《Interconnection.fyi》
<https://www.interconnection.fyi/>。

58 Chris Kavalec 等人，《加利福尼亚能源需求2018 — 2030年修订预测》，加利福尼亚能源委员会，
电力评估部门，出版物编号：CEC-200-2018-002-CMF，2018年2月，
<https://www.energy.ca.gov/publications/2018/california-energy-demand-2018-2030-revised-forecast>。

59 RMI 和 FedEx 推出 GridUp 工具，支持主动电网投资以应对电动汽车充电需求，RMI，2024
年8月1日，
<https://rmi.org/press-release/rmi-and-fedex-launch-gridup-tool-enabling-proactive-grid-investments-to-support-ev-charging-needs/>。

60 《2021 PSE综合资源计划》，Puget Sound Energy, 2021年4月，
https://www.pse.com/-/media/PDFs/IRP/2021/IRP21_Chapter-Book-Compressed_033021.pdf?modified=20220307225041。

61 “PJM负荷预测报告”，PJM资源充足性规划部门，2024年2月，
<https://www.pjm.com/-/media/library/reports-notices/load-forecast/2024-load-report.ashx>。

62 案号 UE 433，“关于 PacifiCorp dba Pacific Power 的一般费率修订申请，订单号 24-447”，
俄勒冈州公共事业委员会，2024年12月19日，第91-102页，
<https://apps.puc.state.or.us/orders/2024ords/24-447.pdf>。

- 63 “RIIO-2 最终决定——核心文件”，“天然气和电力市场办公室”，2021年2月3日，第134-154页，https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2021/02/final_determinations_-_core_document_revised.pdf .
- 64 “通过清洁能源满足电力需求增长”，RMI，2024，https://rmi.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/09/peak_grid_solutions_for_CW_RC.pdf .
- 65 安娜·M·布鲁克韦等，《气候感知决策：对电网基础设施规划和运营的启示》，环境研究快报，17 (2022) : 073002 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac7815/pdf> .
- 66 Rebecca Smith 等人，《决策科学有助于解决科罗拉多河流域长期规划中的挑战》《美国水资源协会杂志》 58, 5, 2022, [https:// doi.org/10.1111/1752-1688.12985](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12985) .
- 67 《清洁能源2030：关于到2030年实现英国清洁能源的建议》，国家能源系统运营商，<https://www.neso.energy/document/346651/download> .
- 68 规则制定 21-06-017，“关于采用改进配电规划和项目执行流程、配电资源规划数据门户以及集成容量分析图的决定”，加利福尼亚公用事业委员会，2024年9月13日，<https://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Efile/G000/M539/K999/539999224.PDFhttps://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Efile/G000/M539/K999/539999224.PDF>.
- 69 案件编号 No. 46097，“结算方提出的命令提交”，印第安纳州公用事业监管委员会，2024年12月20日，https://iurc.portal.in.gov/_entity/sharepointdocumentlocation/fe6a6dfd-06bf-ef11-b8e9-001dd803a96f/bb9c6bba-fd52-45ad-8e64-a444aef13c39?file=46097_IndMich_Submission%20of%20Proposed%20Order_122024.pdf .
- 70 关于俄亥俄电力公司关于数据中心和移动数据中心相关新电价申请的事宜，俄亥俄公用事业委员会，2024年10月23日，<https://dis.puc.state.oh.us/ViewImage.aspx?CMID=A1001001A24J23B55758I01206> .
- 71 汤姆·克拉泽，“乔治亚公共服务委员会批准规则，允许数据中心使用新的电力使用条款”，乔治亚公共服务委员会，2025年1月23日，https://psc.ga.gov/site/assets/files/8617/media_advisory_data_centers_rule_1-23-2025.pdf .
- 72 埃里克·吉蒙、马克·阿尔斯托姆和马克·奥博伊尔，《能源公园：应对不断增长的电力需求的全新策略》，能源创新，2025年12月，<https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/Energy-Parks-Report.pdf> .

Jeffrey Sward, Lauren Shwisberg, Katerina Stephan, and Jacob Becker, 看看这个：通过监管解决方案来实现大型负载更好预测的方法，RMI，2025，<https://rmi.org/insight/get-a-load-of-this>。

RMI重视合作，并旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许感兴趣的相关方通过创意共享CC BY-SA 4.0许可证引用、分享和引用我们的工作。<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>。



所有使用的图片均来自iStock.com，除非另有说明。



RMI创新中心

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2025 年 2 月 RMI。版权所有。Rocky Mountain Institute® 和 RMI® 为注册商标。