



具有高成本效益的 电网交互式节能建筑

美国某零售建筑集群的脱碳潜力





关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所（RMI）创立于1982年，是专业、独立的非盈利机构。我们致力于通过市场化解方案推动全球能源系统转型，践行1.5°C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。我们在全球最重要的地区开展工作，与企业、政策制定者、社区和非政府组织一起制定并扩展能源体系的干预措施，以便在2030年前将温室气体排放量至少减少50%。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰、华盛顿特区以及印度尼西亚巴厘岛设有办事处。

作者与鸣谢

作者

Cara Carmichael
Philip Keuhn
Sheldon Mendonca
Connor Usry

分析师

Joey Cathcart
Maggie Huang
Raghuram Sunnam

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

其他贡献者

Cedar Blazek, 美国能源部 (DOE)
Ellen Franconi, 西北太平洋国家实验室 (PNNL)
Amy Jiron, 美国能源部 (DOE)
Rois Langner, 美国国家可再生能源实验室 (NREL)
Monica Neukomm, 美国能源部 (DOE)

联系人

Philip Keuhn, pkeuhn@rmi.org
Sheldon Mendonca, smendonca@rmi.org

中文编译

王萌、王广煦, 落基山研究所
韩全胜, 北京市建筑设计研究院有限公司
刘秉祺, 清大科越有限公司
王者, 香港科技大学

联系方式

王萌, mwang@rmi.org

版权与引用

Cara Carmichael、Philip Keuhn、Sheldon Mendonca和Connor Usry, 具有高成本效益的电网交互式节能建筑: 美国零售建筑改造项目的脱碳潜力, RMI, 2022年, <https://rmi.org/insight/decarbonization-potential-for-a-us-retail-portfolio>。

落基山研究所 (RMI) 高度重视合作并希望通过分享知识和洞察加速能源转型。因此, 我们允许相关方通过知识共享许可协议CC BY-SA 4.0参考、共享和引用我们的著作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>。

除非另有说明, 所有使用的图片均来自iStock.com。

目录

执行摘要	5
电网交互式节能建筑介绍.....	7
什么是电网交互式节能建筑 (GEB)?	7
脱碳建筑改造项目取得成功的基本要素	8
零售建筑集群项目背景	9
建模方法	12
投资方案与结果	14
内部收益率为10%的方案.....	15
内部收益率为6%的方案.....	18
热泵方案	21
改造措施分析	23
在各气候区和电费类型中的可行性.....	23
需求管理策略.....	24
电网交互式节能建筑对电力需求的影响	25
适用于整个零售行业的洞察.....	29
对其他项目的好处	30
总结	32
参考文献	33

执行摘要

研究目的

本研究评估了电网交互式节能建筑（Grid-interactive Efficient Building, GEB）在美国某大型零售商的建筑节能改造项目中的潜在价值，并制定了一项能源项目投资计划，分析评估了如何最大程度地提高商店的能效、降低能源成本、减少碳排放并使其作为电网的资源。报告还提供了适用于零售门店的节能措施、可再生能源发电和电网协调策略，指出了整个零售业的机遇。

本研究通过深入评估该零售商旗下的零售门店，提出了包含一整套措施的优化投资方案并提供了推动脱碳的投资路径。我们在43个州、7个气候区、7种电价结构和各种现有条件下，选取了总共113家零售门店作为样本进行了分析，共评估了三种投资方案：内部收益率（IRR，可解释为一项投资的预期年增长率¹）10%的方案，内部收益率6%的方案以及一个协同各类措施的热泵方案。这三种投资方案均以与零售商的讨论结果为基础，分别代表具有10%内部收益率的高收益投资门槛、实现GEB措施部署数量最大化且回报合理的6%内部收益率门槛以及建议安装热泵并与其他措施组合后能够达到10%内部收益率门槛的第三中间方案。

建筑碳排放占全球碳排放的39%。为了避免气候变化产生的最坏影响，我们必须在2030年之前将排放量减少一半，GEB对此将发挥至关重要的作用，主要通过减少建筑物的能耗与排放，帮助我们的电力系统变得更清洁、可靠和稳定。本研究旨在展示零售建筑如何以低成本高效益的方式发挥GEB的潜力，如何将可再生能源、负载柔性化措施和节能措施结合起来，减少峰值能耗并帮助实现一个清洁、有弹性的电网。

主要研究结果

该公司目前对其旗下零售门店的用电量和电力需求的管理良好。此次分析所选的商店是全国一些最高效的零售购物中心。根据Energy Star Portfolio Manager (ESPM)¹的数据，所分析的门店平均比全国94%的零售购物中心更高效。

我们为这家零售商确定了几项具有高成本效益的策略来帮助它减少峰荷需求量、提高能效并减少其整体的碳排放。

1. 在确保6%内部收益率的情况下，该零售商可以减少37%的能源成本和27%的碳排放。
 - 在内部收益率为10%的高收益方案中，该零售商可以减少26%的年度能源成本和19%的碳排放。
 - 升级照明设备和安装屋顶太阳能是实现节能和提升成本效益的关键因素。
 - 可在50%以上的门店以具有高成本效益的方式落实需求侧响应措施。这些措施有助于提高该建筑改造项目的成本效益并在现有电网的基础上进一步减少碳排放。

¹ Energy Star Portfolio Manager: 是一个能够用来检测并追踪建筑（主要针对商业建筑）能源消耗以及二氧化碳排放的在线工具。建筑的业主可以通过上传建筑的能耗等信息，获得对于建筑能效水平的评价。能源之星计划还基于同类建筑的能耗水平，对于建筑提供能效认证和评分。

2. 通过新的或改进后的需求管理、节能和屋顶太阳能措施，该零售商的113家门店可减少约5MW或17%的电力需求。
 - 峰荷需求降低的潜力因门店而异，并受到当前设备与控制方式的影响。采用电直热采暖的门店可以减少高达50%的峰值负荷。
3. 在被分析的门店中，目前有17%（19家）可以通过安装热泵并结合其他节能、需求侧管理以及屋顶太阳能措施实现高成本效益。这些门店中的大多数将采用热泵替换电直热。它们可以作为积累热泵经验的试点项目。
4. 为了在满足投资门槛的同时，最大限度地降低峰荷需求量、提高碳减排量，需要针对具体地点制定改造方案。目前能够通过热泵和电池储能获得可观回报的门店可以作为其他门店的试点，让后者在不久的将来获得更有吸引力的回报。

适用于整个零售行业的洞察

该零售业建筑改造项目本身是一个高效、灵活经营的典范，本报告中的碳减排结果可供其他大型零售商场借鉴。以下是向整个行业推荐的具有高成本效益的碳减排策略：

- 使用集中化的企业级能源管理信息系统 (Energy Management Information System, EMIS) 测量、监测和控制设备性能
- 采取需求侧灵活管理策略，例如分时段开启暖通空调设备以避免同时出现峰荷、在需求峰荷期之前预先调节空间温度（之后慢加速启动设备）。控制时序需要考虑到变化的成本和碳强度（至少每月调整一次）
- 更换为有集成式传感器套件的LED灯具
- 使用大小合适的屋顶太阳能模组减少用电量
- 在气候较暖的地区，在屋顶上安装反射阳光的白色屋顶膜
- 使用空气源热泵热水器
- 通过将电气化与可再生能源发电、节能与用电柔性措施相结合，可以使全国许多地方的高效屋顶热泵空调机组(Rooftop Units, RTUs) 发挥高成本效益。在评估能源升级方面的投资时，应考虑如何发挥出这些措施的协同作用

随着联邦和州碳政策和激励措施的变化以及技术的改进，电气化和电池储能将变得更加经济。热泵改造试点项目将为这家零售商提供用于评估电气化方案经济性的更多信息。这些零售商店的运营方应定期重新评估这些措施的成本效益。

在不同的电价和气候区落实GEB措施都能带来经济效益，并且无论建筑改造项目位于何处，都应该予以考虑。在公司持有的固定资产（这里特指公司旗下所属的零售商店）层面规划GEB升级将：

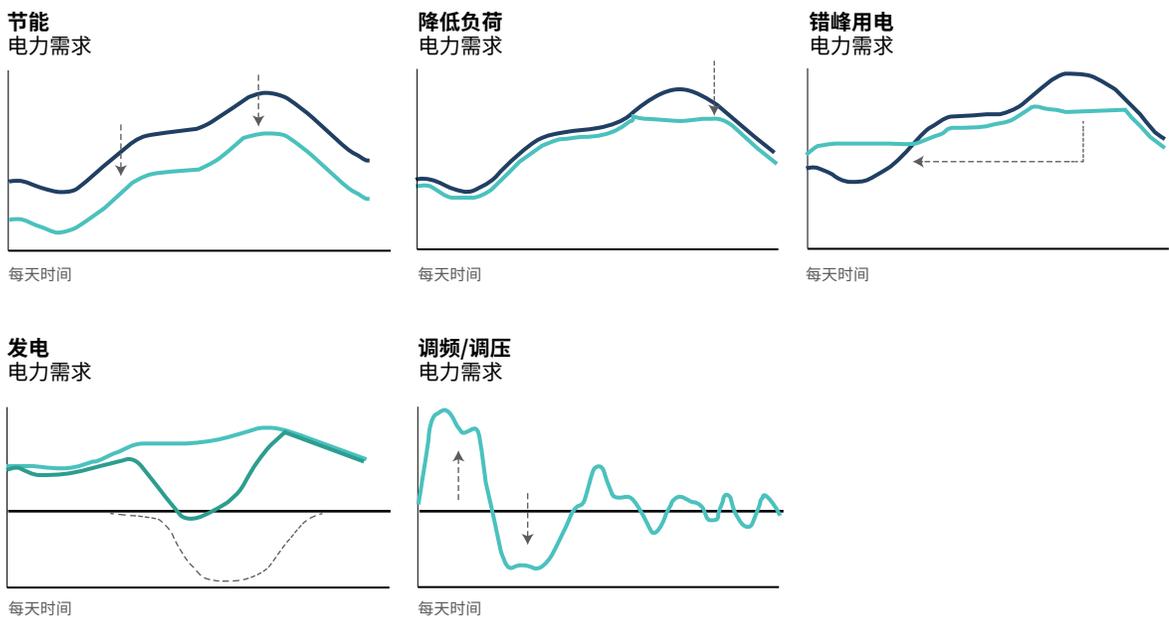
- 减轻行政管理负担。
- 通过批量采购协议减少初始成本。
- 确保资金投入收益最大的项目。

电网交互式节能建筑介绍

什么是电网交互式节能建筑（GEB）？

电网交互式节能建筑是一种能够连续、整合地优化能源使用以满足电网服务、用户需求以及降低成本的高效节能建筑。³

图1 电网交互式节能建筑的典型日建筑负荷情况及其改变用电量的方式



资料来源：美国能源部电网交互式节能建筑发展路线图⁴

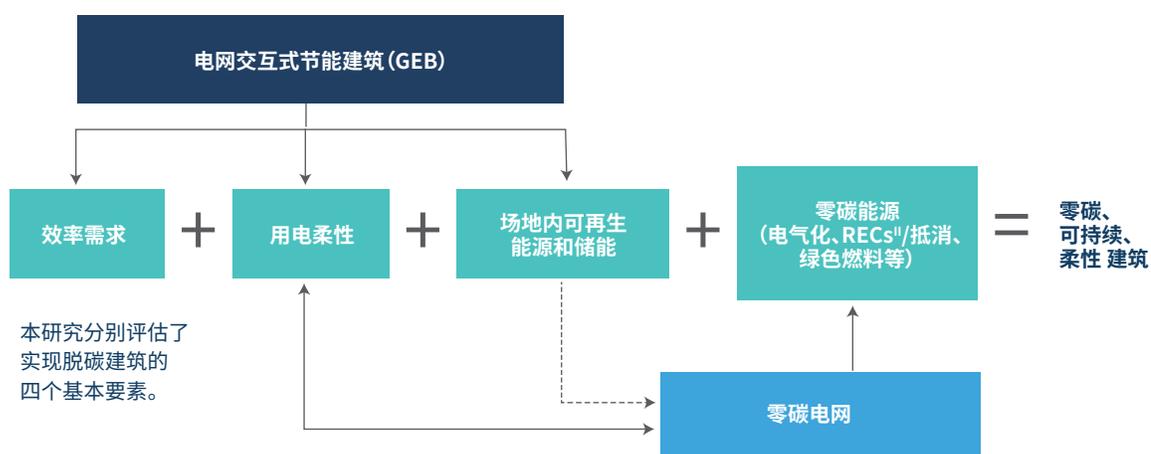
GEB采取五项关键策略调整建筑运营方式，以实现节省成本、提高使用者舒适度和成为电网的一项资产的目标。

1. 节能：在不降低使用者舒适度的情况下，持续减少全天用电量。
2. 降低负荷：在短时间内减少用电负荷。这一策略通常是用来响应需求计划的要求。
3. 错峰用电：将用电量转移到一天中的不同时段以避开高成本或高排放时段，也称为“移峰填谷”。
4. 调频/调压：根据电网运营商的信号，在秒级或亚秒级自主平衡电力供给/需求或无功功率吸收/供给。
5. 发电：利用屋顶太阳能光伏或其他现场资源满足建筑需求并将多余的电力输送到电网。

随着建筑技术和电价结构变得更加复杂，仅通过传统的用能强度 (Energy Use Intensity, EUI) 基准评估建筑性能将不再适用于评价建筑集群的能效水平。现代建筑可以根据市场信号调整自身能耗，优化成本或排放。这些信号将越来越多地由电网运营商或第三方服务商提供。为了实现GEB，投资需要同时考虑建筑内部条件（如舒适度、使用率、照明），和外部条件（如市场价格信号、天气或排放）。通过加入GEB硬件和软件，可以使建筑从基本的节能措施升级到灵活的错峰用电，这既有益于建筑集群的所有者、公用事业公司，同时也满足了使用者的舒适度需求和偏好。

脱碳建筑改造项目取得成功的基本要素

图2 实现脱碳建筑的基本要素



附图2说明了GEB战略如何帮助实现脱碳。脱碳建筑的运行不会造成导致气候变化的温室气体排放，这就需要 使用零碳能源来取代现有的化石燃料系统。为了以具有高成本效益的方式实现符合《巴黎气候协定》的零碳建筑，就需要对建筑落实电气化和用电柔性措施，并在使用电或其他低碳能源的同时部署现场可再生能源和储能解决方案。本报告侧重于根据投资总预算及目标回报率确定具有高成本效益的GEB措施，这限制了实现碳减排量最大化的可能性。但如果侧重于碳排放，那么措施组合的选择就应该考虑最大化碳减排，而不应受到投资限额的限制。

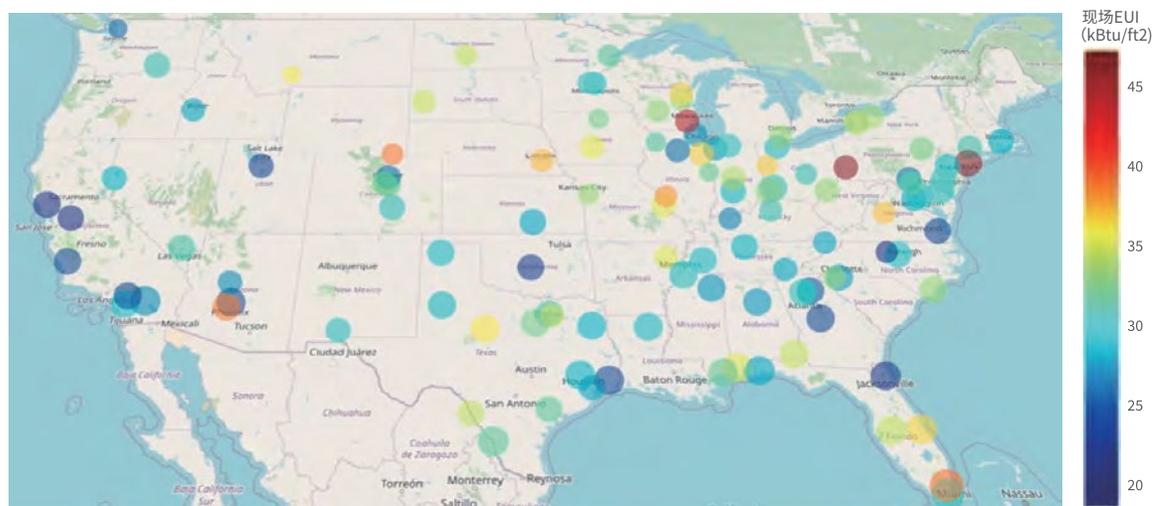
考虑电网碳排放信号的需求侧灵活调节具有较大的减碳潜力。⁵建筑可以管理用电负荷，以使得电网和建筑层面应用更多的可再生资源发电成为可能。在建筑群层面可以部署的能效提升措施、灵活性设施以及分布式能源是实现高成本效益脱碳的重要基础。

II RECs是Renewable Energy Certificates的缩写，指可再生能源证书，用作证明可再生能源的发电量和属性，可以类比国内的绿色电力证书（绿证）。

零售建筑集群项目背景

本研究基于真实的建筑资产、用电量和某大型零售公司旗下门店的财务数据。作为美国最大的连锁百货公司之一，该公司门店覆盖了49个州、多个气候区和多家电力公司。由于其1200家门店中每家门店的用电情况都有所不同，因此选择哪些门店进行建模分析对于确立整个零售公司的可靠投资战略至关重要。本报告分析了GEB升级给该公司旗下具有代表性的门店所带来的潜力。

图3 美国各地的门店及其用电强度(EUI)
(颜色代表用电强度，大小代表了门店面积)



为了提出有效的建议，研究把重点放在该零售商的350家持有时间较长的零售门店上。在这350家门店中，选择了113家门店作为代表，其能效水平与该零售商所有的全国门店一致。在选择这些门店时，考虑了以下七个因素。

图4 具有代表性的门店样本的选择标准

门店选择标准	
变量	考虑因素
州	43个州
气候	覆盖1-7气候区
采暖方式	天然气和电力
太阳能	代表组中包含有和没有屋顶太阳能装置的门店
需求响应	代表组中包含已加入需求响应服务的门店
电力成本	包含了从低到高的电力成本
项目成本	包含了从低到高的项目成本
门店规模	从约5万平方英尺到约11万平方英尺

该零售商的门店目前管理良好

效率基准

该零售商旗下的零售门店的用电强度（EUI）为20-40 kBtu/ft²，平均值远低于能源之星的零售门店EUI中位数（103.5 kBtu/ft²）。通过采取以下节能和需求管理措施，该零售商旗下门店在一般基准条件下的平均节能等级优于94%的美国零售商场：

- 建筑控制：该零售商安装了一个稳健的能源管理信息系统（EMIS）来监测和控制暖通空调设备以及门店内的其他终端用电设备。通过该EMIS，可按区域设置设备运行时间表与温度设定值，并且可以在企业云端上进行远程监测/控制。
- LED照明升级：被评估的门店中，大约有一半的门店使用了不带集成式传感器的LED灯具取代了荧光灯。
- 照明优化：这些门店在适当区域安装了人员传感器和照明调节功能。

许多能源研究的目的是将建筑能耗降低到能源之星的标准，但该零售商的门店已经超过了这个水平。除考虑建筑的EUI之外，针对电网交互式节能建筑的投资策略还需要全面考虑其他相关因素。

需求管理

需求管理能力取决于精细的控制措施和建筑自动化系统。该零售商已经实施了各种减少需求的策略，以减少每月峰荷需求时段的费用。所采取的主要策略有：

- 通过分时段启动暖通空调设备来降低需求：在EMIS中设置目标功率值，锁定压缩机的第三/第四级，并通过屋顶热泵空调系统（RTU）进行循环。当前的控制逻辑主要用于削减夏季峰值负荷。
- 需求响应：在所分析的113家门店中，有29家门店直接或间接（与其他用能方组成聚集商）参与了需求响应计划。当被要求进行需求响应活动时，该零售商的许多门店能够进行温度回调、对建筑进行预冷、限制风机/压缩机的用电量并在该时段后慢加速启动。

用电柔性和需求响应取决于足够的控制技术和市场信号。建筑在升级为电网交互式建筑后，将能够适应不断变化的电价和电网的碳排放信号。

电价结构

该零售商旗下的零售门店面对着各种各样的电价结构。RMI对每一类复杂问题进行了建模，将所有电价归纳为七种电价结构（见附图5）以便分析可能的关联性。电费不根据时间变化的建筑将无法从错峰用电措施中获利。

图5 电价结构一览

电价结构	门店数量	电力需求和电价描述
非季节性非阶梯电价	46	费率恒定，不随用电量以及使用时段和季节而变化。
非季节性阶梯电价	21	费率全年保持不变。如果建筑超过某个功率或用电量限值，费率就会降低。
季节性非阶梯电价	11	费率取决于在一年中的用电时段， 无上限值 ；费率不会因为建筑用电量的增加而改变。
季节性阶梯电价	14	费率取决于一年中的用电时段。如果建筑超过某个功率或用电量限值，费率就会降低。
分时电价 (TOU)	5	费率取决于一天中用电的时段， 但全年保持一致 。费率不会因为建筑用电量的增加而改变。
季节性分时电价	14	费率取决于一天中的用电时段和一年中的用电时间。 无上限值 ；费率不会因为建筑用电量的增加而改变。
季节性分时阶梯电价	2	费率取决于一天中的用电时段和一年中的用电时间。如果建筑超过某个功率或用电量限值，费率就会降低。

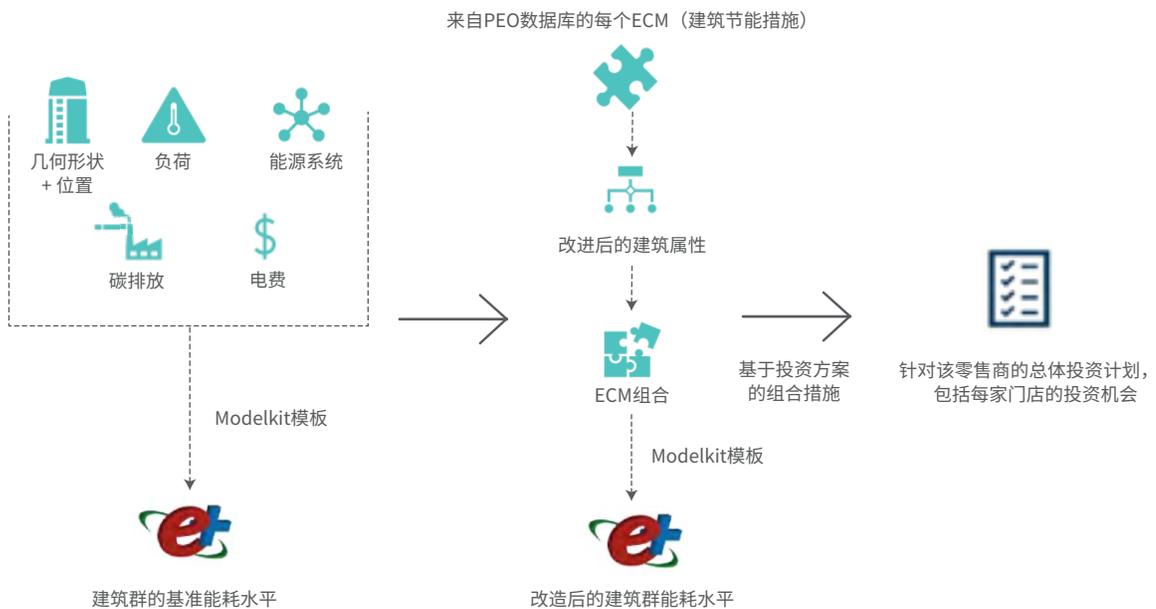
建模方法

RMI使用其建筑集群能源优化工具 (Portfolio Energy Optimization tool, PEO) 评估该113家门店。PEO采用了“规模化定制”的能源建模方法。“规模化”指该工具能够一次性生成和模拟所有113个能源模型，“定制”是指为每家门店构建一个自下而上、准确表示该门店现有条件的能源模型。在本报告中，每家门店的名字都被匿名化和标准化。

该零售商旗下零售门店的信息取自客户提供的各种数据集，包括调查问卷、图纸、暖通空调控制时序、账单信息和间隔数据^{III}。这些数据集被输入到建筑集群能源优化工具 (PEO) 中，生成根据每家门店情况加以校准的EnergyPlus模型。

PEO建模框架

图6 RMI建筑集群能源优化工具(PEO)操作步骤
针对该零售商的总体投资计划，包括每家门店的投资机会



针对选中的113家门店，我们总共分析了13类措施，包括60多个能源和财务变量，共转化成4500多个能源模型。根据客户提供的投资标准和能效目标，我们以每项措施的结果为依据，选择特定门店的改造方案，并模拟计算出这些方案的相互协同作用。最终，我们对于特定门店的结果进行叠加，得出针对整个零售建筑集群的建议以及成本效益分析。

以下措施被认为与该零售商的门店最为相关（该列表并未包含所有被评估的措施）各项措施的相互作用被加入到每个模型中，从而充分利用电气化协同效应所带来的降本优势。

III 间隔数据：指在规定时间间隔（每15分钟或1小时）通过电表等仪器记录的建筑物运行数据（如用电量、用气量等）。

图7 对该零售商建筑改造项目采取的措施

类别	措施	措施内容说明
用电柔性	电池储能	最大限度地提高错峰用电量或内部收益率
	冰蓄冷	对热泵屋顶机组配备冰蓄冷
	照明调节	减少用电(不包括错峰用电)
	分段启动加热和冷却盘管	通过分段启动盘管或风机减少每月峰荷需求
节能	优化外围护保温结构——屋顶和外墙的隔热	每项措施包含几种不同的R值方案(如R20、R30和R40)和保温材料类型。
	屋顶膜	深色或浅色屋顶膜
	优化外窗	用高性能的窗户取代目前的窗户；增加玻璃膜层
	外门升级	安装外门风幕和快速开合的卸货门可减少渗透
	暖通空调升级	安装高效屋顶机组, 包含热回收、调速电机、双焓经济器控制、风量调节和低压损滤芯等装置
	LED照明升级	LED灯改造；升级为带集成式传感器的LED灯具
	吊扇	使用集成能源信息管理系统(EMIS)的吊扇增加风速, 从而实现在提升夏季设定温度的情况下不降低室内舒适度
电气化	空气源热泵RTU	用空气源热泵取代燃气炉
可再生能源	屋顶太阳能光伏系统	新的太阳能光伏模组或增加现有的屋顶太阳能光伏数量。由于零售商每一幢建筑的购电协议不同而且在未来可能有变化, 因此屋顶太阳能光伏系统模型计算了全生命周期持有成本(Total Cost of Ownership, TCO)。

投资方案与结果

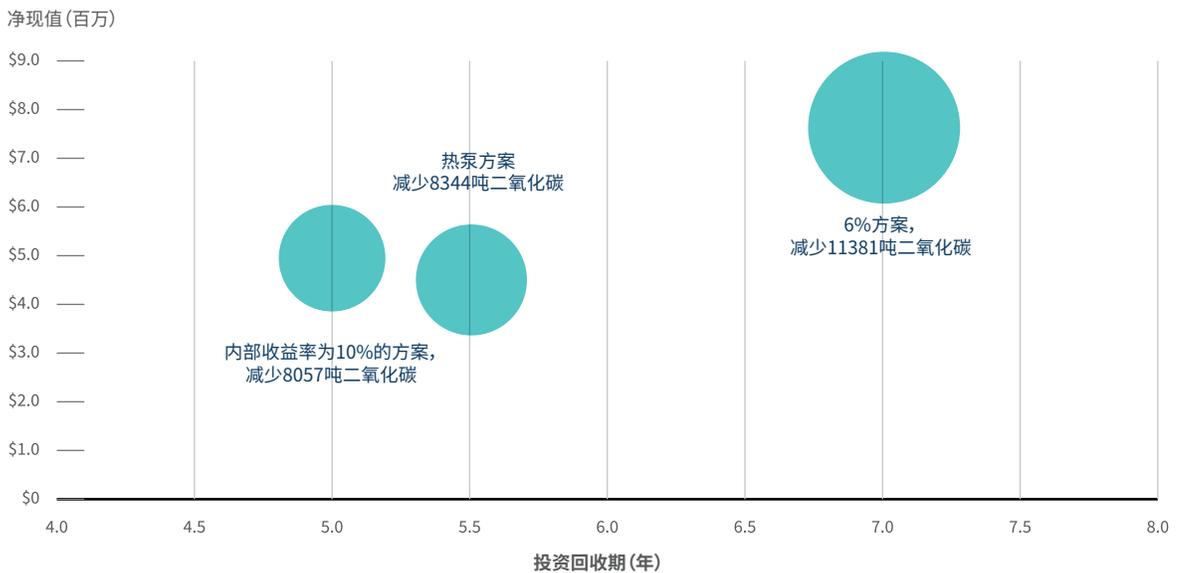
基于上述分析，我们为该零售商提供了其门店升级改造的不同方案，每个方案都有不同的净现值（NPV）、投资回收期期和碳减排潜力。这些投资方案专为113家样本门店构建。它们根据零售商的投资预算以及RMI和NREL的建议制定。

内部收益率为10%的方案：满足内部收益率为10%的高收益投资标准的措施可以显著减少能耗和碳排放。

内部收益率为6%的方案：降低投资门槛可以最大限度地提高建筑集群可投资的用电柔性、效率和可再生项目。

热泵方案：高效热泵方案的评估是基于上述10%内部收益率的情景进行的，该方案仅选择符合投资门槛的门店接受热泵改造。

图8 为该零售商推荐的每个投资方案路线的预计净现值、投资回收期期和碳减排潜力



需要指出的是，任何本研究提出的方案都不建议拆除任何有剩余使用寿命的设备。替换现有设备的措施按“增量成本”，即同类产品与高效产品之间的成本差异定价。本分析没有使用对天然气或电力价格的预测，而是使用了当前的电价结构和能源价格。碳强度的计算基于EPA的eGrid计划所定义的指定州级碳排放。

内部收益率为10%的方案

所有收益率超过10%的单一措施都被归入到一个组合中，以便计算组合中所有措施的总体效果。当多个措施之间存在竞争关系时，则选择内部收益率最高的方案。在满足投资收益率门槛的前提下，热泵和太阳能协同应用将被纳入投资方案中。但需要注意，过高的投资收益率要求会限制方案的减排潜力。

主要结论：

- 该零售商可以在保证10%内部收益率的情况下，减少26%的年能源支出和19%的碳排放。投资1190万美元将产生500万美元的净现值回报。
- 节电主要通过安装屋顶光伏和更换集成传感器的LED灯具实现，这些措施贡献了80%的净现值。
- 照明升级减少了建筑内部得热，使得供暖的天然气用量略有增加。
- 用电柔性具有一定的成本效益，但对净现值的影响相对较小，因为该零售商旗下的门店已经使用了需求管理措施。

10%IRR情景下，改造措施对于该零售商的影响

经济性方面



1190万美元
投资机会



500万美元(净现值)
每年减少26%的能源支出



5年
投资回收期

能源使用方面



14307 MWh
每年节省16%的电力



5 MW
每年减少17%的用电峰值需求



(18243) Thermⁱ
每年增加3%的天然气用量

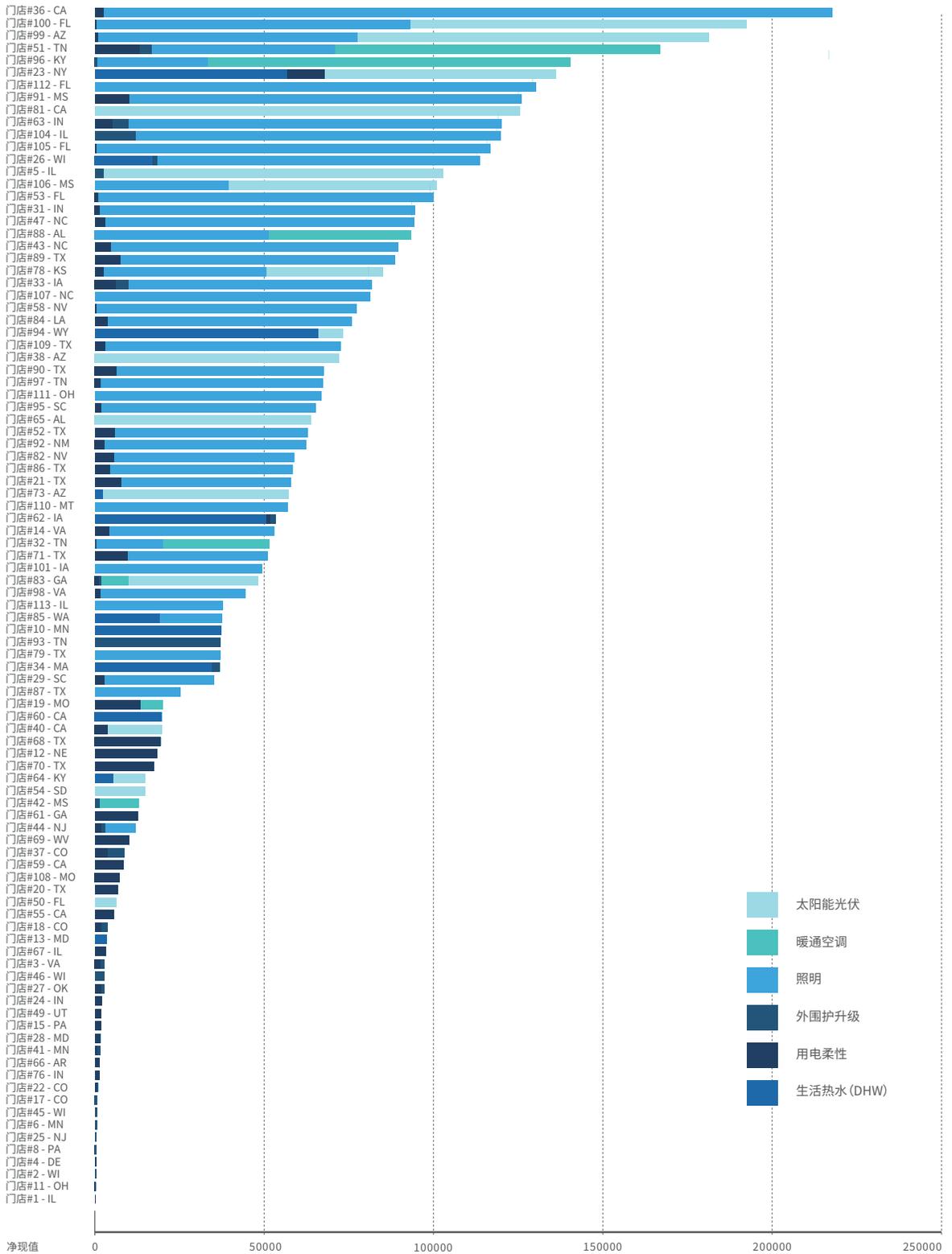


每年减少8057吨二氧化碳
减少该零售商旗下的建筑群
19%的二氧化碳排放

注：1 Therm=29.3 kWh

PEO工具所采取的规模化定制方法帮助我们为每家门店确定了具有高成本效益的GEB策略。如下图所示，每家门店的投资潜力差异很大。以下分析可以帮助识别高价值项目，并将其在选定门店开展试点，以验证模型结果的有效性。

图9 达到10% IRR门槛的每幢建筑的改造措施



备注：上图帮助确认哪些门店可以开展具有最高净现值潜力的试点项目。这些试点项目可以用来验证节能减排量和制定对于整个零售建筑集群的投资计划。

下表列出了内部收益率为10%和6%情况下成功的个别措施。降低投资回报率的要求将允许更多照明升级，安装更多屋顶光伏和热泵。

图10 10%和6% IRR方案中的成功措施

类别	措施描述	门店数量 (10% IRR)	门店数量 (6% IRR)
用电柔性	分段开启加热和冷却热泵，以减少同时使用造成用电峰荷。可以调整当前的设备控制逻辑，开启循环风机和分段启动冷却/加热盘管，对于月度的峰值负荷进行管理。峰值负荷降低的目标值也应通过控制逻辑每月进行调整。	60	63
	安装一个与现有暖通空调系统连接的冰蓄冷系统	0	3
能效	安装空气源热泵热水器(用于生活热水加热)	12	23
	更换集成传感器的LED灯具	45	46
	更换集成传感器的LED灯具并接入EMIS系统	2	2
	将报废的灯具更换成带有集成式传感器的新LED灯具	6	10
	安装外窗镀膜	0	3
	在屋顶上铺设黑色屋顶膜	4	4
	在屋顶上安装白色反光薄膜	15	15
	将已到使用寿命的双层玻璃窗更换成三层两腔玻璃窗户。	7	10
电气化	将已到使用寿命的的燃气RTU更换成更高能效的型号。替换的设备应该包括一个调速电机、双焓经济器控制、风量调节和低压损空气滤芯。	2	5
	用热泵替换现有的已到使用寿命的RTU，并配备调速电机、双焓经济器控制、风量调节和低压损空气滤芯。	8	11
可再生能源	安装规模合适的屋顶太阳能光伏系统。屋顶太阳能系统可以与用电柔性、节能和热泵相结合，实现门店的电气化。	19	51

内部收益率为6%的方案

将投资门槛降低到6% IRR可以最大限度地提高建筑集群可投资的用电柔性、效率和可再生项目。

主要结论：

- 该零售商可以在确保760万美元净现值的情况下，减少37%的能源支出和27%的碳排放。虽然投资回收期比10%内部收益率方案略长，但该方案的净现值潜力是所有三个评估方案中最高的。
- 该零售商旗下的近一半门店可以通过规模合适的屋顶太阳能满足每年的全部电力需求。
- 在越来越多的城市和州政府设定碳排放目标的背景下，该方案将通过最大限度地提高能效、用电柔性 and 控制策略最小化该零售商所面临的风险。

6%IRR情景下, 改造措施对于该零售商的影响

经济性方面



2350万美元
投资机会



760万美元(净现值)
每年减少37%的能源支出



7年
投资回收期

能源使用方面



14387 MWh
每年节省16%的电力



4.8 MW
每年减少16%的高峰时段需求



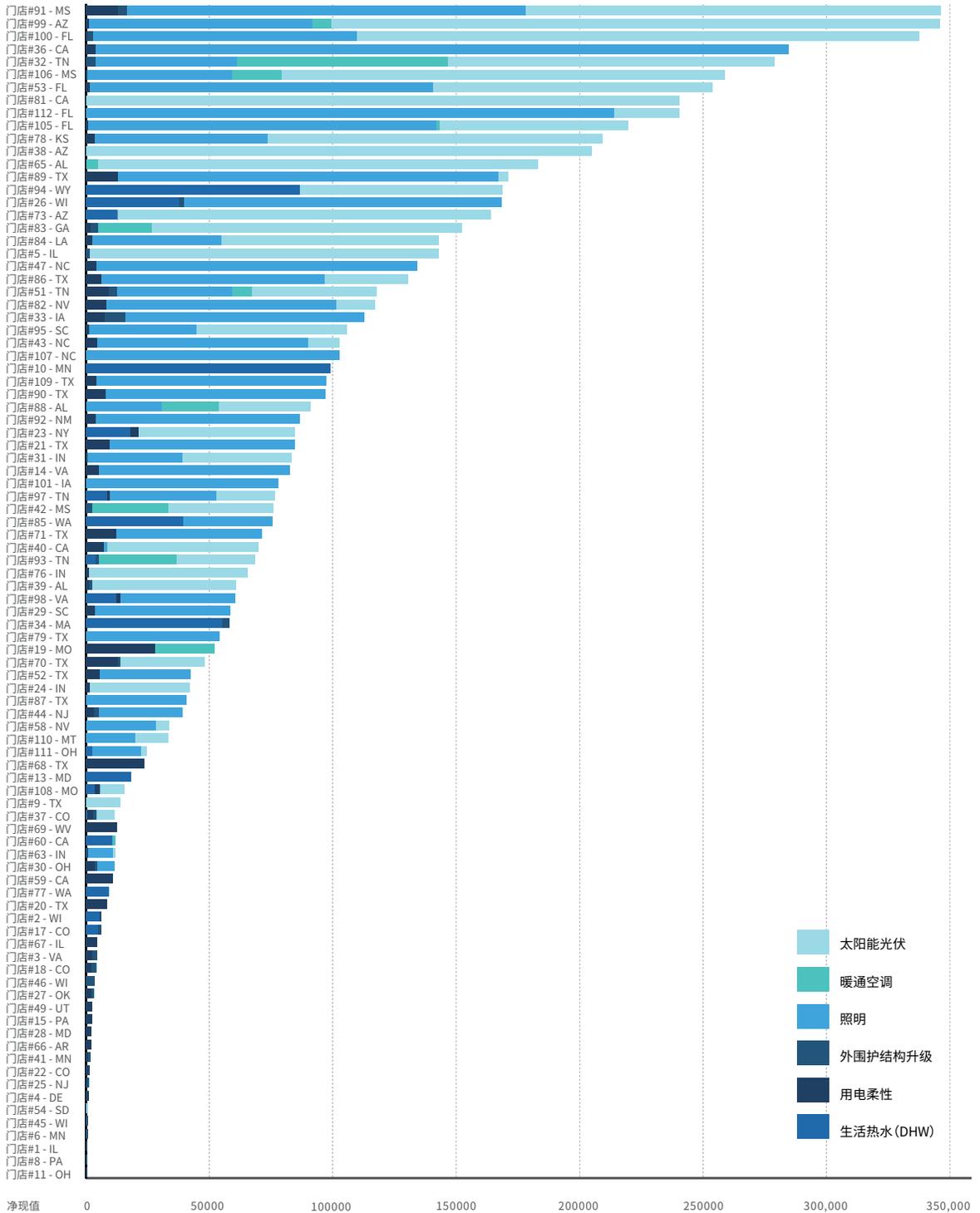
(28657) Thermⁱⁱ
每年增加4.8%的天然气用量



每年减少11,381吨二氧化碳
整个建筑改造项目减少27%的二氧化碳排放

注: 1 Therm=29.3 kWh

图11 满足6% IRR门槛的每幢建筑的改造措施



备注：上图识别出哪些门店可以开展具有最高净现值潜力的试点项目。这些试点项目可以用来验证节能减排量和制定对于整个零售建筑集群的投资计划。

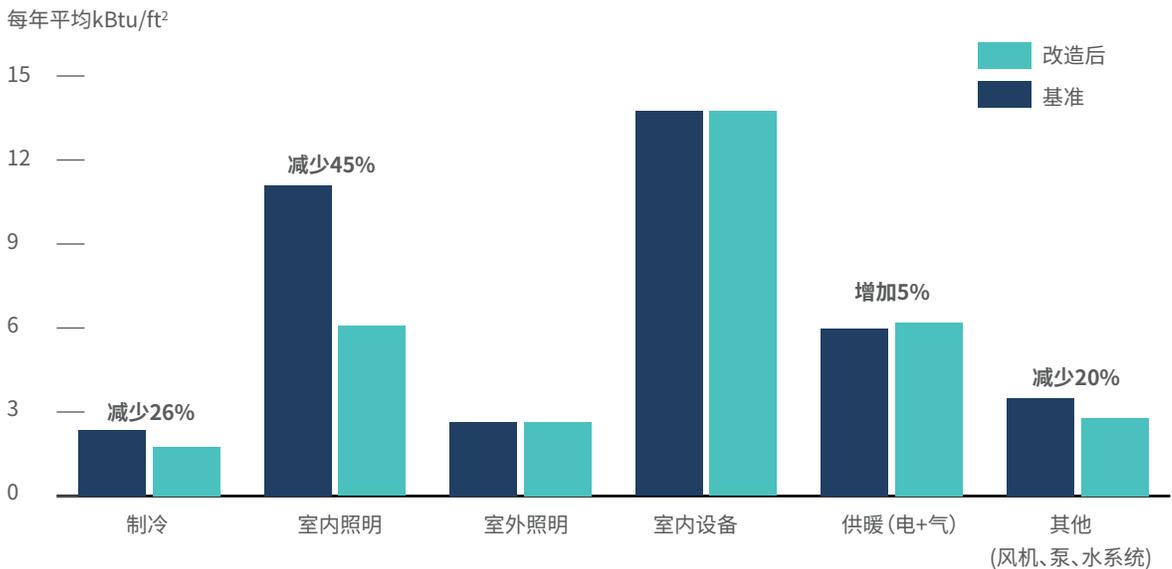
照明升级和屋顶太阳能贡献了该方案中碳减排总量的71%。用于供暖和生活热水 (Domestic Hot Water, DHW) 的热泵贡献了额外的26%。在该零售商现有的用电柔性措施的基础上进行改进, 可以用最少的投资减少1.5%的碳排放。这些结果表明了成本优化分析之后的改造方案的碳减排潜力——如果把碳作为主要关注点, 将实现更大的减排潜力。

图12 6%内部收益率下各措施的碳减排潜力



下图显示了6%内部收益率情景下的不同措施对整个建筑集群终端用能量的影响。这些措施减少了制冷、室内照明和其他系统（风机、泵和水系统）的能耗。由于高效照明设备的采用减少了内部得热，供暖负荷略有增加。

图13 采用6%内部收益率方案每个终端用途的平均能耗



热泵方案

用热泵取代报废的燃气RTU将有助于该建筑改造项目逐渐实现脱碳化。热泵方案使用了与10%内部收益率方案相同的措施组合以及节能型热泵RTU和用电柔性措施来减少由电气化而增加的峰值负荷。我们发现19家门店达到了10%内部收益率门槛。

热泵情景下, 改造措施对于该零售商的影响

经济性方面



1400万美元
投资机会



440万美元(净现值)
每年减少28%的能源支出



5.5年
投资回收期

能源使用方面



13583 MWh
每年节省15%的电力



4.7 MW
每年减少16%的峰值用电需求



(12285) Thermⁱⁱⁱ
每年增加2%的天然气用量



每年减少8,344吨二氧化碳
减少该零售商旗下的建筑群20%的二氧化碳排放

注: 1 Therm=29.3 kWh

主要结论:

- 热泵、屋顶光伏、节能措施和用电柔性之间存在着协同效应。如果该零售商只安装热泵RTU而不与屋顶光伏、节能措施和用电柔性升级相结合, 只有8家门店达到目标IRR, 而在结合的情况下有19家门店达到目标IRR。
- 通过采用该投资方案, 零售商可以减少28%的能源支出和20%的碳排放, 该方案的投资额为440万美元, 投资回收期为5.5年。
- 在19家达到投资门槛的门店中, 只有4家门店从燃气供暖转为热泵; 其余15家采用高效热泵的门店目前均使用电直热采暖。
- 照明改进增加了一些门店供暖的燃气使用量。
- 目前, 24个州和地区已采取立法或行政行动以期在未来使用100%的清洁能源。⁷ 该路线将帮助这些零售门店以及该零售商拥有的建筑集群满足未来的法律或市场要求。

在该零售商拥有的建筑群中, 19家零售门店可以使用高效RTU热泵(与其他措施相结合)满足10%的内部收益率门槛, 总投资额为820万美元, 投资回收期为6.6年, 最终净现值为190万美元。这19家门店分布在不同的气候区, 拥有不同的电价结构。

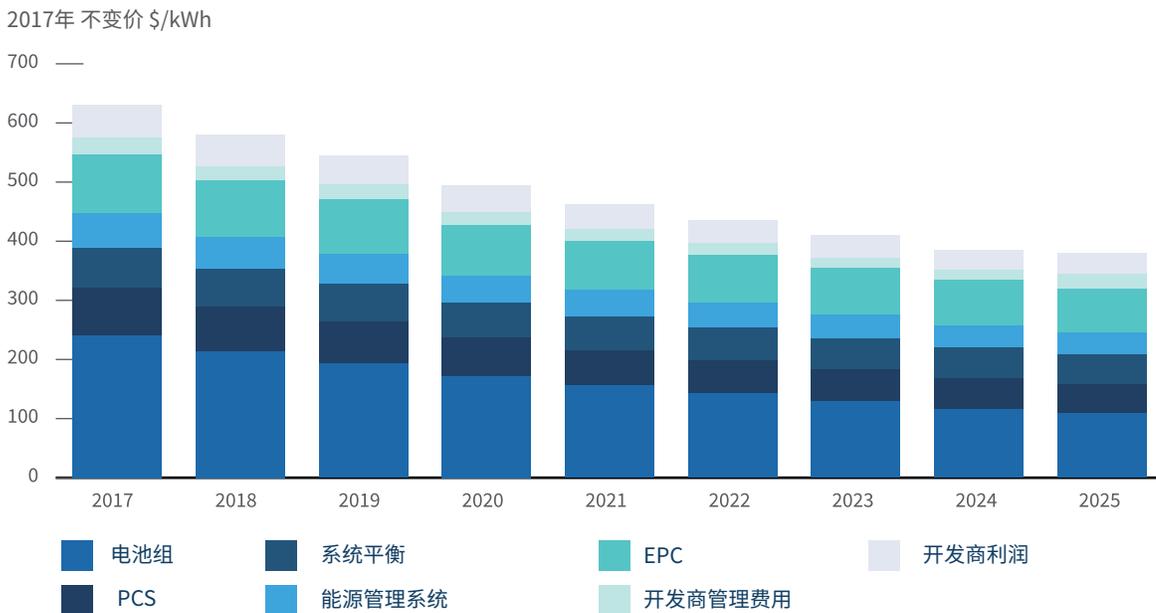
虽然没有一家在寒冷气候区的门店实现了具有高成本效益的热泵措施组合, 但电气化的经济性正在不断提高, 可以电气化的门店数量将逐渐增加。关注二氧化碳热泵将使得零售门店匹配美国创新和制造(American Innovation and Manufacturing, AIM)法案, 该法案的目标是在未来15年内逐步淘汰传统制冷剂。⁸

电池储能措施的经济性日益提升

基于对于电池储能、节能措施、电气化和可再生能源措施之间协同作用的模拟，本分析确定了五座建筑作为电池储能试点的候选者。这五座建筑的内部收益率都超过10%。通过结合电池储能和屋顶太阳能光伏系统，能够实现门店营业时段峰荷需求的减少并实现经济协同效益的最大化。我们在分析中未发现电池储能的成功与气候区或电价类型之间有任何直接的关联，但可能有几个相互关联的因素推动了这些门店的成功。

在过去的三年里，商业化的电池储能成本下降了15%，预计到2030年还会继续下降。⁹ 这一趋势将使电池储能在未来几年内变得越来越可行，目前从试点中获得的经验也将可以在更大范围的建筑群中获得推广。

图14 1 MW/1 MWh项目中一个完整储能系统的基准投资成本



备注：图中所示的是商业规模储能系统的成本迅速下降。“PCS”是“储能变流器”（Power Conversion System），“EPC”是“工程、采购和施工”（Engineering, Procurement, and Construction）

资料来源：彭博社新能源财经

改造措施分析

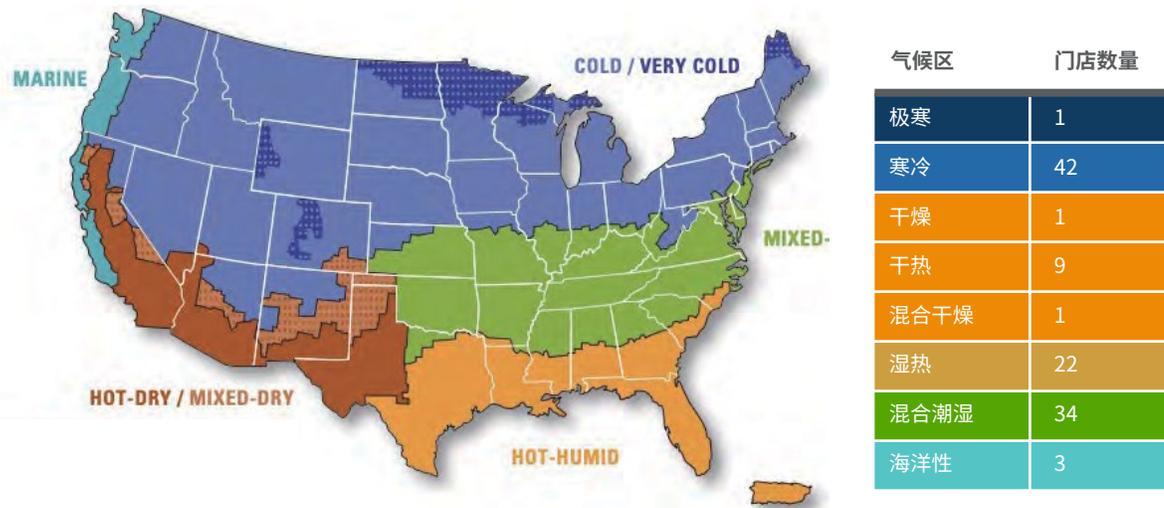
在各气候区和电价类型中的可行性

我们通过一项分析探究了有效的措施和气候/位置因素之间的相关性。该分析关注气候区、电价类型或天然气和电力的价格差异（即建筑自身条件之外的因素）是否影响了措施的有效性。分析结果显示，这些外部因素与建筑自身条件将共同决定每家门店特有的改造措施组合。

气候区：

虽然有些措施在所有气候区都是经济可行的，但该分析表明了几个值得注意的地方。

图15 气候区地图和名称



资料来源：美国能源部美国建筑计划

- 在模拟改造方案的过程中，没有一个气候区的方案有效性明显高于其他气候区。
- 高效热泵在南方气候区取得了成功（10%内部收益率）。
- 在屋顶铺设黑色薄膜只在寒冷、海洋性和混合湿润气候区取得成功。
- 照明措施在所有气候区均取得成功（地点和经济回报之间没有关联）。
- 需求管理/屋顶太阳能措施在所有气候区均取得成功（地点和经济回报之间没有关联）。

电价类型：

我们将这些零售商门店的各种电价定性为七种主要的电价类型（更详细的定义见图5）。研究在对结果进行各种相关性检验后发现，虽然每种电价类型下有效的措施存在差异，但无论电价构成如何，都有一些措施可以为整个建筑集群减少成本和碳排放。没有任何一种电价类型是引起整个建筑改造项目的措施成功/失败的必要指标。

需求管理策略

需求响应（DR）计划能够同时为电网和零售商带来价值。它可以帮助电网运营商管理紧急情况下的峰荷需求，同时奖励那些能够适时减少负荷的建筑。许多建筑已经参与了DR计划，它们实施了一些需求侧响应的策略，如在峰值负荷来临前进行预冷，以及在DR事件^{IV}中降低设定温度并关闭所有风机和压缩机。该零售商现有的DR策略十分有效，已经实现了大部分降本潜力。我们分析了调节照明是否具有效果，但发现进一步降本的潜力很低。由于需求响应带来的收益会因为供电部门激励的变化而不断变化，因此每年的DR事件数量以及联邦和州的政策都会影响收益潜力。

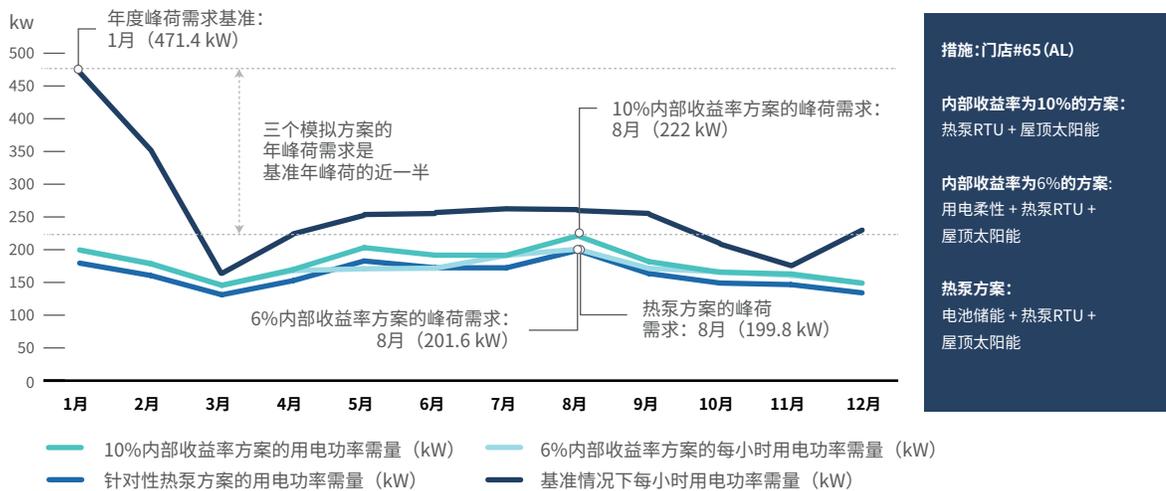
全年管理峰值负荷需求的措施比传统的DR计划更具成本效益。持续管理峰值负荷需求每月都能带来收益，而且没有改变特定DR计划的风险。该零售商目前采用自动化控制逻辑在夏季对RTU压缩机进行分时段控制以防止同时出现峰荷，以此管理需量电费。在本研究所评估的一半以上的门店中，升级控制逻辑实现对于每月峰值负荷需求的管理能够以最小的投资提高需求管理的收益。

IV DR事件指用户被要求降低能源消耗，从而应对高电网负荷的特定时刻。DR事件也被称作“节能事件”，“峰值事件”等。

电网交互式节能建筑对电力需求的影响

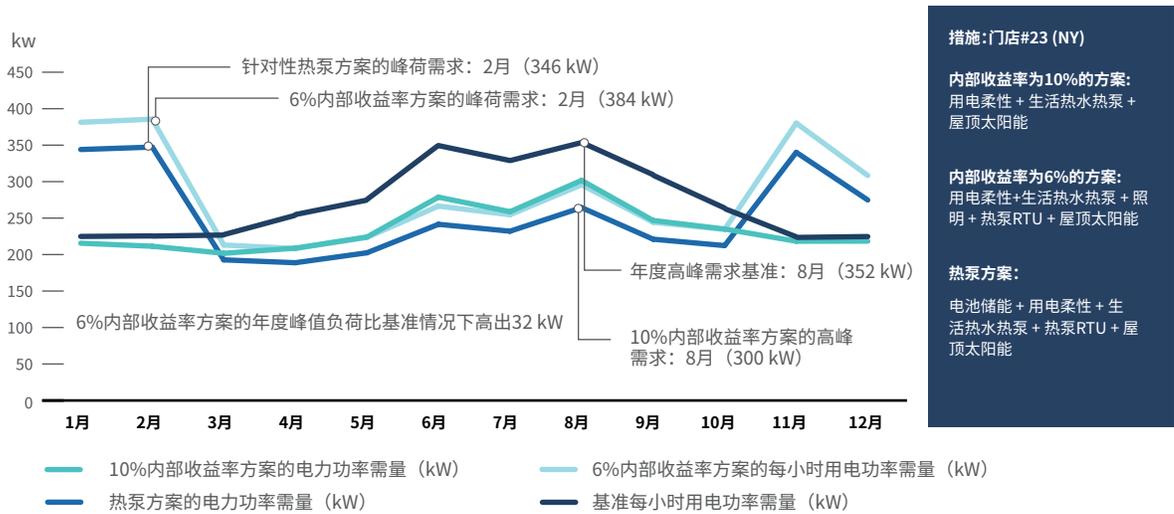
图16展示了三种不同投资方案下，65号门店（阿拉巴马州，ASHRAE气候区2A：湿热）每月峰值负荷需求相较于基准需求的变化。实施组合措施带来了两个好处：a) 减少年能耗量和相关的能源成本；b) 降低峰值负荷需求并在可行条件下实行削峰填谷以减少电费。该建筑是一个全电建筑，在冬季清晨就会产生电力需求峰值。在所有三个方案中，由于我们将高效热泵与其他措施相结合，该建筑的每月峰荷需求降低了50%。

图16 门店#65(阿拉巴马州)：每月电力峰值负荷对比



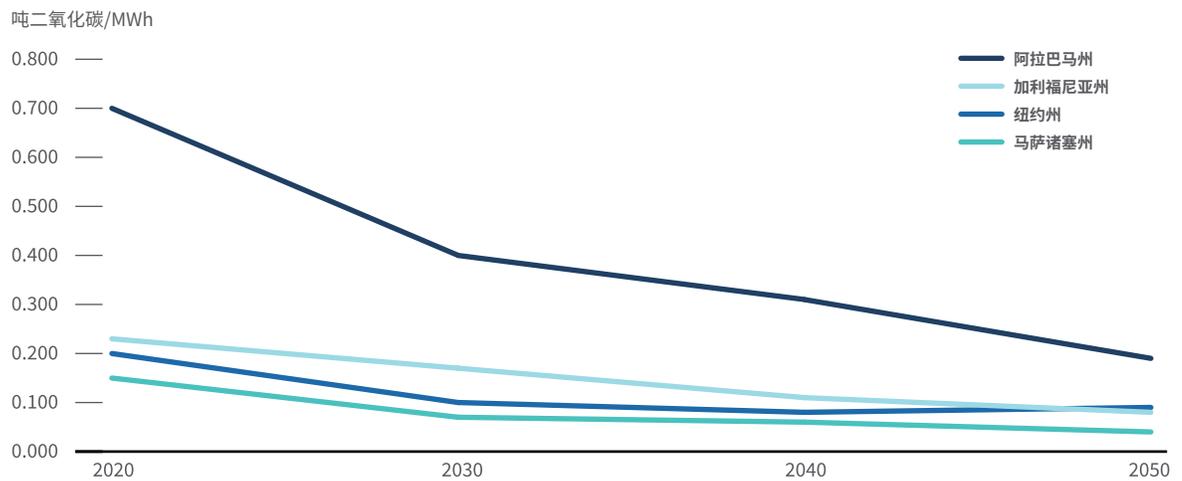
当前使用燃气供暖系统的建筑如果转向使用电热泵供暖，将增加冬季的总电力需求。虽然在这种情况下电费较高，但通过将热泵与节能、用电柔性和屋顶太阳能措施相结合，可以减少需量电费的增加。在我们分析的所有气候区中，我们选择了阿拉巴马州和纽约州的门店来展示我们的措施对需求曲线的影响。这两家门店在冬季和夏季分别由于使用电供暖和制冷系统而出现峰荷负荷。图17详细说明了23号门店（纽约州，ASHRAE气候区4A：混合湿润）的每月峰值用电需求。全面的电气化转型方案将最大程度地减少冬季峰值负荷带来的风险，这又将使电网运行稳定并减少账单费用。在23号门店的案例中，我们看到由于热泵RTU的应用，峰荷从夏季转移到冬季。但冬季峰值并不比夏季峰值高出多少。

附图17 门店#23(纽约州)：每月电力峰值负荷对比



未来几十年有望通过增加可再生能源的可变发电量实现电网层面的脱碳，有29个州在其可再生能源组合标准中规定了严格的时刻表。¹⁰ 图18展示了四个不同州电网年平均二氧化碳排放因子的变化趋势。从图中可以看出，对位于当前电网排放因子较高州的门店进行投资能在短期内实现更高的二氧化碳减排。但选择位于电网更清洁的州（图中的马萨诸塞州、纽约州或加利福尼亚州，与阿拉巴马州相比）的门店进行投资仍然有助于长期推进脱碳目标的实现。

图18 每兆瓦时终端用电的年平均二氧化碳排放量



资料来源: Cambium Database, NREL

减少负荷和需求调峰：

电费账单由尖峰负荷电费（\$/kW）和电量电费（\$/kWh）组成。因此，要使GEB措施的经济效益最大化，就必须避免峰值负荷和高收费时段的过多电力消耗。GEB建筑可以减少和转移一天中的用电，以避免在门店营业时间内的需量电费。图19到图21分别展示了三个典型日（夏季峰荷、冬季峰荷、过渡季峰荷）中，在65号门店实施三种不同改造方案对于用电负荷的影响（与基准情景对比）。结果显示，三种改造方案均能在所有典型日实现总电力需求的降低，在冬季和夏季典型日，能够实现的峰值负荷降低要高于过渡季。

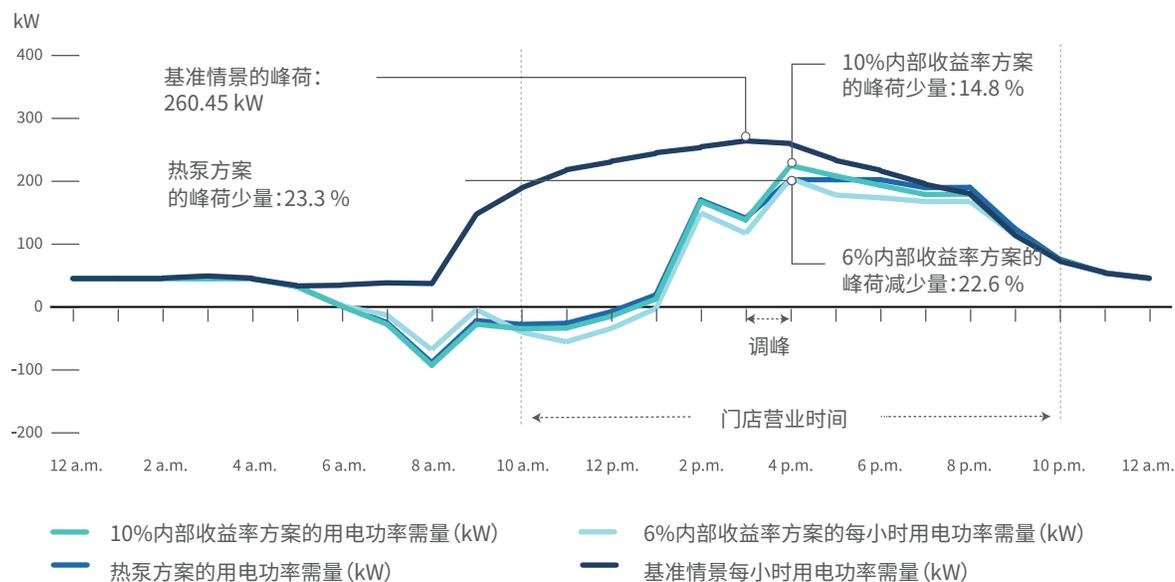
门店采用了以下几种对电力负荷曲线产生不同影响的措施组合：

- 10%内部收益率方案：高效RTU热泵 + 屋顶太阳能
- 6%内部收益率方案：每月需求管理 + 高效RTU热泵 + 屋顶太阳能
- 热泵方案：电池储能 + 高效RTU热泵 + 屋顶太阳能

a) 夏日：在夏季典型日，6%内部收益率方案的峰值负荷需求减少了22.6%，热泵方案的峰值负荷需求减少了23.3%，从而降低了容量电费。

图19 门店#65 (阿拉巴马州)：电力负荷对比

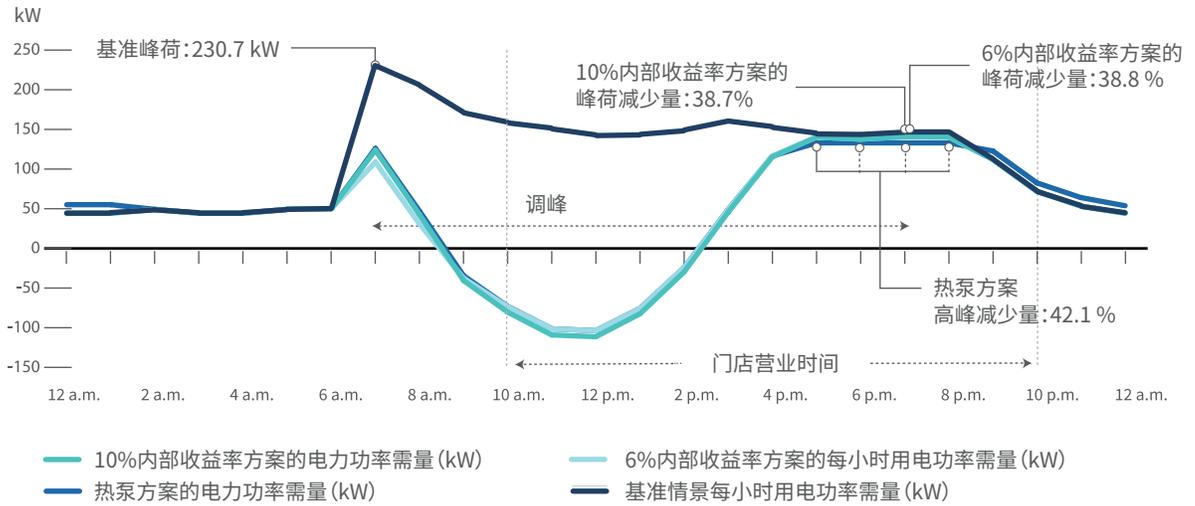
2019年8月7日（夏日）



b) 冬日：热泵方案的冬季峰值负荷需求减少了42.1%，6%内部收益率方案减少了38.8%，从而降低了容量电费。

图20 门店#65(阿拉巴马州): 电力负荷对比

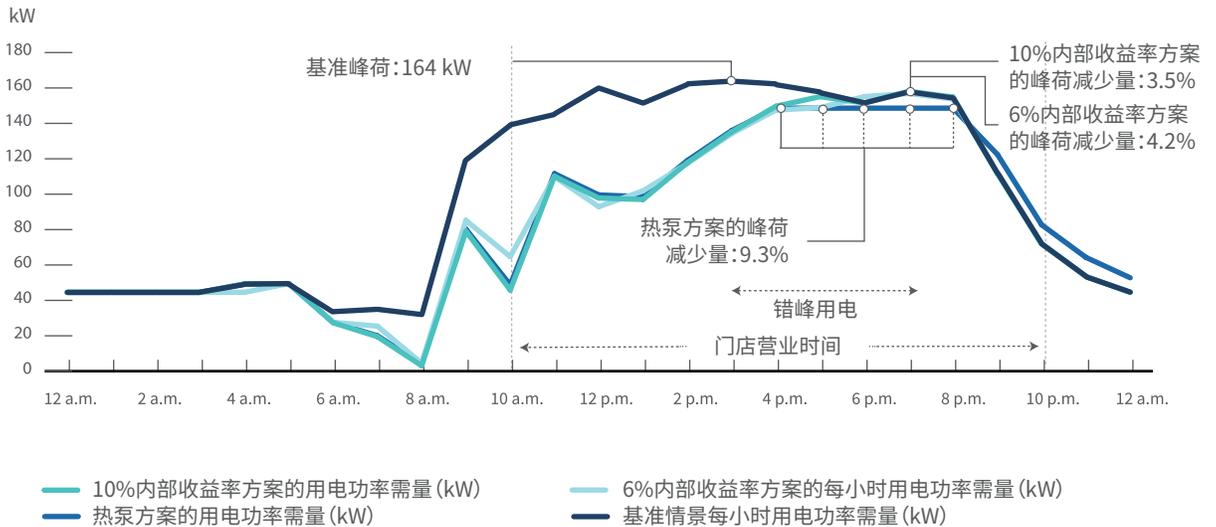
2019年12月12日 (冬日)



c)过渡季: 在所选择的过渡季典型日, 热泵方案的峰值负荷需求减少了9.3%, 6%内部收益率方案减少了4.2%。

图21 门店#65(阿拉巴马州): 电力负荷对比

2019年10月1日 (温和日)



适用于整个零售行业的洞察

本研究聚焦在美国某一零售商旗下零售门店的改造，但本研究可以成为整个零售行业的电网交互策略实施的参考或起点。我们的研究表明，任何零售商店建筑群均有可能以具有高成本效益的方式实施电网交互式节能措施，实现合理的投资回收期 and 10% 内部收益率。以下几项措施被认为在所有门店中都最为有效，应被其他零售商店的所有者采用：

- 使用集中化的企业级能源管理信息系统（EMIS）测量、监测和控制设备性能
- 通过分时段使用暖通空调设备等用电柔性策略避免同时达到峰荷，并在峰荷需求之前（和之后）对室内进行温度调节。控制顺序应考虑变化的成本和电网碳排放强度（至少每月调整一次）
- 将LED灯具更换成集成传感器组件的灯具
- 使用大小合适的屋顶太阳能光伏系统，减少网电使用
- 在气候较暖的地区，在屋顶上安装反射阳光的白色屋顶膜
- 安装空气源热泵热水器
- 通过将电气化与可再生能源发电、节能措施和用电柔性措施相结合，可以使全国许多地方的高能效热泵屋顶装置更加具有成本效益。在评估能源升级方面的投资时，应考虑这些协同作用

对于希望推动进步并为其资产提供未来保障的建筑业主来说，将投资门槛降低到6%的内部收益率能够实现更高的脱碳潜力。相关的GEB措施包括最大化需求灵活性措施、节能措施以及屋顶太阳能光伏系统安装数量的最大化。

越来越多的城市和州政府正在出台覆盖所有经济部门的碳减排目标。因此，开始确定在短期内就能通过电气化带来收益的地点和门店十分重要。这样可以使业主获得更多热泵RTU的相关经验，从而为更加广泛的应用做好准备。纽约市97号地方法规和逐步淘汰传统制冷剂等碳排放方面的立法正在推动市场朝脱碳迈进，这一转型过程中，具备电气化转型经验的业主将更有能力做出正确的能源相关投资决策。

为了实现脱碳，必须同步优化节能措施、用电柔性措施和零碳能源的部署，从而防止冬季电网峰荷的失控。通过实施一系列组合措施而不仅仅是单独使用热泵进行改造，可在确保在电网不会过载的同时保持低运营成本。在电网没有完全脱碳的情况下，仅安装热泵，而不配套太阳能光伏系统的方案甚至有可能增加峰荷需求和碳排放。

对其他项目的好处

具有可持续发展目标的企业除了投资回报外，还应该权衡改造对电网的潜在影响。New Buildings Institute (NBI) 的GridOptimal、RECURVE的FLEXvalue和传统的社会成本测算等工具可用于评估电表后端需求管理对电网层面的影响。我们选择使用GridOptimal来分析推荐的改造方案对脱碳目标和供电方的影响，其他工具也可以用来做类似的分析。

GEB对供电方的好处

随着建筑功能的发展，需要采用新的衡量标准来评估建筑在电网中发挥的作用。传统的用电强度（EUI）过于局限，而GridOptimal等新指标体系将GEB的评估指标扩大到电网。GridOptimal指标体系试图用一个统一的框架来评估不同行业（住宅、商业、工业）、电网区域和政策/监管背景下的建筑。最适合本研究两个指标是“电网峰荷贡献度”和“电网碳排放贡献度”。

图22 GridOptimal指标汇总表

GridOptimal指标	衡量内容
电网峰荷贡献	建筑需求在系统峰荷时段对电网负荷的贡献程度
电网碳排放贡献度	建筑需求在一年内对上游(电网)产生的碳排放的贡献程度

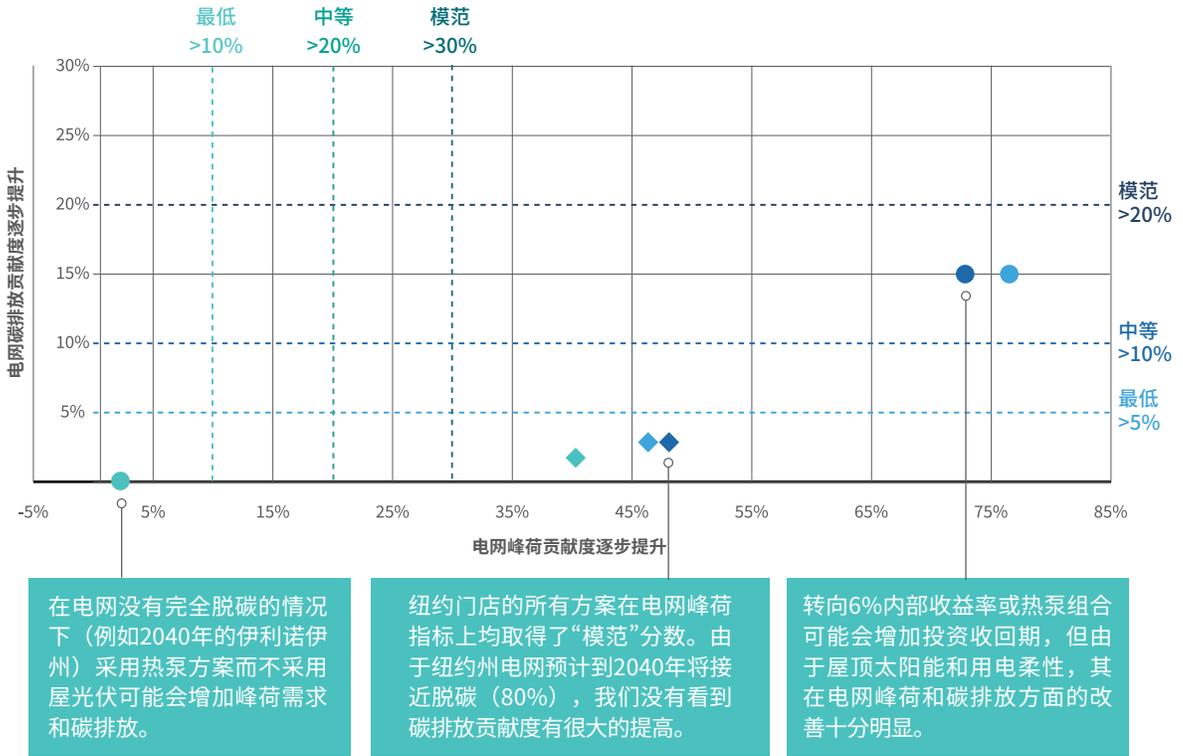
备注：所有输出类别的得分均为0%-100%的百分比¹⁴。得分越高，说明建筑的减碳和降低峰荷的能力越强。

由于量化和比较建筑对于电网贡献度的方法仍然缺失，建筑的能效升级目前仍主要局限在传统的节能改造措施。关注峰荷需求和边际碳排放率的新指标使业主能够深入了解他们的建筑并做出更加明智的投融资决定。我们使用NBI的GridOptimal指标对于样本建筑进行评估，以展示我们的措施对电网的影响。

随着各州努力达到其可再生能源组合标准 (Renewable Portfolio Standard) 的目标和电网的发展，用电柔性潜力将在减少建筑碳足迹方面起到更加重要的作用。一旦更多太阳能和风能进入电网，发电所产生的碳排放量将会有较大波动。在可再生能源比例高的电网地区，如果建筑能够把负荷转移到主要使用可再生能源发电的时刻，建筑碳排放强度可最多减少40%。零售商目前正在通过管理用电柔性节约成本；未来，用电柔性管理将成为建筑脱碳最为有力且必须的手段。

图23 不同方案的GridOptimal分数

门店#23 (纽约) 与门店#104 (伊利诺斯州)



建筑负荷需求变化以及它们管理碳排放和峰荷需求的能力是相对于建筑所在地区而言的。本分析选择了一家位于伊利诺伊州和一家位于纽约州的门店说明电网脱碳对三种投资方案的影响。选择这两家门店是为了说明我们的改造方案对未来发电结构和门店所在电网脱碳潜力的影响的差异。GridOptimal工具使用NREL对这两个州进行Cambium 2040年标准情景预测的结果作为计算之前定义的指标基础。

分析显示，三种投资方案在帮助电网管理峰荷需求和减少碳排放方面的效果各不相同（见图23）。结论：

- 在电网没有完全脱碳的情况下（例如伊利诺伊州）进行不带屋顶光伏系统的电气化可能会增加峰荷需求和碳排放。电气化改造与屋顶光伏以及节能措施的结合十分重要，从而抵消弃用天然气时用电量增加所产生的影响。如果电网没有脱碳，一些建筑的电气化可能会增加电网的碳排放。
- 转向6%内部收益率组合可能会增加投资回收期，但由于屋顶太阳能和用电柔性措施，其在减少电网峰荷和碳排放方面的改进变得十分明显。
- 纽约州门店的所有方案在“电网峰荷”指标上都获得了“模范”分数。但由于纽约州电网预计到2040年将接近脱碳（80%），我们没有看到“碳排放贡献度”分数有很大的提高。

总结

GEB策略使零售商能够以具有高成本效益的方式改进传统的能效和建筑运营管理，从而实现可持续发展目标。本次分析表明，GEB措施可以大大减少整个零售建筑集群的能源成本和碳排放，并带来丰厚的回报。通过挖掘电网交互式节能建筑的潜力，被分析的零售商可以继续引领零售领域并创造一个推动内部脱碳目标实现的环境。随着碳减排变得日益重要以及零售业领导者重视可持续发展理念，GEB战略将以具有高成本效益的方式使零售业对其建筑作出具有前瞻性的投资。

参考文献

- 1 “IRR”, Investopedia, 访问日期: 2021年10月5日, <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>.
- 2 2019年全球建筑和施工现状报告: 迈向零排放、环保和柔性的建筑与施工部门, 国际能源署和联合国环境规划署, 全球建筑和施工联盟, <https://www.unep.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector>.
- 3 Andrew Satchwell, Mary Ann Piette, et. al., 国家电网交互式节能建筑发展路线图, 美国能源部/建筑技术办公室, RMI, 2021年5月, <https://gebroadmap.lbl.gov/A National Roadmap for GEBs - Final.pdf>.
- 4 出处同前.
- 5 Cara Carmichael、James Mandel、Henry Richardson、Edie Taylor和Connor Usry, 用电柔性对碳排放的影响, RMI, 2021年, <https://rmi.org/insight/the-carbon-emissions-impact-of-demand-flexibility/>.
- 6 “排放与发电资源综合数据库 (eGRID), 2019年”, 美国环保署, 2021年, 可从美国环保署的eGRID网站获得: <https://www.epa.gov/egrid>.
- 7 气候和能源解决方案中心, 访问时间: 2021年7月, <https://www.c2es.org/document/greenhouse-gas-emissions-targets/>.
- 8 “AIM法案”, 美国环保署, 访问时间: 2021年10月, <https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction/aim-act>.
- 9 Logan Goldie-Scot, “储能系统成本: 不仅仅是电池”, 彭博社新能源财经, 2017年, <https://www.bnef.com/insights/16561?query=eyJxdWVyeSI6ImJlbmNobWFyayBudW1iZjZlIGZvcjBhIDFtdy8xbXdoIHByb2pY3QlLCJwYWdlIjoxLCJmaWx0ZXJzIjpb7Im9yZGVyIjpbImRhdGUixSwiZGF0ZXMiOls1XX19>.
- 10 “美国国家电力投资组合标准”, 气候与能源解决方案中心, 2021年, <https://www.c2es.org/document/renewable-and-alternate-energy-portfolio-standards/>.
- 11 “关于97号地方法规的一切”, 城市绿色委员会, 2020年, <https://www.urbangreencouncil.org/content/projects/all-about-local-law-97>.
- 12 “逐步淘汰第二类臭氧消耗物质”, 美国环保署, 访问时间: 2021年8月, <https://www.epa.gov/ods-phaseout/phaseout-class-ii-ozone-depleting-substances>.
- 13 评估建筑-电网一体化的新指标, New Buildings Institute, 2020年, <https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2020/11/NewMetricsForEvaluatingBuildingGridIntegration.pdf>.
- 14 出处同前.
- 15 Cara Carmichael、James Mandel、Henry Richardson、Edie Taylor和Connor Usry, 用电柔性对碳排放的影响, RMI, 2021年, <https://rmi.org/insight/the-carbon-emissions-impact-of-demand-flexibility/>.

Cara Carmichael、Philip Keuhn、Sheldon Mendonca和Connor Usry, 具有高成本效益的电网交互式节能建筑: 美国零售建筑改造项目的脱碳潜力, RMI, 2022年, <https://rmi.org/insight/decarbonization-potential-for-a-US-retail-portfolio>.

落基山研究所 (RMI) 重视合作, 希望通过分享知识和洞察加速能源转型。因此, 我们允许相关方通过知识共享许可协议CC BY-SA 4.0参考、共享和引用我们的著作。

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2024年4月, 落基山研究所版权所有。

Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。