



专题报告

# 苏州市虚拟电厂常态化运行方案： 空调和电动汽车

电力圆桌项目课题组

2024年12月

## 电力圆桌项目

电力圆桌（全称电力可持续发展高级圆桌会议）项目于 2015 年 9 月启动，旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略，邀请业内专家和各利益方参与，共同探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。通过建立一个广泛听取各方意见的平台机制，电力圆桌将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到平台讨论，选出核心问题委托智库开展高质量研究，并将研究成果和政策建议提交到平台征求意见，从而支持相关政策的制定和落地，推动中国电力行业的改革和可持续发展，提高电力行业节能减排、应对气候变化的能力。

## 项目课题组



苏州中咨成立于1994年，是中国国际工程咨询公司的控股子公司，是长三角地区重要的综合性咨询机构之一，是国际咨询工程师联合会和中国工程咨询协会会员单位。公司主要面向政府、企业、金融机构等服务对象，提供专业的投资策划、规划咨询、政策研究、评估咨询、管理咨询、全过程咨询等现代咨询服务。已累计承担 5000 多项各类咨询业务，服务区域从长三角拓展到全国绝大多数地区，同时积极响应“一带一路”倡议，咨询服务涉足加拿大、澳大利亚、非洲、东南等海外国家和地区。公司参与过的重要项目包括长三角地区一体化发展重大项目推进体系研究（国家）、哈萨克斯坦札纳塔斯风电项目后评价、江苏电力控煤研究、苏州工业园区近零碳园区建设发展路径研究、长三角虚拟电厂发展现状研究等。

感谢自然资源保护协会专家为本报告提供的宝贵建议。

Cover Image @Freepik

所使用的方正字体由方正电子免费公益授权

# 苏州市虚拟电厂常态化运行方案： 空调和电动汽车

**Mainstreaming Virtual Power Plant Operations  
for Air Conditioners and Electric Vehicles in Suzhou**

2024年12月

# 目 录

执行摘要 .....	1
1. 研究背景及现状分析 .....	4
1.1 研究背景 .....	4
1.2 虚拟电厂发展现状 .....	6
2. 苏州虚拟电厂发展基础 .....	8
2.1 苏州概况 .....	8
2.2 潜力分析 .....	10
2.3 苏州虚拟电厂实践 .....	21
3. 空调领域常态化运行研究 .....	26
3.1 发展优势 .....	26
3.2 发展瓶颈 .....	27
3.3 发展思路 .....	29
3.4 发展路径 .....	30
4. 电车领域常态化运行研究 .....	41
4.1 发展优势 .....	41
4.2 发展瓶颈 .....	42
4.3 发展思路 .....	44
4.4 发展路径 .....	44

5. 建议 .....	52
5.1 推动虚拟电厂参与现货和辅助服务市场.....	52
5.2 加快完善配套价格机制和市场交易机制.....	53
5.3 加强虚拟电厂与地方能源专项规划协调.....	54
5.4 建立市区协同的虚拟电厂监管决策机制.....	54
5.5 推动产学研融合和关键标准规范制定 .....	55
5.6 引导空调和充电基础设施智能化改造 .....	55
参考文献.....	56

# 执行摘要

双碳背景下，我国能源绿色低碳转型加速推进，电力来源清洁化和终端能源消费电气化的趋势明显，对电网平衡带来较大挑战。苏州作为“最强地级市”和首批入选碳达峰试点的城市，兼顾高速增长的用能需求和能源低碳转型目标，亟需构建现代电网体系和智慧用能体系，通过市场化手段，挖掘建筑、交通等重点用能领域的灵活性资源，培育新的产业体系，推动地区经济社会的高质量发展。虚拟电厂是兼具经济性和灵活性的选项之一。

随着城镇化和电气化水平提升、极端天气频发，空调已成为冬夏季城市用电负荷攀升的主要贡献因素，而伴随电动汽车保有量上升和高压大功率快充桩的推广应用，电动汽车充电负荷快速增长，特别是用电高峰期间的大规模无序充电则更进一步加剧了电网的供需矛盾。与此同时，空调具有能耗占比高、短时储能特性，电动汽车亦可作为高度灵活的移动储能单元，充分挖掘这两类需求侧资源的灵活性调节潜力，推动面向这些资源的虚拟电厂实现常态化运行，对于维护电网供需平衡、确保电力低碳保供具有重要意义。

苏州城市化程度较高，2001年-2022年间苏州市累计建成商业建筑面积4621.2万平方米，预计到2025年进一步增至4968.9万平方米，研究发现，2022年苏州市仅办公和商业广场两类商业建筑得可调控潜力规模就可达到15.4万千瓦，2025年将增至16.7万千瓦，增幅达8.4%。然而，受制于政策、市场和技术等多方面的制约因素，现阶段空调资源主体参与意愿不强，各试点项目也尚未实现常态化运行，可持续发展能力有待进一步增强。具体原因包括，技术方面，由于工商业和居民空调的负荷特性和运行模式存在显著差异，现阶段虚拟电厂对空调资源的预测精度还相对有限，加之缺少对应的灵活响应策

略，以及用户侧数字化基础薄弱等原因，虚拟电厂实际响应能力还无法满足电网随调随用的期望；在政策监管方面，一是尚未形成统一的功能定位，不利于虚拟电厂明确发展方向，优化资源配置；二是相关标准规范和管理机制的缺失，也不利于虚拟电厂的规范管理；在市场约束方面，主要体现为市场空间无法支撑产业发展，价格机制尚无法激活市场主体参与意愿，交易结算和计量考核模式有待完善。

基于上述现状和发展约束，课题组提出苏州空调领域虚拟电厂发展路径：一是加大对各类资源潜力的摸排，基于负荷特征分析，建立不同时间段内各类空调可调节潜力的评估模型，并形成常态工作机制，根据市场环境变化及时优化评估模型。二是充分考虑不同类型空调资源的调控特性和响应速度，以及终端智能设备、用户舒适度等多重因素，制定适宜的调控目标和策略。三是推动建筑空调智能化改造，打造楼宇数字底座。四是提高虚拟电厂的设备运维、客户关系和风险管理水平。五是提升虚拟电厂电力市场交易能力，探索多元商业模式和增值服务。

近年来苏州电动汽车保有量快速发展，截至 2022 年底苏州市电动汽车保有量达到 23.42 万辆，充电桩数量达到 11.88 万个；预计到 2025 年，苏州市电动汽车保有量将增至 38 万辆，充电桩数量达到 20 万个。研究发现，2022 年苏州市电动汽车领域可调控潜力规模达到 4.1 万千瓦，2025 年将增至 7.8 万千瓦，增幅达 90.2%。现阶段多个车企桩企均在苏州有所布局，但受制于技术和市场等因素，尚未形成规模化和常态化运行。具体来看，在技术约束方面，包括电动汽车的充电行为预测精度不足，充电基础设施薄弱，电池技术亟需提升；在政策监管方面，包括协同规划机制尚不健全，以及对于车网互动这一新业态的管理机制尚未明确；在市场约束方面，包括市场交易频次偏低，分时电价激励不足，交易计量和结算堵点，市场和车主间缺少有效价值传导机制等。

基于上述现状和发展约束，课题组提出苏州电动汽车领域虚拟电厂发展路径：一是开展区域勘察，针对电车充电的随机性特点，建立电车在不同时间尺度下参与电网响应的充放电潜力评估模型。二是优化虚拟电厂资源调用模式和响应策略，完善车网联动机制。三是推动车网互动核心技术攻关及充换电设施智能化升级。四是提高充换电设备运维、客户关系维护和风险管理水平。五是探索虚拟电厂 - 交通数字化融合的商业模式和多元化收益渠道。

本课题还对于两类资源实现常态化运行所面临的共性问题提出政策和机制建议：（1）对于交易规模和价格激励有限的市场制约因素，建议持续推动虚拟电厂参与现货和辅助服务市场，并进一步完善动态分时电价机制，丰富交易品种；（2）对于虚拟电厂功能定位不明确和管理相对分散的政策制约因素，建议加强基础研究工作，明确虚拟电厂在能源规划和布局中的发展定位，探索与苏州能源规划、双碳规划、电力规划的统筹衔接；同时进一步完善工作机制，成立虚拟电厂管理机构；（3）对于虚拟电厂提升响应能力相关的关键技术创新、标准规范制定和基础设施改造等重点环节，建议政府出台相关政策，给予一定的扶持。

# 研究背景及 现状分析

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 常态化运行的概念及内涵

#### 1.1.1.1 基本概念

随着新能源产业的快速发展和能源数智化转型的推进，虚拟电厂作为一种创新的能源管理模式，逐渐受到市场主体的关注。尤其是碳达峰、碳中和目标的提出，为虚拟电厂的发展提供了广阔的空间，而物联网、大数据等技术的不断进步也为虚拟电厂的运行提供了强大的技术支撑。

虚拟电厂常态化运行是指虚拟电厂运营商通过技术创新和高效管理，提升终端资源的响应能力，满足电网调控的技术要求，并在较为完善的政策市场环境下，探索新兴商业模式，实现项目稳定的参与交易频次和可持续的盈利能力。

当前国内虚拟电厂正处于蓬勃发展的阶段，各地虚拟电厂示范项目陆续投入运行，显示出行业的活力和潜力。然而，受限于政策机制、技术创新、商业模式等因素，国内虚拟电厂聚合的相当规模负荷资源尚未实现常态化利用，在资源开发、投资回收、安全保供等方面都不利于虚拟电厂的规模化发展。

### 1.1.1.2 影响因素

在电改持续深化过程中，虚拟电厂能否实现与常规电源同台竞争，获取更多的市场交易机会，一方面需要建立完善的政策机制和市场环境，另一方面取决于其内在常态化运营能力，包括技术层面的响应能力、组织管理能力以及经济层面盈利能力的协同。

表 1-1 虚拟电厂常态化运行内在影响因素

关键能力	影响因素	原因
响应能力	资源潜力	资源潜力是各类资源在不同时间尺度下的可调节规模、速度和可靠性，直接关系到虚拟电厂的资源配置、资源利用方式和投资效益。
	智能终端	设备智能化水平的提升，使得虚拟电厂能够更快速、更准确地采集、分析和处理数据，从而做出及时有效的响应。
	响应策略	调控方式决定了虚拟电厂如何有效地管理和协调其内部资源，发挥资源潜力以满足电力系统的需求变化和电网调度要求。一个灵活、高效且精准的调控方式能够显著提升虚拟电厂的响应能力，使其能够更快地适应市场变化，提供更优质的服务。
管理能力	客户关系	虚拟电厂的运行效果依赖于与客户的紧密互动和高效协调，良好的客户关系能够帮助虚拟电厂精准地了解客户的需求和痛点，针对性地改进运营流程和服务质量，提升客户满意度，用以吸引更多的客户参与，提升品牌影响力和市场竞争力。
	设备运维	通过定期设备运维，运维人员可以了解设备的运行状态，进而调整设备的工作参数，使其运行在最佳状态，提升虚拟电厂可靠性。
	风险管理	建立综合的风险管理体系，将交易、技术、管理等风险纳入统一管理框架，实现风险的有效识别和应对，有助于提高虚拟电厂抗风险能力，降低运行成本。
盈利能力	商业模式	包括具体的服务内容以及与用户间的收益分配，是确保虚拟电厂长期盈利与可持续发展的关键因素。

### 1.1.2 研究思路

当前空调作为温控负荷，已成为导致冬夏季城市电力负荷峰谷差值变化的主要原因之一，而伴随电动汽车保有量上升，电动汽车大规模无序充电，进一步加剧了电网的供需矛

盾。与此同时，空调具有能耗占比高、短时储能特性，电动汽车亦可作为高度灵活的移动储能单元，通过智能充电、需求侧响应等手段挖掘空调、电动汽车类需求侧灵活性资源潜力，推动面向该类资源的虚拟电厂实现常态化运行，对于维护电网供需平衡、确保电力稳定供应具有重要意义。

本课题旨在研究苏州市面向空调和电动汽车两类重要需求侧灵活性资源的虚拟电厂常态化运行方案，通过文献研究、定量分析、专家咨询等方式，分析苏州市虚拟电厂在空调和电动汽车两个领域的发展现状、梳理制约发展的关键问题、提出发展目标和重点任务，为支撑地方能源转型，挖掘需求侧在保供和消纳方面的潜力提供参考。

## 1.2 虚拟电厂发展现状

全球能源绿色低碳和可持续发展趋势下，虚拟电厂作为新兴主体，其全球市场规模呈现出快速增长的态势。根据 Fortune Business Insights 数据，2023 年全球虚拟电厂市场规模为 14.2 亿美元，预计到 2032 年将增至 239.8 亿美元，年均增幅 37.70%<sup>[3]</sup>。从细分市场来看，2023 年，欧洲在全球虚拟电厂市场占据主导地位，份额为 41.54%，而在亚太地区，受益于中日韩等国在智慧能源管理方面的大规模投资，预计未来几年虚拟电厂市场规模也将以显著的速度增长。

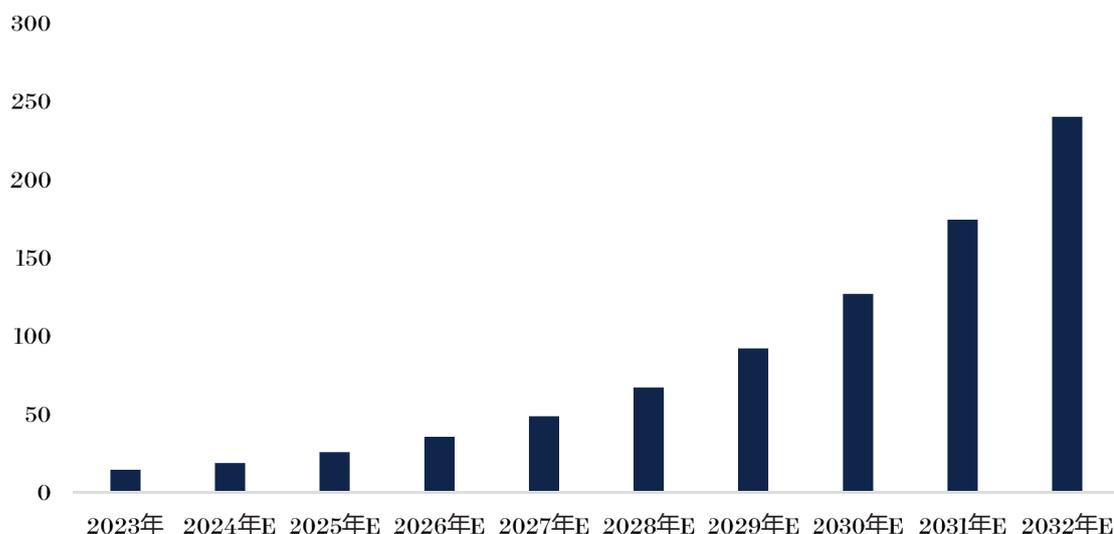


图 1-1 2023-2032 年全球虚拟电厂装机累计规模预测情况 (GW)

国内的虚拟电厂实践起步于 2016 年，江苏、广东、冀北等地积极开展了示范项目的建设，截至目前国内虚拟电厂项目累计装机容量约为 3.7GW<sup>[4]</sup>。从资源类型来看，国内虚拟电厂以负荷侧资源调节为主，聚合类型较少。同时，各地虚拟电厂也在深入探索商业化运行模式，包括为电网公司提供辅助服务、参与电力市场交易等。随着新型电力系统建设的推进，预计虚拟电厂的装机容量将持续增长。

表 1-2 国内典型虚拟电厂

项目类型	项目名称	建设效果
空调领域虚拟电厂	嘉兴平湖虚拟电厂	项目涵盖商业综合体、行政机关、酒店以及商业写字楼等四类 16 家空调用户，累计运行容量 23.1 兆瓦 <sup>[5]</sup> 。通过三个“一键生成”的调控机制，可实现公共建筑柔性调控能力 2.2 兆瓦，节能能力 0.6 兆瓦，用以参与浙江省电力需求响应和辅助服务市场交易。
	美的 iBUILDING 虚拟电厂运行管理平台	项目接入的多联机制冷额定功率达 143.1 兆瓦，通过开发的一套兼顾响应负荷预测、控制及末端用户舒适度的算法控制架构，在实际调控中，对 7.7 兆瓦的运行功率平均压降负荷 20.6% <sup>[6]</sup> 。
电车领域虚拟电厂	蔚来规模化车网互动虚拟电厂	项目通过电源协调管理系统，聚合和协调优化分布式充电桩、换电站等资源，参与电力市场和电网运行，提高电网稳定性和调节效能，并为电网和用户灵活的服务与效益。2022 年，蔚来累计组织换电站 123 座，家充电桩超过 8000 根为全国 10 个省市的电网提供需求响应以及调峰服务，总调峰容量约 16 万千瓦，总调峰电量接近 450 万千瓦时 <sup>[7]</sup> 。
	特来电虚拟电厂	项目以“充电网、微电网、储能网”为载体构建的虚拟电厂平台，通过聚合电动汽车有序充电、光伏微网、移动储能、梯次储能等资源，能够实现调频调峰、需求侧响应、聚合售电、绿电消纳和碳交易等功能 <sup>[8]</sup> 。

# 2 苏州虚拟电厂 发展基础

## 2.1 苏州概况

### 2.1.1 电力供需

作为区域经济中心和大受端电网，苏州各类建筑用电和充换电需求逐渐成为电力消费水平持续提升的重要驱动因素。近五年来，苏州市最高用电负荷呈现快速增长的态势，年均增速约 7.59%，峰谷差增长趋势明显。2022 年苏州市最高用电负荷达到 2877 万千瓦<sup>[10]</sup>。截至 2022 年，苏州市发电总装机容量合计 2573 万千瓦。此外，为保障快速增长的电力需求，苏州加快引进区外来电，到 2025 年苏州规划区外受入的电力为 2500 万千瓦，区外来电占全社会用电量比重达到 34.2%。

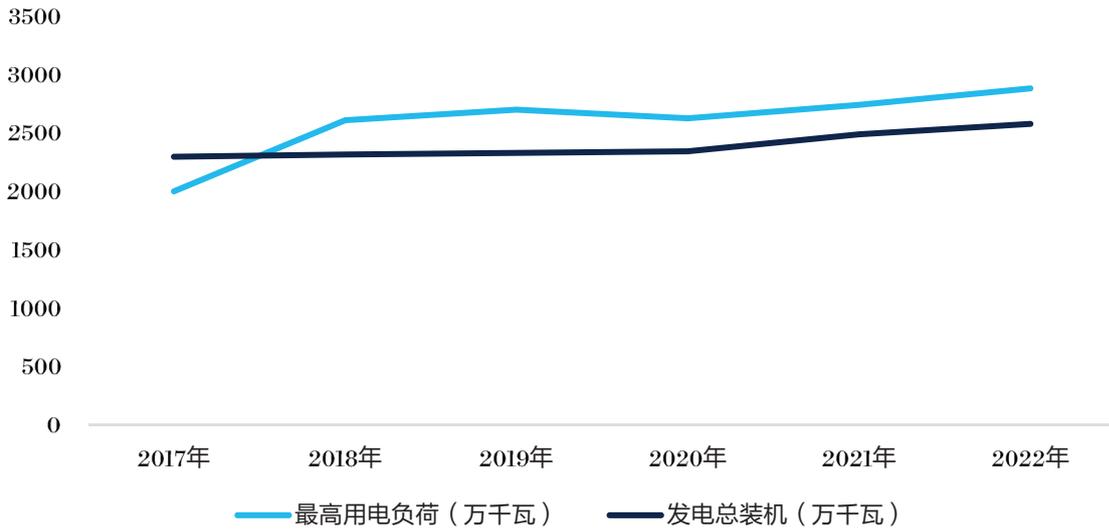


图 2-1 2017-2022 年苏州市最高用电负荷及发电装机容量情况

### 2.1.2 电力市场机制

根据技术实现与管理难度不同，虚拟电厂相关市场规则通常先由需求响应或控制要求较低的调峰辅助服务市场起步，具备实时控制能力时引入电力现货市场，具备秒级精确控制能力时可参与调频、备用等辅助服务市场。现阶段，江苏省内虚拟电厂仍以单边的形式组织，以参与省级需求响应、辅助服务等交易品种为主，未来可探索双边协商、双边集中竞价、挂牌交易等交易形式，拓展可常态化参与的现货市场和区域级的交易品种。

表 2-1 江苏虚拟电厂参与电力市场的交易品种

市场	交易品种	交易范围	交易组织形式	交易价格
需求响应	削峰	省内	单边报量报价边 际出清	削峰：最高限价 15 元 / 千瓦 填谷：0.6 元 / 千瓦时
	填谷			
辅助服务	调峰	省内、 区域	单边报量报价边 际出清	中长期：削峰报价上限为 3000 元 / 兆瓦时 短期：1000 元 / 兆瓦时（需求时段大于或 等于 4 小时）、2000 元 / 兆瓦时（需求时 段小于 4 小时）
	调频			

## 2.2 潜力分析

### 2.2.1 研究方法

灵活性资源可调节潜力评估作为虚拟电厂项目的核心内容，对于项目实施过程中涉及各个利益主体均有重要意义。对于电力用户，可调节潜力评估可以让用户更加了解自身的用电弹性。对于虚拟电厂，其可根据评估结果并结合自身风险偏好优化市场投标策略，降低市场交易的决策风险，同时也可依据评估结果优化对用户的激励策略。对于电网调度，可调节潜力的准确评估是调度中心制定科学合理调度计划的数据支撑，对充分发挥削峰填谷、消纳新能源、降低系统运行成本等方面的作用来说至关重要。对于政府，可调节潜力评估结果是政府主管部门科学合理地制定电价和激励政策的重要依据，对推进虚拟电厂项目实施、挖掘资源可调节潜力非常重要。本报告将建立可调节潜力估算方法学，分析苏州市空调和电动汽车资源的可调节潜力。

按照类型划分，可调节潜力受到区域边界条件的制约，具体可分为理论、技术和市场（实际可用）三个维度的响应潜力，从容量大小来看，理论潜力  $\geq$  技术潜力  $\geq$  实际可用潜力。

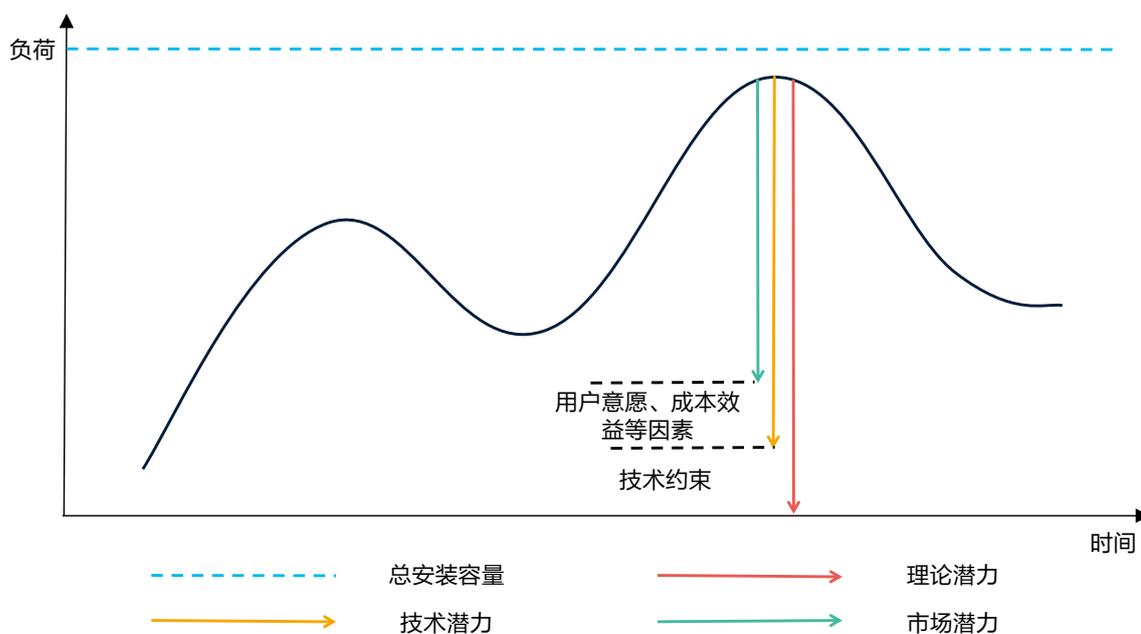


图 2-2 不同类型负荷侧灵活性潜力示意图

**理论潜力：**理论潜力是指负荷理论上可参与需求响应的最大响应容量，即当前负荷值（基线负荷）与理论极限响应点的差值。如图所示，对于空调等负荷侧资源来说，当其参与需求响应进行削峰时，理论上可通过关闭所有用电设备将负荷削减至 0，即理论下调潜力为基线负荷大小；当负荷参与需求响应进行填谷时，理论上可将所有用电设备全部开启，即理论上调潜力为总安装容量与基线负荷之差。理论需求响应潜力的评估结果较为粗糙，通常可用于判断负荷是否适合参与需求响应，进而确定需求响应的实施对象。

**技术潜力：**技术潜力是在理论潜力的基础上考虑技术约束（如可控负荷转移时间、荷电状态约束等）后的需求响应潜力。相较理论潜力，技术潜力的评估适用性更强，可在辅助确定需求响应实施对象的基础上为需求响应实施方案的制定提供重要参考。

**实际可用潜力：**实际可用潜力是在技术潜力的基础上，进一步考虑实际建设阶段所需的前期投资与运行成本约束、用户价格敏感度等多种复杂因素后实际可获得的潜力大小。对于经济不敏感的用户，即便参与响应具有可行性和经济性，也可能选择不参与或不完全参与，其实际激发出来的潜力小于技术潜力。

相较理论潜力，实际可用潜力需要考虑的约束因素更加复杂，需要依靠项目实践过程中具体应用场景的探索作为数据支撑，故本节潜力分析重点基于技术层面的潜力分析。

综上，空调和电车领域响应资源潜力分析的过程主要分为两个阶段：

①**计算行业理论潜力：**一是根据行业负荷特性计算其最大可调节潜力；二是在此基础上，分析行业与电网高峰负荷的关系，从而得到行业理论可调节潜力。

$$\Delta P_{f,T/n} = \max \Delta P_{f,n} * \beta_{n,h} = (P_{\max,n} - P_{\min,n}) * \beta_{n,h} \quad \text{公式 (2-1)}$$

式中： $P_{f,T/n}$  为区域 n 行业运行层面理论可调节负荷，kW；

$\max P_{f,n}$  为区域 n 行业最大可调节能力，kW；

$\beta_{n,h}$  为行业负荷与地区电网高峰负荷的相关性，%。

$P_{\max,n}$  为区域 n 行业最大负荷，kW；

$P_{\min,n}$  为区域 n 行业的最小负荷，kW

公式中行业最大负荷和最小负荷之差，可称之为行业最大可调节能力，其大小由行业负荷特性决定。

②**计算行业技术潜力**：在理论潜力的基础上考虑实际响应过程中的技术约束，从而得到行业技术可调节潜力。

$$\Delta P_{f,S/n} = \gamma_{n,h} * P_{f,T/n} \quad \text{公式 ( 2-2 )}$$

式中： $P_{f,S/n}$  为区域 n 行业负荷的技术可调节能力，kW；

$P_{f,T/n}$  为区域 n 行业负荷的理论可调节能力，kW；

$\gamma_{n,h}$  为行业负荷的实际可调节比例，%。

### 2.2.2 商业空调领域

#### (1) 负荷特性

按照行业类型区分，公共建筑可以分为很多种类型，包括商业广场、办公建筑、学校、康体中心等。考虑到公共建筑服务对象的特殊性及其社会价值，本节研究主要选取办公建筑和商业广场作为研究对象。

表 2-2 三类主要建筑负荷特性

建筑类型	典型用户	用户行为特征
公共建筑	医院、学校等	用户用电可靠性要求等级较高，用电高峰较为集中，多为白天，学校多为工作日；其中，医院对电力的可靠性最高
商业建筑	办公、商场等	用户用电量较大，用电高峰较为集中，多为白天，具有较大的节约电力资源潜力
居民建筑	居民用电	用户用电量较大，增长快，负荷变化大，通常形成一到两个负荷高峰

#### ①办公建筑

通过负荷特性曲线分析，办公建筑空调系统一般在 7:30 左右就开启制冷，目的是为了加速制冷，在 9:00 左右达到全日空调负荷最大值，在至 12:00 的时段内一直保持稳定发展趋势；随后，至 18:00 左右，负荷保持稳定下降，此时办公建筑的员工逐渐下班。

从 18:00 开始，负荷曲线明显下降，稳步减少，至 22:00，空调系统负荷非常低，满足少部分的制冷需求。

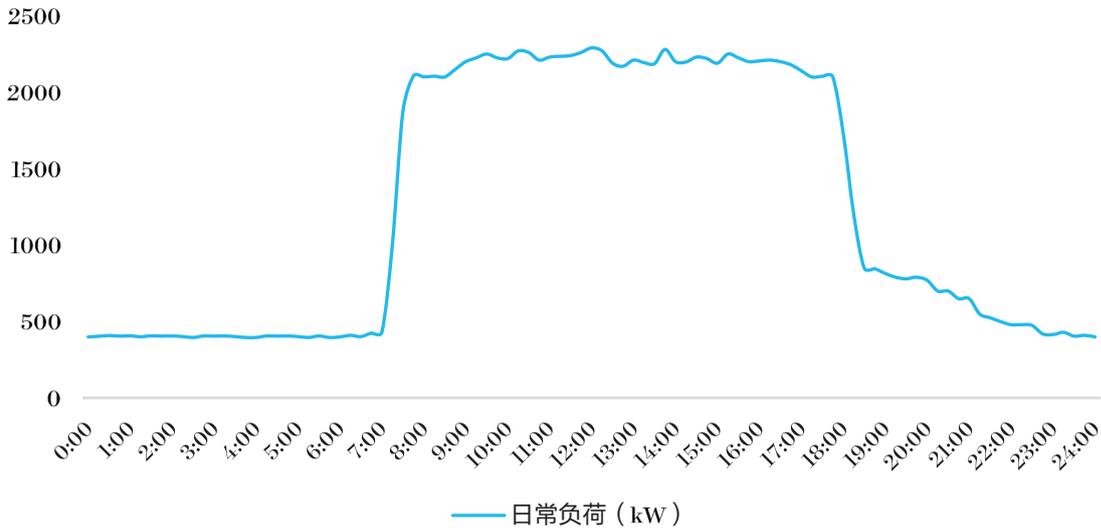


图 2-3 苏州办公建筑典型负荷曲线

### ②商业广场

商业广场的负荷特性变化规律主要受到营业时间和外部气温和光照等环境的影响。商业广场一般从每天 8:00 到 22:00 营业，负荷在 9:00 至 18:00 间显著增加。



图 2-4 苏州商业广场典型负荷曲线

## (2) 潜力分析

### ① 空调负荷

2001年-2022年间，苏州市累计建成商业建筑面积4621.2万平方米。其中办公建筑建成面积达1017.4万平方米；商业广场建成面积达3603.8万平方米<sup>[10]</sup>。从年度建成面积来看，2013-2022年间苏州市办公和商业广场的年均增长率分别为8.7%和4.9%。考虑到苏州城市化开发程度较高、房地产市场仍面临较大的调整压力等因素影响，2025年前苏州上述两类商业建筑的投产面积保守按照4%和2%的年均增速计算，预计到2025年，苏州市上述两类建筑的建筑面积将达到4968.9万平方米，其中办公建筑1144.5平方米、商业广场3824.4平方米。

表 2-3 2022 年及 2025 年苏州市商业建筑面积

建筑类型	2022 年建筑面积 (万平方米)	2025 年建筑面积 (万平方米)
办公建筑	1017.4	1144.5
商业广场	3603.8	3824.4
合计	4621.2	4968.9

根据公式：

$$P_{\max,n} = \frac{E_n}{N_h} = \frac{M_n * S_n * R_n}{N_h} \quad \text{公式 (2-3)}$$

式中： $P_{\max,n}$ 为制冷季商业建筑领域n类建筑的最大制冷负荷，kW；

$E_n$ 为制冷季商业建筑领域n类建筑的月用电量，kW；

$N_h$ 为制冷季商业建筑领域n类建筑月运行小时数，h；

$M_n$ 为商业建筑领域n类建筑的建筑面积， $m^2$ ；

$S_n$ 为制冷季商业建筑领域n类建筑的月用电强度， $kW \cdot h/m^2$ ；

$R_n$ 为制冷季商业建筑领域n类建筑的制冷季空调用电占比。

式中的 $S_n$ 和 $R_n$ 由于缺乏相关数据，参考毗邻城市上海市同类型建筑的用电强度，其中办公建筑和商场广场中空调负荷的占比分别为 33.9% 和 30.0%<sup>[11]</sup>。

表 2-4 2022 年上海市商业建筑制冷季用电强度 (kWh/m<sup>2</sup>)

建筑类型	6月	7月	8月	均值
办公建筑	6.6	9.4	10.1	8.7
商业广场	9.9	13.9	14.8	12.9

根据上述两类建筑中典型建筑的负荷特性分析，这两类建筑空调每月的运行时间约为办公建筑 200 小时、商场广场 360 小时。按照公式 (2-3)，2022 年苏州商业建筑在制冷季的平均用电负荷为 53.5 万千瓦，其中办公和商业建筑在制冷季的平均用电负荷分别为 15.0 万千瓦、38.5 万千瓦。到 2025 年，苏州商业建筑的制冷负荷预计将增至 57.7 万千瓦，其中两类建筑的制冷负荷分别为 16.9 万千瓦和 40.8 万千瓦。

表 2-5 苏州市公共建筑制冷季用电负荷情况 (万千瓦)

年度	建筑类型	6月	7月	8月	均值
2022 年	办公建筑	11.4	16.2	17.4	15.0
	商业建筑	29.5	41.5	44.1	38.5
2025 年	办公建筑	12.8	18.2	19.6	16.9
	商业建筑	31.3	44.0	46.9	40.8

## ② 理论潜力

结合前述对公共建筑空调负荷特性的分析，其季节性特征明显。2023 年夏季尖峰时段分为日尖峰时段 (14:00—15:00) 和晚尖峰时段 (19:30—21:30)，其中空调负荷与日尖峰负荷强相关。依据德尔菲法对该时段两类建筑空调的负荷同时率 $\beta_{n,h}$ 分别赋值为 0.95 和 0.9。根据赋值结果，计算电网夏季日尖峰时段商业建筑空调负荷最大可调节潜力为 48.9 万千瓦，到 2025 年将增至 52.8 万千瓦。

表 2-6 苏州商业建筑空调最大可调节潜力

年度	建筑类型	空调负荷(万千瓦)	$\beta_{n, h}$	最大可调节潜力(万千瓦)	合计(万千瓦)
2022 年	办公建筑	15.0	0.95	14.3	48.9
	商业建筑	38.5	0.9	34.6	
2025 年	办公建筑	16.9	0.95	16.0	52.8
	商业建筑	40.8	0.9	36.8	

### ③ 技术潜力

在响应调节过程中，空调负荷的可调节能力需要进一步考虑用户的热舒适度，在一定的温度范围内来通过适当的调控策略，降低空调的整体负荷。空调负荷调控策略涵盖多种方法，各自具备不同的调节能力。除中断运行和关闭新风机组两类刚性调控方式，可实现 100% 的调控范围外，通过设定温度、减少冷源、预制冷等柔性调控方式，其综合可调节范围为 5%-65%。

鉴于此，本课题以苏州某办公建筑和商业广场的实际调控案例作为参考，其在夏季 38℃ 高温天气下，综合使用限制空调主机负荷、提高冷冻水温等调控方式，对办公和商业建筑的空调负荷可调节比例分别达到 34.0% 和 30.6%。据此计算，得到 2022 年苏州市办公和商业广场两类商业建筑在技术层面的可调控潜力分别为 4.8 万千瓦、10.6 万千瓦，共计潜力规模达到 15.4 万千瓦，到 2025 年增至 16.7 万千瓦。

表 2-7 苏州公共建筑空调负荷实际可调节潜力

年度	建筑类型	最大可调节潜力(万千瓦)	可调比例(%)	实际可调节潜力(万千瓦)	合计(万千瓦)
2022 年	办公建筑	14.3	34.00%	4.8	15.4
	商业建筑	34.6	30.60%	10.6	
2025 年	办公建筑	16.0	34.00%	5.5	16.7
	商业建筑	36.8	30.60%	11.2	

### 2.2.3 电动汽车领域

#### (1) 负荷特性

分类来看，各类电动汽车充电行为存在一定差异性。其中私家车以晚间充电为主，出租车、公交车等长距离使用的营运车辆的充电行为相近，有白天和晚间两个充电高峰，充电时间也近似。

表 2-8 苏州三类主要电动汽车充电行为特性

用户类型		充电行为特性
私家车		私家车主要用于上下班，大部分时间处于闲置状态。私家车开始充电时间更多的是集中在下班高峰期，约在 18:00 达到高峰，且晚上充电频率显著高于中午。
运营车辆	出租车	出租车（包括网约车）同属运营类车辆。开始充电时间主要集中在中午 12:00 ~ 15:00，晚上 22:00 ~ 1:00，接近凌晨的充电频率略高于中午的充电频率。
	公交车	公交车出行规律较为固定。开始充电时间有两个峰值，分别为中午 12:00 附近和晚上 23:00 附近，且在 23:00 附近会达到一天中的最大峰值。

#### (2) 潜力分析

##### ① 充电负荷

近年来苏州电动汽车保有量快速发展，截至 2022 年底苏州市机动车保有量达 507.3 万辆，其中电动汽车保有量达到 23.42 万辆<sup>[12]</sup>。随着电动汽车渗透率的增加，预计至 2025 年，苏州市电动汽车保有量约 38 万辆，电动化率约为 7.2%，其中电动私家车保有量约 31 万辆<sup>[13]</sup>。

表 2-9 2022 年苏州市新能源汽车保有量及 2025 年预测数量

2022 年新能源汽车保有量 (万辆)	2025 年新能源汽车保有量预测 (万辆)	
23.42	私家车	31.0
	专用车	6.1
	其他电动车	0.8
	合计	37.9

截至 2022 年底，苏州共计拥有各类充电桩数量达到 11.88 万个，其中私人充电桩 10.01 万个，公共充电桩 1.87 万个。预计至 2025 年，苏州市需累计建成充电桩 20 万个，其中私人充电桩不少于 15.5 万个，公用充电桩约 4.5 万个<sup>[13]</sup>。根据使用场景的不同，电动汽车充电桩功率也有所不同，其中私人充电桩以慢充为主，功率范围通常在 3kW 到 22kW 之间；公用充电桩则以快充为主，功率范围通常在 30kW 到 150kW 之间。以国网为例，其公共充电桩主要提供 7KW 的慢充和 30KW 的快充服务。鉴于此，私人桩和公用桩的单桩功率分别保守按照 7kW 和 30kW 测算，苏州私人桩接入容量约为 70.1 万千瓦，公用桩接入容量约为 56.1 万千瓦，合计容量 126.2 万千瓦。预计到 2025 年，苏州私人桩接入容量约为 108.5 万千瓦，公用桩接入容量约为 135.0 万千瓦，合计容量 243.5 万千瓦。

表 2-10 苏州市车用充电桩用电需求测算

年度	充电设施类型	数量 (万个)	单位功率 (kW)	用电容量 (万 kW)	合计
2022 年	私人桩	10.01	7.00	70.07	126.17
	公共及专用	1.87	30.00	56.10	
2025 年	私人桩	15.5	7.0	108.5	243.5
	公共及专用	4.5	30.0	135	

## ② 理论潜力

整体来看，苏州市电动汽车充换电负荷总体呈“日间高峰、晚间尖峰”特征。由于车载空调的使用及冬天电池损耗较大，冬夏季负荷曲线高于春秋季节，但总体趋势相同。以苏州冬季典型日为例，根据江苏省充电设施政府监管平台数据，苏州冬季负荷高峰期为16:00-24:00间，基本保持在10万千瓦以上，其中尖峰为晚间6点左右，是谷值（早间7点左右）的8.7倍。

此外，考虑到充电桩在各个时段的使用情况不同，课题组对苏州电网晚高峰时段下的充电设施的使用情况进行了调研，其中对于私人桩，普通电动汽车充一次电的续航里程通常在100至500公里之间，居民夜间平均约一周充电一次，主要集中在下班高峰期，因此晚高峰期间私人桩的同时使用的概率约为0.14；对于公用桩，运营车辆虽夜间平均每天充电一次，但主要集中在晚上22:00~1:00间，此外公桩使用率在不同地区也存在显著差异，在电动汽车普及率较高的市区，晚高峰期间公用充电桩的使用率较高，如苏州北站电竞馆充电桩场站在晚尖峰时段（19:30—21:30）的使用率在70%-85%，而在部分偏远地区使用率可能低至0%，参考2023年苏州市公用充电桩平均时间利用率约为12.3%<sup>[14]</sup>，因此晚高峰期间私人桩的同时使用的概率约为0.12。据此计算，晚尖峰期间苏州充电桩的用电负荷约为16.54万千瓦，其中私人桩9.8万千瓦，公用桩6.7万千瓦。到2025年，充电负荷预计将增至31.39万千瓦，其中私人桩15.2万千瓦，公用桩16.2万千瓦。

表 2-11 苏州市车用充电设施最大可调节能力

年度	充电设施类型	用电容量 (万千瓦)	同时系数	用电负荷 (万千瓦)	合计 (万千瓦)
2022年	私人桩	70.1	0.1-0.2	9.8	16.5
	公用桩	56.1	0-0.85	6.7	
2025年	私人桩	108.5	0.1-0.2	15.2	31.4
	公用桩	135.0	0-0.85	16.2	

### ③ 技术潜力

出于电池寿命的考虑，当前对于锂离子电池主要采用恒流恒压的充电模式，即当电池电压上升到恒流充电阈值（普遍设置电池容量 80%）后，充电系统会根据电池容量将充电电流不断降低，充电电压保持不变，此时充电速度会显著变慢。在技术潜力分析中，假设车主的期望电量为 80%，即电动汽车 SOC 达到 80% 后才能参与调控。根据省电动汽车公司前期调研数据，居民夜间平均充电时长为 8 小时，考虑到在实际应用中，为节省时间并确保安全，车主一般会选择在电量剩余 20% 左右时开始充电，以及电动汽车由 20% 电量慢充至 80% 的时间大约为 6 小时，因此 8 小时的充电时间内电动汽车有 25% 的时间可参与调控。据此计算，2022 年苏州充电负荷的可调节潜力为 4.1 万千瓦，其中私人桩 2.5 万千瓦，公用桩 1.7 万千瓦；到 2025 年苏州充电负荷的可调节潜力增至 7.8 万千瓦，其中私人桩 3.8 万千瓦，公用桩 4.1 万千瓦。

表 2-12 苏州市车用充电设施技术潜力

年度	充电设施类型	用电负荷 (万千瓦)	可调比例 (%)	技术潜力 (万千瓦)	合计 (万千瓦)
2022 年	私人桩	9.81	25%	2.5	4.1
	公用桩	6.73	25%	1.7	
2025 年	私人桩	15.19	25%	3.8	7.8
	公用桩	16.20	25%	4.1	

#### 2.2.4 潜力汇总

本次课题重点聚焦具备良好调节潜力的两类商业建筑和两类充电设施，基于各类用户的负荷特性分析、电网负荷同时率、可调节能力等因素，分析两类资源的可调节资源潜力。

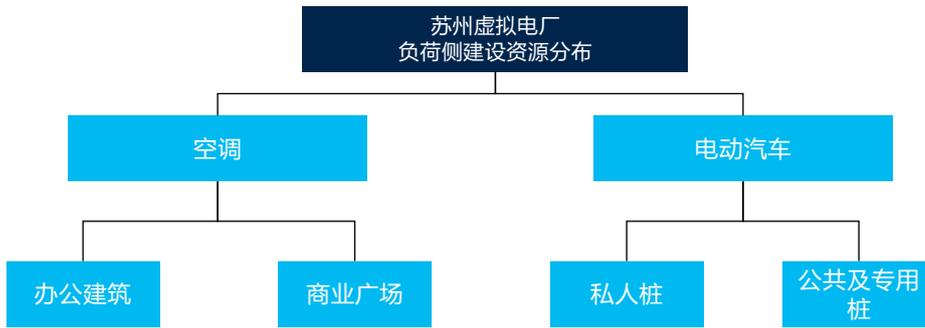


图 2-5 苏州虚拟电厂商业建筑空调和电动汽车的灵活性资源分布情况

经测算，综合各类型空调和电车负荷资源，考虑技术约束情况下，2022 年苏州商业空调和电动汽车可调节负荷资源共计 19.6 万千瓦。预计到 2025 年，两项数据将增至 24.6 万千瓦。

表 2-13 苏州市虚拟电厂建设资源情况

年度	资源类型	重点领域	理论潜力 (万千瓦)	技术潜力 (万千瓦)	合计 (万千瓦)
2022 年	空调	办公建筑	14.3	4.8	19.6
		商业建筑	34.6	10.6	
	电车	私人桩	9.8	2.5	
		公用桩	6.7	1.7	
2025 年	空调	办公建筑	16.0	5.5	24.6
		商业建筑	36.8	11.2	
	电车	私人桩	15.2	3.8	
		公用桩	16.2	4.1	

## 2.3 苏州虚拟电厂实践

在各地积极布局虚拟电厂的趋势下，现阶段苏州也在积极开展虚拟电厂项目的试点建设，在建设模式、资源类型、商业模式等维度开展不同方向的探索。在建设模式方面，既

有以苏州零碳智慧虚拟电厂为代表的地方供电公司和能源企业合建模式，也有以昆山市政府侧虚拟电厂为代表的地方政府主导建设模式，也有以协鑫虚拟电厂平台为主导的售电公司自发建设模式。在资源类型方面，既有聚合了燃机和光伏等分布式电源、储能，以及空调、充换电站和生产负荷的综合型虚拟电厂，也有偏重空调负荷等资源的负荷型虚拟电厂。在商业模式方面，部分项目可通过可调负荷参与辅助服务市场、现货市场、需求响应机制获取收益，而部分与配电网层面灵活互动的虚拟电厂项目还处于技术验证阶段，收益来源尚不清晰。

表 2-14 苏州虚拟电厂项目及建设效果

项目名称	建设效果
协鑫灵活资源交易聚合平台虚拟电厂	<p><b>建设内容：</b>该项目为市场化项目，由协鑫集团主导建设。项目聚合总容量 2510MW，实际可调节规模 160MW，包括 60MW 燃机和光伏等分布式电源、15MW 空调、20MWH 的储能、10MW 储水 / 储冷 / 储热，以及 30MW 充换电站负荷和 40MW 生产负荷。</p> <p><b>调控模式：</b>项目面向电车、空调等不同类型灵活资源，创新采用了主动替代类参与模式、空调集群参与模式、光储充一体模式、城市公用负荷参与模式四种调控范式。</p> <p><b>商业模式：</b>项目以需求响应和中长期、短期辅助服务为主，其中中长期辅助服务聚合用户 32 家，实现调节电量 228MWH；短期电力辅助服务累计完成填谷电量 14GMH。</p>
昆山市政府侧虚拟电厂	<p><b>建设内容：</b>项目由昆山市政府和国网（苏州）城市能源研究院等企业合建。昆山市政府侧虚拟电厂控制平台下属的调控系统包括用于中央空调、多联机空调和分体空调等各类型空调的智能终端设备。</p> <p><b>技术优势：</b>整套“软硬控制系统”实现可同时在线用户数大于 5000 户、单个用户监测硬件点数规模大于 1000 点、数据刷新和控制指令延时小于 2 秒、数据采集周期实现 1 分钟频次、有功电能计量精度 0.5 级、温度测量精度 <math>\pm 0.5</math> 摄氏度、温度控制精度 <math>\pm 1</math> 摄氏度等关键目标。</p>

### 2.3.1 协鑫虚拟电厂

协鑫虚拟电厂始建于 2017 年，由协鑫集团主导建设。项目聚合了空调、充换电站、分布式电源、储能、生产负荷等多类灵活资源，运行总负荷超过 55.1 万千瓦，可调负荷约 36 万千瓦，其中包括 3 万千瓦充换电站负荷、1.5 万千瓦空调负荷、2 万千瓦储能，以及 4 万千瓦生产负荷等其他资源。



图 2-6 协鑫虚拟电厂

响应策略方面，项目开展了多个应用场景的探索。面向空调、充电站、主动替代能源以及城市公用负荷，项目基于各自场景的用电特征分析，通过优化响应策略和控制方式，降低对空调、充电等用户的影响程度，提升四类资源参与市场化交易的准确率。

表 2-15 协鑫虚拟电厂的四个创新响应模式

参与模式	模式特点	响应策略	响应效果
空调集群参与模式	通过对商业楼宇的空调进行分析，采用集群控制，分区执行方式，对用户影响小	通过限制空调主机负载、冷却水泵、冷却塔降频等策略	灵活资源占比约 30%。
光储充一体参与模式	通过光储充协调控制，光伏和储能匹配充电负荷进行实时调节，实现参与市场的效益，绿色最大化	通过储能 + 光伏，可根据充电桩基准负荷和目标负荷的差异进行充电策略的调整，提升充电桩参与市场化交易的准确率。	—
主动替代类参与模式	利用溴化锂、天然气分布式等资源，实现不影响用户生产，无扰式调整	利用溴化锂、天然气分布式等可分布式能源降低负荷	灵活资源占比约 20%。
城市公用负荷参与模式	城市污水处理系统管道存在一定量的存储空间，可利用管道存储能力对终端处理负荷进行调节	提升泵抽水 5 万平方米	调节能力 1MW，持续时间可达 2-3H。

商业模式方面，项目以参与需求响应、中长期和短期辅助服务为主。2023 年参与江苏中长期电力辅助服务，累计调节电量 228MWH，参与短期电力辅助服务，累计调节电量 14GWH，帮助用户增加收益超 2000 万元，减少燃煤消耗约 3000tce，碳减排约 8000tCO<sub>2</sub>。

技术方面，项目根据市场规则不断升级完善，建设了灵活资源服务“1+1+1”体系。包括一个管理体系、一个聚合平台和一套编码体系，基于平台构建的调节资源模型，可对所聚合的资源实现 100% 的数据监视、远程遥控、保护投入，并根据调节需求自动匹配编码资源，实现自动调节。

### 2.3.2 昆山政府侧虚拟电厂

昆山政府侧虚拟电厂由国网（苏州）城市能源研究院负责建设，是苏州首个以公共建筑空调柔性控制为主体的虚拟电厂。聚合资源包括 19 家机关建筑空调负荷合计 29205 千瓦，4 家商业建筑空调负荷合计 7305 千瓦。按照 20% 的可调节负荷容量估算，可形成 7302 千瓦容量的虚拟电厂。

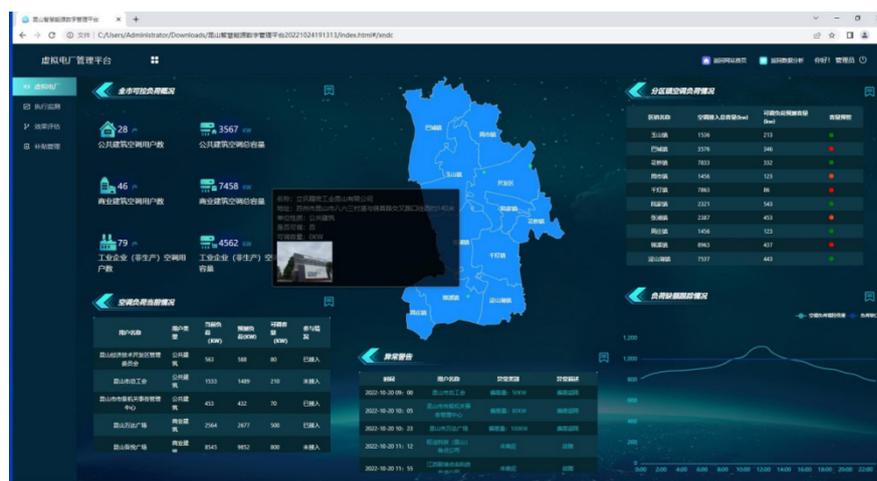


图 2-7 昆山政府侧虚拟电厂

在技术创新方面，该项目深挖柔性精准控制技术潜力，自主开发了全套软件系统、决策优化算法和相关智能监控装备，包括搭建了智能用电管理、电力需求侧管理 2 个主要功能模块的控制平台，且下属调控系统实现中央空调、多联机空调和分体空调等各类型空调智能终端设备的全部设备柔性接入。

在调控策略方面，该项目针对中央空调、多联机空调和分体空调三类设备的特性，研究制定了差异化资源配置方案，结合项目采用的柔性精准控制技术能够在夏季高温场景实现最高 45% 调峰成效，在夏季常规天气实现最高 37% 调峰成效。为苏州探索规模化柔性负荷响应提供技术支持和样本实践。

商业模式方面，项目联合政府机构、供电公司等单位，进一步挖掘数据价值。一是联合昆山供电公司不断推动完善响应补贴机制和补贴标准，形成体制机制示范。二是争取稳定维护运行费用，基于数据深度分析价值为市政府、区镇政府及其各相关部门提供服务，争取长期运行维护费用。三是探索绿色金融信息复用，推动绿色低碳行为作为昆山碳普惠信用基础，推动各方参与昆山双碳建设工作。

# 3 空调领域常态化运行研究

## 3.1 发展优势

**空调负荷资源丰富。**作为一座经济发达的城市，苏州商业建筑的数量和规模均在全国前列，截至最新数据，苏州已开业的 3 万 m<sup>2</sup> 以上购物中心达到 139 家，总体量约 1243 万 m<sup>2</sup>，此外近年来苏州写字楼市场持续活跃，拥有大量的写字楼项目。大规模的公共建筑在夏季提供了丰富的空调负荷资源。

**出台专项政策，明确管理机制。**为充分挖掘空调负荷资源，构建可调负荷资源池，江苏已出台《加快推进全省非工空调智慧调控能力建设工作方案》。作为江苏首个面向空调领域可调节负荷资源的专项政策，《方案》不仅提出了资源建设目标，也明确了具体工作机制。建设目标方面，《方案》面向商超、综合体、写字楼等非工楼宇，推动全省非工用户空调智慧调控能力建设，通过新型电力负荷管理系统实现空调负荷和温度的可观可测、可调可控。工作机制方面，《方案》明确了各级发改委、电网公司和电力用户的三方工作职责，保障资源开发的顺利推进。

**深厚产业基础和丰富创新资源。**作为我国重要的制造业基地之一，苏州拥有完整的空调产业链，涵盖研发、生产、销售等多个环节，聚焦了大金、格力、麦克维尔等一批

国内外知名空调制造企业。此外，苏州已与中科院、清华大学、上海交大、国网城市能源研究院等 200 多所国内外院所开展形式多样的合作，建设各类产学研创新载体超 160 家，实施产学研合作项目 2 万余项，拥有良好的科技创新和成果转化能力。苏州深厚产业基础和丰富创新资源，有利于支撑楼宇智能化改造和平台搭建过程中关键技术创新和成本控制。

**搭建产业生态圈，促进政企协同。**苏州已成立了由十四家政企单位合作共建的苏州虚拟电厂生态圈，为形成社会共识、促进政企协同提供交流与合作平台。

## 3.2 发展瓶颈

受制于政策、市场和技术等多方面的制约因素，现阶段空调资源主体参与聚合和调用的意愿不强，各试点项目也尚未实现常态化运行，可持续发展能力有待进一步增强。

### 3.2.1 技术制约

**资源要求高。**虚拟电厂的可调资源量级较大且分散，而调控需要具备较高的可靠性，由于气象、用户行为的不确定性和数据质量、预测模型的局限性，目前虚拟电厂对空调负荷的预测精度普遍不足，直接影响项目调控精度和成本效益。

**控制策略不够灵活。**为充分发挥空调负荷调节潜力，保证响应可靠性，虚拟电厂在制定响应策略时，需要考虑不同类型空调资源的调控特性和响应速度。然而，在实际操作中，当前虚拟电厂多采用过于简单或固定的控制策略，缺乏灵活性，无法满足不同场景下的需求。例如，对于中央空调和溴化锂空调，其调控方式和响应速度存在差异，需要开发针对性的控制策略。

**用户侧数字化基础薄弱，改造成本较高。**资源侧数字化进程是虚拟电厂的基础，但苏州建筑用户的数字化基础设施还相对薄弱，存在智能化程度较低和冗余监控并存的问题，无法满足虚拟电厂动态响应和柔性控制需求。此外，在对空调实施智能化改造的过程中，不同厂商、不同组件的接口、协议难以打通，不仅推高了相关的改造和维护成本，也限制了虚拟电厂对资源的快速集成能力。

**交易能力不足。**苏州虚拟电厂仍以邀约为主，随着市场成熟，辅助服务和现货交易对平台交易能力将提出更高要求，需要精准把握市场价格波动，提升内部资源配置效率，制定收益与风险取得最佳平衡的报量报价策略，提高项目效益。

### 3.2.2 政策监管

**功能定位尚未形成统一认识。**目前苏州相关主体基于自身特点和差异化诉求，正在积极推动相关项目落地实施，已经取得初步成效，但尚未对虚拟电厂的发展内涵和功能定位尚未形成统一认识，进而产生一系列问题。一是难以规范管理，不同主体适配的政策、市场机制存在差异，可能推高机制建设、协调管理的系统性成本。二是权责利不明，在市场交易过程中，虚拟电厂与其他市场主体间缺乏清晰的权责利归属，难以贡献增量价值，例如虚拟电厂参与电能量交易，与售电公司业务有所重合，导致其建设的增量价值不明显。

表 3-1 苏州相关主体利益诉求

主体类型	典型主体	诉求	特点
电网公司	国家电网	助力能源安全保供、促进新能源消纳、延缓电力投资	依托需求响应、负荷管理系统搭建虚拟电厂管理平台
发电企业	国电投、苏州能源集团	掌握负荷资源，与分布式新能源等项目形成互动	依托分布式新能源项目延伸拓展
民营企业	协鑫、固德威	获得业务收益、获得优质客户资源、拓展节能等业务	依托电力交易代理、智慧能源等能源服务延伸拓展
用户	楼宇、充电桩等业主	对正常生产 & 生活无负面影响；相对可观的经济收益；省心、省力	—

**监管体系不完善。**尽管江苏已出台《非工空调改造方案》，明确了空调负荷资源建设目标和工作机制，但其组织、实施和管理仍沿袭旧有的需求侧管理模式。此外，虚拟电厂的行业规范和标准体系等也还未明确建立，这导致在参与电网调度交易的权责边界不够明确，监管过程中缺乏明确的指导和规范，增加了监管的难度和不确定性。

### 3.2.3 市场机制

**市场空间无法支撑产业发展。**一是交易规模不足。现阶段江苏现货市场尚处于试运行阶段，空调资源仍以邀约需求响应和调峰辅助服务为主，而为应对夏季用电高峰的挑战，近年来江苏提前规划和建设了一批迎峰度夏电力保供工程，增强了江苏电网的供电能力，导致近两年调峰辅助服务和需求响应的实际调用频次较少，无法支撑空调资源的常态化交易。二是市场环境尚未成熟。现阶段电力市场特别是负荷侧尚未形成成熟的市场环境，而由于空调资源相对分散，且用户响应存在不确定性，还未实现与常规电源、电网侧储能等灵活性资源同台竞争的环境，在电网调度优先级中相对靠后。

**电力价格无法有效激活市场。**一是目前我国电力市场形成的价格主要反应主干电网电力供需形势，而配电网价格信号缺失，例如江苏分时电价覆盖主要集中在工业用户，商业用户选择执行分时电价，导致空调负荷管理的经济效益不明显，虚拟电厂为支撑配电网运行的高投入价值缺乏充分价格信号进行反应。二是响应价格有所下降，一方面近期修订的需求响应细则将补偿价格下调，空调资源主体参与的收益下降；另一方面大规模灵活资源的接入，预期将拉低辅助服务和现货市场的交易价格。

**交易结算机制有待逐步细化。**主要体现在独立计量问题，新版江苏响应细则并非针对平台进行统一计量考核，而是要求具备独立户号的用户满足 2 小时全时段响应。考虑到用户的舒适度，这种计量考核模式对商超、写字楼等建筑的长时响应能力要求较高，不仅影响用户参与意愿，也未能有效发挥虚拟电厂聚合零散资源的规模优势。

## 3.3 发展思路

空调领域虚拟电厂的常态化运行，是一个融合技术革新、市场活力与多元商业模式的综合性目标，需要针对当前面临的具体问题，进行全产业链的协同推进，具体到项目层面，主要涉及其技术响应能力、组织管理能力以及经济盈利能力的共同提升。其中响应能力提升的核心是在政府、企业与社会各方的共同努力下，虚拟电厂基于空调资源潜力的分析情况，通过持续提升终端设施智能化水平，优化响应策略，实现优质资源的灵活响应；组织管理能力是指虚拟电厂通过高效运维、客户关系和风险管理，旨在确保用户侧可调负荷的

可用性；盈利能力提升是指虚拟电厂充分利用市场机制，探索多元化、可持续的商业模式，具体包括积极参与电力市场交易，提供需求响应、辅助服务，并拓展综合能源服务等。

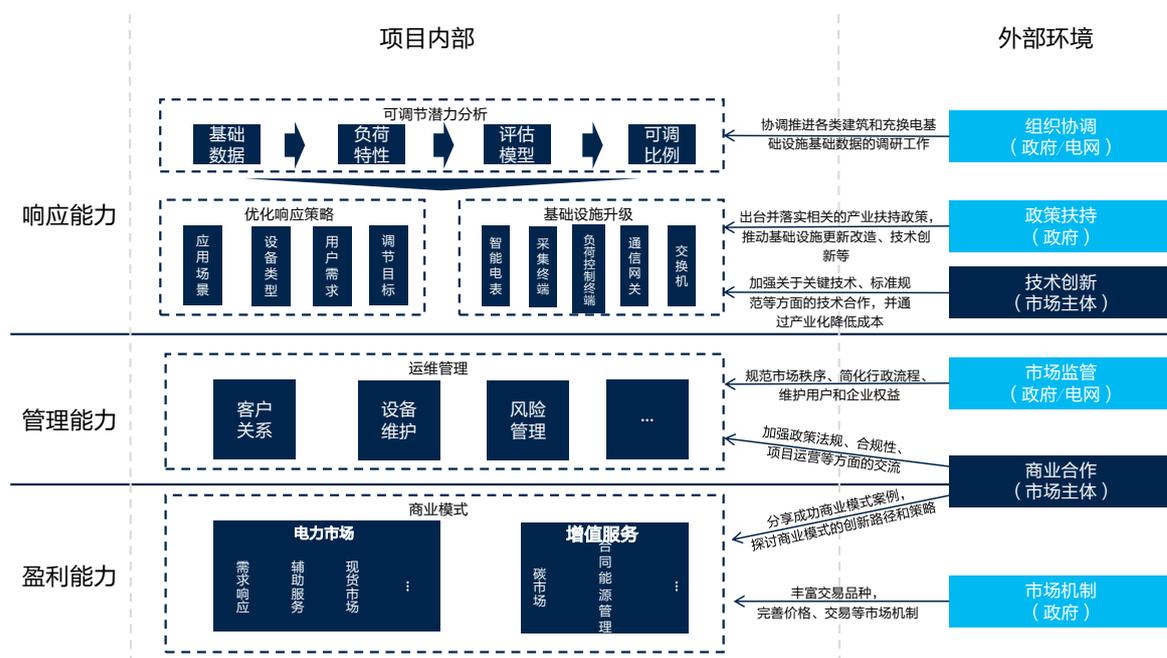


图 3-1 虚拟电厂常态化运行建设思路

## 3.4 发展路径

### 3.4.1 资源摸排，形成常态工作机制

终端用户的资源潜力作为虚拟电厂实际响应能力的关键支撑，是直接关系项目资源配置效率，实现可持续盈利的前提条件。尽管本次课题前期对空调资源的调控潜力做了初步的分析，但在实际响应中，其实际可调节能力仍受到气象、用户行为的不确定性和数据质量、预测模型的局限性等众多因素的影响。目前虚拟电厂对空调负荷的预测精度普遍不足，因此现阶段国内虚拟电厂均在开展负荷资源摸排工作，为项目系统性挖掘调控潜力，以及决策优化提供支撑。

在具体实施过程中，重点是摸清空调资源底数，并建立科学的负荷模型。首先是摸清各类空调负荷的基础数据。对于虚拟电厂，一方面是有效对接优质空调资源，对办公建筑、

综合体、公共行政等具备良好调控潜力的建筑，通过积极的沟通、提供节能管理等方式获取用户信任，然而，由于用户认可度较低，在前期摸排阶段可能需要寻求政府提供一定的支持，协调资源的对接。另一方面是开展具体的资源摸排工作，由于地区环境差异，苏州虚拟电厂需要结合本地区建筑特征，开展空调负荷特征的分析，其中重点收集区内用户行为和外部环境数据，包括空调使用模式、室内外温湿度、太阳辐照强度等，并抽取不同环境下，水冷、风冷、多联机、分体式等各类空调在实验和实际运行中的负荷运行特征值，建设空调负荷资源基础数据库。其次是建立基于热力学原理的各类空调的负荷模型，并针对削峰、填谷等应用场景需求，建立不同时间段内各类空调可调节潜力的评估模型，用以对不同应用场景需求下的各类空调资源的可调节潜力评估。

值得注意的是，由于实际可调控潜力涉及具体用户行为、前期投资与运行成本约束等众多不确定因素，并非依照前期一次的摸排就可以进行测算的，而是在响应策略、关键技术、运行管理、商业模式的更新迭代过程中不断优化的，因此需要充分研究各类空调用户需求 and 敏感度，不断完善市场规则并在市场环境下优化空调响应策略，及时调整评估模型，才能高效开展用户侧资源摸排。

### 3.4.2 优化调控，制定空调响应策略

在响应策略方面，受限于数据积累不足、用户需求多样等因素，现阶段虚拟电厂多采用相对简单或固定的控制策略，未能充分发挥各类建筑的调控潜力，因此需要在前期潜力评估的基础上，充分考虑不同类型空调资源的调控特性和响应速度，以及终端智能设备、用户舒适度等多重因素，制定适宜的调控目标和策略。

在具体实践过程中，重点是开展不同应用场景响应策略的探索。对于虚拟电厂，需结合商超、写字楼、酒店、政府机关等用户的需求，以及水冷、风冷、多联机、分体式等空调的设备特性，按照分钟级、小时级、日前等多时间尺度，研究各类空调负荷的调节方法和模型，并利用过程仿真技术和实测数据不断迭代算法、优化模型，提出一套覆盖全类型空调设备、适用于不同建筑类型的负荷调控运行策略，并为各类建筑制作空调响应的标准化操作手册，“一楼一册”全面科学挖掘不同场景下空调资源响应能力。此外，考虑到项目整体对外特性，尽管同为空调负荷资源，但写字楼、酒店、商场等公共建筑的用电特性

和运行模式存在一定的差异，具备一定的时空互补性。因此需要进一步分析不同时间尺度下各类建筑空调负荷的聚合策略和响应能力。

表 3-2 昆山政府侧虚拟电厂空调负荷调控方案

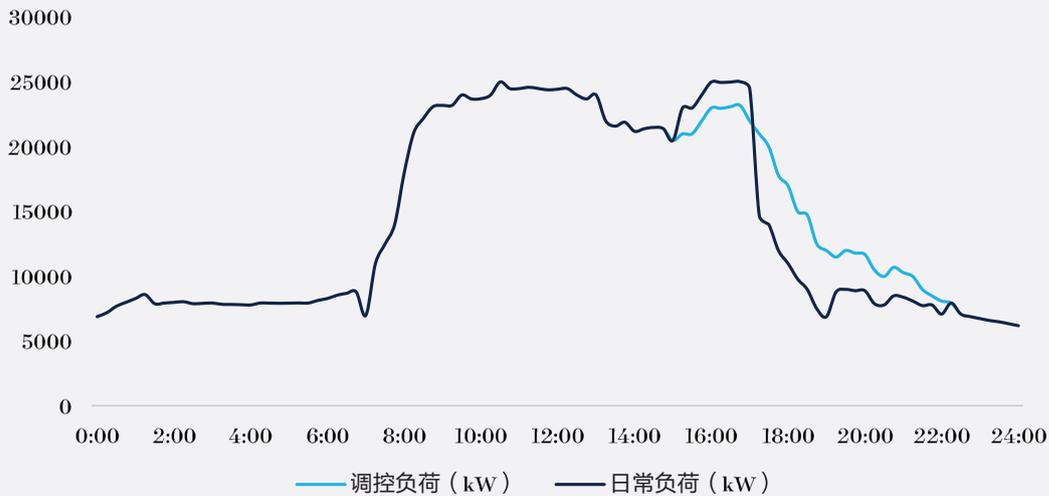
空调类型	调控对象	I 级调控方案	II 级调控方案	III 级调控方案	响应时间	调峰效果
中央空调	制冷(热)主机出水温度调控	√	√	√	I 级: 5min II 级: 15min III 级: 15min	I 级: 5%-50% II 级: 10%-55% III 级: 15%-65%
	制冷(热)主机启停控制	√	√	√		
	制冷(热)主机容量调控	√	√	√		
	冷(热)水泵调控		√	√		
	冷却水泵调控		√	√		
	冷却塔风机调控		√	√		
	主机蓄冷和释冷调控		√	√		
	新风机调控			√		
	空调机组调控			√		
	风机盘管调控			√		
多联机空调	软启停、送风量调控、末端温度调控				1min-5min	10%~30%
分体空调	软启停、温度调控				1min-5min	10%~50%

### 专栏 3-1 协鑫虚拟电厂空调集群参与模式

协鑫虚拟电厂通过对区域内商业楼宇的空调进行分析，采用集群控制、分区执行的方式，对用户影响小。

**装机情况：**商业建筑面积共计 100 万 m<sup>2</sup>，终端设备容量包括空调装机约 1.5 万千瓦，溴化锂装机约 4600RT，冰蓄冷装机约 15000RTH。（相当于 10000KWH 电量）。

**响应策略及效果：**在 17 点前，冷水主机满负荷运行，提前将楼宇温度降低，到 17 点降低冷水主机 30% 负荷运行，中海财富冰蓄冷开启放冷模式，协鑫广场等楼宇利用溴化锂空调制冷，17:00-19:00 降低电负荷 6000kW，19:00 以后商业楼宇电负荷逐渐降低。



协鑫虚拟电厂空调集群响应效果

#### 3.4.3 基础升级，打造楼宇数字底座

智能终端作为连接终端设备和软件平台的纽带，是实时监控设备状态、及时响应调控指令的重要工具。然而，由于我国智能建筑领域起步较晚，多数建筑的空调系统在智能水平上相对薄弱，此外，在对空调实施智能化改造的过程中，终端设备的接口、协议往往难

以打通，也影响了信息感知的准确性和实时性。针对这一问题，一方面需要虚拟电厂加强与包括科研院所、设备商、用户在内的产业链上下游合作，推动关键技术研发，探索空调智能化解决方案。另一方面需要政府、企业和公众共同努力，通过出台支持政策、提高公众认知等方式，推动建筑空调智能化改造，打造楼宇数字底座。

首先是关键技术研发方面，近期出台的《电力市场注册基本规则》特别提到虚拟电厂要具备对聚合资源的调节或控制能力，这要求其在技术开发方面要倾向于对可调可控功能的开发，例如面向基于先进感知、独立计量、定位的智能控制终端，以及面向资源聚合商的规模化分布式资源实时感知与协同调控系统等。此外，针对接口、协议难以打通的问题，更多还是依靠虚拟电厂联合科研机构及设备厂商，推进接口及通信协议等标准化，实现不同品牌空调设备间的兼容互通。

表 3-3 空调负荷调控关键技术

技术类型	具体内容
智能控制终端	通过集成传感器、计量设备、定位技术，能够实时监测、独立计量空调的运行状态、发电量、负荷情况、位置等信息，为虚拟电厂的调度和结算提供依据。
协调控制系统	是一种集成了数据分析、决策支持和远程调控功能的综合管理系统，能够基于终端资源运行状态，自动生成优化调度方案，并通过远程调控技术实现对分布式能源的协同调控。
信息通信技术	包括互联网、物联网、大数据、云计算等多种技术的融合，为虚拟电厂提供高效的信息传输和处理能力，是虚拟电厂实现设备之间互连性、协同性以及与其他系统无缝对接的基础。

其次是建筑空调智能化改造方面，对于政府，可出台相关产业扶持政策，鼓励建筑业主开展建筑节能和智能化改造，对老旧电能表和配电设备进行智能化更新，并给予一定的资金支持，一定程度上可降低虚拟电厂的前期投资成本。对于虚拟电厂，重点是根据各类空调资源的可调规模和调控难易程度，按照“先大后小、先易后难、一楼一案”原则，分批开展现场查勘，并制定和空调类型、负荷特性相适宜的改造方案，加大智能控制终端的部署，提升数据采集和智能调控能力。此外，对于部分价格敏感，且存在大量安全可靠温控负荷需求的用户，开展技术经济性分析，推动冰蓄冷等空调的改造，打造梯队化的资源调度序列。对于建筑业主，需要培养能源管理意识，增强管理能力，在降低自身运营成本的同时，提升终端资源响应能力和响应精度。

### 专栏 3-2 海信中央空调智能化改造案例

#### 改造内容：

海信中央空调利用 ECO-Building 智慧控制平台结合 5 大技术平台打造的水冷离心机组、水冷螺杆机组、风冷热泵机组、风机盘管空气处理机组和户式水机 6 大产品品类。

1. 对空调主机进行适当改造，加装水阀执行器及水泵变频器，控制循环冷却水温度和水泵运行频率，加装末端风机盘管控制器，以控制末端送风量。

2. 更换新风水阀执行器，铺设与新风机组 DDC（Direct Digital Control）控制器之间的交互电缆，实现新风水阀开度的远程平滑调节。从冷暖面积测算，到取暖制冷设备、用能需求、用能谷峰等数据信息的收集、整合、研判、调控，层层关联，对于产品力、系统服务能力、自控能力等综合能力有较高要求。

#### 改造效果：

1. 海信中央空调融合场景体验、服务体验、能效管理、安全保障等于一体，打造的海信 ECO-Building 智慧控制平台将物联网和大数据分析技术结合于一体，能够远程对中央空调机组的运行状况进行采集检测和控制，对空调机组发生的故障及时进行报警。

2. 终端用户和空调运维人员可远程实时查看机组运行状态，并进行机组开停、温度设定等操作，不仅极大地提高了工作效率，还可以减少人力成本、降低管理成本，能够满足各种场景对中央空调集中控制的需求。

3. 海信 ECO-Building 智慧楼宇系统将园区用电管理直接与国家电网联通，可实现 20% 至 50% 的负荷调节能力，动态响应电网负荷调峰，实际调控负荷偏差与目标调控负荷的偏差小于  $\pm 10\%$ 。

### 3.4.4 提高效率，保障项目稳定运行

由于虚拟电厂的响应能力很大程度上依赖于用户侧可调负荷的可用性，因此在运营阶段，虚拟电厂还需做好设备运维、客户关系和风险管理等工作，以保障能够提供持续、稳定、高效地服务。

设备运维方面，主要是完善虚拟电厂的人才培养和运维制度。一是加强运维人员的专业技能培训，提高其对空调设备和虚拟电厂平台的操作和维护能力。二是建立完善的运维制度，包括设备巡检、故障处理、安全防范等方面的规定和操作流程。利用 VR 电厂巡检技术等创新手段，提高巡检效率和准确性。通过模拟真实的电厂环境，使巡检人员能够在虚拟空间中进行设备检查和故障诊断。

客户关系方面，主要是做好虚拟电厂与用户的沟通交流。一是做好用户细分和需求分析，并制定个性化的服务方案。根据建筑类型和规模、响应能力、地理位置等因素，虚拟电厂可将用户进行细分，并深入了解各类用户的空调使用习惯、节能需求、服务期望等，用于制定相应的空调负荷管理方案，包括能效评估、节能措施建议等，以满足用户的个性化需求。二是优化用户参与机制，对于虚拟电厂，可通过开发用户友好的交互界面和智能化应用，方便用户实时查看用电情况和能源贡献，并根据自身的用电需求和偏好，灵活调整用电策略，以参与到虚拟电厂的调度中来。此外，虚拟电厂还可定期向用户发送服务报告、节能成效分析等信息，增强用户的信任感和满意度。

风险管理方面，主要是建立虚拟电厂风险应急管理机制。一是做好全面风险识别与评估。根据各类空调的设备特点和运行状态，虚拟电厂需重点识别与负荷波动、能效变化、设备故障等相关的风险。例如，夏季高温天气下空调负荷激增可能导致的电网压力、老旧空调设备故障频发等。结合历史数据和专家意见，对识别出的风险进行评估，确定其发生的可能性和影响程度，并进行分级管理。二是制定应急预案。针对空调设备故障制定应急响应流程，包括故障发现、报告、抢修及备用设备启用等环节。此外，考虑到空调负荷数据在虚拟电厂运营中的重要性，还需制定相应的数据安全保障预案，包括数据加密、备份、恢复等措施。三是定期开展应急演练，并持续优化。加强对相关人员培训和教育，并定期组织模拟演练，模拟空调负荷高峰时段、设备故障等场景下的应急响应过程。

### 3.4.5 试点先行，探索多元增值服务

商业模式是虚拟电厂实现盈利和可持续发展的关键，具体涉及虚拟电厂与外部的市场交易和与内部用户的收益分配等。通过创新商业模式，虚拟电厂能够吸引更多的资源和用户参与，推动产业的快速发展。顺应电力市场改革进度，现阶段国内各地正在积极探索多元商业模式，通过参与需求响应、辅助服务市场等，获取收益。但除补贴激励以外，虚拟电厂相关的商业模式、市场机制等还需要进一步探索优化，与国外成熟商业模式相比还存在一定差异，无法有效支撑项目的常态化运行。在探索成熟商业模式过程中，不仅需要政府积极优化外部市场环境，持续推动电力市场改革；同样依赖专业市场主体发挥灵活市场机制，探索多元增值服务。

首先是持续提升电力市场交易能力。对于虚拟电厂，一是面向不同的市场需求，根据各类空调的调控特性，优化资源配置。从现有示范项目来看，常规空调主要以用电高峰期间参与削峰类需求响应和辅助服务为主，其中商场、写字楼等建筑多采用中央空调和VRV多联机空调，其规律性强、价格敏感度较高、系统集成度高，可调节潜力大，可参与需求响应和辅助服务；其中居民建筑、学校等建筑多采用分体式空调，价格敏感度较低，虽可以在一定程度上参与需求响应，但调节潜力和响应速度有限。二是优化报量报价策略，实现利益最大化。作为市场化项目，虚拟电厂的诉求在于综合考虑市场竞价、调控成本、用户行为、风险溢价等复杂因素下的报量报价策略，实现成本和风险可控下的利益最大化，其主要涉及代理合同约定价和申报定价策略两个环节。其中虚拟电厂和空调用户签订的代理合约，关系到收益分配以及对用户响应可靠性的约束，合约套餐主要包括固定价格套餐、比例分成套餐、阶梯价格套餐、市场价格联动套餐等类型，其定价需要考虑各类空调用户的价格敏感度、风险偏好和反应行为等多重因素，不仅反映可调节资源经济成本、用电舒适度损失成本、效用损失成本、内部交易成本等虚拟电厂成本构成，同样需要考虑合同约定价、考核措施、收益分成等合约约束对用户参与互动的的影响。而在申报定价策略环节，项目需要考虑市场价格的波动性，灵活调整虚拟电厂整体聚合出力和价格以适应市场变化，在市场价格上涨时提高出力并提高定价，从而最大程度地获利；在市场价格下跌时，控制出力和降低定价以避免亏损。

其次可探索多元增值服务。以海量数据和技术创新为驱动，虚拟电厂可进一步为各类用户提供综合能源、碳资产管理、碳足迹评价等能碳一体化服务，拓展项目收益渠道，支撑项目在现行市场环境下可持续发展，助力楼宇和园区用户实现碳减排。

表 3-4 空调参与电力市场交易盈利能力

空调类型		用户类型	调控特性	电力交易品种		
				需求响应	辅助服务	现货市场
中央空调系统	风冷水循环	办公类、商场、宾馆、医院等建筑。	价格敏感性适中 规律性强 系统集成度高 可调潜力大	高峰期间参与削峰类需求响应和辅助服务获益大，有一定量可以提供系统备用、调频等辅助服务，但在电能量市场中的参与度相对较低		
	水冷	大型商场、酒店、医院等建筑。				
	风冷风循环	候机楼、火车站、室内运动场馆、展览馆等建筑。				
VRV 多联机空调系统		一般用于写字楼。	灵活性高 价格敏感度一般	部分价格敏感用户可削减部分负荷参与削峰类需求响应和辅助服务，由于在容量和响应速度上可能不及中央空调系统，在备用、调频等辅助服务和电能量市场中的参与比例较低		
分体式空调		居民建筑、学校、普通办公楼、工厂宿舍建筑。	灵活性高 价格敏感性低 具有一定可调度潜能	可以在一定程度上参与需求响应，但调节潜力和响应速度有限，通常不适合直接参与辅助服务和电能量市场		
冰蓄冷空调		有大量温控需求的大型建筑均可使用。	价格敏感度高 可调潜力大	适用于长时间的响应		

### 专栏 3-3 常规空调和冰蓄冷空调的经济性分析

为分析空调参与响应的经济效益，课题组以某商业建筑为例，站在虚拟电厂角度，综合考虑常规空调接入改造成本及参与需求响应获取的分成收益，测算在满足最低期望的投资回收期要求下，每年需要参与的响应次数，并分析用户可获取的收益。在此基础上，课题组进一步对比分析了对常规空调进行冰蓄冷空调改造对虚拟电厂和用户成本和收益的影响，具体包括其冰蓄冷改造成本，及通过需求响应和峰谷电价差套利形式获取的增量收益。

**项目概况：**建筑面积约 10 万  $\text{m}^2$ ，每天 19h 运行。每年夏季运行 120 天。该项目空调配置有 4 台制冷量为 4219kW 的冷机并联蓄冷。项目峰值冷负荷约为 16756kW，出现在 15:00 左右。而在零点的冷负荷不足 4000kW，1:00-5:00 则没有冷负荷。

**运行策略：**1) **常规空调：**以参与削峰响应为主，在响应时段压降峰值负荷的 30% 参与响应；2) **冰蓄冷空调：**削峰和填谷响应均可参加，此外还可通过峰谷价差套利，具体策略为在夜间的电价低谷时段使用 4 台 4219kW 的主机蓄冷，把蓄冷槽蓄满，且日常开机时间需与填谷响应时段错位，以保证响应有效性；在白天把蓄冷槽内冷量分配到部分高峰时段，日常分配时段同样需注意与削峰时段错位，不足部分使用主机来补充，其余时段运行主机。

#### 成本效益：

成本方面，该项目接入虚拟电厂的改造成本，按照每千瓦 500 元 /kW 测算，为 843.8 万元；此外因冰蓄冷空调系统改造额外增加 1720.2 万元的投入由用户负责。

2) 效益方面，①常规空调，参与削峰获取的补贴，根据江苏最新版政策，按照参与日前邀约型响应（补贴限价为 3 元 / 千瓦时）、单次响应 2 小时测算，虚拟电厂分成收到的单次削峰收益为 0.9 万元，假设静态投资回收期 10 年，则常规空调的年均参与响应的频次需最少达到 93 次才可回收成本，对应的虚拟电厂和用户年收益分别为 84.4 万元和 196.9 万元。②冰蓄冷空调，削峰补贴方面，同样按照上述测算，虚拟电厂分成收到的单次削峰收益为 0.9 万元；填谷响应方面，根据江苏

可调负荷辅助服务政策，约定响应谷时段可再生能源消纳补贴为 0.6 元 / 千瓦时，单次响应 2 小时进行测算，虚拟电厂分成收到的单次填谷收益为 0.6 万元，假设静态投资回收期 10 年，则常规空调的年均参与响应的频次需最少达到 56 次可回收成本，对应的虚拟电厂和用户年收益分别为 84.4 万元和 383.8 万元。此外，用户还可通过峰谷价差节省电费，该项目冰蓄冷空调系统比常规空调系统每年总计减少用电量 2.53 万千瓦时，其中在低谷时段增加电量 363.45 万千瓦时，在高峰和平峰时段分别减少电量 184.09 万千瓦时、176.83 万千瓦时。参考江苏 2024 年 7 月代理购电工商业用户电价表，35 千伏等级的高峰、平峰和低谷时段电价分别为 1.0897 元 / 千瓦时、0.6337 元 / 千瓦时、0.2652 元 / 千瓦时，全年节省电费 216.3 万元。

冰蓄冷与常规空调系统投资和效益对比表

费用类型	常规空调	冰蓄冷空调
冰蓄冷改装成本（万元）	0	1720.2
接口改装成本（万元）	843.8	843.8
虚拟电厂投资回收期（年）	10	10
单次削峰收益（万元）	3	3
单次填谷收益（万元）	—	1
虚拟电厂分成比例（%）	30	30
年均响应频次（次）	92.6	55.6
用户年削峰收益（万元）	196.9	196.9
用户年填谷收益（万元）	—	78.8
用户节约电费（万元）	—	216.3
用户年综合收益（万元）	196.9	491.9
用户增量投资回收期（万元）	—	5.8

# 4 电车领域常态化运行研究

## 4.1 发展优势

**优秀市场主体和示范项目的经验积累。**苏州拥有一批成熟的充电设施运营商，国网公司、协鑫能源、星星充电、蔚来等企业均在苏州有所布局，探索了光储充一体化的参与模式，通过储能+光伏，根据充电桩基准负荷和目标负荷的差异进行充电策略的调整，提升充电桩参与市场化交易的准确率。

**构建统一的监管服务平台。**为推进电网间能量和信息互动，2019年苏州市推出新能源汽车及充电设施监测平台，打通了各充电运营商、新能源车企及监管平台的数据壁垒，构建统一的监管服务平台，有效提升充电设施智能管控水平。

此外，依托苏州优秀的全产业链优势和创新能力，以及现有的产业生态圈，电车领域灵活资源的开发同样拥有良好的发展基础。

## 4.2 发展瓶颈

### 4.2.1 技术制约

**资源调度不确定性高。**随着电动汽车数量的不断增多，其作为灵活性资源的价值日益突显。不过，电动汽车参与虚拟电厂与空调等传统负荷有所不同。对于虚拟电厂，一方面，电动汽车的充电需求与用户的用车需求是分开的，尤其是私家车，每天停驶时间长，实际所需的充电时间短，有充分的时间让系统进行调度安排，因此电动汽车参与响应的成本相较于传统负荷更低。另一方面，电动汽车充电具有随机、分散的特性，因而其充电给电网带来的负荷相对就更加难以被精确地预测和调度。响应实施的实时性要求越高，电动汽车参与响应的成功率和准确性就可能越低。

**充电基础设施薄弱。**一是充电基础设施在资源配置方面存在超配、错配等突出问题。苏州电动汽车保有量已达 23.42 万辆，充电桩达 11.88 万个，但其中公用充电桩仅 1.8 万个，平均桩数利用率 51.4%，而平均时间利用率更是仅 12.3%<sup>[14]</sup>，充电桩利用率、低用户充电难并存的现象仍然存在，不利于充换电负荷资源的开发。二是 V2G、光储充一体等新模式尚未形成规模。V2G、光储充一体等具备良好调节潜力的新模式，由于电池技术限制、投资较大等原因，尚未形成规模发展。

**关键技术亟需进一步突破。**一是电池技术方面，目前新能源汽车常用的三元锂电池充放电循环寿命为 2000—3000 次，且大部分私家车用户出行所需电池循环寿命约为 500—600 次，要推进 V2G 大规模商业化应用，仍需加大对高安全、低成本、长寿命新型电池技术的研发力度。二是协调互动技术的不足，由于新能源车反向充电存在子调度和电网安全冲突的问题，可能导致断面过载并增加调度成本。三是标准体系仍有缺失，由于当前充放电负荷聚合参与电力交易的相关数据交互、运行调控、信息安全等标准体系仍有缺失，制约了车网互动的规模化推广。例如，当前已开展的 V2G 试点示范大多是由企业采用私有协议实施，不能有效支持车网互动的规模化应用，此外还存在交流充电接口不具备数字化通信能力，车辆“预约充电”和“休眠唤醒”等有序充放电的必备功能尚未纳入车辆强制标准等问题。

### 4.2.2 政策监管

**协同规划机制不健全。**现阶段，苏州在车网互动领域尚未出台具体的专项政策。政策的缺失导致电动汽车与电网互动的发展缺乏明确的指导方向和发展路线，不仅让苏州当地企业在项目实施过程中面临不确定性，也影响了相关技术和商业模式的推广。此外，充电基础设施建设需要发改、能源、交通、城建等政府部门以及电网、整车、充电设施运营商等企业相关各方协同推进，但目前相关协同规划和工作机制还不健全，制约了充电基础设施建设速度。

**管理机制尚未明确。**车网互动作为尚处于培育阶段的新业态新模式，政府应承担重要的监管和引导责任，完善市场应用配套服务体系，营造良好的市场环境。但现阶段苏州缺少明确管理机构和组织形式，遵循旧有的管理办法，监管与管理的部门不明确，管理职能交叉，协同发力不足。

### 4.2.3 市场机制

**市场空间受到量价制约。**在交易规模方面，由于充放电负荷聚合参与电力现货市场、辅助服务市场的交易机制还不健全，交易规模和交易频次无法支撑虚拟电厂常态化运行。在价格激励方面，一是价格型需求响应能力不足，现阶段充放电峰谷分时电价在时段和价差设置上仍较为粗放，而新能源消纳成本主要由发电企业和电网企业承担，通过电力市场传导至终端用户的激励有限，对新能源车有序充电、V2G参与削峰填谷引导力不足，峰谷差获利难以弥补新能源汽车动力电池折旧成本。此外，居民区电动汽车充电电价低于工商业场所充电电价，车主向公共场所转移的意愿较低。二是激励型需求响应能力不足，苏州当前的补偿电价难以调动网约车等运营车辆的积极性，公共场站充电一般采用工商业电价，存在一定比例服务费用，用户参与响应后的实际收益较低，激励效果不足以调动积极性。

**独立计量问题凸显。**现阶段苏州需求响应和辅助服务以户号为计量主体，对于建设在公共建筑内的充电桩，其运营方可能和户号主体的产权不一致，对于充电桩这种负荷占比较小的调节资源，响应准确率容易受到用户负荷波动的影响，难以支撑车网互动的持续商业化运营。

**充电服务水平有待提升。**由于充电运营企业缺乏稳定经营预期，在设备维护、技术升级以及服务提升等方面持续投入不足，故障桩比例较高、非充电车辆占位等问题较为突出，对新能源车主的实际使用体验造成加大影响。

## 4.3 发展思路

同空调类似，电车领域虚拟电厂的常态化运营高度依赖产业技术和模式的进一步突破和创新，需要虚拟电厂以试点示范积累有益经验和模式为基础，配合相关技术、标准、价格机制的优化完善，协同推进项目的响应能力、管理能力和盈利能力提升，逐步帮助项目实现常态化运行，并探索能够普遍适用推广的发展模式。

## 4.4 发展路径

### 4.4.1 区域勘察，建立标准作业程序

对于兼具负荷和储能特性的电动汽车，尽管课题组在前期对充电负荷的调控潜力做了初步的分析，但为充分研究其资源潜力，提升虚拟电厂响应能力，同样需要虚拟电厂对各类用户充放电负荷特征进行更精细的分析，以便更好掌握电车参与电网调节的充放电潜力，为虚拟电厂制定响应策略、有序开发资源提供支撑。

在具体实施过程中，主要包括资源摸排和模型构建两个环节。由于电车充电的随机性特点，为提高虚拟电厂在后续负荷特征的分析 and 模型的构建过程中的准确度，因此需要海量数据进行支撑。苏州市已搭建了聚合全市充电资源的充电设施运行监管平台，对于虚拟电厂可积极寻求数据上的支持，分类型的整理公共场站、居民区、办公楼、换电站等场景的车桩分布情况和历史负荷数据。除此之外，考虑到电车的放电特性，还需要进一步考虑充电桩的充电效率、动力电池放电深度（DOD）、荷电状态（SOC）等技术因素，建立电车在不同时间尺度下参与电网响应的充电和放电潜力评估模型，用以评估其充放电潜力。而在后续运营中，随着关键技术、响应策略的不断完善，虚拟电厂还需做好常态化增量数据维护工作。

#### 4.4.2 改善调度，完善车网联动机制

在实际响应中，虚拟电厂想要提供性能稳定的灵活性商品，参与电力市场的报量报价，必须对大规模电动汽车聚合后的实际可调节能力进行量化评估，然而电动汽车用户行为，在不加干预的自然状态下具备较强随机性的特征，增加了其参与虚拟电厂响应的不确定性。

因此在项目实践中需要虚拟电厂结合不同应用场景充电行为上的差异，持续优化各类充电基础设施参与车网互动的方法和模型。对于虚拟电厂，首先是制定充换电设施实时需求响应策略。根据前期对私家车、运营车、专用车等不同类型用户充电行为的调研情况，面向具体的应用场景，综合考虑动力电池损耗成本及 SOC 期望等用户的个性需求因素后，结合车网互动（V2G）、快速充换电、液冷大功率充电、智能有序充电、无线充电等新技术新模式，制定有序充电和 V2G 模式下运营商的响应策略，通过设置分时电价、积分奖励、电费折扣等措施，引导用户参与，优化电网负荷分配。其次是开展策略实施和监测评估。在不同应用场景测试车网互动响应策略，并通过平台对策略实施效果进行监测和评估，用以后续对响应策略优化。在此基础上，结合不同台区的负荷特性和需求，优化区域范围内电车集群的充放电策略，提升区域电网的调控效率和稳定性。

表 4-1 电车负荷响应策略

调控策略	调控方式	适用类型
中断服务	刚性	所有电站类型
动态电价响应	柔性	所有电站类型
调节充电功率	柔性	所有电站类型
电车到电网放电	柔性	充电站
调整换电时间	柔性	换电站
优化电池充电策略	柔性	换电站

### 专栏 4-1 电车负荷响应策略

**1) 中断服务：**中断换电操作是指在响应期间暂停充换电站的服务，以达到立即减负荷的目的。此方法能够实现 100% 的负荷调节能力，适用于所有充换电站。在进行中断控制时，需要避免频繁启停，以免对设备造成损害，因此需要提前规划好中断和开启的时长。

**2) 动态电价响应：**动态电价响应是指根据电价的实时变化调整充电策略，在电价低时进行充电，在电价高时暂停充电。此策略不仅能节省充电成本，还能减少电网高峰负荷，适用于所有电动汽车。智能充电桩和车载系统能够实时接收电价信息并自动调整充电行为。

**3) 调节充电功率：**调节充电功率是指在响应期间通过调整充电功率来控制电动汽车的充电速度，从而实现对电网负荷的精细化调节。适用于所有支持可调功率充电的电动汽车。智能充电系统能够根据电网负荷实时调整充电功率，避免对电网造成过大冲击。

**4) 电车到电网放电：**电车到电网放电是指在电网需要时，将电动汽车电池中的电能反馈给电网，以支持电网的稳定运行。该策略适用于具备 V2G 功能的电动汽车。通过双向充电桩和 V2G 控制系统，可以实现电能的双向流动，在高峰时段对电网放电。

**5) 调整换电时间：**调整换电时间是指在响应期间根据电网负荷情况和电价变化，统一调整换电服务的时间安排。通过将换电操作集中在电网负荷低谷时段，减少高峰时段的负荷需求。适用于所有能够灵活调整服务时间的换电站。需要使用智能调度系统根据实时数据进行动态调整。

**6) 优化电池充电策略：**优化电池充电策略是在换电站内，适当调整电池的充电功率和充电时间，以提高充电效率并减少对电网的负荷影响。具体做法包括在电网负荷低谷时段提高充电功率，而在高峰时段降低充电功率或暂停充电。这种策略适用于具备智能充电管理功能的换电站，有助于在相同电池储备量下减少电网负荷。

### 4.4.3 技术突破，提升车网融合互动

针对电车领域基础设施薄弱的情况，在实施层面，重点协同推进车桩网的智能化改造，以及强化网络安全，加强电动汽车与电网融合互动，提高电网调峰调频、安全应急等响应能力。

首先是协同推进车网互动核心技术攻关。围绕响应能力的提升，与空调负荷类似，虚拟电厂同样需要围绕可调可控功能的提升，加强对海量分散资源的预测和聚合调控技术的研究。此外，面向充放电这一特殊场景，虚拟电厂还需围绕车桩网三方面的技术需求，加强与设备商的技术合作，一是车网互动型电池，在不明显增加成本基础上提升动力电池循环寿命，并提升高频度双向充放电工况下的电池安全防控能力，用以降低电池成本、提供高循环充放电寿命、解决电池安全问题，打消用户顾虑。二是高可靠、高灵活、低能耗的双向充放电设备，用以提升车网互动的效率和效益，降低能源损耗。三是安全的信息互通技术，用以保障车网互动所需的车端、桩端、低压层、配网层、中压层等电网端的数据进行安全交互，打消各主体顾虑，实现更精准的监测和调度。

其次是推动充换电设施智能化升级及配套电网保障能力提升。对于政府，可加大对有序充电、V2G、光储充一体化等示范类设施的补贴力度，鼓励存量车辆和充电设施通过升级改造提升互动能力。对于虚拟电厂，可优先对换电站、公交综合场站、公用快充站等优质资源，开展智能化改造，提升终端设备的可观可测能力。对于电网公司，为满足有序充电、V2G的推广需求，需同步提高配网保障能力，升级智能变电站设备和电压调节器，部署动态负荷管理系统和储能设备等。

### 4.4.4 加强管理，提高项目运行效率

针对故障桩比例较高、非充电车辆占位等服务有待提升的问题，对于虚拟电厂来说，为保障实际响应中终端资源的可用性，同样需要在运营阶段做好充换电设备运维、客户关系和风险管理等工作，其具体内容与空调类似，包括在设备运维方面，加强智能化和数字化手段运用，提升设备故障远程诊断和处置能力；在客户关系管理方面，加强车网互动技术的宣传，并构建充电站（桩）标签体系，实现精细化运营；在风险管理方面，设置意外情况紧急预案，并制定严格的数据安全和隐私保护政策等。

### 4.4.5 示范应用，拓展多样商业模式

在实践层面，探索虚拟电厂 - 交通数字化融合的商业模式。

首先是探索虚拟电厂聚合各类充电资源参与电力市场的模式和路径。从苏州示范项目来看，车网互动主要以智能有序充电和车网双向充放电（V2G）等形式参与市场。在有序充电场景下，新能源汽车用户或换电站可参与需求响应、辅助服务等业务，如夜间谷电时汽车在住宅区充电，日间峰电时在写字楼或工业园区放电，实现峰谷价差收益。充放电场景下，车主可利用 V2G 桩将电动汽车作为移动储能单元进行峰时向电网放电。

其次是建立多元化收益渠道。一是以绿色、低碳为导向，探索车网互动和碳市场结合的模式。随着有关机制不断健全和电力市场不断完善，新能源汽车可参与碳市场和绿电、绿证交易市场，虚拟电厂可进一步探索车网互动场景下绿证交易、碳资产管理、碳交易实施路径，发挥其绿色效益，同时对各主体起到一定的激励作用。二是探索“光储充换”一体站、综合智慧能源岛”（充电网 + 储能网 + 微电网 + 虚拟电厂）等多种功能融合的模式，建设可持续、差异化的项目。三是鼓励围绕用户需求，为用户提供充电导航、状态查询、充电预约、费用结算、道路救援等服务，拓展增值业务，提升用户体验和运营效率。

表 4-2 车网互动参与电力市场交易盈利能力

充电站类型	用户类型	车辆调控特性	电力交易品种		
			需求响应	辅助服务	现货市场
换电站	物流车 (重型)	灵活性大 规律性强 电池容量大	夜间参与现货市场、填谷类需求侧响应获益大，夜间有一定量可参与旋转备用市场		
	私家车	夜间可调度潜能大			
公交综合场站 快充站	公交车	规律性强，夜间可 调度潜能大			
公用快充站	私家车 网约车 出租车	价格敏感度高的用户于日间具有一定 可调度潜能	部分价格敏感用户可平移部分负荷，总体能在各市场获利，但获利一般		

充电站类型	用户类型	车辆调控特性	电力交易品种		
			需求响应	辅助服务	现货市场
居民小区 慢充站	私家车 (包括私桩)	夜间可调度潜能大	夜间参与现货市场、填谷类需求侧响应获益大，夜间有一定量可参与旋转备用市场		
公共建筑 工业园 商场 慢充站	私家车 公交车	日间具有一定的可调度潜能可调度潜能大充电量少	结合光储充可增加获利，参与电力现货市场、削峰类和阻塞缓解类需求侧响应市场		

### 专栏 4-2 车网互动经济性分析

为分析电车参与响应的经济效益，课题组以私家车和运营车为例，站在虚拟电厂角度，综合考虑两类电车在有序充电和 V2G 两种模式的相关改造成本及参与需求响应获取的分成收益，测算在满足投资回收期的最低期望下，每年需要参与的响应次数，并分析车主可获取的收益。

**车辆概况：**1) 私家车：电动私家车日均行驶里程 50 公里，车用电量每天 7kWh，车载动力电池容量 60kWh，车用电量外剩余 53kWh 可用于车网互动。2) 运营车辆：电动运营车日行陵城 200 公里，车用电量每天 40kwh，车载动力电池用量 80kWh，除车用充电量外剩余 40kwh 可用于车网互动。

#### 运行策略：

私家车：①有序用电场景下，车辆充电时间由原始电价高峰时段（18:00-21:00）转移至低谷时段（21:00-次日 8:00），按照江苏居民分时电价水平，私家车错峰充电收益为 0.2 元/千瓦时（高峰：0.5583 元/千瓦时，低谷电价 0.3582 元/千瓦时），期间若参与需求响应，削峰时，按照参与日前邀约型响应（补贴限价为 3 元/千瓦时）、单次响应 2 小时进行测算，单次削峰收益为 21 元；填谷时，根据江苏可调负荷辅助服务政策，约定响应谷时段可再生能源消纳补贴为 0.6 元/千瓦时，单次响应 2 小时进行测算，单次填谷收益为 4 元。② V2G 模式下，车辆通过夜间

低谷充电，午间高峰放电套取峰谷价差收益，并参与需求响应获取额外收益，其中削峰场景下电车通过放电参与削峰（日常放电时段与削峰时段错开以确保有效参与，并扣除当天峰谷价差收益中的高峰放电收入），补贴标准不变；填谷场景下电车通过充电参与填谷响应（日常充电时段与填谷时段错开以确保有效参与，并扣除当天峰谷价差收益中的高峰放电收入），补贴标准不变。

2) 运营车辆：①有序用电场景下，运营车峰谷电价收益和需求响应方式与乘用车相同，唯一不同是运营车辆充电电价均采用的是江苏两部制的一般工商业电价（10千伏），峰谷电价为0.88元/千瓦时（高峰：1.163元/千瓦时，低谷电价0.283元/千瓦时）。②V2G模式下，运营车收益模式与乘用车相同，不同点是适用电价和可放电容量不同。

#### 成本效益：

1) 成本方面，主要包括虚拟电厂的接入成本和V2G改造成本，其中接入成本按500元/千瓦的单位成本测算，假设私家车和营运车辆的充电桩分别为14kw和30kw，则接入改造成本分别为0.7万元和1.5万元；V2G改造，私家车主和营运车辆业主需投入的增量成本约1.5万元和8万元。

2) 效益方面，主要包括削峰和填谷的响应补贴和峰谷电价收益，按照上述策略，假设虚拟电厂期望的最低静态投资回收期为10年，每年参与削峰和填谷的次数相同。①对于私家车，在有序充电场景下，当每年参与削峰和填谷响应的次数均达到93次时，可满足虚拟电厂投资回报的最低要求，此时，虚拟电厂和用户的综合收益分别为700元和2144.6元。在V2G模式下，当每年参与削峰和填谷响应的次数均达到14次时，就可满足虚拟电厂投资回报的最低要求，此时，虚拟电厂和用户的综合收益分别为700元和12581.2元。①对于运营车辆，在有序充电场景下，当每年参与削峰和填谷响应的次数均达到35次时，可满足虚拟电厂投资回报的最低要求，此时，虚拟电厂和用户的综合收益分别为1500元和16348.0元。在V2G模式下，当每年参与削峰和填谷响应的次数均达到33.3次时，就可满足虚拟电厂投资回报的最低要求，此时，虚拟电厂和用户的综合收益分别为1500元和8351.2元。

综合来看，对于虚拟电厂，在有序充电模式下，营运车辆由于每天充电量更高，可参与响应的更多，因而可更快的回收投资成本，但也需要每年 30 余次的调控频次。相对应的，在 V2G 模式下，由于营运车辆可放电较少，加之电池放电效率影响，私家车可以获得更高的价差收益，因而可更快的回收投资成本，但每年需要参与的调控频次低至 14 次。对于私家车，由于高额的价差收益，在 V2G 模式下可以获得更高的增量收益，在第二年即可收入初始的 V2G 改造投资。然而对于营运车辆，由于可发电量相对较少，其在 V2G 模式下获取的综合收益较低，无法收回前提投入的 V2G 改造费用。

私家车和营运车参与车网互动的经济性分析

具体分项	私家车		营运车	
	有序充电	V2G	有序充电	V2G
V2G 增量成本 (万元)	0	1.5	0	8.0
虚拟电厂接入成本 (万元)	0.7	0.7	1.5	1.5
投资回收期 (年)	10.0	10.0	10.0	10.0
充放电效率 (%)	85	85	85	85
单次削峰收益 (元)	21.0	135.2	120.0	102.0
单次填谷收益 (元)	4.2	36.0	24.0	48.0
虚拟电厂收益分成比例 (%)	30	30	30	30
响应频次 (次)	92.6	13.6	34.7	33.3
用户年削峰收益 (元)	1361.1	1289.8	2916.7	2380.0
用户年填谷收益 (元)	272.2	343.6	583.3	1120.0
用户价差收益 (元)	511.3	10947.9	12848.0	4851.2
用户年综合收益 (元)	2144.6	12581.2	16348.0	8351.2
增量投资回收期 (年)	—	1.4	0	-

# 5 建议

前文分别针对面向空调和电动汽车两类灵活性资源的虚拟电厂在苏州常态化运行面临的优势和瓶颈进行了分析，提出了该类虚拟电厂发展的五项重点任务。

从项目内部资源和能力出发，在底层资源层面，通过建立常态化的潜力评估机制、优化聚合模式、加大资源智能化改造三项重点任务，丰富项目资源规模，实现对底层资源规模的实时更新和掌握，并提升资源响应精度和可靠性；在项目平台层面，通过加强组织管理、探索多元商业模式，利用市场机制推动空调和电车领域的虚拟电厂商业化运行，提升项目可持续发展的能力。

为保障前文所述重点任务的有序推进，课题组分别从市场机制、政策监管，以及产业扶持的角度，提出若干建议。

## 5.1 推动虚拟电厂参与现货和辅助服务市场

**针对交易规模不足的问题，持续推动虚拟电厂参与现货和辅助服务市场。**省级层面，建议完善需求响应机制，探索开展可调负荷年度、月度提前招标，对中标容量提供响应容量补偿与响应电量补偿相结合的补偿方式，为市场主体提供长效稳定收益机制。尽早开展现货市场长周期结算试运行，推动现货市场早日转正，建立完善虚拟电厂参与现货市场的准入和交易结算规

则。优化辅助服务市场和省内现货市场的交易衔接流程，完善价格和结算机制，建立顺畅的信息流通机制。此外，制定虚拟电厂参与现货市场和辅助服务市场的执行与认定标准，为虚拟电厂的盈利模式和市场操作提供清晰的规范依据，推动其商业化进程。市级层面，推动苏州市内可调负荷参与江苏省辅助服务市场和负荷管理平台统一管理，提高开市频次，给与负荷侧与发电侧同台竞争的机会。参考先进试点经验，配置“智能量测终端+多芯智能电表”，完成独立计量和智能控制。

## 5.2 加快完善配套价格机制和市场交易机制

**针对当前价格无法有效引导用户参与、交易品种相对单一的问题，进一步完善动态分时电价机制，丰富交易品种。**

价格机制方面，进一步完善动态分时电价机制，优化时段划分，建立健全工商业和电动汽车居民充电桩分时电价机制。省级层面，建议对符合技术准入条件的虚拟电厂和其他资源主体进行公平出清、形成价格，并根据各地供需形势，适当地引入两部制定价方法；政府部门也应在具体实践中适时调整核定价格申报上下限要求。市级层面，建议一是加强夏冬高峰期尖峰负荷发展情况研究，推动探索完善季节性尖峰电价和深谷电价、蓄热蓄冷电价在苏州试点示范。二是探索合理拉开工商业午间充电电价和居民小区充电电价差距，有效引导私家电动汽车充电负荷向“午间在工商业场合充电”转移，鼓励电动公交谷段充电。对实行两部制电价的集中式充换电设施用电免收需量（容量）电费。研究建立向电网反向放电的价格机制。扩大分时电价刚性执行的覆盖范围，实现 315 千伏安及以上的工商业用户、集中式充换电站分时电价全面覆盖。三是对充换电服务费价格区间进行有效引导和严格监管。建立健全充换电服务费指导价机制，明确给出充换电服务费的上下限范围，确保用户充换电终端价格能够切实反映当地充换电供需关系，达成供需关系的精准动态匹配，促进存量和增量的充换电网络资源高效利用。

市场机制方面，省级层面，建议持续构建全周期覆盖、多元主体融合、各层级有序衔接的长三角省市间电力互济交易机制，丰富交易品种和形式，优化区域能源结构，拓展虚拟电厂市场空间。市级层面，探索尖峰电价资金池的合理利用方式，发挥政府在尖峰电价

资金池管理中的引导作用，协调各方利益，制定科学合理的激励政策和监管机制，用以提高空调和车网互动资源参与需求响应的频次和规模，引导楼宇业主和新能源汽车用户积极参与响应。

### 5.3 加强虚拟电厂与地方能源专项规划协调

针对顶层设计缺失导致的发展定位不明的问题，加强基础研究工作，明确虚拟电厂在能源布局中的发展定位，探索与苏州能源规划、双碳规划、电力规划的统筹衔接。在市级层面，建议加强虚拟电厂、微能网、聚合商等新元素，以及嵌入式直流、柔性互联装置等新型配网装备规模化接入条件下对地区电网承载力和平衡力的影响分析。充分考虑城市能源系统和城市配电网的承载力和平衡力需求，对虚拟电厂系统参与电力系统响应交互的系统架构、运行方式、控制策略、通信互联机制等开展深入研究。各级电网规划部门应在不同承载力、平衡力边界水平下积极做好适应地方电网发展特点的主配微协同规划。力争在本地电源规划、能源站规划中将虚拟电厂、微能网纳入统筹规划范围，把智慧楼宇和充电基础设施的建设及其配套电网改造作为重要的城市基础设施纳入当地经济社会发展相关规划。建立动态评估机制，跟踪分析规划执行情况，总结规划实施过程中的问题，及时研究提出调整方案并按程序对规划进行滚动调整。

### 5.4 建立市区协同的虚拟电厂监管决策机制

针对管理机制尚未明确导致的管理分散的问题，完善虚拟电厂监管体系，优化产业发展环境。在市级层面，建立部门协同、上下联动的工作机制，成立虚拟电厂管理机构，组建涵盖政府、国网、运营商、楼宇业主等多方市场主体的工作专班，聚焦虚拟电厂落地的重点、难点问题，做好规划制定、政策落实、综合协调、工作督导以及本部门推广应用等工作。通过综合规划打破监管孤岛，协调各方利益关系，通过制定明确的过渡路径和监管时间表，推动各方利益主体形成合力，共同促进虚拟电厂产业发展。简化审批程序和减少行政障碍，加快虚拟电厂项目的推进速度。建立健全高效节能空调和双向充放电车辆的电池质保体系。完善典型应用场景下的双向充放电业务流程与管理机制。

## 5.5 推动产学研融合和关键标准规范制定

针对关键技术和标准规范缺失导致的接入和调度问题，**加强产学研用协同，推动负荷管理标准制定**。在关键技术方面，鼓励虚拟电厂联合相关研究机构，联合开展可调可控功能的开发，例如面向基于先进感知、独立计量、定位的智能控制终端，基于通用大模型的空调负荷功率预测，以及面向资源聚合商的规模化分布式资源实时感知与协同调控系统等。在标准规范方面，加快修订出台接口及通信协议等标准，积极推进接口互操作性检测及服务平台间数据交换等标准的制修订。进一步完善空调和充电基础设施相关工程建设标准与管理规范，以及计量、计费、结算等运营标准与管理规范。在创新体系方面，构建开放合作的促进机制。充分发挥苏州产业基础和优秀创新能力，加强虚拟电厂与电网企业、科研院所、设备商等主体间联系，形成集技术研究、平台建设、工程应用等多位一体的产学研用协同创新组织。破除阻碍创新要素在不同机构之间自由流动的体制机制障碍，推动创新资源在各类组织之间有效流动，在空调和充换电领域关键技术取得突破，并向各产业、各领域应用扩散。

## 5.6 引导空调和充电基础设施智能化改造

针对基础设施相对薄弱的情况，**建议省级或市级层面出台相关政策，推动基础设施建设与升级，明确资金扶持方向，降低前期投资成本**。在空调领域，引导存量楼宇提质升级，支持公共建筑业主结合《能源重点领域大规模设备更新实施方案》，加快老旧电能表更新替换和配电设备智能化更新。在充换电基础设施领域，一方面鼓励存量换电站开展功率拓扑改造，将原有单向的整流电路升级为双向的储能变流器 (PCS) 模块，并同步升级换电站站端能量管理系统 (EMS) 的功率控制系统；加快直流公共快充站升级改造，提升快充桩功率调节能力。另一方面推广具备有车网互动等功能的智能充电基础设施，新建充换电基础设施原则上应采用智能设施。此外，积极推动配电网智能化改造，强化对电动汽车充放电行为的调控能力。

# 参考文献

- [1] 吴迪, 康俊杰等. 电网与保障能源转型.[EB/OL]. 北大能源研究院.(2022-07)[2024-7-26]. <https://energy.pku.edu.cn/docs//2022-07/3dc551ae50a047e880e80ab6a92cf3a8.pdf>
- [2] 王东容. 我国虚拟电厂发展研究[J]. 电力决策与舆情参考.2020, 29、30: 16-24
- [3] Fortune Business Insights.2024-2032 年虚拟发电厂市场规模、份额和行业分析.[EB/OL]. Fortune Business Insights.(2024-11-11)[2024-11-15].<https://www.fortunebusinessinsights.com/zh/industry-reports/virtual-power-plant-market-101669>.
- [4] 中商产业研究院.2024-2029 年中国虚拟电厂行业分析及发展前景预测报告.[EB/OL]. 中商产业研究院.(2024-07-19)[2024-11-15].<https://www.askci.com/news/chanye/20240719/115935272136157577103227.shtml>
- [5] 北极星售电网.浙江嘉兴“虚拟电厂”助力保障迎峰度夏供需平衡.[EB/OL]. 北极星售电网.(2024-07-19)[2024-11-15].<https://m.bjx.com.cn/mnews/20240719/1389957.shtml>
- [6] 美的楼宇科技.柔性调控, 美的楼宇科技成功助力浙江省电网削峰填谷.[EB/OL]. 美通社.(2023-11-21)[2024-7-26].<https://www.prnasia.com/story/427863-1.shtml>
- [7] 蔚来官网.蔚来 2022 年环境、社会及公司治理报告.[EB/OL]. 蔚来.(2023-3-1)[2024-7-26].<https://www.nio.com/cdn-static/luban/nextjs/images/bf990d389d9a18fe9f93fc8c86ccc3ac8284cd6b114938b46447cd3f37213561/esg/NIO-2022-ESG-Report-Simplified-Chinese.pdf>
- [8] 中国财富网.公司构建了充电网+微电网+储能网的碳中和虚拟电厂.[EB/OL]. 蔚来.(2024-10-18)[2024-7-26].<https://www.cfbond.com/2024/10/18/991065004.html?id=14194?id=14194>
- [9] 苏州市人民政府.苏州供电公司晒 2022 年“成绩单”.[EB/OL].(2023-01-21)[2024-06-25].<https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/szyw/202107/807c0172c00c4db0805c396db-ba28048.shtml>.

- [10] 苏州统计局. 苏州市统计年鉴 2023.[EB/OL]. 苏州市统计局官网.( 2023-12-13 )[2024-7-26].  
<https://tjj.suzhou.gov.cn/sztjj/tjnj/2023/zk/indexce.htm>
- [11] 上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测中心 .2022 年上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测及分析报告 .[EB/OL]. 上海市人民政府官网 . ( 2023-06 ) [2024-7-15].<https://zjw.sh.gov.cn/cmsres/7e/7ecb07e166fa4f12ae93a2f24eaec2b8/038d0c-125c6fabed6fda8f57df3a435f.pdf4acca39dbb5d0e1d8d11>
- [12] 苏州市人民政府 . 对市十七届人大二次会议第 0155 号建议的答复 .[EB/OL]. ( 2023-05-29 ) [2024-06-25].<https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/bmwj/202308/9009acb03d-fa4819b37001f13e71f110.shtml>
- [13] 苏州市政府 . 苏州市 “十四五” 电动汽车公共充换电设施规划的通知 . ( 2022-06-01 ) [2024-7-26].<https://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/zfbgswj/202206/b9152963df214b2b-8ba02ad07ab8a80d.shtml>
- [14] 中规院 .2023 年中国主要城市充电基础设施监测报告 . ( 2023-09-06 ) [2024-7-26].<https://mp.weixin.qq.com/s/UqLAci9iQsFXawJFd-SowA>

**作者**

苏州中咨：许相敏、程环宇、薛会、郭凤凤、徐璐、郅梦婧、孙源涵

**联络方式**

程环宇，hyc\_orange@126.com

