



专题报告

深圳市虚拟电厂建设潜力分析： 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



中国科学院深圳先进技术研究院
SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

中国科学院深圳先进技术研究院（简称“深圳先进院”）由中国科学院、深圳市人民政府及香港中文大学于 2006 年 2 月共同建立，实行理事会管理，探索体制机制创新；瞄准国际一流工研院，致力于建设与国际学术接轨、与粤港澳大湾区产业接轨的新型科研机构，定位为提升粤港澳大湾区制造业、健康产业和现代服务业的自主创新能力，推动自主知识产权新工业建立，率先建成国际一流科研机构。

深圳先进院目前已初步打造了科技、人才、产业一体的“创新体系”，由八个研究所（中国科学院香港中文大学深圳先进集成技术研究所、生物医学与健康工程研究所、先进计算与数字工程研究所、生物医药与技术研究所、脑认知与脑疾病研究所、合成生物学研究所、先进材料科学与工程研究所、碳中和技术研究所）组成，牵头组建 2 个全国重点实验室、3 个国家创新中心、79 个省市创新载体。

深圳先进院将抓住粤港澳大湾区和中国特色社会主义先行示范区“双区驱动”的建设机遇，在改革热土上孜孜探索体制机制创新，不断冲击国际科学前沿，前瞻布局战略性新兴产业，不断多方位促进科教融合和创新发展。

感谢深圳虚拟电厂管理中心、南方电网深圳供电局有限公司为本课题研究提供的指导。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

深圳市虚拟电厂建设潜力分析： 空调和电动汽车

**Potential Analysis for Virtual Power Plant Development
in Shenzhen: Air Conditioners and Electric Vehicles**

2024年12月

目录

摘要	1
1. 背景	6
1.1 全国虚拟电厂建设现状与经验	6
1.2 全国新能源和空调电动汽车负荷的发展情况	8
1.3 深圳新能源和空调电动汽车负荷的发展情况	9
2. 国际虚拟电厂建设经验	10
2.1 因地制宜发展特色虚拟电厂	10
2.2 明确法律框架，为虚拟电厂发展提供保障	11
2.3 多层级平衡机制提升电力市场效率	11
2.4 制定统一的技术标准和通信协议，实现设备互联互通	12
2.5 推广智能设备与控制技术，提升能效与需求响应便捷性	12
2.6 多元化商业模式与激励措施推动虚拟电厂发展	13
2.7 电价激励与响应奖励优化用户行为，提升电网效率	14
3. 深圳市虚拟电厂现状与经验	15
3.1 深圳虚拟电厂发展现状	15
3.2 深圳虚拟电厂管理平台建设成效	17
3.3 深圳市虚拟电厂建设经验	18

4. 深圳市响应潜力和效益评估	20
4.1 响应潜力评估	20
4.2 灵活性资源响应经济性评估	27
5. 研究发现和行业建议	36
5.1 研究发现	36
5.2 行业建议	38
参考文献	46

摘要

我国电动汽车保有量快速增长和极端气候频发导致电力需求激增，加之可再生能源的大规模接入，电网面临着巨大的调节压力，亟需提升系统的灵活性，实现源荷高效互动。虚拟电厂作为一种新型的电力管理模式，通过聚合分布式能源、储能系统和可控负荷等资源，能够有效提升电力系统的灵活性和可再生能源的消纳能力，为落实双碳目标要求，提高电网平衡调节能力提供有效支撑。

欧美发达国家已经建立起成熟的政策框架和体制机制，并逐步形成了基于当地能源资源禀赋和市场需求的虚拟电厂体系和运营模式，而作为国内的先行者之一，深圳市在虚拟电厂建设方面处于全国领先地位。本报告首先梳理了国际虚拟电厂发展历程，总结了欧美等先进国家和地区的虚拟电厂建设经验。报告接下来对深圳虚拟电厂建设现状与响应潜力做了分析和评估。结合国际经验，报告提出深圳市虚拟电厂发展建议，关注空调与电动汽车两类高潜力资源，设计政策路线图，为深圳市虚拟电厂的可持续发展提供参考。报告还根据我国实际情况，提出因地制宜发展虚拟电厂、明确法律框架、建立多层次平衡机制、统一技术标准和通信协议、推广智能设备、多元化商业模式与激励措施以及实施电价激励等助力全国虚拟电厂发展的建议。

2023 年深圳市虚拟电厂管理平台接入容量约 2650 兆瓦、调节能力达 560 兆瓦。2025 年全市预计建成具备 1000 兆瓦级可调能力的虚拟电厂，逐步形成年度最大负荷 5% 左右的稳定调节能力，并在 2030 年负荷调节能力达到 1500 兆瓦。报告在梳理深圳市虚拟电厂政策支持、发展状况和建设成果的基础上，发现深圳市在虚拟电厂建设发展方面具

有如下优势：虚拟电厂的政策支持力度大，市场活跃度高，资源整合能力强，参与主体综合收益可观；建设了国内首个网地一体虚拟电厂运营管理平台，已形成全国可推广的管理模式。

在深圳虚拟电厂资源中，本报告重点分析了空调和电动汽车的调控响应潜力，对这两大领域的市场潜力和经济效益进行了详细评估。研究发现，在响应潜力评估方面，最佳情景下，2030年深圳市空调调节潜力可达4844兆瓦，削峰能力达到最高用电负荷16%，电动汽车调节潜力可达1859兆瓦，填谷能力达到低谷用电负荷10%。

在响应经济性评估方面，空调的响应经济效益主要体现在避免发电成本、减少碳排放成本及GDP损失方面，而电动汽车响应经济性主要以避免发电成本、减少碳排放成本、GDP损失及充电峰谷分时电价的差价优惠表现。最佳情景下，2030年，假设深圳市约65%居民户和51%工商业空调提供灵活性资源响应，单次响应可避免发电成本约在1608-6438万元之间，实现净经济效益284-5114万元，避免损失GDP1.78亿元，减少碳排放成本139万元；43%电动汽车提供灵活性资源响应，单次响应可避免发电成本约在644-2577万元之间，实现净经济效益114-2047万元，避免损失GDP0.71亿元，减少碳排放成本55万元。

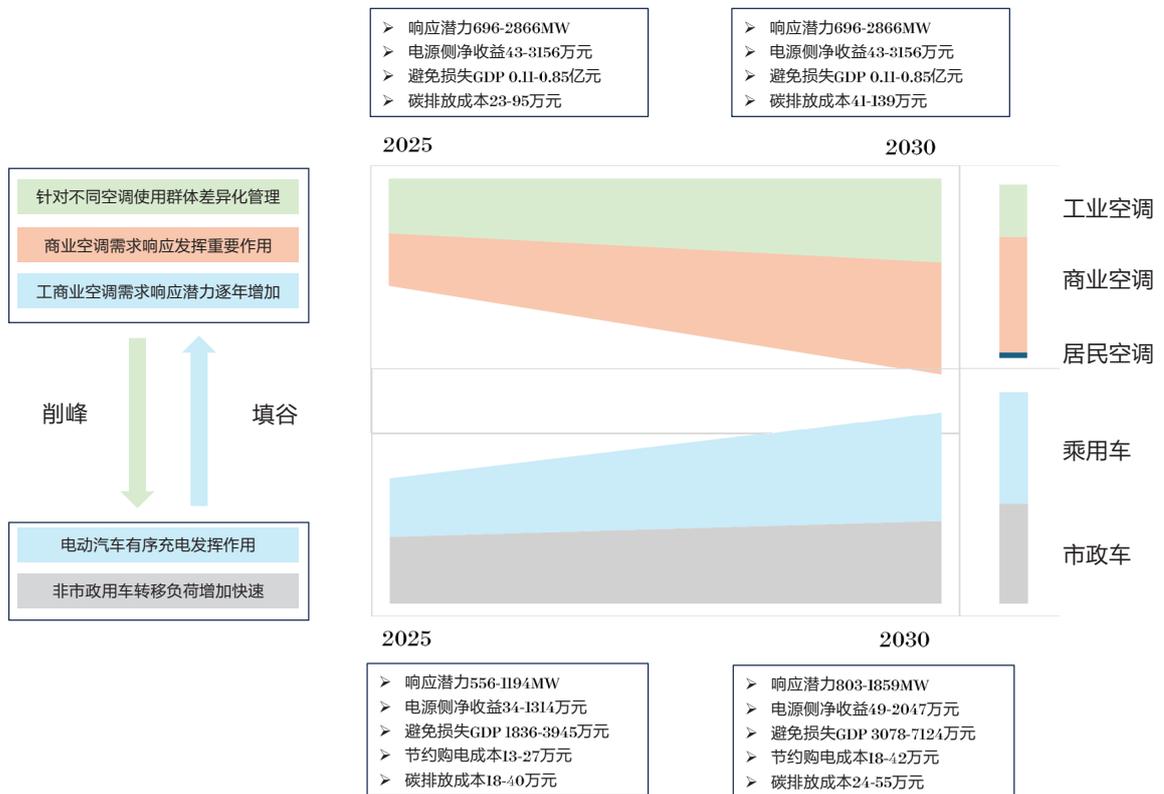


图1 深圳市响应潜力评估结果

表 1 深圳市空调与电动汽车参与响应政策路线图

对象	分类	特点	分类	近期措施	远期措施
工业商业	政策	蓄冷渗透率高； 蓄冷峰谷电价比高； 商业空调潜力大； 温度设置偏低	政策	<ul style="list-style-type: none"> 提供设备安装升级补贴、专项贷款和税收优惠 单独安装分时计量装置 设计工商业专用的需求响应电价，优化蓄冷电价制度 新建项目融入蓄冷设计，既有项目改造提供补贴与税收优惠 	<ul style="list-style-type: none"> 优化电价政策，实施实时电价 设计灵活的需求响应合约 工商业能源用户设定能效标准和建筑节能排放限额 对集中蓄冷进行容量定价
				技术	<ul style="list-style-type: none"> 推广中央空调技术 进行蓄冷改造更新 采用精细化管理与智能控制技术 提升变频与节能技术设备覆盖率 提供舒适度调节技术和设备支持 空调负荷实现分区控制与精准响应
居民	政策	数量庞大； 多人居多； 个人负荷分散	政策	<ul style="list-style-type: none"> 推广应用智能空调与控制技术 对参与需求响应的用户免费安装智能控制设备并予以激励金 推广空调伴侣，提升需求响应设备的普及率 空调以旧换新补贴 推行居民分时电价机制 鼓励龙头企业（如格力、美的）加入空调聚合需求响应体系 	<ul style="list-style-type: none"> 设计不同参与模式和补贴标准 推动自动化、分级化需求响应模式 要求新装空调具备响应能力 提升空调能效水平，COP≥5.0，增加能效补贴 逐步实行尖峰电价
				技术	<ul style="list-style-type: none"> 手机远程控制，支持用户手动退出 提升空调能效水平，COP≥3.8 设置合理的温控范围和响应时长 升级或集成传感器和控制元件 系统的精细化管理 试行需求响应应用场景多样化，与电动车或其他智能家居设备联合调控
居民	技术	潜力有限； 无峰谷电价； 控制难度高； 响应弱； 规模化不足； 无有效商业模式； 隐私安全问题突出	技术		

对象	分类	特点	分类	近期措施	远期措施
电动汽车	市政 用车	控制力度强； 预测性强； 使用时间固定	政策	<ul style="list-style-type: none"> 建立统一智能调配平台，优化市政车队调度和管理流程 提供充电桩建设补贴，降低初始投资成本，加快充电设施覆盖 制定行业统一标准，明确响应规范和考核方式 	<ul style="list-style-type: none"> 推动自动化车队管理系统建设 发展V2G，实现电网与车辆间能量互动，增强电力调控能力
		调度复杂； 需考虑运输计划与需求响应的平衡	技术	<ul style="list-style-type: none"> 增加需求响应奖惩机制 推广智能车载管理系统 优化用车和响应计划，提高车队需求响应参与率 	<ul style="list-style-type: none"> 通过智能充电桩调节功率，调节电网频率从而提供平衡服务 基于分布式电源管理的系统研究，进一步降低对主电网的依赖 推动电动汽车与光储充结合发展
电动汽车	乘 用车	未来潜力大； 用户价格敏感性较强； 充电时间灵活； 私家车规模大但分散	政策	<ul style="list-style-type: none"> 提高响应补贴，针对不同用户推广分层次奖励机制 提供电动汽车的特定峰谷电价选择 增加V2G基础建设投资与充电桩建设 明确电动汽车参与电力市场准入条件 构建需求响应参与积分系统，吸引用户长期参与与需求响应 	<ul style="list-style-type: none"> 完善标准体系，设立针对V2G的价格激励机制 个性化需求响应合同 允许参与容量市场和辅助服务市场
		充电设施建设和运营成本较高； 车主参与意愿弱（安全里程）； 车辆缺乏 V2G ； 用户充电习惯限制； 充电设施和智能化管理不足； 主体多元化，难以集中管控	技术	<ul style="list-style-type: none"> 手机控制时间，聚合商智能安排充电 汽车厂商增强电池质量，完善V2G 保险条款 推广智能充电桩 增强电动汽车性能，配备V2G功能 使用先进电池管理系统，设定V2G最低电量阈值 	<ul style="list-style-type: none"> 开发统一集成管理平台 完善运营商与车主参与需求响应的竞价机制与考核机制 推动电动汽车与光储充结合发展 电动汽车实行V2G

背景

在我国新能源电力系统建设全面启动的背景下，可再生能源的迅猛发展引起了电源结构的显著转变。2023年，全国太阳能发电装机容量约6.1亿千瓦，同比增长55.2%；风电装机容量约4.4亿千瓦，同比增长20.7% [1]。一方面，可再生能源快速发展显著影响着我国能源电力绿色转型。另一方面，我国电力系统迫切需要增加系统调节资源以优化新能源的吸纳效率。此外，空调和电动汽车等用电负荷的急剧攀升，对电网的承载能力提出了更高的要求。以深圳市为例，2023年深圳市公共建筑空调负荷占全社会用电负荷比重超过32%，新能源汽车总量已达76.6万辆。在电动汽车充电高峰时段，全市充电负荷超过1200兆瓦，相当于即时消耗广东最大的火电机组发电容量；截至2024年6月，深圳市机动车保有量约为426.3万辆，其中，新能源汽车达108.0万辆，占比超四分之一 [2]。这意味着，空调和电动汽车将对电网承载能力造成挑战，电网供需平衡将面临阶段性压力。虚拟电厂作为一种创新的电力资源管理平台，为平衡供需两侧提供了一种高效的解决方案。

1.1 全国虚拟电厂建设现状与经验

国家与地方协同推动虚拟电厂政策支持与发展目标，深圳市虚拟电厂处于全国领先地位。为推动虚拟电厂发展，国家和地方层面发布了一系列政策文件，并提出了相应的政策目标。地方层面约24个省份推出虚拟电厂相关支撑政策，23个地区出台了需求侧响应相关政策。

在国家层面，2022年1月，国家发改委、国家能源局联合发布《“十四五”现代能源体系规划》，明确提出力争到2025年，电力需求侧响应能力达到最大负荷的3%-5%，其中华东、华中、南方等地区达到最大负荷的5%左右[3]。今年7月，国家发展改革委等三部门印发的《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》，提出要完善市场和价格机制，实现典型地区需求侧响应能力达到最大用电负荷的5%或以上，具备条件的典型地区需求侧响应能力达到最大用电负荷的10%左右，利用源荷储资源建设一批虚拟电厂，建立健全标准体系，研究完善电动汽车充电分时电价政策[4]。

地方层面，2022年广东省发布了《广东省市场化需求响应实施细则(试行)》，建立以市场为主的需求响应补偿机制，拓宽电力需求响应实施范围，逐步形成年度最大用电负荷5%的响应能力[5]。深圳市发布的《深圳市虚拟电厂落地工作方案(2022-2025年)》，《深圳市碳达峰实施方案》以及今年的《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施(征求意见稿)》等文件提出深圳到2025年，全市源网荷储一体化发展取得显著成效，建成具备1000兆瓦可调能力的虚拟电厂，逐步形成年度最大负荷5%左右的稳定调节能力，并在2030年虚拟电厂负荷调节能力达到1500兆瓦的目标[6]。

总的来说，目前国内虚拟电厂发展的特点如下：1) **政策框架有待完善，发展路径暂不明确。**虚拟电厂具体功能范围、定位、市场主体地位等有待进一步明确。目前我国虚拟电厂正处于发展初期，各地资源禀赋、能源需求、电网结构、经济发展水平、市场建设程度等情况各异，各方涉及协作机制、底层设备交互、政府监管与信息共享等方面责任义务划分尚不完善，响应市场化程度不高，难以激发虚拟电厂主体参与各类市场交易的意愿，影响了市场化机制的有效性。2) **电力市场建设尚不成熟，虚拟电厂商业模式盈利模式单一。**目前我国电力现货市场、辅助服务市场建设进展不一，特别是在非试点地区，市场结构和规则机制尚不成熟，虚拟电厂参与市场的准入条件、运行管理和交易机制尚不完善。现阶段，虚拟电厂的运行模式主要依赖政府的行政管理和补贴，电力市场化环境尚不成熟，大多数虚拟电厂仅通过参与需求响应获取利益，而需求响应属于偶发交易，具有交易频次不确定的特点，实际收益较为有限。缺乏多样化的金融工具，导致产品种类有限，无法满足市场需求。参与现货、辅助服务市场仍属于试点阶段，商业模式较为单一，尚未形成稳定的收益来源、获得充分的成本补偿，影响虚拟电厂的功能发挥、盈利能力和市场参与积极

性。3) **虚拟电厂并网调度运行缺乏统一标准规范**。虚拟电厂并网调度运行缺乏统一标准规范。关于国家、行业层面的虚拟电厂标准体系尚未完全建立，标准研制进度与虚拟电厂发展速度不匹配，虚拟电厂建设运营缺少成熟标准参考。由于虚拟电厂聚合资源涉及参与主体众多，在缺少统一的技术标准和规范下，用户对于改造方案、接入方式、投资成本和交易方式等认知不清晰，这增加了虚拟电厂参与电网调度运行和电力市场的难度。此外，调控设备和聚合商之间缺乏统一的通信协议，造成数据交互壁垒和网络安全隐患。

1.2 全国新能源和空调电动汽车负荷的发展情况

我国在新能源领域取得了显著进展，特别是在风电、光伏发电和新能源汽车方面。截至 2023 年底，全国风电和光伏发电累计装机容量分别达到 4.41 亿千瓦和 6.09 亿千瓦，占全国总装机容量的 36.2%，较十年前增长近 10 倍。煤电发电量占比降至 53%，为历史新低，风光发电量占比突破 25% [7]。2024 年，我国正在建设的风电和光伏发电项目占全球总量的 64%，新增装机规模达到 339 吉瓦 [8]。新能源的迅速扩张显著优化了电力结构，同时增加了电源侧出力的不确定性，电力系统电量不平衡问题愈加凸显。此外，负荷侧空调和电动汽车大规模普及使电力系统稳定运行变得更加复杂。2023 年我国空调产量达到 24487 万台，国内市场需求量为 19981.87 万台，空调行业零售市场规模从 2016 年的 2751.37 亿元增长至 2023 年的 5554.96 亿元 [9]。夏季空调降温用电负荷占全社会用电负荷比重在 30% 左右，部分地区超过 40%。2023 年，中国新能源汽车产销量分别为 958.7 万辆和 949.5 万辆，分别增长 35.8% 和 37.9%，销量渗透率达到 31.6%，占全球销量比重超过 60%，连续 9 年位居全球第一，保有量突破 2041 万辆 [10]。截至 2024 年 6 月，全国新能源汽车保有量达到 2472 万辆，总充电量约为 242.9 亿千瓦时，同比增长 54.6%。根据国家能源局预计，2025 年、2030 年总充电量将分别为 1423 亿千瓦时、3839 亿千瓦时，将占全社会用电量的 1.9%、4.6% [11]。

1.3 深圳新能源和空调电动汽车负荷的发展情况

“十三五”期间，深圳市清洁能源装机容量占比约 76%，可再生能源 100% 全额消纳。“十四五”期间，深圳市预计将新增新能源装机 45 万千瓦，清洁能源装机容量占比将提升至 81%^[12]。从深圳市现有供电结构来看，电网属典型受端电网，市内电源不能满足电网电力供应需求，叠加中长期来水不确定性带来的西电东送出力水平波动、风光机组出力波动性大等因素，深圳市需要充分调动源荷两侧电力资源灵活性，才能确保电力系统的平稳运行。

空调用电持续拉高电网峰谷差，是当前深圳市虚拟电厂调控的重心。电动汽车充电高峰时段与新能源消纳困难时段匹配良好，是未来参与电力电量平衡的重要资源。深圳市属于南部海滨城市，长夏短冬，自 4 月份开始，逐渐使用空调，7-8 月份空调使用量达到尖峰，10 月份逐渐回落。高峰期空调用电量是低谷期 2.5 倍，空调使用时间可达 6-7 个月。据统计，2023 年深圳市公共建筑空调负荷占全社会用电负荷比约 32%，总空调负荷占比可达 40%-50%，这也导致电力系统的负荷峰值往往与空调负荷峰值高度吻合。2020 年深圳市新能源汽车保有量达到 48 万辆，占全市机动车保有量约 14%；截至 2024 年 6 月，深圳市机动车保有量约为 426.3 万辆，其中新能源汽车达 108 万辆，占全市机动车保有量约 25%。最高充电负荷超 1300 兆瓦，占深圳市最大负荷的比例超 6%，年充电量约 43 亿度，占深圳市全社会用电量 4%。公交车、出租车和网约车已全面电动化，预计 2035 年新能源汽车保有量约 290 万辆，最大充电负荷超过 3500 兆瓦^[13]。

2 国际虚拟电厂建设经验

各国基于自身的能源资源禀赋和市场需求，采取了多种措施来推动虚拟电厂的发展。在不同层面对我国虚拟电厂建设提供了一定的借鉴意义，然而，这些经验往往是在当地电力市场相对成熟、资源相对丰富的背景下形成的，一些条件在国内尚未完全具备，因此应结合我国实际情况进行调整。

2.1 因地制宜发展特色虚拟电厂

欧洲是虚拟电厂技术发展较早且成熟的地区之一，主要通过聚合分布式发电资源进行统一协调管理，以确保电力系统稳定运行。在欧洲商业化的虚拟电厂领域，虚拟电厂通常由独立第三方运营商、发电厂以及 TSO(Independent System Operator, TSO) 合作运营 [14]。德国结合自身可再生能源发展需求，重点解决新增分布式电源并网和市场交易问题。英国将灵活电力市场机制纳入能源战略，重点解决市场交易和平衡服务的机制障碍问题。法国明确虚拟电厂参与市场的门槛和机制，引导技术发展方向，确保虚拟电厂发展符合电网需求。

美国是虚拟电厂发展较早的国家之一，在虚拟电厂建设、法律法规、试点案例等方面均有较为深入的探索。主要聚合分布式发电、储能系统、可控负荷等资源，以聚焦可控负荷的需求响应为主，灵活调节电网负荷、支持电网调峰调频需求。需求响应参与总量占美国电力市场总高峰负荷的比例达到 6%-7%[15]。由于电网体系独立且运营商高度分散，由东部互联电网、西

部互联电网以及德克萨斯电网这三大电力互连系统组成，基本彼此独立运行，且相互之间的电力传输有限，其电力市场既有批发也有零售，与终端用户的互动更为紧密，这种分散的市场结构使虚拟电厂的多样化发展成为可能。

2.2 明确法律框架，为虚拟电厂发展提供保障

法律框架是虚拟电厂发展的重要保障。德国发布了《虚拟电厂技术指南》，规定了虚拟电厂的技术要求和运营规则，为虚拟电厂的发展提供了制度保障。《可再生能源法》规定超过 100 千瓦的可再生能源必须参与电力市场以及补贴鼓励中型需求响应资源聚合虚拟电厂，以推动商业化 [16]。美国自 1992 年起先后制定了《能源政策法》、《能源独立与安全法》《美国复苏与再投资法案》等一系列支持响应发展的法规政策，为需求响应资源参与电能批发市场、辅助服务市场、容量交易等提供了法律基础和政策环境 [17]。

2.3 多层次平衡机制提升电力市场效率

德国电力市场的平衡机制是保障电力系统供需平衡的重要工具。平衡机制是基于“平衡基团” (Balancing Group) 的概念，采用了分层次管理与逐级平衡的策略，通过严格预测和偏差费用结算，提高了电力市场的供需平衡效率 [18]。德国电力市场中的发电企业和用户会被分配到特定的“平衡基团”，由一个平衡责任方 (Balancing Responsible Parties, BRP) 管理。BRP 必须对第二天每 15 分钟的电网接入和退出进行准确的预测，确保平衡组内总发电量 + 总外购电量 = 总用电量，如果出现偏差，平衡责任方需支付相应的偏差费用。现已有 24 个欧洲国家实行了平衡基团机制，组成了国际电网控制合作组织，并按照“平衡基团内平衡→输电网控制区内平衡→国内跨区域平衡→欧洲电网控制合作组织 (International Green Climate Change Cooperation, IGCC) 成员国内平衡”的层级体系，实现跨国电力资源调度。当某一层级无法实现平衡时，可以调用上一级资源。



图 2-1 电力市场平衡机制中主要参与方关系图

2.4 制定统一的技术标准和通信协议，实现设备互联互通

技术标准化是虚拟电厂高效运作的关键，通过标准化通信协议实现不同设备和系统间的互联互通，显著提升响应的精确性和速度。采用 OpenADR (Open Automated Demand Response) 或 OCPP(Open Charge Point Protocol) 等标准，用户授权后即可让空调、充电桩等设备参与响应，实现与电网和运营商的远程协调。这种通信协议的标准化确保了不同品牌、不同类型的设备之间的兼容性，并保障了电网与充电负载的实时调度。此外，通信协议的安全性同样重要，需要安全的加密技术保护用户隐私和数据安全。例如，美国的电力服务公司 SCE 和 PG&E 在响应的通信过程中广泛使用了 AES-256(Advanced Encryption Standard) 加密标准，确保用户的隐私得到有效保护，并防止数据泄露或网络攻击。

2.5 推广智能设备与控制技术，提升能效与需求响应便捷性

智能设备的广泛应用提高了电力系统的需求响应速度和能效管理精度。例如，智能电表和物联网设备的实时监测与调节功能，使用户能主动调整能源使用。欧盟通过能源系统

数字化行动计划，能物联网设备和仪表的推广，支持采用智能家电。目前欧盟 51% 的家庭和中小企业配备了智能电表。

智能控制技术让用户参与响应更便捷，在空调负荷和电动汽车充电管理方面提供有力支持。通过智能恒温器和手机 APP，用户可以远程控制空调的运行，并根据电价信号和响应事件调整用电设置。例如，美国加州的 Smart AC 计划和英国的 Octopus Energy 允许用户选择偏好温度和响应条件，系统自动在合适的时段控制空调负载。这些措施大大提升了用户参与需求响应的便捷性。许多电动汽车充电项目也提供手机应用控制功能，允许用户设定车辆的充电时间。例如，美国 PG&E 为电动汽车车主提供了智能手机 APP 服务，用户可以通过智能手机 APP 远程设置车辆充电时间，系统会自动在电价较低的时段充电，确保用户以最具经济效益的方式完成充电。

2.6 多元化商业模式与激励措施推动虚拟电厂发展

虚拟电厂的发展离不开丰富的商业模式和有效的补贴激励措施。不同国家通过多样化的运营模式和激励政策，降低了用户参与门槛，提高了虚拟电厂的普及率。多样化的商业模式和激励措施是虚拟电厂发展的重要驱动力。如基于社区（用户）的商业模式、发电企业模式、基于电网公司的平台模式（英国特有）、发电商 + 售电商混合型、“电网发起采购”的模式（法国特有）、第三方运营的混合型模式、售电企业运营的混合模式等。美国建立了固定费率补偿和市场交易机制相结合的需求响应补贴机制，对于是否具备竞争市场机制的系统设定了不同的策略。美国能源部提供 30 亿美元联邦贷款，支持虚拟电厂推广，同时向用户提供充电桩安装补贴和智能控制设备奖励计划（如 Smart AC 项目）。这些政策不仅降低了用户参与的经济成本，还扩大了响应用户的覆盖范围。

另外，各国针对不同的需求响应项目，分别设置了相关注册奖励和设备补贴。在充电桩运营方面，电力公司通常负责支付基础设施建设费用，而用户则承担设备的安装和维护。美国 Charge Ready 项目为弱势社区和企业提供高达 50% 的充电桩折扣，EV Charging 项目最高可获得 2 万 5 美元的安装补贴。这种政策支持旨在减少电动汽车充电基础设施的初期投资成本，鼓励更多用户安装和使用电动汽车充电设施 [19]。Smart AC 项目为首次

参与响应的用户提供免费的智能控制设备安装，同时提供一次性注册奖励（如 75 美元），这不仅减少了用户参与的技术和经济门槛，还帮助电力公司扩大响应用户的覆盖范围 [20]。

2.7 电价激励与响应奖励优化用户行为，提升电网效率

电价激励和响应奖励机制是引导用户合理用电、缓解电网高峰负荷压力的有效手段。尖峰电价引导负荷转移，可缓解高峰时段压力。特别是对于空调，在高峰时段实施尖峰定价（通常为常规电价的 2 到 5 倍）可有效引导用户在高峰时段减少用电，通过分时电价引导用户改变用电行为，促使用户在高峰时段预冷或减少使用空调，从而有效降低电网负荷压力。响应奖励机制吸引用户参与响应计划。空调用户在参与响应后，根据响应次数、时长及减少的电量获取账单折扣或直接奖励，每次响应可获得 1 至 5 美元的奖励。在 **Charge Ready** 项目中，用户须参加响应计划，并在特定时段（如下午 4 点到晚上 9 点的高峰时段）调整其充电行为，参与者不仅可获得 2 美元 / 千瓦时的响应补贴 [21]，还帮助电网实现实时调节供需平衡，为电力系统提供调峰资源。

3 深圳市虚拟电厂 现状与经验

3.1 深圳虚拟电厂发展现状

3.1.1 虚拟电厂发展迅速，电网局部调节压力增加

近年来，深圳市全社会用电消费量整体呈现上升趋势，从 2015 年 851 亿千瓦时增长至 2022 年 1074 亿千瓦时，年均增长率达 4%^[22]。其中，第三产业 + 居民用电消费量增速明显。预计深圳全社会用电量“十五五”之前仍保持中速增长，2030 年之后电量增速逐步放缓。2035 年后在碳中和目标的约束下，预计电量进入饱和增长阶段，增速降至 1% 以下。用电结构在“双碳”影响下，深圳产业向更加高端化、高产值、低能耗的方向发展。一方面，深圳市经济结构发展中，第三产业为主的服务业在未来将在 GDP 中占据主要因素；另一方面，居民用电量的快速增加意味着深圳市用电需求将进入高位区间。在用电快速增长和土地资源受限的背景下，深圳的“三高一限”特征（高负荷、高密度、高端产业和土地资源有限）推动了虚拟电厂建设的必要性。

3.1.2 新能源蓬勃发展为虚拟电厂奠定基础，新型负荷增长迅速，电动汽车和空调具备显著调节响应潜力

深圳的新能源产业发展迅速，2022年新能源产业增加值约810亿元，例如：“20+8”计划为新能源汽车等产业提供了高质量发展的政策支持。根据《深圳市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划》，深圳市将加强绿色低碳产业的发展，虚拟电厂的建设将有助于提升新能源产业集群的竞争力。随着新型电力系统的建设不断推进，截至2023年底，深圳虚拟电厂接入资源容量超过2650兆瓦，接入资源数量47174个，可调容量约560兆瓦。其中，建筑楼宇接入数量399个，接入容量约237.9兆瓦，可调容量32.7兆瓦；工业负荷接入数量33个，接入容量约452.3兆瓦，可调容量103.6兆瓦；工业负荷接入数量33个，接入容量约452.3兆瓦，可调容量103.6兆瓦；充电桩负荷接入数量约3.9万个，接入容量约1101.5兆瓦，可调容量388.5兆瓦。截至2024年5月，深圳市已建成充电设施33万个，车网互动示范站137座，可调节电力超400兆瓦。预计到2025年，深圳市虚拟电厂接入容量将达到9000兆瓦，最大调节容量达1000兆瓦，形成年度最大负荷5%左右的稳定调节能力，每年可减排温室气体约54万吨。

3.1.3 虚拟电厂的商业模式主要以参与响应获取响应补贴为主

深圳虚拟电厂管理中心参与电网调控，聚合商主要通过参与响应获利，其商业模式示意图如图3-1。接入深圳虚拟电厂平台的市场主体主要通过3种方式获取激励[5]。1) 广东省市场化响应补贴。日前邀约，价格上限3.5元/千瓦时。日内局部响应，价格上限5元/千瓦时。2) 深圳政府建立的本地固定补贴。分布式光伏上网电量0.3元/千瓦时，直流充电桩并网容量300元/千瓦、交流充电桩并网容量150元/千瓦。3) 南方电网区域两个细则规定的调峰、调频等辅助服务固定价格补贴。独立储能0.792元/千瓦时，直控型可调节负荷，填谷0.132-0.792元/千瓦时，削峰0.264-1.584元/千瓦时。

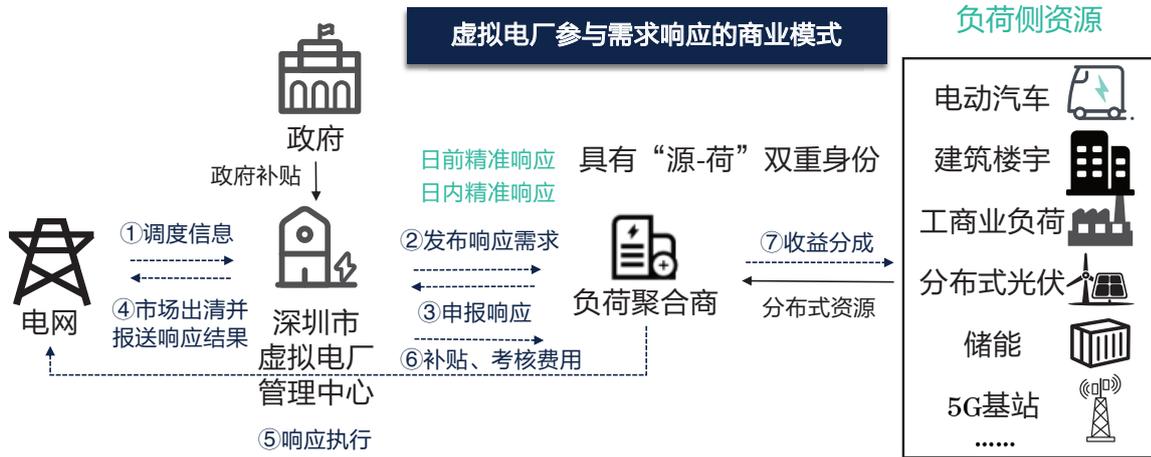


图 3-1 虚拟电厂参与响应的商业模式

3.2 深圳虚拟电厂管理平台建设成效

(1) 参与市场情况

负荷资源整合丰富，聚合商丰富。目前，深圳虚拟电厂管理平台已经成功整合了来自 45 家运营商的资源网络，覆盖了建筑楼宇空调、新能源汽车充电、5G 基站供电、冰蓄冷空调系统等九大类共计 5.5 万个可调负荷单元，共计接入资源容量 2650 兆瓦，可调容量为 560 兆瓦。

依托深圳财政支持，开展本地精准响应。日前精准响应申报价格上限为 3.5 元/千瓦时、下限为 1.5 元/千瓦时，实时精准响应补贴价格为 5 元/千瓦时，补偿资金来源于政府补贴。2023 年度内，共开展 33 次精准响应，28 次日前响应，5 次实时响应，累计调节电量约 1285 兆瓦 h，最大调节功率约 210 兆瓦，减少碳排放约 1074.3 吨，为各虚拟电厂运营商带来经济收益约 450 万元，创造社会直接经济效益达 3418.1 万元。

积极参与跨省备用。2023 年 11 月，深圳地区 7 家虚拟电厂作为第三方独立主体参与跨省备用市场交易，首次与其他常规电源发电主体同台竞价，日前出清最大中标容量约为 24 兆瓦。响应区域调频。2023 年 5 月，深圳供电局联合南网科研院运用 5G 专用切片技术在国内首次验证了虚拟电厂调频技术，标志着深圳虚拟电厂基本具备实体电厂功能，力

争年底参与区域调频市场。积极扩展沟通广东交易中心与广东电网，将深圳虚拟电厂纳入广东电力交易市场体系，实现“深圳经验”区域传递。

(2) 虚拟电厂技术创新情况

目前，深圳构建了国内首个网地一体虚拟电厂调控管理平台，也是唯一一家打通与电网调度系统接口的平台，实现对负荷侧资源“可观、可测、可控、可用”，涵盖秒级、分钟级数据实时采集，可实现微小时段、微小负荷的精准灵活调控，覆盖电力市场多类场景，实时为电网调节各类调节能力，实现了电力灵活性资源物理 - 信息 - 价值的多维传递。

(3) 生态与产业情况

针对接入用户成立专属服务团队，从接入流程指导，政策解读、设备改造、平台接入等方面提供“多对一”服务模式，目前已成立服务小组 103 个。通过线上培训和实战演练相结合的方式，在深圳形成一批能够高质量和电网互动的虚拟电厂运营商。通过管理带动 90 余家企业进入虚拟电厂产业链，强化了新能源产业集群发展动能。

协助政府有效制定虚拟电厂系列政策，先后参与制定《深圳市虚拟电厂落地工作方案(2022-2025 年)》《深圳市虚拟电厂精准响应实施细则》和《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施》等。推动成立新型电力系统负荷侧资源灵活调控技术标准化工作组，发布了南方电网虚拟电厂领域首个技术标准《虚拟电厂运营管理系统功能规范》，立项团体标准 / 企业标准共 10 余项，申请行业标准 6 项。并支持深圳市市场监督管理局正式批准发布了《分布式光伏接入虚拟电厂管理云平台技术规范》等三项地方标准。

3.3 深圳市虚拟电厂建设经验

当前，深圳市虚拟电厂通过一系列对可调度资源的深度挖掘和技术手段应用的示范探索，为国内其他地区虚拟电厂的构建提供了有益的思路，同时，对照欧美等发达国家和地区的虚拟电厂管理模式，深圳市虚拟电厂的发展还面临着诸多挑战。

(1) 深圳市虚拟电厂管理平台具有先锋示范作用。深圳市的虚拟电厂建设在虚拟电厂管理平台的建设、技术应用和标准制定方面具有较高的示范效应。其虚拟电厂管理平台具

备较强的调度和管理能力，负荷资源整合能力强，实现了多种资源的智能化调控，聚合商丰富，目前已接入平台资源数量超过 3 万个。共计接入资源容量 2650 兆瓦，可调容量为 560 兆瓦。

(2) **深圳市响应综合收益可观，积极增强电力市场的活力和效率。**深圳市响应频次高，市场活跃度强，为鼓励更多资源聚合商参与，其补贴力度较大。峰谷电价和低电价时段蓄冷的优惠政策增加了聚合商响应的意愿，增加了其峰谷套利的机会。蓄冷电价的峰平谷电价比为 1.65:1:0.25，相较于珠三角五市峰谷分时电价的峰平谷比价 1.7:1:0.38，谷时充电成本大幅下降，同时峰谷价比从 4.47 变为 6.6，峰谷价差进一步促进了蓄冷空调移峰填谷。深圳市正积极推动与广东省电力现货市场的有机融合，以增强电力市场的活力和效率。目前，深圳市虚拟电厂通过参与广东省电力市场的交易活动，逐步与广东省电力市场的标准和规则接轨，探索与省级虚拟电厂相协调的运营模式，以实现更大规模的资源整合和调度能力提升，更广泛的市场接入和资源优化配置。

(3) **空调和电动汽车的响应潜力上具有较大的资源优势，然而用户的实际参与意愿仍显不足。**2023 年，深圳市以累计约 173 万辆的新能源汽车产量，位列全国第一。“车网互动”（V2G）发展走在全国前列，空调负荷在电网负荷占比大，未来调控潜力巨大。虽然深圳市对商业和工业部门实施了峰谷实行分时电价，但居民用电大部分为阶梯电价，因此居民用户缺少将消费转移到非高峰时段的动力。同时单个楼宇空调响应项目改造投资较大，可调负荷有限，性价比不高，难以回收投资，而电动汽车充电桩的改装也需要一定的成本，车主参与 V2G 收益不高。

4 深圳市响应潜力和效益评估

根据深圳市虚拟电厂建设总体情况，报告将描述深圳市调节灵活性资源带来的潜力和经济效益，并以空调和电动汽车两大用电大户作为案例进行评估。由于基础电力负荷数据的难以获取，且目前深圳市电力市场并未纳入全部类型的电动汽车，居民峰谷电价仍未普及使用，本报告基于特定假设和技术对电力负荷数据进行了大致估算，未来深圳市空调和电动汽车的效益研究仍依托于地方实际的证据。

4.1 响应潜力评估

4.1.1 空调响应潜力

针对商业、工业和居民部门，本报告对上述三类对象进行了初步空调响应潜力评估和考察。

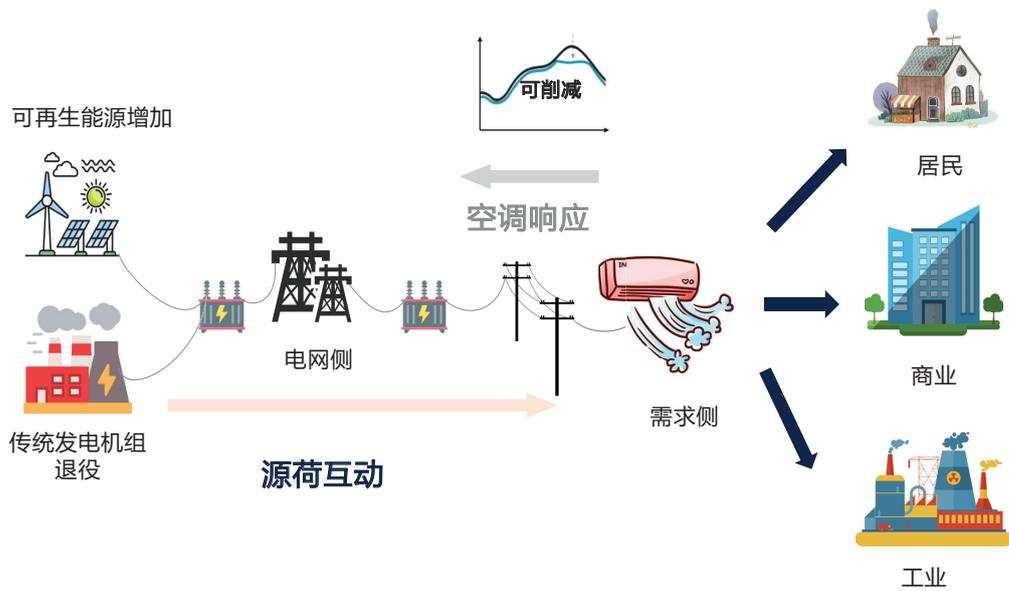


图 4-1 空调灵活性调控主体

居民空调响应潜力评估方法

步骤 1：居民空调逐时负荷的生成。参考已有文献，通过华南地区居民空调使用情况调研数据提取，构建典型家庭户空调用能画像，刻画与表征典型家庭户空调使用特性；基于 EnergyPlus 空调能耗模拟软件，生成典型家庭逐时空调用电数据。假设家庭空调用电行为每天重复出现，估算制冷季典型家庭逐月空调耗电量，在此基础上匹配各类典型家庭户数预测，估算 2025 和 2030 年全市居民空调夏季空调用电量，加入全年居民空调用电量比例参数假设，生成居民全年总耗电量，结合统计年鉴居民用电量进行校准。

步骤 2：居民空调需求负荷的生成。结合深圳市历年夏季平均气温，预测深圳市中性温度和老年人最高耐热温度。考虑不同家庭户热舒适度约束，设置不同情景参数，估算每类家庭户可削减的空调负荷。

工商业空调响应潜力评估方法

步骤 1：工商业空调逐时负荷的生成。结合工商业全年用电量，假设典型工商业年度用电强度，确定每类行业的建筑面积。参考既有文件关于公共建筑月空调用电强度披露数据，自上而下确定工商业月度空调用电量。同时，构建原型建筑模型，设置相关能耗参

数，通过改变空调设置温度参数不断拟合工商业全年用电量，确定市级尺度工商业空调基线负荷。

步骤 2：工商业空调响应潜力估算。针对深圳市蓄冷技术渗透率的增加，设置不同情景参数，基于热舒适度约束考虑不同蓄冷渗透率下工商业削减的空调负荷，进行高峰时段工商业空调响应潜力估算。

空调响应潜力评估结果

深圳市空调高峰用电时段为 13:00-14:00 时段，与电网用电高峰时段吻合。依据本报告测算高峰时刻各部门响应潜力，深圳市总体空调响应潜力如下：

- ◎ 基本情景：2025 年深圳市空调响应潜力约 696 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市最高用电负荷¹3%；2030 年深圳市空调响应潜力为 1386 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市最高用电负荷 5%。
- ◎ 中等情景：2025 年深圳市空调响应潜力约 1677 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市最高用电负荷 7%；2030 年深圳市空调响应潜力为 2970 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市最高用电负荷 11%。
- ◎ 最佳情景：2025 年深圳市空调响应潜力为 2866 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市最高用电负荷 12%；2030 年深圳市空调响应潜力为 4844 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市最高用电负荷 16%。

1 根据深圳市供电局披露的 2021 年深圳市全社会负荷数据和深圳市用电量增长趋势，报告估算深圳市用电高峰时段出现在 13:00-14:00，2025 年最高用电负荷约 24977 兆瓦，2030 年最高用电负荷约 28166 兆瓦。

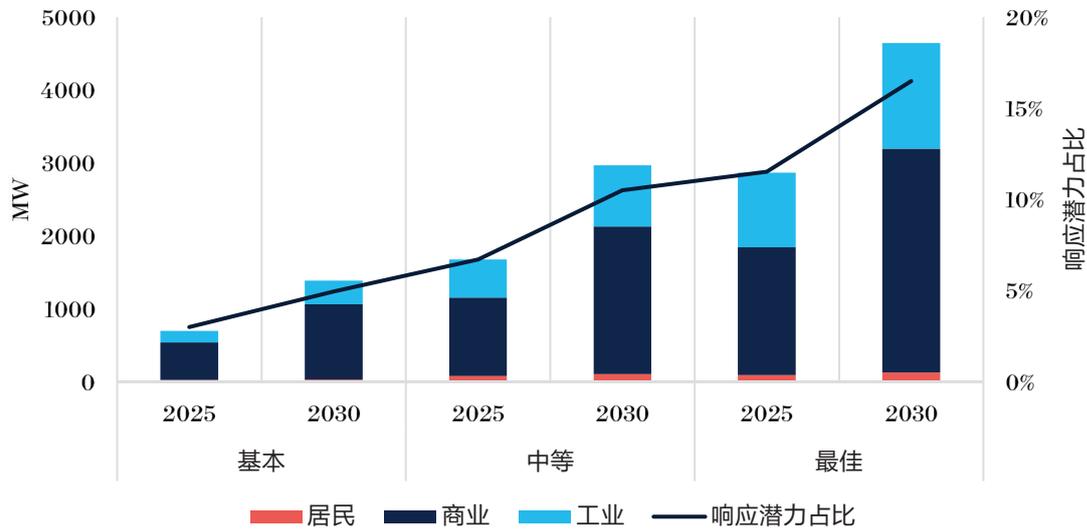


图 4-2 2025-2030 年深圳市空调响应潜力

4.1.2 电动汽车响应潜力

电动汽车响应潜力评估方法

针对不同类型电动汽车，考虑电动汽车充电特性和充电时间分布，预测不同类型电动汽车保有量，在此基础上模拟不同类型电动汽车典型日充电负荷。参考深圳市分时电价场景设置，假设深圳市电动汽车开展有序充电活动，储能充电由午夜零点启动调整至凌晨 5:00²，假设不同类型电动汽车转移率，估算电动汽车响应潜力。根据电动汽车响应潜力，估算电动汽车转移负荷带来的各项经济效益。

² 根据估算，深圳市用电低谷期出现在 5:00-6:00，2025 年深圳市低谷期用电负荷约 15720 兆瓦，2030 年深圳市低谷期用电负荷约 17727 兆瓦。

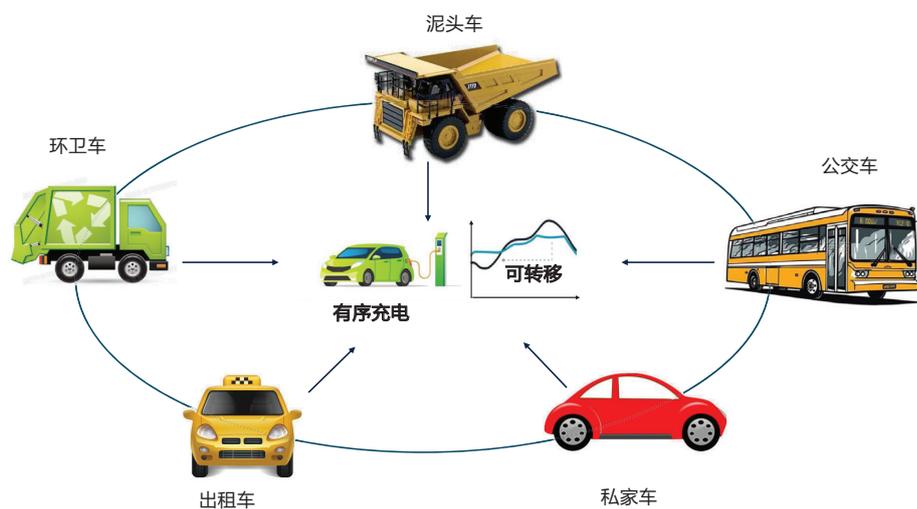


图 4-3 电动汽车灵活性调控主体

电动汽车响应潜力评估结果

参考南方电网车网互动平台响应示范数据，深圳市电动汽可将充电开始时间转移由午夜零点转移至凌晨 5:00。深圳市电动汽车响应潜力如下：

- ◎ 基本情景：2025 年深圳市电动汽车响应潜力约 556 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市低谷用电负荷 4%；2030 年深圳市电动汽车响应潜力约 803 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市低谷用电负荷 5%。
- ◎ 中等情景：2025 年深圳市电动汽车响应潜力约 957 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市低谷用电负荷 6%；2030 年深圳市电动汽车响应潜力约 1471 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市低谷用电负荷 8%。
- ◎ 最佳情景：2025 年深圳市电动汽车响应潜力约 1194 兆瓦，响应潜力占 2025 年深圳市低谷用电负荷 8%；2030 年深圳市电动汽车响应潜力约 1859 兆瓦，响应潜力占 2030 年深圳市低谷用电负荷 10%。

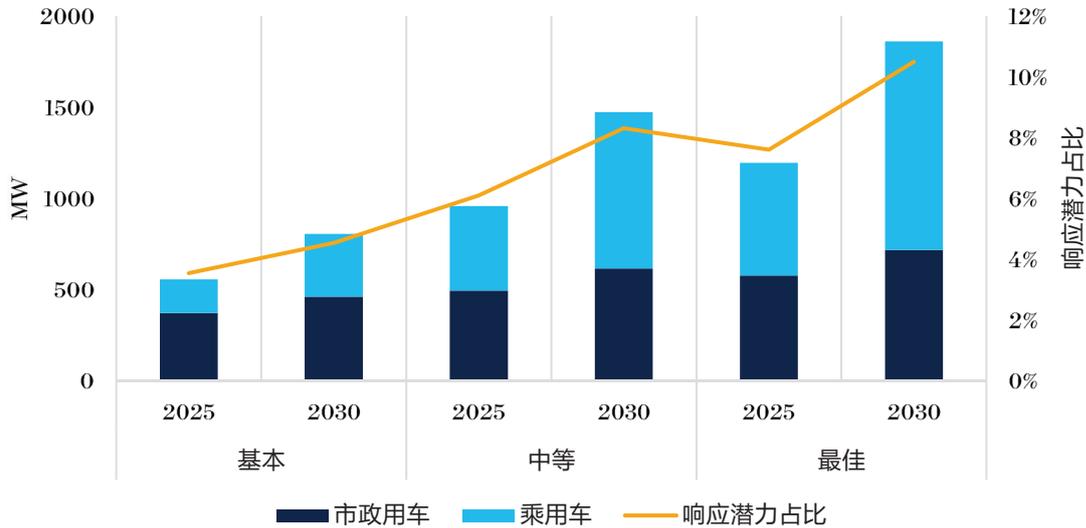


图 4-4 2025-2030 年电动汽车响应潜力

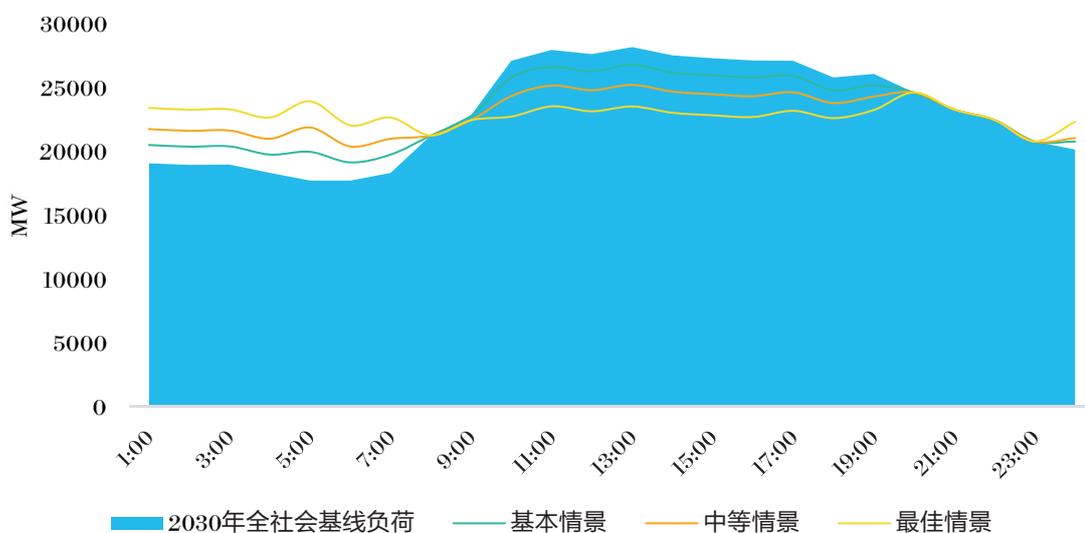
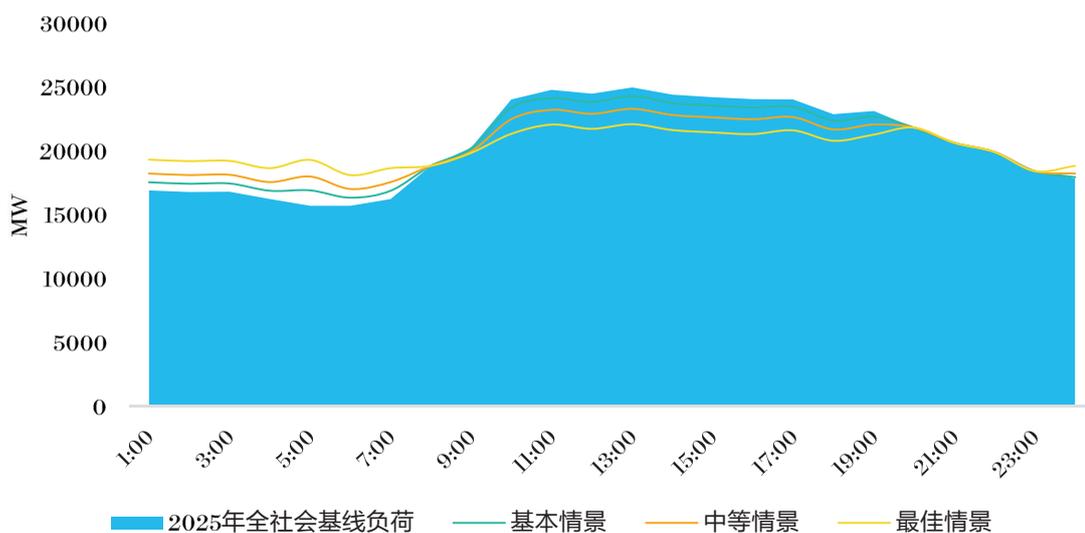
4.1.3 全社会用电负荷影响

依据深圳市空调和电动汽车潜力估算，本报告综合分析多时段下两者对全社会用电负荷影响。考虑到深圳市工商业空调存在蓄冷现象，假设深圳市工商业空调在低谷时期完成蓄冷 (0:00-8:00)，储蓄冷量在用电高峰期 (10:00-19:00) 进行释放。叠加空调 + 电动汽车响应后，深圳市 2025 年、2030 年用电负荷变化趋势如下所示：

- ◎ 基本情景：2025 年深圳市空调实施响应时，高峰负荷约 24287 兆瓦，低谷负荷约 16917 兆瓦，削峰潜力由空调响应贡献，可占全社会最高用电负荷 3%，填谷潜力由空调和电动汽车响应共同作用，可占全社会低谷负荷 8%，其中，空调蓄冷贡献 4%，电动汽车转移充电贡献 4%。2030 年深圳市实施响应时，高峰负荷约 26772 兆瓦，低谷负荷约 19964 兆瓦，削峰潜力可占全社会最高用电负荷 5%，填谷潜力可占全社会低谷负荷 13%，空调蓄冷贡献 8%，电动汽车转移充电贡献 5%。
- ◎ 中等情景：2025 年深圳市实施响应时，高峰负荷约 23301 兆瓦，低谷负荷约 18000 兆瓦，削峰潜力可占全社会最高用电负荷 7%，填谷潜力可占全社会低谷负荷 14%，空调蓄冷贡献 8%，电动汽车转移充电贡献 6%。2030 年深圳市实施响应时，高峰负荷约 25207 兆瓦，低谷负荷约 21873 兆瓦，削峰潜力可占全社

会最高用电负荷 11%，填谷潜力可占全社会低谷负荷 23%，空调蓄冷贡献 15%，电动汽车转移充电贡献 8%。

- ◎ 最佳情景：2025 年深圳市实施响应时，高峰负荷约 22100 兆瓦，低谷负荷约 19304 兆瓦，削峰潜力可占全社会最高用电负荷 12%，填谷潜力可占全社会低谷负荷 23%，空调蓄冷贡献 15%，电动汽车转移充电贡献 8%。2030 年深圳市实施响应时，高峰负荷约 23521 兆瓦，低谷负荷约 23920 兆瓦，削峰潜力可占全社会最高用电负荷 16%，填谷潜力可占全社会低谷负荷 35%，空调蓄冷贡献 25%，电动汽车转移充电贡献 10%。



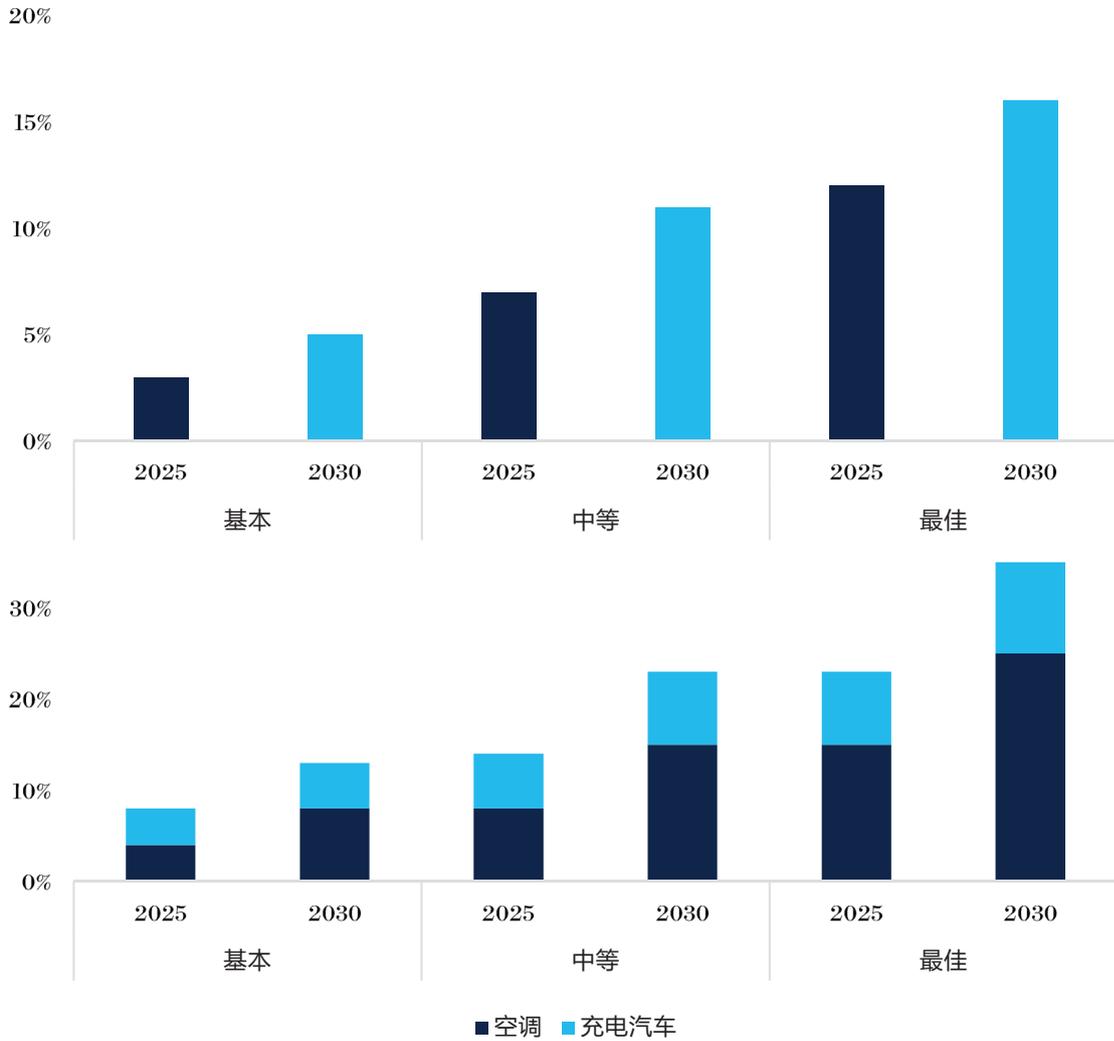


图 4-5 2025-2030 年深圳市全社会用电负荷变化

4.2 灵活性资源响应经济性评估

灵活性资源响应经济性评估方法

考虑调控各类灵活性资源项目在实际运行中产生的激励费用，核算负荷侧响应成本；结合深圳市调峰发电结构，假设深圳市调峰情景，计算电源侧发电机组提供灵活性能力所需成本，比较源荷两侧经济性效益，估算各类灵活性资源调控带来的净经济效益。

灵活性资源具有多种经济效益。从输配电角度出发，在负荷侧实施灵活资源响应是管理意外事件，避免电力中断的有效措施。因此，本报告从国民经济生产视角，估算了因电力中断可减少的国内生产总值³ (GDP)。此外，考虑到电动汽车主要参与响应项目类别为价格型响应，本报告从需求侧视角出发，结合调研数据估算了可避免的购电成本。

表 4-1 不同灵活性调控项目对电力系统的潜在效益

	空调	电动汽车
发电侧	<ul style="list-style-type: none"> 调峰机组的发电成本¹： 与调峰次数和发电容量相关 主要为扩容机组建设成本 二氧化碳排放成本 灵活性煤电调峰：0.46-2.18 元 / 千瓦时 抽水蓄能调峰：2.18-13.08 元 / 千瓦时 气电调峰：2.69-16.13 元 / 千瓦时 	<ul style="list-style-type: none"> 调峰机组的发电成本（可能存在）： 与调峰次数和发电容量相关 主要为扩容机组建设成本 二氧化碳排放成本 灵活性煤电调峰：0.46-2.18 元 / 千瓦时 抽水蓄能调峰：2.18-13.08 元 / 千瓦时 气电调峰：2.69-16.13 元 / 千瓦时
输配电侧	<ul style="list-style-type: none"> 缓解输配电网拥塞成本 意外事件造成电力中断损失的经济成本 电网升级改造的投资成本 	<ul style="list-style-type: none"> 电网升级改造的投资成本 调控电力系统供需平衡付出的技术成本
需求侧	<ul style="list-style-type: none"> 参与需求响应进行的经济补贴：0.70-3.50 元 / 千瓦时 增加电力市场需求弹性 	<ul style="list-style-type: none"> 参与需求响应进行的经济补贴：0.7-3.5 元 / 千瓦时 避免高峰期充电获得的电价差：0.22-0.63 元 / 千瓦时²

¹数据来源于年调控 5 次 -20 次情景下各灵活性调峰资源单次调度度电成本

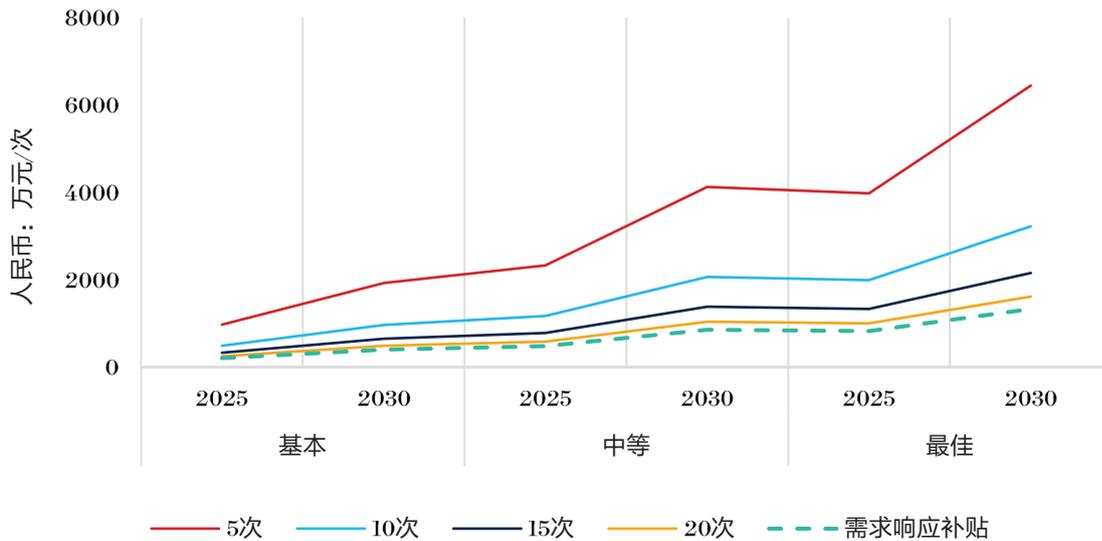
²数据来源于深圳市南网电动 2024 年车网互动示范调研数据

³ GDP 是指国家（或地区）所有常住单位在一定时期内生产活动的最终成果，GDP 是国民经济核算的核心指标，也是衡量一个国家或地区经济状况和发展水平的重要指标。

4.2.1 空调响应经济性评估

(1) 可避免发电成本

当对负荷侧实施灵活性资源调控时，响应次数与电源侧度电成本紧密相关，本报告基于不同响应次数，针对高峰时段 (13:00-14:00) 产生的响应潜力，呈现 2025-2030 年每年实施 5 次空调响应、10 次、15 次和 20 次时可避免的发电成本和经济收益⁴，电源侧可避免建设容量考虑了所需备用容量率 (15%) 和输配电损耗率 (7%)⁵。执行 5 次响应时，最佳情景下，2025 年单次响应电源侧可避免发电成本 3973 万元，实现净经济收益 3156 万元；2030 年单次响应电源侧可避免发电成本 6438 万元，实现净经济收益 5114 万元。执行 20 次响应时，最佳情景下，2025 年电源侧可避免发电成本 922 万元，实现净经济收益 176 万元；2030 年电源侧可避免发电成本 1608 万元，实现净经济收益 284 万元。



4 发电成本和经济效益为不同响应次数情景下，执行 1 次可避免的度电成本和实现的净收益。净经济收益为可避免度电成本与响应补贴之差。根据《广东省电力市场年度报告》数据披露，2021 年广东省用户平均补贴成本为 2.85 元 / 千瓦时。

5 电源可避免建设容量 = 需求侧响应潜力 * (1+ 备用容量率) / (1+ 输配电损耗率)。

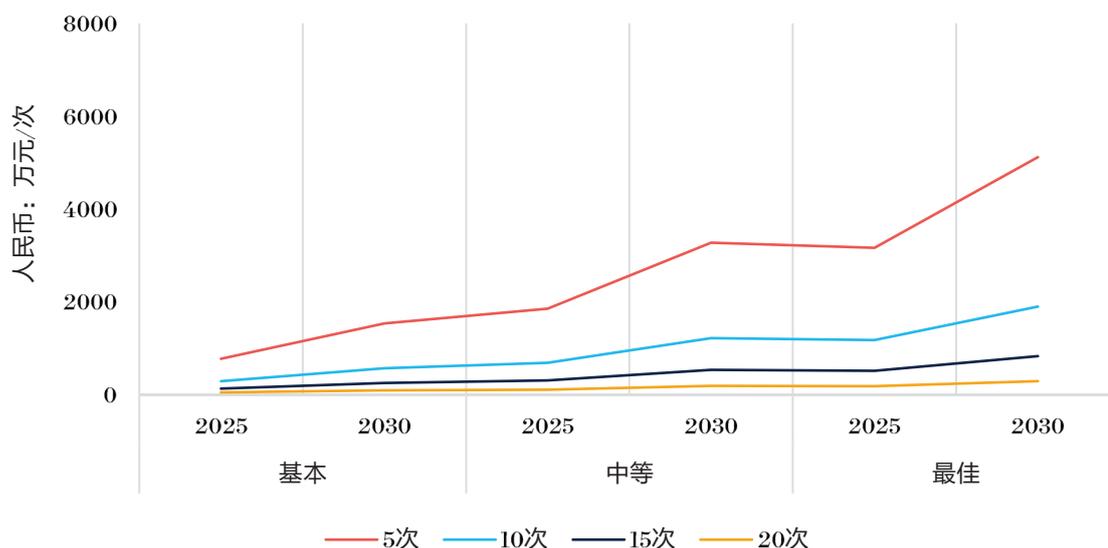


图 4-6 2025-2030 年深圳市空调响应可避免发电成本和净经济收益

(2) 可避免损失 GDP

根据深圳市历史度电 GDP 增长趋势，假设深圳市度电 GDP 按照年均 3% 速度增长，2025 年深圳市度电 GDP 约 33 元 / 千瓦时，2030 年深圳市度电 GDP 约 38 元 / 千瓦时。基本情景下，2025 年深圳市单次避免损失 GDP 约 0.11 亿元，2030 年深圳市单次避免损失 GDP 0.53 亿元；中等情景下，2025 年深圳市单次避免损失 GDP 约 0.55 亿元，2030 年深圳市单次避免损失 GDP 1.14 亿元；最佳情景下，2025 年深圳市单次避免损失 GDP 约 0.95 亿元，2030 年深圳市单次避免损失 GDP 1.78 亿元。

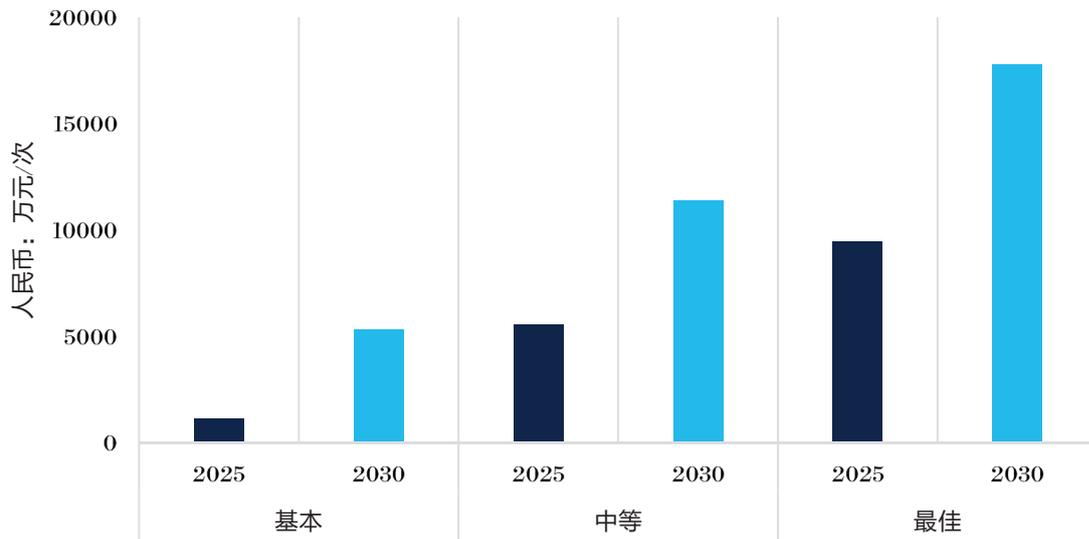


图 4-7 2025-2030 年深圳市空调响应避免损失 GDP

(3) 可避免二氧化碳排放成本

参考《中国区域电网二氧化碳排放因子研究》，2020 年广东省电网排放因子约 0.445 千克 CO₂/ 千瓦时，2025 年广东省电网排放因子约 0.369 千克 CO₂/ 千瓦时，2030 年广东省电网排放因子约 0.332 千克 CO₂/ 千瓦时。基于上述依据估算深圳市空调响应减少的碳排放量。考虑到发电侧所需备用容量和输配电损耗，最佳情景下，2025 年深圳市空调响应可避免二氧化碳排放量约 1308 吨，2030 年深圳市可避免二氧化碳排放量约 1907 吨。以联合国球契约组织倡导的单位减碳成本 (100 美元⁶ / 吨 CO₂) 为依据计算碳排放成本 [22]，最佳情景下，2025 年深圳单次空调响应可避免碳排放成本 95 万元，2030 年深圳单次空调响应可避免碳排放成本 139 万元。

6 假设 1 美元 = 7.27 人民币。

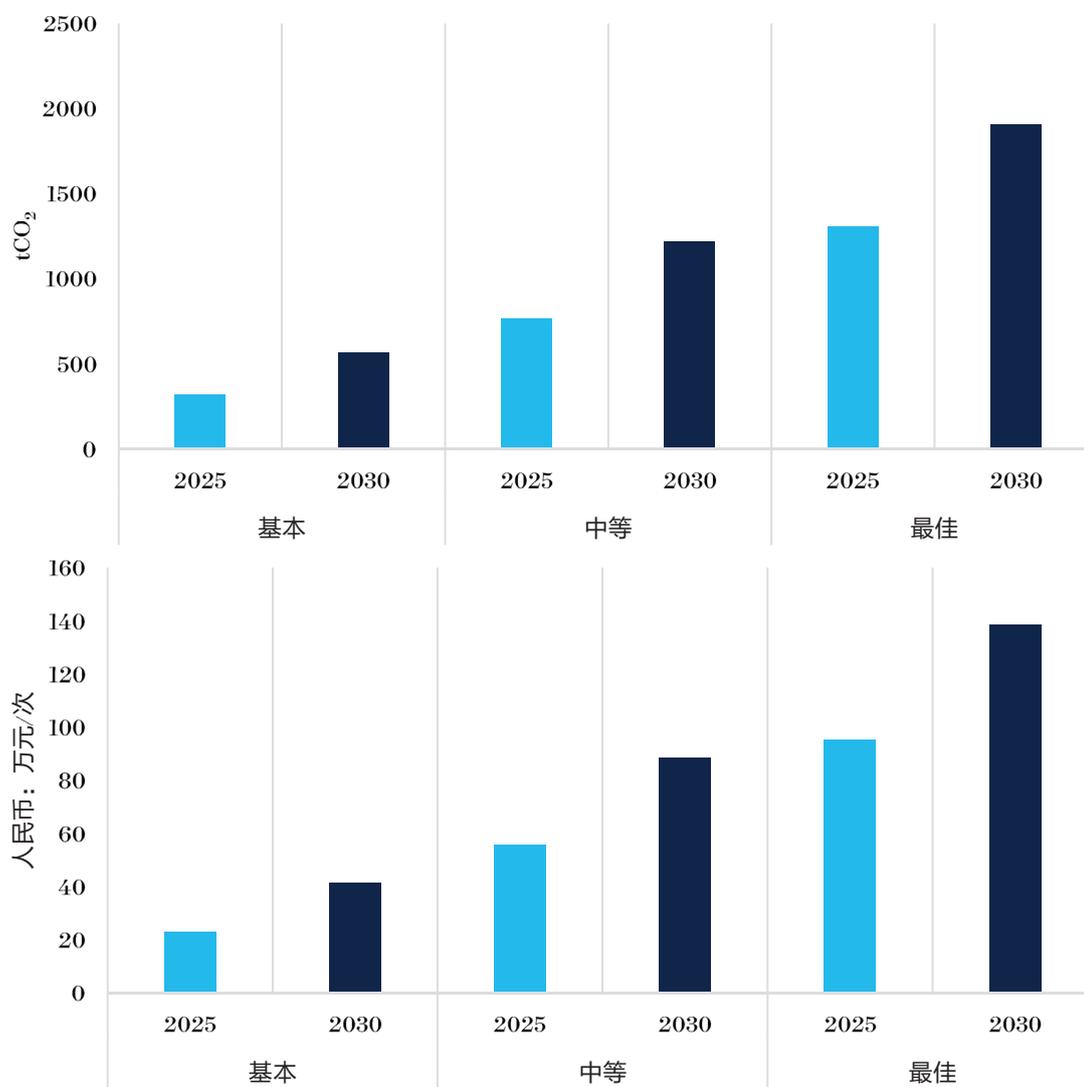


图 4-8 2025-2030 年深圳市空调响应二氧化碳经济收益

4.2.2 电动汽车响应经济性评估

(1) 可避免发电成本

执行 5 次响应时，最佳情景下，2025 年电源侧单次可避免发电成本 1655 万元，实现净经济收益 1314 万元；2030 年电源侧单次可避免发电成本 2577 万元，实现净经济收益 2047 万元。执行 20 次响应时，最佳情景下，2025 年电源侧可避免发电成本 413 万元，实现净经济收益 73 万元；2030 年电源侧可避免发电成本 644 万元，实现净经济收益 114 万元。

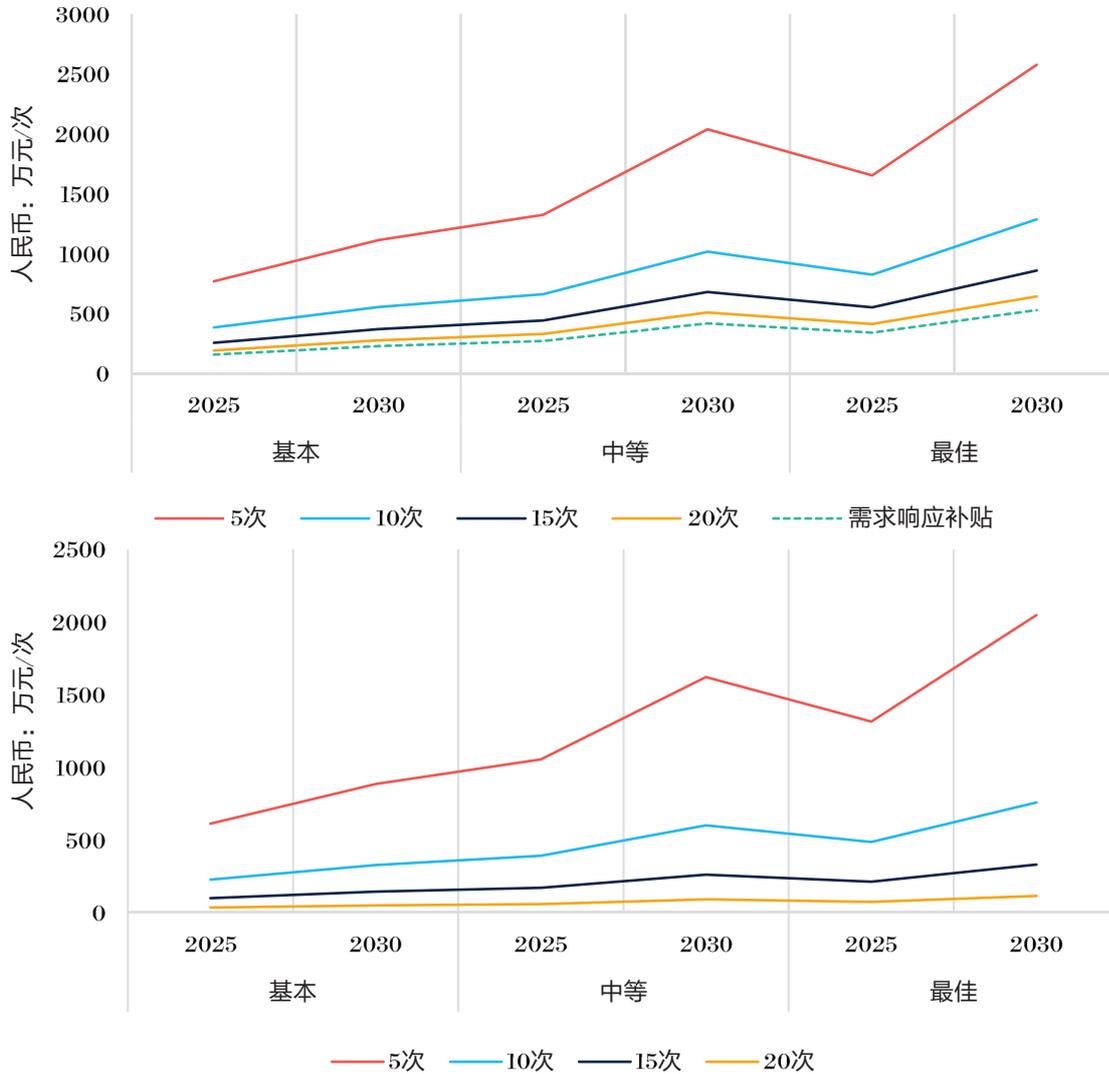


图 4-9 2025-2030 年深圳市电动汽车响应可避免发电成本和净经济收益

(2) 节约充电成本和避免损失 GDP

根据深圳市电力交易中心发布的现货实时市场价格，0-8:00 点内的峰谷电价平均价差 226.59 元 / 兆瓦时，最高可达 629 元 / 兆瓦时。基于上述披露数据估算电动汽车参与响应单次可节约购电成本：最佳情景下，2025 年全社会单次参与响应可节约购电成本 27 万元，2030 年全社会单次可节约购电成本 42 万元。假设深圳市度电 GDP 假设同上，最佳情景下，2025 年深圳市单次避免损失 GDP 0.40 亿元，2030 年深圳市避免损失 GDP 0.71 亿元。

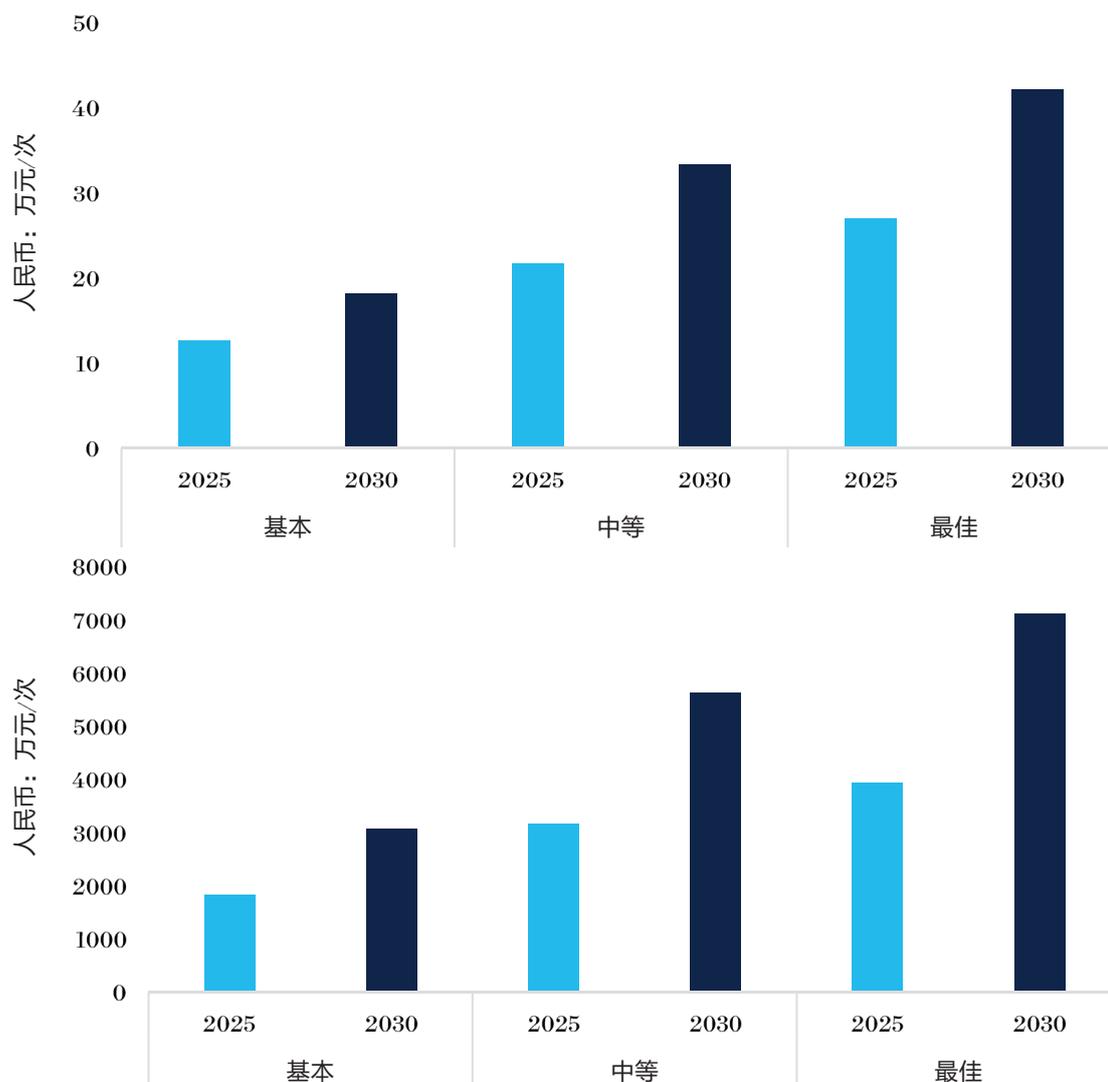


图 4-10 2025-2030 年深圳市电动汽车经济性评估

(3) 可避免二氧化碳排放成本

最佳情景下，2025 年深圳市电动汽车响应可避免二氧化碳排放量约 545 吨，单次可避免碳排放成本 40 万元。2030 年深圳市电动汽车响应可避免二氧化碳排放量约 763 吨，单次可避免碳排放成本 55 万元。

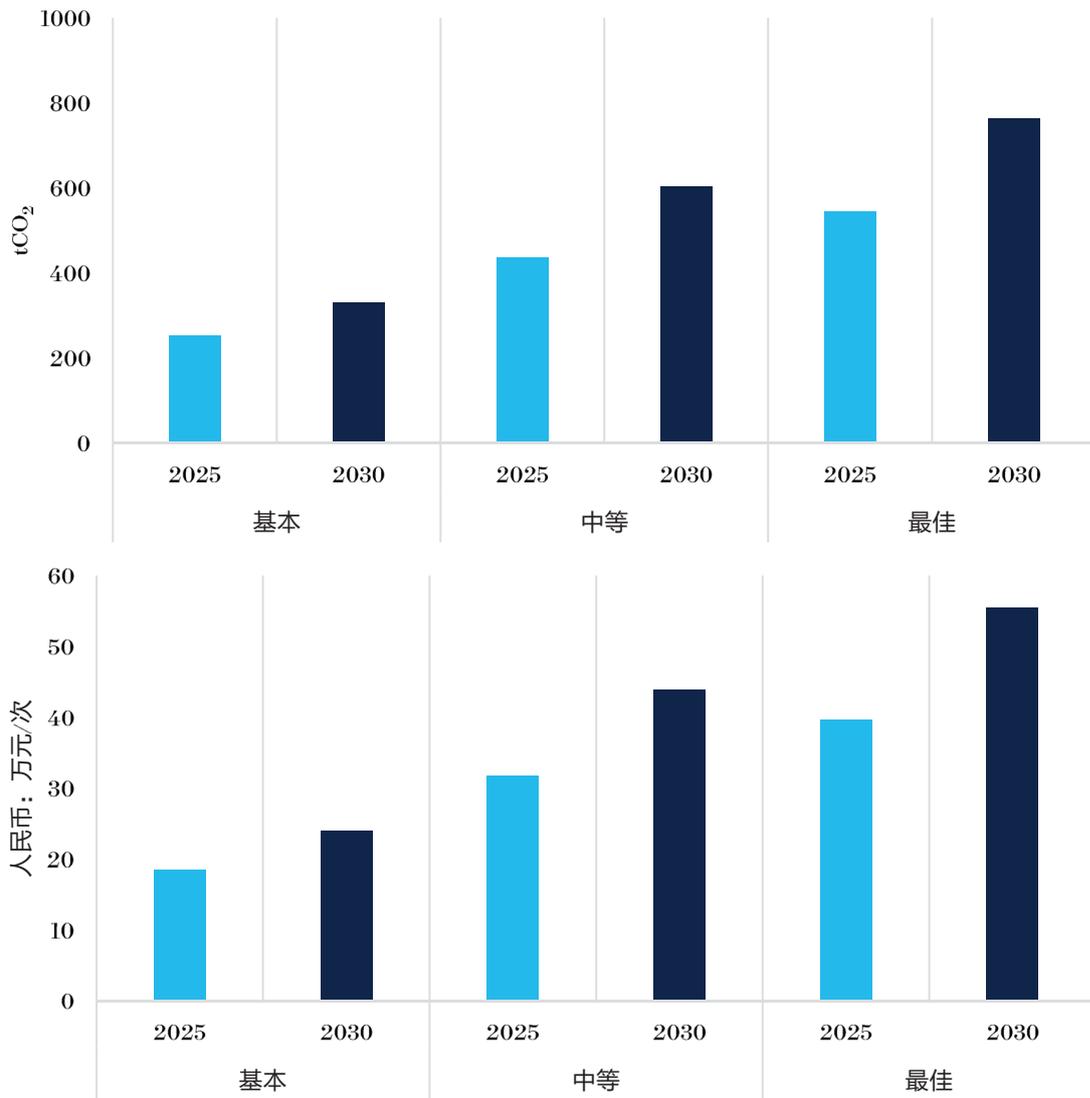


图 4-11 2025-2030 年深圳市电动汽车响应二氧化碳经济效益

5 研究发现和行业建议

5.1 研究发现

5.1.1 空调灵活性调节应考虑舒适性和时间特性，针对不同响应主体进行分别调控，合理配置灵活性资源，通过各类主体优化组合提升响应潜力，形成深圳市用电高峰期 5%-15% 的稳定响应能力。

按照空调对象调控主体不同，可将深圳市空调响应主体划分为居民、商业和工业。居民参与响应主要通过降低室内温度实现，户用空调总量大，但对响应潜力较小、调控分散、难以聚合，且居民电价制度导致响应意愿较低。目前深圳市多人户家庭较多，个体负荷分散，需进行各类家庭户调控级别划分；工商业参与响应可通过调控设置温度和蓄冷技术实现，深圳市以轻工业为主，工业用户对节能成本较为敏感，商业空调普遍温度设置偏低，使用强度大且蓄冷技术渗透率高，具备一定削峰填谷能力。在蓄冷电价政策的激励，以及保证深圳市蓄冷渗透率稳步提高情况下，工商业空调削峰潜力显著，通过市场激励手段引导用户挖掘用电弹性。考虑到深圳市工业生产特性，中长期尺度下深圳市商业空调或可贡献最高潜力。最佳情景下，深圳市居民空调响应潜力贡献占总响应潜力比例约 3%-4%，商业空调响应潜力贡献比例约 61%-67%，工业空调响应潜力贡献比例约 31%-36%，削峰能力达到最大用电负荷 12%-16%。

5.1.2 电动汽车灵活性调节应考虑不同类型电动汽车保有量和行驶特性，确保各类电动汽车有序用电，稳步提升乘用车参与比例。

当前深圳市电动汽车响应调控主要以有序用电、平衡电网负荷、保证电力系统稳定性和可靠性为主。其中市政用车具有使用时间固定、可预测性强的特点，易于实施统一调度且控制力度较强的特点。乘用车由于主体多元化、充电需求分散导致集中管控难度较大。私家车主对价格敏感，且对安全和里程的担忧导致对响应接受度低，此外，充电设施的分布不均和缺乏普及的 V2G 功能进一步限制了车主响应参与度。但随着充电管理智能化水平的提升以及政策激励的增加，结合深圳市车网平台互动示范结果和目前深圳市电动汽车保有量，2025 年深圳市可转移负荷 1194 兆瓦（市政用车可转移负荷 576 兆瓦，乘用车可转移 618 兆瓦）；2030 年深圳市可转移负荷 1859 兆瓦（市政用车可转移负荷 716 兆瓦，乘用车可转移 1143 兆瓦）。随着乘用车保有量增加，未来乘用车将为电动汽车调控主力。

5.1.3 不同响应调控主体带来的电力经济效益不同，合理安排多方主体调控次数，通过源荷经济性成本对比提升电力系统综合经济收益。

空调响应经济效益主要体现在避免发电成本、碳排放成本及避免损失 GDP 方面。以用电高峰时段 (13:00-14:00) 为例，在年响应次数 5-20 次时，最佳情景下，2030 年单次响应可避免发电成本约在 1608-6438 万元之间，实现净经济效益 284-5114 万元，可避免二氧化碳排放成本约 139 万元，可避免损失 GDP 约 1.78 亿元。电动汽车响应经济性主要以避免发电成本、碳排放成本、避免损失 GDP 及充电峰谷分时电价的差价优惠表现。最佳情景下，2030 年单次可避免发电成本约在 644-2577 万元之间，实现净经济效益 114-2047 万元，可避免损失 GDP 7124 万元，可节约购电成本 42 万元，可避免二氧化碳排放成本约 55 万元。

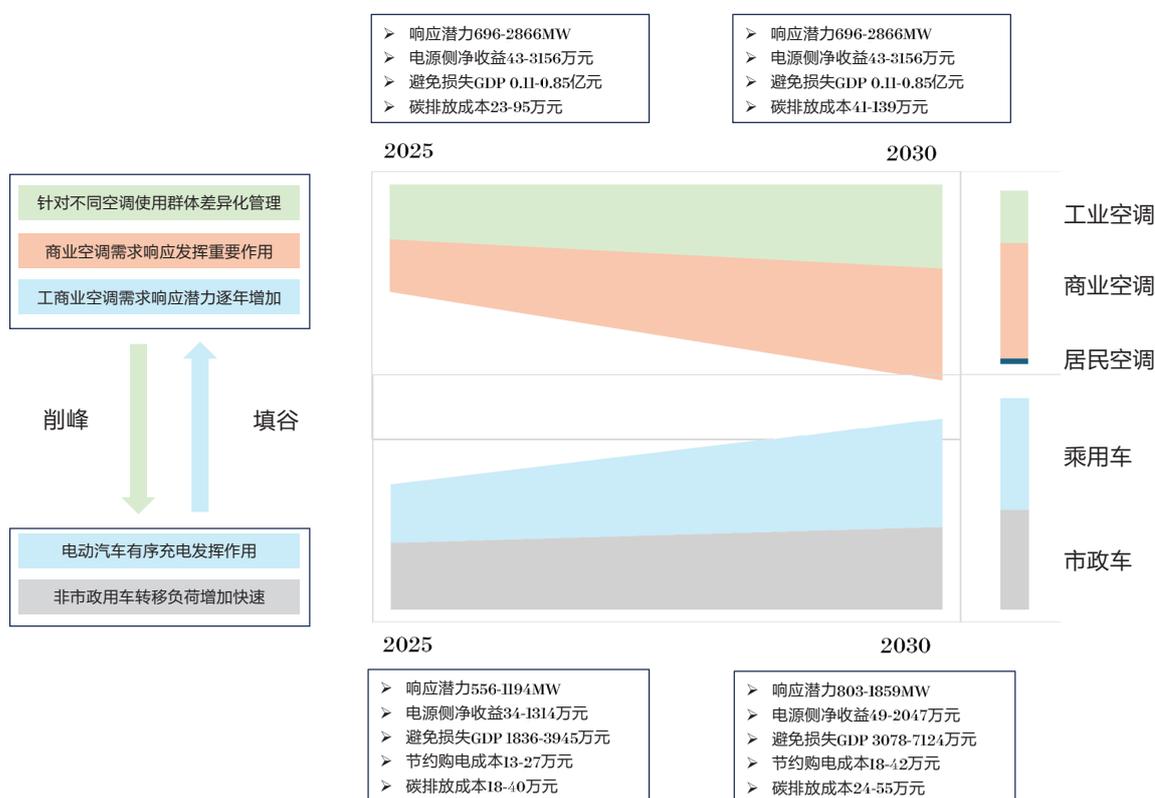


图 5-1 深圳市响应潜力评估结果

5.2 行业建议

根据国际经验及深圳虚拟电厂建设现状与响应潜力评估结果，报告提出深圳市虚拟电厂发展建议，关注空调与电动汽车两类高潜力资源，设计政策路线图，为深圳市虚拟电厂的可持续发展提供参考。

5.2.1 明确虚拟电厂定位，完善法律法规和技术标准。

构建虚拟电厂的法律法规框架。明确其作为新型电力市场主体的法律地位和责任义务，认可虚拟电厂是可持续、市场化的“电源”，推动其在电力市场中的合规化发展。针对虚拟电厂参与现货市场、辅助服务市场和邀约响应中的应用场景，细化市场准入条件，明确角色定位与义务分工，保障其参与调峰、调频、调压、转动惯量等市场交易，避免市场主体间责任不清与权益受损。

加快技术标准体系建设。结合深圳市现有智能电表与终端设备，制定区域内统一的虚拟电厂资源通信协议与数据接口标准，建立终端监控设备、通信接口、聚合控制管理等技术标准。打通采集终端、虚拟电厂运营平台、电网调度系统、交易系统之间的数据和控制通道。支持虚拟电厂并网，建议加快推动调度、交易主管部门出台虚拟电厂并网调度运行规程，确保虚拟电厂的高效接入。加快推动虚拟电厂资源感知、系统交互、网络安全防护、入网测试等技术标准体系建设。推动国家层面统一智能电表计量标准，促进售电公司、虚拟电厂、聚合商和用户等市场主体的协调发展。

5.2.2 加强顶层设计，健全监管体系，强化省市协同与资源共享。

构建分级监管机制，确保市场规范与公平。建议由深圳市政府或深圳能源局牵头，联合行业专家及企业代表，设立一个专门机构监管，明确监管机构的职责和权限，确保市场的公平竞争和资源的合理配置，在数据使用范围和运营介入程度等方面明确边界。促进监管机构全面参与新兴业态的流程管控，推动各类试点项目的分级监管建设，不断完善监管方式方法，对不同阶段、不同规模和不同业务模式的项目实施不同力度的监管，确保市场的规范和有序发展。

开展地市级电力市场试点。可借鉴欧洲平衡区的理念，探索分散式平衡模式，一定程度对平衡压力和责任进行下放，在条件相对成熟的区域，设置电力市场的二级市场试点，即地市级市场，在本地新能源负荷平衡后再参与省级市场，促进响应机制与电力市场的协调。

加强区域协同，推动区域市场联动发展。加强深圳市与广东省的协调合作，推进两级电力市场联动发展，形成资源共享和互补优势。共享电力需求数据、负荷分布、土地资源数据等信息，打造跨部门、跨区域的数据交互平台，提升资源配置效率。深圳虚拟电厂管理中心可利用好深圳政策，引导虚拟电厂的产业链良性发展，常态化组织深圳虚拟电厂精准响应，服务和缓解电力供应紧平衡和局部电力供应紧张情况，提升虚拟电厂双向灵活调节能力，将负荷侧资源为电网所用。结合南方区域市场建设同步争取将深圳虚拟电厂纳入南方区域电力市场主体范畴试点，稳妥推进虚拟电厂参与南方区域调频、备用等辅助服务市场，初步建立长效市场机制。

5.2.3 加快常态化市场机制建设，优化电价政策，逐步以市场价格替代政策补贴。

电力市场与电价政策是发展虚拟电厂的核心。目前，政策补贴型需求响应受限于全年运行时间和调用频次较少，调峰市场尚未实现日常化开市，且辅助服务费用的分摊问题仍未完全解决，市场间歇性参与问题突出，虚拟电厂运营商盈利模式单一且效益较低。建议扩大虚拟电厂交易品类，持续缩短交易周期、提升交易频次，逐步实现由补贴驱动向市场化机制转型。

支持分布式能源通过虚拟电厂参与电力市场等多品种交易。包括现货市场、辅助服务市场（调峰、调频、备用等）以及容量市场，完善投资管理、市场准入和结算模式。针对现货市场，建议缩短日前市场报价时间，缩短交易周期，提升交易频次与响应速度，提高用户对电价的敏感度，实现更精准的响应，并强化中长期市场与现货市场的衔接，实现不同交易品种之间的平稳转换。健全电力辅助服务市场，不断丰富适应可再生电力高频波动的爬坡、备用等辅助服务交易品种。加快建设差异化的容量激励机制，在容量市场中针对不同定位的资源差异化设定补偿价格，以增加虚拟电厂收益。

优化电价政策设计，构建多样化电价机制。电价是决定虚拟电厂盈利能力的核心指标，为了激励多方参与，应通过设计合理的电价机制实现负荷侧资源的最大化利用。通过价格信号引导用户削峰填谷，促进电力系统高效运行。建议完善阶梯电价、优化分时电价和引入容量电价等多样化电价机制。针对工商业用户进一步优化分时电价机制，细化时段划分并引入动态定价，确保价格充分反映供需关系，并与电力现货市场建立联动机制。试点推行居民分时电价机制，时机成熟可逐步在夏季负荷高峰时段（如7月下午3点至9点）实行尖峰电价（如峰值为基础电价的2~3倍），引导居民用户优化用电行为。针对大用户实施阶梯式电价，提高高负荷用户的电价敏感性，增强响应效能。科学调整峰谷时段划分，峰谷电价差越大，虚拟电厂能为用户带来的价格激励越大。针对私家车用户需求分散的问题，建议实施差异化的价格激励政策，例如峰谷电价优惠机制，吸引更多用户参与响应。结合具体尖峰负荷曲线形态、电源结构等系统特性，合理核算调节性新型主体的容量价值，为空调和电动汽车设置相应的容量电价，激发用户端参与积极性。

5.2.4 政策激励与约束并举，全面提升需求侧参与积极性。

构建强制性与自愿性相结合的措施框架。可通过电费补贴、税收优惠等降低相关方的参与成本。对新装空调与新能源汽车提出具备响应能力的要求，包括动态调控功能和远程智能控制接口。推动终端设备智能化升级，同时允许用户自主选择是否参与响应计划。对于建筑类终端，实施能效标准和排放限额，鼓励排放主体主动采取如响应等低碳措施。将绿色电力消费责任传导至终端用户，通过激励政策推动用户与电网互动，支持清洁能源高效利用。

差异化设计补贴机制，精准激励多方主体。依据用户的参与程度和市场变化设计差异化动态补贴政策，并且可以根据用户类型进一步细化，针对居民用户、工商业用户、大工业用户的用电特性，设置不同的补贴方式。对高响应速度、高精度的资源（如工业负荷、智能家居设备）提供更高的补贴倾斜，鼓励技术先进的响应资源参与市场交易。采用“基础性激励 + 绩效奖励”的双重机制，既提高响应的覆盖面，又促进用户深度参与市场交易。将响应补贴与节能改造、碳减排补贴等政策相结合，形成协同激励，提升整体政策效能，在重点地区和行业率先开展试点验证。

加大技术研发支持，推动设备智能化升级。政府设立专项资金，支持鼓励科研机构和企业对虚拟电厂关键技术创新。推广智能电表、智能控制系统和远程控制技术。推动老旧电能表更新换代，居民和工商业用户的空调及蓄冷设备升级改造，重点支持节能型和智能化设备的普及应用，如提供空调以旧换新补贴政策，帮助解决智能设备前期投入问题，实现分散资源的聚合与远程控制，强化响应的实时性和灵活性。鼓励空调厂商与能源管理系统集成，加大对变频空调、智能家居设备及综合调控系统的技术研发支持，通过设备层面的智能控制实现精细化管理，提升用户响应速度与精度，减少人工干预复杂性。建议推动市政用车领域的智能化调度管理，建立统一智能调配平台，简化车队管理流程。建议加快智能电池管理系统的研发和部署，为电动汽车提供更精准的充电管理和动态调控能力。支持分布式电源管理技术的应用，提升电动车独立运行和协同调节的能力，逐步构建安全、高效、多层次的能源管理体系。

5.2.5 探索多样化商业模式，提升虚拟电厂经济效益。

聚合商应根据市场需求积极开发多样化商业模式，如合同模式、市场化模式、自主调度模式等。此外，通过社区级虚拟电厂模式，可整合社区级储能和响应资源，实现本地化能源管理和优化。设计响应机制时，应充分考虑电力市场建设进度，确保市场主体准入、交易品种、流程和结算机制的有效衔接。聚合商应不断提升自身专业性，拓展用户可调节负荷、储能、分布式电源等新型主体的参与渠道。建立科学合理的利益共享机制，通过收益分配、激励措施等方式，增强用户的参与感和积极性。

空调与电动汽车作为用户侧关键负荷资源，可通过技术和商业模式创新，充分挖掘其参与虚拟电厂的潜力。鼓励空调和电动汽车等终端设备的智能化升级，为用户提供个性化响应建议。通过与小用户和家用空调所有者签订虚拟电厂运营协议，聚合资源并参与市场交易。空调可提供自动化分级响应，设定不同的响应等级（如轻度、中度和重度响应），如轻度响应仅调低功率，中度响应则可调低功率并降低温度设定值，而重度响应可进入间歇性运行模式。推广智能充电桩，简化用户充电操作流程，提升使用便捷性。通过补贴加快充电桩的布点建设，提升基础设施覆盖率，为车网互动提供坚实保障。同时，建立充电服务标准体系，为智能化、个性化响应提供技术和服务保障。

5.2.6 加强用户宣传教育，推动用户侧资源整合与控制。

提升用户认知与参与度，推动政策宣传落地。加强对公众和企业的宣传教育，通过社区服务机构、行业协会及地方政府部门，确保政策信息覆盖到居民用户、企业用户及负荷聚合商等多方主体，帮助用户理解参与方式及收益，指导用户安装智能设备、接入虚拟电厂，并通过本地化管理模式提升用户参与的便捷性和接受度。利用数字化工具（如手机应用程序、社交媒体平台）发布科普内容和动态信息，提高政策的普及度。针对从业人员，提供专项技能培训，培养专业化、标准化负荷聚合商。借助电网公司及其下属综合能源服务公司的资源优势，推动用户侧资源的微网建设与能源管理系统升级，实现对于用户侧资源的深度掌控。

表 5-1 深圳市虚拟电厂发展宏观政策路线图

对象	特点	分类	近期宏观措施	远期宏观措施
虚拟电厂	政策支持与市场活跃度高； 补贴力度较大； 峰谷电价优势明显； 资源聚合与调度能力较强； 技术与平台建设具有优势	政策	<ul style="list-style-type: none"> • 出台虚拟电厂相关法律法规 • 完善分时电价与峰谷电价机制，推广尖峰电价 • 提高峰谷电价时段划分的科学性 • 支持分布式电源通过虚拟电厂聚合参与电力市场交易及辅助服务市场 • 开展需求响应宣传活动 • 提高政策激励力度，鼓励用户安装分布式能源设备 • 降低需求响应门槛，扩大用户参与覆盖面 • 国家层面制定智能电表计量标准 • 支持第三方聚合商发展，集中管理用户侧负载资源 • 设立监管机构，构建分级监管机制 	<ul style="list-style-type: none"> • 要求用户侧资源具备需求响应能力 • 探索建立容量市场，对分布式资源进行容量定价 • 实施动态实时电价与关键尖峰电价 • 增强现货市场波动性，缩短交易周期，提升交易频次与响应速度 • 探索建立个人碳指标，激励居民参与需求响应 • 设置电力市场的二级市场试点 • 依据用户投入度和响应效果设计阶梯式奖励机制 • 试点协同激励政策 • 采用“基础性激励 + 绩效奖励”补贴机制
	缺乏统一市场规则和标准； 用户参与意愿不强； 聚合商与电网企业协作不足； 盈利模式单一； 缺乏统一的技术标准和规范；	技术	<ul style="list-style-type: none"> • 建立标准化通信协议，提升系统兼容性与协同调度效率 • 推动智能电网改造与智能终端设备升级 • 建立电网与用户间的实时通信系统，实现数据高效互通 • 加强用户数据保护，构建安全可靠的数据管理平台 	<ul style="list-style-type: none"> • 推动智能电表全覆盖，实现家庭能源管理的远程控制与优化 • 集成家庭能源管理系统参与需求响应 • 推广光储充一体化系统，参与需求响应

表 5-2 深圳市空调与电动汽车响应政策路线图

对象	分类	特点	分类	近期措施	远期措施
工业	商业	蓄冷渗透率高； 蓄冷峰谷电价比高； 商业空调潜力大； 温度设置偏低	政策	<ul style="list-style-type: none"> 提供设备安装升级补贴、专项贷款和税收优惠 单独安装分时计量装置 设计工商业专用的需求响应电价，优化蓄冷电价制度 新建项目融入蓄冷设计，既有项目改造提供补贴与税收优惠 	<ul style="list-style-type: none"> 优化电价政策，实施实时电价 设计灵活的需求响应合约 工商业能源用户设定能效标准和建筑碳排放限额 对集中蓄冷进行容量定价
			技术	<ul style="list-style-type: none"> 推广中央空调技术 进行蓄冷改造更新 采用精细化管理与智能控制技术 提升变频与节能技术设备覆盖率 提供舒适度调节技术和设备支持 空调负荷实现分区控制与精准响应 	<ul style="list-style-type: none"> 在工业用户中推广低能耗空调技术 增加动态负载控制与通信技术支持 广泛应用负载聚合技术，提升整体调节能力
居民	空调	数量庞大； 多人户居多； 个人负荷分散	政策	<ul style="list-style-type: none"> 推广应用智能空调与控制技术 对参与需求响应的用户免费安装智能控制设备并予以激励金 推广空调伴侣，提升需求响应设备的普及率 空调以旧换新补贴 推行居民分时电价机制 鼓励龙头企业（如格力、美的）加入空调聚合需求响应体系 	<ul style="list-style-type: none"> 设计不同参与模式和补贴标准 推动自动化、分级化需求响应模式 要求新装空调具备响应能力 提升空调能效水平，COP≥5.0，增加能效补贴 逐步实行尖峰电价
			技术	<ul style="list-style-type: none"> 手机远程控制，支持用户手动退出 提升空调能效水平，COP≥3.8 设置合理的温控范围和响应时长 升级或集成传感和控制元件 系统的精细化管理 试行需求响应应用场景多样化，与电动车或其他智能家居设备联合调控 	<ul style="list-style-type: none"> 全自动需求响应模式 加强动态负载控制与通信技术 推广智能家居系统 实现大规模负荷群控制 增大变频空调渗透率，聚合商从调温转调频 研究分户或分区响应控制技术，提升整体负荷响应能力
		潜力有限； 无峰谷电价； 控制难度高； 响应弱； 规模化不足； 无有效商业模式； 隐私安全问题突出			

对象	分类	特点	分类	近期措施	远期措施
电动汽车	市政用车	控制力度强； 预测性强； 使用时间固定	政策	<ul style="list-style-type: none"> 建立统一智能调配平台，优化市政车队调度和管理流程 提供充电桩建设补贴，降低初始投资成本，加快充电设施覆盖 制定行业统一标准，明确响应规范和考核方式 	<ul style="list-style-type: none"> 推动自动化车队管理系统建设 发展V2G，实现电网与车辆间能量互动，增强电力调控能力
	乘用车	调度复杂； 需考虑运输计划与需求响应的平衡	技术	<ul style="list-style-type: none"> 增加需求响应奖惩机制 推广智能车载管理系统 优化用车和响应计划，提高车队需求响应参与率 	<ul style="list-style-type: none"> 通过智能充电桩调节功率，调节电网频率从而提供平衡服务 基于分布式电源管理的系统研究，进一步降低对主电网的依赖 推动电动汽车与光储充结合发展
电动汽车	乘用车	未来潜力大； 用户价格敏感性较强； 充电时间灵活； 私家车规模大但分散	政策	<ul style="list-style-type: none"> 提高响应补贴，针对不同用户推广分层次奖励机制 提供电动汽车的特定峰谷电价选择 增加V2G 基础建设投资与充电桩建设 明确电动汽车参与电力市场准入条件 构建需求响应参与积分系统，吸引用户长期参与与需求响应 	<ul style="list-style-type: none"> 完善标准体系，设立针对V2G 的价格激励机制 个性化需求响应合同 允许参与容量市场和辅助服务市场
		充电设施建设和运营成本较高； 车主参与意愿弱（安全里程）； 车辆缺乏 V2G ； 用户充电习惯限制； 充电设施和智能化管理不足； 主体多元化，难以集中管控	技术	<ul style="list-style-type: none"> 手机控制时间，聚合商智能安排充电 汽车厂商增强电池质量，完善V2G 保险条款 推广智能充电桩 增强电动汽车性能，配备V2G 功能 使用先进电池管理系统，设定V2G 最低电量阈值 	<ul style="list-style-type: none"> 开发统一集成管理平台 完善运营商与车主参与需求响应的竞价机制与考核机制 推动电动汽车与光储充结合发展 电动汽车实行V2G

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据 [EB/OL].2024.01.https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm
- [2] 深圳政府在线. 深圳加速驶向“新一代世界一流汽车城” [EB/OL].2024.07.https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_11439922.html
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知 [EB/OL]. 2022. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 国家能源局 国家数据局关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》的通知 [EB/OL].2024. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm
- [5] 国家能源集团. 广东省市场化需求响应实施细则及培训课件 [R/OL].2023.03. <https://guangdongsd.chnenergy.com.cn/dlyxww/zcfga/202303/ef890f-0072234f24a3144329a34f8e97.shtml>
- [6] 深圳市发展和改革委员会. 深圳市发展和改革委员会关于印发《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施》的通知 [EB/OL].2024.06. https://f吉瓦.sz.gov.cn/gkmlpt/content/11/11351/post_11351896.html#25135
- [7] 国家能源局. 《中国的能源转型》白皮书 [R/OL].2024.08. https://www.nea.gov.cn/2024-08/29/c_1310785406.htm
- [8] Global Energy Monitor. 中国继续引领全球风电和太阳能发展, 其目前在建装机规模为全球所有其他国家总和的两倍 [R].2024.07.
- [9] 智研咨询. 2025-2031 年中国空调行业市场现状分析及发展前景研判报告 [R].2024.
- [10] 国家发展和改革委员会. 我国新能源汽车产销连续 9 年位居全球第一 [EB/OL]. 2024.11. <http://finance.people.com.cn/n1/2024/0118/c1004-40161886.html>

- [11] 国家能源局. 用电量增长折射经济向新向绿发展 [EB/OL].2024.08. http://www.nea.gov.cn/2024-08/09/c_1310784089.htm
- [12] 深圳政府在线. 我市全社会供电量和用电量预计全年同比大幅增长 [EB/OL].2021.12. http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_9431627.html
- [13] 深圳政府在线. 深圳加速驶向“新一代世界一流汽车城” [EBOL].2024.07.https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_11439922.html
- [14] 李可舒, 王冬容. 欧洲虚拟电厂发展对我国的启示 [J]. 中国电力企业管理, 2020(25):93-95.
- [15] 崔楷舜, 朱兰, 魏琳琳, 等. 美国电力市场中响应的发展及启示 [J]. 电气传动, 2022,52(16):3-11,48.
- [16] 尹玉霞. 德国虚拟电厂发展经验 [J]. 电力设备管理, 2022(16):291-293.
- [17] 潘佳, 李天舒, 裴江南. 虚拟电厂技术现状及展望 [J]. 工程施工新技术, 2024,3(5).
- [18] 刘秋华, 张正延, 姜亚熙, 吴玲, 杨圣城, 刘鑫. 平衡单元模式下德国电力电量平衡机制探讨及启示 [J]. 电力需求侧管理, 2024,26(4):113-118.
- [19] PG&E. EV Charging program . <https://www.pge.com/en/clean-energy/electric-vehicles/ev-charge-program.html#accordion-e850c30b7b-item-63d4d9bc94>
- [20] Southern California Edison. Program Year 2021 Southern California Edison Summer Discount Plan Impact Evaluation[R].2021.
- [21] 深圳市统计局. 《深圳市统计年鉴》[M],2022.
- [22] McKinsey Greater China. 从内部碳定价出发, 开启企业碳减排之旅 [EB/OL].2024. <https://www.mckinsey.com.cn/>

作者

中国科学院深圳先进技术研究院 (SIAT): 冯威, 袁佳晨, 陈黎明, 项宇彤, 李啸远

联系方式

冯威, w.feng@siat.ac.cn

