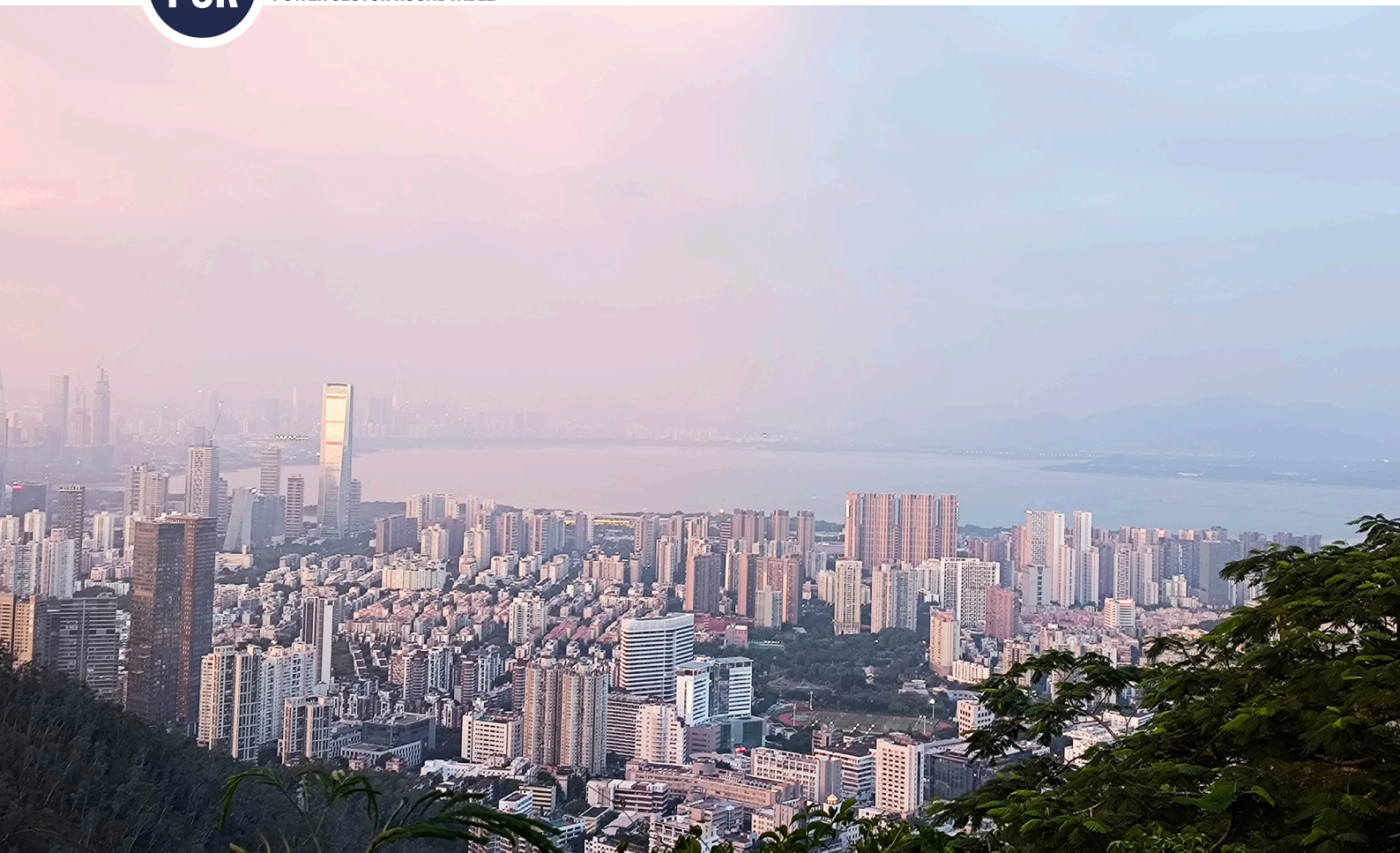




电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE



广东专题

广东省电力需求侧灵活性潜力分析： 以深圳、广州、佛山为例

电力圆桌项目课题组

2025年12月

版权说明

本报告免费下载，转载或引用请注明来源，不得用于任何形式的商业牟利。如有违反，我们保留依法追究其法律责任的权利。

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，积极探索体制机制创新，致力于建设与国际学术接轨、与粤港澳大湾区产业深度融合的新型科研机构。作为深圳市碳中和技术创新中心，深圳先进院围绕碳中和基础科学与前沿技术持续开展系统研究，致力于在相关领域发挥引领作用，着力构建完整的碳中和产业化技术链条。已形成科技、人才与产业协同发展的创新体系，由八个研究所组成，牵头组建 2 个全国重点实验室、3 个国家创新中心和 79 个省市级创新载体。依托上述平台体系，深圳先进院建设并运行多个储能与清洁能源系统科研平台，涵盖储能器件、车网互动、能源系统集成及系统安全运行等关键领域，在智慧能源相关研究方面具备坚实基础和持续积累。



自然资源保护协会
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 700 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC 自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 40 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC 在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。

广东省电力需求侧灵活性潜力分析： 以深圳、广州、佛山为例

2025 年 12 月

目 录

- 摘要1
- 1. 引言 3
 - 1.1 研究背景3
 - 1.2 广东电力供需与需求侧灵活性资源发展..... 4
- 2. 城市需求侧灵活性调控 6
 - 2.1 深圳电力供需与需求侧灵活性调控发展历程 6
 - 2.2 广州电力供需与需求侧灵活性调控发展历程 8
 - 2.3 佛山电力供需与需求侧灵活性调控发展历程 11
- 3. 需求侧灵活性潜力综合评估13
 - 3.1 研究范围与边界 13
 - 3.2 测算方法 15
 - 3.3 灵活性潜力测算 17
 - 3.4 经济效益测算 34
- 4. 需求侧灵活资源挖掘的挑战与行业建议..... 37
 - 4.1 面临挑战37
 - 4.2 发展建议 39
- 参考文献..... 42

摘要

我国新能源发电装机持续高速增长，并已经成为新增发电装机的主体。然而，新能源高比例发展面临消纳与系统调节双重压力。当前电力系统的灵活调节仍主要依靠煤电、水电等传统电源，但煤电灵活性改造不足，水电受流域和季节限制明显，生物质和燃气等电源又受成本与出力时段约束，电源侧提升灵活性空间有限。需求侧灵活性资源因分布广、响应快、调节尺度多样及单位成本较低等优势，正成为提升系统调节能力的关键增量，并助力电力系统消纳新能源。作为需求响应的先行省份，广东省需求侧灵活性资源总体潜力可观，但尚未实现系统性、规模化开发利用。

基于此，中国科学院深圳先进技术研究院与自然资源保护协会合作开展课题研究，选取深圳、广州、佛山三市作为代表城市，对三市需求侧调节能力及其经济效益进行测算与评估，同时，从政策、市场、用户与技术等维度分析制约因素，并提出差异化的发展建议。

测算结果表明，深圳、广州、佛山三市在 2027 年具备稳步实现最高负荷 10% 以上削峰的能力，但填谷能力相对偏弱。具体来看，深圳预计 2027 年最大可实现削峰能力约 292 万千瓦（约 11%），填谷能力为 135 万千瓦（约 5%）；服务业（105 万千瓦）和新型负荷（159 万千瓦）合计贡献超过 90%。广州预计 2027 年最大可实现削峰能力约 327 万千瓦（约 11%），填谷能力为 134 万千瓦（约 5%）；服务业（120 万千瓦）和新型负荷贡献显著（含电动汽车 59 万千瓦、储能 39 万千瓦），工业侧以汽车制造、计算机制造为主。佛山预计 2027 年最大可实现削峰能力约 193 万千瓦（约 11%），填谷能力为

74 万千瓦（约 4%）。佛山以制造业为核心，电子设备、金属加工、橡塑等行业占比高，其工业结构调节难度较大，但仍具备一定的空间。

此外，报告从电源侧可避免的发电成本、可避免的 GDP 损失以及可避免碳排放社会成本等对三市需求响应效果进行了情景测算，鉴于单位度电调峰成本和净经济收益随响应时长增加呈现明显的边际递减特征，在年响应时长为 50/100/200 小时的场景下，结果如下：

深圳调峰度电成本分别为 21.4/12.4/7.9 元 / 千瓦时，净经济收益为 17.9/8.9/4.4 元 / 千瓦时；广州调峰度电成本为 25.7/14.3/8.6 元 / 千瓦时，净收益为 22.2/10.8/5.1 元 / 千瓦时；佛山调峰度电成本为 25.7/15.4/10.2 元 / 千瓦时，净收益为 22.2/11.9/6.7 元 / 千瓦时。短时高价值响应单位边际效益最高。基于单位度电 GDP 和碳因子 0.33kg/kWh 估算，年均 200 小时响应可带来的经济与环境效益：深圳年可避免 GDP 损失 113 亿元，可避免碳排放社会成本 464 亿元；广州可避免 GDP 损失 117 亿元，可避免碳排放社会成本 519 亿元；佛山对应分别为 46 亿元与 320 亿元。

报告总结了当前深圳、广州和佛山虚拟电厂与需求侧管理面临的核心挑战：（1）管理层面，省市区多级调度权责与收益分配机制模糊，技术标准不统一，平台建设水平参差，制约了资源的跨区域高效聚合；（2）技术层面，终端设备数字化基础差、负荷预测精度低以及平台协同控制能力不足，影响了精准调控与可信结算；（3）市场层面，存在激励来源单一、价格信号传导不畅、准入渠道不足以及灵活资源容量价值难以体现等问题；（4）商业运营层面，用户收益感知弱、激励链条不完整，尤其是高产值工业和多产权商业楼宇的参与动力不足。

为应对上述挑战，报告从四个维度提出发展建议：（1）强化顶层设计，加快建立统一标准与协同机制，设立稳定激励资金池，并因地制宜推动重点城市差异化试点；（2）电网企业需向开放服务平台转型，升级“云 - 边 - 端”调控架构，推动用户侧改造并优化市场结算机制；（3）全面向负荷侧开放各类市场，深化电价改革以传导真实价格信号，并探索“电 - 碳 - 金融”协同机制；（4）降低用户侧参与门槛，通过透明的收益分配和“无感化”技术体验，激发各类主体主动参与。

引言

1.1 研究背景

在“双碳”目标和新型电力系统建设加快推进的背景下，高比例可再生能源并网使电力系统对灵活调节能力的需求显著上升。传统依赖煤电与水电的传统调峰模式在成本、扩展速度和资源约束等方面逐渐显露瓶颈，仅通过电源侧扩容难以兼顾经济性与系统效率。

在此背景下，需求侧灵活性资源成为提升系统灵活性的重要增量。相较电源侧，需求侧资源具有分布广、响应快、边际成本低及可快速规模化部署等优势，是新型电力系统中的重要灵活性增量。广东省需求侧资源结构多样、可调节负荷基础较好，为虚拟电厂与需求响应提供了良好基础。

近年来，国家层面将需求侧灵活性置于新型电力系统建设的重要位置。全国需求侧管理在 2011 年《电力需求侧管理办法》确立框架后进入规模化阶段。“十四五”以来多项政策明确提出，到 2025 年需求响应能力需达到最大负荷的 3%-5%，具备条件地区可提升至 10%。2025 年《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》提出在 2027 年实现全国虚拟电厂调节能力 2000 万千瓦以上、2030 年达到 5000 万千瓦以上。与此同时，广东在政策体系上也陆续出台相关政策，率先启动需求侧灵活性体系建设，力争 2025 年需求响应削峰能力达到最高负荷的 5%。2024 年，广东电网接入需求响应资源已超过最大

负荷的 5%，预计到 2025 年，可参与需求响应的负荷规模可能达到 1000 万千瓦以上。

^[1]2025 年 8 月广东完成首批 10 家虚拟电厂运营商资质审核，虚拟电厂正式成为新的市场主体类别。^[2]

1.2 广东电力供需与需求侧灵活性资源发展

广东作为我国最大省级电网，供需张力持续存在。2025 年最高负荷达 1.64 亿千瓦。作为典型受端电网，外购西电约占全社会用电量的 20% 左右。^[3]2024 年广东电源装机约 2.2 亿千瓦，其中风光装机 5913 万千瓦，占比 27%。火电仍占主体但占比下降，水电和其他清洁能源保持稳步增长。新能源发电占比超过 7%，按照规划，2025 年、2030 年可再生能源装机占比将分别达到 35% 和 45%。在高比例新能源并网、跨区受电并存的格局下，电力供给的不确定性和波动性增强，叠加现货价格尖峰更频繁，需求侧灵活性价值更加突出。

从空间格局看，广东经济与用电负荷高度集中于珠三角地区。2024 年全省 GDP 为 14.16 万亿元，其中深圳、广州、佛山分别约 3.7 万亿、3.1 万亿和 1.3 万亿元，三市合计占全省 57%。用电方面，广州（1281 亿千瓦时）、深圳（1215 亿千瓦时）、佛山（856 亿千瓦时）用电量居全省前三，合计占比超过 36%；珠三角城市群整体贡献约 71% 的全省用电量，用电结构高度集中。^[4]

广州、深圳与佛山作为广东省三大核心城市，产业结构差异显著。深圳以先进制造业和现代服务业为主，2024 年三次产业结构为 0.1 : 37.8 : 62.1，^[5]高技术制造业和先进制造业占规模以上工业增加值分别达 58.2% 和 68.2%，现代服务业占第三产业比重约 76.5%。^[6]广州三次产业结构为 1.08 : 25.3 : 73.66，呈现显著的服务业主导格局，2025 年一季度，服务业对 GDP 增长的贡献率超过 90%，^[7]以现代服务业和生产性服务业为核心，同时汽车产业作为第一支柱正加快向新能源与智能化转型，先进制造业增加值占规模以上工业增加值比重为 59.9%。^[8]佛山是典型的制造业立市之城，2024 年三次产业结构为 1.8 : 50.3 : 47.9，^[9]拥有 10 个千亿级产业集群和超 3 万亿元规上工业总产值。随着产业转型推进，2025 年一季度佛山第三产业占比达到 50.2%，首次超过第二产业。^[10]

虚拟电厂建设方面，广东经历了从聚合商示范平台到省级统一平台的演进过程。早期以“粤能投”等聚合商平台为主，承担资源接入与市场化运营职能。随着资源规模扩大和跨市调控需求增加，南方电网统一建设分布式源荷聚合服务平台，实现省级统一注册、能力校核、调度协调与交易管理。截至 2025 年 2 月，南方电网虚拟电厂接入容量约 1200 万千瓦，实时最大可调节能力 255 万千瓦，年累计响应 162 次，调节电量 545.5 万千瓦时。^[11]同时新型负荷资源快速增长，为广东构建跨市统一灵活性资源池提供了丰富“新基建”载体。

综合经济体量、产业结构与用电规模，深圳、广州、佛山在广东电力系统中具有明显代表性。本报告选取三市作为研究样本，对其 2027 年可提供的需求侧灵活性潜力与经济效益开展量化评估，重点检验其是否具备达到“最高负荷 8% 调控能力”的条件，并在此基础上提出实施建议和城市级虚拟电厂建设路径，为广东乃至其他地区推进需求侧灵活性体系建设提供参考。

2 城市需求侧 灵活性调控

2.1 深圳电力供需与需求侧灵活性调控发展历程

深圳用电结构由工业主导向服务业与居民并重转型，负荷尖峰化，夏季峰值压力持续加大。2024 年第二产业用电占比下降至 49%，第三产业占比提升至约 37%，居民用电年均增速约 5% 并保持 17% 的占比，显示服务业及生活性负荷成为推动城市用电增长的主力。伴随夏季高温与区域尖峰负荷增长，深圳电力系统面临显著峰值压力。

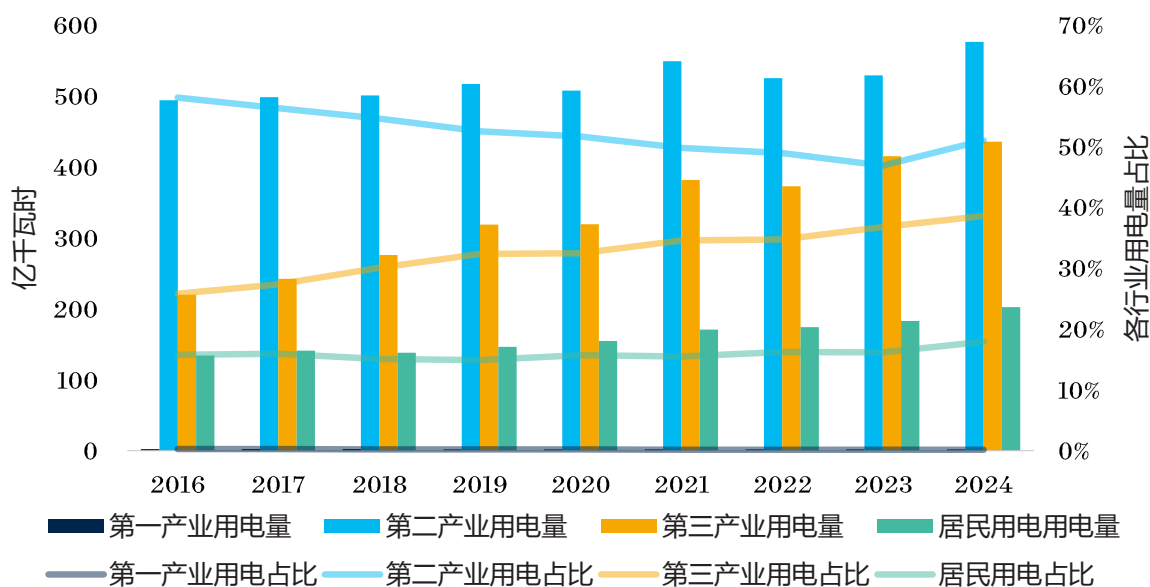


图 2-1 深圳 2016-2024 年电力消费量

来源：《深圳统计年鉴》

受端型电网格局与“三高一限”特征叠加，使深圳对灵活调节能力的需求显著高于其他城市。深圳本地电源仅能覆盖约 30% 需求，70% 依赖外来电，电源保障空间有限；^[12]同时深圳是全球负荷密度最高的城市之一、土地紧缺导致传统扩容方式约束突出。2025 年最大负荷达 2370 万千瓦，尖峰持续时间短，使传统电源建设的边际成本更高。为优化能源结构，深圳加快发展本地气电、生物质能、海上风电等清洁能源，并对燃煤电厂进行清洁化改造，截至 2025 年底清洁能源装机预计达 84%，系统灵活性需求进一步增加。^[13]

深圳通过系列政策推动虚拟电厂和需求侧响应发展。自 2022 年起，深圳密集出台支持车网互动 (V2G)、建筑楼宇、工商业及新型储能接入的政策。2024 年《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施》明确提出 2025 年形成 100 万千瓦级调节能力、占年度最大负荷约 5% 的稳定响应规模。同期，深圳在全国最早形成虚拟电厂终端、安全、接口、充电 V2G 等关键技术规范体系，为规模化接入提供统一标准。

多元可调资源快速增长，奠定深圳需求侧灵活性的坚实基础。截至 2024 年底，深圳新能源汽车保有量超 120 万辆（渗透率达 76.9%），充电设施超 40 万个，建成 1000 余座超级充电站，形成全国最大的 V2G 与有序充电基础；^[14]用户侧与集中式储能持续扩

容，到 2025 年，全市光伏新增装机 150 万千瓦；^[15] 同时，数据中心与 5G 基站建设规模居全国前列，共布局 47 个数据中心和累计建成 8.5 万余座 5G 基站，^[16,17] 为削峰与填谷提供结构多样的可调资源。

深圳已形成“平台 - 生态 - 能力”三位一体的虚拟电厂体系，调节规模与成效全国领先。截至 2025 年 7 月，深圳虚拟电厂管理中心已接入 1.45 万家用户主体、61 家运营商，聚合资源规模达 431 万千瓦，最大可调节能力超 116 万千瓦（占峰值负荷 5.4%），调节占比全国领先。平台覆盖充电桩、智能楼宇、蓄冷、储能、分布式光伏、5G 基站等六大类 6 万余台，实现多类型资源协同调控。在运行成效上，深圳累计实施精准需求响应 153 次，调节电量约 700 万千瓦时，减排二氧化碳约 5800 吨，创造直接经济效益约 1.7 亿元，已成为迎峰度夏、新能源消纳和局部电网约束缓解的核心工具。预计 2025 年底，平台接入规模将达到 450 万千瓦，可调节能力提升至约 120 万千瓦。^[18]

收益机制以政府引导型激励为主、市场化收益为辅，构建了较为完备的正向激励体系。深圳精准需求响应补贴与省级市场化需求响应形成叠加机制，补贴原则为“不高于省级力度”，兼容各类资源类型；同时鼓励虚拟电厂参与广东现货市场套利及南方辅助服务市场。深圳亦通过专项资金强化产业链发展，对关键技术、核心设备、V2G 场站改造给予最高 1000 万 -1500 万元不等的支持，有效降低聚合商与用户侧接入成本，提升资源可调节性。^[19]

2.2 广州电力供需与需求侧灵活性调控发展历程

广州用电规模和峰值持续攀升，对快速可调用的灵活调节能力需求日益迫切。2024 年全社会用电量达 1281 亿千瓦时、最高负荷 2455 万千瓦，均为南方电网辖区最高。工业仍是主要支撑（487 亿千瓦时，占 38%），居民用电保持约 7% 的年均增速，叠加夏季空调集中，尖峰压力持续加大。预测至 2030 年最高负荷将达 3600 万千瓦，用电规模的跃升对需求侧灵活性提出更高要求。^[20]

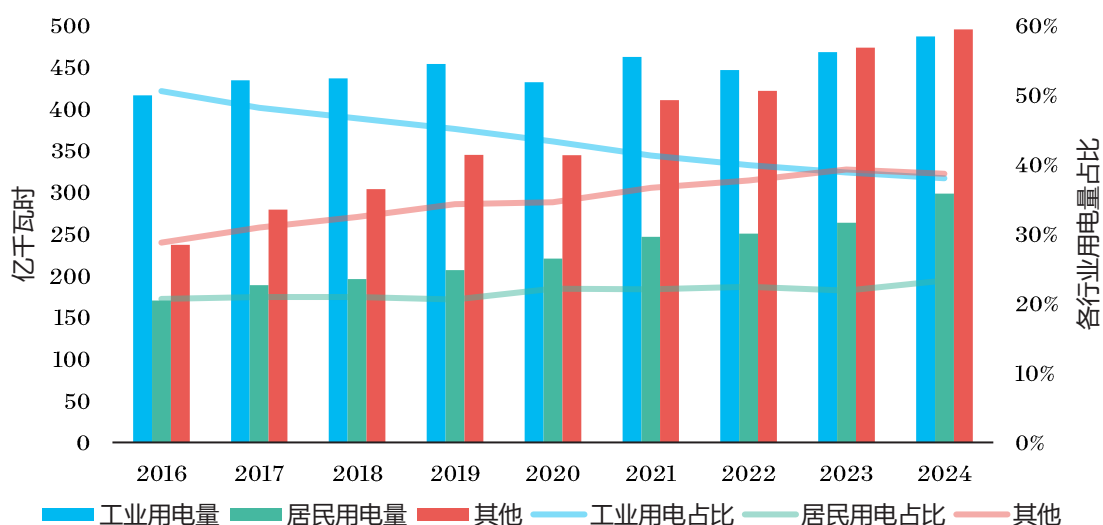


图 2-2 广州 2016-2024 年电力消费量

来源：《广州统计年鉴》

在能源结构转型与外来电约束增加的背景下，广州对本地可调节资源的需求进一步加强。2024 年底，电源总装机 1533 万千瓦，其中燃气占比快速提升、光伏达 284 万千瓦成为新增长极。^[20]但“西电东送”外来电存在波动性，供需紧张时段向广东送电意愿下降，调节可靠性存在波动，本地顶峰、移峰难度进一步加剧。随着新能源渗透率提升，广州的供给侧调节能力实际收缩，需求侧成为稳定系统运行的关键抓手。

广州市通过完善政策体系，为虚拟电厂和需求侧响应提供明确的目标和资金保障。2024 年《国家碳达峰试点（广州）实施方案》要求广州需求侧响应能力不低于最大用电负荷 5%，接入新型负荷管理系统的可控制负荷达到最大负荷的 20%。同年《广东省虚拟电厂参与电力市场交易实施方案》规定虚拟电厂参与需求响应交易和参与电能量市场交易的调节能力要求为不小于 5 兆瓦和 1 兆瓦，连续响应时间不低于 1 小时。《广州市虚拟电厂高质量发展实施方案》进一步提出 2025-2027 年接入容量 200/400/500 兆瓦、调节能力 80/120/150 兆瓦的量化目标，并设立市级财政激励。《广州市虚拟电厂运行实施细则》形成全流程管理闭环，包括准入、能力校核、响应执行、核证结算等，为规模化运营奠定制度基础。

广州虚拟电厂建设加速进入体系化运行阶段，形成覆盖多类型资源的统一纳管平台。

2025 年 7 月“广州市虚拟电厂管理中心”挂牌运行，承担城市侧资源统一纳管、协调调用与应急支撑任务，标志需求侧调控从项目化示范转向制度化运营。平台聚合可中断负荷、分布式光伏、储能、电动汽车充换电设施等多类资源，意向可调能力达 50 万千瓦、校核可调能力 20 万千瓦；中长期目标至 2035 年形成 860 万千瓦负荷控制能力，构建规模化 V2G 与秒级响应资源池。

广州率先建设全市新型电力负荷管理系统，实现“需求响应 - 有序用电 - 负荷控制”三位一体的资源体系。系统摸排并接入 500kVA 及以上非居民中央空调负荷，覆盖写字楼、党政机关、商超、酒店等场景；同步推动储能、通信基站、充电桩等具备备用能力的设备可控化，优先推动公共机构、国有企业和节能监察企业接入。将 10kV 高压用户全部纳入统一管理，实现“政府 + 电网 + 用户”协同的柔性资源体系。截至 2024 年底，广州电网负荷控制能力达 502 万千瓦，超过最高瞬时有用电负荷的 20%。^[20] 依托“羊城充”智慧出行管理平台，推动车网互动，同时在供需紧张和负荷热点区域合理布局充（换）电站。

新兴负荷快速发展，电力系统调控格局加速重塑。截至 2025 年 2 月底，广州市分布式光伏装机规模达 301 万千瓦，位居全国省会城市前列。^[21] 截至 2025 年 12 月中旬，新能源汽车保有量已超过 125 万辆，充电桩突破 25 万台，公共充换电站超过 4400 座，充电运营商超过 400 家，率先在 V2G 量产车型上布局，形成覆盖广泛、运行成熟的充电网络。^[22] 2025 年初车网互动 1 小时响应中，4.37 万辆新能源汽车参与，填谷最大负荷超 4.4 万千瓦，1003 座充电站、10172 个充电桩参与，响应电量 3.1 万千瓦时，促进新能源消纳 50.4 万千瓦时。^[23] 《广州市建设国家车网互动规模化应用试点城市工作方案（2025-2027 年）》明确了 2025-2027 年智能有序充换电设施接入规模和 V2G 放电量目标。

2.3 佛山电力供需与需求侧灵活性调控发展历程

佛山负荷与用电量持续攀升，尖峰时段调节需求显著抬升且以工业负荷为主。2025年佛山电网全社会最高用电负荷达1666万千瓦，电力供需处于紧平衡状态。2016-2024年全社会用电量年均增速约4%，整体保持稳步增长。2024年全社会用电量856亿千瓦时，其中工业用电454亿千瓦时，占比约53%，年均增速不足1%；其他行业用电402亿千瓦时，占比升至47%，年均增速接近10%。总体上，服务业和居民用电增长明显，但在可预见时期内，工业仍是佛山用电“压舱石”和主要调控对象。

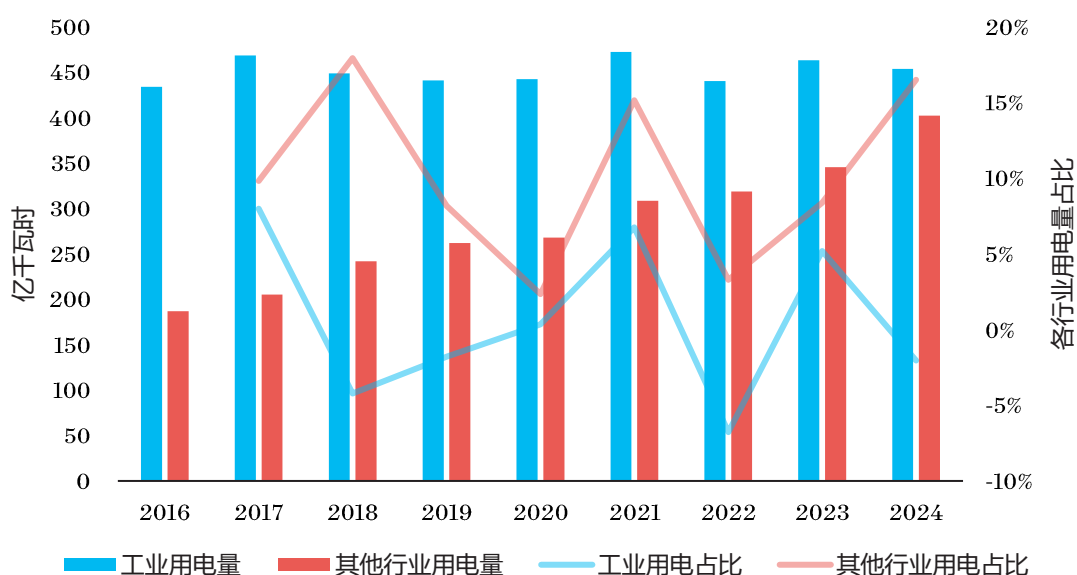


图 2-3 佛山 2016-2024 年电力消费量

来源：《佛山统计年鉴》《佛山统计公报》

在供给侧“以煤为主、清洁化提速”的格局下，佛山同步培育本地灵活电源和新型负荷资源。“十三五”以来，佛山持续提升气电、生物质和光伏等清洁能源占比，并依托其全国氢能示范高地的基础，已形成加氢站、氢能公交与氢燃料电池车的应用体系，为后续交通侧负荷灵活性提供新可能。电网侧通过主网工程、电能替代与大规模储能布局不断增强本地承载能力，为源网荷储协同调节奠定物理基础。需求侧方面，根据佛山市2024年底发布的《佛山市推进分布式光伏高质量发展实施方案》，预计2025年全市分布式光伏总装机规模达360万千瓦，2030年超600万千瓦，占全市电源装机比重超过50%。^[24]

截至 2025 年 4 月底，佛山分布式光伏装机容量已突破 400 万千瓦。^[25] 这表明受市场与政策驱动，分布式光伏实际装机进度明显快于规划预期，正加速向主导电源形态演进。与此同时，园区储能、工商业储能及新能源汽车加速渗透。佛山正从“工业刚性负荷为主”向“光伏主导、储能协同、电动化提升”的新型用能结构系统转型。

佛山需求侧管理政策体系由早期试点逐步走向明确能力目标与场景化落地。2012 年，作为国家发展改革委需求侧管理综合试点城市之一，佛山需要在 2013 至 2015 年间，节约电力负荷和转移（减少）高峰电力负荷 45 万千瓦。^[26]2021 年《关于印发佛山供电局加快构建新型电力系统服务“碳达峰碳中和”行动方案的通知》明确，到 2025 年需求侧负荷响应占最大负荷的 3% 以上，2030 年前达到 5% 以上。

佛山当前仍以“有序用电 + 政府主导响应”为主，虚拟电厂与市场化结算尚处起步过渡阶段。在虚拟电厂尚未形成规模前，佛山主要依赖工商业节能错峰和行政调控应对电力紧张局面。早期供需矛盾较为突出。2012 年佛山成为全国首批电力需求侧管理综合试点城市，建设了集在线监测、有序用电、能效分析、需求响应等 19 个功能为一体的电力需求侧管理平台，覆盖政府、电网、企业与电能服务商四类主体。按佛山供电局试点目标测算，平台需接入 1000 家以上大用户，完成试点后，可每年节电 13.5 亿千瓦时，减少新建电厂投资约 20 亿元、减排二氧化碳 135 万吨，并带动电能服务业 GDP 增加约 100 亿元。^[27] 试点期内佛山需求响应成效显著：2013 年备案项目 224 个、年节电量 3.1 亿千瓦时，降低与转移负荷 16.6 万千瓦；2015 年开展两次大规模响应，参与企业 96 家，削减负荷 13.4 万千瓦，完成率达 97.8%；2016 年平台接入 1.7 万家工业用户数据，实现 15 次需求响应，调节能力约 19.8 万千瓦。^[28] 财政激励在初期发挥重要作用，2013-2015 年能效电厂与移峰填谷项目补贴为 570 元/千瓦，调峰项目补贴 130 元/千瓦，冰蓄冷用户享受峰谷电价（1.36/0.39 元每千瓦时），有效提升了用户参与度。^[29]

3 需求侧灵活性潜力 综合评估

3.1 研究范围与边界

本报告以深圳、广州、佛山三市典型产业与负荷结构为基础，从工业、服务业、新型负荷三大类构建覆盖主要用户侧资源的“可调资源池”，并测算各类资源在 2027 年条件下的可调节灵活性潜力。前者指在一定技术和管理条件下可被聚合和控制的设备与用能场景集合；后者指在既定边界和当前市场机制下，单位时间内可通过需求响应实际调用的上 / 下调功率或电量规模，代表技术上可实现的可调用潜力。研究聚焦配电网及用户侧需求响应资源，不包括发电机组灵活性改造及电源侧调峰能力。

工业负荷是“存量型、基数大”的灵活性主体。结合三市产业结构，本报告选取六类行业作为代表：通用和专用设备制造业、计算机设备制造业、橡胶和塑料制品业、汽车制造业、电子设备制造业和金属制品业。这些行业既包括连续性工艺，也包含可中断性较强的加工行业，代表了三市主要可调工业负荷类型。

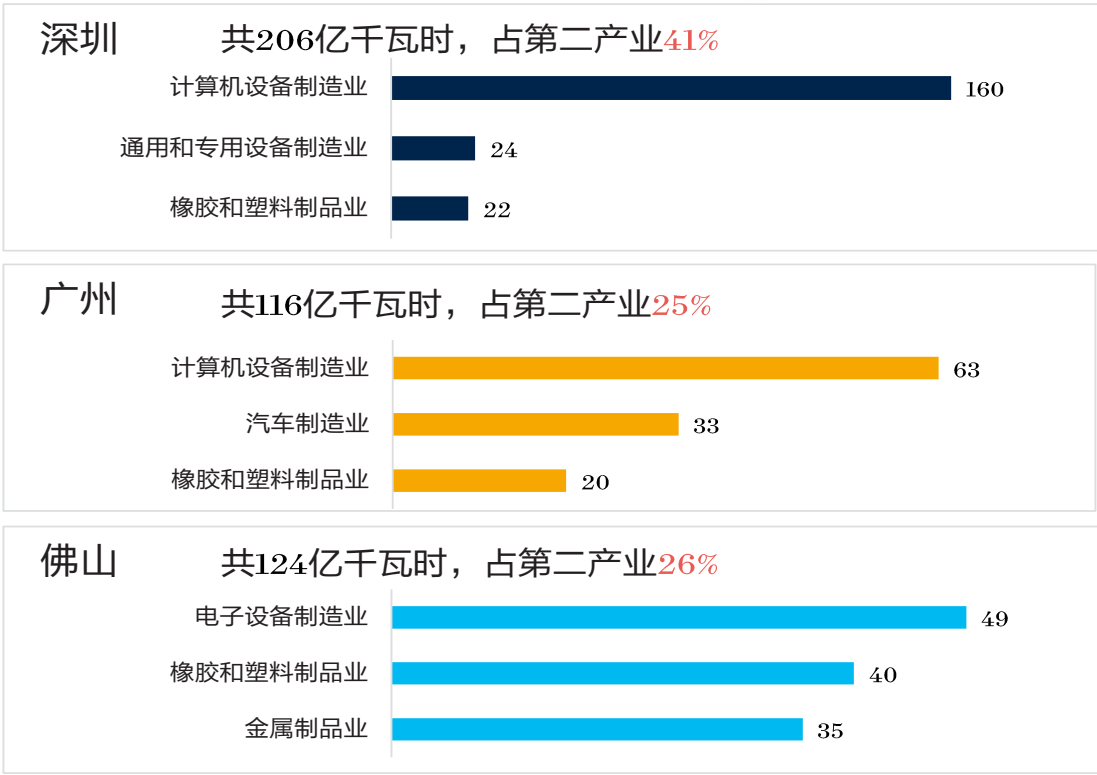


图 3-1 三市第二产业代表行业用电量情况（亿千瓦时）

来源：《深圳统计年鉴 2024》《广州统计年鉴 2024》《佛山统计年鉴》

第三产业负荷随城市服务业扩张快速增长，是需求侧灵活性的主要增量来源。作为“增量型、潜力高”的灵活性主体，主要集中于商业楼宇、公共建筑、酒店、医院、会展中心与综合体，具有显著的日内峰谷特征，其空调、照明与部分辅助系统可通过温控优化、启停策略、群控等方式实现快速响应。

新型负荷是“成长型、策略性”的灵活性增量资源，具备可移峰、反调节（如 V2G）、双向响应、策略灵活等特性，是三市灵活性快速提升的关键驱动力。本报告重点覆盖电动汽车、储能、蓄冷、分布式光伏以及 5G 基站五类对象。

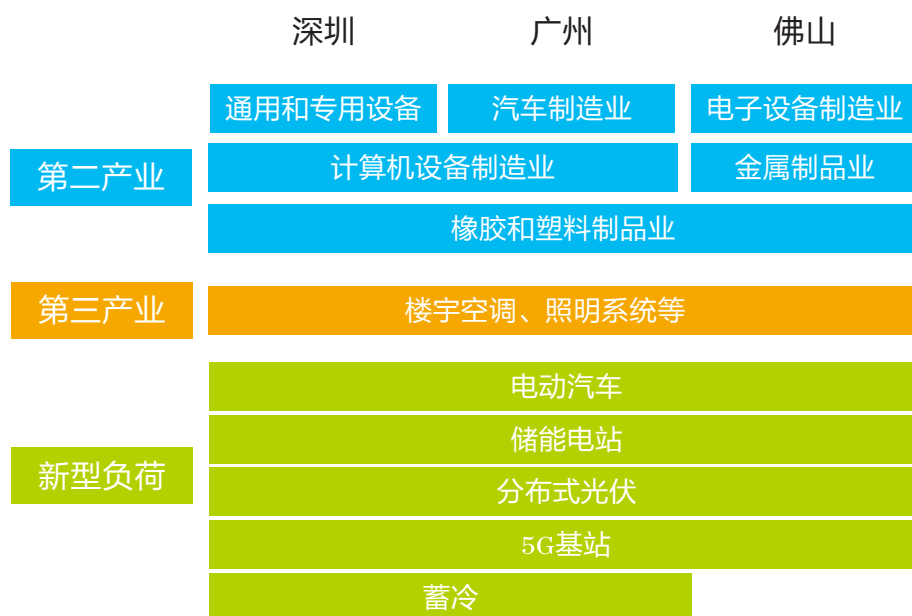


图 3-2 代表城市行业选取

3.2 测算方法

3.2.1 灵活性潜力测算方法

为保证不同城市与行业之间的可比性，本节以典型工作日、1h 响应时长为基准，在不显著影响工业企业正常生产节奏、不影响居民和商业用户基本生活服务的前提下，挖掘可在中短时范围内技术可行的灵活性可调潜力。

根据各市分行业用电量，预测 2027 行业用电高峰负荷，结合典型用电负荷曲线和调节比例，估算调控时段可提供的灵活性潜力，计算公式如下：

$$\text{调控时段用电高峰负荷} = \text{年用电量} \div 8760\text{h} \div \text{负荷率} \quad (1)$$

$$\text{行业灵活性潜力} = \text{调控时段用电高峰负荷} \times \text{灵活性潜力占比} \quad (2)$$

新型负荷方面，本报告按“资源池 - 可控比例”口径统一测算：先确定可调资源量，再乘以接入调度率与调节渗透率得到事件时段的等效可调用能力，如公式（3）。

$$\text{新型负荷灵活性潜力} = \text{可调资源量} \times \text{接入调度率} \times \text{调节渗透率} \quad (3)$$

本报告综合采用“自上而下”和“自下而上”，系统层面以各市 2027 年最大负荷 8% 的调节需求作为参考目标，资源层面根据行业负荷特性、典型负荷曲线、新型负荷渗透率、设备可控比例等参数推算可调节能力，最终汇总形成整体灵活性潜力。

3.2.2 经济效益测算方法

根据上述估算的灵活性潜力，本报告在典型调控情景下，考虑调控各类灵活性资源在实际运行中产生的激励费用，核算负荷侧响应成本，同时结合三市调峰发电结构及调峰情景，计算电源侧发电机组提供同等灵活性能力所需成本，估算各类灵活性资源调控带来的净经济效益。电源侧可避免发电成本如公式（4）所示：

$$LCOE = \frac{C_{inv} + \sum_{n=1}^N \frac{C_{op}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{ER_m \times h_m \times m}{(1+r)^n}} \quad (4)$$

式中：

C_{inv} ——初始投资成本（元）；

C_{op} ——运行维护成本（元）；

ER_m ——发电侧电力容量（kW）；

h_m ——第 m 次需求响应时长（h）；

m ——年执行需求响应次数；

r ——折现率（%）；

N ——项目生命周期（年）。

各灵活性资源投资成本和运行维护成本，^[30-32] 如下表所示：

表 3-1 电源侧灵活性资源成本

类型	投资成本 (元 / 千瓦)	年运行维护成本 (元 / 千瓦)	机组使用年限 (年)
灵活性改造煤电	4300	1082	30
燃气电厂	7000	387	20
抽水蓄能	6700	184	50
光伏	4400	48	25
沼气	2900	6160	10

此外，由于需求侧提供的灵活性资源具有多重效益（经济效益和环境效益），本报告进一步估算了需求侧响应时可避免的 GDP 损失，以及可避免碳排放社会成本。可避免的 GDP 和碳排放社会成本估算如公式（5）和公式（6）所示：

可避免 GDP 损失 = 灵活性潜力 × 响应小时数 × 度电 GDP (5)

可避免碳排放社会成本 = 二氧化碳排放社会成本 × 灵活性潜力 × 响应小时数 (6)

3.3 灵活性潜力测算

3.3.1 第二产业

（1）金属制品业（佛山）

佛山金属制品业涵盖铝型材加工、金属冲压、结构件制造以及电镀 / 喷涂等配套服务环节，是典型的连续生产 + 间歇峰值负荷行业。企业普遍采取三班 24 小时运行，用电曲线整体平稳，冲压工序叠加形成短时高峰，夜间部分辅助设备间歇运行。具备可中断与降载并存的调节特征。在不影响关键工序及交付的前提下，典型调节手段包括：停开部分压力机、暂停非紧急清洗 / 烘干批次、关闭非必要照明和适度上调空调设定温度，单次响应持续时间一般不超过 1 小时。^[33]

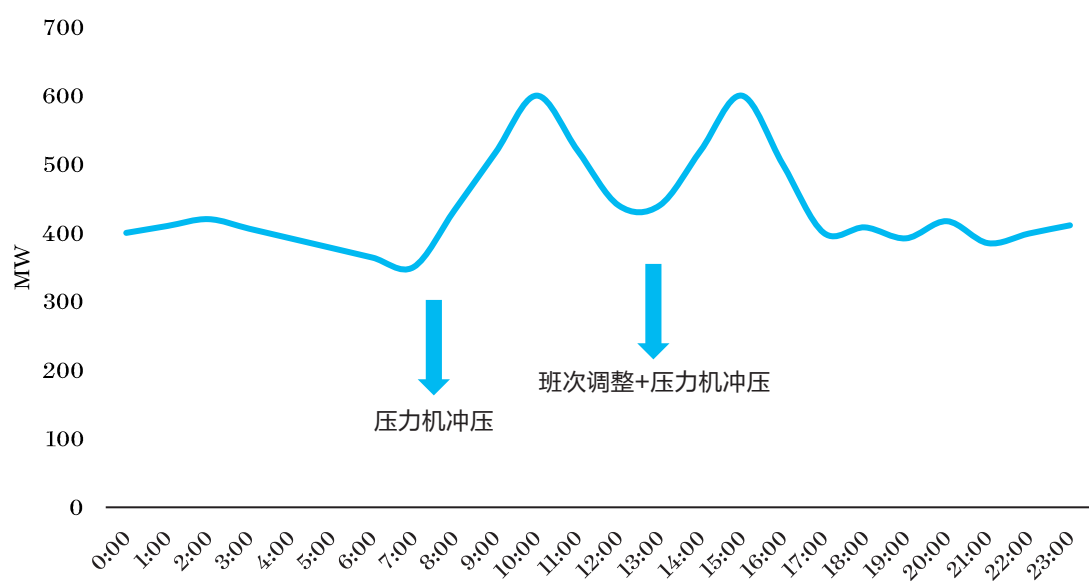


图 3-3 金属制品业典型用电负荷

根据 2016-2024 年规模以上工业用电数据，金属制品业用电长期占佛山工业用电 10%-11%，并保持约 2%/ 年的增长。则 2027 年用电量约 54 亿千瓦时，按典型负荷率 0.73 估算高峰时段最大用电负荷约 85 万千瓦。若取 15% 调节渗透率，则佛山金属制品业可释放的需求侧灵活性调节潜力约为 12.8 万千瓦，是佛山制造业中重要的削峰资源之一。

表 3-2 金属制品业灵活性潜力分析

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
压力机	开关	可中断	30%	20%-30%	11%-22%
清洗线 / 烘干线	开关	可中断	15%	30%-40%	
照明	开关	可中断	5%	0%-100%	
空调系统	降温	可削减	8%	10%-20%	

（2）橡胶和塑料制品业（深圳 / 广州 / 佛山）

橡胶和塑料制品生产工艺因产品的不同，工艺也不同。以塑料行业为例，其生产流程对供电可靠性要求高，多采用三班制，注塑、破碎、吹塑等设备 24 小时运行，负荷呈

“稳定基荷 + 频繁短峰”锯齿状特征。为了不破坏生产节拍，需求响应主要通过关停部分辅助设备和非生产性负荷实现，例如车间通风、备用冷却塔风机、非核心区域空调和照明等，可支持 1 小时以上的持续响应。^[34]

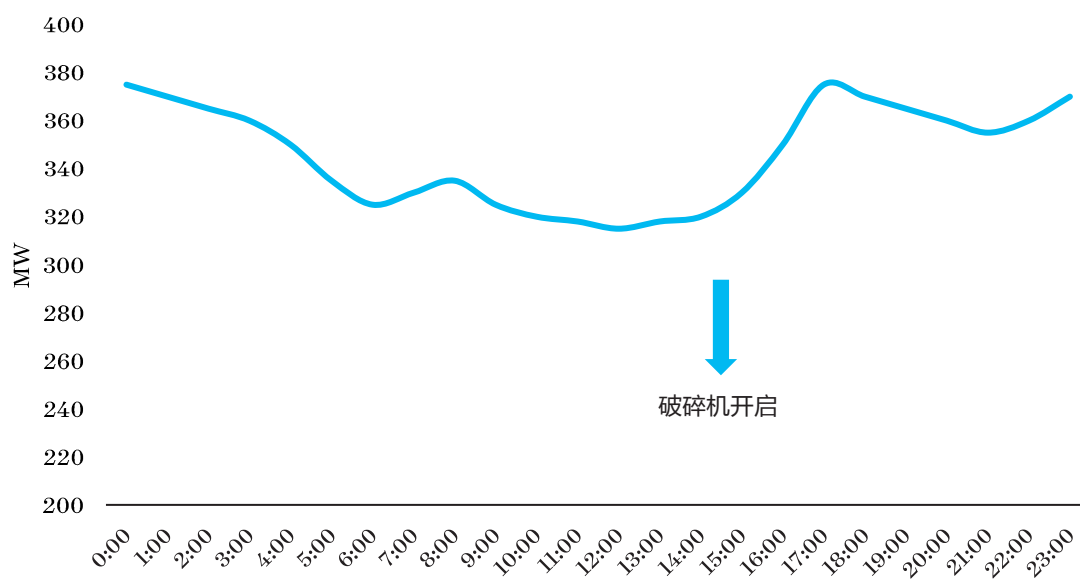


图 3-4 塑料行业典型用电曲线

根据三市行业发展态势，预计 2027 年橡胶和塑料制品业用电量分别约为：深圳 31 亿千瓦时、广州 22 亿千瓦时、佛山 71 亿千瓦时。按典型负荷率 0.92 估算，高峰用电负荷分别约为 39 万千瓦、27 万千瓦和 88 万千瓦。考虑到连续性工艺对停机和温控高度敏感，本报告取 8% 调节渗透率，测算得到三市橡胶和塑料制品业可释放的灵活性潜力分别约为 3.1 万千瓦、2.2 万千瓦和 7.0 万千瓦。由于行业规模基数大，尤其是佛山产业集聚度高，该行业仍能在三市需求侧响应中提供一定规模的削峰能力。

表 3-3 橡胶和塑料制品业灵活性潜力分析

调节设备	调节方式	响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
风机、小型电压机、空压机	开关	可中断	8%	20%-50%	2%-10%
照明	开关	可中断	10%	0%-30%	
分体及中央空调系统	开关 / 降温	可中断、可削减	10%	0%-30%	

（3）通用和专用设备制造业（深圳）

通用设备与专用设备制造业涵盖机械加工设备、金属成形设备、成套生产装置等多类型装备。该行业生产节拍相对灵活、工序离散度高，多采用两班制或三班制，日负荷曲线呈“白天集中、夜间回落”特点，是制造业中可调性较强的代表行业之一。

以典型机械加工设备生产线为例，其流程包括熔化、切割、热处理、焊接、总装与测试环节，用电峰谷差率较大，早峰时段是全天的生产用电高峰，深夜时段是生产用电低谷。需求响应阶段主要通过对熔化炉、热处理炉、高频炉、鼓风机、烘干机等高能耗设备进行降功率或降频运行，并配合关停部分通风设备和非生产区域照明，实现 0.5-2 小时的削峰。^[35]

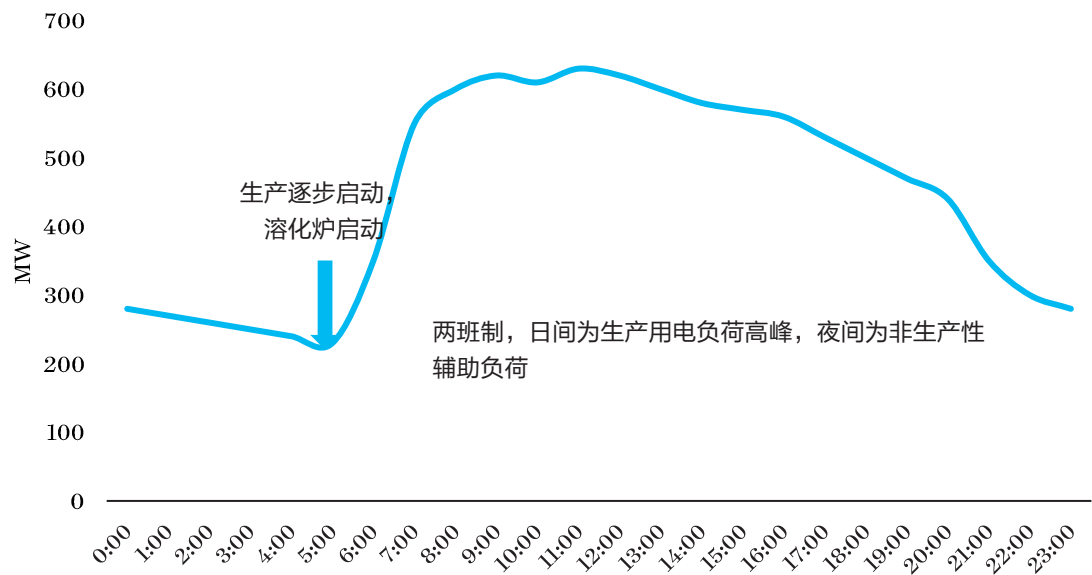


图 3-5 通用和专用设备制造业典型用电曲线

深圳通用 / 专用设备制造业近年来用电年均增速约 2%，预计 2027 年用电量约 35 亿千瓦时。按负荷率 0.71 估算，高峰用电负荷约 57 万千瓦。考虑以高端加工与精密制造为主，设备单体价值高、加工节拍敏感，本报告取 21% 调节渗透率，测算深圳该行业可提供的灵活性调节潜力约为 11.9 万千瓦。

表 3-4 通用和专用设备制造业

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占	
				个体占比	合计
热处理炉	降温	可削减	11%	20%-50%	10%-27%
高频炉	降频	可削减	8%	20%-50%	
熔化炉	降功率	可削减	12%	25%-50%	
鼓风机	降频	可削减	7%	20%-50%	
烘干机	降频	可削减	4%	20%-60%	
风机、通风机	开关	可中断	5%	20%-65%	
照明	开关	可中断	1%	0%-100%	
分体及中央空调系统	开关 / 降温	可中断、可削减	1%	0%-100%	

（4）计算机设备制造业（深圳 / 广州）

计算机设备制造业是深广电子信息产业的重要支撑，其中数据中心是负荷规模最大、运行最稳定的负荷单元，由于 IT 服务器与制冷系统实行全年 24 小时运行模式，呈现“高基荷 + 温度敏感”的单峰特征。其调节路径主要包括：负载迁移、短时关闭空闲服务器、适度上调机房空调设定温度、利用蓄冷移峰以及关停非必要照明等，具有响应速度快、调节深度可预期的特点。

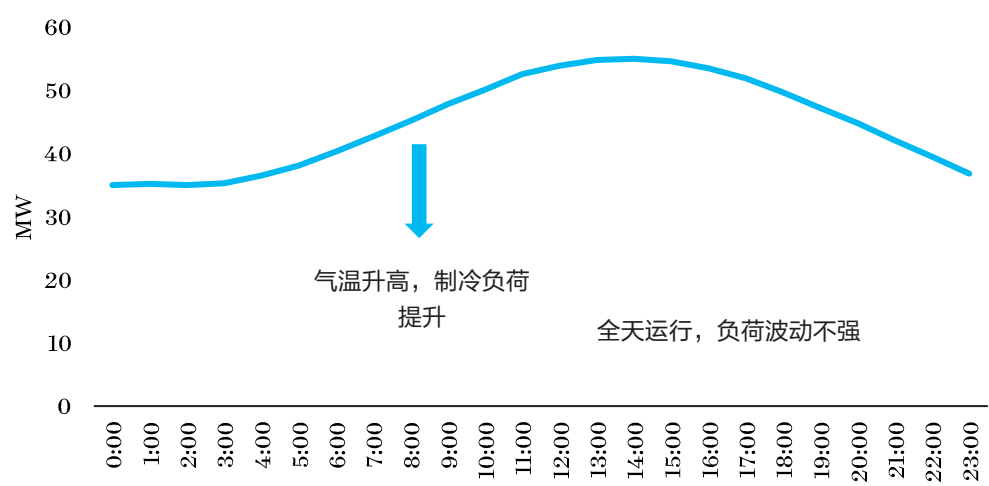


图 3-6 数据中心典型用电曲线

根据广东电网数据和数据中心分布情况估算，2024 年上半年广东 209 个数据中心总用电量达到 35.2 亿千瓦时，同比增长 44.4%。结合广州与深圳数据中心存量规模及已公布规划布局，预计至 2027 年深圳、广州数据中心年用电量分别约为 37 亿千瓦时和 56 亿千瓦时，按行业典型负荷率 0.82 估算，峰时负荷约为深圳 52 万千瓦、广州 78 万千瓦。考虑到 IT 负载可迁移性与制冷系统可调特性，本报告分别取深圳 25%、广州 34% 的调节渗透率，对应可释放灵活性潜力约为 13.0 万千瓦和 26.4 万千瓦。

表 3-5 计算机设备制造业灵活性潜力分析

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
IT 服务器	开关、负载迁移	可中断、可削减	50%	20%-30%	22%-34%
冷却系统	开关、变频	可中断、可削减	40%	30%-40%	
不间断电源	协助削峰	可削减	6%	5%-15%	
照明	开关	可中断	2%	0%-100%	

（5）电子设备制造业（佛山）

佛山电子设备制造业长期保持较高产业占比，用电量长期维持在全市规模以上工业用电的 11%-12% 区间，呈现稳定增长态势。日负荷曲线呈典型“双峰”特征，早高峰（8:00-11:00）与午高峰（14:00-17:00），峰值负荷比日均高 40-60%，夜间低谷（0:00-6:00）基础照明和工业冷却维持，用电仅为峰值的 30%-40%，由于上下班需要，午间和晚班会出现负荷缓降。在不影响关键工艺和交付的前提下，行业主要通过：降低焊接设备加热功率、适度调整贴片节拍、回流炉在高峰时段降低部分温区温度、推迟非关键测试任务（如老化测试）、减少舒适性负荷（空调和照明）等方式参与响应。

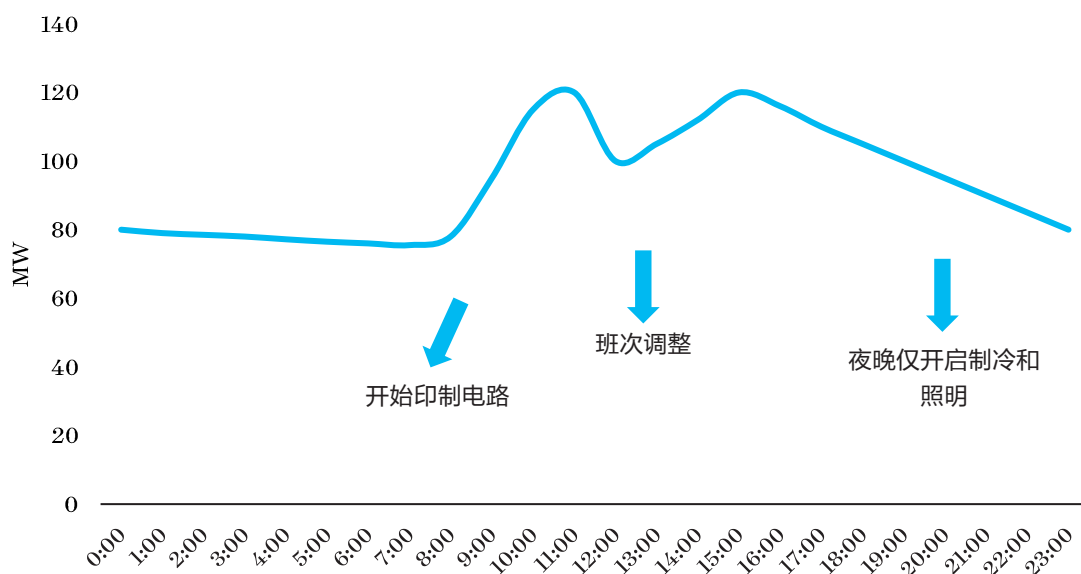


图 3-7 电子设备制造业典型用电曲线

基于年均 2% 的增长趋势，预计 2027 年佛山电子设备制造业用电量约 62 亿千瓦时。按负荷率 0.78 估算，调控时段最大负荷约 90 万千瓦。若调节渗透率按 31% 估算，行业可释放需求侧灵活性调节潜力约 28.0 万千瓦。

表 3-6 电子设备制造业灵活性潜力分析

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
焊接设备	降温	可削减	40%	12%-15%	9%-32%
分体及中央空调系统	降温	可削减	35%	12%-18%	
测试系统	转移测试	可转移	15%	0%-100%	
照明	开关	可中断	5%	0%-100%	

(6) 汽车制造业（广州）

汽车制造业是广州先进制造业支柱行业之一，负荷规模大、季节性强，对电能质量要求高，整体负荷在夏季及白天时段明显抬升。冲压车间以大型压力机为主，呈现周期性脉冲负荷，峰值高、持续时间短，普遍实行双班制。焊装车间自动化程度高，焊接机器人与焊机构成主要负载（占该车间能耗 40%-50%），负荷水平相对稳定，对供电连续性要求严苛。涂装车间为能耗最高环节，^[36]多采用连续三班制，工艺启停成本高，通风风机与烘干炉等设备近乎不间断运行，空调与烘干炉合计约占该车间能耗 44%。总装车间负荷分散，单台设备功率不大但数量众多，用电随生产节拍小幅波动。

在安全与质量边界内，行业具备一定工序协同调节能力。冲压车间将冲压机工序转移至 23:00-7:00 谷电时段或待机。焊装车间将非主线机器人关闭或结合三班倒实施错峰生产。涂装车间减少喷涂线运行生产线。总装车间关闭非作业区照明，作业区下降照明亮度，降低输送线速度，削减电机峰值负荷，优化作业流程和时间安排。^[37]

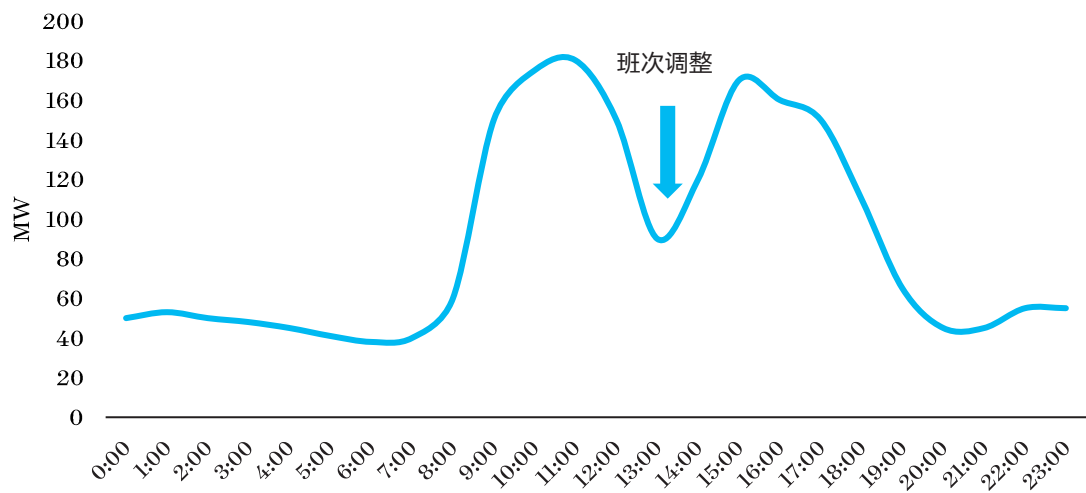


图 3-8 汽车制造业典型用电曲线

根据 2016-2024 年用电趋势，广州汽车制造业年均增速约 7%，预计 2027 年用电量约 46 亿千瓦时。按负荷率 0.5 估算，高峰用电负荷约 105 万千瓦。结合产线柔性 with 工序协同条件，取 23% 调节渗透率，对应可释放需求侧灵活性调节潜力约 24.1 万千瓦。

表 3-7 汽车制造业灵活性潜力分析

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
冲压设备	改变运行时段	可转移	9%	10%-15%	8%-23%
焊装机器人	开关	可中断	13%	10%-25%	
喷漆室	减少产线	可中断	5%	30%	
烘干炉	时移 / 降温	可转移 可削减	7%	40%-50%	
照明	分区开关 / 自动调光	可中断	4%	30%-65%	
中央空调系统	开关 / 降温	可中断、可 削减	14%	0%-80%	

3.3.2 第三产业

服务业是城市侧最典型、最成熟、也是当前三市贡献度最高的需求侧灵活性资源。其涵盖商业综合体、写字楼、酒店餐饮、金融服务、教育医疗及公共建筑等多类型场景，负荷主要集中在空调、照明、电梯 / 扶梯、弱电系统、办公插接负荷及机房冷却等设备上。行业负荷呈现显著的日内与季节性波动：夏季制冷负荷在午后至傍晚形成尖峰，夜间人员活动减少后负荷快速回落。

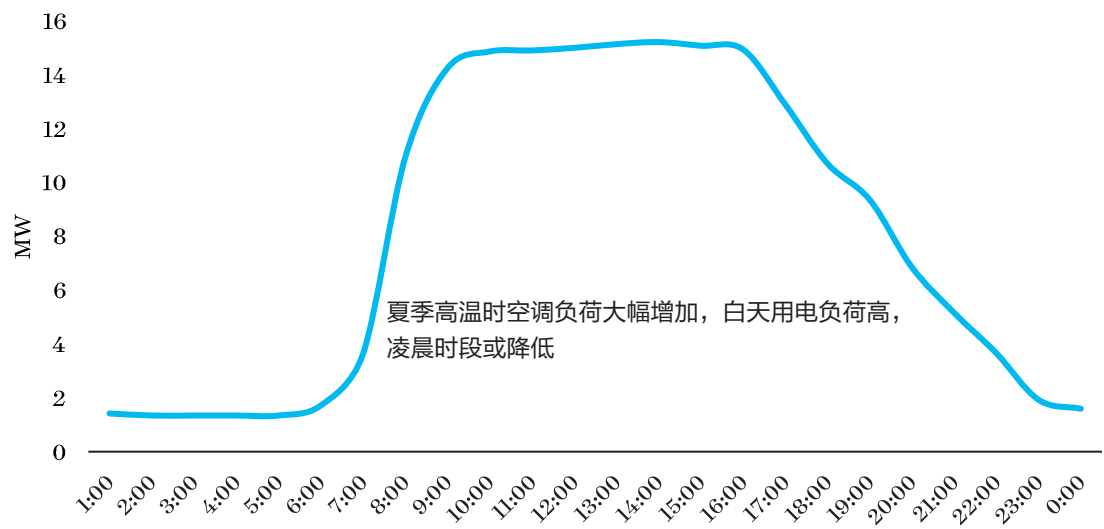


图 3-9 服务业典型用电曲线

服务业因其建筑能耗系统集中、负荷响应快、可控性强，是最成熟的需求响应行业之一。典型调节措施包括：提高空调设定温度、优化冷机运行策略削减制冷负荷；关闭非必要照明与通风设施降低峰段功率；依托楼宇能耗管理系统实现空调群控、照明分区控制、电梯群控等，实现分钟级至小时级的快速响应。在不影响建筑功能及人员舒适性的前提下，服务业可在高峰时段向电网稳定提供可观的削峰能力。

表 3-8 服务业灵活性潜力分析

可调节设备	调节方式	需求响应类型	用电占比	可调负荷占比	
				个体占比	合计
分体及中央空调系统	调温	可削减	40%	15%-25%	6%-14%
照明系统	开关	可中断	15%	0%-20%	
电梯 / 扶梯（群控）	限速 / 待机 / 减少运行台数	可中断	3%-5%	0%-20%	

基于三市服务业用电增长趋势及建筑规模扩张，设深圳、广州与佛山服务业用电量分别以 5%、5% 和 6% 的年均增速增长，基于一定参数假设，得到三市服务业灵活性能力测算结果。如下表。

表 3-9 三市服务业灵活性潜力测算结果

指标	深圳	广州	佛山
2027 年预测年用电量（亿 kWh）	504	567	302
负荷率假设	0.55	0.52	0.50
日高峰用电负荷（万千瓦）	1045	1246	690
可调节渗透率假设	10%	12%	8%
灵活性可调能力（万千瓦）	105	120	55

3.3.3 新型负荷

（1）充电汽车

电动汽车具备保有量快速增长、可控性强和调节方式多样等优势，是三市增长最快的灵活性资源。当前主要调节方式为有序充电，通过引导充电实现移峰填谷。少数试点场景已具备 V2G 能力，在系统紧张时可短时向电网反向送电，为削峰提供额外可控容量。

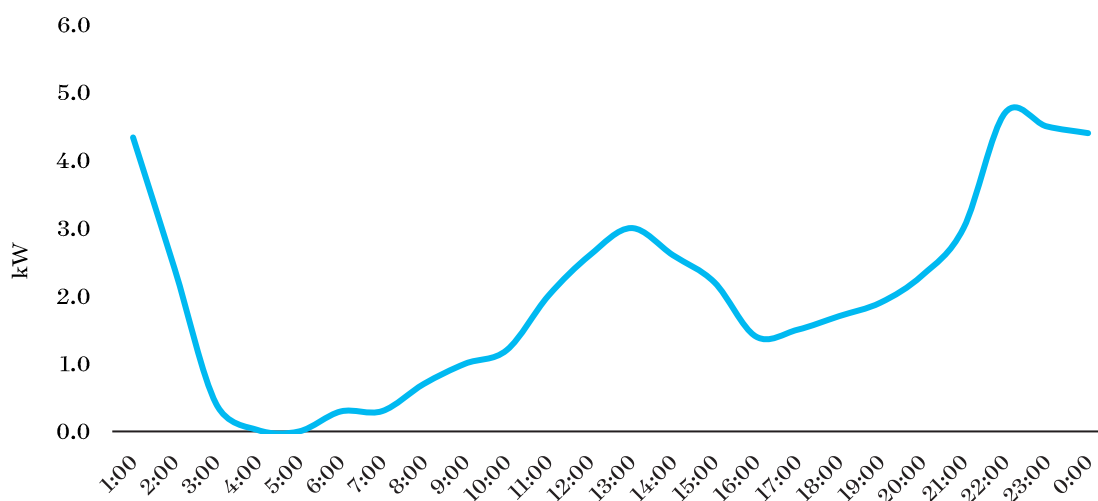


图 3-10 典型充电汽车用电曲线

目前深圳、广州和佛山新能源汽车规模持续扩大，预计 2027 年三市新能源保有量将分别为 198、196 和 61 万辆。在虚拟电厂统一接入与调度条件下，参考深圳虚拟电厂运行经验，根据渗透率和每车 10 千瓦充电功率的参数条件下，三市 2027 年电动汽车通过有序充电可提供的灵活性调节潜力约为：深圳 67.0 万千瓦、广州 59.0 万千瓦、佛山 15.9 万千瓦。根据结合深圳和广州的 V2G 示范项目经验，参与率若按照 80% 测算，^[38] 预计深圳与广州可额外提供约 10.7 万千瓦和 3.2 万千瓦的削峰能力。因佛山 V2G 功能尚处探索阶段，暂不纳入本期测算。综合“有序充电+V2G”两类可调方式，预计 2027 年电动汽车对深圳、广州、佛山需求侧整体削峰能力的贡献将分别达到 77.7 万千瓦、62.2 万千瓦和 15.9 万千瓦。

（2）储能

储能系统是当前新型负荷中响应速度最快、可控性最强、调节深度最高的资源类型，是虚拟电厂最核心的直接受控能力来源。按应用场景划分，储能主要包括电网侧独立储能和工商业用户侧储能两类。从发展规模来看，广东省规划明确提出到 2027 年新型储能装机规模达到 400 万千瓦。^[39] 佛山储能建设进展领先，截至 2024 年底已投运储能项目 107 个，装机规模约 58 万千瓦。^[40] 广州已发布 37 个新型储能站址规划，全部投运后规模将从 26 万千瓦跃升至 450 万千瓦。^[41] 深圳储能接入虚拟电厂最早，当前平台内可调

规模已超过 3 万千瓦并实现常态化调度。结合项目落地节奏与规划路径，预计 2027 年三市电网侧储能规模分别约深圳 54 万千瓦、广州 78 万千瓦、佛山 97 万千瓦。工商业用户侧储能规模分别约 2 万千瓦、2 万千瓦、3 万千瓦。

根据深圳虚拟电厂运行经验，基于三市发展阶段，预计到 2027 年，储能释放的需求侧灵活性调节潜力分别为：深圳 29.1 万千瓦（其中电网侧 28.9 万千瓦、用户侧 0.2 万千瓦）；广州 38.6 万千瓦（其中电网侧 38.5 万千瓦、用户侧 0.1 万千瓦）；佛山 46.3 万千瓦（其中电网侧 46.2 万千瓦、用户侧 0.1 万千瓦）。

（3）分布式光伏

分布式光伏是典型的间歇性可再生资源，具有明显的日内峰谷特征。若配置储能，可在谷段充电，傍晚放电实现移峰与出力平滑。广东省分布式光伏发展迅速，截至目前并网规模已达 41GW。其中广州已建成分布式光伏约 350 万千瓦，规划提出 2027 年装机规模达到 500 万千瓦。^[42] 佛山当前分布式光伏并网约 506 万千瓦，2030 年目标达 600 万千瓦。^[24] 深圳光伏到 2030 年装机容量达到 240 万千瓦，^[43] 目前已接入虚拟电厂平台约 52 万千瓦，具备良好的聚合基础。

作为非直接可控资源，本报告设定光伏接入调度率 30%、可调渗透率 5%-8%。基于各市装机规模、结构特征及虚拟电厂接入情况测算，2027 年三市可提供的分布式光伏灵活性调节潜力分别约为：深圳 7.1 万千瓦、广州 9.2 万千瓦、佛山 11.6 万千瓦。

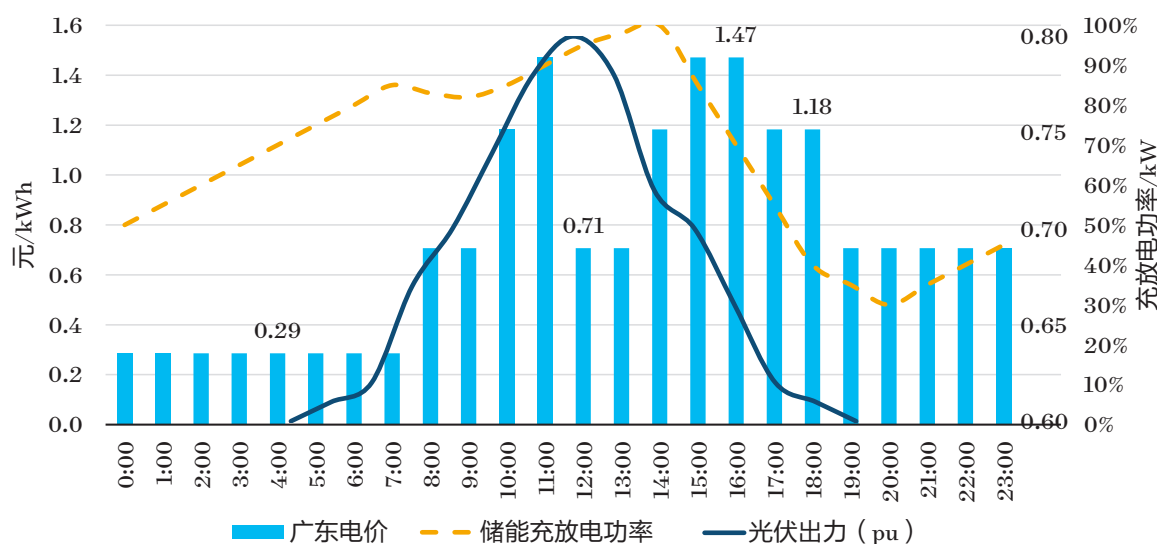


图 3-11 储能充放电和分布式光伏出力曲线

(4) 5G 基站

5G 基站是典型的“数量大、分布广、功率稳定、响应快速”的新型可调负荷，是城市虚拟电厂中最具规模化潜力的资源之一。广东通信基础设施领先全国，截至 2024 年 5G 基站累计建设约 40 万座，其中广州超过 10 万座，并明确提出至 2027 年建设不少于 12 万座的目标。^[44] 深圳约 5 万座，佛山约 3 万座。三市每万人基站数分别为 36.98、35.47 和 30.28 座，显著高于全国平均水平。^[45] 按三市建设规划推算，至 2027 年三市基站规模预计分别达到 12 万座、10 万座和 6.5 万座，对应可调资源池规模约 43、49 和 27 万千瓦。

典型宏基站平均功率约 5kW，可调比例超过 80%，^[46] 是需求响应的核心对象。^[47] 5G 基站灵活性主要来自三类可控设备：1）通信负载可迁移，不同区域基站可通过业务卸载实现负荷空间转移；2）后备储能（磷酸铁锂电池）常年处于待机状态，可作为短时上调（放电）或下调（充电）资源；^[48] 3）变频空调作为稳态底座负荷，可通过温控优化实现快速削峰。^[49]

结合三市建设规模及运行参数，本报告设定基站群削峰渗透率 60%、填谷渗透率 45%。据此测算，2027 深圳、广州和佛山的 2027 年 5G 基站灵活性削峰调节潜力分别为 25.8、29.5 和 16.0 万千瓦，填谷调节潜力分别为 18.9、21.6 和 11.7 万千瓦。

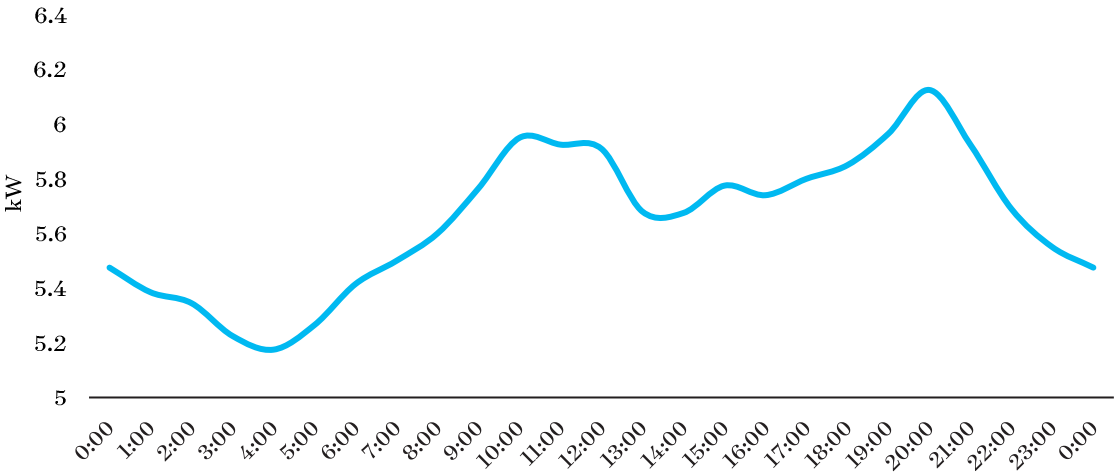


图 3-12 某 5G 基站用电曲线

(5) 蓄冷

蓄冷是楼宇与区域供冷领域最具确定性和可控性的双向可调资源，通过“夜间储冷、白天释冷”实现压缩机负荷跨时段迁移，是典型的可移峰负荷，^[50] 如下图。其调节深度明确、响应持续性好、可控性强。广东是国内蓄冷应用较成熟的区域之一。广州区域集中供冷体系发展较早，如大学城示范区累计蓄冰规模约 25 万冷吨时；^[51] 深圳近年来蓄冷技术快速扩张，前海集中供冷系统规划了 10 个冷站，全部建成后总蓄冷规模预计超过 50 万冷吨时，形成全国领先的城市级示范；^[52] 佛山蓄冷规模较小，本报告暂不纳入测算。

根据深圳前海调研数据，在多栋大型建筑中，蓄冷系统可覆盖商业建筑峰值负荷的 30%-40%。参考深圳虚拟电厂运行监测数据，蓄冷系统的典型调节渗透率取 36%，接入调度率约 75%。结合三市蓄冷应用规模及集中供冷体系成熟度测算，2027 年深圳与广州蓄冷可提供的灵活性调节能力分别约为 19.7 万千瓦和 14.8 万千瓦。

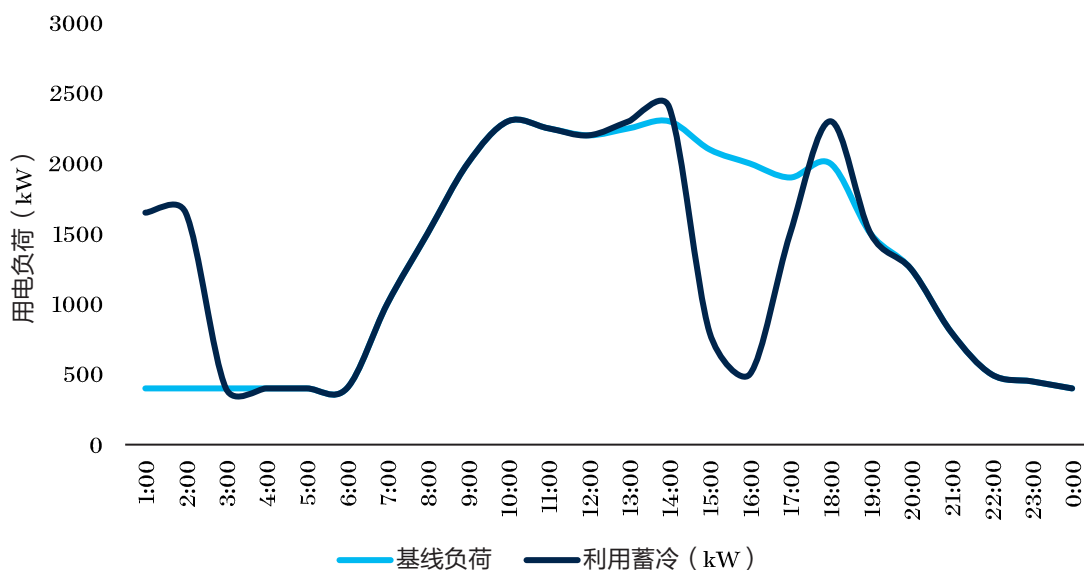


图 3-13 某商业建筑采用蓄冷前后用电曲线

3.3.4 灵活性潜力测算结果

综合三市测算结果，深圳、广州、佛山在 2027 年的削峰潜力分别约为 292、327、193 万千瓦，均明显高于各自 8% 调控目标值（209、234、144 万千瓦），呈现出“削峰能力整体富余”的共性。从结构上看，广州灵活性总量最高，服务业占比大（约 120

万千瓦)；深圳新型负荷接入和平台成熟度领先；佛山则以制造业和电网侧储能为主，电网侧储能整体依赖度高。总体而言，新型负荷已成为三市灵活性能力增长的关键增量，三市在资源结构和技术条件方面的差异，也决定了其在推动需求侧响应和虚拟电厂建设时的重点方向将不尽相同。

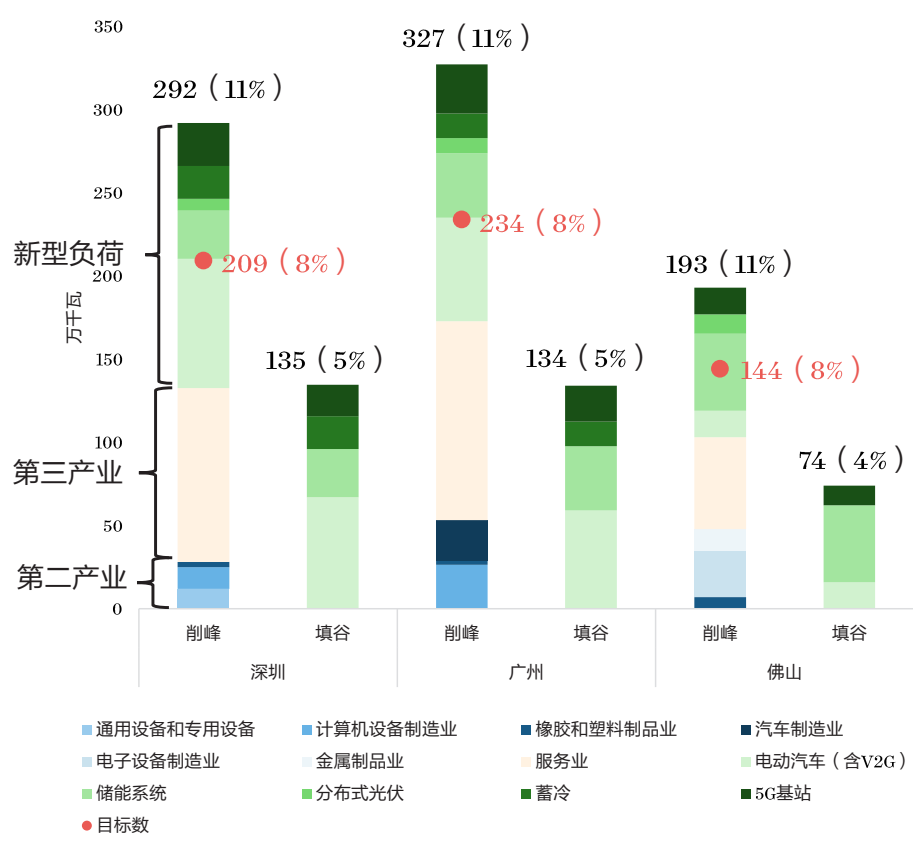


图 3-14 代表城市 2027 年需求侧灵活性潜力

深圳用电高峰集中在 14:00 左右，2025 年夏季深圳电网用电负荷达 2370 万千瓦，^[53] 参考 2016-2024 年深圳全社会用电情况，假设负荷增速为 5%，2027 年深圳最高负荷预计约 2615 万千瓦，8% 调控需求约为 209 万千瓦。测算结果表明，深圳需求侧最大削峰潜力约 292 万千瓦 (约 11%)，填谷潜力约 135 万千瓦 (约 5%)。

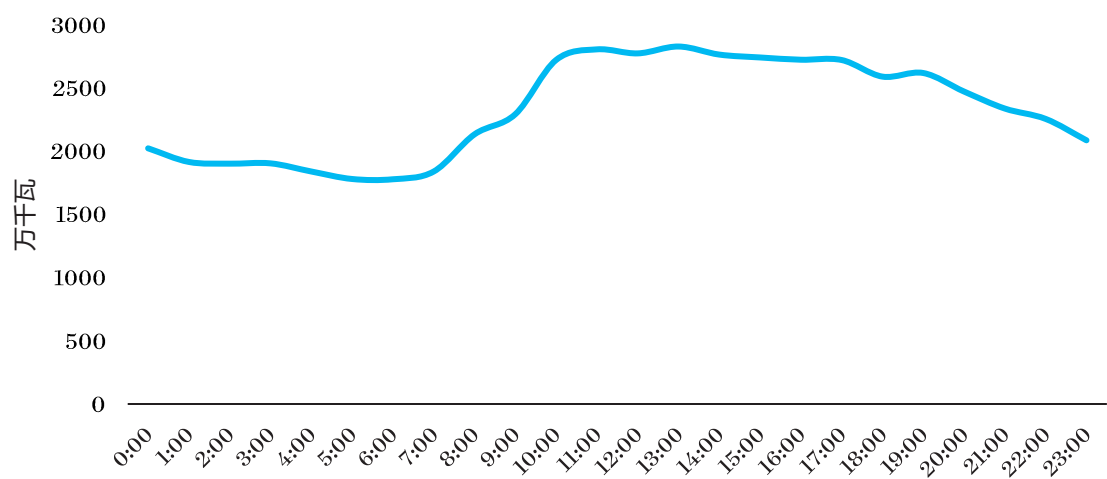


图 3-15 深圳 2027 年全社会用电负荷

广州日用电高峰约在 13:30-14:00。2025 年夏季电网统调负荷达到 2482 万千瓦，^[54]同时参考 2016-2024 年广州全社会用电情况，假设负荷增速为 6%，2027 年广州最高用电负荷预计约 2924 万千瓦。若要实现 8% 调控目标，2027 年广州可调控灵活性资源需求约 234 万千瓦。测算结果表明，广州可挖掘的最大削峰潜力约 327 万千瓦（约 11%），填谷潜力约 134 万千瓦，总量在三市中最高，调节空间最为宽裕。

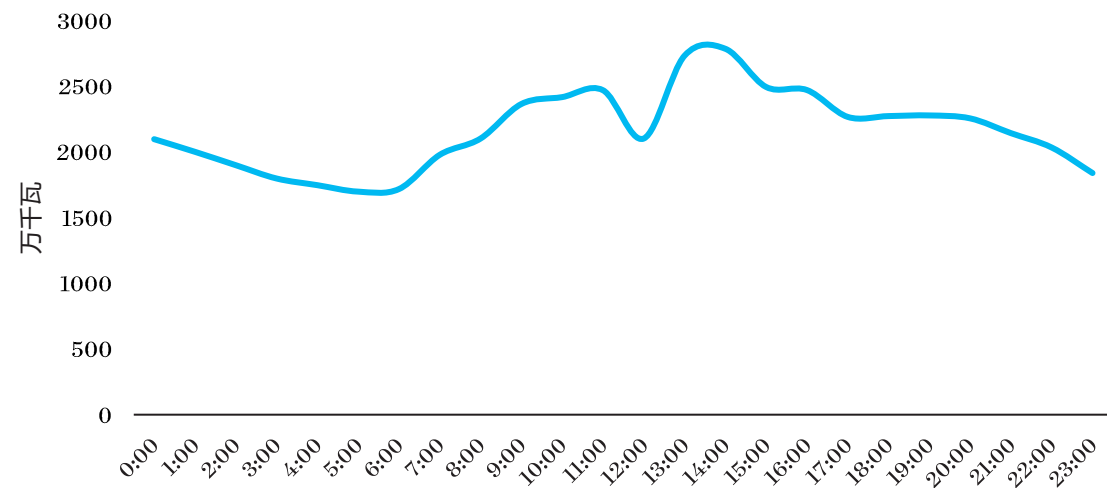


图 3-16 广州 2027 年全社会用电负荷

佛山夏季日用电负荷曲线呈现典型的“双峰”特征，2025 年夏季佛山用电负荷峰值达到 1666 万千瓦，按 4% 年增速推算，预计 2027 年日用电高峰约 1802 万千瓦。若要实现 8% 调控目标，佛山须具备约 144 万千瓦的需求侧灵活性调节能力。结果表明，佛山 2027 年的需求侧灵活性潜力最大可实现调节能力约 193 万千瓦（约 11%），填谷潜力约 74 万千瓦，几乎全部由新型负荷承担。

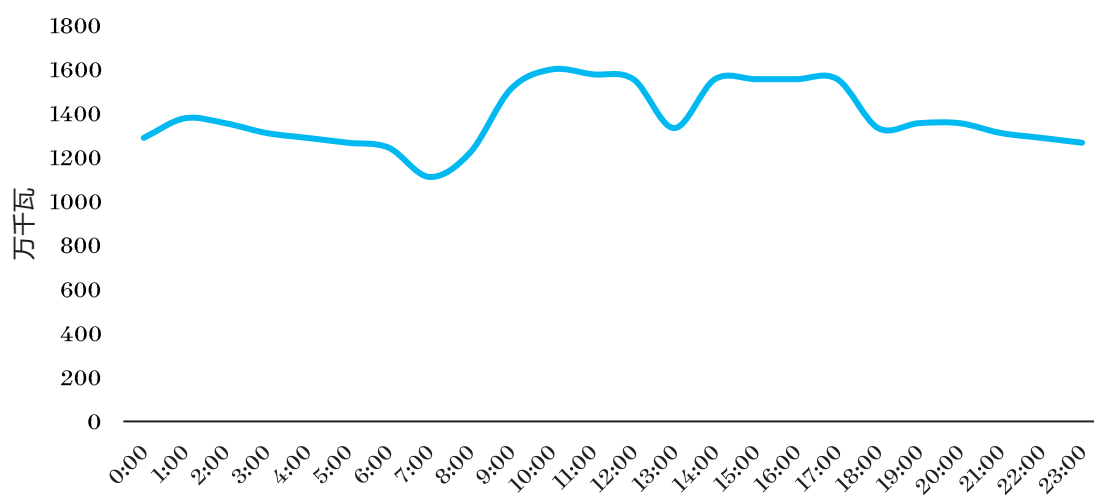


图 3-17 佛山 2027 年全社会用电负荷

3.4 经济效益测算

需求侧灵活性不仅能降低系统调峰成本，也是提升新能源消纳、避免经济损失与减排的重要手段。本节在统一假设（备用容量比例 15%、输配电损耗 7%）下，基于三市 2027 年灵活性潜力，构建 50h、100h、200h 三种调控情景，综合评估其调峰成本规避效益、净经济收益以及可避免的 GDP 损失与可避免碳排放社会成本。

3.4.1 调峰成本与净经济收益测算结果

为刻画在“无需求响应”情景下需启用的高成本调峰电源，本报告结合三市装机结构和规划趋势，构建了 2027 年的调峰电源结构假设，如下表。深圳可控电源以气电和可再生能源为主，风光占比预计提升至约 35%，调峰对天然气机组依赖度较高。广州现有装机

中气电占比超过四成，随着新能源持续扩张，预计 2027 年光伏占比进一步提高、煤电占比下降，调峰成本结构将由气电主导。佛山煤电占比较高（64%），但预计至 2027 年煤电占比将降至约 45%，天然气与新能源装机同步增长。不同类型电源的边际成本特征直接决定了调峰时段需要启用的“高成本机组”比例，进而影响最终的调峰成本。

表 3-10 调峰情景假设

装机占比	燃煤	天然气	水电	风光	生物质
深圳	30%	25%	7%	35%	3%
广州	25%	50%	1%	20%	4%
佛山	45%	35%	1%	15%	4%

在此基础上，按照 50h、100h、200h 三种年度调峰时长情景，计算三市度电调峰成本，并采用了广东省需求响应最高出清补贴 3.5 元 / 千瓦时作为补贴标准，根据各市调峰结构的差异，得到需求响应带来的度电净经济收益，结果见下表。

表 3-11 调峰度电成本与净经济收益测算结果

城市	调峰度电成本（元 / 千瓦时）			调峰净经济收益（元 / 千瓦时）		
	50h	100h	200h	50h	100h	200h
深圳	21.4	12.4	7.9	17.9	8.9	4.4
广州	25.7	14.3	8.6	22.2	10.8	5.1
佛山	25.7	15.4	10.2	22.2	11.9	6.7

根据测算，当调控时长从 50h 到 200h 时，三市单位调峰成本均下降超过 60%，体现典型的固定成本摊薄效应。在广东省最高 3.5 元 / kWh 出清补贴机制下，三市在全部时长情景下均保持稳定的正净经济收益，说明需求侧灵活性作为“虚拟电源”，在短、中、长时调控均具有显著的成本优势。深圳风光占比高、可调火电偏少，调峰依赖气电，单位调峰成本较高，但可规避成本也更高，因此净收益高。广州气电占比高，调峰成本中等，规模优势明显，综合效益最强。佛山煤电占比高，边际调峰成本最低，使其在调峰收益稳定性方面表现较好。

3.4.2 可避免 GDP 损失与碳减排效益测算结果

需求响应除了直接降低调峰电量成本外，还可以显著减轻因供需偏紧导致的经济产出损失。基于 2016-2024 年三市 GDP 与全社会用电量历年数据，推算得到 2027 年度电 GDP：深圳约 27.0 元 / 千瓦时，广州约 24.9 元 / 千瓦时，佛山约 16.1 元 / 千瓦时。本报告使用广州碳排放权交易中心披露的减碳成本 33.4 元 / 吨 CO₂ 作为依据，¹ 假设电力碳排放因子为 0.33 千克 CO₂ / 千瓦时。² 据此估算在不同调控时长情景下可避免 GDP 损失与可避免碳排放社会成本，结果如下。

表 3-12 可避免 GDP 损失与可避免碳排放社会成本测算结果

城市	度电 GDP (元 / 千瓦时)	可避免损失 GDP (亿元)			可避免碳排放社会成本 (亿元)		
		50h	100h	200h	50h	100h	200h
深圳	27.0	28.3	56.5	113.1	116.0	232.0	464.0
广州	24.9	29.2	58.3	116.7	129.7	259.4	518.8
佛山	16.1	11.6	23.2	46.3	79.9	159.8	319.6

报告通过不同调控情景的分析，展示了需求响应具备显著的成本规避能力，实施需求响应可避免各市因供需紧张而产生的经济损失，同时兼具一定的碳减排效益，有利于推动城市能源结构向低碳化方向演进。根据测算，深圳、广州和佛山均表现出良好的碳减排潜力，在 200 小时调控情景下，广州的可避免碳排放社会成本达 519 亿元，而佛山相对较低，约为 320 亿元。

1 碳排放价格根据广州碳排放交易中心 2025/7/22—2025/7/28 成交平均价格估算
2 该电力排放因子参考国家生态环境部披露省级电力碳排放因子及《中国区域电网二氧化碳排放因子研究》估算所得

4 需求侧灵活资源挖掘的挑战与行业建议

4.1 面临挑战

4.1.1 管理体制：规则不统一、标准缺位

（1）**聚合商定位不明，权责收益待明确**：现行体系中聚合商商业定位不清，缺统一职责界定与考核标准。电网、聚合商、用户间权责边界和收益分配规则不透明，结算流程有梗阻，影响各方投入与运营积极性。

（2）**标准未统一，制约规模化推广**：设备接口、通信协议等存在区域差异，形成“数据孤岛”，阻碍资源调度结算，降低虚拟电厂及需求响应模式推广效率。

（3）**省市协同待完善，市级平台发展不均衡**：省、市、区在调度、启动、收益等方面缺统一规范，协同架构不健全。市级平台有差异，高比例新能源接入下邀约方式难满足实时调节需求。

（4）**多主体协同不足，影响响应**：需求侧调控涉及多方但无标准化协同流程，信息传递和指令执行滞后。电网内部部门业务未协同，中小企业和居民用户缺技术与运维保障，区域调节能力共享和跨区域交易机制待健全。

4.1.2 技术体系：数字化水平不均、模型精度有限

（1）终端数字化基础弱，软硬件支撑不足：工商业存量设备在线监测等覆盖率低，工业负荷受工艺和订单影响，商业空调负荷与气象、人流相关，可调资源识别精度低。新型资源规模扩张快但随机性大、调控策略多，改造接口与标准不统一，接入成本高、周期长。

（2）负荷资源可控性释放不充分，资源结构与调控能力错配：受生产工艺和运行安全等制约，工业、商业及新型负荷实际可调能力低于理论潜力。佛山连续性工艺集中，削峰空间大但调节窗口受限；广州关键工序不可中断，楼宇暖通系统陈旧、控制粒度不足；深圳高端制造对电能质量和供电连续性要求高，“无感化调节”难度大，“资源大、可调小”问题突出。

（3）虚拟电厂平台能力参差不齐，“云边端”协同机制不健全：三市平台技术成熟度和功能架构差异大，关键环节缺乏统一标准，事前、事中、事后方法不一致，调节量计量及核证公信力不足，难以满足实时高精度调度和高频市场化结算需求。

4.1.3 市场机制：激励难以常态化、市场通道受限

（1）激励机制长效性不足，常态化运行基础薄弱：当前需求响应激励主要依托地方财政补贴，资金规模受年度预算制约波动大，部分资源闲置或低频调用，未建立与容量补偿匹配的长期稳定机制，制约资源常态化参与水平。

（2）价格信号传导机制不完善，用户侧调节积极性待提升：批发市场现货及尖峰电价未有效向终端传导，中小工商业及居民用电价格激励作用不足。负荷多峰叠加，在峰谷价差收窄与信号滞后影响下，部分设施高峰时段充电，加剧系统调峰压力。

（3）市场准入机制存在短板，新型负荷价值实现路径不畅：广东省虽已运行现货及辅助服务市场建设，但负荷侧参与渠道不足，分散资源在规模门槛等方面达标困难，其价值未获市场充分认可与合理补偿。

4.1.4 商业模式：收益传导薄弱、用户参与动力不强

（1）商业模式不成熟，缺可持续市场化收益体系：虚拟电厂和需求响应靠补贴和专项资金，市场化收益与系统贡献未直接挂钩，行业“造血”能力不足。

（2）收益分配机制透明度低，用户参与动力不足：电网企业、聚合商与终端用户间收益分成、结算周期及风险分担规则无统一标准，居民用户获得感不强，收益预期不稳定。

（3）行业机会成本差异大，用户侧参与意愿弱：高产值工业用户机会成本高于激励水平，权衡订单安排等因素，填谷响应动力不足；商业楼宇有协调、安全、隐私和控制权等顾虑；高附加值产业占比提升使现有激励与用户机会成本缺口拉大。

4.2 发展建议

4.2.1 政府层面：强化顶层设计与生态构建

（1）健全法规标准：加快构建虚拟电厂全生命周期法规与标准体系，制定统一规范，推动标准化接入，破除数据壁垒，建立第三方检测认证机制。

（2）完善治理补偿机制：明晰省、市、区职责，建立“市场主导、行政保障”协调机制，制定跨区域资源调用与补偿细则，提升协作效能。

（3）建立双轨激励机制：设省级专项资金，推行“基线补偿+绩效奖励”模式，支持核心城市制定差异化政策。

（4）建设平台培育生态：牵头成立产业联盟，发布指南，提供服务，降低成本。建省级协同平台，实现信息互通与联动，支持商业模式创新，探索交易，吸引资本投入。

（5）强化宣传培训：通过媒体、平台等开展宣传与培训，组织相关方参与解读与指导，推动企业参与标准制定与试点。

（6）推进试点示范：深圳发展高端制造调节与V2G，广州推广楼宇调控与有序充

电，佛山挖掘工业负荷与储能。省级层面，推动完善各类需求侧资源参与市场的实施方案，让需求侧灵活性资源真正发挥市场价值。

4.2.2 电网层面：构建灵活资源枢纽与智能服务平台

（1）加快推进用户侧灵活资源基础改造，夯实资源调节基础：统筹补贴与金融工具，支持加装智能传感及控制终端，推广“柔性调节技术包”，转化存量负荷。同步优化新型负荷布局，降低对高成本火电机组依赖。

（2）建设云-边-端协同调控平台，推动智能化升级：构建“云端优化、边缘响应”架构，省级统筹、地市聚合并开放 API，部署边缘单元实现秒级响应。结合数字孪生与 AI 提升负荷预测与策略优化能力，保障数据安全。

（3）建立“双轨制”运行控制与安全保障机制：构建“日前承诺+实时召唤”体系，依托区块链追溯调节贡献，保障结算公平透明。

（4）优化市场准入流程，完善结算补偿制度：电网企业整合业务职能，设虚拟电厂服务窗口，提供一体化服务。实施“容量+电量”补偿机制，压缩结算周期，探索资金反哺机制。

（5）培育第三方服务市场：支持聚合商等主体发展，通过政府购买与示范工程引领，构建服务生态体系。

4.2.3 市场层面：健全价格机制与交易体系，释放灵活资源价值

（1）打通批发-零售价格传导链，引导资源优化配置：深化现货和电价改革，试点节点电价，允许售电公司等设计含实时电价或尖峰激励的零售套餐，拉大峰谷价差，实施精细化、差异化电价机制，配套专项政策，精准传递电力时空价值到用户侧。

（2）丰富交易品种，拓宽资源参与渠道：全面放开负荷侧电能量及辅助服务市场准入，设多时间尺度交易窗口，放宽容量、时长等约束，开发适应分布式及小规模资源的交易产品，建立涵盖容量、备用及灵活性价值的市场化定价机制。

（3）促进多市场协同，推动电力、碳市场与绿色金融联动发展：建议广东依托全国碳市场经验开展碳交易试点，研究虚拟电厂减排量计量方法并纳入区域碳市场或碳普惠体系。通过双激励机制实现碳交易收益及绿证奖励叠加，简化绿证申领程序。创新绿色金融产品，支持政府保障用户侧基础设施改造，建立与补贴退坡联动的激励机制。

4.2.4 用户层面：引导主动参与，培育新型用能文化

（1）实施分层聚合与分类参与机制，降低准入门槛：推行“直接参与 + 代理聚合”模式，大用户直入市场，中小用户由聚合商集中参与；鼓励重点园区和社区开展虚拟电厂示范，带动用户参与。

（2）优化收益分配机制，保障用户权益透明可预期：建立“基础补偿 + 绩效奖励”制度，通过电费抵扣、现金返还、绿色积分等形式直接体现收益。要求平台及聚合商提供可核查的对账信息，确保用户清晰掌握收益预期与风险边界。

（3）推广标准化技术，提升便捷性：普及即插即用智能终端，通过补贴等降低用户成本；支持用户预设条件，系统自动调节，减少干扰。

（4）增强自主意识，倡导新理念：通过示范、推广和宣传，推动社会从“被动用电”向“主动参与调节”转变，将需求侧灵活性纳入企业和居民能源范畴。

参考文献

- [1] 黄少中, 汤泰, 张葵叶, 等. 新型电力系统下广东灵活调节能力分析及提升举措 [R/OL]. 中国能源研究会双碳产业合作分会, [2025][2025-12-03]. <https://www.nrdc.cn/Public/uploads/2024-12-23/676949b11142d.pdf>.
- [2] 广东电力交易中心. 关于公布第一批列入虚拟电厂运营商目录企业名单的通知 [EB/OL]. [2025-12-16]. https://mp.weixin.qq.com/s/8CPWc_jle_xSQtH0hKd4ug.
- [3] 大地量化. 南方 | 全国最大的广东电力市场 [EB/OL]. [2025-12-18]. https://mp.weixin.qq.com/s/owo30e2Ewb5nh5_Xlpj9IQ.
- [4] 广东统计年鉴 2025 年 [EB/OL]. [2025-12-16]. https://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_4810393.html.
- [5] 深圳市统计局. 深圳市 2024 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-05-22) [2025-12-17]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/tjsj/tjgb/content/post_12190855.html.
- [6] 深圳特区报. 韧性强 潜力大 活力足 深圳经济发展高位攀登向上向好 [EB/OL]. (2025-10-20) [2025-12-17]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_12444198.html.
- [7] 广州市统计局. 2025 年一季度广州经济运行情况解读 [EB/OL]. (2025-04-27)[2025-12-17]. https://tjj.gz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10234/post_10234582.html#230.
- [8] 2024 年广州市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-04-08)[2025-12-17]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/sjfb/tjgb/content/post_10203564.html.
- [9] 佛山市统计局, 国家统计局佛山调查队. 2024 年佛山市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-04-26)[2025-12-17]. <https://epaper1.fsonline.com.cn/fsrb/res-file/2025-04-26/A03/fsrb20250426A03.pdf>.
- [10] 南方日报数字报. 近十年佛山首季经济数据蕴藏四个趋势 [EB/OL]. (2025-05-08)[2025-12-17]. https://epaper.nfnews.com/nfdaily/html/202505/08/content_10134664.html.

- [11] 中关村储能产业技术联盟. 新突破! 南方电网虚拟电厂规模近 1200 万千瓦 [EB/OL]. (2025-02-19)[2025-12-16]. https://www.cnesa.org/information/detail/?column_id=58&id=6886.
- [12] 综合开发研究院. 综研观察 | 深圳碳达峰、碳中和, 走在前列 [EB/OL]. [2025-12-16]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Fz-DnepT2dPgznQ9W77k9w>.
- [13] 深圳市生态环境局, 深圳市发展和改革委员会. 深圳市应对气候变化“十四五”规划 [EB/OL]. (2022-09-30)[2025-12-16]. https://meeb.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10189/post_10189731.html#3752.
- [14] 光储充头条. 简报 | 深圳市新能源汽车充换电行业月报 (2025 年第 1 期) [EB/OL]. (2025-03-03)[2025-12-17]. <https://mp.weixin.qq.com/s/QJ9NuUyyX7fsz2sIsVwV9Q>.
- [15] 深圳市人民政府. 深圳市碳达峰实施方案 [EB/OL]. (2023-10-07)[2025-12-17]. https://www.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10865/mpost_10865082.html#20044.
- [16] 深圳市人工智能产业协会. 《深圳市人工智能产业发展白皮书 (2025 年版)》 [R/OL]. (2025-06-20)[2025-12-17]. https://www.szaicx.com/page142?article_id=17447.
- [17] 深圳特区报. 深圳市工业和信息化局党组书记、局长黄强: 凝心聚力 奋发有为 扎实推动深圳工业和信息化高质量发展 [EB/OL]. (2025-08-23)[2025-12-17]. https://mp.weixin.qq.com/s/SKqiQlZr4Ekhy_mFvsqGBQ.
- [18] 虚拟电厂与微电网专业委员会. 虚拟电厂典型案例汇编 (2025 年) [R]. 中关村智能电力产业技术联盟.
- [19] 深圳市发展和改革委员会. 深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施 [A/OL]. https://fgw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/11/11351/post_11351896.html#25135.
- [20] 广州市发展和改革委员会, 广州市工业和信息化局. 广州市面向 2035 年电力供应保障规划 [EB/OL]. (2025-02-25)[2025-12-17]. https://www.gz.gov.cn/gzzcwjk/gzdata/content/post_10132352.html.
- [21] 广州市委网络安全和信息化委员会办公室, 中共广州市委网络安全和信息化委员会办公室. “空中”建发电站 广州点“绿”成金 [EB/OL]. (2025-03-28)[2025-12-17]. <https://www.gzwxw.gov.cn/context/contextId/213133>.
- [22] 中国南方电网广东广州供电局, 广州市政府. 《广州市车网互动实践与探索白皮书》 [EB/OL]. (2025-12-11)[2025-12-17]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ORdAmhq2ZzpRJlvkZCe4wQ>.
- [23] 南方电网广东广州供电局. 广州启动城市级车网互动灵活响应活动 [N/OL]. 2025-01. <http://gd.news.cn/20250127/ec30d6b5a22f4d2ca21ca70c7f1cd9f7/c.html>.
- [24] 佛山市发展和改革局. 佛山市推进分布式光伏高质量发展实施方案 [EB/OL]. (2024-12-03)[2025-12-10]. https://fsdr.foshan.gov.cn/fsfgj/fhj/zwgk/zcwj/qtwj/content/post_6208717.html.
- [25] 佛山发改. 佛山分布式光伏装机容量突破 400 万千瓦 [EB/OL]. (2025-05-17)[2025-12-18]. https://mp.weixin.qq.com/s/PMNW8aPvsXdKV_oFOCOCyg.

- [26] 中国节能网. 广东佛山: 打造电力需求侧管理“样本” 助力产业转型升级 [EB/OL]. (2015-12-16)[2025-12-18]. <http://ces.cn/news/show-93866.html>.
- [27] 北极星售电网. 广东佛山电力需求侧管理平台运行情况大调查 [N/OL]. 2016-05. <https://news.bjx.com.cn/html/20160523/735512.shtml>.
- [28] 王岩. 佛山电力需求响应关键技术研究及平台实现 [J]. 2017(03).
- [29] 中国网. 佛山电力需求侧管理试点 搭建全社会参与平台 [N/OL]. 2015-06. http://union.china.com.cn/dlzx/txt/2014-04/18/content_6830838.html.
- [30] 刘彤, 牛东晓. 基于全寿命周期的燃机发电项目效益分析研究 [D]. 华北电力大学, 2015.
- [31] 王火根, 王可奕. 基于生命周期评价的生物质与煤炭发电综合成本核算 [Z]// 干旱区资源与环境: 卷 34. 2020: 56-61.
- [32] 王驰中, 高鑫, 陈衡, 等. 中国各地区光伏发电平价上网成本效益综合分析 [Z]// 可再生能源: 卷 42. 2024: 1295-1301.
- [33] 何德卫, 张远雄, 徐青甫, 等. 佛山工业企业分行业需求响应策略研究 [J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(03): 35-38.
- [34] 程元, 饶尧, 丁胜. 工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析 [J/OL]. 能源工程, 2023, 43(01): 72-78. DOI:10.16189/j.cnki.nygc.2023.01.011.
- [35] RIU I, SMILEY D, BESSASPARIS S, 等. Load Growth Is Here to Stay, but Are Data Centers? [R/OL]. (2024-07). <https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2024/07/E3-White-Paper-2024-Load-Growth-Is-Here-to-Stay-but-Are-Data-Centers-2.pdf>.
- [36] 赵宏伟. 涂装车间能源降耗分析和研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2018, 21(07): 45-48+59.
- [37] 王洪莹, 陶鹏, 李春睿, 等. 基于负荷弹性系数法的典型行业理论响应潜力评估分析 [J]. 河北电力技术, 2022, 41(05): 16-19.
- [38] 电力圆桌项目课题组. 需求侧资源潜力评估与开发利用路径 [R/OL]. <https://www.nrdc.cn/Public/uploads/2025-10-22/68f885c30de12.pdf>.
- [39] 广东省人民政府办公厅. 广东省推动新型储能产业高质量发展指导意见的通知 [EB/OL]. (2023-03)[2025-12-10]. https://www.gd.gov.cn/zwgk/gongbao/2023/8/content/post_4137229.html.
- [40] 佛山发改. 市发改局新能源和节能科科长苏耀聪: 节能战线默默耕耘, 为绿美佛山注入“源”动力 [EB/OL]. (2025-07)[2025-12-10]. https://mp.weixin.qq.com/s/baloIxYcx35_sGXZXoCfsw.
- [41] 广州日报. 广东首个“飞轮+锂电”混合新型储能电站落地广州 [EB/OL]. (2025-04)[2025-12-10]. <https://cn.solarbe.com/news/20250417/50001829.html>.
- [42] 广州市发展和改革委员会, 广州市工业和信息化局. 广州市面向 2035 年电力供应保障规划 [EB/OL]. (2025-225)[2025-12-10]. https://fgw.gz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10132/post_10132353.html#481.

- [43] 深圳市人民政府 . 深圳市碳达峰实施方案 [EB/OL]. (2023-09-12)[2025-12-10]. https://www.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10865/mpost_10865082.html#20044.
- [44] 广州市工业和信息化局 . 广州市 “5G+ 工业互联网” 融合应用试点城市方案 [EB/OL]. (2025-09)[2025-12-03]. https://gxj.gz.gov.cn/yw/zchb/zcwj/cyzc/content/post_10449728.html.
- [45] 朱庆, 纪程 . 计及 5G 基站及需求响应的综合能源系统日前优化调度 [J/OL]. 电气传动, 2025, 55(01): 70-80. DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed25649.
- [46] 梁克锐, 陆俊; 翟峰 . 考虑 5G 基站电池参与的需求响应策略研究 [D/OL]. 华北电力大学 (北京), 2023. <https://link.cnki.net/doi/10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000289>.
- [47] 刘军会, 郭璞, 李虎军, 等 . 5G 基站储能配置与需求响应可行性研究 [J/OL]. 河南电力, 2021(S2): 20-23+28. DOI:10.19755/j.cnki.hnep.2021.s2.007.
- [48] 汤江晖, 苏子云, 王迎秋, 等 . 考虑 5G 宏基站空调负荷参与需求响应的潜力分析 [J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(06): 77-83.
- [49] 张新, 岳园园, 曾好, 等 . 面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 162-170.
- [50] 乔鹏龙, 孙育英, 逢秀锋, 等 . 冰蓄冷系统参与虚拟电厂日前调度的优化方法与应用潜力研究 [J]. 暖通空调, 2025, 55(S1): 112-118.
- [51] 新菱集团 . 典型案例 - 广州大学城 [EB/OL]. [2025-12-18]. http://www.sinro.com/case_info.asp?InfoID=69.
- [52] 深圳政府在线 . 前海世界级 “大空调” 24 小时集中供冷 [EB/OL]. (2021-03-18)[2025-12-18]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_8634373.html.
- [53] 深圳政府在线 . 深圳电网用电负荷创历史新高 [EB/OL]. (2025-07-08)[2025-12-17]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_12267628.html.
- [54] 广州新闻 . 广州电网负荷创历史新高 [EB/OL]. (2025-07-09)[2025-12-17]. https://epaper.xxsb.com/html/content/2025-07/09/content_778890.html.

作者

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

联系方式

冯威, w.feng@siat.ac.cn



自然资源保护协会（NRDC）
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编：100026
电话：010-5332-1910
www.nrdc.cn