



需求侧资源潜力挖掘方法与实践

—以长三角中心城市湖州为例

中国电力圆桌项目课题组

国家发改委能源研究所

国网湖州供电公司

国瑞沃德（北京）低碳经济技术中心

自然资源保护协会

2020年6月

中国电力圆桌项目

中国电力可持续发展圆桌（简称电力圆桌）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。



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 600 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 30 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。

项目研究报告系列

- 《推动中国竞争性电力市场建设的整体性研究》 中国宏观经济研究院市场与价格研究所，2018 年 10 月
- 《西北区域电力现货市场及监管机制研究》 西安交通大学，2019 年 4 月
- 《满足建设美丽中国的电力中长期可持续发展研究》 中国能源研究会，2019 年 5 月
- 《基于园区增量配电网的综合能源服务业态研究》 电力规划设计总院，2019 年 12 月
- 《需求侧资源潜力挖掘方法与实践—以长三角中心城市湖州为例》 国家发改委能源研究所，国网湖州供电公司，国瑞沃德（北京）低碳经济技术中心，2020 年 4 月
- 《适应新能源发展的西北区域电力辅助服务市场机制研究》 西安交通大学，2020 年 5 月



本项目课题组成员：

国家发改委能源研究所：周伏秋 邓良辰 王娟

国网湖州供电公司：王函韵 卢峰 陈家乾 王龙

国瑞沃德（北京）低碳经济技术中心：李淑祎 王健夫 蒋习梅 程伟

自然资源保护协会：刘明明 王万兴 游梦娜 金亨美 冯婕茹

需求侧资源潜力挖掘方法与实践

—以长三角中心城市湖州为例

Demand Side Resource Potential Analysis Methods and
Application—Case Study on the City of Huzhou in the Yangtze River Delta

中国电力圆桌项目课题组

国家发改委能源研究所

国网湖州供电公司

国瑞沃德（北京）低碳经济技术中心

自然资源保护协会

2020 年 6 月

目 录

- 摘要 i
- 1. 研究背景与重点1
 - 1.1 研究背景与意义 1
 - 1.1.1 需求侧资源概述 1
 - 1.1.2 需求侧资源开发现状 3
 - 1.1.3 需求侧资源开发意义 8
 - 1.2 研究重点与方法 10
 - 1.2.1 研究范围的界定 10
 - 1.2.2 待解决的关键问题 11
 - 1.2.3 主要技术路线 12
- 2. 电能替代资源潜力分析方法学13
 - 2.1 重点领域的电能替代资源潜力分析 13
 - 2.2 电能替代资源潜力分析的计算方法 15
 - 2.2.1 宏观层面 16
 - 2.2.2 中观层面 16
 - 2.2.3 微观层面 19
- 3. 需求响应资源潜力分析方法学21
 - 3.1 重点领域的需求响应资源潜力分析 21

3.1.1 影响需求响应资源量的主要因素	21
3.1.2 重点领域的需求响应资源潜力分析	22
3.1.3 移峰填谷和填谷需求响应潜力分析	27
3.2 需求响应资源潜力分析的计算方法	28
3.2.1 宏观层面	28
3.2.2 中观层面	30
3.2.3 微观层面	37
4. 湖州市需求侧资源开发现状	40
4.1 湖州市经济社会发展现状	41
4.1.1 湖州市经济社会发展概况	41
4.1.2 湖州市能源及电力消费情况	44
4.2 湖州市需求侧资源开发现状	50
4.2.1 湖州市电能替代资源开发现状	50
4.2.2 湖州市需求响应资源开发现状	51
5. 湖州市需求侧资源潜力计算分析	54
5.1 湖州市的电能替代资源潜力	54
5.1.1 宏观层面	54
5.1.2 中观层面	54
5.1.3 宏观和中观核算	58
5.2 湖州市的需求响应资源潜力	59
5.2.1 宏观层面	59
5.2.2 中观层面	60
5.2.3 宏观和中观核算	70
5.2.4 环境及影响分析	71
6. 研究发现和政策建议	73
6.1 研究发现	73
6.2 政策建议	76

摘要

需求侧资源是电力发展进入新阶段后，在用户端挖掘解决电力供需平衡的新手段。“十三五”以来，国内电力形势的变化、电能替代工程的持续推进和清洁能源的大规模发展，都对需求侧资源的开发利用提出明确要求。对区域需求侧资源潜力进行分析测算推动需求侧资源科学合理开发、逐步走入市场实现价值的重要工作内容。本课题在需求侧资源潜力分析方法的大量理论研究基础上，尝试提出一种可操作性较强的潜力量化分析方法学，同时针对用户侧资源开发优先顺序提出了四象限分析理论，旨在从宏观层面、行业层面以及微观企业层面为需求侧资源的开发利用以及进一步参与市场交易提供方法学支撑。湖州市地处长三角中心区域，是“两山”理念的发源地和多元融合高弹性电网建设的主阵地。本课题选择湖州为案例进行需求侧资源潜力的量化分析，为建设多元融合高弹性电网、制定综合资源规划和绿色发展战略提供理论支撑。

一、需求侧资源的开发已从传统的“减少需求”扩展到“灵活调节与消纳并举”的新阶段

电力系统正经历着全方位的转型：（1）供应端电源构成中新能源比重在增加，电力系统中接入了大规模的间歇性新能源，导致电力负荷曲线发生变化，电网亟需提升灵活性以适用这种新变化。（2）用户端也在发生变化：在国内电气化率高的部分地区，出现了分布式电源、电动汽车、储能、智能设备、清洁供暖等多元化负荷，区域负荷特征变化显著。（3）智能电网、能源互联的发展，也在很大程度上重塑着电网：即从以电流单

向流动为特征，转型到电流的双向流动。用户端不再是被动的电能消费者，而是可以参与电力供需平衡的维护。

电力系统的这一转型为需求侧资源潜力挖掘和价值实现创造了有利的条件，需求侧资源的作用也从传统的削峰减少需求，扩展到灵活调节电力负荷、促进新能源消纳。“用户侧可调节资源”能高效解决电力系统局部阻塞或过剩等问题，提高非常规机组的包容性，促进新能源消纳和清洁能源发展。

二．作为促进电力供需平衡的新手段，需求侧资源具有经济、可靠、灵活和低碳的特点

“十三五”以来，中国的电力供需形势已发生深刻变化。中国经济进入“提质增效”的“新常态”，用电量增速放缓，电力供应能力总体较为充足，在局部地区由于空调等季节性用电的扩大，局部时段“缺电力”成为比“缺电量”更为突出的问题。在此背景下，将需求方的各种资源纳入统一的资源规划，通过开发建立在用户需求和用户利益基础之上的需求侧资源，激发用户主动参与维护电力平衡的意识和行为，促进供需双方共同利益的产生，可实现供给侧和需求侧的高度协调匹配和供需平衡。

需求侧资源开发改变了过去“以供定需”的资源开发方式，它将需求方的各种资源，纳入统一的资源规划，重在提高终端用电效率、改变用户的用电行为，同时将需求侧放在与供应方对等的位置，在避免扩大电源投资的前提下，使负荷下降到电网可承受的范围之内，同时提高电网运行的稳定性和效率，可作为以更经济、更高效、更灵活、更绿色地实现电力供需总体平衡的一种新手段。

三．挖掘需求侧资源的市场价值有利于国内电力市场的发展和完善

中国于 2015 年启动了新一轮的电力市场改革。围绕着电力市场的构建，开展了电力市场化交易、输配电价改革、售电侧改革、增量配电网试点等一系列工作。其中，需求侧管理和需求响应也被明确写入《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》，需求响应资源已被正式纳入电力市场建设。

从市场开拓的角度出发，需求侧资源的开发需要政府、能源供应企业、能源服务公司、电力用户等的共同参与，意味着将会有更多的主体直接或间接地参与电力市场。在成熟的电力市场环境下，需求侧资源既可以参与电量市场影响电价，还可以参与辅助服务市

场提供调频和备用等服务，同时还可以推动辅助服务市场、储能等项目得到更好的发展，因此，需求侧资源的开发将扩大电力市场规模，持续激发市场活力。

四．开发不同层面需求侧资源潜力分析方法学，同时配合“四象限法”，能有效推动区域制定科学合理的综合资源规划

本研究初步提出了三个层面的资源潜力分析方法学。（1）宏观层面，需求响应以“可调节负荷占区域最大负荷的比重”为指标，电能替代以“区域电气化率”为指标，为政府宏观决策服务。（2）中观层面，按照工业、建筑、交通三大领域，提出了具体的行业指标，为行业潜力资源分析服务，需求响应以“行业最大可调节能力”、“行业参与度”、“行业可调节负荷”以及“行业调节电网高峰负荷能力”为主要指标，工业领域以“电力对燃油、燃煤的替代潜力”为电能替代指标，建筑和交通领域主要以“商用及民用电气设备推广率”为电能替代指标。（3）微观层面，电能替代主要考虑电力容量约束下，用户可增加的电能替代量；需求响应主要考虑直接削减和转移高峰负荷两种方式下，用户侧可调节负荷的大小。

报告提出四象限分析方法用于区分不同类型的用户资源。A 象限：单个用户可调节能力大、价格敏感度高；B 象限：单个用户可调节能力小、但价格敏感度高；C 象限：单个用户可调节能力大、但价格敏感度低；D 象限：单个用户可调节能力和价格敏感度均低。区域在制定开发需求响应资源策略时，重要的是寻找处于四个象限的四类资源，特别是 A 类资源，此类资源具有规模开发的基本条件，且开发难度相对较小，拥有较高的性价比；如果市场发展较为成熟，负荷集成商越来越多的参与需求响应并发挥组织中介的作用，B 类资源也将是理想的开发对象；当电力系统出现较为严重的供应缺口时，可以调动 C 类资源，即单个用户可调节能力大、但价格敏感度低的资源类型，但这意味着更高的经济成本；在紧急状态下，D 类资源即单个用户可调节能力小、价格敏感度低的资源类型也可以参与需求响应，但 D 类用户的参与不仅会有经济成本的付出，也将伴随着一定的社会成本。

五．四大措施推动需求侧资源的高效开发和价值实现

（一）强化政策支持力度，切实提高需求侧资源战略地位

我国需求侧资源利用正从行政式管理向市场化响应转变，在过渡时期需要进一步加

强政策支持保障力度，从规划、价格、监管等方面建立完整的政策体系，从而推动需求响应的快速发展。一是推动综合能源资源规划设计，统筹中长期电源规划与需求侧资源开发利用，将需求侧资源纳入电力发展规划、能源发展规划和地区经济发展规划。二是制定并完善峰谷电价、可中断电价、季节性电价等电价政策，适当扩大峰谷电价价差、合理设定低谷时段，降低综合用电成本。加快推进市场化电价形成机制，通过价格信号引导电力用户，促进资源优化配置。三是加强对工业、商业、居民等电力用户参与需求响应调控的引导，促进用户不断追求降耗、高效、经济的用电行为，激发用户主动参与维护电力平衡的意识和行为，促进电力供需双方形成利益共同体。尤其在电力需求响应的初期阶段，需要制定科学合理的补贴标准，对参与需求响应的用户给予经济补偿。四是加强监管体系建设。需求侧资源的开发涉及海量数据信息，亟待研究建立一套完整的法律法规、监管手段和配套措施，加强监管体系建设，为需求侧资源开发利用提供保障。

(二) 将需求响应纳入电力“新基建”重点内容，实现需求响应资源智能调控

电力“新基建”将推动源 - 网 - 荷 - 储各环节智能化数字化转型。需求响应作为电力系统调度运行的重要资源，应纳入电力行业“新基建”重点内容，为充分发挥需求响应价值在提升系统可靠性、促进可再生能源消纳等方面的作用奠定基础。一是培育电力数据要素市场，为需求响应实施奠定数据基础。推动电力数据流通共享，推进政府、行业、企业间电力数据开放、互联，充分挖掘电力数据尤其是需求侧相关数据的资源价值，为需求响应策略制定提供数据依据。加强数据资源整合和安全保护，建立统一规范的数据管理制度，提高数据治理和规范性。二是构建需求响应信息交互平台，为需求响应资源赋能。加快完善需求侧数字基础设施建设，包括电力负荷管理系统、电能在线监测平台、负荷集成商电能管理系统、电力用户电能管理系统等在内的需求响应技术支持系统，完善各技术系统之间的信息交互、有序和安全共享功能，为电力用户提供平台数据和响应依据。同时，通过整合系统运行、市场交易和终端用户电力数据，提高需求侧大数据分析能力，实现需求响应资源的智能调控。三是加快电力需求响应标准体系建设。随着“云大物移智”等信息通信技术与电力系统的深度融合，系统梳理并健全电力需求响应与安全供应标准体系，包括管理标准、技术标准、安全标准、产品标准等，注重与其它相关标准的有机衔接。以科学合理的规则标准提升监管有效性，降低执法成本，并严格依照标准开展监管。

（三）推动完善电力市场建设，发挥需求侧资源平衡电力供需的作用

电力市场机制具有价值发现和优化资源配置的功能，是需求响应的最好载体。应进一步培育完善电力市场建设，将需求侧和供应侧同等对待，发挥需求侧资源在市场中的作用。

一是积极培育各类市场主体挖掘利用需求侧资源。激发市场主体对需求响应产品和模式创新能力，利用能源互联网技术，把分布式的需求响应资源集成进入电力市场，协助用户制定需求响应策略并指导用户执行响应等工作，充分发挥需求侧资源价值。二是建立并完善中长期电能市场、现货能量市场、辅助服务市场、容量市场等市场机制，通过反映电力供需情况的实时电价信号，激发需求响应资源开发的积极性。具体地可以通过建立涵盖需求响应资源的辅助服务分担共享机制，完善需求响应项目的辅助服务考核机制和补偿机制；适时建立涵盖需求响应资源的辅助服务市场，考虑建立供需双向投标的辅助服务交易机制，通过市场化手段进一步发现各类需求响应资源的辅助服务价值。三是以新能源消纳、分布式能源协同优化为典型场景，建立需求侧资源常态化利用机制，给予需求侧资源独立市场主体地位，引导其积极参与电力市场。探索实施需求响应、扩大电能替代规模，对零散用户创新开展电能替代“打包”交易，通过直接交易等市场化手段降低用电成本。四是打破省间壁垒，推动需求侧资源参与电力市场跨省跨区交易。鼓励东部负荷中心的需求侧资源参与西部新能源消纳，鼓励电能替代用户与“三北”、西南地区富余清洁能源以及高效环保机组开展跨区跨省直接交易。

（四）加强需求侧资源潜力挖掘研究，为需求侧资源开发提供理论支撑

需求侧资源与发电资源具有同等重要的作用。为充分开发利用需求侧资源，促进电力供需平衡，要着重加强需求侧资源挖掘能力，关注需求侧资源价值应用，发挥需求侧资源在调节电力供需、提高系统可靠性、提升系统运行效率等方面的价值。

一是加强需求侧资源潜力分析基础研究。进一步加强需求侧资源潜力分析评估，深入研究需求响应资源中不同类型用户的用电特性、电能替代资源中技术经济可行的替代潜力，以及节能潜力和分布式电源开发利用潜力等等。针对政府部门、电力公司、负荷集成商等主体的不同需求，系统梳理需求侧资源的技术潜力和经济潜力。二是紧密结合信息化新技术提高需求侧资源评估精准度。利用广泛部署的用户信息、电网信息与发电

信息等数据采集终端，整合系统运行、市场交易和用户用电数据，提高需求侧大数据分析能力，发挥技术创新驱动作用，为需求侧资源利用提供新动能。三是加强需求侧资源分析研究成果应用引导。出台政策鼓励电力公司、负荷集成商等相关企业增加研发投入，支持企业积极参与需求侧资源挖掘研究。树立“项目从需求中来，成果到应用中去”的理念，充分发挥需求侧资源在系统规划和运行中的价值，支持相关成果转化应用、迭代更新。加强宣传，扩大示范带动效应，便于需求侧资源开发利用进一步拓展。

Summary

Demand-side resources are a new means to solve the balance of power supply and demand on the user side after power development enters a new stage. Since the "Thirteenth Five-Year Plan", changes in the domestic power situation, continuous advancement of electric energy substitution projects and large-scale development of clean energy have all set clear requirements for the development and utilization of demand-side resources. The analysis and calculation of regional demand-side resource potential is important to promote the scientific and rational development of demand-side resources as they gradually enter the market and realize value. Based on a large number of theoretical studies on demand-side resource potential analysis methods, this topic attempts to propose a highly operable potential quantitative analysis methodology. At the same time, it proposes a four-quadrant analysis theory for the priority of user-side resource development. The macro level, industry level and micro-enterprise level all provide methodological support for the development and utilization of demand-side resources and further participation in market transactions. Huzhou City is located in the central area of the Yangtze River Delta. It is the birthplace of the "Two Mountains" concept and the main front for the construction of an integrated and highly resilient power grid. We have selected Huzhou as a case study for quantitative analysis of demand-side resource potential, which provides theoretical support for the construction of a multi-integrated and highly resilient power grid, the formulation of comprehensive resource planning and green development strategies.

1. The development of demand-side resources has expanded from the traditional "reduction of demand" approach to a new stage of "flexible adjustment and simultaneous consumption".

The power system is undergoing an all-round transformation: (1) The proportion of new energy in the supply-side power structure is increasing and large-scale intermittent new energy is being connected to the power system, resulting in changes in the power load curve. This means that the power grid needs to be more flexible in order to adapt to these changes. (2) The user side is also shifting. In some areas of China with high electrification rates, there are diversified loads including distributed power, electric vehicles, energy storage, smart equipment, and clean heating. Regional load characteristics have changed significantly. (3) The development of smart grid and energy interconnection has also reshaped the grid to a large extent, shifting the grid away from unidirectional current flow and towards to bidirectional current flow. The user end is no longer a passive consumer of electricity, but can participate in the maintenance of power supply and demand balance.

This transformation of the power system has created favorable conditions for demand-side resource potential mining and value realization. The role of demand-side resources has also been shifted away from traditional peak shaving to reduce demand and towards a more flexible adjustment of power load and the promotion of new energy consumption. "User-side adjustable resources" can effectively solve problems such as partial blockages or surpluses in the power system, it can improve the inclusiveness of unconventional units, and it can promote the consumption of new energy and the development of clean energy.

2. As a new means to promote the balance between power supply and demand, demand-side resources represent economic, reliable, flexible and low-carbon options.

Since the "13th Five-Year Plan", China's power supply and demand situation has undergone profound changes. China's economy has entered a "new normal" of "improving quality and efficiency", the power consumption growth rate has slowed down, and the overall power supply capacity is relatively sufficient. In some regions, due to the expansion of seasonal power consumption such as air conditioning, "in short of power" has become a more prominent problem than "in short of energy". In this context, various demand side resources are included in a unified resource plan, and the development of demand-side resources based on user

needs and user interests encourages users to actively participate in the maintenance of power balance and in promoting both parties. This generation of common interests has the potential to achieve a high degree of coordination and balance between the supply side and the demand side.

Demand-side resource development has shifted the goal of resource development away from its past aim of "meeting demand". It incorporates various resources from the demand side into a unified resource plan, focuses on improving the efficiency of terminal electricity consumption, and works to change the electricity consumption behavior of users. This allows the demand side to be of equal importance as the supply side. With the goal of avoiding expansion of power supply investment, the load is reduced to within the range that the power grid can withstand, while improving the stability and efficiency of the power grid as a whole. This method can be more economical and can achieve an overall balance between power supply and demand in an efficient, flexible and green manner.

3. Exploiting the market value of demand-side resources is conducive to the development and improvement of the domestic power market.

China launched a new round of electricity market reform in 2015. These reforms included work on electricity market-oriented transactions, power transmission and distribution pricing reform, electricity sales reform, and an incremental distribution network pilot. Demand side management and demand response were also included in the "Several Opinions on Further Deepening the Reform of the Electric Power System", and demand response resources have been formally incorporated into the construction of the electricity market.

From the perspective of market development, the development of demand-side resources requires the joint participation of the government, energy supply companies, energy service companies, and power users. This means that more entities will participate in the power market directly or indirectly as it develops. In a mature power market environment, demand-side resources can participate in the electricity market to influence electricity prices and can participate in the auxiliary service market to provide services such as frequency modulation and backup. At the same time, it can also promote the development of the auxiliary service market and of energy storage projects. Therefore, the development of demand-side resources will expand the scale of the electricity market and will continue to stimulate market vitality.

4. Development of demand-side resource potential analysis methodologies at different levels, combined with the "four-quadrant method", can effectively promote the development of scientific and reasonable comprehensive resource planning in the Yangtze River Delta region.

This study initially proposed three levels of resource potential analysis methodology. (1) At the macro level, the demand response uses the "adjustable load as a percentage of the largest regional load" as an indicator and electric energy replacement uses the "regional electrification rate" as an indicator to serve the government's macro decision-making. (2) At the middle level, based on the three major areas of industry, construction, and transportation, specific industry indicators are proposed to serve industry potential resource analysis. Demand response is based on an "industry's maximum adjustable capacity", "industry participation", an "industry's adjustable load" and "industry regulation peak load capacity of the power grid". The industrial field uses "electricity to replace fuel oil and coal-burning potential" as the electrical energy replacement index. The construction and transportation fields mainly use the "commercial and civilian electrical equipment promotion rate" as a substitute indicator for electrical energy. (3) At the micro level, electrical energy substitution mainly considers the amount of electrical energy substitution that users can increase under the constraints of power capacity. The demand side mainly considers two methods, directly reducing power loads and to shifting peak loads. The user is capable of adjusting the size of the load directly.

The report proposes a four-quadrant analysis method to distinguish different types of user resources. They are divided as follows. A Quadrant: single users have large adjustment ability and high price sensitivity; B Quadrant: single users have small adjustment ability but high price sensitivity; C Quadrant: single users have large adjustment ability but low price sensitivity; D Quadrant: individual users have low adjustability and price sensitivity. When formulating a strategy for developing demand response resources, it is important for regions to find four types of resources in each of the four quadrants, especially type A resources. Such resources have the basic conditions for large-scale development, and the development difficulty is relatively small and cost-effective. If market development is more mature, load integrators are more and more involved in demand response and play the role of organizational intermediary. In this scenario, type B resources are ideal. When there is a serious supply gap in the power system, type C resources can be mobilized. These are resources with large single

user adjustability but low price sensitivity, meaning they entail higher economic costs. Under emergency conditions, type D resources have small individual user adjustability and price sensitivity. This resource type can also participate in demand response, but class D users will pay economic and social costs.

5. Four measures to promote the efficient development and value realization of demand-side resources.

(1) Strengthen policy support and effectively improve the strategic position of demand-side resources.

China's demand-side resource utilization is changing from administrative management to a market-based response. During the transition period, it is necessary to further strengthen policy support and to establish a complete policy system, from planning, price, and supervision to promoting the rapid development of demand response. Firstly, we must promote comprehensive energy resource planning and design, coordinate mid- and long-term power supply planning for demand-side resource development and utilization, and integrate demand-side resources into power development planning, energy development planning, and regional economic development planning. Secondly, we must formulate and improve electricity pricing policies, such as peak-valley electricity prices, interruptible electricity prices, seasonal electricity prices, etc., appropriately expanding the peak-valley electricity price spread, reasonably setting the valley time period, and reducing overall electricity cost. We should accelerate the promotion of market-based electricity price formation mechanisms, guide electricity users through price signals, and promote the optimal allocation of resources. Thirdly, we should strengthen guidance of power users, including industrial, commercial, residential and other consumers so that they may participate in demand response regulation. We should encourage users to continuously pursue consumption reduction, high efficiency, and economic power consumption behaviors, stimulate users to actively participate in maintaining power balance awareness and behaviors, and promote power supply and demand reform as a community interest. Especially in the early stage of power demand response, it is necessary to formulate scientific and reasonable subsidy standards to give economic compensation to users participating in demand response. Fourthly, we must strengthen the oversight system. The development of demand-side resources involves massive amounts of data, and it is urgent to study and establish a complete set of laws, regulations, supervision methods and supporting measures, to strengthen the development of supervision systems, and to provide a guarantee for the development and utilization of demand-side resources.

(2) Incorporate demand response into the key content of "new power infrastructure" in order to realize intelligent regulation of demand response resources.

The "new infrastructure" of electric power will promote the intelligent digital transformation of the source-grid-load-storage link. Demand response, as an important resource for power system dispatching and operation, should be included as part of this "new infrastructure" of the power industry, laying the foundation for the full realization of demand response value in improving system reliability and promoting the consumption of renewable energy. Firstly, we must cultivate the market for power data elements and lay a data foundation for the implementation of demand response. This includes promoting the circulation and sharing of power data, promoting the sharing and interconnection of power data among governments, industries, and enterprises, fully exploring the resource value of power data, especially demand-side related data, and providing a data basis for the development of demand response strategies. We should strengthen data resource integration and security protection, establish a unified and standardized data management system, and improve data governance and standardization. Secondly, we should develop an interactive demand response information platform to empower demand response resources. We should accelerate the improvement of demand-side digital infrastructure construction, including demand response technical support systems and power load management systems, power online monitoring platforms, load integrator power management systems, power user management systems etc. We additionally must improve information sharing between technical systems and interactive systems, including orderly and safe sharing functions that provide a basis for data and user response. At the same time, by integrating system operations, market transactions, and end-user power data, demand-side big data analysis capabilities are improving to achieve intelligent regulation of demand response resources. Thirdly, we should work to accelerate the construction of standard power demand response systems. With the in-depth integration of information and communication technologies, such as big data and the cloud, the system can sort out and perfect a standard system for power demand response and safety supply, including management standards, technical standards, safety standards, product standards, etc. We will improve the effectiveness of supervision with scientific and reasonable rules and standards, reduce the cost of law enforcement, and carry out supervision in strict accordance with these standards.

(3) Promote the improvement of the electricity market, and use the role of demand-side resources to balance electricity supply and demand.

The electricity market has the ability to discover value and optimize resource allocation, and it is the best carrier for demand response. It is therefore necessary to further cultivate and improve the construction of the electricity market, to treat the demand side and the supply side equally, and give play the role of demand side resources in the market.

First, we must actively cultivate various market players to utilize demand-side resources. This means stimulating market entities' ability to innovate demand response products and models, using energy network technology to integrate distributed demand response resources into the electricity market, assisting users in formulating demand response strategies, guiding users as they develop responses and giving full play to demand-side resource value. Secondly, we should establish and improve market mechanisms such as the medium- and long-term electric energy market, spot energy market, ancillary service market, and capacity market, and stimulate enthusiasm for resource development by responding to real-time electricity price signals reflecting electricity supply and demand. Specifically, by establishing an auxiliary service sharing mechanism covering demand response resources, the auxiliary service assessment mechanism and compensation mechanism for demand response projects can be improved. An auxiliary service market covering demand response resources could be established in a timely manner, and consideration would be given to establishing an auxiliary service transaction mechanism for bidirectional supply and demand bidding. Through market-oriented means we will further discover the value of auxiliary services for various types of demand response resources. Thirdly, we will use new energy consumption and distributed energy collaborative optimization as typical scenarios, establish a demand-side resource normalization utilization mechanism, give demand-side resources an independent market dominant position, and guide them to actively participate in the electricity market. We will explore the implementation of demand response, expand the scale of electric energy substitution, innovate the "packaging" of electrical energy substitution for dispersed users, and reduce the cost of electricity through market-oriented means such as direct transactions. Fourthly, we will break down inter-provincial barriers and support demand-side resources in participating in cross-provincial and cross-regional transactions in the power market. We will encourage the demand-side resource load centers in the east to participate in the consumption of new energy in the west, and encourage electricity substitution users to conduct cross-regional and inter-provincial direct transactions with surplus clean energy sources within the "Three North" and southwest regions,

as well as with efficient environmental protection units.

(4) Strengthen research on demand-side resource potential and provide theoretical support for demand-side resource development.

Demand-side resources have the same important role as power generation resources. In order to fully develop and utilize demand-side resources and to promote the balance of power supply and demand, we must focus on strengthening demand-side resource mining capabilities, pay attention to the demand-side resource value application, and give full play to the role of demand-side resources in regulating power supply and demand, improving system reliability, and improving system operating efficiency value.

First, we must strengthen basic research on demand-side resource potential analysis. This includes further strengthening the analysis and assessment of the demand-side resource potential, in-depth study of the power consumption characteristics of different types of users in demand response resources, examining the technical and economically feasible potential of electric energy replacement resources, and researching energy saving potential and distributed power development and utilization potential. In response to the different needs of government agencies, power companies, load integrators and other subjects, the system should sort out the technical and economic potential of demand-side resources.

Secondly, we should closely integrate new information technology to improve the accuracy of demand-side resource assessment. We should use widely deployed data collection terminals such as user information, power grid information, and power generation information to integrate system operation, market transactions, and user power consumption data, allowing us to improve demand-side big data analysis capabilities, drive technical innovation, and provide new demand-side resource utilization kinetic energy. Thirdly, we should strengthen the application of demand-side resource analysis and research results. The introduction of policies encourages power companies, load integrators and other related companies to increase R & D investment and to support companies as they actively participate in demand-side resource mining research. Establishing the concept of "projects come from demand, and achievements go to application" will give full play to the value of demand-side resources in system planning and operation and will support the transformation and application of relevant achievements and iterative updates. We will strengthen publicity and expand demonstration-driven effects to facilitate the further expansion of demand-side resource development and utilization.

研究背景与重点

1.1 研究背景与意义

1.1.1 需求侧资源概述

资源指的是一切可被人类开发和利用的物质、能量和信息的总称。传统的能源资源，多是在供应端从产业链上游向下游纵向延伸的合纵模式；近几年兴起的综合能源服务资源，则是围绕客户需求提供一站式服务的连横模式，即在需求侧开发出来的资源，是一种新型的终端能源的开发和利用形式。凡是能够满足终端客户用能需求的产品和服务，都是潜在的需求侧资源。这种从供应端到需求端的转变，意味着能源行业从产业链纵向延伸走向横向互联，从以产品为中心的服务模式转向以客户为中心的服务模式，成为实现国家能源革命的新兴市场力量。

按照开发条件，可将需求侧资源分为可开发资源和暂不具备开发条件的资源。其中，可开发资源按照其技术经济性，又可分为技术可开发资源以及同时具备技术经济性的可开发资源。

(1) 技术可开发资源。即在一定时期内，对于技术而言存在可行性的需求侧资源，即通过技术升级可以获得的需求侧资源。

(2) 经济可开发资源。即不仅满足技术可行性要求，同时满足经济要求的需求侧资源，具体的做法是在技术可行性基础上，进行成本效益分析，从而得到的具有经济效益的需求侧资源。

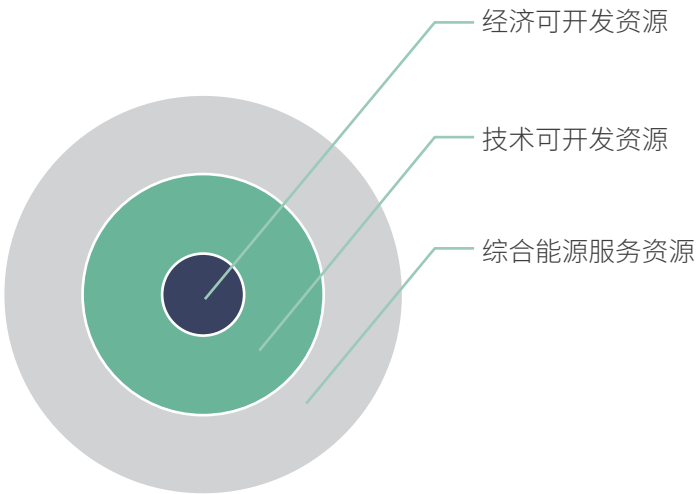


图 1-1 需求侧资源示意图

在终端用电领域，需求侧资源又可分为：电能替代资源、可调整的电力资源以及可节约的电量资源。

①**电能替代资源**：电能替代指在终端能源消费环节，使用电能替代散烧煤、燃油的能源消费方式，具体包括电采暖、地能热泵、工业电锅炉（窑炉）、农业电排灌、电动汽车、靠港船舶使用岸电、机场桥载设备、电蓄能调峰等方式。为提高清洁能源消费比重、减少大气污染物排放，电能替代的电量应来自可再生能源发电，以及部分超低排放煤电机组。

②**可调节的电力资源（需求响应）**：调节的是电功率 (kW)，一般根据电力系统的负荷特征，以某种方式将用户的电力需求从电网负荷高峰期消减，或者将其转移到电网负荷低谷时段，减少日或者季节性的电网峰荷，促进电力需求在不同时序上合理分布，增加低谷期设备利用率，提高系统运行的可靠性、经济性和灵活性。

③**可节约的电量资源**：节约的是电量 (kWh)，是指以提高电能利用效率为目的，通过各种节电改造项目、技术、产品和工艺等方式节约电能消耗量，从而减少因发电而消耗的一次能源以及其他社会资源，是一种可循环的资源。可节约电量资源的典型范例为能效电厂，即以电量节约的方式满足用户的用电需求，实现供需平衡，减少对煤电的需求、减少污染物排放、提高电力系统运行的经济性和可靠性，具有显著的经济效益、社会效益和环保效益。

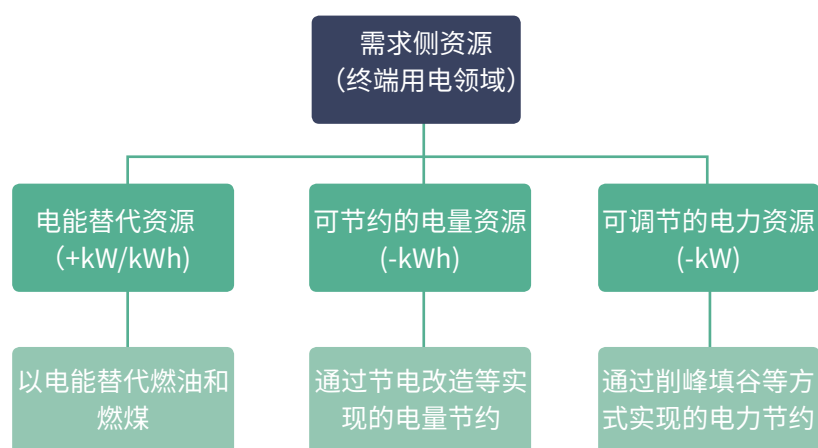


图 1-2 终端用电领域的需求侧资源示意

除了以上三类资源外，分布式能源作为一种分布在用户侧的综合能源系统，可以按照资源条件、用户需求等，就地生产并供应多种能源类型，因此，可以理解作为一种广义的需求侧资源。

1.1.2 需求侧资源开发现状

目前，国内需求侧资源开发的主要内容及开发现状如下：

(1) 电能替代资源开发

在国内，电能替代资源的开发更多的是政策推动下的行为。一方面，国家通过严格执行节能环保法规标准、适度财政补贴等方式，推动电锅炉、电窑炉等在工业领域的加速取代，推动电动车、电采暖、热泵等在公共机构、商业及居民用户的持续推广；另一方面，国家通过配电网改造¹，增量配电网试点²等，加快配电网建设进程，提高供电能力和供电质量，促进电能替代工作的顺利实施。

2016 年，国家发展改革委、国家能源局等八部委联合印发了《关于推进电能替代的指导意见》，制定了 4500 亿 kWh 的电能替代规划目标，电能替代在全国铺开。2017 年，北方地区清洁供暖中也将电采暖作为清洁供暖的重要补充方式。

1. 国家能源局在《配电网建设改造行动计划（2015-2020）》提到 2020 年国内高压配电网变电容量达到 21 亿千伏安，中压公用配变容量达到 11.5 亿千伏安，分别比 2014 年提高 50%、40%。要完成这一目标（即新增变电容量 10.3 亿千伏安），2015-2020 年国内配电网建设投资需求不低于 2 万亿元。

2. 国家公布的四批增量配电网试点名单涉及 404 个项目，预计项目完工后将提高供电能力 1 亿千瓦。

随着电能在中国能源领域地位和重要性的进一步提高，未来国内电能替代规模还将进一步扩大。

从供应侧看，目前，中国已经确立了“清洁能源优先发展”的能源发展战略³。由于清洁能源主要转化成电能加以利用，因此，清洁能源的快速发展带动了国内电气化水平的逐步提高。从2000年到2018年，国内能源生产结构中，清洁能源占比从5.2%提高到23.5%；而终端能源消费中，电力消费占比从8.9%一路提高到25.5%（见图1-3）。

从需求侧看，“十三五”以来，随着中国经济进入新常态，国内电力进入新发展阶段。一方面，电气化水平持续提高，电力增长速度超过一次能源增长速度；另一方面，电力增长动力由工业加快向第三产业和居民用电转变，空调等家用电器快速普及，电动汽车、电采暖等新型用电设备加快推广，数据中心等负荷密集区不断扩大等，持续推高着国内用电负荷。

有研究表明，如果不考虑能源替代的经济性，仅从当前技术可行性考虑，中国电能替代潜力空间约2.2万亿kWh，发展空间巨大。

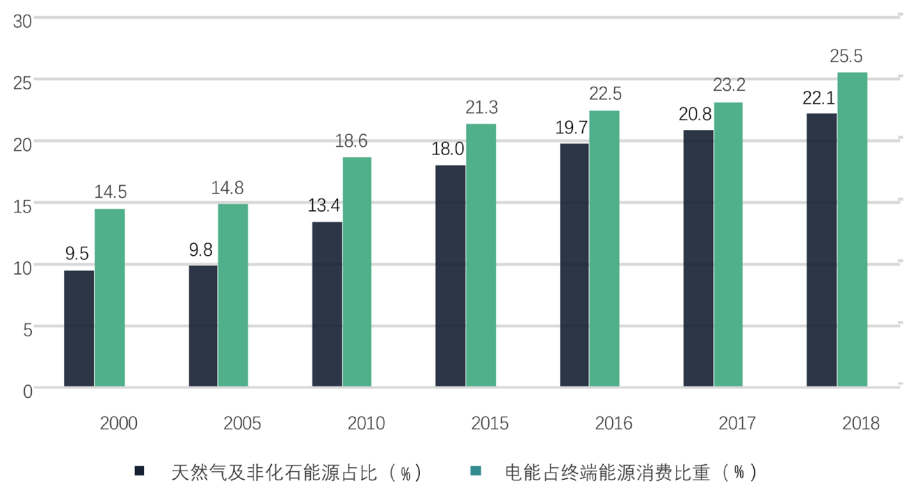


图 1-3 2000 年至今中国清洁能源的发展与国内电气化水平

3. 2017 年 5 月，国家发展改革为和国家能源局联合印发《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》。

(2) 可调节电力 / 需求响应资源开发

需求响应是电力发展进入新阶段后，从需求侧解决电力供需平衡的新手段。需求响应不同于有序用电，它是电力用户对电价或激励信号做出的主动响应，这种响应主要表现为用户临时性改变用电行为，即根据电价高低或激励大小，临时性调节电力负荷，包括削峰、移峰填谷或者填谷。需求响应的实施对于减少燃煤（燃气）机组的调频或调峰依赖，提高电力系统运行的可靠性和经济性等意义重大。

需求响应是电力需求侧资源的重要组成部分。从上世纪 90 年代以来，中国的电力需求侧管理经历了引进、宣传、示范推广等过程。2010 年，国家出台了《电力需求侧管理办法》，并于“十二五”期间，启动了城市电力需求侧管理综合试点工作。期间，国内的需求响应工作主要集中在北京、江苏、上海、广东等地。大多数地区实施的需求响应规模较小，且主要关注用户的削峰行为。

“十三五”以来，随着国内电力形势的变化，电能替代和清洁能源的发展，需求响应的应用价值进一步提高。在国内电气化率高的部分地区，随着分布式电源、电动汽车、清洁能供暖等多元化负荷的接入，区域负荷特征改变明显（见图 1-4）。主要表现为：电力负荷峰谷差持续加大，夏季和冬季日负荷特征愈加明显，局部时段“缺电力”的现象频出。同时，随着新能源资源的大规模接入，部分地区电力供需不匹配对电网稳定运行产生的威胁时有发生。在这种情况下，需求响应在削峰填谷、促进电力供需平衡、提高电网运行可靠性等方面的作用，受到越来越多的重视。

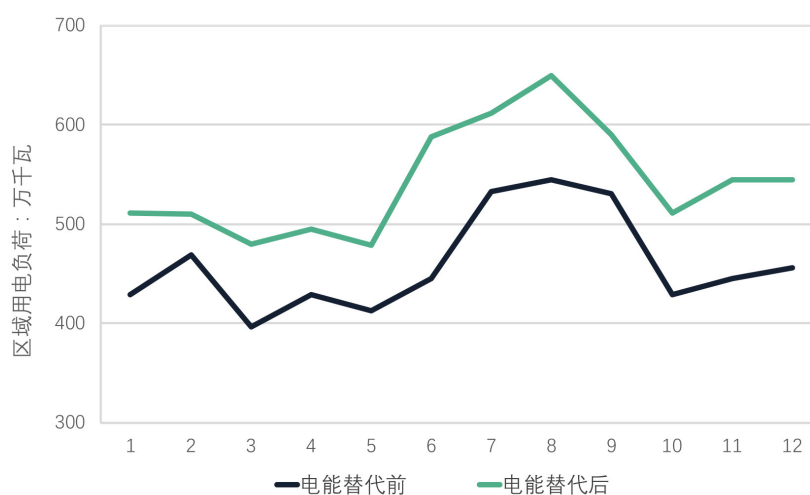


图 1-4 区域负荷特性的改变示意

2017 年，修订后的《电力需求侧管理办法》（以下简称《办法》）出台，以较大的篇幅强调需求响应在保障电力供需平衡方面的重要作用，并首次提出“建立需求响应与可再生能源电力消纳协调互动”的经济激励机制。同时，《办法》还要求“各地应扩大需求响应试点实施范围，推动需求响应资源纳入电力市场”。

在《办法》出台后，国内需求响应的实施范围逐渐从“十二五”期间的试点城市扩大到多个省份，除了北京、江苏、上海、广东之外，天津、山东、河南、浙江等地区也相继开展了全省（市）范围内的需求响应工作，实施规模也随之扩大。如江苏省需求响应单次最大规模从 2015 年的 165 万 kW 提高到 2019 年的 402 万 kW⁴，增幅达到两倍以上；2019 年，浙江在全省下达了 300 万 kW 的需求响应⁵，广东省要求全省形成 500 万 kW 的调峰能力⁶。除了传统的大工业用户外，商业和居民用户也开始参与需求响应，如 2019 年 8 月，江西省电力公司对 10 万户居民发出邀约开展电力需求响应试点。同时，在新电改驱动下，新的市场主体，如售电公司、负荷集成商、储能设施也出现在需求响应工作中⁷。

在用户激励方面，补贴仍是各地普遍采取的措施。对于形成和扩大补贴资金来源，各地进行了不同尝试，如江苏省需求响应补贴主要由尖峰电价增收电费支付，浙江省尝试以跨区域省间富余可再生能源电力现货交易购电差价盈余部分支付补贴费用，河北等地从城市附加费中提取需求侧管理专项资金。

在实施类型上，虽然目前国内实施的需求响应大都以削峰为主，但部分地区也开始了填谷试点。如上海在 2018 年开始了大规模的“填谷式”需求响应⁸，并尝试利用需求

4. 中国电力新闻网，《江苏单次削峰负荷超四百万千瓦》，2019 年 8 月 6 日。

5. 2019 年 7 月，浙江省发改委和省能源局联合下发了《关于开展 2019 年度浙江省电力需求响应工作的通知》。

6. 2019 年 4 月，广东省能源局在《广东省 2019 年电力需求响应方案（征求意见稿）》中，指出 2019 年全省需求响应工作目标是在全省用户侧调峰能力总量达到 500 万千瓦。

7. 负荷集成商参与需求响应可以追溯到“十二五”城市综合试点工作时期，“十三五”期间在各地的需求响应试点中，负荷集成商均有不同程度的参与；售电公司和储能设施则是在“十三五”期间，才开始涉足需求响应。如山东省等在 2019 年需求响应工作通知中，均提出了鼓励售电公司、储能设施参与需求响应。2019 年，浙江省需求响应协议用户中出现了售电公司。

8. 2018 年 6 月 18 日，国网上海电力首次实施大规模“填谷”式电力负荷需求响应，期间共有 88 户自主申报用户、5 家负荷集成商（涉及 522 户）参与，涵盖工业生产移峰、自备电厂、冷热电三联供、冰蓄冷空调机组、电力储能设施、公共充电站、小区直供充电桩等全类型可控负荷。此次负荷需求响应单次最大提升负荷 105.93 万千瓦，响应时段平均填谷负荷 87.28 万千瓦。

响应助力可再生能源消纳。江苏省也于2018年首次实施填谷需求响应，并首创竞价模式⁹。

(3) 节约电量资源

在所有的需求侧资源中，节约电量资源开发最早也最为成熟。早在“十一五”中国就全面启动节能工作，相关规划战略、政策措施、标准规范、试点示范等向节电和提高效率方面倾斜。

在政策推动下，节能服务公司成为节电资源开发的主力之一。在国内，节能服务公司大多采用效益分享型模式，因此，可节约的电量资源成为节能服务公司的重要关注点。目前，节能服务公司在终端用电领域主要开展的项目类型包括：能源管控系统、供热系统节能（热水、蒸汽）、中央空调系统节能、电机系统节能、建筑综合节能、新能源与可再生能源利用等。

(4) 分布式能源资源开发

近年来，分布式能源受到国家的大力支持。为了鼓励分布式能源的发展，国家出台了一系列扶持政策，如《能源发展“十三五”规划》、《关于发展天然气分布式能源的指导意见》、《关于开展分布式发电市场化市场试点的通知》等。早期的分布式能源发展政策多集中在发电规划和并网¹⁰，“十三五”以来政策逐渐向多能互补、项目示范、市场化交易¹¹等方面倾斜。

在政策支持下，国内分布式能源市场较为活跃。目前，国内发电企业、电网企业、燃气企业等均积极向产业链上游拓展，开展多种类型的分布式能源开发与供应服务，包括分散式风电、分布式太阳能、生物质能、余热余压余气开发利用服务以及天然气三联供、区域集中供热 / 供冷站的投资、建设、运营服务等。

9. 江苏省在2018年10月1日到3日，共组织六次填谷需求响应，规模达到719万千瓦。此次需求响应在同等条件下，优先选择申报激励价格低、负荷量大的负荷集成商和用户参与响应。根据申报情况，竞价额最高在8元/千瓦，最低在1.33元/千瓦。

10. 2012年7月，国家能源局出台《分布式发电管理办法》、《分布式发电并网管理办法》。

11. 2016年2月，国务院出台《关于推进“互联网”+智慧能源发展的指导意见》；2016年7月，国家发展改革委、能源局出台《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见》；2017年5月，国家能源局出台《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》。

1.1.3 需求侧资源开发意义

需求侧资源的开发，在提高资源利用效率、防治大气污染、应对全球气候变化等方面的意义和作用，已经被人们熟知。在中国，特别是经济社会进入新常态以来，需求侧资源的开发被赋予更高的价值。

(1) 新常态下促进电力供需平衡的新手段

“十三五”以来，中国的电力供需形势已发生深刻变化。主要表现为用电量低速增长，电力供应能力较为充足，中国的火电设备年平均利用小时数从之前的 5000 小时以上，下降到 4300 小时左右；同时，局部地区电力供需仍比较紧张，由于空调等季节性用电的扩大，导致局部时段“缺电力”现象较为突出。

如浙江省，其电力消费增长越来越集中在第三产业和居民生活用电上，季节性用电的扩大导致夏季高峰时段“缺电力”成为比“缺电量”更为突出的问题。2019 年，浙江省全社会用电量同比增长 3.8%，而最高用电负荷增长高达 6% 以上¹²，全省最高负荷增幅比用电量增幅高出两个百分点以上。

在电力供应总体宽松的情况下，以建设新电源的方式应对局部时段的负荷高峰，显然谈不上资源的优化配置。而需求响应的实施，以用户在某一时段共同削减负荷的方式，在避免扩大电源投资的前提下，使得负荷下降到电网可承受的范围之内，同时提高电网运行的稳定性和效率，因此，可以更经济、更有效地实现电力供需总体平衡。

(2) 推动电力供给侧与需求侧的高度协调匹配

在中国能源系统的发展过程中，一直将能源需求作为一种刚性需求，各个能源行业的发展也基本遵循着“扩张保供”的思路，这一点在电力行业尤其明显，当电力供需矛盾突出时，单纯增加发电装机和输配电容量来满足日益增长的用电需求，同时辅助以有序用电、负荷控制等行政手段来减少高峰用电负荷。这种靠增加电力供应、用户被动参与来满足需求增长的传统模式，不具有可持续性。

而需求侧资源的开发利用，是将需求方的各种资源，纳入统一的资源规划。它重在提高终端用电效率，重在改变用户的用电行为。它强调资源的开发利用要建立在用户需求和用户利益的基础之上，通过激发用户主动参与维护电力平衡的意识和行为，促进电

12. 来自北极星电力网浙江省发改委的文章，<http://m.bjx.com.cn/mnews/20200121/1038246.shtml>。

力供需双方形成利益共同体，推动供给侧和需求侧的高度协调匹配。同时，需求侧资源开发将促进国内用电方式从无限满足电力需求走向有限（合理）满足电力需求的思维转变，推动全社会绿色生活和消费方式的形成。

（3）推动发展清洁能源，助力可再生能源消纳

目前，中国部分地区能源生产消费的环境承载能力已接近上限，大气治理形势严峻，清洁能源发展任务艰巨。按照“十三五”规划的总体要求，“十三五”时期中国能源发展的一个重大目标是提高能源系统的清洁化水平。在国内能源结构清洁化转型过程中，由于供需增长不平衡、网源发展不协调等导致的“三弃”问题尤为突出。

由于需求响应在削峰填谷、提高电力系统稳定性和灵活性的作用，可以成为促进可再生能源消纳的重要手段。可再生能源发电的间歇性、随机性、不可控性，对需求侧用电负荷曲线柔性度的要求越来越高，通过深化开发需求侧资源，积极发展储能和需求响应等关键技术，促进供应侧与用户侧大规模友好互动，是促进可再生能源多发满发的重要手段。

（4）有利于国内电力市场的发展和完善

2015年，中国启动了新一轮的电力市场改革。围绕着电力市场的构建，中国开展了电力市场化交易、输配电价改革、售电侧改革、增量配电网试点等一系列工作。其中，需求侧管理和需求响应也被写入电改9号文¹³，需求响应资源纳入电力市场建设的呼声渐高。

从市场开拓的角度出发，需求侧资源的开发需要政府、能源供应企业、能源服务公司、电力用户等的共同参与，意味着将会有更多的主体直接或间接地参与电力市场。在成熟的电力市场环境下，需求侧资源既可以参与电量市场影响电价，还可以参与辅助服务市场提供调频、备用、可中断负荷等，同时还可以带动辅助服务市场、储能等项目得到更好的发展，因此，需求侧资源的开发将扩大电力市场规模，持续激发市场活力。

13. 2015年3月，中共中央办公厅以中发[2015]9号文发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》，开启了中国新一轮电力体制改革的大幕。

1.2 研究重点与方法

1.2.1 研究范围的界定

需求侧资源包括电能替代、需求响应、分布式能源和节电资源。从资源开发的角度，四类资源之间的关系密不可分。电能替代资源的开发，将扩大电能需求，当电能需求超过供应能力，节电和降低用电负荷的需求随之产生；同时，当可再生能源成为新增能源消费的主力，高质量的电能替代工作，必将推动需求响应和分布式能源的开发利用。

在目前的电力供需形势下，电能替代和需求响应的关系尤为密切。一方面，电能替代是实现需求响应规模化发展的重要前提，随着电气化水平的提高，需求响应资源池不断扩大，使得需求响应资源的开发逐渐具备技术和经济上的可行性；另一方面，需求响应是确保电能替代顺利开展的重要条件，通过需求响应从需求侧促进区域的电力 / 电量平衡，提高区域电网的承载能力和运行效率，推动电能替代的规模化发展。

电能替代和需求响应看似相互矛盾，一个是扩大电能消费，一个是调节高峰负荷。但实质上都是为电力供需平衡服务。通过电能替代和需求响应工作，能够提高区域用能清洁化水平，提升电力系统的灵活性和可靠性，提高能源系统的开发和利用效率，实现可再生能源消纳、节能减排、大气污染防治等多重目标，从而更高效的应对气候变化带来的挑战。

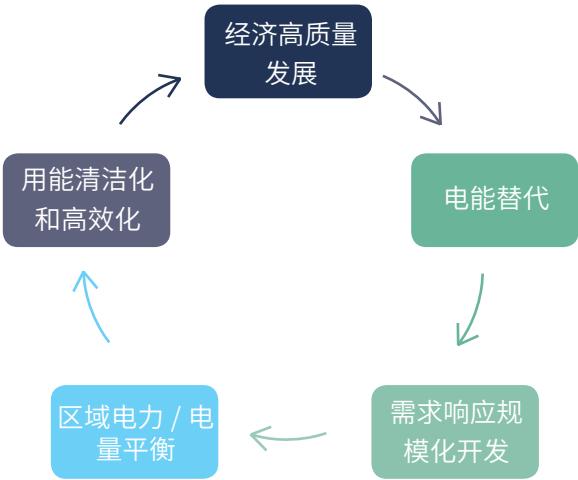


图 1-5 电能替代与需求响应的关系示意

综上，本文将重点研究电能替代和需求响应资源。

1.2.2 待解决的关键问题

无论是电能替代还是需求响应，都均有资源分散性的特点。尤其是需求响应资源，受制于用户特性和负荷调节的能力，较难产生规模效应；同时，相当大的需求响应资源，不具备实时响应的条件，难以满足电力系统瞬时平衡需求。以上种种原因决定了需求响应资源，虽然具有较高的开发前景，但同时具有较高的开发难度。

此外，虽然需求响应是提高全社会资源配置效率的有效手段，但作为需求响应的参与主体，用户并不会主动为系统效率提升买单，只会对政府和电力公司的激励信号做出反应。而电力公司是否会起承担实施主体的责任，市场是否会产生负荷集中商等中介力量，则取决于政府能否克服相关的制度和政策障碍，创造有利于需求响应资源开发的有利环境。

而无论是需求侧资源的开发，还是在政策市场驱动下的发展，均首先取决于能否找到可开发的需求侧资源，并将其资源潜力进行定量化测算。特别是对于目前尚处于试点示范阶段的需求响应工作来说，其资源潜力分析方法的开发是支撑需求响应工作从“开发前景”到“项目实践”的重要桥梁，同时也是相关方制定科学、合理的需求响应资源开发策略的重要基础。

综上，本项目以提出兼具科学性和实用性的需求侧资源潜力分析方法学为目标，并以电能替代和需求响应为研究对象。项目将解决的主要问题包括：

①**电能替代和需求响应资源的分布？**按照开发条件，资源可分为具有技术经济性的资源以及暂不具有开发能力的资源。因此，要研究提出资源潜力方法学，首先要摸清电能替代和需求响应资源的分布，即哪些领域具有可开发的资源。

②**电能替代和需求响应资源潜力的测算方法？**这是本项目研究的核心内容。考虑到现实需求，即政府决策层、企业及一线工作部门等，对潜力分析的精度和深度要求不同，项目将研究制定宏观、中观、微观三个维度的方法学，以满足不同对象的具体需求。

③**拟定的潜力分析方法是否具有科学性和实用性？**通过湖州案例分析，分别测算其宏观、中观的电能替代和需求响应资源潜力，评估潜力分析方法学的科学性、可行性和实用性。

④**如何在政策层面支持电能替代和需求响应资源潜力的市场价值的实现？**作为新型资源，实现电能替代和需求响应资源的市场价值离不开政策支持，项目将研究提出针对性强的政策建议。

1.2.3 主要技术路线

本项目研究的技术路线如下：

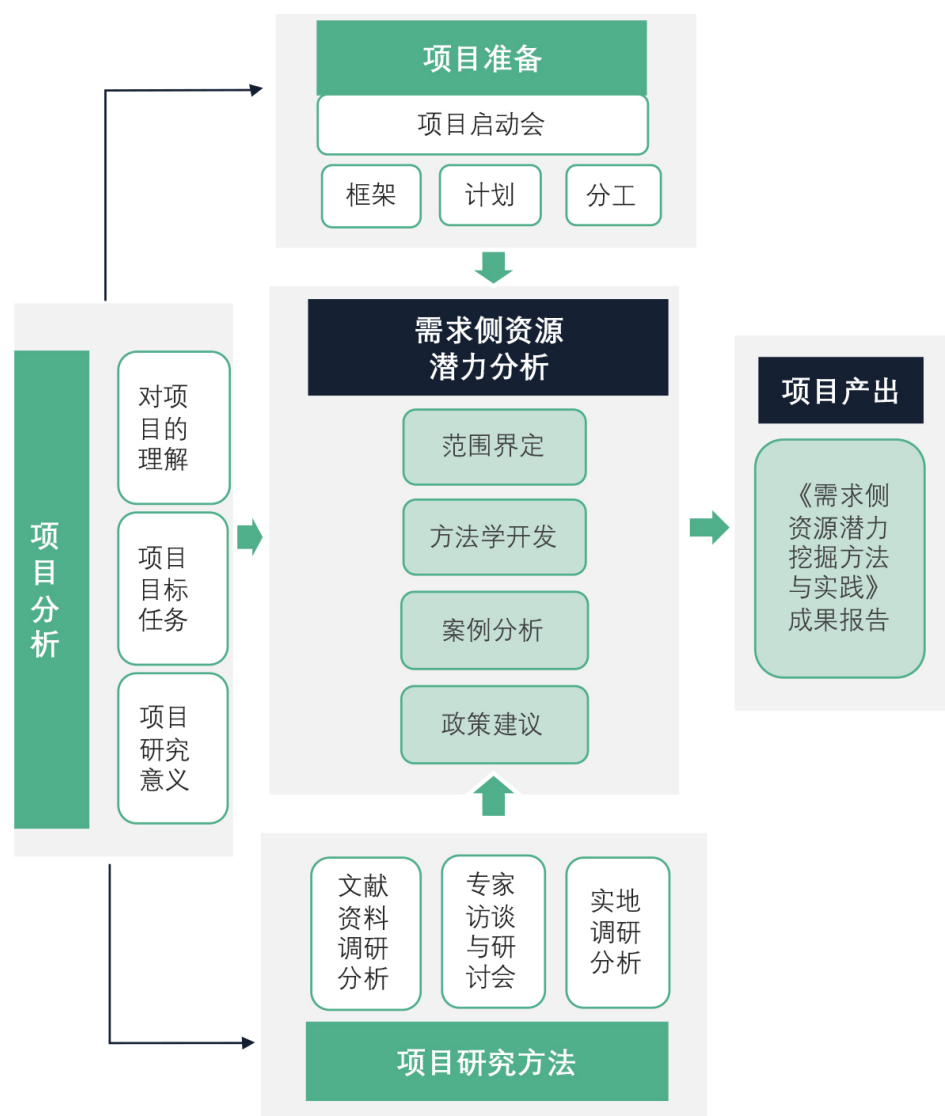


图 1-6 本项目的主要技术路线

2 电能替代资源潜力 分析方法学

本章重点分析电能替代的资源分布，研究提出宏观、中观和微观三大维度的电能替代资源潜力分析的方法学。

2.1 重点领域的电能替代资源潜力分析

电能作为重要的能源载体，通过输电网络和储用装置几乎覆盖了人们所能触及的任何地域，其应用范围囊括了现代文明所涉及的各个领域。但是，从技术经济性考虑，现阶段并非所有领域的燃煤或燃油设备都能够替换成电能设备，影响电能替代资源开发的主要因素有设备特性、电力系统承载能力等。

一是用能设备的“可替代性”。主要从设备技术经济性考虑，一方面终端用能领域可实现燃煤或燃油替代的电能设备已经出现；另一方面，在不影响正常生产生活的情况下，电能设备的替换和使用具有一定的经济性。

二是电力系统的“承载能力”。电能替代会提高区域用电负荷同时改变负荷特性，对用户负荷承载能力和区域电力平衡均形成一定压力，因此，需要在配电网扩容改造的同时，增加区域电网的灵活性等。

根据国家相关文件，现阶段电能替代的重点领域主要有居民采暖、工农生产、交通领域等。

①工业领域

主要集中对燃煤锅炉、传统窑炉以及运输设备等的电能替代。

一是在生产工艺需用热水（蒸汽）的各类行业，推广蓄热式工业电锅炉。

二是在金属加工、铸造、陶瓷、岩棉、微晶玻璃等行业以及产品具有高附加值的行业，推广电窑炉。

三是在采掘、油田钻机以及食品加工、港口码头中的货物运输环节，推广油气管线电加压、电动皮带传输等替代技术。

②建筑领域

主要集中在电采暖、蓄能、家用电器普及等方面。

一是以电采暖为补充供暖方式，推进北方居民电采暖，范围主要针对燃气（热力）管网覆盖范围以外的城区、郊区、农村等还大量使用散烧煤进行采暖的，使用蓄热式电锅炉、蓄热式电暖器、电热膜等多种电采暖设施替代分散燃煤设施。

二是在供热（冷）要求较高的大型商场、办公楼、酒店等场所，推广应用热泵、电蓄冷空调、蓄热式电锅炉等，推广应用储能装置。

三是加快空调、冰箱、电热水器、电炊具等家用电器的普及使用。

③交通领域

主要针对各类车辆、靠港船舶、机场桥载设备等，以电能替代燃油，推广电动车，港口岸电和空港路电等。

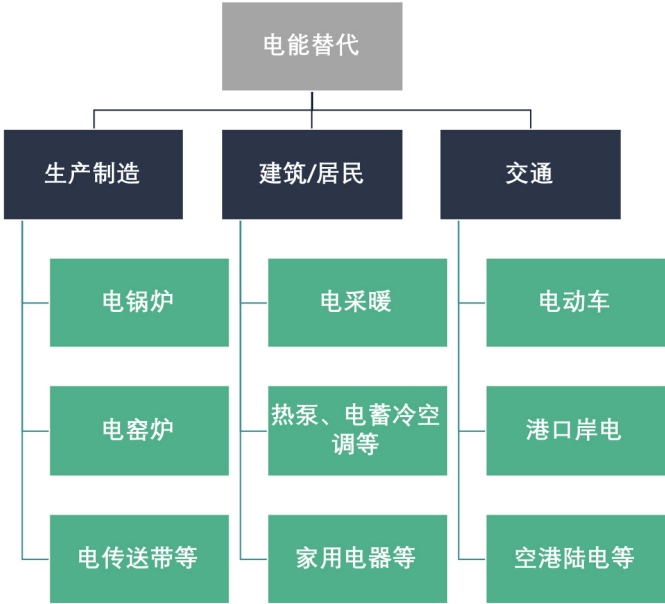


图 2-1 电能替资源分布的主要领域

“十三五”期间，国家制定了 4500 亿 kWh 的电能替代规划目标，电能替代工作在全国范围内铺开。从工作成效看，2018 年全国基本完成了国家规划目标。其中，仅 2016-2018 年，国家电网公司就完成替代电量 3566.02 亿 kWh，占全国规划目标总量的 79%¹⁴。随着人民生活水平的提高，在产业转型、清洁能源高比例发展和大气污染防治等的多重需求下，预计“十四五”乃至更长一段时间内，国内电能替代工作的步伐仍将持续加快。仅从当前技术可行性考虑，中国电能替代潜力空间约 2.2 万亿 kWh⁴。

2.2 电能替代资源潜力分析的计算方法

电能替代蕴含着巨大的资源潜力。从区域发展的角度分析，由于政府部门、电力公司、负荷集成商等主体对资源开发的关注点不同，因此，本报告以宏观、中观、微观三个维度来进行电能替代资源潜力分析。

宏观层面以区域整体为对象，将资源潜力简化成统一的指标，该指标可基于区域对标得到，可用于政府层面的规划参考等；

中观层面以重点领域（行业）为对象，给出不同行业的潜力计算指标，该指标计算需要充分考虑行业特性，计算过程较为复杂，但测算结果的准确性较高；

微观层面以终端用户为对象，给出具体用户的潜力计算指标，该指标计算较为简单，可用于实际操作层面的调查分析



图 2-2 资源潜力分析的三个维度

从理论上讲，宏观层面的资源总量 $\approx$ 行业资源量之和 $\approx$ 用户资源量之和。

14. 数据来自国家电网公司，网址：<http://news.bjx.com.cn/html/20140312/496192.shtml>

2.2.1 宏观层面

以区域电气化率，即终端能源中电力消费占比为主要指标。

$$E_m = \Delta S_f * E_f \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-1)}$$

式中：为宏观层面的区域年电能替代潜力，kWh；

ΔS_f 为区域规划或预测的电气化提高率，%；

E_f 为区域预测的年电力消费量，kWh。

2.2.2 中观层面

以重点领域（行业）为对象，分析该行业燃煤 / 燃油替代潜力。主要包括工业、建筑、交通三大重点领域。

①工业领域：电能替代的主要方式是电锅炉替代燃煤锅炉（工业供热）、电窑炉替代传统窑炉等。

电锅炉和电窑炉等电能设备的使用将满足行业同样的用热需求。因此，可以用热量守恒测算行业的电能替代潜力。

i. 电锅炉替代潜力：

$$E_{i,coal} = \frac{[C_{coal} * Y_{coal} * 7000 \left(\frac{\text{千卡}}{\text{kgce}} \right)] * \gamma_{coal}}{Y_{boi} * 860 \text{ (千卡/kWh)}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-2)}$$

式中： $E_{i,coal}$ 为工业电锅炉年电能替代潜力，kWh；

C_{coal} 为区域工业燃煤锅炉的年耗煤量，kgce；

γ_{coal} 为区域规划或预测的燃煤锅炉可替换率，%；

Y_{coal} 为区域工业燃煤锅炉的平均热效率，%；

Y_{boi} 为替换后的区域工业电锅炉的平均热效率，%。

表 2-1 锅炉热效率参考值

锅炉热效率	Y（参考值）
蓄热式燃煤电锅炉 Y_{coal}	75%
蓄热式电锅炉 Y_{boi}	95%-98%

ii. 电窑炉替代潜力：

$$E_{i,oil} = \frac{[O_{oil} * Y_{oil} * 10000 \left(\frac{\text{千卡}}{\text{kgoe}} \right)] * \gamma_{oil}}{Y_{fur} * 860 \text{ (千卡/kWh)}} \dots\dots\dots \text{(式 2-3)}$$

式中： $E_{i,oil}$ 为工业电窑炉年电能替代潜力，kWh；

O_{oil} 为区域工业窑炉的耗油量，kgoe；

γ_{oil} 为区域规划或预测的窑炉可替换率，%；

Y_{oil} 为区域工业窑炉（重油为热源）的平均热效率，%；

Y_{fur} 为替换后的区域工业电窑炉的平均热效率，%。

表 2-2 窑炉热效率参考值

窑炉热效率	Y（参考值）
传统窑炉 Y_{oil}	25-35%
电窑炉 Y_{fur}	95%-98%

iii. 工业电能替代潜力：

$$E_{ind} = E_{i,coal} + E_{i,oil} \dots\dots\dots \text{(式 2-4)}$$

式中： E_{ind} 为工业领域的电能替代潜力，kWh；

$E_{i,coal}$ 为工业电锅炉年电能替代潜力，kWh；

$E_{i,oil}$ 为工业电窑炉年电能替代潜力，kWh。

②建筑领域：以电采暖替代、家用电器普及为主。

i. 电采暖替代潜力：

$$E_{b,hea} = A * d_n * \sum_{i=1}^n (R_i * \gamma_{i,hea}) \dots\dots\dots \text{(式 2-5)}$$

式中： $E_{b,hea}$ 为区域电采暖的电能替代电量，kWh；

A 为区域供暖面积， m^2 ；

d_n 为该区域的供暖季天数，天；

R_i 第 i 种电采暖设备每天单位面积耗电量，kWh/ m^2 /d；

$\gamma_{i,hea}$ 是第 i 种电采暖设备的推广率，%。

表 2-3 典型电采暖设备每日单位面积的耗电量参考值

类型	R (参考值, kWh/m ² /d)
蓄热电锅炉	0.7-0.8
电加热装置	0.9-1.0
空气源热泵	0.4-0.45
地源热泵	0.25-0.3

ii. 家用电器电能替代潜力:

$$E_{b, equ} = \sum(E_i * \Delta P_i * G_{equ, i}) \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-6)}$$

式中: $E_{b, equ}$ 为区域家用电器的电能替代电量, kWh;

E_i 为 i 种电器的年耗电量, kWh;

ΔP_i 为 i 种电器的普及提高率, %;

$G_{equ, i}$ 为 i 种电器的现有数量, 台。

iii. 建筑电能替代潜力:

$$E_{bui} = E_{b, hea} + E_{i, equ} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-7)}$$

式中: E_{bui} 为建筑领域的电能替代潜力, kWh;

$E_{b, hea}$ 为区域电采暖的电能替代电量, kWh;

$E_{i, equ}$ 为区域家用电器的电能替代电量, kWh。

③ 交通领域: 以电动车替代燃油车为主

$$E_{tra} = \sum_{i=1}^n EV_i * M_i * D_i * 365 \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-8)}$$

其中: E_{tra} 电动汽车的年最大耗电量;

i 为不同的电动车类型;

EV_i 为 i 类型的电动车数量;

M_i 为 i 类型电动车的百公里耗电量;

D_i 为 i 类型电动车每日的最大行驶里程。

表 2-4 电动车的百公里耗电量

类型	百公里电 (kWh/100km)
2 吨左右的汽车，如出租车、私家车和公务车等	20
10-13 吨左右的商用车、公交车、专用车等	120

表 2-5 四种类型的电动汽车每日的最大耗电量

	百公里电耗 (kWh/ 百公里)	每日最大行驶里程 (公里 / 日)	每日耗电量 (kWh/ 日)
公交	120	150	180
出租	20	300	60
专用	120	50	60
私人及公务	20	30	6

④ 地区电能替代资源总量：

从中观层面分析，地区电能替代资源总量等于工业、建筑和交通领域的电能替代量之和。

$$E_{m,fe} = E_{ind} + E_{bui} + E_{tra} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-9)}$$

2.2.3 微观层面

计算单个用户 j 的电能替代资源潜力，同时考虑用户电力容量约束。

$$E_{j,inc} = p_{j,inc} * 8760 \text{小时} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-10)}$$

$$p_{j,inc} = \sum_{i=1}^n k_i * G_{i,inc} * P_i / \text{功率因数} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-11)}$$

$$p_{j,inc} + p_{j,sto} \ll p_{j,tot} \cdots \cdots \cdots \text{(式 2-12)}$$

式中： $E_{j,inc}$ 为用户实施电能替代后的新增电力消费，kWh；

$P_{j,inc}$ 为用户实施电能替代后的新增负荷，kW；

K_i 为第 i 种电能替代设备使用概率；

$G_{i,inc}$ 为第 i 种替换后的电能设备数量，台；

P_i 为第 i 种电能替代设备额定（运行）功率，kW；

$P_{j,sto}$ 为用户实施电能替代前的存量负荷, kW;

$P_{j,tot}$ 为用户扩容后的电力容量 ,kW。

表 2-6 设备使用频次的取值参考

使用频次	K
持续使用	1
经常使用	0.6
偶尔使用	0.25

从微观层面分析，地区电能替代资源总量等于地区所有用户电能替代资源量之和：

$$E_{m,j} = \sum_{j=1}^m E_{j,inc} \cdots \cdots \cdots \quad (\text{式 2-13})$$

3 需求响应资源潜力 分析方法学

3.1 重点领域的需求响应资源潜力分析

需求响应主要包括用户临时性削峰或填谷的调节负荷的响应行为。用户在负荷总量中，一部分负荷可通过改变工作班制、改变出力大小、改变蓄能等综合手段做出调整。这部分负荷量就是用户侧的需求响应资源潜力。

3.1.1 影响需求响应资源量的主要因素

在实际运行层面，用户能否参与需求响应以及参与度的大小，除了与外部刺激（主要是价格和激励信号）密切相关外，主要由其负荷特性决定。具体来说：

一是用户负荷是否具有“可调节性”。根据用户生产生活条件限制，用电设备可分为可调节负荷和不可调节负荷。

①不可调节负荷：在电网高峰时段下，用户负荷中心不可以调节的负荷部分，该部分负荷要求的供电可靠性高，一旦改变会对用户生产生活或者电网安全可靠带来严重影响；

②可调节负荷：电网高峰时段下，用户负荷中心可以调节的负荷部分。从调节负荷的角度，一般认为，可调节负荷具备较大的需求响应资源潜力。

二是可调节负荷的“调节能力”。用户可调节负荷的调节能力大小与用户可终端设备功率、设备使用频次、保留负荷等密切相关；由于用户响应行为具有间歇性特征，因

此用户负荷的季节性、周期性、日负荷特性等均影响到需求响应的可调节时段和响应时间。同时，用户负荷与电网高峰负荷的关系，也会影响用户的可调节能力等。

具体包括：

- ①使用频次：按照用电设备使用频率，可以分为连续使用、经常使用和偶尔使用三种主要类型。
- ②保留负荷：是指用户在不影响基本生产生活，同时用电行为的改变对电网不造成负面影响的情况下，应该保留的最低负荷。
- ③可调节时段：可调节时段与用户用电特征相关。根据用户用电是否具有明显的季节性特征，如夏季空调制冷、冬季电采暖等，工作日和非工作日特征以及早晚高峰等，可区分季、月、日可调节时段。
- ④响应时间：是指用户根据价格或激励信号做出改变用电的行为，这种行为的变化一般是临时性的，临时性用电行为改变做出的时点以及持续的时间，可称之为响应时间。
- ⑤峰荷同时率：是指区域电网负荷峰值与用户（用户组）负荷峰值之和的比值。影响负荷同时率大小的主要因素，包括用户所有用能设备功率、用户负荷发生的时间概率、区域电网负荷特性等。

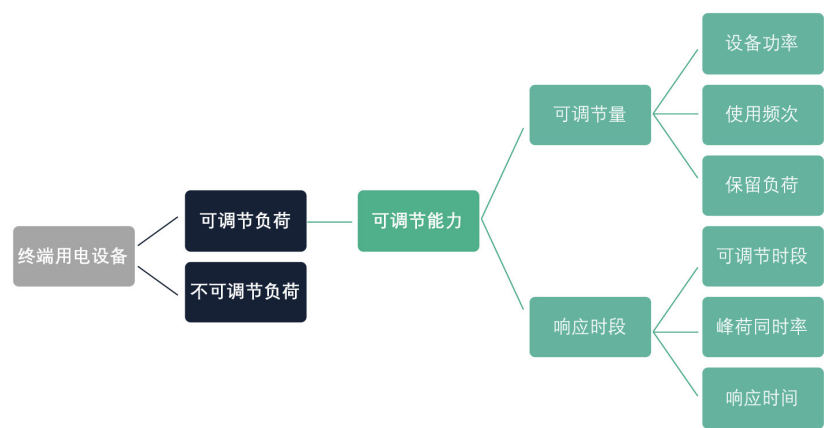


图 3-1 需求响应资源影响因素

3.1.2 重点领域的需求响应资源潜力分析

从重点领域看，同一行业中用户具有相似的负荷特性，其需求响应资源具有一定的共性。

(1) 重点领域的用电特性分析

工业领域：主要用电设备为电锅炉、电窑炉、电传送装置、电机等生产装备，以及电梯、照明、空调等辅助生产设备等。根据用电特性，可分为连续性用户和不连续用户。

①连续性生产电力用户，包括化工、水泥、冶金等行业，此类用户用电量，生产班制连续，主要生产设备长时间投运，对电力稳定、安全供应的要求较高；

②非连续生产电力用户，包括机械、纺织、食品等行业，此类电力用户生产班制不连续，具有较大的需求响应资源潜力。

建筑领域：主要用电设备包括空调、照明、电梯、水泵、电采暖等用能设备。根据用户特征又可分为公共建筑、商业建筑和民用建筑类型：

①公共建筑，包括政府机关、医院、学校等，此类电力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，机关和学校多为工作日；其中，医院等公共机构对电力的可靠性要高于机关和学校。

②商业建筑，包括宾馆、餐饮、娱乐等行业，用户用电量，用电高峰较为集中，多为晚上，具有较大的节约电力资源潜力。

③居民建筑，主要以居民用电为主，用户用电量，增长快，负荷变化大，通常形成一到两个负荷高峰。

交通领域：以电动车、港口岸电以及充电设施为代表，用户用电量，用电高峰较为集中，特别是电动私家车出行多为早晚高峰，其充电时段的选择具有较大的调节潜力。

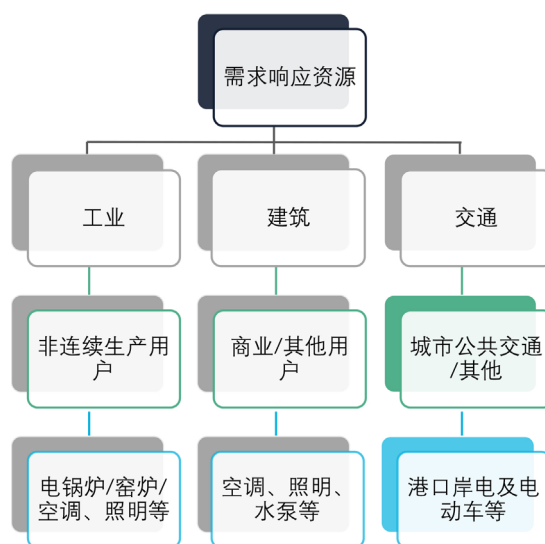


图 3-2 需求响应资源分布的重点领域

(2) 重点领域的用户参与度分析

单个用户“可调节能力”的潜力开发可以用“参与度”来表征，“参与度”包括区域用户参与比例、参与用户的实际响应量等。激发用户参与需求响应的主要手段是释放价格和激励信号，一般来说，峰谷价差越大或奖励越高，会激发更多的用户参与；当然，不同用户对价格或激励信号的敏感程度不同，国内在研究需求响应资源潜力时，大多用到价格弹性系数法，即用电力需求 - 价格弹性分析用户对电价的敏感程度。广义上，激励型需求响应也可看作一种特殊的价格性需求响应，它与价格性需求响应对用电量变化的影响具有相似的效果。

从理论上分析，区域需求响应资源潜力的大小是“可调节能力”和“价格敏感度”共同作用的结果。根据单个用户“可调节能力”与“价格敏感度”的大小，将其分为四个象限，如下图所示。其中，

- A 象限——单个用户可调节能力大、价格敏感度高；
- B 象限——单个用户可调节能力小、但价格敏感度高；
- C 象限——单个用户可调节能力大、但价格敏感度低；
- D 象限——单个用户可调节能力和价格敏感度均低。

从需求响应资源潜力开发的难易程度上看，处于 A 象限的用户明显具有更高的需求响应资源潜力。B 象限的用户潜力不大，但容易激发其参与。C 象限的用户潜力大，但开发成本较高。而 D 区的用户开发价值较低。

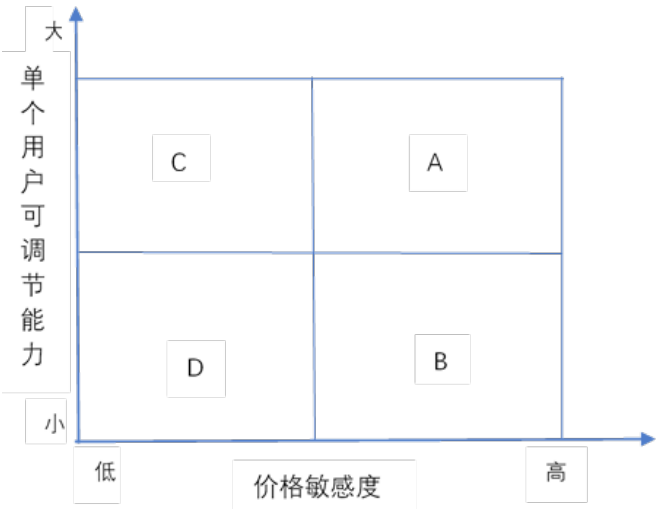


图 3-3 用户需求响应资源开发难易程度分析

在重点领域，工业中非连续生产行业，建筑领域的商业建筑，其可调节能力大、价格敏感度高，需求响应资源潜力大。而公共建筑和民用建筑，需求响应资源开发难度相对较高。工业行业中连续生产的行业，由于其负荷利用率大且供电可靠性要求较高，因此，需求响应资源潜力相对较小。

表 3-1 重点领域负荷特性分析

领域	可靠性要求	日负荷特性	单个用户可调节能力	价格敏感度
工业				
连续性生产	高	连续	高	低
非连续性生产	较高	间歇	高	高
建筑				
公共建筑	高	较连续	低	低
商业建筑	不高	间歇	较高	中
居民建筑 ¹	高	间歇	低	低
交通				
电动车	较高	间歇	低	高
港口岸电	较高	间歇	低	高

注 1：由于居民用户在国内电价体系中的特殊性，居民用电价格敏感度不高

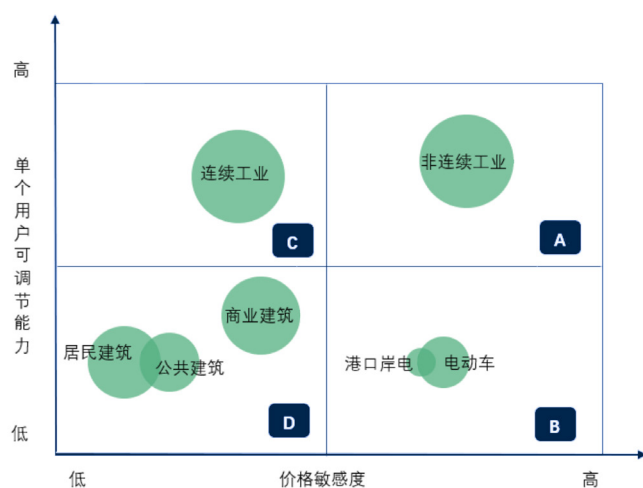


图 3-4 重点领域需求响应资源四象限分析

因国内终端电价仍处于管制状态，无法根据电力供需形成浮动电价，因此，国内需求响应资源的开发多为激励型。这种激励型需求响应多以财政补贴为主，补贴类型分为填谷和削峰，一般单次削峰补贴在 2-4 元 /kWh（居民户单次削峰补贴一般不足 1 元 / kWh），填谷补贴一般在 1.2 元 /kWh。

从用户参与类型看，工业用户是主力，居民、商业、公共机构用户逐渐受到重视。随着电力市场的发展，售电公司、储能设施等也开始参与需求响应工作。在江苏等需求响应工作开展较早的地区，负荷集成商扮演着重要角色，负荷集成商起到将分散的需求响应资源汇集的作用，因而对于规模化开发需求响应资源的意义重大。

表 3-2 国内部分地区的激励型需求响应

地区	实施规模（2019）万 kW	参与用户类型	奖励标准
江苏	单次削峰 -402 万 kW	工业、居民、储能用户等	实时削峰补贴为 4.0 元 /kWh；约定削峰补贴为 2.0 元 /kWh；填谷补贴单价为 1.2 元 /kWh。
上海	单次削峰 -34 万 kW 单次填谷 -34 万 kW	工业、商业用户等	削峰补贴上限为 3.0 元 /kWh；填谷补贴上限为 1.2 元 /kWh。
天津	18 年填谷 -40 万 kW	工业企业、充电设施等	填谷实际补贴单价：1.2-2.0/kWh
浙江	削峰安排 -300 万 kW	工业用户等	实时削峰补贴为 4.0 元 /kWh；约定削峰补贴为 2.0 元 /kWh；填谷补贴单价为 1.2 元 /kWh。
广东	调峰能力 -500 万 kW	大工业用户、负荷集成商、电力市场用户等	市场化用户参与需求侧响应的价格标准为 20 元 /kW·天；非市场化用户参与需求响应的价格标准 10 元 /kW·天。
山东	削峰交易 -210 万 kW 填谷交易 -83 万 kW	电力市场用户	削峰统一出清价：30 元 /kWh 填谷统一出清价：30 元 /kWh 用户每年至少参与 8 次需求响应
河南	18 年单次削峰 -32.05 万 kW	工业用户（响应能力 500kW 及以上）；非工业用户（响应能力 200kW 及以上）	实时约定响应 1~2 小时可得 18 元 /kW·次补贴；约定需求响应 2 小时以上的可获得 9 元 /kW·次的补贴
江西	最大削减规模 -235kW	居民用户（响应用户 369 户）	削峰补贴 0.5-0.8 元 / kWh

注：综合相关地区出台的政策文件及公布的需求响应实施效果等。其中，山东需求响应规模为单变竞价交易结果

在实践中，需求响应资源规模开发的重要前提是摸清其市场价值，一方面通过经济效益、环境效益、社会效益等理论分析，促进其价值获得市场承认；二是通过激励型或价格型需求响应的实践探索，促进需求响应资源参与电力市场，并在市场中获得“价格发现”。目前，需求响应的市场“价值承认”、“价格形成”均处于起步阶段，需求响应资源的有效开发还有赖于电力市场改革的持续推进。

3.1.3 移峰填谷和填谷需求响应潜力分析

以上的需求响应资源潜力分析更多的是针对直接削减式的需求响应。除了直接削减外，移峰填谷（又称转移负荷）和填谷也是需求响应的主要类型。

（1）移峰填谷

在地区电力供应短缺、失去电力平衡时，一般实施削峰和移峰填谷，这也是国内需求响应实施的主要类型。移峰填谷与直接削峰不同的是，它同时起到削峰和填谷的作用，既减少新增装机容量，又充分利用了闲置容量，这对于提高机组效率和稳定系统负荷曲线均有重要意义。

移峰填谷的实施一般需要用户采用蓄能技术，比如安装蓄冷空调；或者有其他可替代能源，如在电网高峰时段，以燃气或分布式太阳能等替代电力；再或者响应用户具备调整作业程序或设备使用时间的条件。

从理论上讲，工业、建筑和交通等领域均具备一定的转移负荷能力。但是，用户是否愿意参与移峰填谷，则主要取决于其收益能否大于成本。

- 对于采用蓄能技术的用户来说，取决于用户减少的高峰电费支出是否能够补偿多消耗的低谷电量支出电费，以及蓄能改造成本。
- 对于采用能源替换技术的用户来说，取决于减少的高峰电费支出能否补偿燃气或其他能源利用的成本；
- 对于采用作业调整等方式的用户来说，也取决于用户为此付出的物质或时间成本能否得到合理的补偿。

（2）填谷

填谷指在电网低谷时段增加用户的电力电量需求。它有利于启动系统空闲的发电容量，使得电网负荷趋于稳定，提高了系统运行的经济性，因而对电力公司获益最大。

如果要将填谷与移峰填谷严格加以区别，那么填谷最大的特点是在低谷时段带来“新增的”电力电量消费，而非“转移的”电力电量消费。填谷最常见的方式是以新增的谷段电力替代其他形式的能源。比如电动汽车替代燃油车，在电网低谷时段实施的充电行为；再如以蓄热电锅炉替代燃煤锅炉，在低谷时段进行的蓄热等。当然在实践中，“新增的”和“转移的”电力电量消费有时难以区分，因此，填谷和移峰填谷的差别并不显著。

近年来，中国一直致力于可再生能源发展，解决弃风弃光等问题。由于填谷促进了闲置发电容量的有效利用，因此，对于可再生能源消纳的意义重大。

在实践中，工业、建筑、交通等均能成为填谷实施的重点领域。而用户对填谷是否做出响应，对可再生能源消纳能否起到作用，同样取决于谷段低廉的电费支出（或者经济激励）能否激励用户改变用能行为和习惯。

3.2 需求响应资源潜力分析的计算方法

与电能替代类似，不同的主体对需求响应资源开发的关注点不同。因此，需求响应资源潜力分析以宏观、中观、微观三个维度来进行。

3.2.1 宏观层面

以可调节负荷占区域最大负荷的比重作为主要指标。

$$\Delta P_{m,DR} = P_{m,max} * \mu_m \cdots \cdots \cdots \quad (\text{式 3-1})$$

式中： $\Delta P_{m,DR}$ 为区域宏观层面负荷可调节量，kW；

$P_{m,max}$ 为区域年最大负荷，kW；

μ_m 为可调节负荷占最大负荷的比例，%。

其中， $\mu_m = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ ，X 为区域电气化率、用电结构、激励水平、峰谷价差等。可对标类似区域得到，也可参考国家或地区规划目标要求等。

新修订的《电力需求侧管理办法》提出：支持和鼓励各类电力市场参与方开发和利用需求响应资源，提供有偿调峰和调频等服务，逐步形成占年度最大用电负荷 3% 左右的需求侧机动调峰能力。该指标也可作为区域需求响应资源开发目标的重要参考。

2016 年，国家能源局发布了《关于组织实施“互联网+”智慧能源（能源互联网）示范项目的通知》，文件设计了“基于灵活性资源的能源互联网试点示范”，明确鼓励“在试点城市建设中建设占本城市最大负荷 5-10% 的多种能源形式的虚拟电厂。

2019 年以来，国内部分地区也制定了需求响应工作目标。

广东在《广东省 2019 年电力需求响应方案（征求意见稿）》指出：2019 年广东省电力需求响应工作目标在全省形成峰时一般地区负荷约 3%，重点地区负荷约 5% 需求侧的机动调峰能力，全省用户侧机动调峰能力总量达到 500 万 kWh 左右。

根据《浙江省发展改革委省能源局关于做好 2019 年全省有序用电和电力需求侧管理工作的通知》，2019 年，浙江省统调最高用电负荷约 7800 万 kW，全省需求响应总负荷为 300 万 kW，形成年度最大用电负荷 3.8% 的需求侧机动调峰能力。

根据山东省能源局发布《关于开展 2019 年电力需求响应工作的通知》，全省应具备占最大直调用电负荷 3% 左右的需求侧机动调峰能力，各市原则上需按上年最大直调用电负荷的 5%，组织电力用户申报参与需求响应，作为储备库资源。

表 3-3 2019 年国内典型地区的需求响应目标

地区	目标
广东	
全省	3%
重点地区	5%
江苏	3.8%（2016）
浙江	3.8%（2019）
山东	3%（2019）

同时，国外在研究区域层面需求响应资源潜力时，也给出了可调节量占最大负荷比例的参考数值。

如美国联邦能源管理委员会调查的需求响应项目，其预计削峰量占区域最大负荷的比重，从 2006 年的 4% 提高到 2012 年的 8% 以上。

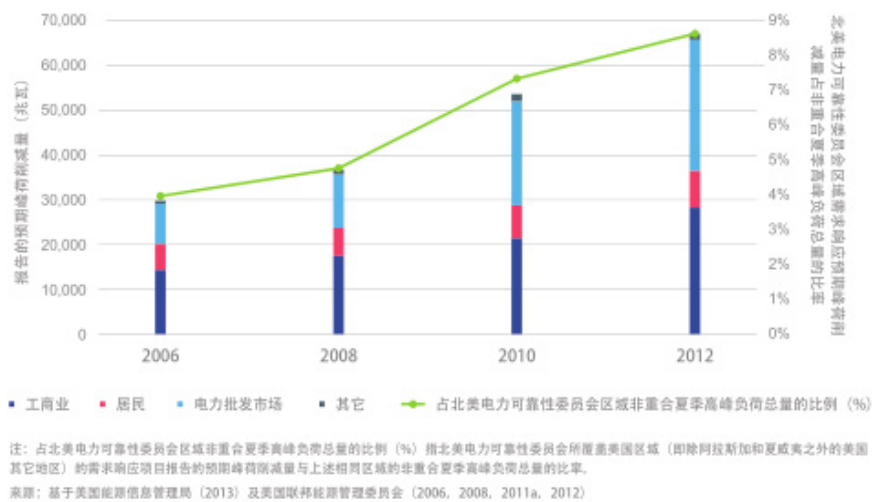


图 3-5 美国联邦能源管理委员会调查中需求响应项目报告的预期峰荷削减量

3.2.2 中观层面

行业需求响应资源潜力计算需要摸清区域边界条件、行业特性、电网负荷特性。

区域边界条件：行业需求响应资源潜力受到区域边界条件制约。从削峰上讲，行业保留的最低负荷之和应不能低于电网最小运行负荷；从经济层面分析，需求响应资源开发受到市场约束，即激励大小和电价波动应不违背经济规律，危及社会稳定等。

行业负荷特性：行业需求响应资源量的大小受到其自身用电特性的制约，如行业是否连续生产、对用电可靠性要求、单个用户负荷大小等必然影响行业参与需求响应的规模；从价格敏感度出发，在同等的激励或电价条件下，必然存在响应程度高的用户和响应程度低的用户。再者，一旦价格或激励到位，会激发用户需求响应工作的自主性，如用户除了直接参与高峰削减外，还会以蓄能方式转移高峰负荷。用户在低谷的蓄能行为会增加区域总的电能消费，但仍有效降低电网高峰负荷。因此，对于区域电力平衡仍有积极和正面的影响。

电网高峰负荷：在实际运行层面，考察用户对电网负荷的实际调节能力，起决定作用的是行业负荷与电网高峰负荷的关系，如果行业负荷具有明显的季节或日高峰负荷特征，且具备实施（实时或约定）需求响应的基本条件，则必然是需求响应的重要实施主体。

综上，行业需求响应资源潜力分析的过程应包括：

1) **区域边界条件分析：**从技术和经济层面摸清区域层面的电网约束和价格 / 激励约束条件。

2) 行业负荷特性分析：一是分析行业负荷特性；二是分析行业最大可调节能力；三是度量电价对行业用电负荷的影响，分析行业的参与度；四是汇总形成行业需求响应资源池。

3) 行业可调节电网高峰负荷能力分析：其关键点：一是分析电网负荷曲线特征；二是摸清行业负荷与电网高峰负荷的关系；三是制定需求响应工作方案。

行业层面的需求响应资源潜力分析过程如下图所示。

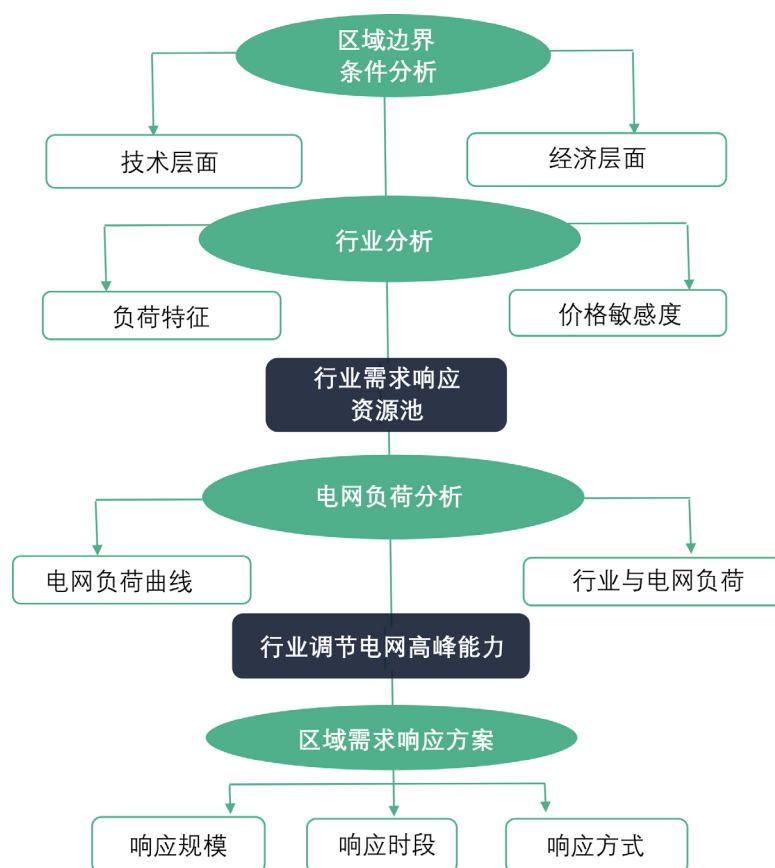


图 3-6 中观层面需求响应资源潜力分析的过程

① 区域边界条件：

为保障电力系统的稳定性，行业不可能无限制削峰，因此，在技术层面必然符合电网最低负荷要求的行业最大可调节能力；同时，为保障经济社会稳定，激励或电价波动有一定的阈值，因此，在经济层面必然存在受价格和激励条件约束的行业最大可调节能力。

技术层面：

$$\max \Delta P_{fie,gird} \ll P_{grid} - P_{grid,min} \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-2)}$$

式中： $\max \Delta P_{fie,gird}$ 为受电网约束某时段区域行业最大可调节能力总量，kW；

P_{gird} 为区域某时段电网负荷，kW；

$P_{gird,min}$ 为区域某时段电网运行最小负荷，kW。

经济层面：

$$\max \Delta P_{fie,price} \ll ED_{max}^p * \max \Delta P_{fie,gird} \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-3)}$$

式中： $\max \Delta P_{fie,price}$ 为区域某时段受价格或激励约束的区域行业最大可调节总量，kW；

ED_{max}^p 在区域电价浮动最大限制和最大激励下的某时段最大响应率。

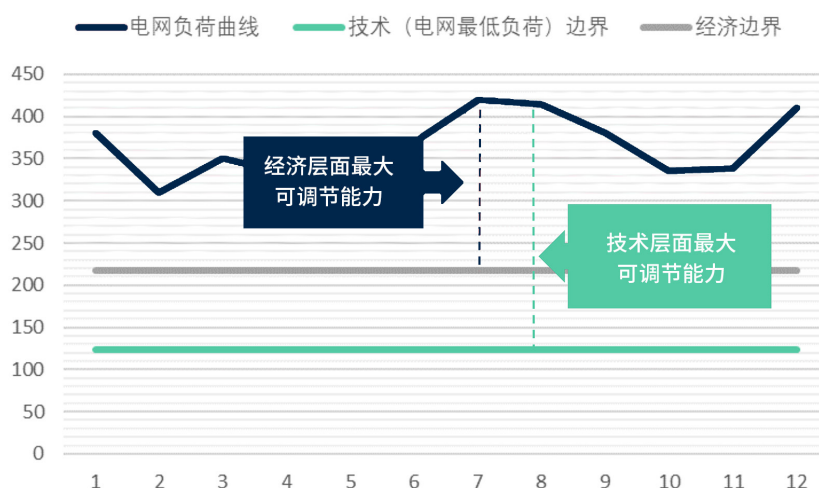


图 3-7 区域电网边界条件示意

②行业特性分析：

一是根据行业负荷特性，分析行业最大可调节能力；二是分析行业在激励信号下的参与度。

$$\Delta P_{fie,T/n} = \max \Delta P_{fie,n} * \mu_n = (P_{max,n} - P_{min,n}) * \mu_n \cdots \text{(式 3-4)}$$

式中： $\Delta P_{fie,T/n}$ 为区域 n 行业负荷的可调节负荷，kW；

$\max \Delta P_{fie,n}$ 为区域 n 行业最大可调节能力，kW；

$P_{max,n}$ 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；

μ_n 为行业参与度，%。

式中行业最大年负荷和最低年负荷之差 $\max \Delta P_{fie,n} = (P_{max,n} - P_{min,n})$ 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。

i. 行业最大可调节能力

a) 工业领域

$$P_{max,ind/n} = \frac{E_{ind,n}}{N_h * S_{use,ind/n} * (1 - S_{r,ind/n})} \dots\dots\dots (式 3-5)$$

$$P_{min,ind/n} = P_{max,ind} * S_{min,n} \dots\dots\dots (式 3-6)$$

式中： $P_{max,ind/n}$ 为工业领域 n 行业的最大负荷，kW；

$P_{min,ind/n}$ 工业领域 n 行业的最小负荷，kW；

$E_{ind,n}$ 为工业领域 n 行业的年用电量，kWh；

N_h 为年小时数，假设生产设备连续运行，取 8760 小时；

$S_{usd,ind/n}$ 为工业 n 行业的负荷率，为行业运行负荷占最大负荷比，%；

$S_{r,ind/n}$ 为工业 n 行业年检修时间占行业总运行天数的比重，%；

$S_{min,ind/n}$ 为工业 n 行业最低负荷占行业最大负荷的比重，%。

式中的行业最大负荷比 $S_{usd,ind/n}$ 、最小负荷比 $S_{min,ind/n}$ 设备检修时间可通过行业统计分析得到。如果缺乏统计分析，可参考行业经验值。

表 3-4 工业负荷率的取值参考

行业	$S_{usd,ind/n}$	$S_{min,ind/n}$	$S_{r,ind/n}$
钢铁	95%	65%	10%
电解铝	100%	95%	2%
电解铜	100%	75%	5%
电解锌	100%	75%	5%
氯碱	95%	50%	10%
电石	90%	50%	10%
水泥	90%	50%	10%
造纸	90%	70%	10%

b) 建筑领域

$$P_{max,bui/n} = \frac{E_{bui,n}}{N_{FLH,h}} \dots\dots\dots \text{(式 3-7)}$$

$$P_{min,bui/n} = P_{max,bui/n} * S_{min,bui/n} \dots\dots\dots \text{(式 3-8)}$$

式中： $P_{max,bui/n}$ 为建筑领域 n 行业的最大负荷，kW；
 $P_{min,bui/n}$ 为建筑领域 n 行业的最小负荷，kW；
 $E_{bui/n}$ 为建筑领域 n 行业的年用电量，kWh；
 $N_{FLH,h}$ 为建筑领域 n 行业设备的年满负荷运行小时数，h；
 $S_{min,bui/n}$ 为建筑 n 行业最低负荷占行业最大负荷的比重，%。
 因建筑领域包括公共、商业、居民建筑等，其用电设备多为间歇运行方式，因此，年运行小时数存在差异。以下是典型设备的运行小时数参考值。

表 3-5 建筑领域设备运行小时数的取值参考

类型	$N_{FLH,h}$	$S_{min,bui/n}$
公共建筑		
空调	991	60%
照明	500	90%
通风	4380	90%
商业建筑		
空调	991	0%
通风	4380	100%
热水加热	250	100%
食品零售冷却	5840	100%
冷藏室	5000	100%
酒店餐馆制冷	5000	80%
供水	4380	100%
民用建筑		
空调	991	0%
热水器	365	0%
电采暖	3600	90%
洗衣机	292	0

c) 交通领域

$$P_{max,tra/n} = \frac{E_{tra,n}}{N_{CDZ,n}} \dots\dots\dots (式 3-9)$$

$$P_{min,tra/n} = P_{max,tra/n} * S_{min,tra/n} \dots\dots\dots (式 3-10)$$

式中： $P_{max,tra/n}$ 为交通领域 n 种充电设施的最大负荷，kW；

$P_{min,tra/n}$ 为交通领域 n 种充电设施的最小负荷，kW；

$E_{tra,n}$ 为交通领域 n 种充电设施的年用电量，kWh；

$N_{CDZ,h}$ 为 n 种充电设施的运行年小时数，h；

$S_{min,tra/n}$ 为 n 种充电设施最低运行负荷占行业最大负荷的比重，%。

表 3-6 交通领域充电运行小时数的取值参考

行业	$N_{CDZ,h}$	$S_{min,tra/n}$
电动车		
快充	1000	0%
慢充	2000	0%
港口岸电		
充电设备	500-2000	0

ii. 行业参与度 μ_n

影响行业参与度的因素众多，其中最重要的是行业负荷的价格敏感度。价格敏感度的度量一般用价格弹性系数法。但由于国内浮动电价体系尚未建立，难以定量描述价格变动与用户负荷变动之间的关系。因此，只能采用经验值，主观判断用户在价格或激励信号下的响应大小。

根据四象限分析。依据单个用户可调节能力与价格敏感度的大小，将区域行业分为四个类型，参考典型地区的实践案例，给予 μ_n 不同的赋值。

如下表所示。

④地区需求响应资源总量

从中观层面分析，地区需求响应总量等于工业、建筑和交通领域所有行业运行层面的需求响应资源量之和。

$$\Delta P_{m, fie} = \sum_{n=1}^m \Delta P_{fie, rea} / n \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-12)}$$

3.2.3 微观层面

用户 j 的需求响应参与方式，包括直接削减负荷和转移高峰负荷两种方式。

①直接削减方式（节约电力和电量）

日内可调节负荷：

$$\Delta P_{j, dir} = (P_{j, max} - P_{j, min}) \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-13)}$$

设备可调节负荷：

$$\Delta P_{j, dir} = \Delta P_{j/ equ} = \sum_{i=1}^n k_i * L_i * P_i \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-14)}$$

式中： $\Delta P_{j, dir}$ 为用户 j 日直接可调节负荷 ,kW；

$P_{j, max}$ 为用户 j 的最高负荷 ,kW；

$P_{j, min}$ 为用户 j 的保留负荷 ,kW；

$\Delta P_{j/ equ}$ 为用户 j 所有设备的直接可调节负荷，kW；

K_i 为第 i 种用电设备使用概率；

L_i 为第 i 种用电设备可直接调节的负荷比重，%；

P_i 为第 i 种用电设备额定（运行）功率 ,kW。

②转移负荷方式（节约高峰电力但增加区域总的电能消费）

该方式可节约电网高峰电力，但增加电网谷段的电能消费。用户需要配套蓄能设备，其可调节负荷能力由用户蓄能能力决定。

$$\Delta P_{j, ind} = \frac{\sum Q_{Ej}}{N_{max, h}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 3-15)}$$

式中： $\Delta P_{j, ind}$ 为用户 j 日可调节负荷 ,kW；

$\sum Q_{Ej}$ 为用户 j 的蓄冷（热）量，kWh；

$N_{max, h}$ 为区域电网高峰时段及持续时间。

表 3-9 浙江省峰谷时段表

序号	类型	时段	时长 (h)
1	尖峰	19:00-21:00	2
2	高峰	8:00-11:00, 13:00-19:00	10
合计			12
3	低谷	11:00-13:00 22:00- 次日 8:00	12

从微观层面分析，地区需求响应资源总量等于地区所有用户直接调节和转移负荷能力之和。即：

$$\Delta P_{m,j} = \sum_{j=1}^m (\Delta P_{j,dir} + \Delta P_{j,ind}) \cdots \cdots \cdots \quad (\text{式 3-16})$$

虽然目前国内外均涌现出需求响应试点及实践，但由于需求响应资源较为分散，影响因素众多，其资源的可开发量难以度量，因此，国内外需求响应潜力分析大多采用定性分析和定量分析相结合的方式，其定量分析的取值大多来自于经验值。

但无论如何定义需求响应潜力的大小，需求响应目标都是明确的，即为区域电力平衡服务。因此，如何以最为经济的方式，开发更多的需求响应资源，平滑负荷曲线，是需求响应潜力分析的重要内容。

由于不同的用户会对激励措施做出不同的反应，因此，用户识别非常重要。

按照上文的四象限分析，地区开发需求响应资源时，重要的是区别并寻找四类资源，特别是 A 类资源，即单个用户可调节能力大、价格敏感度高的资源类型，此类资源具有规模开发的基本条件，且开发难度相对较小，拥有较高的性价比。

如果市场发展较为成熟，负荷集成商越来越多的参与需求响应并发挥组织中介的作用。B 类资源，即单个用户可调节能力小，但价格敏感度高的资源类型，也将是理想的开发对象。

当电力系统出现较为严重的供应缺口时，可以调动 C 类资源，即单个用户可调节能力大、但价格敏感度低的资源类型，但这意味着更高的经济成本。

在紧急状态下，D 类资源即单个用户可调节能力小、价格敏感度低的资源类型也可以参与需求响应，但 D 类用户的参与不仅会有经济成本的付出，也将伴随着一定的社会成本。

从这个意义上讲，地区在需求响应资源开发时，可以根据资源开发难度和开发规模，将其分为四类资源。当然，在实践中，用户的可调节能力、价格敏感度受到多种因素影响，并不是一成不变的。

在实际运行层面，可根据电网“阻塞”情况、用户负荷与地区电网高峰负荷的相关性、用户是否具有实时响应条件等，制定分批次或分时段的响应策略。

4 湖州市需求侧资源开发现状

长江三角洲（以下简称长三角）地区是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一，在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位。2018年，习近平总书记强调，支持长江三角洲区域一体化发展并上升为国家战略，要推动长三角更高质量一体化发展中进一步发挥龙头带动作用，把长三角一体化发展的文章做好，使之成为我国发展强劲活跃的增长极。随着中国经济发展和产业结构的调整，浙江电网发展面临深刻变化和转型需求。在电源侧，浙江发电类型多达13种，外来电比例达到35.7%，同时新能源发展迅速。在电网侧，安全红线不断收紧，设备和运行冗余度大。在负荷侧，用户负荷资源处于沉睡状态，交互机制能力尚未建立。而在储能侧，设施配置少，难利用，无政策。为此，国网浙江电力创造性地提出了，建设能源互联网形态下的多元融合高弹性电网，大幅提高全社会综合能效水平，推动全社会绿色低碳发展，并将其作为打造“努力成为国家电网建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业的重要窗口”的主阵地，作为今后一段时间国网浙江电力工作的一条主线。¹ 湖州市作为浙江省下辖地级市，地处长三角中心区域，是连接长三角南北两翼和东中部地区的节点城市。湖州市是“两山”理念的发源地，是全国首个地级市生态文明先行示范区和全省第一批省级生态市，同时也是建立多元融合高弹性电网的主阵地。本课题选择湖州为案例，开展需求侧资源潜力分析，是因为湖州市电力消费具有以下突出的特点。

一是全市电气化程度高，大幅超过全国平均水平。2018年，湖州市电力占终端能源

消费比重在 40% 左右，全市电气化率比全国平均水平高出十几个百分点，甚至超过了不少发达国家。湖州市的高电气化率，代表国内不少城市电气化发展的方向。

二是电力对外依存度高，电力供应日趋紧张。湖州市的电力消费中 80% 来自市外，2018 年全市用电量和最高负荷增长均在 10% 以上。随着用电量和用电负荷的提升，湖州市对外来电的依赖性更高，全市电力保供压力逐年增加。

作为“生态 + 电力”概念的首倡地，湖州市将电力作为促进城市能源系统清洁化的重要手段，并已经做出了突出成绩¹⁵。未来湖州市还将深入推进“全域电气化”，工业、建筑、交通等领域的电能替代工作力度还将持续加大。因此，城市电力供需平衡还将面临更大的压力。

2018 年，湖州市全市最高负荷比上年增长高达 13%，最高负荷增长超过用电量增长 0.5 个百分点，“缺电力”成为比“缺电量”更加突出的问题。在这种情况下，2019 年，湖州市响应全省要求，开展了需求响应的首次尝试，积极探索在高电气化率下解决“缺电力”问题的新方式。

综上所述，随着电能替代工作的推进，湖州市电力供应紧张问题将更加突出，多元高弹性电网建设对需求响应的需求也更为迫切。加上湖州市的高电气化率特征，以及在需求响应方面的先行经验，选择湖州市做案例分析，具有较高的典型意义和参考价值。

4.1 湖州市经济社会发展现状

4.1.1 湖州市经济社会发展概况

“十三五”以来，湖州市经济呈现高质量快速发展态势。2018 年，湖州市实现地区生产总值（GDP）2719 亿元，比上年增长 8.1%（可比价），比 2015 年提高 26%；全市年常住人口超过 302 万人，城镇化率达到 63.5%；按户籍人口计算的人均 GDP 为 101990 元；GDP 增速、人均 GDP 以及城镇化率水平等指标均明显高于全国平均水平。

15. 2019 年 10 月，国家发展和改革委员会经济运行调节局以专报形式，要求各地总结推广湖州“生态 + 电力”示范城市建设经验做法。

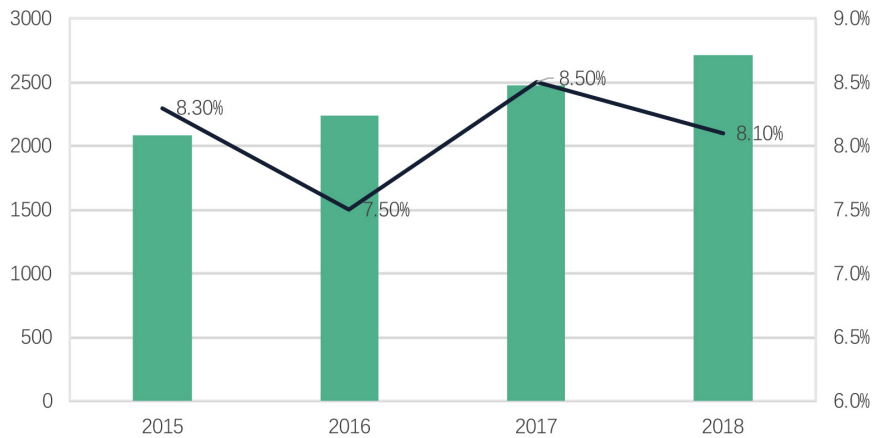


图 4-1 “十三五”以来湖州地区生产总值及年增长率

注：来自 2016-2018 年《湖州市国民经济和社会发展统计公报》

全市居民收入为 44487 元，其中城镇居民人均可支配收入达到 54393 元，农村居民人均可支配收入达到 31767 元，城市居民收入水平是农村收入水平的 1.7 倍，城乡差距较小，在浙江乃至全国领先。

作为经济发达地区，湖州市汽车、家电等耐用品的普及率较高。2018 年，全市私人汽车拥有量达到 73.8 万辆，城镇居民每百户汽车拥有量达到 58 辆；洗衣机、电冰箱、电视机、空调、热水器等家用电器实现了全面普及，其中，城镇居民每户拥有的电视机和空调数量均超过两台。

表 4-1 2018 年湖州市城镇居民每百户家庭的主要消费品拥有量

类型	数量	品种	数量
家用汽车	58	电视机	224
洗衣机	105	计算机	98
电冰箱	109	空调	241
微波炉	82	热水器	118

注：来自《2019 湖州统计年鉴》

分产业看，2018 年，全市第一产业增加值 127.7 亿元；第二产业增加值 1273.6 亿元，其中工业增加值 1152.5 亿元；第三产业增加值 1317.7 亿元。三次产业结构比例为 4.7:46.8:48.5。从产业结构看，第二产业和第三产业优势明显。

表 4-2 2018 年湖州市三产结构

	2018年	±%
地区生产总值（GDP）	2719	8.1
第一产业增加值	127.7	2.8
第二产业增加值	1273.6	8.2
# 工业	1152.5	9.2
第三产业增加值	1317.7	8.5
交通运输仓储和邮政业	116.5	4.7
批发和零售业	325.7	6.7
住宿和餐饮业	91.2	4.2
金融业	185.2	8.5
房地产业	159.7	5.9
其他服务业	430.7	13.4

注：来自《2018 年湖州市国民经济和社会发展统计公报》

（1）第一产业

湖州市农业和渔业较为发达，农业和渔业分别占到一产的 1/2、1/3 左右。湖州市主要的农产品除传统的粮食作物、经济作物外，茶叶、花卉等产量也较高。湖州是全国有名的茶乡，安吉白茶属全国知名品牌。

（2）第二产业

2018 年，湖州市工业增加值占到全市 GDP 的 40% 以上，工业在全市经济社会发展中占据重要地位。

湖州市工业结构以重工业为主。2018 年，全市重工业产值占到全部工业产值的 56%，重工业产值增速达到 10%，高于工业产值增速。

2018 年，全市产值超百亿的工业行业共有 10 个，分属装备制造业和工业原材料两大领域。其中，装备制造业以电气设备制造、通用设备制造为主，2018 年电气设备制造业产值超过 500 亿元，位列全国工业行业第二；原材料行业以石化和化工¹⁶、纺织、建材、电力和钢铁行业为主。其中，石化和化工行业是第一大行业，产值达到 668.3 亿元，纺织、建材产业位列第三和第四，产值均超过 400 亿元。总体来看，湖州市“三高”行业占比较大。

16. 包括化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业、橡胶和塑料制品业。

表 4-3 湖州市产值超百亿的工业行业

行业	产值（亿元）	排名
石化和化工	668.3	1
电气设备制造	535.9	2
纺织业	423.9	3
建材业	411.3	4
电力	337.6	5
通用设备制造	297.9	6
家具制造	276.1	7
钢铁	194.3	8
木材加工	186.9	9
金属制品	169.7	10

注：来自《2019 湖州统计年鉴》

（3）第三产业

得益于优越的地理位置，湖州市经贸发达，近年来，旅游、交通、服务业等行业发展较快。2018 年，湖州市接收国内外旅游超过 11840 万人次，旅游收入达到 1357.09 亿元，比上年增长 23%，比 2015 年增长了近一倍。旅游业的迅猛发展，带动了全市交通、社会零售以及相关服务业的发展。

2018 年，湖州市社会消费品零售总额比上年增长 10.0%，其中，批发零售业增长 9.3%，住宿餐饮业增长 14.9%；全市完成货运量 18783 万吨，增长 12.1%，其中公路 11504 万吨，增长 17.2%。

4.1.2 湖州市能源及电力消费情况

近年来，湖州市能源消费呈现以下特征：

一是能源对外依存度高。湖州市是典型的能源外向依附型城市。本市的原煤、石油制品、电力等主要能源均来自外购，仅有少量的光伏、生物质等可再生能源自产。

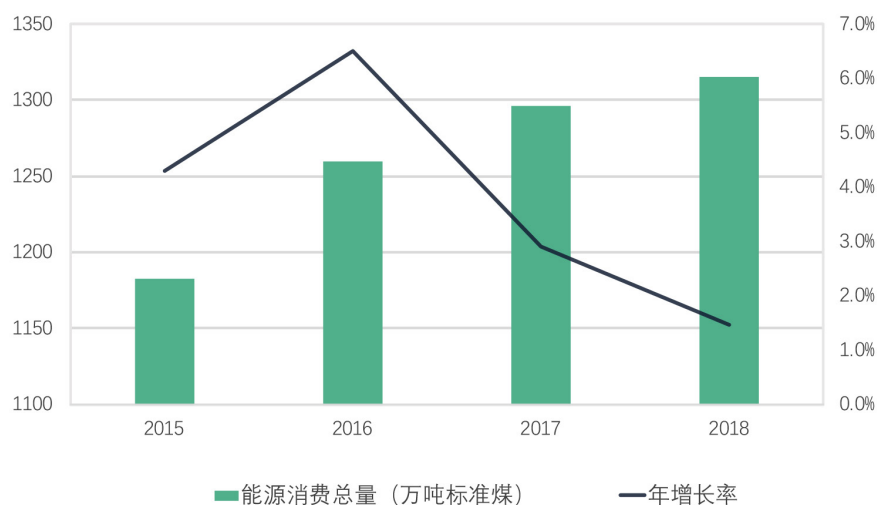


图 4-2 2013-2018 年湖州市能源消费增长情况

注：2015-2017 年数据来自《2017 湖州市能源发展报告》、2018 年数据系笔者核算

二是清洁能源消费比重大。2018 年，湖州市能源消费总量为 1315 万吨标准煤¹⁷。其中，煤炭、石油制品、天然气、一次电力、外来电及其它能源占比分别为 51%、16%、7%、3%、23%¹⁸。从能源消费结构看，湖州市能源清洁化水平较高，天然气和电力等清洁能源比重占到全市一次能源消费比重的 34% 左右，高于全国平均水平。

三是能源利用效率较高。“十三五”以来，湖州市扎实推进能源强度和总量“双控”工作，能源消费增速明显放缓，能源利用效率逐年提升。2018 年，湖州市全市能源消费总量仅比去年增长 1.5%，万元 GDP 能耗下降为 0.50 吨标准煤，能源利用效率高于全国平均水平。

表 4-4 “十三五”期间湖州市万元 GDP 下降率

年份	单位 GDP 能耗 (吨标煤 / 万元)	单位 GDP 能耗下降率 (%)
2016	0.55	0.9
2017	0.52	5.2
2018	0.50	4.7

注：来自《2019 湖州统计年鉴》

17. 湖州市尚未公开 2018 年全市能源消费总量数据。该数据为笔者根据湖州市发布的 2018 年 GDP 以及单位 GDP 能耗进行的测算，仅供参考。

18. 因湖州市 2018 年油品、天然气等消费数据不可得，因此，本报告主要引用《2017 年湖州市能源发展报告》中的数据。

作为最主要的能源消费类型，湖州市电力、煤炭和成品油消费均具有鲜明的地区特色。

(1) 电力消费

全市电气化程度极高。近年来，湖州市深入建设“生态+电力”示范城市，提高以电力为主的清洁能源消费。2018年湖州市全社会用电量274.8亿kWh，同比增长12.5%。全市电气化率接近40%，比“十三五”期初增长10个百分点，远高于同期全国平均水平，甚至超过部分发达国家。

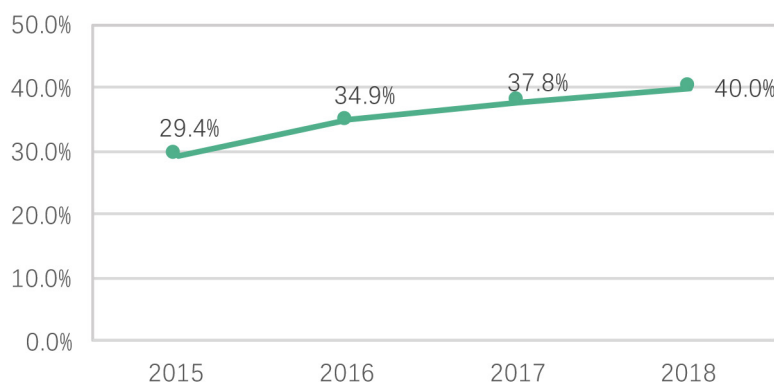


图 4-3 2015-2018 年湖州市电气化率

注：2015-2017 年数据来自《2017 年湖州市能源发展报告》，2018 年数据系课题组测算

电力保供压力大。2018 年，湖州市全年最高供电负荷达 466 万 kW（7 月 26 日），已超过“十三五”规划值。2018 年，全市最高负荷比上年增长 13%，负荷增长首次高于用电量增长约 0.5 个百分点。其中，7、8、12 月份的最高负荷均超过 450 万 kW，1、5、6、9 月份最高负荷同比增长 30%。随着用电量和用电负荷的提升，湖州市对外来电的依赖性更高，2018 年全市净调入电量 227.2 亿 kWh，占电力总消费量的 82.7%。无论从电力还是电量，湖州市保供压力均逐年增大。

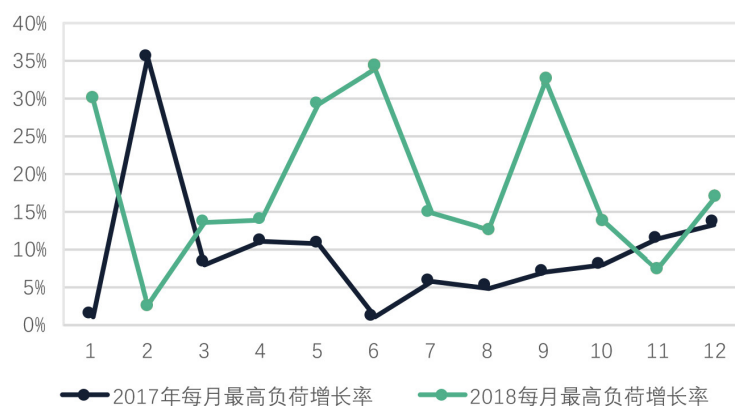


图 4-4 2017-2018 年湖州市每月最高负荷的变化情况

注：来自国网湖州供电公司

工业用电占据绝对优势。从 2018 全市用电量消费结构看，第一产业仅为 1%，第三产业和居民用电分别占 11% 和 12% 左右，第二产业用电占 76%，在全市电力消费中占据绝对主力；从增速看，居民生活用电增速波动较大，三产用电呈高增长，二产用电增长较为平稳。

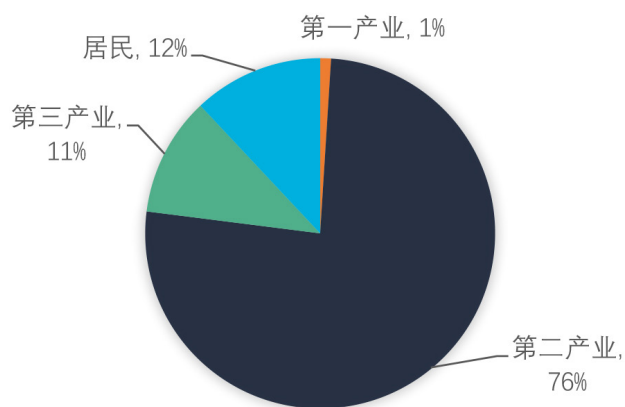


图 4-5 2018 年湖州市电力消费结构

注：来自国网湖州供电公司

用电集中在高耗能行业。2018 年，湖州市规模以上行业中用电量超过十亿 kWh 的行业共有五个，分别为纺织、装备制造业、建材、石化和化工、电力行业。除装备制造业外，其他均为传统的高耗能行业。2018 年，上述五大行业用电量占到湖州市全社会用电量的一半以上，其中，纺织业年用电量达到 50.5 亿 kWh，占到全市用电量的 18% 以上，是名副其实的用电第一大户。

表 4-5 2018 年湖州市重点行业用电量

排序	行业	用电量 (亿 kWh)	占全社会用电量比重
1	纺织业	50.5	18.4%
2	装备制造业	41.0	14.9%
其中	金属制品	14	5.1%
	电气设备制造	15.1	5.5%
3	建材	28.7	10.4%
4	石化和化工	26.6	9.7%
5	电力	14.2	5.2%
合计		161	58.6%

注：来自湖州市供电公司

(2) 成品油消费

根据《2017 年湖州市能源发展报告》，2017 年，湖州成品油消费 146.7 万吨，同比增长 2.75%。其中，汽油 74.66 万吨，同比增长 7.5%，柴油 57.74 万吨，同比下降 2.86%。湖州市的汽油主要用于交通运输和生活消费，柴油主要用于交通运输和第二产业。

由于历年《湖州市统计年鉴》，均未曾统计本市全口径的成品油消费情况，仅给出规模以上工业的成品油消耗。根据《2019 湖州统计年鉴》，全市规模以上工业柴油消费为 3.67 万吨，汽油消费为 0.8 万吨，该数据与《2017 年湖州市能源发展报告》中数据差距较大。

本报告假设《2019 湖州统计年鉴》中的柴油消费全部用于工业生产。根据《2019 湖州统计年鉴》，2018 年建材行业的柴油消费为 1.8 万吨，占到规模以上工业柴油消费的一半左右。因此，建材行业是全市柴油消费第一大户。

表 4-6 2018 年湖州规模以上工业柴油消费

类型	消费总量 (万吨)	占比
规模以上工业成品油消费	3.67	100%
其中，建材行业	1.80	49%

注：来自《2019 湖州统计年鉴》

(3) 煤炭消费

全市“减煤控煤”空间仍较大。根据《2019 湖州统计年鉴》，2018 年湖州市原煤消费量为 946.2 万吨，折算成标准量为 675.9 万吨标准煤，占全市煤炭消费的 51.4%。自“十三五”以来，湖州市大力开展全域电气化工作，电能对煤炭的替代渐成规模。从数据看，全市煤炭消费增速从“十三五”期初的 15% 下降到 6.5%，用能清洁化水平明显提高。但是，目前全市煤炭消费仍处在较高的水平，煤炭占全市能源消费的比重仍在 50% 以上。2018 年，煤炭消费增速高出全市能源消费增速 5 个百分点，表明湖州市在“减煤控煤”方面仍有较大的提升空间。

全市用煤集中在电力行业。从全市煤炭流向看，70% 以上的煤炭用于发电、供热等投入，30% 左右用于工业终端消费。2018 年，全市发电用煤消耗量在 695.1 万吨，占比超过 73%，其中，浙能长兴电厂、华能长兴电厂用煤均在 200 万吨以上。

煤炭终端消费以建材行业为主。建材行业是全市除电力之外的第二大煤炭消费户。2018 年，建材行业用煤超过 180 万吨，占全市煤炭消费的 19%；其次是石化和化工行业，煤炭消费量均在 50 万吨以上，占全市煤炭消费的 5%；纺织业煤炭消费量约为 10 万吨，占比约为 1%。

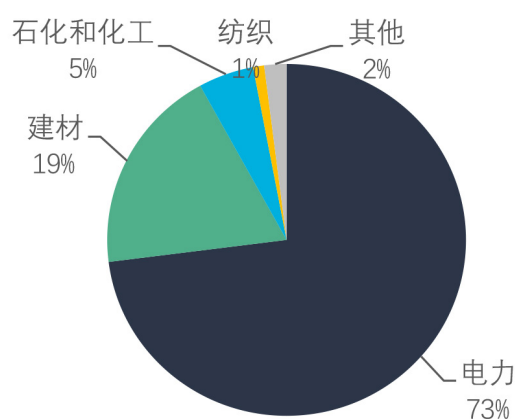


图 4-6 2018 年湖州市煤炭消费结构

注：来自《2019 湖州统计年鉴》

4.2 湖州市需求侧资源开发现状

湖州市电能替代工作起步较早，在全国大规模组织电能替代工作之前，湖州就已经将电能替代燃煤、燃油作为推动能源结构升级重要手段。“十三五”以来，在城市生态文明建设的推动下，湖州市电能替代工作力度加大，城市“生态+电力”示范建设成效显著。“十三五”前三年，湖州市的电气化率提高 10 个百分点，电力占终端能源占比接近 40%。相比而言，湖州市需求响应工作起步较晚。“十三五”之前，全市削峰工作以有序用电措施为主。2019 年，浙江在全省范围内启动需求响应。同年，湖州市也组织开展了本市的需求响应工作。

4.2.1 湖州市电能替代资源开发现状

湖州市的电能替代主要集中在工业、建筑、交通等领域。此外，近年来，湖州市也相继开展了“全电物流”、“全电景区”、岸电推广等极富地方特色的电能替代工作。根据湖州供电公司统计，2013-2019 年，湖州市共推动电能替代项目 1031 个，累计替代电量 21.34 亿 kWh，相当于减少煤炭消费 212.76 万吨¹⁹。

从重点领域看：

(1) 工业领域

推动重点用能行业的燃煤（油）锅炉和窑炉淘汰和替代工作。

一是电锅炉替代燃煤锅炉。针对纺织、服装、橡胶、木材加工等重点行业的用热（气）环节，推动电锅炉替代燃煤锅炉。其中，印染行业燃煤锅炉改造已经成为行业样板。

二是电窑炉替代传统窑炉。重点在钢铁、铸造、冶炼、玻璃陶瓷烧制、竹木制品加工耐火材料等行业推广应用大容量中频感应电炉、电弧炉、电窑炉、电加热导热油炉等技术。

(2) 建筑领域

一是示范推进“全电景区”发展。在长兴仙山湖度假区完成电气化改造，成为 2018 年浙江首个完成全电改造的景区，改造覆盖景区基础设施用电、游艇岸电、充换电设施等多个领域²；完成莫干山景区采暖设备的空气能热泵电能替代工作，推广全电民宿建设，已统计的民宿中使用以电为核心的清洁能源比例总体达到 70%，新增民宿采用清洁能源的比例提升至 97.5%。

19. 2020 年 1 月，湖州市供电公司领导在“2019-2020 中国节能服务产业年度峰会”上在讲话。

二推进居民家庭电采暖建设。目前，湖州市已经建成电采暖样板房 7 套、推广电采暖住宅 668 套。此外，湖州市政府出台相关配套政策支持居民电采暖试点工作。

三是推动商业餐饮“全电厨房”改造。对市内大型酒店、连锁酒店、商业综合体、火锅店、沿街商铺等进行用能改造，将其厨炊设备替换改造为全电热灶设备，打造商业餐饮的“全电厨房”。

(3) 交通领域

一是示范推广“全电物流”。推进“全电物流”项目，建成全国首个实现全电运输、全电仓储、全电装卸、全电泊船的“全电物流”电能替代项目。

二是发展港口岸电。出台湖州市首个“十三五”内河港口岸电专项规划，开展了绿色电力设施示范建设，建成城东水上服务区等 5 个水上服务区岸电工程，实现太湖沿岸（浙江境内）公共水上服务区岸电设施全覆盖。

三是推广电动汽车。目前，湖州市中心城区已经实现纯电动公交全覆盖，湖州成为中国首个电动公交车全覆盖的地级市。截至 2019 年底，全市共推广新能源汽车 12190 辆，建成公共充电站 60 座，分散充电桩 1672 个，电动汽车在私人领域的推广初见成效²⁰。

(4) 农业领域

示范推广农场“全电改造”。湖州推动完成以“义远有机农场”为代表的国家“第一、第二、第三”产业融合发展项目的全电改造，该农场占地面积 1600 亩，有 64 个全电大棚、3 项全电农产品加工，包含农业种植、生产加工、旅游服务等多种业态，实现全过程零排放。

4.2.2 湖州市需求响应资源开发现状

根据 2019 年浙江全省需求响应工作安排，湖州市于同年开展了需求响应工作²¹。2019 年，湖州市需求响应指标为 18 万 kW，占全省需求响应规模的 6%。从实施效果看，全市形成了最大用电负荷 3.8% 以上的需求侧机动调峰能力，顺利完成浙江省安排的需求响应任务。

(1) 用户参与情况

2019 年，湖州市共有 82 家企业申请参与需求响应工作，协议响应能力为 30 万

20. 浙江省发改委，《湖州市大力推进新能源汽车产业发展》，2019 年 12 月 11 日。

21. 浙江省发改委、省能源局《关于开展 2019 年度浙江省电力需求响应工作的通知》，2019 年 7 月。

kW，超过全市年度需求响应计划的 167%，形成了规模较大的需求响应资源池。82 家协议用户以建材行业为主，金属制品、机械制造、化工、电子设备制造、有色金属等行业均有一定数量的企业参与。用户协议响应能力在 800-45000kW 之间不等，平均规模为 3660kW。

从用户响应情况看，建材行业有 37 家企业签署响应协议，协议规模合计达到 11.5 万 kW，占到全市用户协议规模的 38%；其次是装备制造业（包括金属制品、机械制造和电子设备制造三大子行业），2019 年共有 20 家企业签署响应协议，协议规模在 8.3 万 kW，占到全市规模的 28%；钢铁行业位列第三，2019 年，全市仅有一家钢铁企业申请需求响应工作，但单个用户体量大，达到 4.5 万 kW，占到全市规模的 15%；化工、有色金属行业的协议规模分别为 1.7 万 kW、1.2 万 kW，两者合计占到全市响应协议的 10%。其他如医药、造纸、木材加工、纺织等行业均有 2 到 5 家企业参与，但用户协议规模总体较小。

表 4-7 2019 年湖州市需求响应协议用户情况表

排序	行业	户数	协议规模 (kW)	户均规模 (kW)
1	建材	37	115060	3110
2	装备制造等	18	83150	4158
	金属制品	7	42500	6071
	机械制造	7	23650	3379
	电子设备制造	6	11000	1833
3	钢铁	1	45000	45000
4	化工	4	17000	4250
5	有色金属	5	12000	2400
6	医药	4	8000	2000
7	造纸	2	8000	4000
8	木材加工	5	7500	1500
9	纺织	3	6400	2133
10	配售电公司	1	4000	4000
合计		82	300110	3660

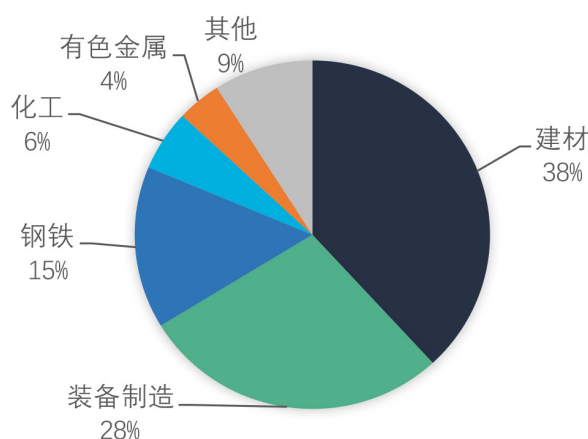


图 4-7 2019 年湖州市需求响应协议用户的规模占比

（2）组织实施情况

湖州市实施削峰需求响应的时间为白天用电高峰时段（早高峰：10 点至 11 点，午高峰：13 点至 17 点）。

湖州市需求响应工作由湖州市供电公司负责组织开展。

基本流程为供电公司与用户签订响应协议，明确需求响应方式，在确定需求响应区域、指标值、响应时段等后，通过负荷管理系统于响应前一天中午 12 点前，向邀约范围内的所有协议用户发出响应邀请；收到用户反馈后，供电公司统计本次计划参与负荷总量，若计划参与总量大于或者等于需求响应总指标，则单个用户的需求响应指标按照协议响应能力进行比例分配；若达不到需求响应指标，则剩余缺口考虑通过有序用电等方式平衡。

（3）激励措施

浙江省制定了本省需求响应工作的激励措施，以用户的补贴为主。2019 年，湖州市遵照执行。根据浙江省政策，需求响应用户补贴分为削峰和填谷两类。其中：

削峰需求响应：实时需求响应补贴单价为 4.0 元 /kWh；约定需求响应，补贴单价为 2.0 元 / 千瓦时。

填谷需求响应：补贴单价为 1.2 元 /kWh。

浙江省 2019 年度电力需求响应试点补贴资金，主要来源于 2018 年跨区域省间富余可再生能源电力现货交易购电差价盈余部分。

5 湖州市需求侧资源潜力 计算分析

以下将分别从宏观和中观层面计算湖州市电能替代和需求响应资源潜力，并将两者的计算结果进行核对，以验证方法的有效性。

5.1 湖州市的电能替代资源潜力

5.1.1 宏观层面

假设未来湖州市电气化率提高到 50%，即相对 2018 年水平提高 10%，按照现有城市能源消费结构和全社会用电规模，则湖州市电能替代潜力为 28 亿 kWh。

计算公式为：

$$E_m = \Delta S_f * E_{2018}$$

式中： ΔS_f 为城市电气化提高率，10%； E_{2018} 为 2018 年城市用电量，274.8 亿 kWh。

5.1.2 中观层面

推动工业、建筑和交通领域的电能替代工作，是湖州市实现“全域电气化”的重要途径。本报告将分别计算三大重点领域的电能替代潜力，以考察湖州全市电气化率提高 10% 的可行性。

①工业领域：

湖州市正在重点推动燃煤锅炉替代、工业窑炉专项治理行动。因此，燃煤锅炉和工

业窑炉存在较大的电能替代潜力。

电锅炉替代燃煤锅炉：2018 年，湖州市工业用煤为 280 万吨（该数据为实物量，折成标准量为 200 万吨标准煤），工业用煤大部分流向燃煤锅炉和窑炉。假设未来湖州市全面完成淘汰任务，基本完成电锅炉替代和高效燃煤锅炉改造计划。现有的 15% 的工业燃煤锅炉被电锅炉取代，则电锅炉替代潜力 $E_{i,coal}$ 为 19 亿 kWh，即通过电锅炉取代燃煤锅炉，年新增电力消费为 19 亿 kWh。

计算公式为：

$$E_{i,coal} = \frac{[C_{coal} * Y_{Coal} * 7000 \left(\frac{\text{千卡}}{\text{kgce}}\right)] * \gamma_{coal}}{Y_{boi} * 860 \text{ (千卡/kWh)}}$$

式中： C_{coal} 为 2018 年全市工业燃煤锅炉煤耗，200 万吨标准煤； Y_{coal} 、 Y_{boi} 分别为燃煤和电锅炉的平均热效率，分别取 75%、95%； γ_{coal} 为工业锅炉用煤被电力替代的比例，取 15%。

电窑炉替代燃油窑炉：按照《2019 湖州统计年鉴》，湖州市 2018 年工业用油消耗量在 3.67 万吨（实物量）。假设“十四五”期间，湖州市在建材等重点行业全面普及电炉、电弧炉、电窑炉、电加热导热油炉等技术，则电窑炉替代燃油窑炉潜力 $E_{i,coal}$ 约为 1 亿 kWh，即通过电窑炉替代燃油窑炉，每年将新增 1 亿 kWh 的用电量。

计算公式为：

$$E_{i,oil} = \frac{[O_{oil} * Y_{oil} * 10000 \left(\frac{\text{千卡}}{\text{kgoe}}\right)] * \gamma_{oil}}{Y_{fur} * 860 \text{ (千卡/kWh)}}$$

式中： O_{oil} 为区域燃油窑炉的耗油量，3.67 万吨； Y_{oil} 、 Y_{fur} 分别为燃油窑炉和电窑炉的平均热效率，分别取 25% 和 95%； γ_{oil} 为工业窑炉替代率，假设为 100%。

工业领域电能替代潜力：综上，湖州市工业领域的电能替代潜力为 20 亿 kWh。其中，燃煤锅炉替代潜力为 19 亿 kWh，燃油窑炉替代潜力为 1 亿 kWh。

②建筑领域：

湖州市建筑领域的电能替代工作以新增电气化设备，如电采暖、家用电器等为主。

电采暖替代潜力：湖州市地处江浙，冬季居民采暖以空调等为主。目前，湖州市启动了居民电采暖工作。但由于经济性等原因，电采暖尚不具备大规模推广的条件。假设未来湖州市居民电采暖推广 5000 户（约占 2018 年湖州市城镇人口户数的 1%），则电采暖推广带来的新增电力消耗为：0.5 亿 kWh。

计算公式：

$$E_{b, \text{hea}} = A * d_n * \sum_{i=1}^n (R_i * \gamma_{i, \text{hea}})$$

式中： A 为 5000 套居民户的供暖面积，平均每户面积 100 平米，合计为 50 万 m^2 ； d_n 为供暖季天数，100 天； R_i 第 i 种电采暖设备每天单位面积耗电量， $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{d}$ ； $\gamma_{i, \text{hea}}$ 是第 i 种电采暖设备的推广率，%。假设电采暖方式主要以电加热装置为主，则电加热装置每天每平米的耗电量为 $1 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{d}$ 。

电器普及推广：湖州市居民和商业餐饮领域均有新电器的普及空间。

- **居民领域：**湖州市传统的家用电器普及率很高，2018 年，全市每百户居民电冰箱、电视机、空调、热水器的普及率均超过 100%。湖州市居民电气化的潜力主要来自于新风系统、洗碗机、除尘器等用电设备。假设未来居民用户推广 500 套新风系统（占城镇居民户数的 0.1%）、5 万台洗碗机和 5 万台除尘器（占城镇居民户数的 10%），则新增用电量为 0.55 亿 kWh ；
- **商业领域：**湖州市商业餐饮等行业电能替代潜力较大，全市仍有不少酒店、商业综合体、饭店等厨房采用瓶装液化石油气，有待于将其改造成为全电热灶设备。假设全市 500 户商业餐饮业，完成全电厨房改造，则新增电力消费 1.75 亿 kWh 。

计算公式：

$$E_{b, \text{equ}} = \sum (E_i * \Delta G_{\text{equ}, i})$$

式中： E_i 为 i 种电器的年耗电量，为 i 电器的平均功率乘以其年运行时间，如新风系统平均功率为 30kW，年运行时间为 2000 小时，则 E_i 等于 6 万 kWh ； $\Delta G_{\text{equ}, i}$ 为 i 种电器新推广的数量，台。

表 5-1 湖州市居民及商业餐饮业电能替代潜力

电器类型	推广数量	平均功率（kW）	每年运行时间（小时）	新增电量（亿 kWh）
新风系统	500 户	30	2000	0.3
洗碗机	5 万户	1	200	0.1
除尘器	5 万户	1.5	200	0.15
商业餐饮	500 户	100	3500	1.75
合计				2.3

注：新风系统、洗碗机、除尘器、全电厨房的平均功率和运行时间均来自经验值

建筑领域电能替代潜力：综上，湖州市建筑领域通过推广电采暖、家用电器等可新增用电需求 2.8 亿 kWh。其中，电采暖为 0.5 亿 kWh，商业和居民户新电器普及带来的用电需求为 2.3 亿 kWh。

③ 交通领域：

湖州市在电动汽车推广方面拥有得天独厚的优势，一是产业基础较好，形成了从零部件到整车制造的较为完整的产业链；二是电动汽车市场条件好，居民承价能力较高，政府在电动汽车购置、充电设施建设等方面给予一定补贴。

私人领域电动汽车推广：2018 年，湖州市城镇居民，每百户汽车拥有量在 58 辆（城镇居民户数超过 50 万户），假设每百户汽车拥有量提高到 63 辆，且新增汽车全部由电动汽车替代，则全市新增电动汽车 2.5 万辆，带来新增电力需求为 0.6 亿 kWh。

公共领域电动汽车推广：湖州市电动公交车已经实现全覆盖，在专用车、商用车等领域尚有一定的推广空间，假设推广 2000 辆专用车，带来新增电力需求为 0.44 亿 kWh。

计算公式：

$$E_{tra} = \sum_{i=1}^n EV_i * M_i * D_i * 365$$

其中：*i* 为不同为电动汽车，包括私人电动汽车、公共领域的电动汽车；*EV_i* 为 *i* 类型的电动车数量，私人电动汽车为 2.5 万辆、专车为 1000 辆；*M_i* 为 *i* 类型电动车的百公里耗电量，私人电动汽车为 20kWh/ 百公里，专车为 120kWh/ 百公里；*D_i* 为 *i* 类型电动

车每日的最大行驶里程，假设私人电动汽车为 30 公里，专车为 50 公里。

港口岸电推广：2019 年被誉为国内港口岸电推广的元年。湖州现有各类船舶 3000 余量，假设未来推广低压岸电 100 套，平均功率 30kW，运行时间在 2000 小时左右，则年新增电力消费 0.06 亿 kWh。

交通领域电能替代潜力：综上，湖州市通过推广电动车、发展港口岸电，每年可带来新增电力消费合计为 1.1 亿 kWh。

表 5-2 湖州市交通领域电能替代资源潜力

类型	推广数量（辆）	每辆每天油耗（kWh）	年新增电力需求（亿 kWh）
私人电动汽车	25000	6	0.60
专用电动车	2000	60	0.44
类型	推广数量	平均功率（kW）	年新增电力需求（亿 kWh）
港口岸电	100 套	30	0.06
合计			1.1

④三大领域电能替代潜力汇总

根据计算结果，湖州市三大领域的电能替代潜力之和为 23.9 亿 kWh。其中，工业领域可实现 20 亿 kWh 的电能替代量，是电能替代潜力最大的领域。

5.1.3 宏观和中观核算

根据宏观层面分析，湖州市电气化率提高 10%，城市年新增用电量为 28 亿 kWh。因此，除了工业、建筑和交通三大重点领域外，湖州市还需持续开展农业“再电气化”、全电景区建设等工作，形成至少 4.1 亿 kWh 的电能替代量，才能实现全市电气化率提高 10% 的发展目标。

表 5-3 湖州市宏观和中观层面的电能替代潜力核算

电能替代潜力 (亿 kWh)		情景条件
宏观	28	城市电气化率提高 10%
中观	工业	20 ①在完成淘汰和改造后，湖州市燃煤锅炉仍有较大的电能替代空间，假设全市现有的 15% 的燃煤锅炉替换成电锅炉 ②假设现有以重油为燃料的工业窑炉 100% 替换为电窑炉
	建筑	2.8 ①城镇居民电采暖普及率提高 1%，即全市新增电采暖 5000 户 ②城镇居民新风系统、洗碗机、除尘器的普及率各提高 0.1%、10%、10%，即全市新上新风系统 500 套、推广洗碗机、除尘器各 5 万台 ③商业餐饮业完成“全电厨房”改造 500 户
	交通	1.1 ①城镇居民每百户汽车拥有量提高 5 辆，且全部由电动汽车取代，即全市新增 2.5 万辆电动汽车 ②专用电动汽车推广 2000 辆 ③港口岸电推广 100 套
	其他	4.1 包括农业、旅游业等领域的电能替代

5.2 湖州市的需求响应资源潜力

5.2.1 宏观层面

2019，湖州市启动需求响应工作，完成了 18 万 kW 的响应指标，实际响应量占到 2018 年全市最大负荷的 3.9%。从用户协议规模看，2019 年全市共有 82 家企业申请参与需求响应工作，协议规模为 30 万 kW，占到 2018 年全市最高负荷的 6.4%。

按照湖州市 2019 年需求响应协议规模、负荷增长速度等进行预测，湖州有望形成占最大用电负荷 10% 以上的需求侧机动调峰能力。按照 2018 年全市最大用电负荷计算，全市可调节负荷 $\Delta P_{m,DR}$ 应为 47 万 kW。

计算公式：

$$\Delta P_{m,DR} = P_{m,max} * \mu_m$$

式中: $P_{m,max}$ 为区域年最大负荷，取 2018 年全市最大负荷为 466 万 kW; μ_m 为可调节负，

荷占最大负荷的比例，假设为 10%。

5.2.2 中观层面

工业、建筑和交通是湖州市实施需求响应的重点领域。重点领域需求响应潜力的计算分为两大步，一是根据行业负荷特性计算其最大可调节能力，通过价格敏感度分析，分析行业参与度，从而得到行业可调节负荷；二是在电网运行层面，分析行业负荷与电网高峰负荷的关系，从而得到行业可调节负荷参与电网削峰的实际能力。

(1) 行业可调节负荷

工业、建筑和交通领域可调节负荷分析包括行业最大可调节能力计算、行业参与度分析、行业可调节负荷计算三大过程。

①工业领域

i 工业行业最大可调节能力计算

2019 年湖州市工业用电量为 203 亿 kWh，占全市全社会用电量的 76%。工业电力消费大户包括纺织、装备制造、建材、石化和化工、电力行业等行业。由于电力属于供给侧，其负荷特性与其他工业用电行业相比，差别较大。因此，本文在计算工业行业可调节能力时，剔除了电力行业。

根据调研，得到工业各行业的用电量、负荷特性如下。剔除电力行业后，湖州工业行业用电量之和为 186.80 亿 kWh。

表 5-4 湖州重点工业行业用电量及负荷情况

序号	行业	用电量 (万 kWh)	$S_{use, ind/n}$ 最高负荷	$S_{min, ind/n}$ 最低负荷	$S_r, ind/n$ 检修时间
1	纺织	504723	85%	35%	10%
2	装备制造业	410273	85%	40%	10%
其中	金属制品	140463	85%	40%	10%
	电气设置制造	150811	85%	40%	10%
	通用、专用设备制造	69845	85%	40%	10%

3	建材	286666	85%	50%	10%
其中	水泥	118850	85%	50%	10%
	玻璃	20598	90%	50%	10%
	陶瓷	12154	90%	50%	10%
4	石化和化工	266008	90%	50%	10%
其中	化学纤维	151373	90%	50%	10%
	塑料	51023	90%	50%	10%
	橡胶	9897	90%	50%	10%
5	木材加工及家具制造	120186	85%	30%	10%
6	钢铁（型材加工）	51242	80%	40%	10%
7	有色（型材加工）	38490	80%	40%	10%
8	医药制造	17137	80%	40%	10%
9	其他	173243	85%	50%	10%
合计		1867968			

注：行业用电量数据来自湖州供电公司，最高负荷、最低负荷和检修时间均来自经验值

根据公式：

$$P_{max,ind/n} = \frac{E_{ind,n}}{N_h * S_{use,ind/n} * (1 - S_{r,ind/n})}$$

$$P_{min,ind/n} = P_{max,ind} * S_{min,n}$$

计算工业及各行业最大可调节能力，即 $(P_{max, ind/n} - P_{min, ind/n})$ ，得到工业行业的最大可调节能力共计为 161.5 万 kW，纺织、装备制造、建材、石化和化工、木材加工位列前五，五大行业最大可调节能力分别为 49.0 万 kW、36.7 万 kW、21.4 万 kW、18.7 万 kW 和 12.6 万 kW。

表 5-5 湖州工业各行业最大可调节能力

序号	行业	最大可调节能力 (万 kW)	行业最高负荷 (万 kW)	行业最低负荷 (万 kW)
1	纺织	49.0	75.3	26.4
2	装备制造业	36.7	61.2	24.5
其中	金属制品	12.6	21.0	8.4
	电气设置制造	13.5	22.5	9.0
	通用、专用设备制造	6.3	10.4	4.2
3	建材	21.4	42.8	21.4
其中	水泥	8.9	17.7	8.9
	玻璃	1.5	2.9	1.5
	陶瓷	0.9	1.7	0.9
4	石化和化工	18.7	37.5	18.7
其中	化学纤维	10.7	21.3	10.7
	塑料	3.6	7.2	3.6
	橡胶	0.7	1.4	0.7
5	木材加工及家具制造	12.6	26.4	13.2
6	钢铁（型材加工）	4.9	8.1	3.2
7	有色金属（型材加工）	3.7	6.1	2.4
8	医药制造	1.6	2.7	1.1
9	其他	12.9	25.9	12.9
合计		161.5	277.5	116.1

ii 工业行业参与度分析

从 2019 年湖州市电力需求响应工作情况看，全市 82 个协议用户全部为工业企业，协议规模达到 30 万 kW，占前文计算的工业最大可调节能力的 19%。

从工业各行业需求响应资源开发情况看，各行业参与度（即行业响应协议规模占行业最大可调节能力的比重）不等。其中，建材、有色金属、医药行业需求响应参与度在

30%-50%，装备制造业达到 23%。而纺织、化工、木材行业需求响应参与度仅为 1%、9% 和 6%。

表 5-6 2019 年湖州市各工业响应协议规模占最大可调节能力比重

序号	行业	最大可调节能力 (万 kW)	2019 年协议规模 (万 kW)	2019 协议规模占最大可 调节能力比重
1	纺织	49.0	0.6	1%
2	装备制造	36.7	8.3	23%
3	建材	21.4	11.5	54%
4	石化和化工	18.7	1.7	9%
5	木材及家具加工	12.6	0.8	6%
6	钢铁（型材加工）	4.9	4.5	92%
7	有色金属（型材加工）	3.7	1.2	33%
8	医药	1.6	0.8	49%
9	其他	12.9	0.4	3%
合计		161.5	30.0	19%

综合行业最大可调节能力的计算结果，以及 2019 年湖州市工业各行业参与需求响应工作的实际情况，结合第三章的用户参与度四象限分析。建材、装备制造、钢铁、有色金属、医药行业的单个用户可调节能力大、价格敏感度高，属于 A 象限；而纺织、石化、木材等行业虽然单个用户可调节能力大，但价格敏感度较低，属于 C 象限。

根据以上分析，对各行业的参与度进行赋值，如下表所示。

表 5-7 湖州市工业各行业参与度赋值

象限	特点	典型行业	μ_n
A	单个用户可调节能力大、价格敏感度高	建材、装备制造、钢铁、有色金属、医药等	50%
B	单个用户可调节能力小、价格敏感度高	/	30%%
C	单个用户可调节能力大、价格敏感度低	纺织、石化、木材等	20%
D	单个用户可调节能力小、价格敏感度低	/	5%

iii 工业行业可调节负荷计算

根据赋值结果，按照公式： $\Delta P_{fie,T/n} = (P_{max,n} - P_{min,n}) * \mu_n$ ，计算得到湖州市工业领域可调节负荷在 54.9 万 kW。其中，装备制造、建材、纺织行业位列前三，可调节负荷分为 18.4、10.7 和 9.8 万 kW。

表 5-8 工业各行业的可调节负荷

序号	行业	最大可调节能力 (万 kW)	参与度 μ_n	可调节负荷 (万 kW)
1	纺织	49.0	20%	9.8
2	装备制造	36.7	50%	18.4
3	建材	21.4	50%	10.7
4	石化和化工	18.7	20%	3.7
5	木材及家具加工	12.6	20%	2.5
6	钢铁（钢材加工）	4.9	92%	4.5
7	有色金属（型材加工）	3.7	50%	1.8
8	医药	1.6	50%	0.8
9	其他	12.9	20%	2.6
合计		161.5	/	54.9

注：因钢铁行业参与度较高，该行业取 2019 年需求响应户的实际签约量

根据 2019 年用户参与情况，钢铁、建材行业已经将本行业的需求响应资源充分挖掘，医药、有色金属的需求响应资源挖掘程度也较高。未来湖州市工业领域需求响应资源的开发主要集中在纺织、装备制造两大行业。扣除 2019 年用户协议量，纺织、装备制造分别有 9.2 万 kW、10 万 kW 的需求响应资源待开发。

②建筑领域

i 建筑行业最大负荷计算

2018 年，湖州市商业建筑²²、公共建筑和居民建筑的用电量分别为 189562 万

22. 包括信息传输、软件和信息服务业、批发和零售业、住宿和餐饮业、金融业、房地产业、租赁和商务服务业。

kWh、89704 万 kWh、313856 万 kWh²³，三者合计占到全市全社会用电量的 21%。

建筑领域电力负荷呈现明显的季节性特征。尤其是空调负荷，是拉高夏季电网峰值的最主要类型。湖州市空调普及率非常高，2018 年，全市居民建筑里的空调数量在 197 万台²⁴，商业空调数量在 10 万台左右，公共建筑领域空调数量在 50 万台左右。根据调研，湖州市建筑领域的空调数量、功率以及运行时间如下：

表 5-9 湖州市建筑领域的空调台数及功率

序号	类型	空调数量（万台）	平均功率（kW）	运行时间（小时） ²⁵
1	居民建筑	197	0.7	600
2	商业建筑	10	5.0	1000
3	公共建筑	50	1.2	800

根据公式（2-7）、（2-8），得到居民、商业和公共建筑领域的空调最大可调节能力分别为 104、47 和 26 万 kW。三者合计得到建筑领域最大可调节能力为 177 万 kW。

表 5-10 湖州建筑领域空调最大可调节能力

序号	类型	最大可调节能力（万 kW）	行业最高负荷（万 kW）	行业最低负荷（万 kW）
1	居民空调	104	104	0
2	商业空调	47	47	0
3	公共建筑空调	26	50	24
合计		177	201	24

注：公共建筑中学校、医院等供电可靠性要求高，其空调负荷应保留，根据调研，湖州市公共建筑中 48% 的空调负荷属于应保留负荷

ii 建筑行业参与度 μ_n 分析

2019 年，湖州市签约的需求响应协议中尚未出现居民、商业和公共机构等类型。从

23. 包括信息传输、软件和信息服务业、批发和零售业、住宿和餐饮业、金融业、房地产业、租赁和商务服务业。

24. 由于缺乏不同类型建筑空调用电量分类统计，课题组按照商业机构、公共机构和居民空调用电量占部门用电比重的 25%、45% 和 20% 测算。

25. 根据湖州市统计年鉴，2019 年湖州市居民总户数为 87.11 万户，城镇化率为 63.5%，其中，城镇居民每百户空调拥有量为 241 台；农村居民内每百户空调拥有量为 202 台。

各地需求响应工作情况看，居民、商业和公共建筑参与需求响应参与度较低，原因一是其需求响应资源较为分散，组织实施难度大；二是在居民、公共机构中，空调作为刚性需求出现，负荷调节不易。

从总体规模看，居民、商业、公共建筑空调的最大可调节能力均较高；但从资源分布的角度，居民和公共建筑中单个用户的可调节能力小；从价格敏感度分析，居民等用户在国内电价体系中均享有特殊的权力，难以将其归结为价格敏感度高的用户类型；比较特殊的是商业空调，相较公共机构、居民，其单个用户的可调节能力比较大，因此，可以给予较高的参与度赋值。

根据以上分析，商业领域单个用户可调节能力相对较大，因此属于 C 象限；公共建筑、居民单个用户的可调节能力、价格敏感度低，因此属于 D 象限。

表 5-11 湖州市建筑各行业参与度赋值

象限	特点	典型行业	μ_n
A	单个用户可调节能力大、价格剪感度高	/	50%
B	单个用户可调节能力小、价格剪感度高	/	30%%
C	单个用户可调节能力大、价格剪感度低	商业	20%
D	单个用户可调节能力小、价格剪感度低	公共建筑、居民	5%

iii 建筑行业可调节负荷计算

根据赋值结果，按照公式（2-4）计算得到湖州市建筑领域空调的可调节负荷为 15.9 万 kW，其中商业空调为 9.4 万 kW；居民空调为 5.2 万 kW，公共建筑空调在 1.3 万 kW。

表 5-12 各类建筑空调的可调节负荷

序号	类型	最大可调节能力 (万 kW)	参与度	可调节负荷 (万 kW)
1	居民空调	104	5%	5.2
2	商业空调	47	20%	9.4
3	公共建筑空调	26	5%	1.3
合计		177	/	15.9

③交通领域

i 交通行业最大负荷

湖州充电基础设施以车用充电站、充电桩为主。根据调研，湖州市充电站的功率在 120 到 200kW 之间，分散式充电桩（包括慢充和快充）的功率在 7 到 60kW 之间不等，充电站和充电桩的年运行时间平均在 500-2000 小时之间。其中，家用慢充年充电时间较长，一般在 1000 小时以上。见下表。

表 5-13 湖州市车用充电设施基本情况

类型	功率 kW	数量	运行时间
充电站	120kW, 200kW	60	500-1000
分散式充电桩			
快充	45kW, 60kW	700	500-1000
慢充	7kW	970	1000-2000

2019 年湖州市电动公交车用电量达到 1860 万 kWh；国网运行的 184 个充电桩（占全市充电桩数量的 11%）、33 座充电站，其用电量达到 169 万 kWh。按照类比分析，得到 2019 年全市各类电动车的用电量约为 3500 万 kWh。

根据公式（2-9）、（2-10），得到交通领域最大可调节能力为 5.1 万 kW。其中，充电站为 0.9 万 kW、快充为 3.5 万 kW、慢充为 0.7 万 kW。

表 5-14 湖州市交通领域最大可调节能力

序号	类型	最大可调节能力 (万 kW)	行业最高负荷 (万 kW)	行业最低负荷 (万 kW)
1	充电站	0.9	0.9	0
2	快充	3.5	3.5	0
3	慢充	0.7	0.7	0
合计		5.1	5.1	0

ii 交通行业参与度分析

与建筑领域相似，交通领域的需求响应资源开发同样存在用户分散、组织实施不易等问题。

从需求响应总体规模看，交通领域的需求响应潜力非常小，目前全市最大可调节能力仅为 5.1 万 kW。从单个用户规模看，充电基础设施的需求响应资源较为分散，规模化开发不易。从充电行为分析，用户对电价的敏感度高，价格波动直接影响用户的充电行为。根据以上分析，车用充电桩属于 B 象限，据此对湖州充电基础设施参与度进行赋值。

表 5-15 湖州市交通领域参与度赋值

象限	特点	典型行业	参与度
A	单个用户可调节能力大、价格敏感度高	/	50%
B	单个用户可调节能力小、价格敏感度高	车用充电站（桩）	30%
C	单个用户可调节能力大、价格敏感度低	/	20%
D	单个用户可调节能力小、价格敏感度低	/	5%

iii 交通行业可调节负荷计算

根据计算结果，交通领域的可调节负荷在 1.5 万 kW。

表 5-16 湖州市交通领域可调节负荷

序号	类型	最大可调节能力（万 kW）	参与度	可调节负荷（万 kW）
1	充电站	0.9	30%	0.3
2	快充	3.5	30%	1.0
3	慢充	0.7	30%	0.2
合计		5.1	30%	1.5

iv 三大重点领域的可调节负荷汇总

综上，工业、建筑（空调）、交通（充电设施）三大领域的可调节负荷之和为 72.3 万 kW，其中，工业为 54.9 万 kW、建筑（空调）为 15.9 万 kW、交通（充电设施）为 1.5 万 kW。

(2) 行业调节电网高峰负荷能力

考察湖州市电网负荷特性，分析行业负荷与地区电网负荷曲线的关系，从而明确行业可调节负荷对于调节电网高峰负荷的贡献大小。

i 湖州市电网负荷特性分析

从年负荷曲线看，湖州市夏季（7、8月）明显高于其他季节，全年最大负荷出现在7月26日（星期四），中午13:35。因此，夏季是电网削峰最迫切时段。

从日负荷曲线看，夏季全天形成两个高峰时段，早高峰10点至11点，晚高峰13点至17点。

ii 行业负荷与电网高峰负荷的关系

湖州市工业负荷占比较大，但工业负荷很少受季节变化。其中，连续生产工业的负荷曲线较为固定，非连续生产工业的负荷曲线随市场变化。因此，工业负荷与夏季电网高峰负荷一般相关。

建筑（空调）负荷的季节性特征明显，空调负荷与夏季电网高峰时段强相关。

交通（充电设施）负荷规模小，且不呈现明显的季节变化，其负荷与夏季电网高峰时段弱相关。

根据以上分析，对行业负荷与电网高峰负荷的关系 $\beta_{n,h}$ 进行赋值。

表 5-17 湖州行业负荷与电网高峰负荷的关系赋值

序号	类型	典型行业	$\beta_{n,h}$
1	强相关	建筑（空调）	1
2	一般相关	工业负荷	0.6
3	弱相关	交通（充电设施）	0.2

iii 计算行业调节电网高峰负荷能力

根据赋值结果，按照公式（2-11），计算在电网高峰时段行业实际可调节能力为49.1万kW，其中工业为34.5万kW、建筑为15.9万kW、交通为0.3万kW。

表 5-18 湖州市调节电网高峰负荷能力

序号	典型行业	行业可调节负荷 (万 kW)	$\beta_{n,h}$	行业可调节能力 (万 kW)
1	工业负荷	54.9	0.6	33.0
2	建筑（空调）	15.9	1	15.9
3	交通（充电设施）	1.5	0.2	0.3
合计		72.3	/	49.1

5.2.3 宏观和中观核算

以 2018 年为基准年，在宏观层面，当湖州形成占最大用电负荷 10% 以上的需求侧机动调峰能力时，全市可调节负荷总量应达到 47 万 kW。

在中观层面，通过行业特性和电网特性分析，得到湖州市工业、建筑、交通三大行业的可调节负荷之和为 72.3 万 kW，三大行业调节电网高峰负荷的能力为 49.1 万 kW。

因此，湖州市能完成宏观层面的需求响应指标，且有望形成占最大用电负荷 16% 的需求侧机动调峰能力²⁶。在夏季高峰时段，通过需求响应，湖州市最大可调节电网高峰负荷达 49.1 万 kW。

对比需求响应工作现状，湖州市已经形成 30 万 kW 的需求响应资源池，全市尚有 42.3 万 kW 的需求响应资源待开发。待开发的需求响应资源主要集中在商业空调、纺织、装备制造业，上述三大行业待开发的需求响应资源均在 9 万 kW 以上。

根据第三章的四象限分析，湖州市的装备制造业、建材等工业行业属于 A 类资源，电动汽车充电桩属于 B 类资源，商业空调、纺织业等属于 C 类资源，而公共建筑和居民空调则属于 D 类资源。如图 5-1 所示。

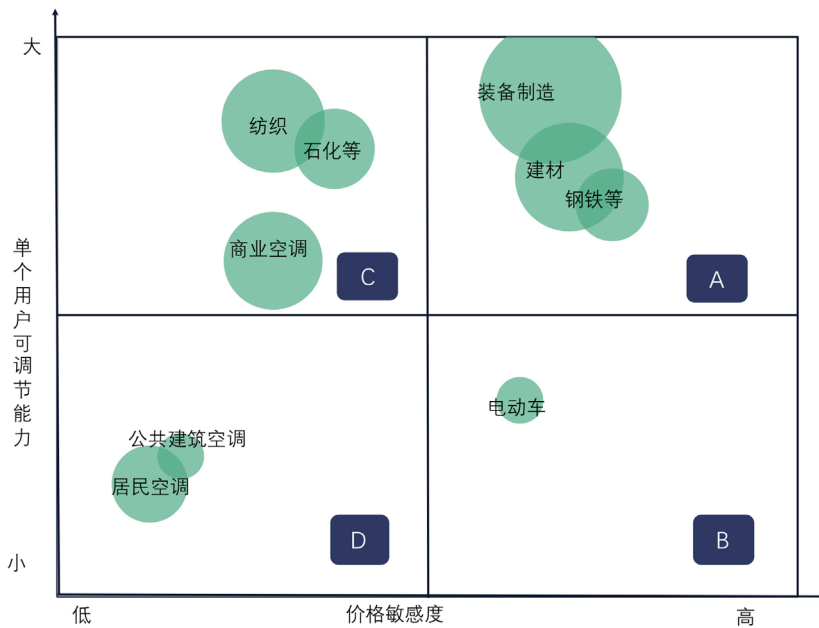


图 5-1 湖州市重点领域需求响应资源潜力分析

26 即用三大行业可调节负荷之和（72.3 万 kW）除以 2018 年全市最大负荷（466 万 kW）。

注：湖州市重点领域需求响应资源潜力四象限分析结果与第三章中图 3-4 的分析结论略有不同。区别在湖州市的连续生产工业如建材、钢铁在 2019 年的需求响应协议签署中，表现出极高的参与度和响应能力，因此，将其列为 A 类资源

从资源开发难度看，工业领域需求响应资源的整体开发难度要小于建筑和交通领域，从具体行业看，装备制造业、建材行业等的资源开发难度要小于电动汽车、商业空调和纺织业等，而公共建筑和居民空调的开发难度最大；

从与电网峰荷的关系看，虽然商业空调与纺织业同属 C 类资源，但由于商业空调与电网峰荷相关性更强，因此，在夏季高峰时段，商业空调明显比纺织业具有更高的开发价值。

上述需求响应资源分析，可以作为湖州市需求响应资源潜力开发的参考。但在实际运行中，还需要分析更多的政策、市场等环境因素。

5.2.4 环境及影响分析

以下将简要分析不同的开发条件下，对重点领域需求响应资源潜力开发的不同影响。

（1）工业领域

案例中不同工业行业对电价的敏感性分析，多是基于经验判断，特别是 2019 年湖州市各工业行业的需求响应协议签署情况，而非行业的实际参与情况。在实际运行层面，行业的产能利用率、市场销售、库存、工业品价格等均会影响行业对电价变动做出的反应，影响工业用户的参与度。

同时，地区是否制定和施行有利于需求响应实施的电价政策，如峰谷电价、蓄能电价、可中断负荷电价等，也很会极大地影响工业用户的响应能力。

此外，在不同的电力市场环境下，直接参与市场化交易或者由售电公司等代理参与市场的工业用户、显然比尚未参与市场的工业用户，具有更高的价格敏感度，因而具有更高的资源潜力。

（2）建筑领域

在建筑领域，商业空调、公共建筑和居民空调具有不同的负荷特征。

以商业空调为例，由于其用电特性，利用蓄能空调进行移峰填谷是一种较为理想的方式，但如果商户低谷时段多用的电量电费无法抵消高峰时段减少的电费，那商户以蓄能方式参与需求响应的积极性将不复存在，规模开发的预期也将随之降低。

反之，虽然从理论上，公共建筑空调是刚性需求，但在峰谷价差、补贴、政策等

的驱动下，公共建筑空调进行蓄能改造的动力更足，由此带来的规模效应会比商业空调更大。

居民空调需求响应潜力开发同样存在着这种不确定性。由于居民峰谷电价尚未真正执行（江苏、山东等地本着居民自愿参与的原则），直接补贴几乎是激励居民参与需求响应的唯一方式。如果激励到位，负荷集成商等认为其有利可图，有意愿参与资源的开发和组织工作，那么居民规模化参与需求响应的前景也是可以预见的。

（3）交通领域

在交通领域，需求响应资源主要分布在电动汽车上。虽然目前国内大多数城市电动汽车的拥有率还比较低，可开发的需求响应资源量还比较小。但是考虑到电动汽车的推广速度，其对于城市用电负荷的调节作用有望进一步提高。

湖州案例中，由于资料所限，仅考虑到充电桩类型（包括快充和慢充）以及电动公交车。事实上，不同车辆类型，如私人汽车、出租车、公务车、专用车、商用车等，其运行轨迹、行驶里程、电池容量、充电电价、用车行为等均会影响到电动车的参与方式和响应规模。如果再考虑到混动或者其他出行方式的替代，那么情况将变得更为复杂。

同样，无论是电动汽车还是充电桩，其分布都较为分散。与大多数用电设备不同的是，很多电动车的充电地点和行为具有很强的不确定性。这种分散性和不确定性加大了电动汽车需求响应资源开发的难度。

因此，电动汽车需求响应资源的开发依赖的因素较多，除了价格政策外，还有赖于城市交通总体规划的完善、充放电技术的提高、以及充电设备运营商的有效管理等。从这个意义上讲，它的开发难度将不亚于商业和公共建筑空调等。但是，作为极具灵活性和成长性的资源类型，考虑到其在削峰和填谷方面的双重作用，电动汽车需求响应资源开发的价值和意义也更为突出，理应是城市统筹规划需求响应资源时重点考虑的内容。

综合考虑湖州市需求响应资源潜力分析结果，工业领域特别是装备制造业将是资源优势最大的行业，具有较高的价格敏感度以及较大的可调节能力；其次是商业空调，在蓄能改造和电价政策影响下，商业空调的响应能力和价格敏感度均较高；纺织业、石化等行业虽然可调节能力大，但从 2019 年实践看，用户参与的积极性并未得到有效激发；公共建筑和居民空调领域，还需借助政策支持以及负荷集成商的组织作用；而电动车资源虽然目前潜力较小，但考虑其成长性，理应是重点关注的对象。

6 研究发现和政策建议

6.1 研究发现

通过研究，本报告的主要观点与研究发现如下：

1. 需求侧资源的开发已从传统的“减少需求”扩展到“灵活调节与消纳并举”的新阶段

电力系统正经历着全方位的转型：（1）供应端电源构成中新能源比重在增加，电力系统中接入了大规模的间歇性新能源，导致电力负荷曲线发生变化，电网亟需提升灵活性以适用这种新变化。（2）用户端也在发生变化：在国内电气化率高的部分地区，出现了分布式电源、电动汽车、储能、智能设备、清洁供暖等多元化负荷，区域负荷特征变化显著。（3）智能电网、能源互联的发展，也在很大程度上重塑着电网：即从以电流单向流动为特征，转型到电流的双向流动。用户端不再是被动的电能消费者，而是可以参与电力供需平衡的维护。

电力系统的这一转型为需求侧资源潜力挖掘和价值实现创造了有利的条件，需求侧资源的作用也从传统的削峰减少需求，扩展到灵活调节电力负荷、促进新能源消纳。“用户侧可调节资源”能高效解决电力系统局部阻塞或过剩等问题，提高非常规机组的包容性，促进新能源消纳和清洁能源发展。

2. 作为促进电力供需平衡的新手段，需求侧资源具有经济、可靠、灵活和低碳的特点

“十三五”以来，中国的电力供需形势已发生深刻变化。中国经济进入“提质增效”

的“新常态”，用电量增速放缓，电力供应能力总体较为充足，在局部地区由于空调等季节性用电的扩大，局部时段“缺电力”成为比“缺电量”更为突出的问题。在此背景下，将需求方的各种资源纳入统一的资源规划，通过开发建立在用户需求和用户利益基础之上的需求侧资源，激发用户主动参与维护电力平衡的意识和行为，促进供需双方共同利益的产生，可实现供给侧和需求侧的高度协调匹配和供需平衡。

需求侧资源开发改变了过去“以供定需”的资源开发方式，它将需求方的各种资源，纳入统一的资源规划，重在提高终端用电效率、改变用户的用电行为，同时将需求侧放在与供应方对等的位置，在避免扩大电源投资的前提下，使负荷下降到电网可承受的范围之内，同时提高电网运行的稳定性和效率，可作为以更经济、更高效、更灵活、更绿色地实现电力供需总体平衡的一种新手段。

3. 挖掘需求侧资源的潜力和价值，有利于国内电力市场的发展和完善

中国于 2015 年启动了新一轮的电力市场改革。围绕着电力市场的构建，开展了电力市场化交易、输配电价改革、售电侧改革、增量配电网试点等一系列工作。其中，需求侧管理和需求响应也被明确写入《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》，需求响应资源已被正式纳入电力市场建设。

从市场开拓的角度出发，需求侧资源的开发需要政府、能源供应企业、能源服务公司、电力用户等的共同参与，意味着将会有更多的主体直接或间接地参与电力市场。在成熟的电力市场环境下，需求侧资源既可以参与电量市场影响电价，还可以参与辅助服务市场提供调频、备用、可中断负荷等，同时还可以带动辅助服务市场、储能等项目得到更好的发展，因此，需求侧资源的开发将扩大电力市场规模，持续激发市场活力。

4. 需求侧资源潜力分析的方法学欠缺，各地在开发需求侧资源时，尚需科学、可行的方法学支撑

宏观区域层面、中观行业层面、微观用户层面的电能替代和需求响应资源潜力分析方法学可以满足政府部门、电力公司、负荷集成商等不同主体的开发需求。但是目前国内围绕方法学开展的研究多停留在理论层面，受制于数据可获得性，可操作性均有待提高。各地在开发需求侧资源时，尚需科学、可行的方法学支撑。

本研究初步提出了三个层面的方法学。宏观层面，需求响应以“可调节负荷占区域最大负荷的比重”为指标，电能替代以“区域电气化率”为指标，为政府宏观决策服务；

中观层面，按照工业、建筑、交通三大领域，提出了具体的行业指标，为行业潜力资源分析服务，需求响应以“行业最大可调节能力”、“行业参与度”、“行业可调节负荷”以及“行业调节电网高峰负荷能力”为主要指标，工业领域以“电力对燃油、燃煤的替代潜力”为电能替代指标，建筑和交通领域主要以“商用及民用电气设备推广率”为电能替代指标；微观层面，电能替代主要考虑电力容量约束下，用户可增加的电能替代量；需求响应主要考虑直接削减和转移高峰负荷两种方式下，用户侧可调节负荷的大小。

5. 不同行业的需求侧资源潜力不同，可通过四象限法分析潜在的调节潜力

区域需求响应资源潜力的大小是所有用户“可调节能力”和“价格敏感度”共同作用的结果之和。由于具有不同“调节能力”的用户对电价变动（或激励措施）会做出不同的反应，因此，用户识别非常重要。本报告提出四象限分析方法用于区分不同类型的用户资源。

- A 象限——单个用户可调节能力大、价格敏感度高；
- B 象限——单个用户可调节能力小、但价格敏感度高；
- C 象限——单个用户可调节能力大、但价格敏感度低；
- D 象限——单个用户可调节能力和价格敏感度均低。

区域在制定开发需求响应资源策略时，重要的是寻找处于四个象限的四类资源，特别是 A 类资源，此类资源具有规模开发的基本条件，且开发难度相对较小，拥有较高的性价比；如果市场发展较为成熟，负荷集成商越来越多的参与需求响应并发挥组织中介的作用，B 类资源也将是理想的开发对象；当电力系统出现较为严重的供应缺口时，可以调动 C 类资源，即单个用户可调节能力大、但价格敏感度低的资源类型，但这意味着更高的经济成本；在紧急状态下，D 类资源即单个用户可调节能力小、价格敏感度低的资源类型也可以参与需求响应，但 D 类用户的参与不仅会有经济成本的付出，也将伴随着一定的社会成本。

6. 湖州案例显示

工业领域中的装备制造业属于 A 类资源，具有较高的价格敏感度以及较大的可调节能力；其次是商业空调，虽然计算结果显示属于 C 类资源，但如果辅以蓄能改造条件以及谷段低廉电价政策等，商业空调的响应能力有望大幅提高；纺织业、石化等行业虽然可调节能力大，但从 2019 年实践看，用户参与的积极性不高，仍属于 C 类资源；公共

建筑和居民空调是传统意义上的刚性需求，属于 D 类型资源，其开发还需借助政策支持以及负荷集成商的作用；电动车资源属于 B 类型资源，虽然目前资源量很小，但考虑其成长性，开发的意义和价值较大。

6.2 政策建议

1. 强化政策支持力度，切实提高需求侧资源战略地位

我国需求侧资源利用正从行政式管理向市场化响应转变，在过渡时期需要进一步加强政策支持保障力度，从规划、价格、监管等方面建立完整的政策体系，从而推动需求响应的快速发展。

一是推动综合能源资源规划设计，强化需求侧资源地位。注重顶层设计，统筹中长期电源规划与需求侧资源开发利用，将需求侧资源纳入电力发展规划、能源发展规划和地区经济发展规划。通过推动供给侧和需求侧的高度协调匹配，自上而下转变“以需定供”的供电思维，逐步走向有限（合理）满足电力需求的思维，推动全社会绿色生活和消费方式的形成。

二是推动建立由市场形成价格的电价机制。如果电价完全市场化，用户自然会根据市场价格调整用电行为。在当前市场环境下，需求响应资源没有途径参与市场，也就难以准确定价需求响应的价值。制定并完善峰谷电价、可中断电价、季节性电价等电价政策，适当扩大峰谷电价价差、合理设定低谷时段，降低综合用电成本。加快推进市场化电价形成机制，通过价格信号引导电力用户，促进资源优化配置。

三是完善补贴激励机制。需求侧资源开发利用的基础是用户的自愿性。加强对工业、商业、居民等电力用户参与需求响应调控的引导，促进用户不断追求降耗、高效、经济的用电行为，激发用户主动参与维护电力平衡的意识和行为，促进电力供需双方形成利益共同体。在电力需求响应的初期阶段，主要依靠补贴吸引用户参与，对参与需求响应的用户给予经济补偿，科学合理制定补贴标准。

四是加强监管体系建设。需求侧资源充分利用是多专业交叉融合和资源整合的过程。随着需求侧资源不断丰富，在发挥需求侧资源平衡供需的作用时，需要挖掘、处理、分析、利用海量数据信息，并在此基础上为用户提供多元化、个性化需求响应套餐服务和产品，这对行业、市场监管提出了新挑战，亟待研究建立一套完整的法律法规、监管手段和配

套措施，加强监管体系建设，为需求侧资源开发利用提供保障。

2. 将需求响应纳入电力“新基建”重点内容，实现需求响应资源智能调控

“新基建”将加速能源系统与信息系统的耦合发展，电力“新基建”将推动源-网-荷-储各环节智能化数字化转型。需求响应作为电力系统调度运行的重要资源，应纳入电力行业“新基建”重点内容，为充分发挥需求响应价值在提升系统可靠性、促进可再生能源消纳等方面的作用奠定基础。

一是培育电力数据要素市场，为需求响应实施奠定数据基础。促进电力大数据的培育与应用，提高终端电力用户信息化、数字化水平，便于精准刻画需求侧负荷曲线，同时准确评估电力用户需求响应潜力。推动电力数据流通共享，推进政府、行业、企业间电力数据开放、互联，充分挖掘电力数据尤其是需求侧相关数据的资源价值，为需求响应策略制定提供数据依据。加强数据资源整合和安全保护，建立统一规范的数据管理制度，提高数据治理和规范性。

二是构建需求响应信息交互平台，为需求响应资源赋能。加快完善需求侧数字基础设施建设，包括电力负荷管理系统、电能在线监测平台、负荷集成商电能管理系统、电力用户电能管理系统等在内的需求响应技术支持系统，完善各技术系统之间的信息交互、有序和安全共享功能，为电力用户提供平台数据和响应依据。同时，通过整合系统运行、市场交易和终端用户电力数据，提高需求侧大数据分析能力，实现需求响应资源的智能调控。

三是加快电力需求响应标准体系建设。随着“云大物移智”等信息通信技术与电力系统的深度融合，系统梳理并健全电力需求响应与安全供应标准体系，包括管理标准、技术标准、安全标准、产品标准等，注重与其它相关标准的有机衔接。以科学合理的规则标准提升监管有效性，降低执法成本，并严格依照标准开展监管。适应新经济新技术发展趋势，及时修订调整已有标准，安全标准、质量标准、环保标准、智能化标准。

3. 推动完善电力市场建设，发挥需求侧资源平衡电力供需的作用

电力市场机制具有价值发现和优化资源配置的功能，是需求响应的最好载体。应进一步培育完善电力市场建设，将需求侧和供应侧同等对待，发挥需求侧资源在市场中的作用。

一是积极培育各类市场主体挖掘利用需求侧资源。随着配售电业务加快放开，配售

电公司充分了解掌握用户的负荷特性信息，均有可能成为负荷集成商，为用户提供综合能源服务，尤其是提供需求响应策略服务。激发市场主体对需求响应产品和模式创新能力，利用能源互联网技术，把分布式的需求响应资源集成进入电力市场，协助用户制定需求响应策略并指导用户执行响应等工作，充分发挥需求侧资源价值。

二是加快电力现货市场与辅助服务市场建设步伐。建立并完善中长期电能市场、现货能量市场、辅助服务市场、容量市场等市场机制，通过反映电力供需情况的实时电价信号，激发需求响应资源开发的积极性。具体地可以通过建立涵盖需求响应资源的辅助服务分担共享机制，完善需求响应项目的辅助服务考核机制和补偿机制；适时建立涵盖需求响应资源的辅助服务市场，考虑建立供需双向投标的辅助服务交易机制，通过市场化手段进一步发现各类需求响应资源的辅助服务价值。

三是建立需求侧管理市场化长效机制。以新能源消纳、分布式能源协同优化为典型场景，建立需求侧资源常态化利用机制，给予需求侧资源独立市场主体地位，引导其积极参与电力市场。探索实施需求响应、扩大电能替代规模，对零散用户创新开展电能替代“打包”交易，通过直接交易等市场化手段降低用电成本。

四是打破省间壁垒，推动需求侧资源参与电力市场跨省跨区交易。在我国电力市场建设过程中，调动市场主体的参与积极性，利用大范围配置资源的效率优势、成本优势吸引更多的市场主体参与跨省区交易，把市场逐步做大、做活，彻底打破省间壁垒，以规范的制度机制积极引导当前省级市场向省间大市场迈进，对省间交易时序和现货交易基本规则进行统一规范。从而，鼓励东部负荷中心的需求侧资源参与西部新能源消纳，鼓励电能替代用户与“三北”、西南地区富余清洁能源以及高效环保机组开展跨区跨省直接交易。

4. 加强需求侧资源潜力挖掘研究，为需求侧资源开发提供理论支撑

需求侧资源与发电资源具有同等重要的作用。为充分开发利用需求侧资源，促进电力供需平衡，要着重加强需求侧资源挖掘能力，关注需求侧资源价值应用，发挥需求侧资源在调节电力供需、提高系统可靠性、提升系统运行效率等方面的价值。

一是加强需求侧资源潜力分析基础研究。目前，需求侧资源潜力分析受限于数据可获得性、技术可操作性等方面限制，难以充分挖掘需求侧资源潜力价值。需进一步加强需求侧资源潜力分析评估，深入研究需求响应资源中不同类型用户的用电特性、电能替

代资源中技术经济可行的替代潜力，以及节能潜力和分布式电源开发利用潜力等等。针对政府部门、电力公司、负荷集成商等主体的不同需求，系统梳理需求侧资源的技术潜力和经济潜力。

二是紧密结合信息化新技术提高需求侧资源评估精准度。利用广泛部署的用户信息、电网信息与发电信息等数据采集终端，整合系统运行、市场交易和用户用电数据，提高需求侧大数据分析能力，发挥技术创新驱动作用，为需求侧资源利用提供新动能。

三是加强需求侧资源分析研究成果应用引导。出台政策鼓励电力公司、负荷集成商等相关企业增加研发投入，支持企业积极参与需求侧资源挖掘研究。树立“项目从需求中来，成果到应用中去”的理念，充分发挥需求侧资源在系统规划和运行中的价值，支持相关成果转化应用、迭代更新。加强宣传，扩大示范带动效应，便于需求侧资源开发利用进一步拓展。

参考文献：

- [1] 电力规划设计总院，《基于园区增量配电网的综合能源服务业态研究》，2019 年 12 月。
- [2] 王伟，《前瞻产业研究院电能替代发展分析报告》，https://www.sohu.com/a/198039486_662580。
- [3] 自然资源保护协会、国家发改委能源研究所、国家可再生能源中心，《电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究》，2016 年 9 月。
- [4] 《多元融合高弹性电网是张什么网》，2020 年 4 月。
- [5] 湖州供电公司，《湖州建设“生态 + 电力”示范城市典型案例》，2019 年 12 月。

采用 CTP 印刷以减少相应的污染物排放

采用可降解环保再生纸制作



中国电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE

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: + 86-10-5927 0688

www.nrdc.cn