



# 电力需求侧灵活性系列: 工业灵活性潜力及发展现状



## 作者与鸣谢

### 作者

落基山研究所:刘雨菁,刘子屹,谢俊

中国电力科学研究院有限公司:宫飞翔,李德智

### 其他作者

落基山研究所:陈梓浩,高硕,李婷,张沥月,周勤 中国电力科学研究院有限公司:陈宋宋

所有作者姓名按姓氏首字母顺序排列

## 联系方式

刘雨菁, yujingliu@rmi.org

### 版权与引用

刘子屹,谢俊,刘雨菁,宫飞翔等. 电力需求侧灵活性系列:工业灵活性潜力及发展现状,落基山研究所,2023

### 鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

孙冲 国网河北省电力有限公司营销服务中心

万达 中铝科学技术研究院有限公司

王顺江 国网辽宁省电力有限公司

张海静 国网山东省电力公司营销服务中心

特别感谢Climate Imperative Foundation对本报告的支持。

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构,以及项目支持方的观点。

## 目录

前	言	4
<u> </u>	、工业需求侧灵活性含义及其发展历程	6
	1.1 保障新型电力系统安全稳定亟待需求侧灵活性发挥重要作用	. 6
	1.2 需求侧灵活性的含义及其发展历程	. 6
	1.2.1 需求侧灵活性的含义及相关概念辨析	. 6
	1.2.2 我国需求侧管理发展历程	7
	1.3 工业是需求侧灵活性的重要潜力来源	8
	1.4 本报告研究目的	10
_	、工业需求侧灵活性的主要来源及其潜力	11
	2.1 工业负荷的基本分类	11
	2.2 不同工业进行负荷调节的方式	12
	2.3 典型工业需求侧灵活性来源及其潜力	13
=	、全球工业需求侧灵活性探索与实践	15
—	<b>、 王 小 工 市 不 関 久 石 口 ホ 宗                                </b>	
	3.2 中国工业需求侧灵活性实践	
四	、需求侧灵活性挑战与工作展望	20
	4.1 工业需求侧灵活性发展面临的挑战	20
	4.1.1 技术限制挑战	20
	4.1.2 经济和市场监管挑战	20
	4.1.3 企业管理挑战	21
	4.2 推动工业需求侧灵活性的近期工作展望	21
矣	老文献	22

电力行业占全球二氧化碳排放的约40%,推动电力生产零碳化和终端用能电气化已成为全球应对气候变化、加速 能源转型的重要抓手。终端用能电气化是工业、交通、建筑等领域的关键减排手段,这将进一步提高对零碳电力 供应的需求。2022年,全球电力供应中仍超过60%来自化石能源,零碳电力系统的构建是各国面临的共同课题。

零碳电力系统会面临着供给侧和需求侧的双重不确定性,这将带来更高的系统灵活性需求以满足电力平衡、实现 更大规模的新能源消纳。在供给侧,以风电、光伏、水电为代表的可再生能源发电技术呈现明显的间歇性或季节 性特点;在需求侧,电力负荷的波动性也伴随终端电气化和极端天气频发等多重因素影响而变得愈发强烈。在低 碳转型的背景下,传统上发挥调节作用的煤电、气电等电源装机占比将持续下降,电力系统需要更多的零碳灵活 性资源来应对供需波动、实现从分钟到年度层面的电力电量平衡。

2021年, 国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》(下简称"方案")指出, 加快构建新能源占比逐渐提高 的新型电力系统,从源、网、荷等多方面开发灵活性资源,以推动碳达峰、碳中和目标的实现。方案明确,建设 新型电力系统要"大力提升电力系统综合调节能力","加快灵活调节电源建设","建设坚强智能电网", "引导自备电厂、传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络、虚拟电厂等参与系统调节"。 伴随着经济发展和其他行业的电气化进程,中国电力需求仍将持续增长,需求侧灵活性价值也将愈发显著。落基 山研究所在2022年发布的《先立后破,迈向零碳电力——探索适合中国国情的新型电力系统实现路径》报告认 为,需求侧弹性地参与供需平衡是新型电力系统的特性之一,实现需求侧的可观可控是提高系统灵活性的有效手 段。

近年来,全国电力供需平衡偏紧,加强电力负荷管理、挖掘需求侧灵活性资源已成为构建新型电力系统的迫切任 务。从宏观看,2015年至2022年间全社会用电量年复合增长率达6.1%,最大用电负荷增速更高,年复合增长率 为7.1%,负荷侧呈现出更大的波动性。从局部看,供需矛盾已经在部分地区凸显: 2022年7、8月迎峰度夏期 间,全国有21个省级电网用电负荷创新高,华东、华中区域电力保供形势严峻。除了传统的夏季负荷高峰外,随 着消费结构和产业结构调整升级,华东、华中和南方区域负荷已呈现夏季和冬季双峰现象: 2022年2月迎峰度冬 期间,江西、湖南、四川、重庆、上海、贵州等地部分时段电力供需平衡偏紧。可见,相比于电量平衡,电力负 荷平衡的挑战更加严峻,亟需优化升级需求侧管理手段助力缓解供需矛盾。

从现状来看,我国需求侧管理仍以有序用电为主,尚未形成完善的市场化运作机制,用户侧负荷调节技术储备不 足、主动响应能力开发程度较低。2023年国家发展改革委组织修订了《电力需求侧管理办法》,首次新增需求响 应章节,强调按照市场化、常态化、聚合化、可靠化方向推进需求响应工作,到2025 年各省需求响应能力达到 最大用电负荷的3%—5%,同时明确有序用电与需求响应的边界、要求精细化开展有序用电工作。

无论是精细化有序用电还是市场化需求响应,摸底用户负荷调节的技术可行性和建立可调节资源库都是必须的基 础工作。在各类用户中,我国工业用户用电量达到57001亿千瓦时,在全社会用电量占比高达65%,而且我国工 业体系完整、负荷结构丰富,理论上具备较大的需求侧灵活性挖掘潜力。此外,工业用户由于单体用电量大、沟 通成本低等因素是当前有序用电实践中优先考虑的负荷资源。深入调研不同工业类别、不同企业间的负荷调节能 力有助于制定更加合理的电力需求侧管理方案。

基于以上背景,落基山研究所需求侧灵活性系列报告首先将重点放在工业部门,本篇综述报告及后续的细分行业 子报告将着重探讨开发工业需求侧灵活性的技术层面核心问题,即各类工业生产环节的负荷可调节潜力。本篇报 告将立足中国工业需求侧灵活性的发展现状,结合国内外现有研究和实践,识别工业需求侧灵活性的主要来源和 潜力,探讨工业需求侧灵活性开发的技术、经济和管理挑战,从而助力工业需求侧灵活性在新型电力系统建设中 发挥重要作用。



## 一、工业需求侧灵活性含义及其发展历程

## 1.1 保障新型电力系统安全稳定亟待需求侧灵活性发挥重要 作用

电力系统灵活性是指在一定经济成本约束下电力系统快速响应供需两侧大幅度功率与电能波动的能力。在 2030 年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标下,中国可再生能源装机迅速增加、发电比重快速增长。2021年 10月,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》指出,"构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统","到2025年, 非化石能源消费比重达到 20% 左右","到 2030 年,非化石能源消费比重达到 25% 左右"。截至 2022 年底, 我国风电、光伏在电力系统中装机占比 29.6%,发电量占比 13.7%。2023 年 6 月,国家能源局组织发布的《新 型电力系统发展蓝皮书》指出,要在建设新型电力系统的加速转型期(当前至 2030 年)推动新能源成为发电量 增量主体,并达到装机占比超过 40%、发电量占比超过 20% 的目标,还要在总体形成期(2030 年至 2045 年)、 巩固完善期(2045 年至 2060 年)推动非化石能源发电逐步转变为装机主体和电量主体 2。建设新型电力系统的 阶段性目标层层推进,意味着未来以风电、光伏为代表的可再生能源电力渗透率将继续快速提升,加剧电源侧出 力的波动性和不确定性,再叠加需求侧的波动性,电力系统未来将会面临更为严峻的供需平衡挑战。因此,电力 系统的灵活性亟待提升,以保障电网运行的可靠性、稳定性和安全性。

电力系统灵活性的提升难以依靠单种技术或单一路径实现,必须在电力系统的多个环节深挖潜力、共同发挥作用。 目前,我国的电力系统灵活性主要来自于灵活性改造后的煤电机组、常规水电、抽水蓄能、电化学储能、气电机 组等。其中,煤电机组灵活性改造率仍较低," 十三五 " 煤电灵活性改造实际完成不到 6000 万千瓦,而且爬坡 速度较慢、启停时间较长、煤耗升高等问题也使得煤电机组无法成为理想的调节手段。常规水电具有明显的地域 限制和季节性限制,其调节能力也受到流域内梯级调度、农业水利等影响。此外,发展气电受到国内气源不足的 能源安全约束,抽水蓄能地域限制明显且建设周期较长,电化学储能也面临着调节时间较短、成本较高等问题。 截至 2022 年底,具备快速调节能力的抽水蓄能、电化学储能、燃气发电仅占电力系统总装机的 6.6%。因此,仅 靠发电侧灵活性无法满足电力系统的稳定性和可靠性需求。电网侧的灵活性也受到线路输电能力、区域协调、电 力市场等多个因素影响,调整较为复杂。而需求侧的灵活性分布广泛,可快速响应电力供需变化、实现多时间尺 度负荷调节,同时调用成本较低,在提高电力系统灵活性方面具有明显的优势。因此,开发需求侧灵活性成为了 保障电网安全稳定运行的迫切需求。

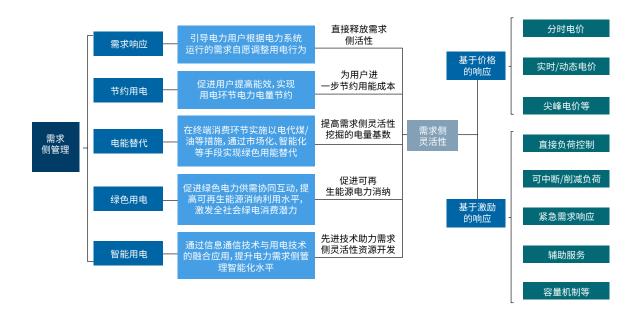
## 1.2 需求侧灵活性的含义及其发展历程

## 1.2.1 需求侧灵活性的含义及相关概念辨析

需求侧灵活性(Demand-side Flexibility, DSF)通常是指电力用户可以根据电力系统运行的需求而调整自身 用电行为的能力,是电力需求侧管理的重要组成部分。2023年发布的《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》指 出,需求侧管理是指加强全社会用电管理,综合采取合理可行的技术、经济和管理措施,优化配置电力资源,在 用电环节实施需求响应、节约用电、电能替代、绿色用电、智能用电、有序用电,推动电力系统安全降碳、提效 降耗 '。其中,绿色用电要求需求侧提供灵活性以促进可再生能源消纳,实现能源绿色转型;而智能用电则是通过 信息通信技术与用电技术的融合,来帮助电力用户挖掘需求侧灵活性资源。

需求侧灵活性潜力主要通过需求响应的方式得以应用。需求响应(Demand-side Response,DR)是指用户根 据电力系统运行的需求自愿调整用电行为。通过需求响应可以实现削峰填谷,提高电力系统灵活性,保障电力系 统安全稳定运行,促进可再生能源电力消纳 <sup>6</sup>。区别于有序用电,用户需求响应是一种主动参与用电调整的行为, 是需求侧管理的重要技术手段。需求侧管理、需求侧灵活性以及需求响应之间的关系如图表1所示。

#### 图表1 需求侧管理及需求侧灵活性的含义及分类



资料来源: 2023年《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》,落基山研究所

## 1.2.2 我国需求侧管理发展历程

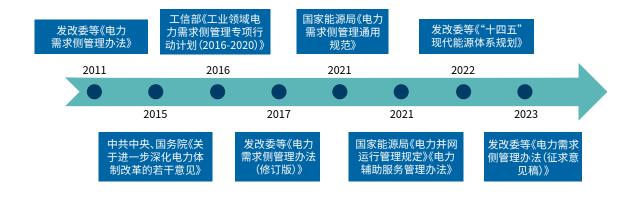
自 2011 年《电力需求侧管理办法》实施以来,我国开始着力推动市场化需求响应、促进节能降耗、扩大绿电消费、 保障电力安全等需求侧管理实践。

- ・2015年,中共中央、国务院印发《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》,明确提出积极开展需求侧管 理和实施需求响应。
- · 2016年,《国家能源生产和消费革命战略(2016-2030)》也明确提出开展工业领域的电力需求侧管理专项行 动。工业和信息化部也印发《工业领域电力需求侧管理专项行动计划(2016-2020)》,提出建设电力需求侧 管理平台,通过制定工作指南等重点任务,组织钢铁、有色、化工等重点行业开展示范推广,全面提升工业 领域用能效率和需求响应能力。
- ・2017年,国家发展改革委员会(国家发改委)等六部委联合印发《电力需求侧管理办法(修订版)》,强调

要总结推广需求响应试点经验,并提出了"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。

- · 2021年,由工业领域电力需求侧促进中心牵头组织编制了《电力需求侧管理通用规范第1部分: 总则》《电 力需求侧管理通用规范 第2部分: 术语》两项标准,由全国电力需求侧管理标准化技术委员会提出并归口, 进一步规范了电力需求侧管理的标准。同年,国家能源局修订发布了《电力并网运行管理规定》、《电力辅 助服务管理办法》,旨在扩大电力辅助服务新主体,丰富电力辅助服务新品种,完善用户分担共享新机制, 健全市场形成价格新机制。
- ・2022年1月,国家发改委等部门发布的《"十四五"现代能源体系规划》确立了工业资源的重要调节地位, 文件提出要引导大工业负荷参与辅助服务市场,鼓励电解铝、铁合金、多晶硅等电价敏感型高载能负荷改善 生产工艺和流程,发挥可中断负荷、可控负荷等功能。
- · 2023年5月,发改委等再出台《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》,明确提出到2025年,各省需求响应 能力达到最大用电负荷的3%-5%,其中年度最大用电负荷峰谷差率超过40%的省份达到5%或以上;到 2030年,形成规模化的实时需求响应能力,结合辅助服务市场、电能量市场交易可实现电网区域内可调节资 源共享互济。

#### 图表2 需求侧管理相关政策时间路线图



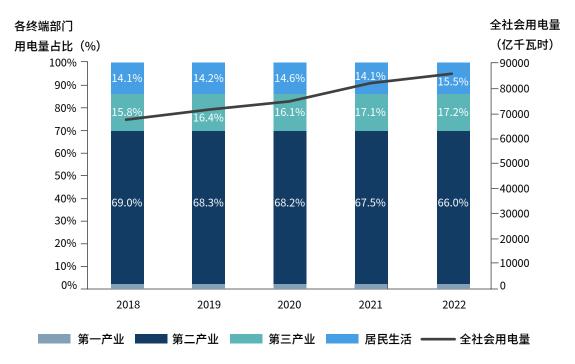
资料来源: 落基山研究所整理

## 1.3 工业是需求侧灵活性的重要潜力来源

**工业负荷基数大、调节潜力高,是电力系统需求侧灵活性挖掘的重要来源**。电力需求侧用户主要包括工业、商 业、居民住宅等部门;,而可参与需求响应的范围更为广泛,包括微电网、分布式智能电网、虚拟电厂、电动汽车 充电设施、用户侧源网荷储一体化聚合等新型负荷侧资源 。在各类用户中,作为我国国民经济的命脉,工业用户 具有最高的电力消费占比,是我国国民经济的命脉(图表3)。据中国统计年鉴显示,2022年,我国全部工业增 加值突破40万亿元大关,占GDP比重达到33.2%,工业用电量达到57001亿千瓦时,在全社会用电量占比高达 66%,远超过商业及居民用户。伴随着工业经济不断发展和部分工业通过电气化实现绿色低碳升级,工业部门用 电量将持续增加。除了用电量基数巨大外,我国工业负荷结构丰富,负荷可调节潜力巨大、可操作性高: 根据中 国电力科学研究院的调研分析,我国削峰潜力、填谷潜力排名前15的行业均属工业领域,主要集中在水泥、钢 铁、铁合金、碳化硅、电解铝、电解镁等行业,同时以水泥、电解类、钢铁为代表的电价敏感型行业参与电力需

求响应的收益显著。在组织管理方面,面向工业用户的单体沟通成本低,通过资源普查、可调节性评估等可以筛 选出有限数量、高品质的工业需求响应资源,通过开展定向的、常态化的工业响应业务延伸,完成削峰填谷、新 能源消纳等典型电网调节场景。

#### 图表3 我国各类电力用户的用电量占比



数据来源:中国统计年鉴2022,落基山研究所

因此,开发工业需求侧灵活性对于保障我国电力系统稳定可靠具有重要意义。虽然我国从上世纪90年代开始引入 电力需求侧管理,但之前主要依靠计划调度模式。目前有序用电的优先级制定较为粗糙,工业企业负荷往往被强 制性的拉闸限电,导致停工停产、造成经济损失,电力系统对工业负荷主动响应能力的挖掘尚不充分。近年来, 伴随着碳达峰碳中和、新型电力系统等目标的提出,实现需求侧的可观可控、弹性地参与电力平衡已成为电力系 统的建设重点之一,已有多个省份开始需求响应、虚拟电厂等实践试点。而且,**信息技术发展与电力市场化改革** 为工业需求侧灵活性的新一轮开发提供了重要技术支撑与市场条件。

- ・从技术角度而言,随着能源数字化战略的实施,工业企业逐步形成"感知-传输-计算-控制"一体化的独特优 势,全面赋能工业精益生产的同时,也为节能降碳、参与电网互动间接赋能。比如钢铁行业提出了"超级自 动化、极致柔性"、"极致能效"等行业发展目标。随着工业互联网与能源互联网建设的深入推进及融合, 基于模型和数据联合驱动的方法将充分考虑生产运行过程中电参数和非电参数的耦合关系,通过实际生产、 安全和经济等约束的等价边界量化,可实现实际生产工况中柔性负荷的解耦,实现温控类、电解类、球磨 类、广义储能类等可调节负荷资源的时空特性精准挖掘。
- ・从市场角度而言,随着电力市场建设的逐步完善,需求侧资源也被赋予更重要的市场主体地位。根据2023年 发布的《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》,电网企业将加快构建可用、可控的需求响应资源库,符合

电力市场准入要求的需求响应各类主体可常态化参与电能量和辅助服务市场交易,支持需求响应主体纳入容量机 制范围,建立并完善与电力市场衔接的需求响应价格机制。这意味着工业企业不仅可以通过移峰填谷、优化用电 行为在电能量市场节约用电成本,还可以直接或间接通过负荷聚合商、售电公司、虚拟电厂运营商、综合能源服 务商等电力需求侧管理服务机构主动参与辅助服务市场、容量机制、需求响应机制来维护电力系统稳定运行。现 有的需求响应资金主要是源于财政专项资金、省间可再生能源交易差价盈余、季节性尖峰电价、可再生能源消纳 补贴、现货市场平衡资金及辅助服务费用等,未来有望纳入到输配电价的系统运行费用中。电力市场化改革为工 业企业开发和利用需求侧灵活性提供了更多的经济激励手段,有望充分调动企业参与需求侧管理的积极性。

## 1.4 本报告研究目的

基于以上背景,落基山研究所(RMI)需求侧灵活性系列报告首先将重点放在工业部门,本篇报告及后续的系列 行业报告将着重探讨开发工业需求侧灵活性的技术层面核心问题,即各类工业生产环节的负荷可调节潜力。只有 先明确各环节的负荷可调节特征,才能进一步通过市场机制设计,充分发挥灵活性潜力。因此,本系列报告将基 于国内外现有研究和实践,结合专家访谈和企业调研,总结梳理工业需求侧灵活性的发展现状,识别工业需求侧 灵活性的主要来源和潜力,探讨工业需求侧灵活性开发的技术、经济和管理挑战,从而助力工业需求侧灵活性在 保障电力系统可靠性和稳定性、促进电力系统低碳化进程中发挥重要作用。

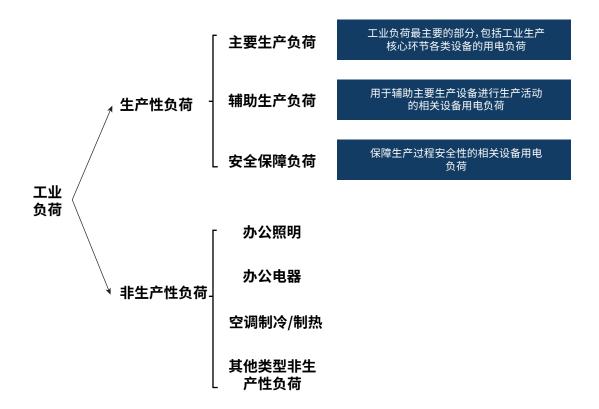
## 二、工业需求侧灵活性的主要来源及其潜力

## 2.1 工业负荷的基本分类

首先,需了解工业生产过程中的各类负荷特点,才能进一步挖掘负荷调整空间,进而做出合理的需求响应决策。

· 从生产功能角度而言,工业负荷可分为生产性负荷和非生产性负荷(图表4)。生产性负荷是指工业生产过程中,由于生产设备驱动、电加热或者电化学过程而消耗的电力。生产性负荷又可分为三类:主要生产负荷、辅助生产负荷、安全保障负荷。对于生产性负荷而言,其可调节潜力取决于各工业用户的终端设备功率、设备使用频次、保留负荷等因素。而非生产性负荷是指企业用于办公照明、办公电器、空调制冷、制热等功能的辅助性负荷。由于各类工业的生产工艺不同,主要用电设备及其负荷占比均有较大差异。通常情况下,生产性负荷是工业进行负荷调节的最主要来源。

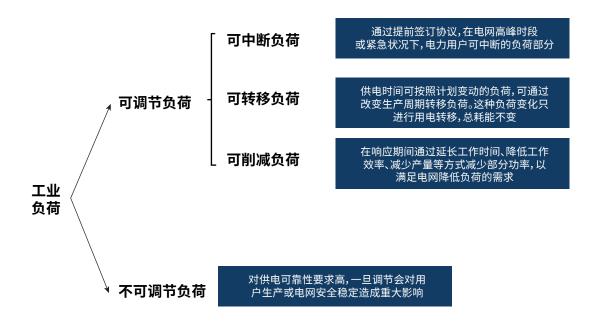
### 图表4 工业负荷按功能分类一览



资源来源:中国电力科学研究院,落基山研究所

· 从需求响应策略角度而言,工业负荷可分为可调节负荷和不可调节负荷,而可调节负荷又包括了可中断负 **荷、可转移负荷和可削减负荷(图表5)**。不可调节负荷通常对供电的可靠性要求高,一旦改变其用电行 为,会对用户生产或电网安全造成重大影响,因此不能轻易调节。可中断负荷是指通过签订协议,在电网高 峰时段或紧急情况下,工业用户可以暂时中断部分负荷需求。这种方式通常具有分钟级的灵活性,并且能够 快速响应电力系统的需求。可转移负荷是指工业用户在计划安排下可以灵活调整用电时间,但总耗能保持不 变;可调整负荷是指工业用户通过降低部分功率来满足电力系统降低负荷的要求。负荷转移和负荷削减两种 方式需要用户频繁进行开关设备的调整,通常适用于小时级和日内时间尺度的调节。

#### 图表5 工业负荷按调节方式分类一览



资源来源:中国电力科学研究院,落基山研究所

## 2.2 不同工业进行负荷调节的方式

根据工艺流程特点,工业可分为连续型生产工业和非连续型生产工业,分别对应差异化的需求响应策略 🖰 连续型 生产工业,也称为流程性生产工业,是指物料均匀、连续地按一定工艺顺序流动,在流动中不断改变形态和性 能,最后形成产品的生产。典型连续型生产工业包括化工、钢铁、铝生产等。由于其生产工艺的连续性,通常需 要相对稳定的负荷供应,同时对供配电的安全性和可靠性要求较高,一般情况下适合于通过负荷转移和负荷削减 来提供灵活性。非连续型工业,也称为离散型工业,是指单个的、可用特定的单位(如台、件等,而非重量或体 积)计数的产品的生产。这类工艺的特点将产品生产过程分解成多个生产单元,最后组装成品。这类工业负荷可 调节性相对更高,调节方式选择更为灵活,典型非连续型生产工业包括食品、机械设备生产等。

不同工业可通过调节生产温度、生产速度、输入电流或输入电压等运行状态实现负荷调节。通过温控方式调节负 荷的典型工业是钢铁行业:例如在炼钢过程中,通过调整钢铁精炼炉的测温加料时间、高温精炼时间、升温速 率、降温速率等,来实现生产负荷的调节。通过调整电流电压来调节负荷的典型工业是电解铝行业:企业通过自 动控制系统,在不中断熔炼炉的情况下,根据外生电力的可用性实时改变功耗; 当电力供应不足/过剩时,电解槽 中的智能熔炼罐会降低/增加输入电压,也可通过对不同电解槽的启停,在短时间内产生较大的负荷变化来提供灵 活性。

除了通过自身负荷调节外,一些大型工业可以通过自有发电资源的方式参与需求响应。工业用户可通过自备电厂 供电替代电网输电来降低电网负荷的需求,或者通过分布式备用电池来参与需求响应,提供需求侧灵活性。例 如,根据Global Energy Monitor数据,中国在运自备煤电厂装机共计超过130GW,占所有在运煤电装机的 12.0%, 主要集中在铝(约76GW)、化工(约26GW)、钢铁(约10GW)等工业部门。可见,自备电厂也是一 类不容忽视的提供工业需求侧灵活性的重要途径。工业行业在低碳转型发展过程中,企业的自备电厂转型升级也 迫在眉睫,除了传统煤电机组向高效环保升级外,投资可再生能源和储能可能是更为长远的路径,有利于实现电 力的清洁化与低碳化,并规避化石燃料价格的波动风险,同时也为电网提供了更多的零碳灵活性来源。

## 2.3 典型工业需求侧灵活性来源及其潜力

不同类型工业的主要负荷调节设备、参与需求响应的时间尺度以及响应潜力(即可调负荷占比)均有明显差 异""。图表6展示了一些典型工业的相关研究与实践情况。在政策、技术、补贴等理想条件下,纺织行业最高可 实现35%左右的响应潜力,电解铝最大可调节负荷比例约22%,钢铁行业也能实现最高约20%的调节潜力,水 泥、玻璃、设备制造等行业的响应潜力也均在20%以上3。

#### 图表6 典型工业需求侧灵活性的主要调控设备、响应时间及响应潜力

工业类型	主要调控设备	响应时间			n 4 ph- \4+ _1_
上业 <u>类型</u>		准备时间	响应时长	恢复投运时间 *	响应潜力
电解铝	电解槽、自备电厂	2h(铝电解槽) ↓ s min 1h 2h 4h 8h	1-2h	2h(铝电解槽) ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20%
钢铁 (炼钢)	电弧炉、轧钢生产线、自备电厂	每班次(轧钢) 	0.5-1h	每班次(轧钢) s min 1h 2h 4h 8h 니 10-30min(电炉)	20%
铁合金	矿热炉、电弧炉、 还原炉等	1-2h	0.5-4h s min 1h 2h 4h 8h	1-2h	30%
水泥	回转窑、立窑等	1-2h	0.5-2h	1-2h	24%
纺织	织布机、加弹机等	0.5-1h	0.5-4h s min 1h 2h 4h 8h	0.5-1h 	35%
玻璃	空压机、退火窑、 玻璃熔窑、冷端玻 璃切割机	0.5-2h	0.5-3h 	0.5-2h    s min 1h 2h 4h 8h	25%
设备制造	溶化炉、热处理炉、 高频炉等	1-2h	0.5-3h	1-2h    s min 1h 2h 4h 8h	20%

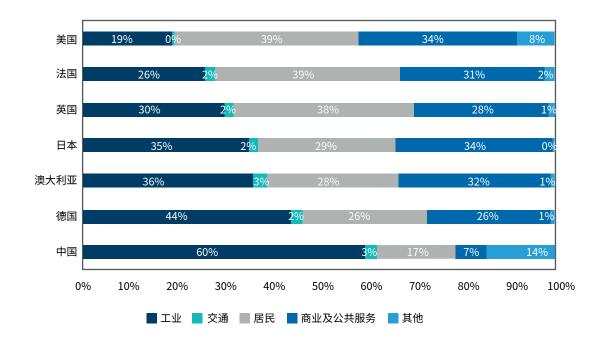
资源来源:国网电力科学研究院程元等<sup>°</sup>,中国电力科学研究院,落基山研究所 \*恢复投运是指从受一定调节的运行状态恢复到正常运行的状态,而非从中断状态恢复至运行状态

## 三、全球工业需求侧灵活性探索与实践

## 3.1 全球工业需求侧灵活性实践

工业的需求侧灵活性潜力挖掘在全球各国均具有重要意义。图表7展示了中国与其他典型国家的电力终端消费结 构。其中,除了中国具有最高的工业电力消费占比(60%)之外,德国的工业终端电力消费占比也达到了44%。 为了实现到2030年可再生能源发电比例达到80%的目标,德国已开始大量挖掘需求侧灵活性资源,据统计,德国 工业需求响应潜力可达10GW,约占全国最大负荷的13%<sup>13</sup>。对于美国而言,尽管其工业用户电力消费占比仅为 19%,但根据美国环境署统计,2021年美国通过需求响应机制实现削峰12GW,其中工业用户贡献了45.6%,充 分体现出工业用户挖掘灵活性的优越性。

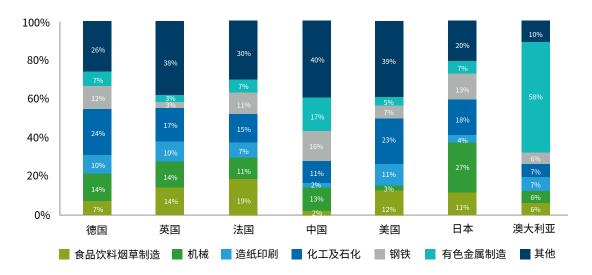
#### 图表7 2020年部分国家分部门电力消费结构



数据来源:国际能源署IEA,落基山研究所

由于产业结构和技术水平的差异,不同国家的工业需求侧灵活性潜力及重点行业有所不同。图表8展示了七个国 家典型工业终端用电占比。可以看出,中国、德国和日本的钢铁用电占比较高,钢铁行业需求侧灵活性潜力的开 发需求尤为迫切。而对于澳大利亚而言,有色金属制造的用电占比更高,其负荷调节的潜力开发更为重要。此 外,食品生产制造在法、英、美等发达国家也有明显占比。

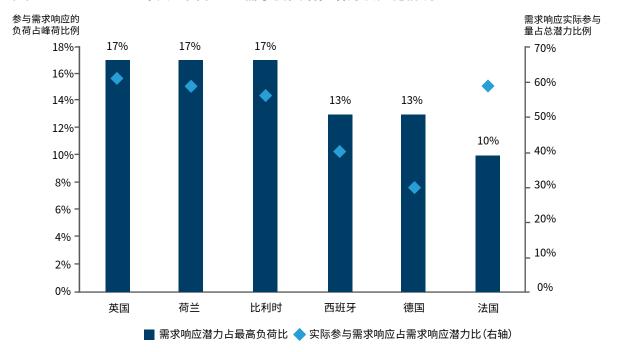
## 图表8 各国不同工业电力消费在总消费占比



数据来源:中国电力统计年鉴,欧洲输电系统运营商联盟TenneT <sup>14</sup>,美国能源信息署,日本电力公司联盟,澳大利亚气候变化、能源、环境和水部,落基山研究所

**从实践来看,欧洲一些发达国家已在工业需求侧灵活性挖掘方面有显著进展**。图表9展示了欧洲6个典型国家工业可参与需求响应的负荷潜力占全社会最大负荷的占比。其中,英国、荷兰和比利时的工业需求响应潜力占比最高,占比均为17%,而其他国家该占比也都超过10%。从实际参与需求响应的情况来看,目前英国、法国、荷兰的需求响应实际参与量已开发至潜力的60%左右,而德国和西班牙的开发程度相对较低,仅为30%<sup>16</sup>。

## 图表9 2020年典型国家工业需求侧灵活性潜力及实施情况



数据来源: 欧洲输电系统运营商联盟TenneT<sup>1</sup>, 落基山研究所

## 3.2 中国工业需求侧灵活性实践

尽管目前中国工业需求侧灵活性的发展仍处于起步阶段,但从近期发展趋势来看,工业生产技术和信息技术的进步、需求响应相关机制和配套政策的完善都为规模化开发工业需求侧灵活性潜力创造了条件<sup>15</sup>。

- ·技术层面,近年来部分工业设备和工艺流程的更新换代有助于需求侧灵活性实践,如电解铝企业更新二极管整流器为负荷调节范围更广的晶闸管整流器,钢铁行业推广电力负荷占比更高的的短流程技术以替代长流程技术等。而且,近年来大数据、云计算、工业互联网等信息技术的发展使得工业能更加精准地实施负荷调节,并与电网实时互动。
- ·在市场和政策机制层面,2021年,国家能源局发文提出贯彻落实《2030年前碳达峰行动方案》有关要求,全面推动高载能工业负荷、工商业可调节负荷、新型储能等参与辅助服务市场,激励需求侧主动参与系统调节,减少系统运行峰谷差。近年来全国多个省份陆续出台了需求响应专项政策并开展了相应的实践,图表10总结了目前各省需求响应政策的参与主体、响应能力目标、响应方式及价格机制等。工业作为主要的电力用户,在各省均被纳入到需求响应的主要参与主体中,以通过经济激励推动工业企业挖掘需求侧灵活性潜力。从补贴机制来看,各省份针对多种响应方式设置了不同的响应价格和补贴标准,以充分激励各类型用户参与需求响应。



## 图表10 典型省份现有工商业需求响应政策汇总

	政策文件	发布时间	参与主体	响应能力目标	响应方式	价格机制
云南	《2023年云南省电 力需求响应方案》	2023.04.27	工业负荷、工商业可中断 负荷、建筑楼宇负荷、用 户侧储能负荷、电动汽车 充电设施、分布式发电、 智慧用电设施等		市场化邀约包括削峰类、填谷 类两类;按照响应时序,可将其 划分为邀约型、实时型两类	(一)实时型响应补贴:全年统一价格2.5元/千瓦时; (二)邀约型响应补贴:削峰类响应补贴标准的上下限分别为5元 /千瓦时和0元/千瓦时;填谷类响应上下限起步阶段分别暂定为 1元/千瓦时和0元/千瓦时
甘肃	《甘肃电力需求响应市 场实施方案(试行)》	2023.04.21	电力用户、负荷聚合商等	最大响应能力不低 于 100 万千瓦	约定(日前)响应和应急(日内)响 应	采用"日清月结"结算模式,补偿费用按照代理协议约定 条款发放给电力用户和负荷聚合商
四川	《2023年四川省电力需 求侧市场化响应实施 方案》	2023.04.19	10千伏及以上工商业电 力用户、负荷聚合商等	最大用电负荷5%左 右的需求侧市场化响 应能力		单个交易单元只能申报一个响应价格,响应价格的上下限分别 为 P1和P2。具体限价标准由省级价格主管部门另行明确
河北	《河北省发展和改革委 员会关于进一步做好 河北南部电网电力需 求响应市场运营工作 的通知》	2023.04.06	电力用户、负荷聚合商两类		日前响应、日内响应、实时响应	(一)当负荷响应率低于80%时,响应无效,不予补贴; (二)当负荷响应率在80%-120%之间时,按有效响应电量乘以出 清价格进行补贴; (三)当负荷响应率高于120%时,120%-150%部分按有效响应 电量乘以出清价格的0.5倍进行补贴;150%以上部分,不予补贴
贵州	《贵州省电力需求响 应实施方案(征求意 见稿)》	2023.04.07	电力用户、负荷聚合商等	力争电力需求响应交 易规模占年度最大用 电负荷的5%左右	按照对负荷曲线的影响,需求响应包 括削峰类、填谷类两类;按照响应时序 ,可将其划分为邀约型、实时型两类	响应价格上限为1.5元/千瓦时。交易中心会同调度中心结 合每日需求响应出清结果,做好需求响应分摊费用结算
天津	《天津市2023年春节 期间电力需求响应实 施细则》	2023.01.11	电力用户、负荷聚 合商、虚拟电厂等	<del></del>	邀约型填谷需求响应、邀约型削峰 需求响应、紧急型削峰需求响应	邀约型填谷需求响应为固定补偿模式,价格为1元/千瓦时
江苏	《江苏省电力需求响 应实施细则(修订征 求意见稿)》	2022.10.24	工商业用户、居民用户、负荷聚合商等	形成最大用电负荷5% 以上的需求响应能力	约定需求响应和实时需求响应	约定响应谷时段可再生能源消纳补贴为5元/千瓦,平时段 补贴为8元/千瓦
宁夏	《宁夏回族自治区电力 需求响应管理办法》	2022.06.14	电力用户、负荷聚合商等	最大响应能力不超过 最大用电负荷的5%	削峰需求响应和填谷需求响应	1.削峰响应按照2元/千瓦时补贴,补偿费用按照有效响应量 、补贴系数、补偿价格、响应时长计算得出 2.填谷响应按照0.35元/千瓦时补贴,补偿费用按照有效响应 量、补贴系数、补偿价格、响应时长计算得出
山东	《2022年全省电力可 中断负荷需求响应工 作方案》	2022.06.07	独立用户、负荷聚合 商、虚拟电厂运营商、 储能运营商	力争全省电力需求响应 削峰、填谷资源分别达到 600万千瓦、200万千瓦 以上,实际削峰、填谷能 力分别达到200万千瓦、 100万千瓦以上	紧急型需求响应和经济型需求响应	根据需求响应类型分档,第一档每响应1千瓦负荷不超过2元 /(千瓦·月)

rmi.org  $I_{18}$ 

## 图表10 典型省份现有工商业需求响应政策汇总

	政策文件	发布时间	参与主体	响应能力目标	响应方式	价格机制
广东	《广东省市场化需求响 应实施细则(试行)》	2022.04.16	高载能工业负荷、工商 业可中断负荷、用户侧 储能、电动汽车充电设 施等	逐步形成年度最 大用电负荷5%的 响应能力	日前邀约需求响应等	现阶段响应价格为单段报价,具有条件后可启用多段报价。日前邀约申报价格上限为3500元/MWh;日前邀约虚拟电厂申报可响应容量下限0.3MW,可中断负荷申报价格上限为5000元/MWh;可中断负荷虚拟电厂申报可响应容量下限为0.3MW
安徽	《安徽省电力需求响 应实施方案(试行)》	2022.01.19	电力用户、负荷聚合商等	逐步形成全省最大用 电负荷5%左右的需求 响应能力	约时需求响应、实时需求响应	对通过需求响应临时减少(增加)的用电负荷执行响应补偿价格;对 纳入需求响应资源库,可供随时调用的约时和实时备用容量,按月 执行容量补偿价格,并根据需求淡旺季进行差异化调整
广西	《广西电力市场化需求 响应实施方案(试行)》	2021.12.28	电力用户、负荷聚合商等		邀约型需求响应	暂定响应价格上限为2.5元/kWh,电力用户月度分摊需 求响应市场损益上限为0.01元/kWh
湖北	《湖北省电力需求响 应实施方案(试行)》	2021.06.18	工业用户、负荷聚合商、储能资源用户等	形成湖北电网最大用电负 荷3%-5%左右的需求响 应能力	日前响应邀约、日内响应邀约	有效响应补贴=有效响应量×响应系数×实际补贴标准,实际 补贴标准按实际有效需求响应用户中报价最高值确定
浙江	《关于开展2021年度 电力需求响应工作的 通知》	2021.06.08	电力用户、负荷聚合商等	全市储备用户侧削峰响应 能力20万千瓦以上,具备 最高用电负荷5%以上的 削峰能力	削峰需求响应:日前、小时级、分钟级、秒 级;填谷需求响应	电量补贴最高4元/kWh,容量补贴根据响应类型且仅在旺季予以补贴
陕西	《2021年陕西省电力 需求响应工作方案》	2021.05.21	电力用户、负荷聚合商等		紧急型需求响应和经济型需求响应	经济型响应(非居民)、经济型响应(居民)、紧急型响应 三类根据调控时间有不同的需求响应补贴标准
福建	《福建省电力需求响 应实施方案(试行)》	2022.05.24	电力用户、负荷聚合 商、储能资源用户、充 电桩运营用户	形成占福建电网最大 用电负荷5%左右的需 求响应能力	激励型需求响应:日内实时响应和日前邀约	根据用户实际响应量占申报响应量的比例,设置补贴价格系数
重庆	《2022年重庆电网需求 响应实施方案(试行)》	2022.04.30	电力用户、负荷聚合商等		约定需求响应和实时需求响应	需求响应补贴标准参考国内其它省市执行情况,并兼顾重庆市 负荷特点,在削峰响应方面,工业用户为10元/千瓦/次,商业、移 动通信基站、用户侧备用电源、数据中心、电动汽车充换电站、冻 库等用户为15元/千瓦/次;填谷响应为1元/千瓦/次

资源来源: 落基山研究所整理

电力需求侧灵活性系列:工业灵活性潜力及发展现状

## 四、需求侧灵活性挑战与工作展望

## 4.1 工业需求侧灵活性发展面临的挑战

尽管工业需求侧存在较大的灵活性资源,但其潜力的挖掘依然面临着来自技术限制、经济和市场监管、企业管理 等多方面的挑战,这些挑战共同导致了当前工业需求侧灵活性资源开发的不充分16.17。

### 4.1.1 技术限制挑战

工业开发需求侧灵活性的最基本条件是明确各环节的可调节负荷量,并且掌握其进行需求响应的速度、持续时间 以及恢复速度,进而做出最优的需求响应决策。然而,当前许多工业生产设备的信息化、自动化及智能化程度仍 然不足,具备联网能力的设备信息交互接口不统一,这些技术缺失使得工业的灵活性潜力难以得到准确评估 "。

进一步,如果智能设备无法捕捉体现生产特性的关键参数,或者没有较好的定量分析及优化模型利用读取的关键 数据,则无法有效识别出工业需求侧的负荷调节空间,进而限制了灵活性资源的应用,导致无法有效地扩展和调 节需求响应资源 '。一方面,对于一些连续型生产企业,其生产过程的负荷稳定性尤为重要,如果不能精准把控负 荷调整时间和范围,则会面临严重的安全风险。另一方面,对于一些生产工艺较为复杂的工业,其负荷的调节必 须满足相关生产约束条件,而约束往往表现为非电力变量。因此,需要考虑工业负荷生产阶段的其他特征,并将 这些特征与工业负荷调节联系起来,建立符合生产实际的可控特征模型。

此外,技术标准的缺失也是导致工业需求侧灵活性开发较难的重要原因。许多工业并不熟悉保障生产质量与安全 的基线负荷,并且对响应时间并不熟悉,因而导致参与需求响应存在困难。同时,考虑到一些工业工艺和技术的 差异,其需求响应的能力及特性也存在异质性,从而使得成功参与需求响应的企业经验缺乏可转移性,进一步增 加了工业调节负荷的难度。

## 4.1.2 经济和市场监管挑战

除了技术挑战之外,不可持续性的商业模式与经济激励也是工业需求侧灵活性发展较慢的重要原因管。从成本来 看,需求侧灵活性的挖掘需要大量技术与设备投资,同时增加额外的运营成本。而这些成本通常难以获得融资, 导致需求响应工作推进困难。此外,负荷的频繁调节可能使主要生产设备性能和效率降低,从而造成额外的能源 损失并降低设备使用寿命。从效益来看,部分工业的电力成本在总生产成本中占比较低,仅仅通过移峰填谷、节 约用电成本并不能带来显著的效益改善,同时还会面临产量无法交付、产品质量降低等风险。

目前较低的需求响应成本收益也反映了相关市场机制的缺位 2。从电能量市场层面,目前只有山西、山东、广东、 甘肃、蒙西等少数省份(市、区)现货市场进入长周期连续试运行,大部分省份的工业用户并不能直接感受到实 时的电价变化,降低了工业用户开发自身用电灵活性、优化用电行为的积极性。此外,尽管目前已超过十八个省 份(市、区)发布了电力需求响应相关实施方案,但多为迎峰度夏期间配套有序用电的应急机制,响应总量和补 偿标准每年更新,无法对工业企业开发需求侧灵活性提供稳定的投资信号。此外,当前工业参与需求侧灵活性缺 乏统一完善的监管框架,难以实施工业需求侧灵活性的评估标准和验证程序,相关需求响应市场方式(交易品

种)仍需针对不同工业负荷特征、响应速率、响应可靠性等关键参数进行精细化设计。

可观的是,少数电力市场化改革发展较快的省份已推出了针对需求响应的市场机制并开始常态化运行,如广东自 2022年4月陆续开展日前邀约、可中断负荷、直控型可调节负荷竞争性配置等市场化需求响应交易品种;甘肃、 福建等省份也发布了相关试行政策文件,这为开发工业需求侧灵活性带来了更多机遇。

### 4.1.3 企业管理挑战

除了技术、经济和市场监管之外,工业实施需求侧灵活性还存在企业管理方面的挑战。一方面,企业管理人员可能因为缺乏对于需求侧灵活性的认知,而对开展需求响应实践产生抗拒心理。另一方面,需求响应实践需要安排特定人员深入了解相关专业知识,并且对工人的操作程序提出了额外要求,这都易让员工因需要学习新技术而形成抵触心理。这些隐形障碍也会给工业需求侧灵活性开发带来困难。

## 4.2 推动工业需求侧灵活性的近期工作展望

对我国而言,帮助工业提高对于需求侧灵活性的认知,明确参与需求响应的战略意义和未来经济潜力,加快推进工业生产过程的信息化、智能化建设并帮助识别工业灵活性潜力,是当前亟需解决的重要课题。因此,本系列报告旨在基于我国发展现状,总结工业负荷及用电量特征,了解工业需求侧灵活性的调节潜力,并进一步明确当前面临的主要挑战。随后,我们还将通过一系列的行业子报告,深入调研需求侧灵活性资源较为丰富的主要工业行业(电解铝、钢铁等)的开发潜力及其主要技术手段,各类潜力的响应特征及其潜在影响,以及开发灵活性亟需解决的问题。同时,我们还将展示全球各类工业需求侧灵活性发展的优秀案例,总结可供企业参考的实践经验。

近年来,全国层面及各省发布了一系列推动需求侧管理进程的政策,为工业发展需求侧灵活性创造了空间<sup>23</sup>。随着工业信息技术的发展,信息技术、人工智能技术、工业物联网技术等与传统工业控制系统、能源管理系统的融合,为工业开发需求侧灵活性潜力提供了必要的数据和技术支撑。此外,随着电力市场建设的推进,需求响应的市场机制将会逐步完善,这为工业参与需求响应提供了经济激励。工业企业精益生产、节能降碳、低碳绿色发展、参与电网互动是一个系统工程,政府层面也应从发改、能源、工信、环保等多部门联合进行顶层设计,从多个维度促进后工业时代企业各维度的高质量发展。相信在不远的将来,工业的需求侧灵活性将在保障电力系统稳定性、助力电力脱碳中发挥重要作用。

## 参考文献

- 国务院. 2030年前碳达峰行动方案. (2021).
- 2 国家能源局等.新型电力系统发展蓝皮书. (2023).
- 3 AKRAMI, A., DOOSTIZADEH, M. & AMINIFAR, F. Power system flexibility: an overview of emergence to evolution. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 7, 987-1007 (2019).
- 国家发展改革委.电力需求侧管理办法(征求意见稿).(2023).
- 5 傅质馨, 李紫嫣, 朱俊澎 袁越. "双碳"目标下需求侧管理机制研究综述及展望. 电力信息与通信技术 21, 1-12 (2023).
- 6 Siddiquee, S. M. S., Howard, B., Bruton, K., Brem, A. & O' Sullivan, D. T. J. Progress in Demand Response and It's Industrial Applications. Frontiers in Energy Research 9, (2021).
- 国家能源局.关于加强新型电力系统稳定工作的指导意见(征求意见稿). (2023).
- 中国电力圆桌项目课题组.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. (2020).
- 9 程元, 饶尧丁胜. 工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析. 能源工程 43, 72-78 (2023).
- 10 Zhang, Q. & Grossmann, I. E. Enterprise-wide optimization for industrial demand side manage ment: Fundamentals, advances, and perspectives. Chemical Engineering Research and Design 116, 114-131 (2016).
- 11 Bao, P., Zhang, W., Cheng, D. & Liu, M. Hierarchical control of aluminum smelter loads for primary frequency support considering control cost. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 122, 106202 (2020).
- 12 Shafie-khah, M. et al. Comprehensive Review of the Recent Advances in Industrial and Commercial DR. IEEE Transactions on Industrial Informatics 15, 3757–3771 (2019).
- 13 German Energy Agency. Making money with smart electricity consumption. (2018).
- 14 TenneT. Unlocking Industrial Demand Side Response. (2021).
- 15 Chen, Y., Zhang, L., Xu, P. & Di Gangi, A. Electricity demand response schemes in China: Pilot study and future outlook. Energy 224, 120042 (2021).
- 16 Lindberg, C.-F., Zahedian, K., Solgi, M. & Lindkvist, R. Potential and Limitations for Industrial Demand Side Management. Energy Procedia 61, 415–418 (2014).
- 17 Shoreh, M. H., Siano, P., Shafie-khah, M., Loia, V. & Catalão, J. P. S. A survey of industrial applica tions of Demand Response. Electric Power Systems Research 141, 31-49 (2016).
- 18 宋美琴, 王俐英, 曾鸣. 基于用电行为特征的工业用户需求响应潜力研究. 电力科学与工程 39, 1-7 (2023).
- 19 Ramin, D., Spinelli, S. & Brusaferri, A. Demand-side management via optimal production scheduling in power-intensive industries: The case of metal casting process. Applied Energy 225, 622-636 (2018).
- 20 Leinauer, C. et al. Obstacles to demand response: Why industrial companies do not adapt their power consumption to volatile power generation. Energy Policy 165, 112876 (2022).
- 21 Golmohamadi, H. Demand-side management in industrial sector: A review of heavy industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 156, 111963 (2022).
- **22** 刘航, 马梓萌 王嘉巍. 需求响应资源调节潜力分析综述. 吉林电力 50, 5-8 (2022).

刘子屹,谢俊,刘雨菁,宫飞翔等. 电力需求侧灵活性系列: 工业灵活性潜力及发展现状,落基山研究所,2023, https://rmi.org.cn/insights/industrial-demand-side-flexibility/

RMI重视合作,旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此,我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY SA 4.0 许 可参考、分享和引用我们的工作。https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/







除特别注明,本报告中所有图片均来自iStock。



**RMI Innovation Center** 22830 Two Rivers Road Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2023年9月,落基山研究所版权所有。Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的 注册商标。

