



国家电网
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

电力需求侧灵活性系列： 电解铝行业灵活性潜力概述





关于落基山研究所(RMI)

落基山研究所(RMI), 是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与政府部门、企业、科研机构及创业者协作, 推动全球能源变革, 以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所致力于借助经济可行的市场化手段, 加速能效提升, 推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

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:陈宋宋, 宫飞翔, 王京菊

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:李德智, 李建锋

感谢落基山研究所的李抒苒和闫榕在报告撰写过程中给与的宝贵建议
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: 电解铝行业灵活性潜力概述, 落基山研究所, 2023, <https://rmi.org.cn/insights/dsf-aluminum/>

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。

万 达 中铝科学技术研究院有限公司
李军徽 东北电力大学
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(计量中心)
赵文扬 合肥领航磐云信息科技有限公司

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

作者与鸣谢	3
一、电解铝是工业需求侧灵活性的重要来源	5
1.1 电解铝工业电力消费占比高且灵活性调节理论空间大	5
1.2 绿色低碳转型亟需电解铝需求侧灵活性挖掘	6
1.3 电解铝行业需求侧灵活性相关目标及政策	6
二、电解铝生产工艺特征及负荷调节潜力	8
2.1 电解铝生产工艺流程及主要设备负荷情况	8
2.1.1 电解铝厂的生产系统	8
2.1.2 电解铝生产工艺流程	9
2.1.3 电解铝生产主要设备及负荷占比	9
2.2 电解铝需求侧灵活性来源及其潜力	10
2.3 电解铝需求侧灵活性的实施方案	10
2.3.1 通过调整功率/电压提供灵活性	11
2.3.2 通过电解槽的启停提供灵活性	11
2.3.3 通过自备电厂提供灵活性	11
2.4 电解铝实施负荷调节的关键技术	12
2.4.1 电解铝整流方式	12
2.4.2 工厂自动控制系统	12
三、全球电解铝需求侧灵活性实践	13
3.1 德国电解铝需求侧灵活性实践	13
3.2 云南省电解铝需求侧灵活性实践	15
四、电解铝需求侧灵活性挖掘的挑战与机遇	16
4.1 技术层面	16
4.2 市场层面	16
五、结论与展望	17
参考文献	18

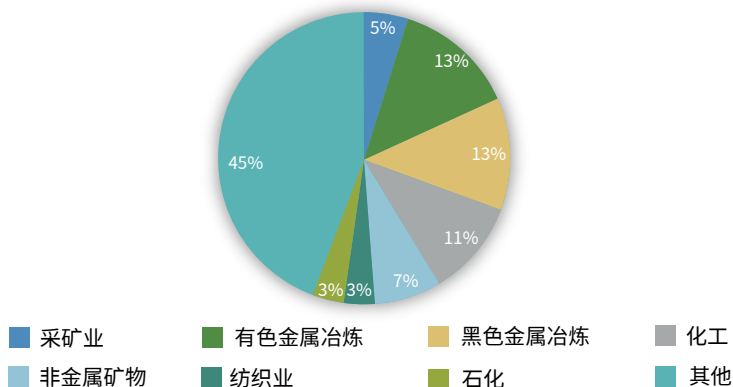
一、电解铝是工业需求侧灵活性的重要来源

1.1 电解铝工业电力消费占比高且灵活性调节理论空间大

铝被广泛应用于国民经济各个领域，不仅是制造业的主要基础材料，也是高新技术和国防建设领域关键的新材料，是用途最广的有色金属。目前，中国铝产品在全球市场占有率快速上升，已成为全球最大的原铝和氧化铝生产国。铝产业链包含铝土矿开采、氧化铝精炼、金属铝冶炼、铝合金生产、铝材以及终端产品制造六个产业环节。其中，通过电解从氧化铝中提炼出金属铝的过程被称为电解铝，是整个铝产业链最重要且耗电量最大的生产环节。据同花顺数据库显示，2022年我国电解铝产量约为4021万吨，总建成年产能累计4526万吨，主要分布在山东（802万吨，17.7%）、内蒙古（661万吨，14.6%）、新疆（618万吨，13.7%）、云南（562万吨，12.4%）、甘肃（307万吨，6.8%）、青海（294万吨，6.5%）等省份。随着“双碳”目标的推进，电解铝厂为实现低碳转型，置换产能逐渐向水电丰富的西南地区 and 风光资源丰富的西北地区转移。

电解铝行业是主要的工业电力消费用户，其需求侧灵活性的挖掘对于保障电力系统稳定运行十分重要。一方面，“十四五”期间随着双碳战略推进和新型电力系统建设，电力供需面临新形势，电网的平衡调节越发关键。夏季冬季电力负荷“双高峰”特征更加显著，新能源并网规模不断扩大，局部地区电力供需矛盾依然突出，电力供需平衡压力和新能源消纳困难叠加并长期存在，亟需进一步发挥电力需求响应在保平衡、促消纳中的重要作用。根据中国电力科学研究院的测算，预计到2025年，不考虑需求侧资源互动，极端情况下，全国将面临约5.62亿千瓦的平衡缺口。随着新能源装机比重增加，西部地区新能源利用率将从95%降到90%以下。依据当前高耗能工业负荷规模估算，全国高耗能工业蕴含的可调潜力约1.08亿千瓦，占电力平衡缺口的19.3%，是重要的电网平衡调节资源。另一方面，电解铝的用电占比较高，蕴含可观的灵活性调节电量基数。2021年，我国电解铝全年用电量占工业总用电量的10%以上，占全社会用电量约7%¹（图表1）。对于电解铝产业较为发达的省份，该占比更高。例如，新疆和青海2021年度有色金属冶炼与压延业用电量占全社会总用电量比例分别高达58.5%和45%²，其中铝业是有色金属冶炼中电力消费占比最高的细分部门，电解铝又是铝生产中耗电最高的环节；“十四五”时期，云南电解铝平均年用电量预计将超过600亿千瓦时，接近云南省年用电量的25%³。因此，在上述背景下，若能充分挖掘电解铝的需求侧灵活性潜力，将会对保障电力系统安全稳定起到重要作用。

图表1 2021年我国工业分行业用电量占比



数据来源：2022年能源统计年鉴

1.2 绿色低碳转型亟需电解铝需求侧灵活性挖掘

目前,在双碳目标及欧盟碳关税政策的推动下,电解铝行业亟需完成用电结构转型。从能效角度来说,近年来电解铝生产能耗指标持续改善,全国平均铝液综合交流电耗从2004年的14795千瓦时/吨降至2020年的13543千瓦时/吨,降幅超过1200千瓦时。然而,目前我国电解铝生产的电力供应仍以火电为主。据中国有色金属工业信息中心主导成立的安泰科公司统计,截止2019年底,我国电解铝用电中火电占86%(其中自备电为65%,网电为21%),水电占10%,风电占2%,太阳能与核电各占1%。到2021年,火电占比降为82%,水电占比上升到16%,核电及其他可再生能源占比仍较少,高火电占比使得电解铝行业依然面临着严峻的减排压力。

在此背景下,电解铝工业的绿色转型需要从电网清洁化和自备电清洁化两方面共同着手,这均对充分开发电解铝负荷的灵活性提出了迫切需求。一方面,随着未来电力供给侧会纳入更多波动性、间歇性可再生能源,电力系统面临着供需两侧的不确定性风险,加大了对系统灵活性的需求。电解铝工业作为电力消费大户且具备可观的理论调节潜力,如果可以通过负荷调节响应电网削峰填谷、调频等需求,将会助力电力系统更加安全稳定地运行。另一方面,伴随着电解铝企业向风、光、水等资源丰富的西部地区转移,企业可以通过投资光伏、风电、小水电等分布式资源进行自产自消,以替代自备火电厂的使用、实现自备电清洁化。但由于这些分布式资源发电波动性强、储能配置成本也较高,电解铝负荷的灵活性将影响分布式供电的可行性和经济性。因此,电解铝行业需求侧灵活性的发展,对于促进行业自身以及整个电力系统的绿色低碳转型都至关重要。

1.3 电解铝行业需求侧灵活性相关目标及政策

近年来,国家陆续推行了相关政策并制定了行业发展目标,直接或间接地促进电解铝的绿色升级和需求侧灵活性发展。2021年10月,国家发改委等五部门联合印发《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》,对钢铁、电解铝、水泥等重点行业 and 数据中心节能降碳及绿色低碳转型提出明确目标任务,到2025年,通过实施节能降碳行动,重点行业达到标杆水平的产能比例超过30%,深挖节能降碳技术潜力;2021年12月,工信部等三部门发布的《“十四五”原材料工业发展规划》提出到2025年电解铝行业碳排放总量下降5%,并促进电解铝行业布局由“煤-电-铝”向“水电、风电等清洁能源-铝”转移,推广高电流密度低能耗铝电解等措施;2022年2月,发改委发布的《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》提出,到2025年电解铝产能达到能效标杆水平的比例超过30%;2022年11月,工信部等发布《有色金属行业碳达峰实施方案》,提出“十五五”期间有色金属行业用能结构大幅改善,电解铝使用可再生能源比例达到30%以上,以确保2030年前有色金属行业实现碳达峰;2022年《“十四五”现代能源体系规划》明确提出电力需求侧响应能力达到最大用电负荷的3%~5%,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,国家发改委修订发布了《电力需求侧管理办法(2023年版)》《电力负荷管理办法(2023年版)》,指出加强高耗能、高排放企业使用绿电的刚性约束,并依据高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平,优先限制能效水平低于基准水平的企业用电需求;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。此外,国家发改委等部门也发布了《工业重点领域能效标杆水平和基准水平(2023年版)》,修订了电解铝行业能效标杆水平和基准水平。从省份来看,许多省份也制定或进一步完善了大工业分时电价以及尖峰电价政策,以鼓励和引导企业错峰生产,由此为包括电解铝在内的工业提供主动挖掘需求侧灵活性的经济激励。例如,江苏省发改委发布《省发展改革委关于进一步完善分时电价政策的通知》,以引导工业电力用户主动错峰、保障民生用电稳定供应、确保电力供需平稳为目标,优化315千伏安及以上的工业用电夏、冬两季尖峰电价。四川、重庆、山西等省份也开始执行新的峰谷电价政策。其他电解铝相关行业政策如图表2所示。

图表2 电解铝行业相关政策

时间	发布单位	政策文件	主要内容
2021.08	国家发改委	《关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知》	完善阶梯电价分档和加价标准，严禁实施优惠电价政策，加强自备电厂管理
2021.10	国务院	《2030年前碳达峰实施方案》	推动有色金属行业碳达峰。巩固化解电解铝过剩产能成果，严格执行产能置换，严控新增产能。推进清洁能源替代，提高水电、风电、太阳能发电等应用比重
2021.10	国家发改委等五部门	《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》	到 2025 年，通过实施节能降碳行动，电解铝、钢铁等重点行业 and 数据中心达到标杆水平的产能比例超过 30%
2021.12	工信部 科学技术部 自然资源部	《“十四五”原材料工业发展规划》	到 2025 年，电解铝行业碳排放总量下降 5%，并促进电解铝行业布局由“煤-电-铝”向“水电、风电等清洁能源-铝”转移，推广高电流密度低能耗铝电解
2022.01	国务院	《“十四五”节能减排综合工作方案》	到 2025 年，通过实施节能降碳行动，钢铁、电解铝等重点行业产能和数据中心达到能效标杆水平的比例超过 30%
2022.01	国家发改委 国家能源局	《“十四五”现代能源体系规划》	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
2022.02	国家发改委	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》	到 2025 年，通过实施节能降碳技术改造，铜、铝等重点产品能效水平进一步提升。电解铝能效标杆水平以上产能比例达到 30%
2022.07	工信部 发改委 生态环境部	《工业领域碳达峰实施方案》	到 2030 年，电解铝使用可再生能源比例提升至 30% 以上
2022.11	工信部 发改委 生态环境部	《有色金属行业碳达峰实施方案》	有色金属行业用能结构大幅改善，电解铝使用可再生能源比例达到 30% 以上，以确保 2030 年前有色金属行业实现碳达峰
2023.03	中国有色金属工业协会	《绿电铝评价及交易导则》	规定绿电铝评价申请主体要求、评价边界、工作流程、材料要求、评价方法、产品标识、证书等内容
2023.09	国家发改委	《电力负荷管理办法(2023年版)》	依据高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平，优先限制能效水平低于基准水平的企业用电需求
		《电力需求侧管理办法(2023年版)》	加强高耗能、高排放企业使用绿电的刚性约束，各地可根据实际情况制定高耗能、高排放企业电力消费中绿电最低占比

资料来源：落基山研究所、中国电力科学研究院整理

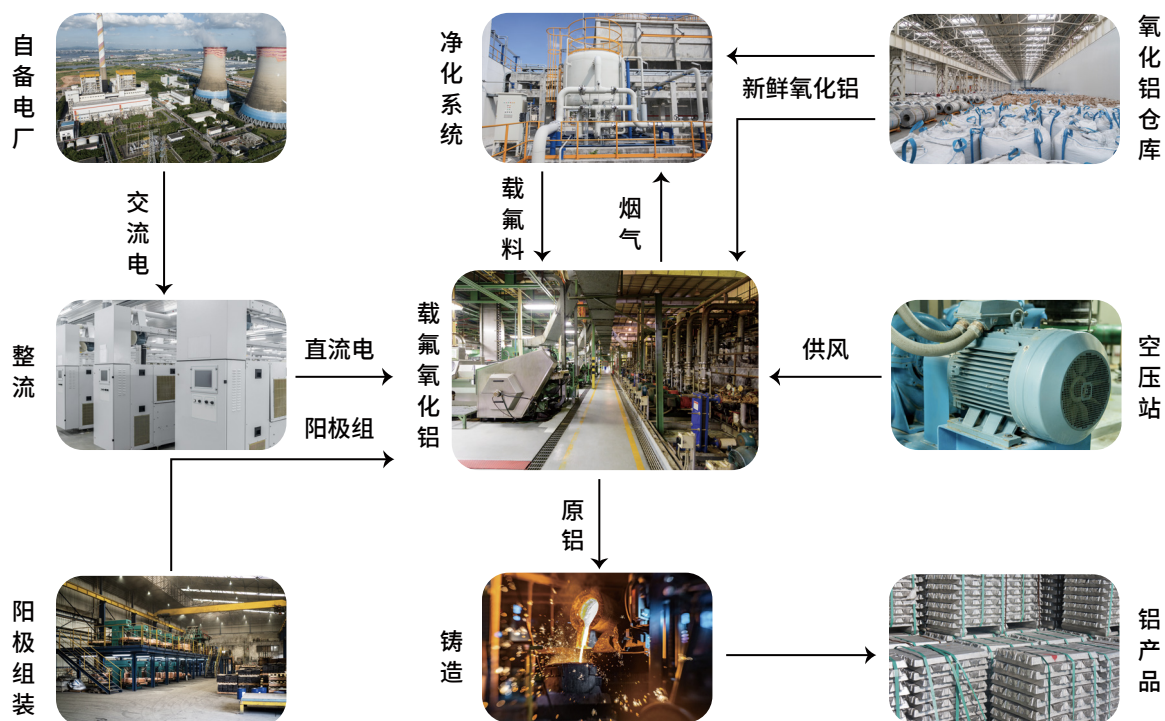
二、电解铝生产工艺特征及负荷调节潜力

2.1 电解铝生产工艺流程及主要设备负荷情况

2.1.1 电解铝厂的生产系统

一个典型的电解铝厂主要包括四大生产系统：动力系统、电解系统、净化系统和阳极组装系统。动力系统主要负责企业内部所有单位的生产和生活用电、用水和用风，并负责电解槽计算机控制系统的维护。电解系统负责生产出合格的铝液。净化系统负责将电解槽排出的烟气收集净化处理，将氧化铝通过浓相、净化、超浓相系统输送到电解分厂的每台电解槽。而阳极组装系统则用于残极处理和阳极组装。各生产系统之间的关系如图表 3 所示。由于铝业的需求侧灵活性主要来源于电解环节，因此下文将重点介绍电解铝生产环节的具体工艺流程。

图表3 电解铝厂各生产系统之间的关系

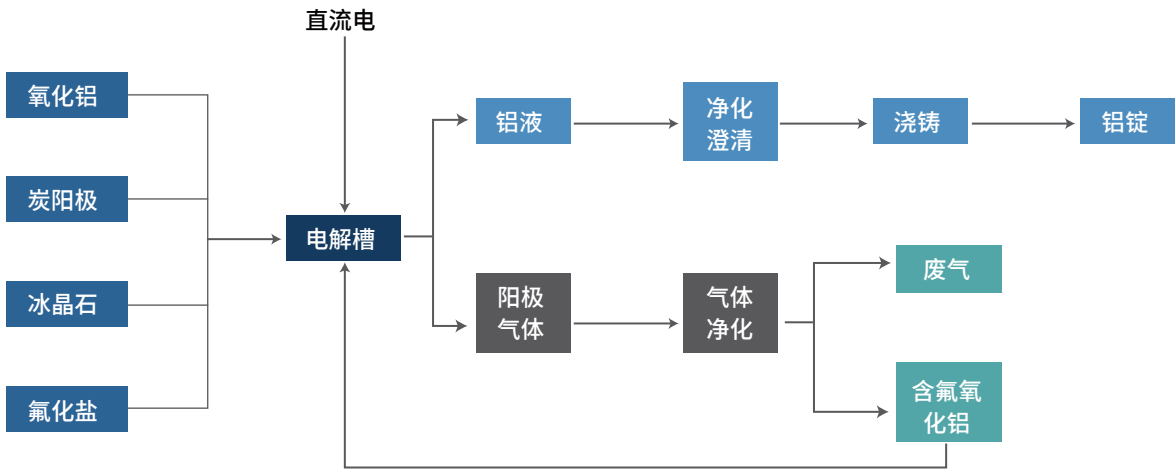


资料来源：中国电力科学研究院，落基山研究所

2.1.2 电解铝生产工艺流程

电解铝的生产采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法，主要是指将铝土矿转化为氧化铝，再用高温熔盐电解生产原铝的过程。整个生产过程以氧化铝为电解质原料，以冰晶石为溶剂，将氧化铝、氟化盐等原辅料分别送入电解槽内。氧化铝溶解在熔融冰晶石熔体中，形成具有良好导电性的均匀熔体。生产采用碳素材料做阴阳两极，当通入直流电后，即在两极上发生电化学反应。整个过程在阳极上产生阳极气体（二氧化碳），阴极上析出液态铝，用真空抬包周期性从电解槽吸出，送铸造分厂铸重熔用铝锭。电化学反应过程中，阳极不断消耗，阳极母线不断下降，要进行阳极更换和母线提升作业，另外通过计算机控制，通过超浓相输送向电解槽定时添加氧化铝，保证生产连续平稳进行。由于在整个电解铝生产过程中需要有持续稳定的电流供应，因此电解槽负荷率通常维持在 95-98% 左右。具体生产流程如图表 4 所示。

图表4 电解铝生产工艺流程



资料来源：落基山研究所整理

2.1.3 电解铝生产主要设备及负荷占比

电解铝生产的负荷可分为生产性负荷和非生产性负荷。生产性负荷是指铝冶炼过程中，由于生产设备驱动、电加热或者电化学反应而消耗的电力。生产性负荷又可分为三类：主要生产负荷、安全保障负荷和辅助生产负荷。其中，主要生产负荷占比最高，通常占总负荷的 75%-90%。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，占比通常在 1%-5%。各类型负荷占比及其对应的主要设备如图表 5 所示。

图表5 铝冶炼行业负荷分类表

负荷类别		负荷占比	主要设备
生产性负荷	主要生产负荷	75%-90%	铝电解槽、铸造炉、铸造机
	安全保障负荷	3%-10%	废水、废渣处理装置、烟气回收装置、消防及治安用电设备
	辅助生产负荷	5%-10%	多功能天车、空压站、水泵站、风机
非生产性负荷		1%-5%	办公照明、办公电器、分体及中央空调、生活用电、厂区照明及亮化

资料来源：中国电力科学研究院，落基山研究所

2.2 电解铝需求侧灵活性来源及其潜力

根据不同时长和程度的灵活性需求，电解铝生产不同环节对应不同调节潜力和调控时间特征。图表 6 总结了不同环节主要设备对应的响应时间以及调节潜力。其中，若仅考虑电解冶炼过程，铝电解槽是负荷占比最高的生产设备，其对应负荷占比 80% 以上，理论情况下可实现的可调负荷占比可达到总体负荷 15%-23% 左右，响应时间最高可持续 2 小时。此外，多功能天车和风机也具备 2%-4% 的负荷调节潜力。非生产性负荷调节潜力较低，整体不到 1%。各个主要设备的调节潜力和调控时间如图表 6 所示。

图表6 电解铝生产各环节负荷调控理论潜力汇总

负荷类别	主要设备	负荷占比	调控方式	调控时间			可调负荷占比		
				准备时间	响应时长	恢复投运时间	个体占比	整体占比	合计
主要生产负荷	铝电解槽	80%	开关 / 电流	2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	1-2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20-30%	15-23%	17-27%
				0.5h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-1h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	30-50%	2-4%	
辅助生产负荷	多功能天车	5%	开关	20分 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-1h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20分 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	30-50%	2-4%	
				秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-1h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	30-50%	<1%	
非生产性负荷	办公照明	<1%	开关	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20-30%	<1%	
	分体及中央空调系统	<1%	开关 / 温度	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20-30%	<1%	
	生活用电	<1%	开关	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	0.5-2h ↓ s min 1h 2h 4h 8h	秒级 ↓ s min 1h 2h 4h 8h	20-30%	<1%	

数据来源：中国电力科学研究院，落基山研究所

2.3 电解铝需求侧灵活性的实施方案

电解铝需求侧灵活性潜力的挖掘主要通过三类方法：①通过调节电解槽中整流器输出端的电压或输入功率来调整负荷；②通过切换断路器直接关闭整个电解槽线来调整负荷。其中，根据电解槽的中断时长也可再进一步分为短时中断和长时中断。短时中断是指在短期内（通常在几分钟到两小时⁶）中断电解槽的运行，并在期间通过其自身的热惯性来维持生产设备的运转；长时中断是指工厂直接停槽，直到被通知可以恢复生产；③通过自备电厂，包括传统火电自备电厂、自备自用型分布式可再生电源和储能电池提供灵活性。自备电厂能够降低企业对于电网的依赖程度，可以在电网负荷较高的时候通过自身供电替代部分电网供电来提供灵活性。

2.3.1 通过调整功率/电压提供灵活性

调整电解槽的可变电压控制器是目前电解铝工业最为常见的负荷调节方法。企业通过一套成熟的自动控制系统，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。当电力供应不足时，电解槽中的智能熔炼罐会降低输入电压，当电力供应过剩时增加输入电压。由于生产原铝过程中的铝还原电池热惯性较大，维持时间通常能达数十小时，因此电源功率的瞬时变化对铝还原电池的热平衡影响很小，短期中断铝还原槽生产不会使冰晶石凝固。如果在生产负荷降低的期间能保证平均功率不变，则不会影响生产质量⁷。然而，在需要较长时间降低负荷的情况下，通过调整电压提供灵活性并不是一个最优选择，因为长期的减载生产会提高产品成本，此时停止生产是更为合适的选择。

2.3.2 通过电解槽的启停提供灵活性

另一种常见的负荷调节方法是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。从切断时长来看，一种方法是对电解槽进行短期的中断（通常可持续几分钟到两小时⁸），这种方式可以不对生产过程产生影响。如果仍无法满足降低负荷需求，具有多条电解槽线的设施可以在生产线之间轮流中断，以此延长总中断时间⁹。另一种方法直接关停电解槽，直到按照电网指令恢复供电为止。这种长期的中断能够提供显著的需求侧灵活性。然而，电解槽的中断会为企业带来经济损失和财产风险，而从中断状态恢复到原有生产状态通常需要花费几天时间，对电解铝稳流系统也有较大的影响。因此，尽管长期的中断生产调节潜力较大，但通常情况下企业不会选择这种方式来提供需求侧灵活性。

2.3.3 通过自备电厂提供灵活性

除了通过调节电压和中断电解槽之外，企业自备电厂也是很好的需求侧灵活性资源。根据 Global Energy Monitor 数据，中国铝行业在运自备煤电厂装机超过 76GW，占全国在运煤电装机的 6.9%。随着近年来国家加强对火电自备电厂的管理以及电解铝企业向水电丰富的西部地区转移，据安泰科数据，电解铝产能自备电的比例已从 2019 年的 65% 下降到 2023 年 6 月的 59%，预计“十四五”末该比例降至 54%。但是中短期内，如此大规模的自备电厂依旧是具备巨大挖掘价值的灵活性资源。同时，近年来一些企业在部分地区尝试通过清洁能源为电解铝厂供电，为电解铝需求侧灵活性提供了新的来源。例如，中铝集团部分电解铝厂尝试通过光伏等分布式能源为电解铝厂提供电力。甘肃酒钢拥有独立的自备电厂和独立电网，正借助自身充足的电力资源、自有电网优势、以及周边的弃风弃电，打造千亿元级铝产业链集群。

根据不同时长和程度的灵活性需求，电解铝工厂可以采取不同的负荷调节方案。图表 7 总结了一些研究案例中不同调节方法对应的响应时间以及调节潜力。对于通过调整功率 / 电压的方案，可通过三种方式进行调节，包括基于有载调压变压器的调节、基于饱和电抗器的调节以及通过调节高压侧母线电压调节。而自备电厂的具体调节潜力受到供电类型、可用容量以及当地政策限制等因素影响，没有统一的时间及潜力标准。

图表7 不同响应模式及其持续时间和潜力

响应模式	调节方法	响应速度	响应持续时长	响应潜力
调整负荷功率/ 直流侧电压	基于有载调压 变压器调节	5-10s/档位 (平均7s)	取决于降幅和设备参数, 通常不超过2h	实际操作中20%-30%
	基于饱和电抗 器调节	秒级		10%(二极管整流); 40%(晶闸管整流)
	通过高压侧母 线电压调节	秒级	与调整幅度相关:调节 额定容量10%以内可持 续2h;调节额定容量的 20%至少可持续0.5h	5%额定容量
长时中断	关闭电解槽	1min以内	根据实际电网需求而定	负荷降低100%
自备电厂	与当地政策限制、自备电厂供电类型及容量有关			

资料来源：中国电力科学研究院，落基山研究所

2.4 电解铝实施负荷调节的关键技术

2.4.1 电解铝整流方式

电解铝企业可通过整流器来调整电压，从而实现负荷调节。目前，电解铝整流普遍有两种方式：①通过移相变压器和二极管的方式整流；②通过整流变压器和晶闸管的方式整流³。第一种二极管整流电解铝系统可通过饱和电抗器和有载调压变压器进行负荷调节。依靠饱和电抗进行调节的范围约为额定电压的5%-10%，平均响应时间为0.5s³；若需要更深度调节时，通过改变有载调压变压器的档位，理论上可实现0-100%的功率调节范围，但其响应时间较长，一般每档动作时间为5-10s，最大档位数接近100。对于第二种晶闸管整流电解铝系统，除有载调压变压器档位控制外，还可通过晶闸管控制。尽管晶闸管控制在理论上也能实现0-100%的功率调节，但考虑到控制成熟度较低且存在反电势影响，实践中通常可实现40%左右的额定电流快速调节，响应时间一般在0.5s-2s，后续通过控制优化，可在几秒内降到更低的保温功率³。相比之下，晶闸管整流无论是在成本、节能降碳还是安全性能方面都更有优势。然而，目前大部分电解铝企业仍采用第一种方式进行整流，而采用晶闸管整流的企业较少，整流器的更新替换或将是提高电解铝需求侧灵活性的有效方案。

2.4.2 工厂自动控制系统

在实现负荷调节过程中，工厂通过一套实时的自动控制系统来实现与电网和市场的互动。当接受电网调度指令或者电力市场释放价格信号时，自动控制系统能够接收处理相关信息，并自动对上述电解铝的整流设备进行调节，同时调节氧化铝原料数量以管理电解槽线功耗，最终实现负荷调节。目前，这种智能控制系统已经普遍应用在大型的电解铝工厂，为负荷调节提供了必要的技术支持。

三、全球电解铝需求侧灵活性实践

从全球范围来看，电解铝行业是许多国家工业需求侧灵活性的重要来源。其中，德国在电解铝需求侧灵活性挖掘方面有成熟的技术和实践案例，德国最大的铝生产企业 Trimet 公司已应用 EnPot 技术实现了 80~600MW/s 的负荷调节^{10,11}。对于中国而言，云南省是我国电解铝生产的主要省份之一。据预测，“十四五”时期云南电解铝用电量将超过 600 亿千瓦时，接近云南省用电量的 25%¹。云南的电力主要由水电供应，由于近两年的极端干旱和高温影响，水电供应严重不足，导致电解铝工业被迫部分停产。在电力供需紧张的背景下，探讨电解铝的需求侧灵活性潜力尤为迫切。因此，本章将分别介绍全球范围内电解铝灵活性发展较为领先的德国，以及中国范围内电解铝灵活性探索较为深入的云南省，探讨电解铝行业的灵活性潜力。

3.1 德国电解铝需求侧灵活性实践

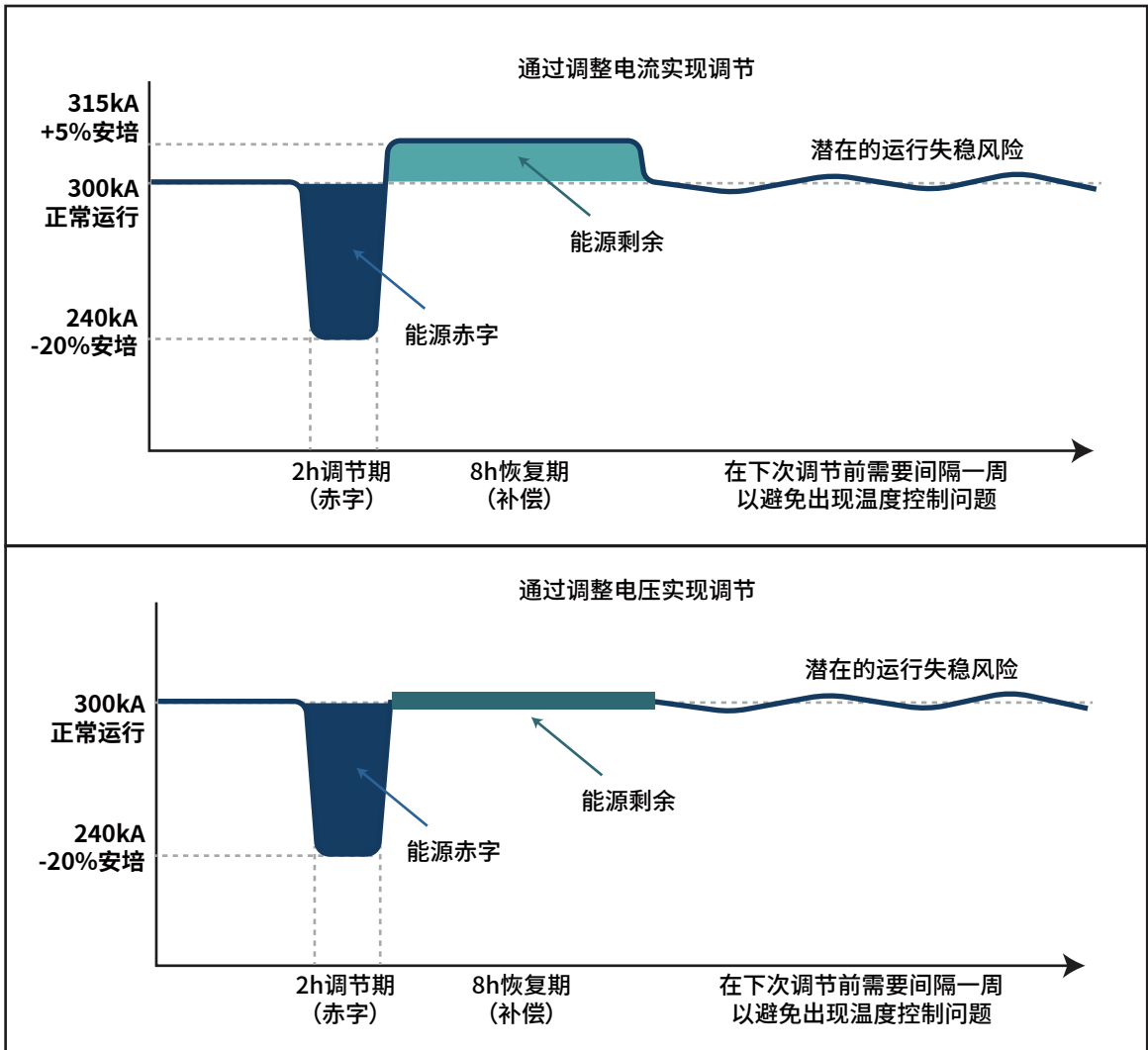
作为欧洲的主要电解铝生产国之一，德国在电解铝需求侧灵活性挖掘方面有成熟的技术和实践案例。尽管德国电解铝产量仅占全球产量的 1% 左右，无法完全代表全球先进经验，但其广泛应用的负荷调节技术可为其他国家电解铝企业开发需求侧灵活性提供重要参考。本节将介绍德国的 EnPot 技术如何实现能效提升和负荷调节，以提供需求侧灵活性。

在电解铝生产过程中，通常只有 50% 的能耗用于氧化铝还原，剩余 50% 的能耗用于提供热能，以维持生产过程的热稳定性。在传统生产技术下，外部微小的负荷输入变动均会带来一定的能量损失。而安装 EnPot 设备后，电解铝厂可以在不限定的时间内提高或者降低负荷，调控原铝的生产速度，同时始终保持稳定的热平衡。EnPot 是一套安装在电解铝生产过程中的先进设备，由一个壳式热交换器、一条主风道、一些分支风道和排气扇四个部分组成。该系统有三种运行模式，包括中性模式 (Neutral Mode)、制冷模式 (Cooling Mode) 和保温模式 (Insulating Mode)。系统根据外接负荷的输入情况来调整运行模式，进而提供了更大的负荷调整空间¹²。

图表 8 和 9 分别展示了没有 EnPot 技术和有 EnPot 技术情景下的负荷调节情况。在没有 EnPot 技术的情况下，铝电解槽可通过降低 20% 的电流并连续运行 2h，但这一过程会造成系统的能量损失，随后需要以超过正常工况 5% 的电流（或在额外 5% 的电压ⁱ）下的持续运行 8h 以恢复热平衡、补偿降低电流时段的铝产量损失，最终保证产量不变。而在加装 EnPot 热交换器后，电解铝厂可以进行任意时长的负荷调节，并且不会出现能量赤字或剩余，因此后续无需通过增加电流或电压来恢复热平衡。同时，该技术能随时回到稳定的正常生产状态，帮助电解铝企业根据电价波动和季节供需波动实现日内和长周期的生产负荷灵活调整。

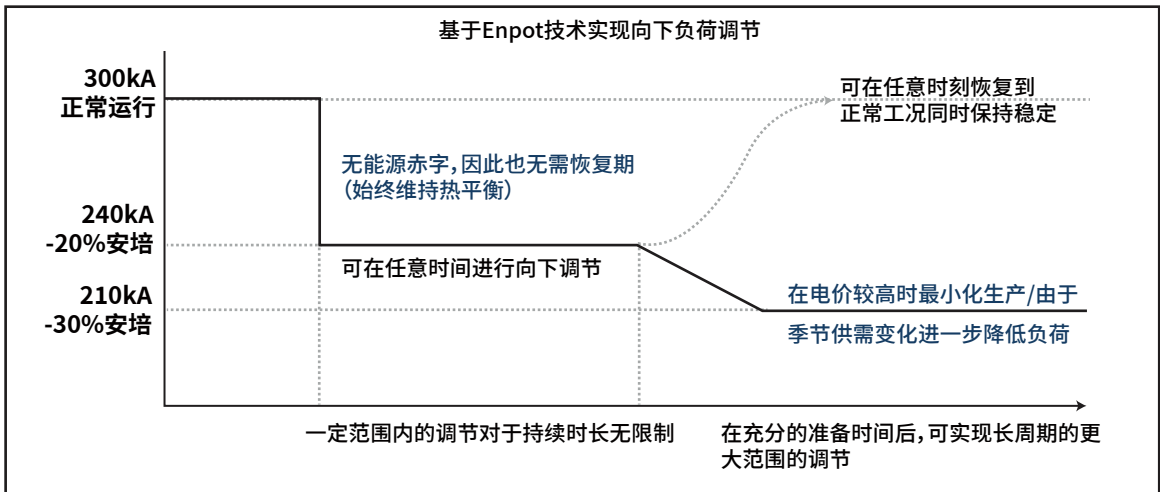
i 如果电解槽正常工况电流已经达到临界点，则只能通过增加电压的方式恢复热平衡，但这种方法并不能弥补能源赤字阶段的产量损失，且补偿期的生产能耗会提高。

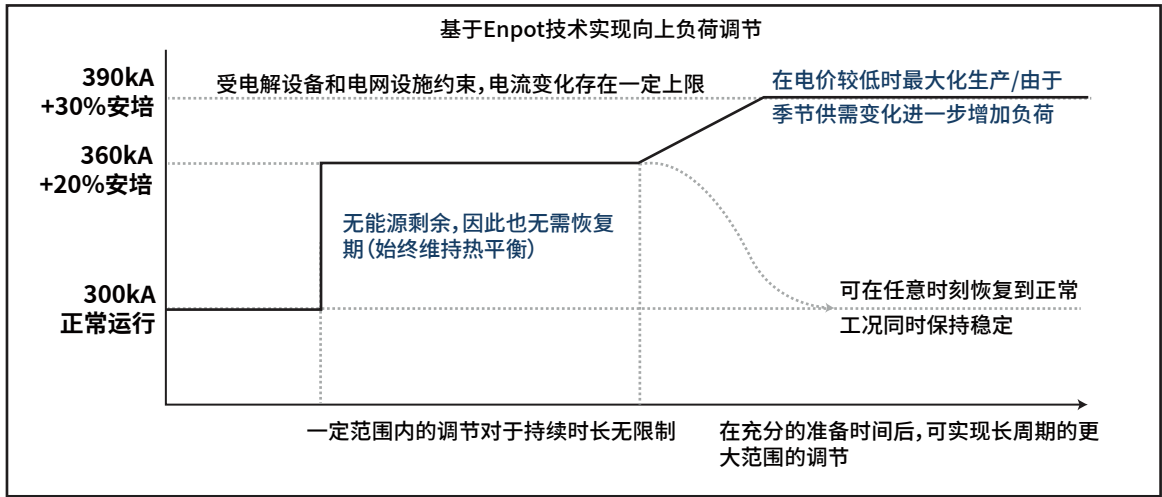
图表8 没有EnPot技术时的负荷调节



资料来源: EnPot公司¹²

图表9 有EnPot技术时的负荷调节



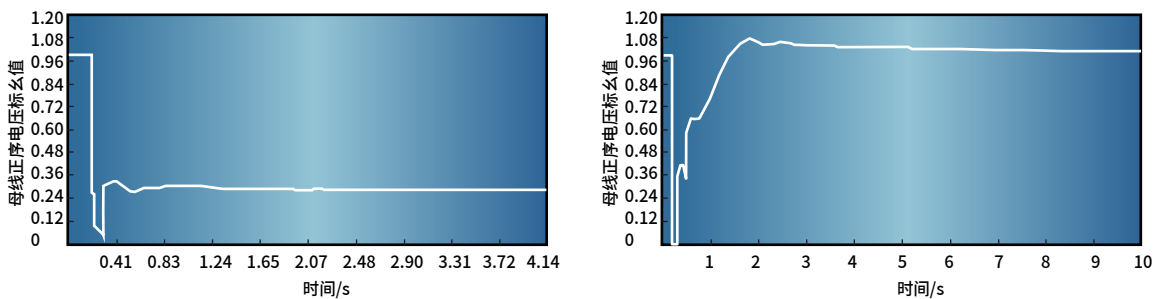


资料来源: EnPot公司¹²

3.2 云南省电解铝需求侧灵活性实践

作为我国电解铝生产的主要省份之一, 云南省的电力主要由水电供应, 其受到季节性波动的影响较大, 部分时段紧张的电力供需关系也使得电解铝的生产受到影响。因此, 云南省积极探索电解铝的需求侧灵活性空间, 以应对供需关系的剧烈波动。以云南电网为算例, 图表 10 分别展示了 2021 年冬季发生的某电解铝负荷近区电网出现的电压失稳情况, 以及向电解铝厂下发快速调降负荷指令后的该区域系统电压响应情况。可见, 电解铝厂的负荷削减能够作为应对电网故障、保障电网系统电压稳定的有效手段³。2022 年, 云南省文山供电局对电解铝企业开展负荷中断试验。在未采取任何保温措施的情况下, 中断时间持续 100min, 后续电解槽恢复生产。结果表明, 短期中断供电时长如果控制在 3 小时以内不会导致电解槽被迫停槽³。以上实践验证了电解铝负荷提供需求侧灵活性的可行性。2022 年, 云南铝业股份有限公司还建立了国内首例分布式光伏直流供电模式, 通过将这部分电力接入电解铝生产系统, 来实现削峰填谷, 同时增加绿电消纳比例, 成为电解铝生产用电模式的重大突破¹³。

图表10 2021年云南电网某地区电压失稳曲线(左)及电解铝厂需求响应调降负荷后系统电压变化情况(右)



数据来源: 云南电网陈义宣等³

四、电解铝需求侧灵活性挖掘的挑战与机遇

4.1 技术层面

尽管在现有技术条件下，电解铝企业已经能够实现一定程度的负荷调节，但是相比德国等需求侧灵活性发展较为成熟的地区，我国的电解铝工业调节能力仍然有限。

一方面，电解铝生产的调节速度、持续时间和调节潜力仍然有进一步提升的空间。例如，目前我国大部分企业所采用的二极管整流方式所能实现的功率调节潜力在 5%-10% 左右，而采用晶闸管整流能够实现 40% 甚至更高的功率调节潜力。因此，企业未来可以考虑优化电解铝生产中的整流器，以提高调节潜力。此外，正如德国 EnPot 技术案例所示，使用更先进的电解铝配套生产系统，在减少额外能源损失、提升能源效率的同时，还能够大幅延长负荷调节持续时间，使其更能满足电力系统的灵活性需求。

另一方面，也需要保障其他支撑灵活性实施的技术同步发展。例如，在进行负荷调节过程中，如果没能准确调节至灵活性所需的范围，过度 and 欠缺的调节均可能影响供电的可靠性以及电解槽等设备的使用寿命，并增加事故风险。因此，未来仍需不断提升安全保障措施。此外，对于更多中小型电解铝厂，实时信息采集和监测控制系统仍待普及应用。

此外，工业需求侧标准体系不健全，尤其针对电解铝企业的需求响应标准规范，尚未形成自上而下的系统性架构。虽然在一定程度上为企业提供了自主决策空间，使电解铝生产企业在负荷调整、能源管理等方面存在较大的自主性和灵活性，但也导致了需求响应方案的设计和实施缺乏统一性和指导性，难以形成规模效应和推广应用。

4.2 市场层面

尽管电解铝企业存在需求侧灵活性空间，考虑到生产的连续性及负荷调节的复杂性，目前除了紧急情况外，企业很难有主动参与负荷调节的积极性。因此，未来需要健全市场化机制以激励电解铝企业参与需求响应。在该前提下，考虑电解铝行业的生产特性，企业可以通过参与分时电价机制 / 电能现货市场、辅助服务市场提供灵活性。

对于分时电价机制 / 电能现货市场，电解铝企业可以根据电网调度情况，通过生产优化模型来实现最小化运营成本，并降低负荷曲线峰值需求。例如，可以通过完善峰谷分时电价机制，促进电解铝企业根据电价波动情况调整各时段产量。当夜晚电价较低时，企业可以大量生产；当电价较高时，可以减少产量来帮助电网实现调峰，并节省自身用电成本。

对于辅助服务市场，由于其通常需要精准的控制和快速的响应，而电解铝的生产采用自动控制系统，能够精准跟踪电网调度变动或市场价格信号，非常适合作为调频和旋转备用资源来参与到辅助服务市场当中。例如，铝电解过程的负荷降低可以作为正备用容量出售给电力市场。在欧洲电力市场，考虑到铝的市场价格和对电解过程的稳定性风险，部分时段调用电解铝正备用能量的价格高达 1000 欧元 / (MW·h)。未来，我国如果有相应的市场机制设计，也会激励电解铝厂充分挖掘需求侧灵活性。由于这种调节是成本驱动⁶，因此企业会主动进行生产调整，进而在一定程度上提供需求侧灵活性。

而从全年周期来看，电解铝企业每年都需对电解槽进行停槽大修（通常需要十几天），考虑到全社会负荷变化的季节周期性特点，应激励企业将检修安排在用电高峰期、在用电低谷期提高生产，以为电力系统提供季节性灵活性需求。

五、结论与展望

电解铝行业是我国工业用电大户，其需求侧灵活性的挖掘有助于保障电力系统的安全稳定运行。从理论层面而言，电解铝负荷调控容量大、调控时间尺度多样、自动化程度高、调节速度快，既可以实现秒 - 分钟级的响应速度，也可以利用电解类工业负荷的热蓄能特性提供小时级的功率调整能力。因此，在理想条件下，电解铝负荷可以响应削峰填谷、调频、备用、安稳控制、联络线功率波动控制等电网调节需求，这对于电解铝负荷占比较大的山东、内蒙古、新疆、云南、甘肃、青海等地区尤为重要。同时，在低碳转型的背景下，电解铝产能逐渐向水电丰富的西南地区 and 风光资源丰富的西北地区转移，挖掘电解铝的负荷调节能力也将有助力可再生能源的消纳。

然而，我国电解铝的负荷调节潜力尚未得到充分挖掘，伴随着需求响应政策机制的不断完善、负荷调节技术的不断成熟以及电力市场建设逐步健全，电解铝工业的需求侧灵活性潜力将会得到进一步的释放。随着《电力需求侧管理办法（2023 年版）》和《电力负荷管理办法（2023 年版）》的实施，以经济激励为驱动的需求响应机制有望实现常态化、市场化运行，需求响应主体可平等参与相应的电能量市场、辅助服务市场、容量市场等，按市场规则获取经济收益。通过开发需求侧灵活性，电解铝企业不仅可以实现负荷调节以响应现货市场或分时电价的价格信号，从而优化用能成本，而且可以作为灵活性资源参与电力辅助服务、需求响应机制等获得额外收益，这将极大促进企业规模化开发和应用电力需求侧灵活性能力。

目前，电解铝企业普遍未达到国内能效标杆水平，同时面临国际碳关税征收、国内由能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变的挑战，开展节能降碳与网荷互动耦合研究是未来的技术发展趋势。未来，伴随着电解铝行业被纳入全国碳市场、电力系统碳排放核算的时间和空间精细度逐渐提高，有望进一步引导企业用户根据电力市场价格和动态碳排放因子信号进行低碳需求响应，充分展现工业需求侧灵活性在构建新型低碳电力系统中的重要地位。

参考文献

- 1 国家统计局.2021年中国有色金属工业年鉴.(2022).
- 2 国家统计局.2021年中国能源统计年鉴.(2022).
- 3 陈义宣, 李玲芳, 李文云等. 电解铝负荷参与电网稳定控制方案研究[J]. 电力需求侧管理24(1): 21-27 (2022).
- 4 国家发展和改革委员会.关于完善电解铝行业阶梯电价政策的通知.(2021).
- 5 中原证券. 电解铝成本高位运行, 新能源汽车、光伏铝材需求稳步增长——铝行业深度分析. (2022).
- 6 代心芸, 陈皓勇, 肖东亮等. 电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J/OL]. 电网技术46(11): 4169-4186. (2022).
- 7 SHOREH M H, SIANO P, SHAFIE-KHAH M, et al. A survey of industrial applications of Demand Response[J/OL]. Electric Power Systems Research 141: 31-49. (2016).
- 8 姚明涛, 胡兆光, 张宁等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报34(25).(2014).
- 9 段平生, 张超, 兰云美等. 新型电力系统下的电解铝负荷弹性管理[J]. 云南电业.(2022).
- 10 Nebel, A., Krüger, C., Janßen, T., Saurat, M., Kiefer, S., & Arnold, K. Comparison of the effects of industrial demand side management and other flexibilities on the performance of the energy system. Energies, 13(17), 4448.(2022).
- 11 国家发展和改革委员会能源研究所等.京津冀与德国电力系统灵活性定量比较研究. (2020).
- 12 Enpot. Aluminum's flexible future.(2023). <https://enpot.com/how-it-works/>
- 13 张睿屹. 按下高质量发展提速键——中铝股份2022年改革发展综述. 中国有色金属报. (2023). <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=443593>

刘子屹, 谢俊, 刘雨菁, 宫飞翔等. 电力需求侧灵活性系列: 电解铝行业灵活性潜力概述, 落基山研究所, 2023
<https://rmi.org.cn/insights/dsf-aluminum>

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/>



除特别说明, 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12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。