

新型电力系统建设背景下碳足迹核算及减排策略研究 ——以广东省江门市为例

陈晓丹 张 林 刘 静

广东电网有限责任公司江门供电局市场营销部 广东 江门 529000

摘要：本文以广东省江门市为案例，聚焦新型电力系统低碳转型，构建了涵盖电源结构优化与用户侧减排协同的双重分析框架。通过测算2015–2025年电力碳足迹，分析了其下降趋势与阶段性瓶颈，设定了2030年电力碳足迹目标及以可再生能源为主的电源结构优化方案。同时，从典型用户视角剖析了重点火电厂的碳效差异与高耗能企业的用电碳排放特征，并提出了差异化的技术改造与行业管理策略。研究表明，实现区域电力碳达峰需协同推进电源结构清洁化与用户侧能效提升，研究成果可为制定精准减排路径提供决策参考。

关键词：可再生能源；新型电力系统；碳足迹；减排策略

1 引言

在全球能源需求持续增长与“双碳”战略深入推进的背景下，电力行业作为我国最大的二氧化碳排放源，其绿色低碳转型已成为关键^[1,2]。新型电力系统以高比例可再生能源为主体，其规划、运行与碳减排目标的深度融合至关重要^[3,4]。与以传统电源为主的系统相比，新型电力系统在电源结构、运行模式等方面呈现出全新特点^[5]。电力碳足迹作为衡量电力产品全生命周期温室气体排放的核心指标，其量化分析为评估转型成效提供了重要依据。

目前，针对电力系统碳减排的研究多集中于宏观层面，对区域尺度下电力碳足迹的精细化测算及其减排路径，尤其是结合典型用户视角的差异化策略分析尚显不足。本文以广东省江门市为案例，聚焦以下两方面研究：

一是基于历史数据与碳达峰目标，测算全市电力碳足迹强度并规划以清洁能源为主体的电源结构优化方案；二是从典型用户视角，深入分析重点火电厂与高耗能企业的碳排放特征与演进趋势，进而提出减排策略。研究旨在通过“能源结构优化”与“用户减排”的双重路径，为区域电力行业碳达峰与低碳转型提供量化依据与决策参考。

2 电力碳足迹测算分析

2.1 测算模型构建

本文选取广东省江门市2015年至2025年度各能源类型年度发电量数据，及生态环境部发布的2024年度各发电类型的平均碳足迹因子，计算江门市2015年至2025年度电力平均碳足迹。其中江门市2015年至2025年度各能源类型年度发电量如图1，各发电类型平均碳足迹因子如表1。

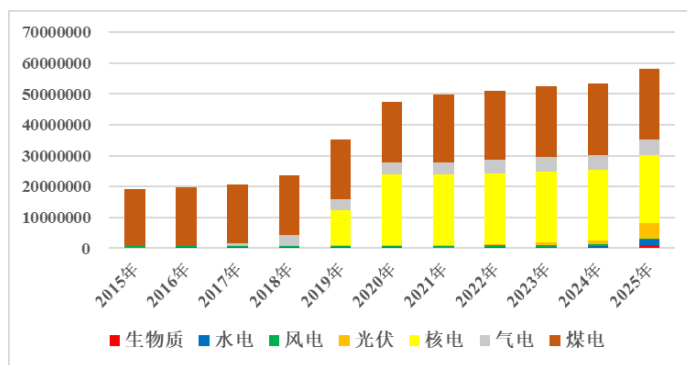


图1 江门市2015-2025年各发电类型发电量

表1 各发电类型电力碳足迹因子

类型	因子 (kgCO ₂ /kWh)
燃煤发电	0.9240
燃气发电	0.4503
水力发电	0.0141

续表:

类型	因子 (kgCO _{2e} /kWh)
核能发电	0.0065
风力发电	0.0324
光伏发电	0.0520
生物质发电	0.0404
输配电	0.0327

目前江门市发电类型主要为火电、气电、核电、水电、风电、光伏、生物质发电。依据生命周期理论,功能单位选定为周期内的1kWh供电量,构建包含发电、输配过程的碳足迹计算模型:

$$CFP = \frac{\sum CFP_i \times U_i}{U_{发电}} + CFP_{输配电}$$

式中:CFP代表电力平均碳足迹,单位是kgCO_{2e}/kWh;CFP_i代表发电类型i发电碳足迹因子,单位是kgCO_{2e}/kWh;U_i代表发电类型i的年发电量,单位是kWh;U代表发电量,这里代表总年发电量,单位是kWh;CFP_{输配电}代表输配电碳足迹因子,单位是kgCO_{2e}/kWh。

2.2 结果分析

江门市2015年至2025年度电力平均碳足迹及碳排放总量如图2所示。2015年至2025年间,江门市单位电量碳排放由2015年的0.923kgCO_{2e}/kWh逐步波动下降至2025年的0.446kgCO_{2e}/kWh,累计降幅达51.7%,江门市电力平均碳足迹呈现显著的阶段性下降趋势,显示出电力结构低碳转型的积极成效。从碳排放总量来看,总排放量由2015年的1774.23万吨增加到2025年的2588.56万吨,累计增幅达45.9%。煤电为碳排放总量的主要贡献发电类型,其排放量占比由2015年的96.3%下降至2025年的81.9%。尽管单位碳强度明显下降,但碳排放总量仍呈持续增长态势,反映出电力需求增长对总体排放的拉动作用。

具体来看,2015至2018年为平稳下降阶段。该时期内,在总碳排放量由1774.23万吨增长至2013.02万吨的背景下,可再生能源装机容量稳步提升及天然气发电逐步

发展,共同推动电力碳强度稳步降低。

2018年至2020年,电力碳足迹下降速度显著加快,特别是在2018至2019年间,数值由0.853kgCO_{2e}/kWh迅速降至0.591kgCO_{2e}/kWh,年度降幅高达30.7%。这一阶段的快速下降主要归功于台山核电项目的陆续投运,核电作为零碳能源的大规模接入,极大优化了本地电源结构,成为驱动碳强度降低的关键因素。尽管此阶段碳强度大幅下降,但总碳排放量仍从2013.02万吨增至2183.64万吨,说明能效提升与结构优化尚未完全对冲用电量增长带来的排放压力。

2020至2025年,江门市电力平均碳足迹进入相对稳定平台期,在0.459kgCO_{2e}/kWh至0.446kgCO_{2e}/kWh之间窄幅波动,总碳排放量从2183.64万吨持续增长至2588.56万吨。尽管该阶段光伏装机容量实现显著增长,但由于全社会用电总量同步上升,光伏发电在总发电结构中的占比并未显著提高,导致其对碳足迹的进一步削减作用受限。这也反映出,在经历前期结构优化带来的碳强度快速下降后,江门电力系统减排效应已逐步触及当前技术条件和能源结构下的阶段性瓶颈。

总体来看,“十三五”中后期江门市电力结构清洁化转型成效显著,碳排放强度大幅降低,但全生命周期总碳排放量仍保持增长态势。在当前技术体系和电源结构框架下,电力碳足迹的下降空间已明显收窄。未来,随着台山核电二期项目建成投运,以及风电、光伏等可再生能源装机占比的持续提升,江门市电力碳平均足迹仍具备进一步下降的潜力。

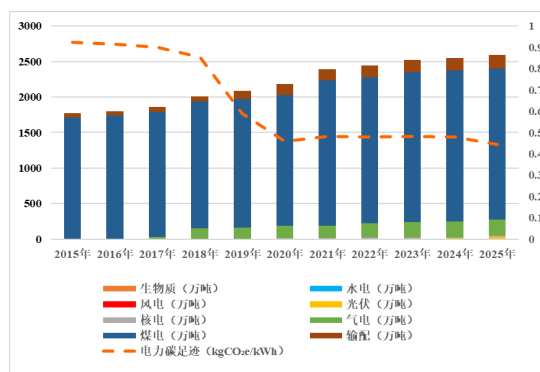


图2 江门市2015-2025年电力平均碳足迹及碳排放总量

2.3 减排目标制定

科学制定碳减排目标是推动电力系统绿色低碳转型的首要环节。以2030年江门市电力碳达峰为约束，量化设定电力碳足迹强度的控制目标，为江门市新型电力系统绿色低碳转型提供目标导向。根据《江门市电网专项规划（2020—2035年）》，“十四五”与“十五五”期间，江门市全社会用电量年均增长率分别为6.8%与6.7%。据此预测，2030年江门市发电量将达到849.03亿千瓦时。同时，2015年至2025年期间，江门市电力全生命周期碳排放总量由1774.23万吨增长至2588.56万吨，年均增长率为3.85%。为实现2030年碳达峰目标，设定2025年至2030年

间年均碳排放增长率逐年递减0.64%。经测算，在碳达峰情景下，2030年江门市电力全生命周期碳排放总量预计为2847.63万吨，相应的碳足迹强度为0.335kgCO₂e/kWh。为实现该目标，建议江门2030年电力碳足迹强度在2025年水平（0.446kgCO₂e/kWh）基础上削减24.9%。

2.4 减排路径规划

为达成2030年电力碳足迹强度削减目标，并衔接区域相关规划与实施方案要求，现对2030年江门市电源装机规模及各发电类型结构进行统筹规划。规划至2030年，全市电源总装机规模预计达到24800MW千瓦，基本建成以清洁能源为主体的电力供应体系，能源结构优化方案如表3。

表2 2030年江门能源结构规划方案测算建议

项目	煤电	气电	核电	光伏	风电	生物质	水电
装机规模 (MW)	6050	3000	5900	8050	1100	500	200
发电占比 (%)	24.6	12.2	47.2	11.0	2.7	2.0	0.3
较2025年新增装机规模	0	1304	2400	3991	849	305	53

在电源结构上，将推动火电从规模扩张转向功能提升，其规划装机容量为9050MW，发电量占比为36.8%。其中，煤电装机将严格控制在600MW左右，占比下降至24.6%，重点对现有燃煤机组实施节能降碳与灵活性改造；气电装机将增至300MW，占比提升至12.2%，通过加快天然气热电联产项目建设，为系统提供关键的调峰能力和灵活性支撑。

核电将成为清洁能源的骨干，规划装机容量达5900MW，发电量占比大幅提升至47.2%，取代火电成为最主要的发电类型。此举旨在依托台山核电项目的安全运行与扩建，为区域能源结构的低碳转型提供核心支撑。

可再生能源将实现跨越式发展，总装机容量从2025年的5236MW跃升至2030年的9850MW，发电量占比相应

从4.8%提高至16%。光伏发电是主要的增长引擎，规划装机容量达8050MW，成为装机规模最大的电源类型，占比11.0%，将重点推广分布式光伏与整县开发。风电装机将达1100MW，占比2.7%，有序推进陆上及海上风电多元化开发。此外，生物质发电装机规划为500MW，占比2.0%；水电（主要为抽水蓄能）装机规划为200MW，占比0.3%，共同增强系统的调节能力与资源化利用水平。

3 典型用户碳排放分析

3.1 火电厂减排策略

选取江门5家重点排放火电厂为对象，5座火电厂发电类型及装机规模见表4，根据重点排放单位碳排放核算数据及各电厂年度发电量数据核算其发电碳排放强度，5家火电厂碳排放量及发电量数据如图3、4。

表3 5座火电厂基本简介

序号	火电厂	发电类型	装机规模 (MW)	机组类型
1	A	燃煤	2x150	循环流化床热电联产燃煤机组
2	B	燃煤	600	超临界热电联产燃煤机组
3	C	燃煤	600 4x630 2x1000	亚临界及超临界燃煤机组
4	D	燃气	2x453	燃气-蒸汽联合循环发电机组
5	E	燃气	2x115	燃气-蒸汽联合循环发电机组

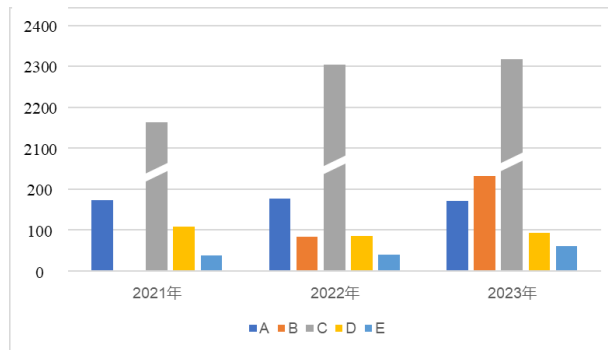


图3 5座火电厂年度碳排放总量

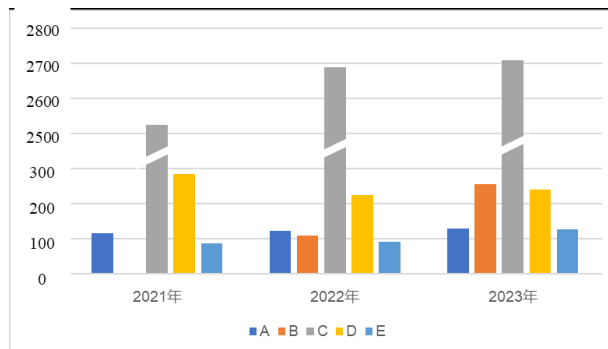


图4 5座火电厂年度发电量

如图5所示, 2021至2023年, 江门市各火电厂碳排放强度呈现差异化趋势。A发电厂强度最高, 但由1.48 kgCO₂/kWh降至1.33 kgCO₂/kWh, 通过技改实现总量下降。B发电厂因2022年高效新机组投运, 强度暂升至0.91 kgCO₂/kWh, 但长期碳效潜力显著。C发电厂作为大型高

效燃煤机组, 强度稳定在0.86 kgCO₂/kWh的先进水平, 发电与排放同步稳定增长。D发电厂与E发电厂采用燃气技术, 强度分别稳定在0.38-0.39与0.44-0.49 kgCO₂/kWh的低碳区间, 远低于燃煤机组, 是优化全市火电碳强度的关键。

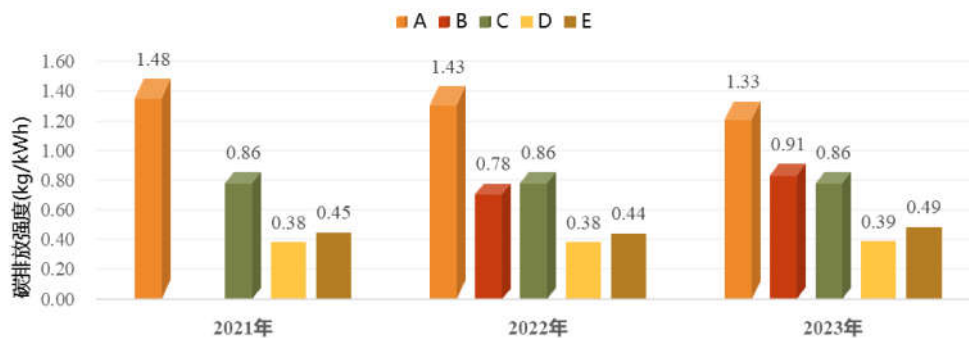


图5 各火电厂2021年至2023年发电碳排放强度

为推进江门市火电行业绿色低碳转型, 需依据各厂特性实施系统且精准的减排策略。首先, 针对碳排放强度较高的存量机组, 如A发电厂, 应在已有技改基础上, 深入开展锅炉燃烧优化、汽轮机通流改造等系统性节能诊断与升级, 并科学评估生物质或固废耦合发电的可行性, 同时强化其作为区域的热电联产核心功能, 提升其在未来高比例可再生能源系统中的调频与备用价值。其次, 对于B发电厂等新建高效机组, 应确保其600MW超超临界机组持续运行在最佳效率区间, 实现设计供电煤

耗, 并深化辅机优化与烟气余热回收, 同时可率先开展掺烧低碳燃料的试验, 为行业中长期转型进行技术储备。再者, C发电厂等大型主力机组, 需在已完成升级改造的基础上, 对标国际最优水平持续挖掘边际能效潜力, 并重点推进深度调峰灵活性改造, 以提升低负荷运行效率与快速响应能力, 适应电网消纳可再生能源的需求, 同时可开展百万吨级碳捕集、利用与封存技术的可行性研究与示范, 布局远期近零排放路径。此外, 应明确D、E发电厂等燃气机组的战略定位, 在维持其联合循环机组

高效运行的同时，重点探索并实施天然气掺烧绿氢的示范项目，逐步向纯氢燃料过渡，并充分发挥其启停迅速、调节灵活的优势，在电力系统中承担更重要的调峰调频责任，为风电、光伏大规模接入提供关键的灵活性支撑，从系统运行层面降低整体碳强度。

3.2 高耗能用户减排策略

选取江门市2025年用电量前十的企业，根据其用电量核算其用电碳排放量，并制定相应的减排策略。10家高耗能企业2021年至2025年用电量数据如图6，10家企业中，包含1家新能源制造企业（F厂）、3家金属加工企业（G、H、O厂）、2家化工造纸企业（I、J厂）、2家电子制造企业（K、L厂）、1家机械制造企业（N厂）、1家纺织化纤企业（M厂）。

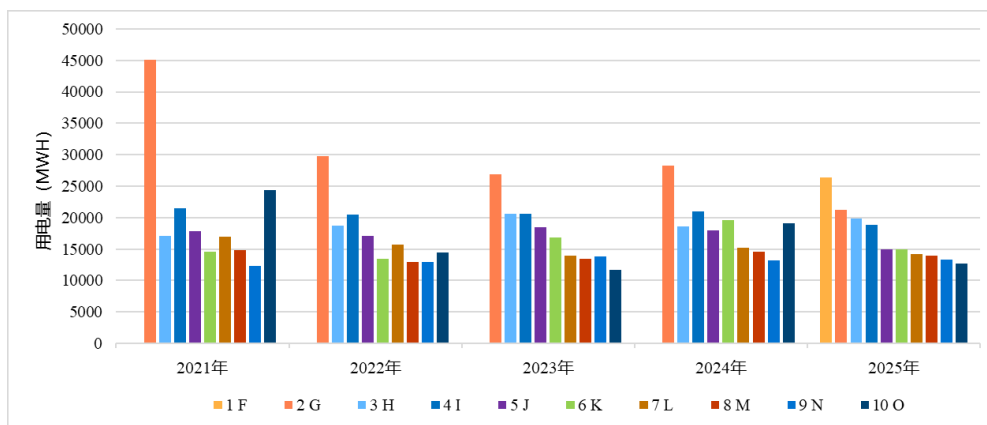


图6 各企业2021年至2025年年度用电量

结合企业用电量数据，以广东省电碳因子（ $0.4403\text{kg CO}_2/\text{kWh}$ ）为基准，核算该十家企业2021年至2025年用电碳排放量。如图7，总体趋势上，除2025年新纳入统计的F厂外，多数企业的用电碳排放总量在观测期内呈下降或波动趋稳态势，这反映出在电力供给侧碳强度一定的前提下，企业通过减少用电量实现碳减排的直接效应。从行业与企业层面分析，减排成效尤为显著的是G

厂，其碳排放总量从2021年的19835.06吨大幅降至2025年的9355.14吨，降幅达52.8%。H厂与I厂的碳排放总量则在相对高位保持小幅波动，减排幅度相对有限。K厂的碳排放总量呈现先升后降的趋势，2024年达到峰值8643.51吨后于2025年回落至6583.68吨，表明其生产经营波动对碳排放影响显著。其余企业，其碳排放总量均呈现总体下降或基本稳定的格局。

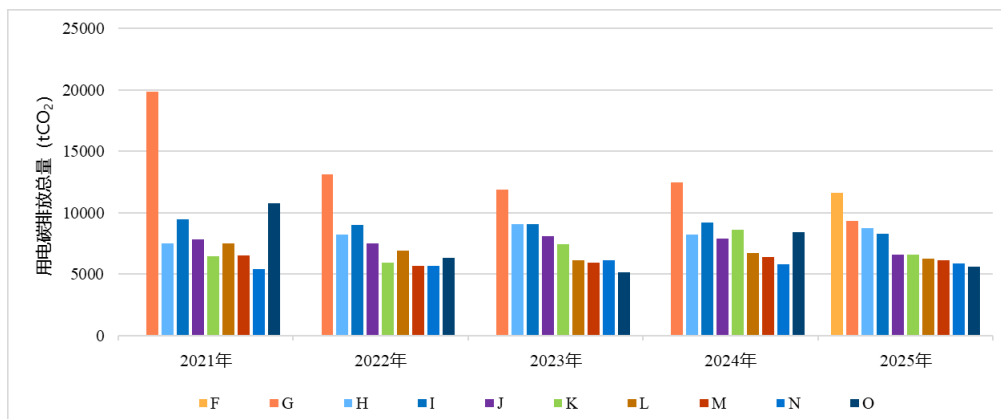


图7 各企业2021年至2025年用电碳排放量

为系统性引导工业领域节能降碳，需依据重点行业的工艺特征与减排潜力实施精准策略。金属加工行业应重点实施技术升级与能源结构优化。大幅提高短流程电炉炼钢产能占比，并积极开展氢能冶金等低碳前沿技术示范。其次，加速淘汰落后高耗能设备，严控煤炭消费。通过建立动态能效管理机制，对能效水平实施分级管理，并引导低能效企业积极参与绿电交易与绿证采购，以市

场机制促进清洁能源替代。目标到2030年，电炉钢产能占比提升至40%以上，全面淘汰35蒸吨以下燃煤锅炉，电能占终端能源消费比重达30%，可再生能源消费比例突破25%，焦炭消耗强度显著降低15%。

化工造纸行业需聚焦热力系统优化与生物质能源利用。化工领域全面推广溴化锂吸收式制冷、热泵等高效余热回收技术，造纸行业重点提升制浆废液等生物质能

源的高效利用水平。同时,以化工园区为载体,大力推进“三废”集中处理与能源梯级利用,实施清洁生产审核全覆盖。目标到2030年,化工行业余热回收率提升至60%,造纸行业热力系统余热回收率达50%;造纸企业生物质能源(以废液、废渣为主)替代率提高至25%;实现园区内60%的小微危险废物安全处置,一般工业固体废物综合利用率达到80%。

电子制造行业应聚焦能效提升、绿色能源与创新研发。对标国际先进水平,重点改造高耗能环节,并实现能源管理系统全覆盖。其次,大力支持企业利用厂房屋顶建设光伏电站,构建工业微电网,提升绿色电力自发自用比例。加强产学研合作,联合攻关电子化学品绿色合成工艺等关键技术。目标到2030年,单位产品综合能耗较2025年下降15%,重点企业能源在线监测覆盖率达90%,厂区屋顶光伏覆盖率和自发自用比例均不低于30%,成功打造3个以上国家级或省级绿色制造示范园区。

装备制造与纺织化纤行业应重点推动资源循环、智能管控与集中供热策略。装备制造领域加快关键工序数控化与智能化升级,深化清洁生产。纺织化纤行业重点实施园区集中供热改造,推广蒸汽冷凝水回用等节水技术,共同目标是提高水资源和能源的循环利用水平。目标到2030年,电镀等关键环节废水循环利用率提升至90%以上,纺织印染园区集中供热覆盖率达到60%,装备制造业关键工序数控化率提升至40%,能源梯级利用率达到75%。

新能源制造行业应构建“全链碳管理+绿电规模化+循环利用”策略。建立覆盖产品设计、生产、回收的全生命周期碳管理体系。其次,规模化应用厂房屋顶光伏,积极采购绿电与绿证,提升绿色电力消费占比。同时,重点发展动力电池等产品的无损化拆解、高效再生利用技术,构建“无废”产业链。目标到2030年,重点用能企业绿

电消费比例达到65%,绿证交易量占比达30%,屋顶光伏覆盖率超30%,新能源汽车动力电池再生利用率达到50%,力争打造2个具有全国影响力的国家级绿色制造标杆。

4 总结

综上所述,本文以广东省江门市为例,聚焦新型电力系统建设,从宏观系统优化与微观用户减排双路径开展了电力碳减排的实证分析。研究首先测算了2015-2025年江门市电力全生命周期碳足迹,揭示了其阶段性下降趋势及当前面临的瓶颈,并基于碳达峰约束提出了2030年电力碳足迹目标及相应的清洁能源主导的电源结构优化方案。其次,从典型用户视角,深入剖析了重点火电厂的碳排放强度差异与演进特征,以及高耗能企业的用电碳排放趋势,并分别制定了针对性的节能减排策略建议。研究表明,实现区域电力碳达峰需系统协同推进电源结构清洁化转型与用户侧能效提升。本研究为区域制定精准、差异化的电力碳减排路径提供了量化依据与决策参考。

参考文献:

- [1].杨海霞与吴聃,国际能源署发布《2022年全球二氧化碳碳排放》报告.世界石油工业,2023.30(02):第80-81页.
- [2].陈景文.双碳目标下新型电力系统发展路径.in全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会.2024.中国北京.
- [3].马超等,新型电力系统电碳协同研究综述:量化方法、关键技术与应用展望.高电压技术:第1-20页.
- [4].孔锋峰等,新型电力系统的分布式光伏发展与消纳.《电力设备管理》,2024.
- [5].钟海旺等,新型电力系统中的规划运营与电力市场:研究进展与科研实践.中国电机工程学报,2024.44(18):第7084-7104页.