



中国人工智能系列白皮书

——智慧电网

中国人工智能学会

二〇二三年九月

《中国人工智能系列白皮书》编委会

主任：戴琼海

执行主任：王国胤

副主任：陈杰 何友 刘成林 刘宏 孙富春 王思东
王文博 赵春江 周志华

委员：班晓娟 曹鹏 陈纯 陈松灿 邓伟文 董振江
杜军平 付宜利 古天龙 桂卫华 何清 胡国平
黄河燕 季向阳 贾英民 焦李成 李斌 刘民
刘庆峰 刘增良 鲁华祥 马华东 苗夺谦 潘纲
朴松昊 钱锋 乔俊飞 孙长银 孙茂松 陶建华
王卫宁 王熙照 王轩 王蕴红 吾守尔·斯拉木
吴晓蓓 杨放春 于剑 岳东 张小川 张学工
张毅 章毅 周国栋 周鸿祎 周建设 周杰
祝烈煌 庄越挺

《中国人工智能系列白皮书——智慧电网》编写组

王继业 赵丙镇 王栋 罗鹏 张宾
殷智 刘溪 孙喜民 刘道伟 王新迎
罗天钦 吴士泓 董俐君 张华铮 唐文佳
周磊 赵俊勇 雷涛 刘亮 林霄
李子豪 王明达 赵高尚

引言

人工智能已成为推动新一轮科技革命和产业变革的驱动力。国家层面，国务院、科技部、工信部等推出人工智能政策、规划及指导建议；国家电网有限公司（以下简称“国网公司”）层面，结合电网业务需求制定战略规划，促进人工智能应用落地。

《新一代人工智能发展规划》明确了人工智能发展一直牢牢把握着赋能实体经济，支撑社会发展的这条主线。习近平总书记强调，要“充分发挥海量数据和丰富应用场景优势，促进数字技术和实体经济深度融合”。2023年7月，习近平总书记在主持召开第20届中央财经委员会第一次会议时再次强调，要把握人工智能等新科技革命的浪潮，适应人与自然和谐共生的要求，推进产业智能化、绿色化和融合化，建设具有完整性、先进性、安全性的现代产业体系。为我国在新发展阶段推动数字经济高质量发展指明了方向。

2021年6月，国网公司互联网部印发《国家电网有限公司人工智能技术应用顶层设计》、《国家电网有限公司构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案（2021-2030年）》等4个方案，深刻阐述了构建新型电力系统的重大意义、新型电力系统特征、内涵、实施路径以及2021-2030年重点任务，指导其各单位开展人工智能相关工作。2022年3月，国网公司数字化部印发《2022年人工智能等数字新技术应用重点工作》，推动人工智能基础能力与核心业务相融合，实现重点领域人工智能工程化应用。

习总书记在中央财经委第九次会议提出要构建以新能源为主体的新型电力系统，实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标。新型电力系统是以确保能源电力安全为基本前提，以满足经济社会高质量发展的电力需求为首要目标，以高比例新能源供给消纳体系建设

为主线任务，以源网荷储多向协同、灵活互动为有力支撑，以坚强、智能、柔性电网为枢纽平台，以技术创新和体制机制创新为基础保障的新时代电力系统，是新型能源体系的重要组成部分和实现“双碳”目标的关键载体。2023年7月，习近平总书记在中央全面深化改革委员会第二次会议中强调，“加快构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统”。

电力行业高度重视中央相关指示，迅速行动成立相关工作组，以人工智能技术深入嵌入电网业务为主线，聚焦图像识别、自然语言处理技术、预测算法、知识图谱等领域，面向各专业探索打造了多款智能应用，助力生产模式和管理方式优化，赋能业务提质和基层减负，支撑电力行业数字化转型和新型电力系统建设。要科学合理设计新型电力系统建设路径，在新能源安全可靠替代的基础上，有计划分步骤逐步降低传统能源比重。要健全适应新型电力系统的体制机制，推动加强电力技术创新、市场机制创新、商业模式创新。要推动有效市场同有为政府更好结合，不断完善政策体系，做好电力基本公共服务供给。

目 录

第 1 章 智慧电网概述	1
1.1 电网发展概况.....	1
1.1.1 电网发展历程.....	1
1.1.2 中国电网概况.....	3
1.2 面临的挑战.....	4
1.3 人工智能关键技术.....	6
1.4 人工智能发挥重要作用.....	8
第 2 章 智慧发电与智慧输电	11
2.1 智慧发电概述.....	11
2.1.1 广域互联新能源智慧发电.....	11
2.1.2 分布式新能源智慧发电.....	11
2.2 智慧输电概述.....	12
2.3 典型应用案例.....	12
2.3.1 新能源功率预测.....	12
2.3.2 分布式电源接入.....	17
第 3 章 智慧变电与智慧配电	23

3.1 智慧变电概述	23
3.2 智慧配电概述	23
3.3 典型应用案例	25
3.3.1 基于网格化的智慧配电网规划辅助计算	25
3.3.2 分布式电源高渗透智慧配电网故障恢复技术	28
第 4 章 智慧用电与电力市场	29
4.1 智慧用电概述	29
4.2 电力市场概述	30
4.2.1 家庭用电预测	30
4.2.2 新能源消纳预测	32
4.2.3 基于强化学习的可再生能源分析	33
4.2.4 基于博弈智能的综合能源集群运行优化	35
4.3 典型应用案例	37
4.3.1 电力营销业务需求	37
4.3.2 人工智能技术在电力交易市场的业务需求	43
第 5 章 智慧电网调度	50
5.1 智慧电网调度概述	50
5.2 智慧电网态势评估与控制技术	51

5.2.1 静态稳定态势评估与决策	51
5.2.2 暂态稳定态势评估与决策	55
5.2.3 负荷及动态轨迹趋势预测	60
5.2.4 智慧电网调度大数据平台	65
5.2.5 运行态势知识图谱可视化引擎	67
5.3 典型应用案例	68
第 6 章 智慧电网的数字化应用	71
6.1 应用案例概况	71
6.2 智慧共享财务	73
6.2.1 智慧财务主要特征	74
6.2.2 智慧财务应用场景	75
6.2.3 智慧财务典型案例	78
6.3 电力征信	82
6.3.1 服务公司，加速公司数字化转型	82
6.3.2 服务政府，助力国家精准化管理	83
6.3.3 服务金融，助力经济高质量发展	84
6.3.4 服务企业，促进产业体系化发展	85
6.4 区块链赋能绿电场景	86

6.4.1 背景介绍	86
6.4.2 典型应用	87
6.5 电力元宇宙	90
第 7 章 总结与展望	95
7.1 总结	95
7.2 展望	96
参考文献	98

第 1 章 智慧电网概述

1.1 电网发展概况

电力是现代社会生产和生活的重要物质基础。随着各国工业化的发展，人类对电力的需求量和稳定性要求逐年增加，能否提供大量廉价优质、稳定可靠的电力供应，直接关系到国家经济发展的进程。国内外，传统电力企业纷纷借助人工智能等数字化技术赋能电网生产、企业运营、客户服务等核心业务场景。

电网是一个庞大的、复杂的、相互关联的网络，其主要任务是将电能从发电端输送到用电端。目前，无论在国际还是在国内，电网发展趋势体现在推动电网的数字化、智能化转型，提高电网运营效率和可靠性，赋能业务提质、服务基层减负，助力传统电网业务数字化转型。

1.1.1 电网发展历程

全球电网的发展经历了多个阶段，从最初的局部电网到现代的智能电网，全球电网整体发展概况体现在电力系统发展历程之中。

1. 电力系统的初创期

电力系统的历史起源于 19 世纪末工业革命。托马斯·爱迪生是电力系统的先驱之一，他在 1882 年在纽约建立了第一个商业电力系统——珍珠街发电站，这是世界上第一个使用直流（DC）发电的电力系统。然而，直流电力系统的传输距离限制了其应用范围。

随后，尼古拉·特斯拉和乔治·威斯汀豪斯开发并推广了交流（AC）电力系统。特斯拉发明的交流电感应电动机和变压器开启了电力系统的新时代。交流电力系统具有更高的传输效率，能够传输长距离而不会有太大的电能损失，从而使电力供应成为可能。

2. 电力系统的扩张期

在 20 世纪中叶，随着工业化的推进，电力系统开始了迅速的扩

张。这一时期，电力设施得到了大规模的建设，电网覆盖的范围也逐渐扩大，逐渐形成了如今的大规模互联电网。电力需求的增长推动了更多的发电站和输电线路的建设。这一时期，尽管也存在部分水力发电，但电力系统主要依靠煤、石油和天然气等化石燃料发电。

3. 电力系统的多样化和现代化

到了 20 世纪末和 21 世纪初，随着全球化进程的加速和电力市场化改革的推进，电力系统开始转向多样化和现代化。新的能源形式，如风能、太阳能、生物质能和地热能等可再生能源逐渐成为电力系统的重要组成部分。此外，核能作为一种低碳能源也在一定程度上推动了电力系统的发展。

随着技术的进步，现代化的电力系统开始采用先进的信息和通信技术，如电力系统的实时监控和远程控制，这些技术的应用提高了电力系统的运行效率和可靠性，降低了运行成本。

4. 智能电网时期

21 世纪初至今，全球电力系统正逐渐进入智能电网时代。智能电网利用先进的信息和通信技术，实现电力系统的自动化、互联和互动。它能够实时监测和调整电力系统的运行状态，提高电力系统的稳定性、可靠性和效率。智能电网的发展目标是实现电力系统的可持续发展，提高能源效率，降低碳排放，保障能源安全。多个国家的电力系统引入人工智能技术，用于辅助决策、电网调度辅助、运维检修人工替代等领域，其核心特点包括：高度集成的可再生能源和储能设备、高度自动化的控制和运行系统、高度互动的供需关系、高度透明的信息传输和数据分析等。

综上，全球电力系统从最初的直流电力系统发展到现代智能电网，经历了多个阶段，保障全球能源安全和促进经济社会发展具有重要意义。在未来，随着科技的进步，电力系统将继续发展，为全球提供更加高效、清洁和可持续的电力服务，同时未来将继续面临新的挑

战和机遇。

1.1.2 中国电网概况

我国电力行业发展迅猛,电源结构不断调整,火电优化水平提高,水电、风电等新能源发电开发力度加大,电网建设不断加强,电力环保成绩显著,电力装备技术不断提高,多项技术已经达到国际先进水平。进入 21 世纪,电力需求更加旺盛,发展潜力巨大,电力建设任务仍十分艰巨,电力系统的主要发展趋势是开发新能源,开发节能环保的新产品,降低设备的功耗,加快研究更高一级的电压输电技术,推广柔性输电技术,加快电网建设,优化资源配置,继续推广城乡电网建设与改造,形成可靠的配电网络。

我国电力发展的基本方针是:提高能源效率,保护生态环境,加强电网建设,大力开发水电,优化发展煤电,积极推进核电建设,适度发展天然气发电,鼓励新能源和可再生能源发电,带动装备工业发展,深化体制改革。在此方针的指导下,结合近期电力工业建设重点及目标,我国电力系统目前的发展将呈现以下四个鲜明特点:

一是自动化水平逐步提高、安全性和可靠性得到充分重视。先进的继电保护装置、变电站综合自动化系统、电网调度自动化系统以及电网安全稳定控制自动化系统得到广泛应用。随着电网建设和网架结构的加强、电网自动化水平的提高,电网安全稳定事故大幅下降。电网供电可靠性也有较大提高,平均供电可靠性为 99.820%。

二是经济、高效和环保。随着大容量机组的应用、电网的发展以及先进技术的广泛采用,煤耗与网损逐年下降。新建火电厂将广泛采用大容量、高效节能机组,采用脱硫技术和控制 NOX 的排放。在电网建设方面,将采用先进技术提高单位走廊输电能力、降低网损,加强环境和景观保护,城市电网将逐步提高电缆化率、推广变电站紧凑化设计。

三是结构调整力度就会继续加大。将重点推进电流域梯级综合开

发，加快建设大型水电基地，因地制宜开发中小型水电站和发展抽水蓄能电站，使水电开发率有较大提高。合理布局发展煤电，加快技术升级，节约资源，保护环境，节约水电，提高煤电技术水平和经济性。实现百万千瓦级压水堆核电工程设计、设备制造本土化、批量化的目标，全面掌握新一代百万千瓦级压水堆核电工程设计和设备制造技术，积极推进高温气冷堆核电技术研究和应用。在电力负荷中心、环境要求严格、电价承受力强的地区，因地制宜技术适当规模的天然气电厂，提高天然气发电比重。在风力资源丰富地区，开发较大规模的风力发电厂；在大电网覆盖不到的边远地区，发展太阳能光伏发电；因地制宜发展地热发电、潮汐电站、生物质能（桔梗等）与沼气发电等；与垃圾处理相结合，在大中城市规划建设垃圾发电项目。

四是技术进步和产业升级步伐将会加快。加快电网建设，优化资源配置。电力工业要着眼于走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染小的新型工业化道路，促进电力设备的本土化。需要重点发展以下几个方面的工作：推广单机容量 60 万千瓦及以上大容量超临界机组。加大大型水电站建设关键技术的研究，加快大容量水电机组设备制造本土化。引进第三代核电技术。加快 100 万千瓦级大型核电站设备制造本土化进程。实现 600 千瓦至兆瓦级风电设备本土化。引进第三代核电技术。基于人工智能等数字化技术，建设功能完善、信息畅通、相互协调的电力调度自动化系统，建立适应电力市场竞争需要的技术支持系统，电力行业的信息化达到国际先进水平。

1.2 面临的挑战

温室气体的过量排放导致温室效应不断增强，对全球气候产生不良影响，二氧化碳作为温室气体中最主要的部分，减少其排放量被视为解决气候问题最主要的途径，如何减少碳排放也成为了全球性议题。

为承担解决气候变化问题中的大国责任、推动我国生态文明建设

与高质量发展，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话上提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”，指明我国面对气候变化问题要实现的“双碳”目标。

能源行业碳排放占全国总量的 80% 以上，电力行业碳排在能源行业中的占比超过 40%。实现“双碳”目标，能源是主战场，电力是主力军，电网是排头兵，大力发展风能、太阳能等新能源是关键。习近平总书记提出构建以新能源为主体的新型电力系统，是对能源清洁低碳转型大势的准确把握，是对新能源在未来能源体系中主体地位的科学定位，是对电力系统在服务碳达峰、碳中和中发挥关键作用的更高要求，极大地增强了能源电力行业加快转型升级的信心和决心。

电网连接能源生产和消费，是能源转换利用和输送配置的枢纽平台。随着新型电力系统建设深入推进，电网的作用将更加突出，电网企业的责任将更加重大。加强人工智能等数字化技术与电网业务深度融合，持续拓展人工智能在电力领域应用的深度和广度，加快构建新型电力系统，促进新能源高效利用，助力新型电力系统建设和双碳目标实现。

一是在满足新能源大规模发展、高比例接入上责无旁贷。截至 2022 年底，我国风电、太阳能发电装机量占总装机容量的 30%。未来新能源仍将保持快速发展势头，预计 2030 年风电和太阳能发电装机达到 12 亿千瓦以上，规模超过煤电，成为装机主体；到 2060 年前，新能源发电量占比有望超过 50%，成为电量主体。无论是集中式新能源规模化集约化开发和大范围优化配置，还是分布式新能源便捷接入和就近消纳，都需要有效发挥电网能源资源配置的枢纽平台作用，有力支撑和服务能源供给清洁化进程。

二是在保障系统安全稳定运行和电力可靠供应上责无旁贷。与常规电源相比，新能源发电单机容量小、数量多、布点分散，而且具有

显著的间歇性、波动性、随机性特征。随着新能源大规模开发、高比例并网，以及电力电子设备的大量应用，电力系统的技术基础、控制基础和运行机理将发生深刻变化，电力电量平衡、安全稳定控制等将面临前所未有的挑战。这对电网企业优化调度运行方式和控制策略，提高系统调节能力和抵御风险能力提出了新的更高要求。

三是在深入推进电力科技创新和自立自强上责无旁贷。科技创新是第一生产力，也是推动能源电力转型发展的重要引擎。随着新型电力系统加快建设，一些技术领域进入“无人区”，需要不断攻克能源转型发展中面临的技术难题，加快突破“卡脖子”技术，抢占全球能源电力科技制高点。发挥企业创新主体作用，凝聚产业链上下游创新合力，这既是电力行业义不容辞的责任，也是实现高质量发展的内在要求。

1.3 人工智能关键技术

人工智能作为一门研究如何使计算机能够模仿人类智能行为的科学与技术，在过去几十年中取得了长足的发展。人工智能的总体技术架构包括图像识别、自然语言处理、预测算法、智能决策、知识图谱和智能芯片等关键组成部分。

图像识别是指让计算机能够理解并识别图像中的内容。它是计算机视觉的核心问题之一，也是人工智能应用中的重要任务之一。图像识别的目标是通过对图像中的像素进行分析和处理，将图像分类、定位、检测和分割等操作转化为计算机可以理解和处理的数据。例如，通过图像识别技术，计算机可以识别出图像中的物体、人脸、文字等。常用的图像识别方法包括卷积神经网络（CNN）和深度学习等技术。图像识别在人脸识别、目标检测、图像搜索等领域具有广泛应用。

自然语言处理是指让计算机能够理解、处理和生成自然语言的能力。人类的交流主要通过自然语言进行，而自然语言处理技术可以使计算机理解和处理大规模的文本数据，实现自动化的文本分析和智能对话等功能。自然语言处理包括语义分析、机器翻译、情感分析、问

答系统、文本生成等任务。例如，通过自然语言处理技术，计算机可以理解用户输入的自然语言指令，并根据用户的需求提供相应的回答或建议，自然语言处理的发展离不开机器学习和深度学习等技术的支持。

预测算法是指通过分析历史数据和模式，利用统计学和机器学习等方法，对未来事件进行预测和预测分析。预测算法可以帮助我们理解和预测事物的发展趋势，并为决策提供依据。常用的预测算法有时序分析、回归分析、分类算法和聚类算法等。例如，通过预测算法，我们可以根据过去的销售数据预测未来的销售额；或者通过分析股票市场的历史数据，预测股票价格的涨跌趋势。机器学习技术如决策树、支持向量机、随机森林等是常用的预测算法。预测算法在金融市场预测、销售预测、天气预报等领域具有广泛应用。

智能决策是指利用人工智能技术对问题进行建模、优化和决策的过程。在大规模、复杂的决策问题中，人工智能可以通过大规模数据分析、数学优化、模拟仿真等手段，为决策者提供支持和决策建议。智能决策可以在金融、物流、交通等领域实现智能化的决策过程。例如，在交通管理方面，通过智能决策，可以优化交通信号灯的控制算法，减少路网拥堵；在物流领域，智能决策可以帮助优化配送路径和物流调度，提高效率和降低成本。智能决策不仅可以提高决策的效率和精度，还可以减少人为误差和决策的主观性。

知识图谱是一种用于表示和组织知识的图形化结构。知识图谱通过抽取和整合多源异构的知识数据，建立实体、关系和属性之间的关联，形成一个庞大且结构化的知识库。例如，通过知识图谱，可以将人物、地点、事件等实体以及它们之间的关系进行建模和表示。知识图谱可以用于问答系统、智能搜索和语义推理等应用。例如，在问答系统中，通过结合知识图谱中的知识，可以更准确地回答用户提出的问题；在智能搜索中，知识图谱可以帮助提供更精准、全面的搜索结果。

果。知识图谱的构建需要依赖自然语言处理、数据挖掘和知识表示等技术。

智能芯片是指专门设计用于加速人工智能任务的芯片。传统的通用处理器在执行人工智能任务时存在计算效率低和能耗高的问题。智能芯片通过集成专门的硬件加速器和优化的电路结构，可以提升计算的效率和能耗的性能。例如，图像处理中的卷积运算和矩阵乘法等常见操作可以通过专门的神经网络加速器来实现。智能芯片广泛应用于神经网络的训练和推断加速，为人工智能应用提供了强大的计算支持。随着人工智能技术的发展，智能芯片也在不断创新和进化，包括更高的并行计算能力、更低的功耗和更丰富的功能。

1.4 人工智能发挥重要作用

人工智能技术是现代科技发展的重要组成部分，从机器学习到深度学习再到大模型，人工智能技术不断演进，对多场景下的人类生活产生了深远影响，体现在提升生产力、改善决策制定、开创新的可能性、提升人类生活质量、推动经济增长等方面。

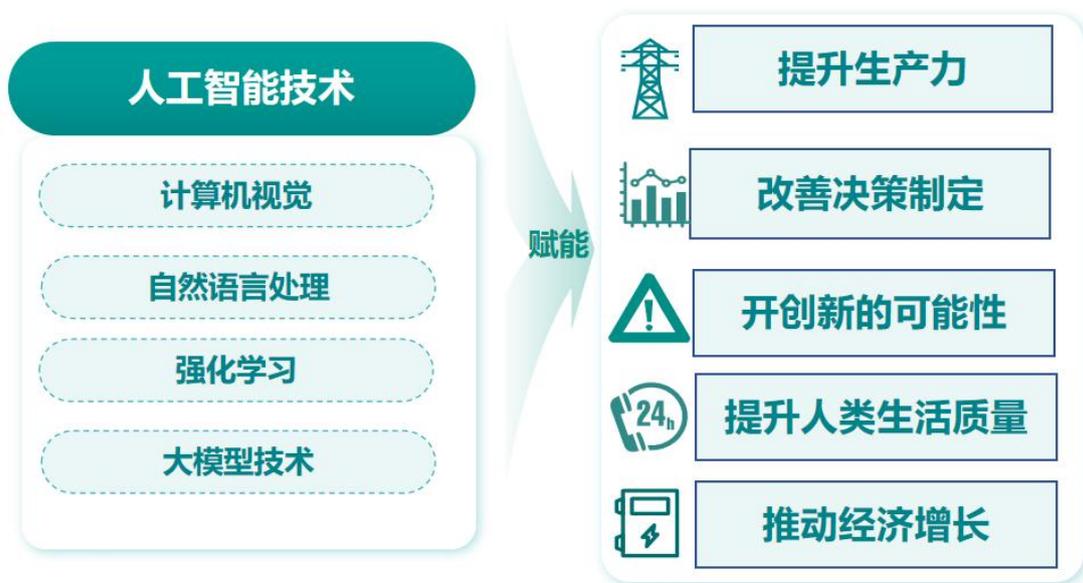


图 1-1 人工智能技术改善决策制定

人工智能技术提升生产力和效率。人工智能技术可以自动化许多繁琐的、重复的任务，从而提高生产力和效率。例如，人工智能可以用于自动化数据分析，这样人类就可以将更多的时间和精力投入到需要创新和创造性的工作中。工厂也可以利用人工智能工具和机器人来自动化生产线，提高生产效率和减少错误。

人工智能技术改善决策制定。人工智能技术可以通过处理和分析大量的数据来帮助决策者做出更好的决定。例如，预测模型可以帮助企业预测销售趋势，以便管理者可以提前调整生产计划。人工智能还可以被用于医疗领域，通过分析病人的病史和生物标志物数据，帮助医生做出更精准的诊断。

人工智能技术开创新的可能性。人工智能技术开创了许多之前无法实现的可能性。例如，自动驾驶汽车利用人工智能技术来感知环境并作出决策，使得无人驾驶成为可能。人工智能还可以用于创建更真实的虚拟现实体验，为娱乐和教育带来全新的可能性。

人工智能技术提升人类生活质量。人工智能技术的应用可以改善人们的生活质量。例如，智能家居设备可以让人们更方便地控制家中的设备和系统，提高生活的便利性。人工智能还可以帮助人们更有效地管理他们的健康，例如通过追踪和分析健康数据来提供个性化的健康建议。

人工智能技术推动经济增长。人工智能技术通过提高生产力、创造新的产品和服务、以及开创新的商业模式，推动了经济增长。根据麦肯锡全球研究所的一项研究，到 2030 年，人工智能可能会创造全球 13 万亿美元的经济价值。

国家高度重视人工智能技术的行业应用，围绕人工智能技术与电网核心业务深度融合的主线，面向发电、输电、变电、配电、用电、调度、交易等关键领域，聚焦图像识别、自然语言处理、预测算法、决策智能等重点技术应用领域场景，以推动人工智能技术有效服务电

网生产经营和基层减负提效为目标，探索了电力营销、电力调度、智慧配电网、电力市场、智慧共享财务、新能源功率预测、分布式电源接入、电力征信、电力区块链、电力元宇宙等典型应用场景，推进人工智能技术与电网核心业务深度融合，打造人工智能应用生态体系，驱动数字化转型。

第2章 智慧发电与智慧输电

2.1 智慧发电概述

随着“双碳”战略的提出，我国电力能源结构逐步向绿色、低碳的方向发展转变。新能源作为我国能源转型发展的重要力量，“十四五”期间将持续快速发展，并逐步成为主力电源，从发展趋势来看，我国东部地区城市优先开发和使用分布式新能源，再加上西电东送的能源，东部能源自给和西电东送相结合，将构建集中式与分布式并重的新能源发展格局。但由于风光发电的间歇性、波动性，随着其在电网渗透率不断提高，电力系统面临电能质量、供需平衡等方面挑战。

基于新能源发电功率波动性和随机性的典型问题，深度应用云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息化技术，实现能源系统在物理层面实现智能电网与能源网的耦合互联，采用互联网技术提供信息的互联互通平台，实现新能源发电系统的扁平化，推进能源生产与消费方式的转变，不断提升能源资源的综合利用率，达到节能减排的目的；借助互联网的信息提取能力以及人工智能强大的计算能力，可以提升新能源发电调度智能化水平，实现新能源发电与智能电网不断融合，能够构建起信息对等的能源一体化架构体系，达到能源供需平衡的状态，实现新能源传输网络智能化。

2.1.1 广域互联新能源智慧发电

连接大规模新能源生产基地与调控中心，与信息通信系统广泛结合，通过大数据分析、人工智能分析实现区域电力需求与电能质量动态监测评估，实现新能源发电的精准功率控制、储能以达到供需平衡，提升跨区域远距离输电以及大电网安全稳定运行能力。

2.1.2 分布式新能源智慧发电

集用户侧分散式能源生产、传输、转换、存储、消费于一体，电、热、

冷、气多能流耦合，广泛结合大数据、人工智能等信息技术，实现分布式新能源就地消纳，打造互联新能源发电的微网单元形态。

2.2 智慧输电概述

输电电力设备主要包含杆塔、架空线、电缆、绝缘子、金具等。输电线路一般较长，有的穿越城区，有的位于山区甚至无人区，运行环境复杂。且输电线路易于遭受诸如覆冰、舞动、雷击、污秽等气象灾害威胁，因此，如何运用智能化手段，替代人员巡检，实现异常识别，并对灾害提前预警是输电智慧化运维工作的重点。在输电领域，人工智能可以应用在以下几个方面：

在架空线运维方面，依托图像、视频、红外、遥感等采集装置，通过人工智能手段，可自动识别外力破坏、侵入、异物、鸟窝、覆冰、舞动、山火、安全距离不足等行为或风险。同时，通过进一步丰富模型库，完善算法，可以自动识别出螺栓松动脱落、金具磨损、导线断股、污秽、锈蚀等微小缺陷，基本替代人员巡视。

在高压电缆运维方面，依托图像、视频、红外等装置，可以自动识别电缆通道内外破、动物侵入、环境异常等问题。依托振动传感器的声纹数据，可以灵敏的识别电缆运行中出现的过流等异常现象，并对异常点进行定位。

在灾害预警方面，依托微气象装置和气象监测站的数据，可以与数值预报数据进行迭代演化，进而提升气象预报的准确度，特别是微地形、微气象区，从而进一步提升灾害预警的准确率。

在线路检修方面，依托图像、视频、声音、力学等传感装置，可以对线路检修的质量进行评判，大幅提升工作效率。

2.3 典型应用案例

2.3.1 新能源功率预测

随着能源供应短缺以及环境污染越来越严重，能源结构出现变化，可再生能源如风能、太阳能逐渐受到重视，呈现迅速发展的趋势。

不过，受多种因素影响，光伏发电技术具有强烈的随机性、间歇性和不可控性等特点，为电网系统的安全、稳定运行调度以及电能质量带来很多挑战，无法保障电网可靠、安全稳定运行。准确预测光伏发电功率可以有效减少光伏发电技术对电网系统的消极影响，为电网的运行调度提供有效依据。

目前主要的光伏发电功率预测方法包括：物理建模法、统计学法和人工智能法。物理建模法模型复杂、计算量大、抗干扰能力较差。常见的统计学法，诸如自回归移动平均法、回归分析法以及指数平滑法等，通常以实际的历史数据进行特征拟合，基于建模数据间的统计关系，进行功率预测。相较于统计学法，人工智能方法的自我学习能力更强，能够对模型的参数进行优化，使得预测更加精准，因而在短期风电功率预测中被广泛应用。

鉴于光伏发电功率预测准确性对电网安全调度以及稳定运行的重要性，提出基于 CNN 和 BiGRU 的光伏发电功率预测模型 CNN-BiGRU 对短期光伏发电功率进行预测。该模型采用卷积神经网络和双向门控循环单元 (Bidirectional Gated Recurrent Unit, BiGRU)，能够从气象数据以及数值天气数据中充分挖掘出数据之间的空间和时间特征。

2.3.1.1 数据预处理

对原始数据集进行更细致的清洗，去除异常值，如在特征集中剔除含有-999 的异常值的行。并对特征集进行特征筛选。对光伏电站和进行相关性分析，剔除相关性弱于十百分位的特征，从而缓解噪音特征对模型预测的干扰。

2.3.1.2 卷积神经网络与双向 GRU 模块

光伏发电功率数据经过上述数据预处理后作为模型输入。见图 2-1 为基于 CNN 和 BiGRU 的光伏发电功率预测模型框架，整个框架由 CNN 和双向 GRU 两个神经网络组成。CNN 用来提取数据的空间

特征，双向 GRU 模型用来提取数据的时间特征。

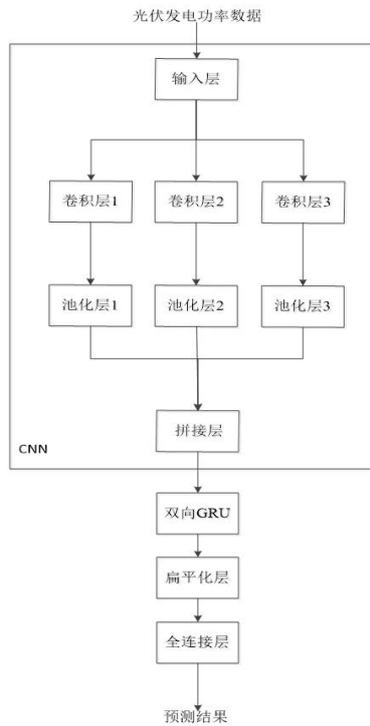


图 2-1 基于 CNN 和 BiGRU 的光伏发电功率预测模型结构图

卷积神经网络从光伏发电功率数据提取空间特征，具有良好的特征提取和结构发掘能力。卷积神经网络由输入层、卷积层、池化层以及拼接层组成。原始光伏发电功率数据是一维时间序列数据，因此将其输入网络前需要进行数据维度转换，在输入层实现将一维数据转换为三维数据。卷积神经网络通过三组大小不同的卷积核对光伏发电功率多变量之间的空间相关性进行了特征提取，每组卷积计算后再进行一次池化操作后则可得到三组大小相同的向量。接下来拼接向量在全连接层进行空间特征信息融合，即为挖掘到的空间特征向量。

CNN 提取出空间特征后，将其放入双向 GRU 模型学习数据之间前向、后向时间序列特征。在 GRU 模型中，状态是从前向后单向传输的，只能提取到数据的单向特征。序列预测任务中，当前时刻的输出和其前向数据和后向数据都有关联，所以在 GRU 基础上衍生出了

双向 GRU。为了提取正确的特征，使用双向 GRU 模型提取数据的时序特征。双向 GRU 不仅能够从长序列中提取特征，还可以从序列中捕捉双向特征。

2.3.1.3 实验设计与结果分析

1. 实验设计

数据采用国内某光伏发电场 13 个光伏电站从 2019-01-01 和 2020-12-31 两年历史数据，采样间隔为 15 分钟。即每天有 96 个采样点，共 70163 个样本。并以 2020-09-01 作为分隔时间划分出训练集和验证集。

提出模型 CNN-BiGRU 使用的卷积神经网络由三个卷积层、三个池化层和全连接层组成。卷积神经网络的第一个卷积层卷积核大小设置为 $9*23$ ，第二个卷积层卷积核大小设置为 $11*23$ ，第三个卷积层的卷积核大小为 $24*23$ 。每个单向 GRU 模型包含一层隐藏层，单元数设置为 88。

为了验证提出模型的有效性，使用相对开机容量均方根误差、相对实际功率均方根误差、负荷高峰时段最大绝对预测偏差，以及日最大绝对预测偏差作为评价指标，对模型 CNN-BiGRU 进行了实验验证和性能评估。

2. 实验结果分析

实验对 CNN-BiGRU 模型进行性能测试。实验测试结果如图 2-2 所示。图中分别展示六天预测数据的时间与光伏发电功率的关系图，其中蓝线代表实际发电输出功率，黄线代表预测发电输出功率。根据图的预测线和实际线重合程度，可见预测值与实际值非常接近，证明提出的 CNN-BiGRU 模型表现良好。

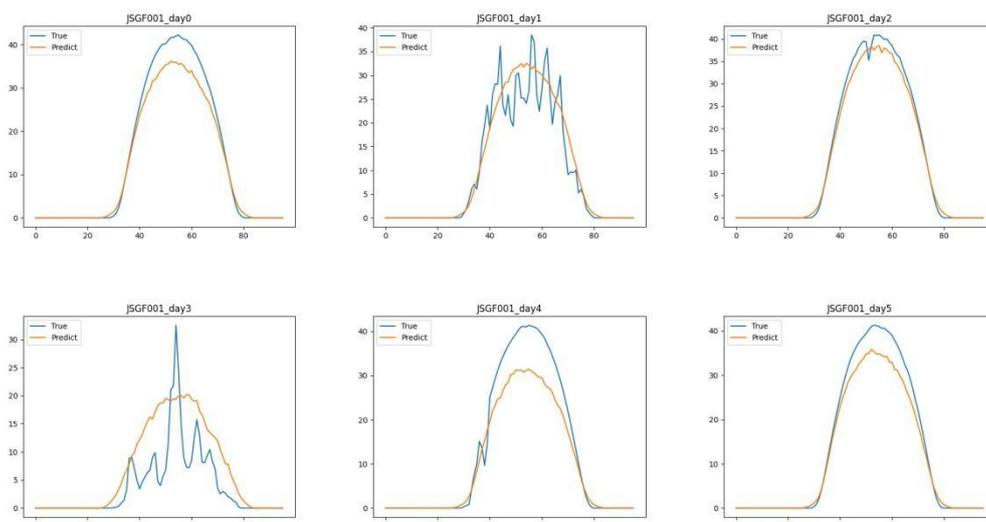


图 2-2 CNN-BiGRU 模型预测功率图

进一步，为评价模型与真实结果的拟合程度，通过具体的预测误差指标分析，得到模型 CNN-BiGRU 与对比模型 LSTM-CNN、XGBoost 的评估指标值，对比结果如表 2-1 所示。

表 2-1 光伏发电功率评估指标对比

模型	评估指标			
	开机容量 均方根误差	相对实际 功率均方根 误差	负荷高峰时 段 最大绝对 预测偏差	日最大绝对 预测偏差
LSTM-CNN	0.246	0.754	0.606	1.307
XGBoost	0.272	1.049	0.314	0.504
CNN-BiGRU	0.14	0.493	0.284	0.086

由表 2-1 可知，所提模型的各项评估指标值均显著优于对比模型。在开机容量均方根误差和相对实际功率均方根误差指标下，XGBoost 模型的预测性能最差，LSTM-CNN 模型次之，模型 CNN-BiGRU 预

测效果最好。特别是在开机容量均方根误差指标下，CNN-BiGRU 比 LSTM-CNN 的结果减少了 10.6% 的误差，相较于 XGBoost 模型的结果减少了 13.2% 的误差。在负荷高峰时段最大绝对预测偏差和日最大绝对预测偏差指标下，LSTM-CNN 模型的性能最差，XGBoost 次之，CNN-BiGRU 模型性能依旧最好。

综合图像和表，提出的 CNN-BiGRU 模型在各个评估指标下都呈现最优的效果，充分体现出 CNN-BiGRU 模型在提取空间特征和时间特征上都具有优势。

2.3.1.4 主要成效

为了提高光伏发电功率预测的准确性，提出了一种基于 CNN 和 BiGRU 的光伏发电功率预测方法，提高了预测模型的精度。通过相对开机容量均方根误差、相对实际功率均方根误差、负荷高峰时段最大绝对预测偏差，以及日最大绝对预测偏差四种评价指标分析了 LSTM-CNN、XGBoost 等预测模型在同一个数据集上的预测精度，实验结果表明，CNN-BiGRU 模型相较于文中提出的对比模型结果最优，预测的准确性更高。

2.3.2 分布式电源接入

分布式光伏发展迅猛，对电网安全稳定运行和管理带来一定影响。一是局部地区出现潮流反送，造成调峰困难和电压升高越限问题；二是分布式光伏信息接入比例低，质量不高，难以有效支持负荷预测和电力平衡安排；三是分布式光伏涉网技术标准不健全，运行管理水平亟待提高。因此分布式光伏智能化接入应用势在必行。

2.3.2.1 分布式光伏接入需求

1. 功率安全稳定控制

分布式光伏接入地区电网后，因分布式能源的功率波动性和随机性对负荷平衡、电压和功率因数带来波动性影响，给功率控制带来困难，严重时将危及电网安全。

2. 电网安全约束

分布式能源发电改变了传统配电网潮流分布情况，且其功率波动性和随机性使得配电网线路/设备重载情况的发生更加不可预测，给系统运行方式安排带来挑战。

3. 生产运行需要

随着分布式能源发电项目的增多，电网的接入压力也随之增大。未来随着大量的分布式项目接入电网，会给电网的负荷预测、继电保护整定等工作带来巨大的影响，同时也会给电网的稳定运行带来安全隐患。电网对于分布式能源发电的指标要求不能仅仅局限于电压、电流、功率因数、孤岛、谐波、闪变、短路能力等传统的规定，还必须将分布式能源纳入整体电网的潮流中来考察和管理。

为确保系统安全运行与电网功率平衡，分布式光伏接入一是应建立完备的接入设计，明确一次线路、继电保护、调度自动化及系统通信接入标准，提高分布式电源建设的效率和效益，提高分布式电源并网规范化；二是依托线上化应用，具备运行数据实时监测及有功功率安全稳定控制能力，在其发电异常、危及上级电网安全运行时，调节其有功功率输出，提高上级电网安全水平，在其发电严重异常且有功调节不能满足要求时，应视接入情况断开其电网侧专线接入开关或并网点开关，切除该能源系统，保障上级电网运行安全。

2.3.2.2 预期成效

通过分布式光伏典型接入方案设计以及线上化调控平台建设，加强信息接入、完善专业管理，实现分布式电站接受电网/管理人员控制、实时监控以及参与电网管理，以提高电网运行的可靠性，转变分布式光伏管理模式逐步趋向“分散发电，集中管理”，为完善分布式的精细化管理提供支撑，保障电网安全稳定运行。

2.3.2.3 分布式光伏接入建设方案

1. 分布式光伏典型接入方案设计

（1）系统一次设计

◆在确保电网和分布式电源安全运行的前提下，综合考虑分布式光伏项目报装装机容量和远期规划装机容量等因素，合理确定接入电压等级、接入点；同时明确相应电气计算（包括潮流、短路、电能质量分析、无功平衡、三相不平衡校验等），合理选择送出线路回路数、导线截面，明确无功容量配置，对升压站主接线、设备参数选型提出要求，提出系统对光伏电站的技术要求。

◆分布式电源并网电压等级根据装机容量进行初步选择的参考标准如下：8kW 及以下可接入 220V；8kW-400kW 可接入 380V；400kW-6MW 可接入 10kV。

（2）继电保护及安全自动装置设计

◆线路保护：分布式光伏以 380V 电压等级接入电网时，并网点、接入点和公共连接点的断路器应具备短路瞬时、长延时保护功能和分励脱扣等功能，按实际需求配置失压跳闸及低压闭锁合闸功能，同时应配置剩余电流保护装置。分布式电源接入变电站、开关站、环网室（箱）、配电室或箱变 10kV 母线时，一般情况下配置（方向）过流保护，也可以配置距离保护；当上述两种保护无法整定或配合困难时，需增配纵联电流差动保护。

◆母线保护：分布式电源系统设有母线时，可不设专用母线保护，发生故障时可由母线有源连接元件的后备保护切除故障。有特殊要求时，如后备保护时限不能满足要求，需相应配置保护装置，快速切除母线故障。需对变电站或开关站侧的母线保护进行校验，若不能满足要求时，则变电站或开关站侧需要配置保护装置，快速切除母线故障。

◆孤岛检测及安全自动装置：分布式光伏发电逆变器必须具备快速检测孤岛且检测到孤岛后立即断开与电网连接的能力，其防孤岛方案应与继电保护配置、频率电压异常紧急控制装置配置和低电压穿越等相配合，时限上互相匹配。分布式光伏接入系统的安全自动装置应

该实现频率电压异常紧急控制功能，按照整定值跳开并网点断路器。分布式光伏 10kV 接入系统时，需在并网点设置安全自动装置；若 10kV 线路保护具备失压跳闸及低压闭锁合闸功能，可不配置具备该功能的自动装置。

（3）系统调度自动化

◆调度自动化：10kV 接入的分布式电源项目，其涉网设备应按照并网调度协议约定，纳入地市供电公司调控部门调度管理；220V/380V 接入的分布式电源项目，由地市供电公司营销部门管理；10kV 接入的分布式电源项目，应能够实时采集并网运行信息，主要包括并网设备状态、并网点电压、电流、有功功率、无功功率和发电量等，并上传至相关电网调度部门；其电能量计量、并网设备状态等信息应能够按要求采集、上传至相关营销部门，如并网设备状态信息不具备直传条件，可由调度部门转发；建议预留下行控制通道；220V/380V 接入的分布式光伏，如纳入调度管辖范围，由用电信息采集系统（或电能量采集系统）实时采集并网运行信息，并能自动按规则汇集相关信息后接入调度自动化系统，主要包括每 15min 的电流、电压和发电量信息。条件具备时，分布式发电项目应预留上传及控制并网点开关状态能力。

◆远动系统：以 220V/380V 电压等级接入的分布式光伏，可通过配置无线采集终端装置或接入现有集抄系统实现电量信息采集、远传及控制；以 10kV 电压等级接入的分布式光伏本体远动系统功能宜由本体监控系统集成，本体监控系统具备信息远传及控制功能；本体不具备条件时，应独立配置远方终端，采集相关信息；以 380V/10kV 多点、多电压等级接入时，380V 部分信息由 10kV 电压等级接入的分布式光伏本体远动系统统一采集并远传。

（4）系统通信

通信通道应具备故障监测、通道配置、安全管理、资源统计等维

护管理功能。接入系统应因地制宜的选择通信方式，满足电源接入需求。

◆光纤通信：根据分布式光伏接入方案，光缆可采用 ADSS 光缆、OPGW 光缆、管道光缆，光缆芯数 12-24 芯，纤芯均应采用 ITU-TG.652 光纤。结合本地电网整体通信网络规划，采用 EPON 技术、工业以太网技术、SDH/MSTP 技术等多种光纤通信方式。

◆电力线载波：在 10kV 配电网中采用中压电力线载波技术。

◆无线方式：分布式电源光伏可采用无线公网通信方式；当有控制要求时，不应采用无线公网通信方式。

2. 分布式光伏调控一体化平台设计

建设分布式光伏调控一体化平台，实现分布式光伏电站设备级运行信息实时接入、转发、展示、分析等基础功能；通过调控电站逆变器运行状态，实现对 10 千伏及以下电压等级并网的区域分布式光伏有功功率自动化控制。功能设计方面：

（1）电站监测

◆针对单个电站的所有逆变器的电流、电压、功率、发电量及故障信息的实时监测。

◆对整个区域接入的所有电站进行汇总展示以及数据统计，提示电站的告警状态，同时显示各电站的关键数据（如当前有功无功出力、通讯状态、平均辐照、理论有功功率和无功功率）和区域统计数据（如发电量、装机容量、台数、等效节能减排等数据）。

（2）电站调控

◆实现对 10kV 及以下分布式光伏电站逆变器远程控制操作，并根据业务逻辑提供必要的条件验证、监护功能。通过定制化采集控制终端远程控制逆变器，实现控制指令的下达，支持对逆变器的开机、关机以及功率按百分比精准控制；支持逆变器群控功能。

◆实现优化控制功能，根据电站特性和电网运行现状，进行聚类

分析，使用新型架构方案和优化算法，形成更加友好型的控制策略，提升新能源的平滑特性。后期可逐步实现预警、安全智能分析和故障联动处理等功能。

（3）数据分析

◆根据指定区域装机发电情况，结合往年发电量变化情况与气象历史数据变化情况，以及天气气象及辐照数据，通过趋势分析模型，对指定区域的分布式光伏发电功率进行趋势预测。

◆深入挖掘分布式光伏海量数据价值，从建站分布、台区分布式发电与用电负荷情况、区域消纳能力等方面研究制定大数据分析模型，结合发电功率预测，实现区域负荷预测及分布式光伏接入承载力评估服务，分析判断台区供需平衡关系，辅助各级电力公司科学规划决策。

第3章 智慧变电与智慧配电

3.1 智慧变电概述

变电电力设备主要包含变压器、断路器、GIS、开关、开关柜、互感器、避雷器、无功设备、站用设备、金具、绝缘子等，应用场景围绕变电站展开。变电站一般运行环境相对稳定，因此在变电领域，主要针对变压器、断路器（GIS）、开关柜等重点设备开展智慧化工作，其目的是掌握重要设备的运行状态，提升电网运行稳定性。具体应用方面包括：

在变压器运维方面，通过分析高频、超声局放以及声级监测装置形成的大量图谱数据，可以建立相关模型，用于对变压器的运行状态进行综合评判。

在断路器（GIS）运维方面，通过分析高频、超声局放、振动声级监测装置的图谱和分合闸线圈电流波形，依托人工智能建模和深度学习，可以对断路器（GIS）进行状态评价。

以此类推，利用局放数据、红外数据，结合电气参量的运行数据，可以对开关柜等设备的运行状态进行预测。

在变电站内，利用图像、视频、红外等装置，可以依托模型算法，实现对设备漏油、外壳绝缘破损、螺栓松动、接头松动、鸟害、侵入、异物、安全距离不足、污秽、锈蚀等缺陷的识别。

在变电检修方面，可以利用图像、视频、激光雷达等多种方式，对检修区域进行三维成像建模，进而指导检修工作，避免发生安全风险。同时，也可比照输电检修，对检修质量进行智能验收。

3.2 智慧配电概述

智慧配电通过使用新一代技术和智能化设备，实现对电网的智能化管理和控制，从而提高电力系统的安全、稳定、高效和可靠性。智

慧配电系统包括智能终端设备、传感器、数据通信网络、数据中心和人工智能算法等组成部分，可以实现对电网各个环节的实时监测、分析和预测，并对电力设备进行智能化控制和调度，使得电力系统在实现电能供应的同时，最大限度地节约电力资源、减少能源浪费和环境污染。智慧配电技术对于推动能源转型、促进可持续发展和实现智慧城市建设具有重要意义。

1. 智能化监测

通过传感器和智能终端设备对电网各个环节进行实时监测，包括电力负荷、电压、电流、电能等参数的采集和处理。同时，还可以对电力设备的运行状态进行监测，实现故障诊断和预测，提高电网的可用性和可靠性。

2. 智能化控制

通过智能化终端设备对电力设备进行智能化控制和调度，实现电网的动态平衡和优化调度，从而最大限度地利用电力资源，提高电力系统的经济效益。

3. 数据化管理

通过数据采集和处理，实现对电力系统的数字化管理和分析，包括电力负荷预测、电能质量分析、设备运行状态分析等，为电力系统的优化调度提供数据支持。

4. 人工智能算法

通过人工智能算法实现对电力系统的智能化分析和预测，包括机器学习、数据挖掘、深度学习等技术，可对电力负荷、电能质量、电力设备运行状态进行智能化分析和预测，提高电力系统的运行效率和稳定性。

智慧配电技术的应用也非常广泛，包括智慧家庭、智慧建筑、智慧工厂、智慧城市等领域。例如，在智慧家庭中，智能电表可以实现对家庭能源的监测和管理，从而节约能源，减少能源浪费；在智慧城

市中，智能电网可以实现城市电力设备的智能化管理和调度，提高城市电力系统的稳定性和可靠性。

3.3 典型应用案例

3.3.1 基于网格化的智慧配电网规划辅助计算

整合电力相关信息系统数据，对基于网格化的智慧配电网规划辅助计算，形成一套技术先进、功能全面并且实用的辅助工具，不仅能够满足某地区各级配电网规划需求，而且还能够推广到其他地市城区等 A、B 类地区使用，为电网规划决策提供数据支持与科学依据，实现精准规划，辅助相关技术人员进行决策。

3.3.1.1 业务需求

随着配电网的规模日益庞大复杂，华北区域电力潮流均由全国西电东送、南北互供的核心通道汇集和输送，该通道承担着服务当地经济社会发展、保障首都电力供应的重要职责，但目前供电区域重叠、边界模糊、接线混乱、联络无序、供电交叉迂回等问题逐渐凸显，实现差异化规划迫在眉睫。为此某地区为形成网格化的智慧配电网，整合电力相关信息系统数据，对配电网的规划理念和规划软件提出了更高的要求，助力智慧配电网迅速落地。

3.3.1.2 主要成效

充分利用先进信息通信技术，打造图数一体、在线交互、智能高效的配电网网格化规划辅助系统，实现智能区域统计，推动实现配电网规划全业务流程可视化、在线化和智慧化作业，提升规划工作的效率和质量；为电网规划决策提供数据支持与科学依据，实现精准规划，辅助相关技术人员进行决策，达到提升工作效率的目的。

3.3.1.3 业务建设方案

1. 电网现状分析

获取 10kV 及以下和 35kV 及以上现状电网图形信息，通过图形化页面展示现状电网图形，在地理图上展示现状变电站布点，线路走

向，并可通过电网搜索功能实现设备地图快速定位。同时集成现状电网及以上设备的基本台账信息、设备运行信息，可关联查看设备台账和运行信息的集成和浏览。同时可以查看变电站负载率信息、线路负载率等信息，辅助电网规划业务。

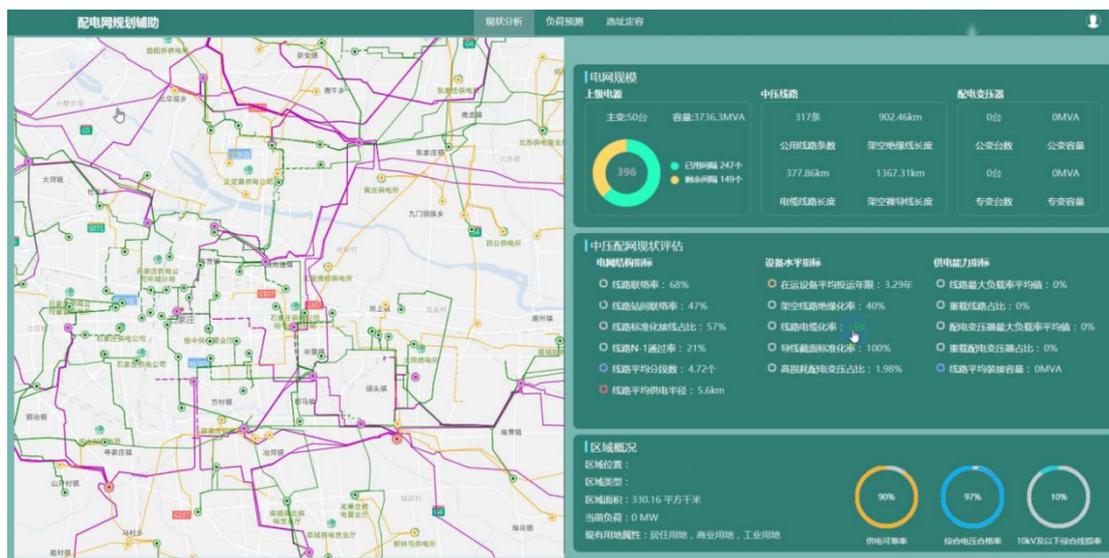


图 3-1 配电网图形信息

2. 配电网空间负荷预测

分析历史数据,包括营销数据调度数据以及用采数据,将地块控规规划信息以及该地块的大用户信息与历史负荷数据结合,分析网格负荷曲线;用空间负荷预测方法计算饱和年负荷,提供基础的数据录入与维护功能,支持对单位地块的大用户等数据的修改,方便修正目标年负荷数据。

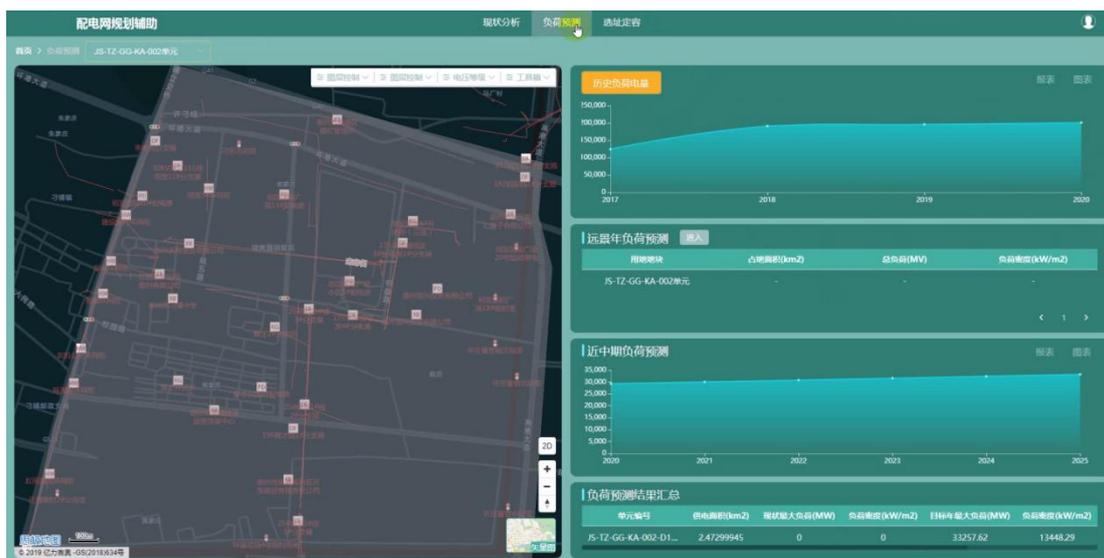


图 3-2 配电网数据分析

3. 变电站选址定容

基于空间负荷预测结果，结合地区分布式电源规划结果，对地区变电站进行选址定容；基于选址定容结果，分析变电站的供电范围以及经济计算指标。

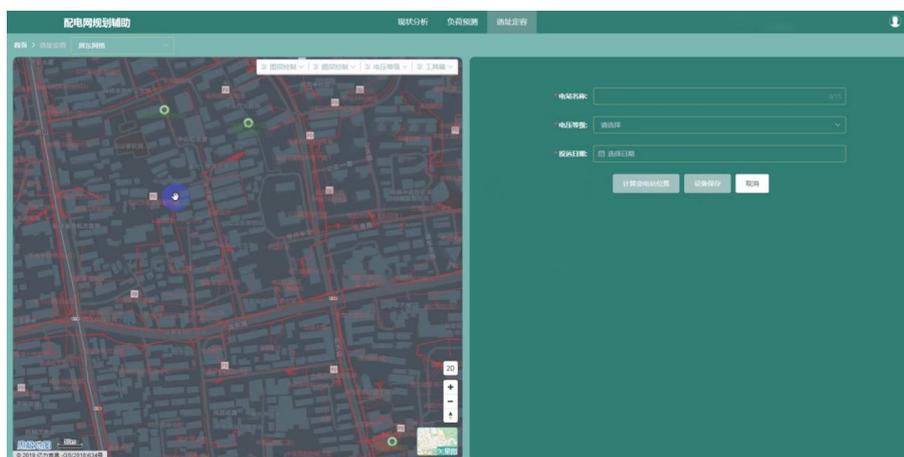


图 3-3 配电网选址定容

3.3.2 分布式电源高渗透智慧配电网故障恢复技术

3.3.2.1 业务需求

研究分布式电源接入智慧配电网后的故障区域定位方法，分布式电源接入智慧配电网后，其拓扑结构将由传统的单电源辐射型转变为多电源结构。当发生短路故障时，其短路电流流向复杂多变，如何针对分布式电源接入后的智慧配电网故障建立合理的数学模型是本项目难点之一。

研究基于数学凸优理论的含分布式电源的智慧配电网网络重构方法，智慧配电网网络重构问题的本质是高维、非凸、非线性的优化问题，如何基于数学凸优化理论，将原问题转化为具有较好求解性质的凸规划模型是本项目的难点之一。

3.3.2.2 主要成效

基于智慧配电网的孤岛划分策略及网络重构策略，同时考虑分布式电源对故障恢复的作用，研究智慧配电网的故障恢复策略，并在某公司配电网进行应用，提高配电网抗灾能力。

3.3.2.3 业务建设方案

研究分布式电源接入对配电网故障定位的影响；研究多源网络结构下基于馈线终端单元的故障信息编码方式；研究含分布式电源的智慧配电网故障定位模型及求解算法。考虑分布式电源调度、电容器组无功补偿、储能优化运行等主动管理，提高孤岛供电的等效负荷；考虑负荷的重要程度，以孤岛内等效负荷最大为目标建立孤岛划分策略，同时考虑孤岛内电力电量平衡。模型考虑重构过程中的开关操作次数、等效负荷恢复量及分布式电源调度、电容器组无功补偿、储能优化运行等主动管理策略；将模型转换成凸规划模型，采用数学凸优理论实现对模型的快速求解。基于智慧配电网的孤岛划分策略及网络重构策略，同时考虑分布式电源对故障恢复的作用，研究智慧配电网的故障恢复策略，并在某公司配电网进行应用，提高配电网抗灾能力。

第4章 智慧用电与电力市场

4.1 智慧用电概述

1. 背景描述

近年来，环境压力和能源危机，促使国家下大力气调整产业结构和实现经济转型。电力作为国民经济的重要支柱产业，以往的粗放型发展模式也不能更好地支撑经济社会又好又快发展。原有电力系统大多关注发电侧或输配电网的建设，通过大规模的增机扩容来满足电力负荷的快速增长需求，但随着能源供给拐带的不断临近，传统的电网发展模式将难以为继，从智能用电角度，加强用电侧资源的全国性普查、合理布局、优化配置和精细化管控迫在眉睫，这也为国民经济不合理产业结构调整决策以及缓解能源供给紧缺局面具有重大的战略意义。

2. 需求分析

从国内外及行业的发展需求，调动用电侧资源来参与电力系统的运行是缓解电网发展瓶颈的要务。而实现用电侧资源参与电力系统的互动成为该领域技术发展的重要目标。需要从更深层次的角度需理解互动的内涵，要站在国家、电力公司、电力用户等多方立场的前提下，从政策、技术、管理等多层次、多角度丰富智能用电互动的内涵，将有力提升电力系统的整体运行效率，产生显著的社会效益和经济效益。

3. 应用方向

电力用户智慧服务应用。电力营业厅分布广、客户需求多、窗口服务人员多，提高工作人员的工作效率及服务质量，降低人员需求和劳动强度是供电企业的现实需求。应用“互联网+”手段，利用多人随机强化学习理论和深度学习、知识引擎技术等技术，通过机器人系

统直接自助办理业务，实现营业厅服务智能化、无人化或少人化，将极大提高营业厅工作效率和服务水平。

4.2 电力市场概述

近年来，能源产业正迎来一个新的发展，智慧能源与能源互联网等概念越来越得到重视。能源预测和规划在能源部门发展和政策制定中发挥着越来越重要的作用。

人工智能在电力交易领域的应用方向主要包括市场需求预测、价格预测、交易自动化、负荷预测、风险管理、图文识别和数据溯源等。这些应用方向可以提高电力交易的效率、可靠性和可持续性，对于能源市场的发展具有重要的意义。

4.2.1 家庭用电预测

家庭用电是能源市场的一个重要组成部分，家庭用电的稳定关系着社会民生。预测家庭用电需求有助于对用电量进行全面的理解，减少家庭用电的电费支出，也有利于进行能源合理分配，实现智能供电。

物联网与人工智能等技术的兴起，以及家庭传感器的广泛采用，积累了大量的时间序列特征数据，这些数据可以用来对家庭用电模式进行分析。家庭用电常用的预测方法主要包括随机森林、小波变换、灰色模型、差分自回归移动平均模型、循环神经网络、BP神经网络、长短时记忆网络等。例如，利用麻雀算法优化BP神经网络，研究了光伏发电预测精度对家庭用电的影响。如图4-1，在一天时间内，光伏发电预测对家庭各电器功耗的影响。

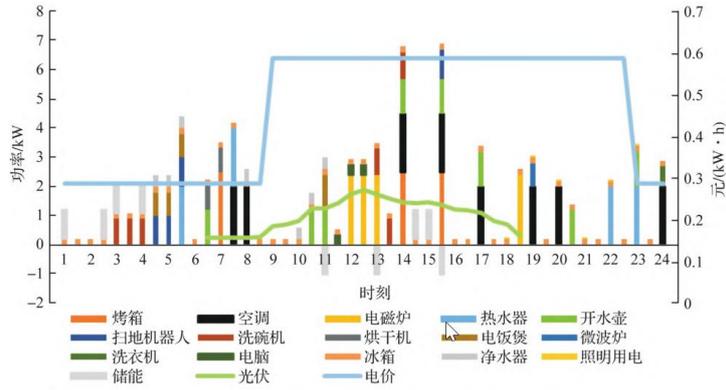


图 4-1 光伏发电预测家庭用电

状态频率记忆网络(State frequency memory network,SFM)是通过长短记忆网络而来，如图 4-2 所示，它由三个门控单元和一个状态更新单元组成。它吸收了循环神经网络的优点，在处理家庭用电时序数据时展现了强大能力。例如，利用 SFM 网络对某地区 5000 多居民的日用电量负荷预测，并分析了他们的用电模式。

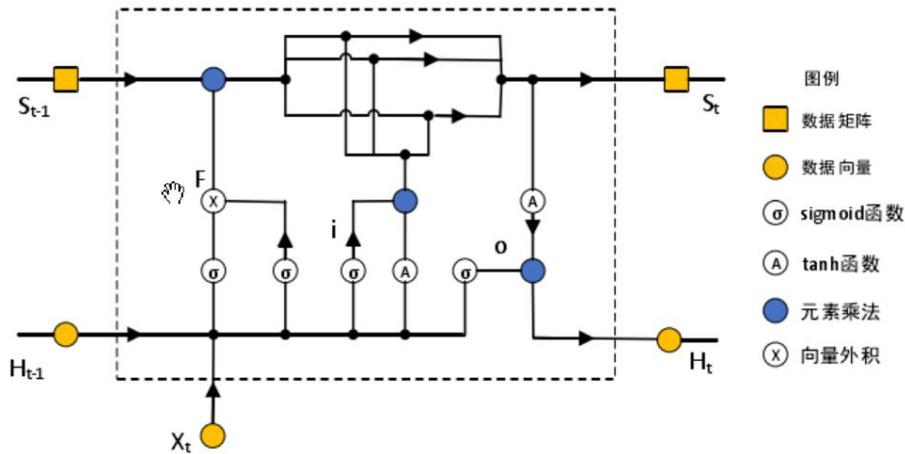


图 4-2 SFM 神经网络结构

除了上述基于深度学习技术，传统的方法如灰色模型(Gray Model,GM)在电力需求预测方面也得到了成功的应用。例如，基于 GM(1,1)灰色预测模型，结合 2009 年至 2018 年上海市的电力数据，对上海市未来五年的电力需求进行预测，并对预测结果进行分析，为

上海市未来的电力市场提供相应的对策。

4.2.2 新能源消纳预测

随着国家经济水平的不断提高、“双碳”目标的不断推进，电网新能源占比日益增加。区域电网新能源出力具有随机性、波动性较强的特点，同时区域电网负荷亦具有随机性、波动性。当电网新能源出力及负荷出现预测外的波动时，由于火力发电机组最小技术出力约束、爬坡约束、最小运行时间约束、检修约束，区域电网功率平衡约束，输电断面潮流约束，储能机组出力特性约束等等原因，使整体区域电网总功率无法平衡，导致区域电网出现新能源消纳问题。

目前，针对新能源消纳评估，有基于非时序模型，利用概率分析理论得到了新能源弃电功率概率分布，进而进行电网新能源消纳评估。随机生成模拟预测新能源消纳能力，通过求解新能源消纳功率和限电功率的离散概率分布，评估周期内的新能源消纳问题。

上述传统的方法均需建立新能源消纳混合整数非线性规划模型，继而采用优化求解器或优化算法进行求解。然而，采用优化算法进行区域电网新能源消纳评估，技术难度大、求解效率低、消耗时间长，无法为电网运行人员快速提供新能源消纳数据参考。下表 4-1 是有关区域电网新能源消纳预测的数据清单，主要分用电侧和供电侧两部分。最近，研究者基于双向长短期记忆网络 BiLSTM，改进了传统方法求解慢等问题，实现了评估区域内各时间断面下是否出现新能源消纳问题的快速在线预测，为电网运行规划人员提供依据。

表 4-1 区域电网新能源消纳预测的数据清单

类别	区域电网新能源消纳预测的数据	
用电侧	负荷	负荷时序出力曲线
	新能源发电机组	新能源时序出力曲线
	火力发电机组	火力发电机组最大容量、最小技术出力、爬坡率

类别	区域电网新能源消纳预测的数据	
供电侧	储能发电机组	储能发电机组最大容量、最小技术出力、最大最小充放电功率、最大充放电次数、充放电功率损耗
	核能发电机组	核能发电机组最大容量、最小技术出力、爬坡率
	水力发电机组	水力发电机组最大容量、最小技术出力、爬坡率

根据上述大量的区域电网新能源消纳历史信息,基于 BiLSTM 新能源消纳算法框架如图 4-3 所示。

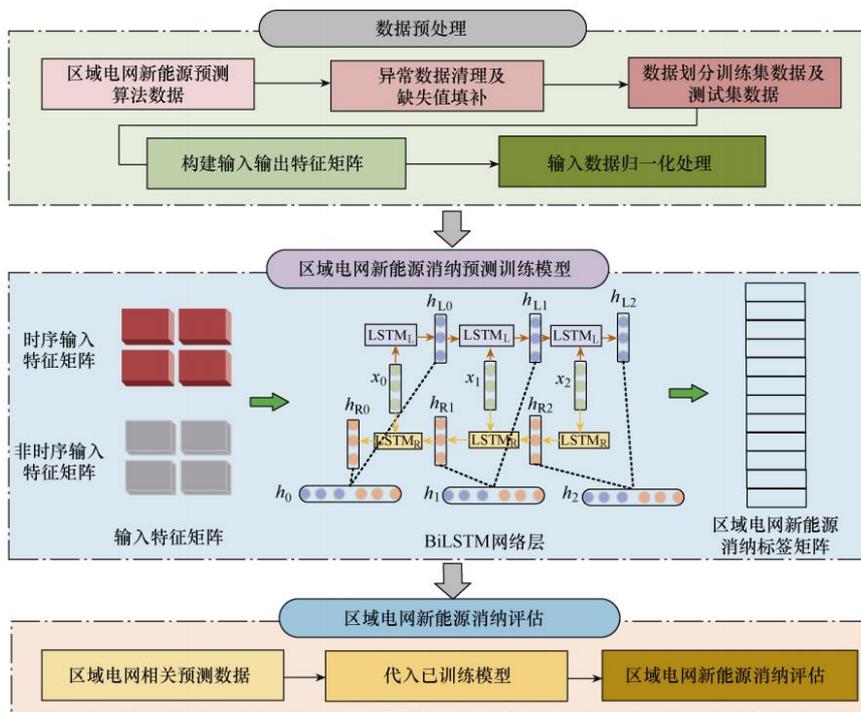


图 4-3 基于 BiLSTM 的新能源消纳预测算法框架

4.2.3 基于强化学习的可再生能源分析

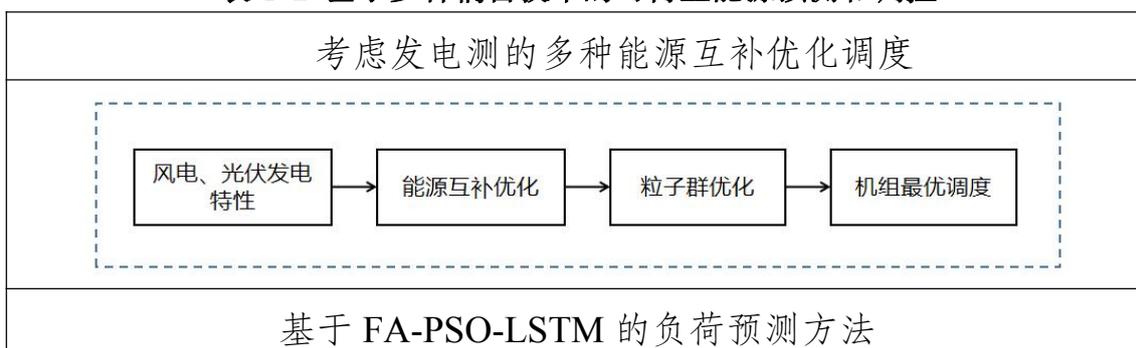
由于风能、光能等可再生能源出力的不确定性,给电网调节带来了难度。如果完全依靠发电侧来应对冲击负荷和可再生能源带来的调节和控制需求,存在着可调容量、调节速度和调节次数的限制。而某些负荷,特别是一些大的工业负荷具有快速调节的能力,如果充分利

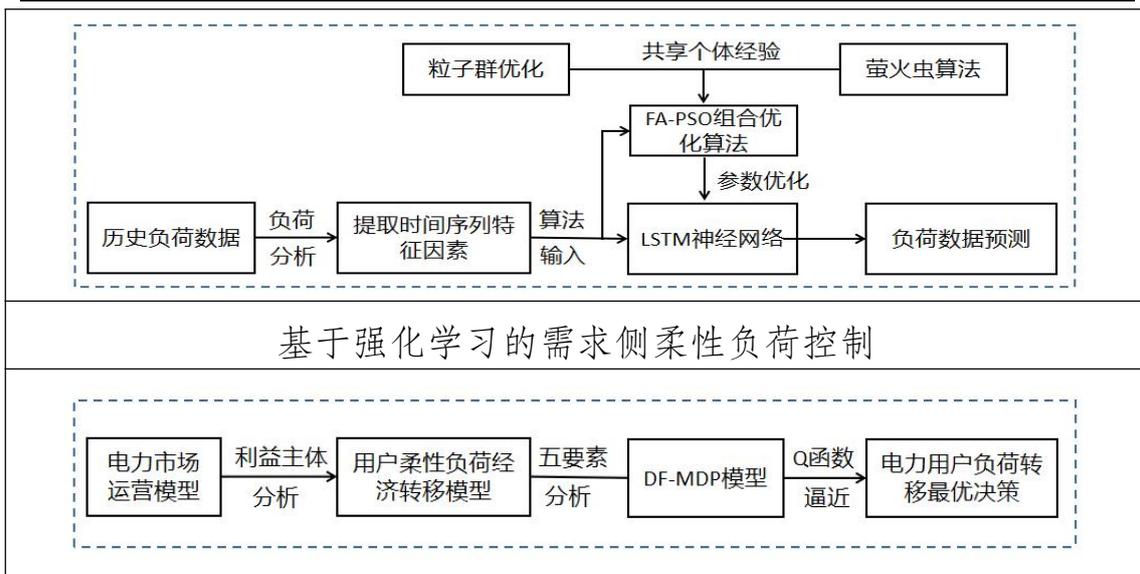
用其调节能力，参与电网的调频，可以降低调频成本，延长发电机的寿命。更重要的是，若无法有效的预测协调消费端用电，会导致产生过量的电无法消化，形成“弃光”、“弃风”等现象。

强化学习是一种基于环境反馈的智能算法，它定义行为和奖惩函数，通过大量的“试错”反馈，逐步收敛到好的行为。由于有着严格的数学逻辑证明，并且可以应用到无模型情况，目前已在电力系统如发电上的负荷频率控制、机组承诺、竞价控制等广泛应用。例如，根据多步 Q 算法，提高了分布式风能与储能结合的微网系统响应速度。根据实时电力系统的状态，基于强化学习解决机组恢复问题。再如，基于 Q 学习的深度 Q 网络控制电动汽车的充电功率，基于 Q 学习与蒙特卡洛结合对充电桩负荷功率预测和调控等等。

本小节我们介绍一种多技术耦合的算法框架，如下表 4-2 所示，它既考虑了发电侧的能源互补优化调度，也借助了传统智能优化模型如萤火虫(FA)、粒子群(PSO)算法及长短记忆网络(LSTM)用于电力负荷预测，同时基于强化学习用于需求侧的负荷控制。其中 DF-MDP 是基于马尔科夫决策过程，结合强化学习行为和环境的交互奖惩得分，得到最优的电力用户负荷转移决策。

表 4-2 基于多种耦合技术的可再生能源预测和调控





人工智能经过不断的发展，已广泛地应用于能源各个领域。上述介绍只是其部分应用，电网建设中还有很多潜在的人工智能应用场景。例如，工业用电的预测，大型园区建设、运营过程中的能耗预测，借助数字孪生等 AI 技术模拟电网运行过程，预测故障、调度等问题。未来，随着 AI 与工业互联网、大数据、边缘计算、云边协同等数字技术交叉融合力度不断提高，能源预测场景将更加深入和全面，模型预测精度和速度将更加精准高效。

4.2.4 基于博弈智能的综合能源集群运行优化

随着新型电力系统建设持续推进，光伏、地热、热电联产等分布式电源，电动汽车、电采暖等新兴负荷，用户侧能源系统逐渐演变为电、气、热耦合的综合能源系统。综合能源系统中各主体利益诉求多元、决策过程非完全理性，导致博弈互动机制复杂，难以实现其高效协同优化。

博弈智能是综合了博弈论和人工智能理论方法的交叉学科问题。它面向多个理性的智能体在同一环境中相互作用的问题，研究如何利用博弈论和人工智能技术，形成各个智能体自身利益最大化的博弈策略。一方面，在多智能体策略学习等一系列人工智能问题中，博弈论的理论体系为问题建模、策略评估与提升等课题研究提供了具有可解

释性的理论支撑；另一方面，数据驱动的人工智能算法也为复杂博弈问题的数值近似求解提供了可行性，博弈智能由此应运而生。

综合能源系统博弈优化主要以实现运营商与各区域的利益均衡为目标，实现运营商收益提升的同时，降低各区域运行成本。可在园区自治运行的基础上，运营商以电价引导各区域协同优化，促进区域间能量共享及分布式新能源就近消纳。

针对综合能源多方利益决策冲突问题，建立不平衡功率下基于演化博弈的集群协同优化模型，提出有限理性假设下综合能源系统多主体博弈架构。通过园区内部多能转化，实现各园区自治优化运行；在此基础上基于演化博弈进行多个园区间能量互补，实现多主体利益均衡下的协同优化。

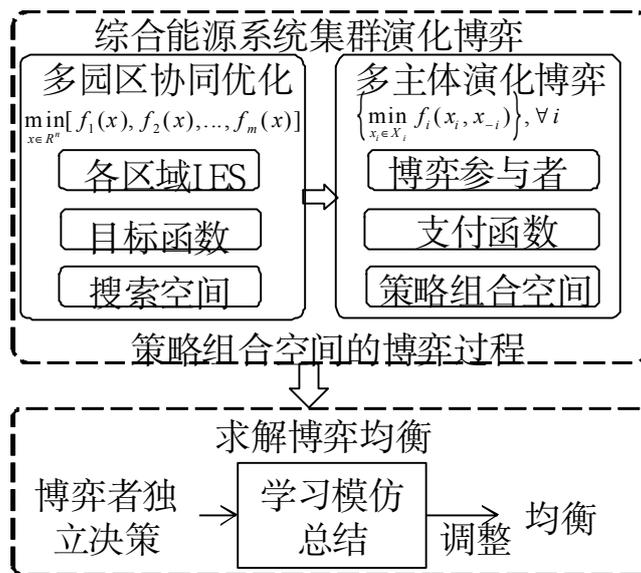


图 4-4 综合能源集群博弈优化运行

单个区域综合能源系统内主要包含的设备有：光伏、风力发电机、微型燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机、电锅炉、电制冷机和储能设备，各区域与配电网通过联络线进行电能交互。综合能源集群可以通过响应内部交易电价决策，调整其内部分布式能源出力，优化能源需求，从而进一步降低自身运行成本。

4.3 典型应用案例

4.3.1 电力营销业务需求

随着人民美好生活需要日益增长，广大群众对电力供应额依赖越来越强，对便捷用电和智慧体验的要求越来越高，当前日常生活服务与互联网的深度融合是必然趋势。随着电能替代、清洁供暖、分布式光伏、电动汽车等综合能源服务的发展，公司服务的内部协同和外部交互更加频繁，需构建“技术先进、柔性高效、安全可靠、灵活互动、友好开放”客户侧能源互联网服务云平台，建设能效数据共享、车联网、分布式光伏、能源电商四大服务体系，推进形成能源服务生态圈，“互联网+营销服务”是实现高效互动、响应需求变化、推动服务拓展，提升公司经营能力的重要行动。

深化“互联网+营销服务”创新，打造统一开放、功能融合的互联网服务平台，发挥传统业务优势，转变服务模式，是加快实现公司向互动化、智能化、多元化、个性化服务转型的重要措施；是满足客户全方位的服务需求，提供优质能源服务，创造增值价值，构建以客户为中心的现代服务体系的重要支撑。同时，打造敏锐的市场前端触角和快速响应能力，有利于布局和拓展服务形态，助力公司构建卓越能源互联网企业的战略目标达成。

4.3.1.1 应用方案

1. 统一的创新平台，赋能各单位业务创新

(1) 构建统一的云平台：集中开展机房、网络、硬件设备等基础设施建设，构建统一创新平台，统筹调配共享资源，通过网络为创新工作提供所需软硬件环境。以“资源共享、按需使用、弹性部署、广泛接入”为目标，实现依据创新业务需求动态分配和调用资源，根据业务变化快速提供匹配资源，打破创新工作受制于基础软硬件资源的瓶颈，有效提高 IT 资源利用率和动态分配、灵活扩展能力，有利于网省公司和各产业单位在开展创新工作时更加专注于业务创新本

身，避免受制于资源、环境等约束，降低各单位创新门槛，满足基本创新需求。

（2）构建研发运维一体化：构建和完善覆盖需求管控、协同研发、故障处理、版本发布全过程的运维一体化管理体系，围绕运行维护和技术服务两方面，从统一调度与服务、操作与监控、分析与展示三个层面，搭建统一、集成、开放、可拓展的一体化运维支撑平台，打造由精通业务知识同时具备跨界解决复杂问题的复合型运维人才构成的专业化、标准化、准军事化的运维支撑队伍，实现持续集成和持续交付，提升研发效能和发布频率，提供一站式开发服务，大幅提升团队交付效率，快速响应省公司及相关产业单位创新工作要求。

（3）提供统一的数据开发工具：一是依托数据融合共享应用平台，打造方便、灵活、快捷的数据分析工具，为创新工作提供数据分析技术支撑；二是通过统一的分析工具，以 95598 智能互动网站、电 e 宝、e 充电 APP、国网商城、光 e 宝等渠道系统的数据为中心，向省市公司的营销业务应用、供电服务指挥平台、用电信息采集系统、PMS 等数据的扩展，实现权限范围内数据探索和价值融合；三是以统一数据开发工具为触手，按照不同的业务维度加工数据并快速转化落地到数据仓库，同步按业务需求和规则快速汇聚为数据集市，打造相应的统一分析服务和统一交互服务，降低数据获取和数据分析的难度，实现安全可控机制下，随处可见的大数据分析。统一的数据开发工具，能有效构建数据创新机制，提升数据运营水平，赋能一线到高级管理人员助力企业增值。

（4）构建企业知识库、核心模型、算法等资源库，实现资源共享：建设统一高效的企业知识库、核心模型和算法等资源库，集中公司创新知识资源，对知识和信息进行统一存储管理、分类、归档、保存和快速定位查找。以知识库、资源库管理为基础，打造公司内部协同创新的支撑平台，提供项目管理、协同研究、成果评价、学习培训

等功能，助力知识管理科学创新体系形成，结合实际业务应用场景，打通公司内部知识整合流程，并将创新成果及时归档到知识仓库，提供知识服务与再次创作的素材，加快成果变现速度，提升知识利用效率，促进跨专业、跨渠道的知识共享交流，一方面，减少基础研究重复投入和资源浪费，另一方面，形成成果共享和两级互动的创新资源平台，使省公司及各产业单位在实际创新工作中切实受益。

2. 打通业务壁垒，支撑快速迭代

(1) 提炼公共业务，支撑跨专业协同创新：平台建设遵从“一系统、一平台、多场景、微应用”的技术路线，采用“大中台、微应用”的架构思路，提炼公共服务，建设共享服务中心，支撑跨专业协同创新。构建统一账户中心、统一支付交费中心、统一积分中心、统一账单中心、统一在线客服中心、统一知识库服务中心等能力中心，为业务创新、渠道发展赋能；构建服务连接平台贯通前台渠道应用与各能力中心的连接，构建业务连接平台搭建共享服务中心与各业务后台连接的桥梁；构建微服务融合治理平台，实现共享微服务的注册、升级、降级、熔断、路由、依赖调用等能力，为业务贯通、组合创新试错提供支撑。

(2) 以聚合业务为工具，连接跨专业合作：一是通过共享服务中心，发现不同业务之间的连接纽带，以“客户聚合、业务融通、数据共享、创新支撑”为聚焦点，从客户视角推进跨专业核心业务前移，形成业务板块各自繁荣又相互促进的业务布局，分子公司各具特色又相互借鉴的运营氛围；二是围绕公共业务，实现对客户诉求的统一接入和双向互动，为跨专业的业务服务提供统一管理和调度；三是建设全口径可复用的微服务池（微服务融合平台），打通各业务线条，为跨专业合作提供灵活服务能力；四是建设两级存储共享的数据融合共享平台，通过不断融合提炼公共数据服务推动跨专业的业务共性融合，实现业务、技术、数据的共享和统一，进一步驱动跨专业合作。

(3) 以微服务为依托，助推个性化应用创新：充分发挥“大平台+微应用”的技术架构优势，助推个性化应用创新。一是构建公共的、高度共享的微服务池，降低业务开发门槛；二是强化共享服务中心的公共能力，为微应用提供统一、丰富的公共组件；三是规范微应用的服务连接流程，并提供微应用统一发布、融合及治理的场所；四是打造数据融合共享平台为微应用提供多样化的业务模型和数据访问能力，提供强大的数据接入、处理、计算和质量管理能力。通过“大平台+微应用”的建设，业务开发人员可以自由组合微服务池内的已发布服务，充分利用搜索服务检索、统一权限、数据技术等公共服务，快速开展业务编排，无需代码开发或少量代码即可完成个性化微应用的创建、更新和发布。

3. 实现客户聚合，增强用户感知

(1) 增强体验，支撑各省个性化服务：坚持“人民电业为人民”服务宗旨，以客户为中心，充分运用互联网“平台+生态”，树立优质服务、用户至上的观念。通过客户聚合，以客户视角统一数据模型、重组业务场景，围绕客户专题服务实现服务拆分及业务重组，优化关联业务设计，实时统计微应用的使用频率、客户访问路径长度等指标，促进微应用的改进和提升。提升客户在信任度、功能交互、应用视觉、售前及售后等方面的使用体验，满足客户统一登录、一键办理、标准服务与个性化定制结合的要求，提升客户粘性。

(2) 支撑客户关系管理创新：转变工作方法，变被动服务为主动服务、灵活服务，促进从客户档案管理到客户关系管理、以产品为中心到以客户为中心的转变。提供多种方式、多种渠道的客户服务模式，并对服务全过程监控。基于“互联网+营销服务”创新网上服务模式，综合使用移动 APP、微应用、电话服务、网络服务等方式提供便捷服务，满足客户个性化需求；通过客户行为监测和大数据分析，发掘客户的偏好体验和个性需求并提供标准化服务和个性化服务，挖

掘影响客户满意度的因素并建立提升客户忠诚度的模式，将客户资源转变为企业资产以实现客户价值的最大化和长效化。

（3）支撑客户行为管理创新：通过多场景微应用提供智能化、个性化服务，引导用户由传统线下服务向互联网线上服务模式转变。简化用电服务事项，创新“零见面网上办”的服务模式，全面满足客户一站式多元化用能需求。通过对客户基本信息和行为数据的监测追踪、收集整理、评估分析，构建面向全客户的群体客户行为数据基线，实时发现和处理个体客户的差异性行为数据，将客户行为数据转变为企业数据资产，利用预测性分析，打造个性化客户互动，提供量身定制的行动。

（4）精准营销：基于客户消费大数据，建立客户消费预测模型，将客户划分为细分群体，从区域、行业、类别等多个维度分析客户交易和消费行为，发现客户需要和喜好，针对每个客户开展具有吸引力的产品推荐和营销行动，营造独特的客户体验。

4. 快速汇聚数据，赋能构建“大脑”

（1）支撑人工智能应用：依托“云平台+大数据”的软、硬件资源，将大数据、云计算能力与营销业务相结合，构建语言识别、态势感知、图像识别、自然语言处理及深度学习等基础服务，利用装有人工智能应用的便携式设备为产品和服务提供统一、标准的入口，将人员、产品、技术及服务通过互联网联接到一起，通过计算、数字化、互联网的技术力量支撑公司在智能家居、智能机器人、智能电表和智能客服等人工智能技术领域开展创新工作。

（2）支撑服务模式：聚合各渠道的账户数据和客户数据，构建统一的客户服务全景视图，结合渠道服务数据和渠道运营数据为基础开展客户服务大数据分析应用，实现客户服务标签化，有效积累、传承、复制最佳的服务并带给最适合的客户，支撑服务模式由以业务为中心到以客户为中心、从管理客户到服务客户的转变。

(3) 支撑产业发展创新：运用互联网“平台+生态”推进“互联网+营销服务”电力新服务创新实践，优化整合公司数据资源，促进渠道融合、服务同源，支撑省公司和产业单位积极创新开拓各类新兴业务：一是利用客户大数据，分析客户对电力的需求，创新客户服务模式，增强客户粘度及行业口碑；二是利用客户行为大数据，对客户进行分类和管理，实现客户的精准营销；三是利用客户消费大数据，分析客户消费偏好和产品需求，有针对性的制定产品策略；四是利用用电大数据，分析客户不合理用电及异常用电，提供合理用电方案指导；五是利用信用大数据，建立用电客户信用评价体系，减少电费的坏账风险。

4.3.1.2 应用成效

1. 社会效益

(1) 通过公司的标杆示范效应，带动其他电力企业以及中央企业提升企业运营的创新性和科学性。

(2) 通过构建供电服务新体系，为提升服务水平注入活力，显示出公司建设“一强三优”现代公司、创建“两个一流”的良好品牌形象，具有良好的社会效益。

(3) 为客户提供足不出户的电力服务，实现用户贴身诉求，为用户提供更好的公共服务；

(4) 为客户提供足不出户的能源电商服务、电动汽车服务、光伏云网服务和能效服务，让客户通过一个渠道，办理多项业务，节省了时间，为社会提供了方便。

2. 经济效益

(1) 实现业扩办电、充值缴费等实体营业厅业务线上化办理，有效降低了人力、耗材等实体营业厅运营成本；

(2) 有效降低电力公司内部管理及人员资源成本，降低人工服务比例，从而降低整体运营成本。

(3) 以企业门户形象统一服务用户，提升用户对公司品牌的统一认知；形成传播合力，提升公司品牌知名度和客户忠诚度，降低公司企业形象宣传成本。

(4) 融合公司各渠道产品功能服务，明确定位划清界线，减少公司内部竞争及功能交叉情况，降低各自独立的开发及运营成本。

4.3.2 人工智能技术在电力交易市场的业务需求

电力交易市场作为经济社会的重要支撑，日益面临着能源效率提升、清洁能源发展和智能化运营的挑战。人工智能技术在电力交易市场的应用可以提高市场效率，优化资源配置，降低成本，提升服务质量，同时也能够帮助市场监管机构更好地监管市场行为，确保交易市场的稳定和可持续发展。

1. 预测与优化能力能源需求与供应

电力交易市场需要准确预测电力需求和价格趋势，以便及时作出合理的调整和优化决策。人工智能技术可以利用历史用电数据、天气数据、经济数据等，建立预测模型，提供精确的电力需求预测和供应预测，帮助交易市场决策者做出有效的能源调配决策。

2. 负荷管理与优化

人工智能可以协助电力交易市场进行负荷管理与优化，根据实时需求和供应情况，通过智能算法优化电力分配，减少能源浪费，提高供电效率。

3. 市场价格预测

人工智能技术可以帮助电力交易市场预测电力价格的波动情况，包括短期和长期价格走势，帮助交易者做出更明智的购买和销售决策。

4. 交易决策支撑

通过分析大量的历史交易数据和市场信息，人工智能可以为交易市场的参与者提供决策支持，帮助他们更好地了解市场趋势、优势和

风险，从而做出更明智的交易决策。

5. 欺诈检测与安全保障

电力交易市场需要防范欺诈行为和确保交易的安全性。人工智能技术可以通过监测交易数据和行为模式，识别潜在的欺诈行为，并提供更安全的交易机制和措施。

6. 客户服务与智能推荐

电力交易市场需要为客户提供更好的服务体验。人工智能可以利用数据分析和个性化推荐算法，向客户提供更适合其需求的电力产品和服务。

7. 市场预警和风险管理

通过实时监测市场数据，人工智能可以发现潜在的市场风险，并提供预警系统，帮助交易市场及时采取风险管理措施，保障市场的稳定运行。

8. 数据处理与决策支持

电力交易市场涉及大量复杂的数据，人工智能技术可以处理和解析这些数据，提取有用的信息，为交易市场的决策制定提供支持。

9. 数据认证与溯源

电力交易市场中存在大量多规模、多主体、交叉、快速的交易场景，以及数据认证颁发证明，信息可查询追溯的应用需求。通过人工智能区块链技术，可实现绿电、绿证等电力市场交易的数据认证，数据不可篡改并且可溯源查询。

4.3.2.1 人工智能在电力交易市场中的成效

1. 智能电力交易平台建立

国网经营区多省份已经建立基于区块链和智能合约的智能电力交易平台。这些平台可以让能源生产者和消费者直接交易，实现点对点的能源交易。去中心化的交易方式可以提高交易效率，减少中间环节，促进了可再生能源的消纳和发展。

2. 辅助电力交易决策

参与电力市场交易的电力用户采用人工智能技术来实现动态申报电价调整。通过实时监测市场供需情况，结合大数据分析，这些公司可以灵活地调整申报电价，以更准确地反映市场情况，提高市场透明度和灵活性。

3. 定制零售套餐电价策略

人工智能为不同用户定制个性化的零售套餐电价策略。通过分析用户的用电习惯、需求模式等数据，采用人工智能算法，向用户推荐最优的电力交易策略，最优的零售电力套餐。如“e-交易”平台可以为每个用户提供更适合其需求的零售套餐电价方案，增强用户满意度和忠诚度。

4. 定制零售套餐电价策略

人工智能为不同用户定制个性化的零售套餐电价策略。通过分析用户的用电习惯、需求模式等数据，采用人工智能算法，向用户推荐最优的电力交易策略，最优的零售电力套餐。如“e-交易”平台可以为每个用户提供更适合其需求的零售套餐电价方案，增强用户满意度和忠诚度。

5. 便捷市场主体注册

某市电力交易中心“e-交易”电力交易系统充分发挥移动端的优势，融合数字安全证书、OCR识别、人脸识别、活体检测等人工智能技术手段，通过平台调取用户工商信息、用电信息，实现电力用户一键式智能注册服务，提高注册效率。

以上内容展示了人工智能技术在电力交易中的潜力和应用前景。通过引入人工智能技术，电力交易市场可以实现更智能、高效和个性化的服务，推动电力市场的创新和发展，有效促进能源转型和可持续发展。

4.3.2.2 人工智能在电力交易市场中的应用及方案

1. 负荷预测与优化

人工智能可以分析历史用电数据、天气数据等，预测未来的电力负荷需求。这有助于电力交易市场做出合理的负荷规划和供应安排，避免因供需不平衡而导致的浪费和成本上升。

2. 电力价格预测

人工智能可以通过分析历史交易数据、天气趋势和市场情报，预测电力价格的波动情况。这有助于交易市场中的参与者做出更明智的购买和销售决策，优化他们的能源采购策略。

3. 交易决策支持

人工智能技术可以利用大数据分析，帮助交易者更好地了解市场走势和风险。通过智能算法，交易者可以获得更准确的市场预测和交易建议，从而做出更明智的交易决策。

4. 能源组合优化

电力交易市场涉及多种能源来源，包括传统能源和可再生能源。人工智能可以优化不同能源之间的组合，以实现最佳的能源供应结构，从而提高市场的可持续性和经济性。

5. 区块链与智能合约在能源交易的应用

智能合约是区块链上的自动执行代码，是人工智能和区块链技术的结合，可以在满足特定条件时自动执行交易。在能源交易中，智能合约可以根据预先设定的条件，自动完成能源交易，确保交易的快速和准确执行。实现能源市场的自动平衡，根据供需关系自动调整能源价格，确保能源市场的稳定运行。

区块链服务通过人工智能身份认证、区块链数字化凭证及区块链智能合约等技术为交易平台提供数据存证、智能结算、溯源等服务。

6. 智能电价定制与动态调整

通过人工智能技术，在电力现货交易市场可以实现动态电价调

整，人工智能可以实时监测供应和需求情况，随时掌握市场的动态变化。这使得电力市场可以更加灵活地调整电价，以应对突发事件或大规模能源需求波动。根据实际供需情况，合理定价，提高市场灵活性和透明度。

7. 人工智能在电力市场预测中的应用方案

随着某省电力现货市场建设工作的稳步推进，现货市场交易电量占比也将逐年增大，该省电力系统的实时供需情况将由现货市场中确定的价格来反映，通过多种形式的交易方式，去优化电力系统中的资源配置。需要预测月度售电量和月平均售电价来分析电力现货市场交易情况。

基于弹性网络和灰色关联分析相结合的影响因素挖掘模型，降低了数据维次，构建了该省电网基于智能挖掘方法的改进 SVM-LSTM 月度售电量预测模型，将影响因素作为输入变量，月度售电量作为输出变量，运用灰狼算法优化 SVM 预测模型的参数，以及方差法分配权重给各模型，提高组合模型的预测效果。

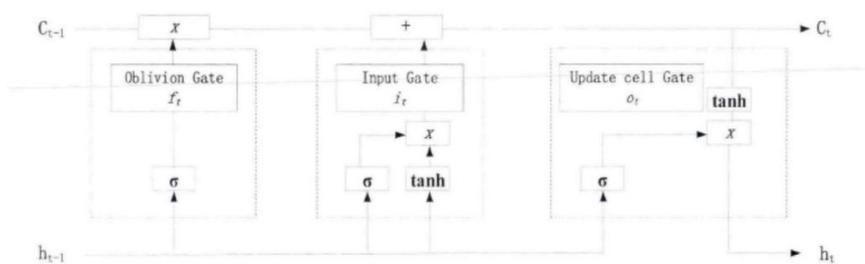


图 4-5 LSTM 神经网络结构图

基于月度售电电量预测数据，可实现月度电价预测以及月度现货市场中的现金流出量预测，预测数据有助于浙江电网进一步统筹资金，合理地安排电网建设资金的投入，提高该省电网的资金利用效率，改善企业经营状况。同时，还可以帮助该省电网研究自身业务与现货市场之间的动态关系，有利于该省电网针对电力现货市场进行适当的

业务设计，更好的迎接电力改革带来的挑战。

4.3.3.3 区块链技术在绿色电力交易中的应用方案

随着国内绿色电力参与市场交易逐渐放开，电力交易系统面临信任和效率的双重挑战，亟须优化机制设计，构建可信高效的交易环境以适应大规模多主体交易的可信性和时效性需求。

某市电力交易中心积极创新，引用先进技术，基于人工智能区块链技术具有多方共识、不可篡改、全程可追溯的技术特点，有效解决了绿色电力交易多主体、跨区、跨省交易模式下，交易系统面临的信任和效率双重问题，建立了用户侧绿色电力消纳凭证生成、交易、溯源机制，建成了具有高效共识、链上交易、身份认证等核心能力的绿色电力交易系统。

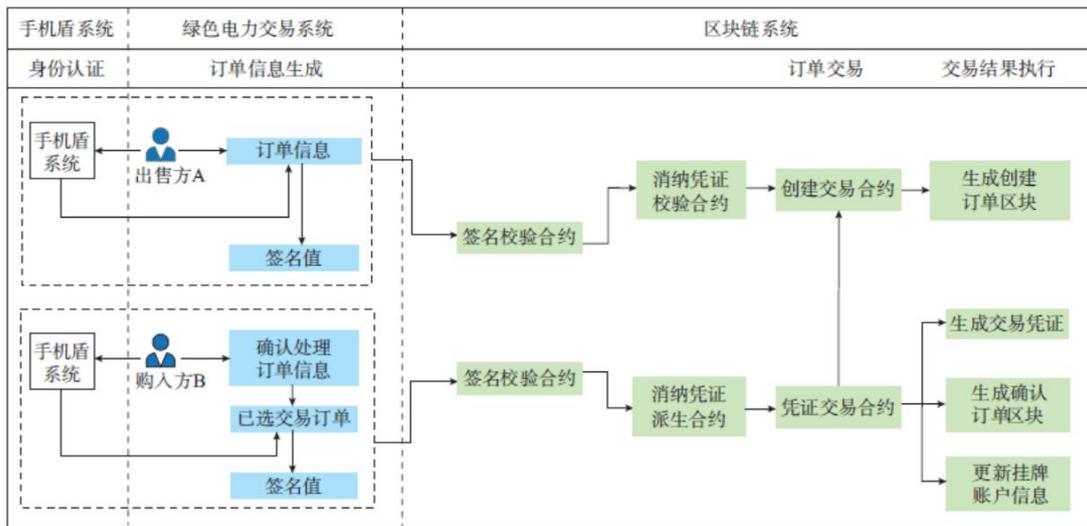


图 4-6 链上交易流程

某市电力交易中心应用人工智能区块链技术为绿色电力交易中消纳绿色电力的用户提供绿色电力消纳凭证，进行用户的绿色电力消费证明；设计了用户侧绿色电力消纳凭证的生成、交易与溯源机制，支撑用户侧所购买绿色电力环境价值的体现、流转与追溯；建成可信、高效的绿色电力交易平台，支撑多主体大规模参与市场交易。

2022年，基于区块链的绿色电力交易系统面向全国开展绿色电力凭证交易，共10个省参与省间交易，绿色电力消纳凭证转移数量达245.5万个，相当于可再生能源电量2.455TWh，支撑全国多个省份完成年度可再生能源消纳责任权重，通过市场化交易手段促进绿色电力的消纳。

4.3.2.3 未来展望

随着人工智能技术的不断发展，其与电力行业的融合将呈现出更多创新和应用。推动电力市场向智能化方向发展，实现更加智能、高效的能源交易。

人工智能与电力交易相结合将为电力行业带来更高效、智能和可持续的发展。通过智能化的电力交易，将更好地满足用户的需求，提高能源利用效率，推动电力市场向更加绿色和智能的未来发展。然而，同时也需要关注隐私保护、数据安全等方面的挑战，并制定相应的监管政策，确保人工智能与电力交易的融合发展能够健康稳健地进行。

第 5 章 智慧电网调度

5.1 智慧电网调度概述

为了有效应对日益严重的环境污染、气候变化及能源危机问题，以电网为核心并深入融合可再生新能源技术和互联网信息技术的能源互联网，是实现广泛互联、高度智能、开放互动的未来能源利用新模式，需要发展和建立与之相适应的在线安全防御支撑体系。在现有电网智能调度系统基础上，进一步融合信息物理系统理念，建立信息与模型混合驱动的智慧电网调度与安全防御体系。

智慧电网智能调度与安全防御体系功能框架如图 5-1 所示，主要以信息物理系统和人机融合为目标，以互联大电网为核心，以信息流和能量流为纽带，以大数据和人工智能为支撑，集成先进的时空大数据平台、多源信息融合、量化态势评估、精准协同控制、自然人机交互等技术，实现大电网智能全景安全主动防御与精准管控。

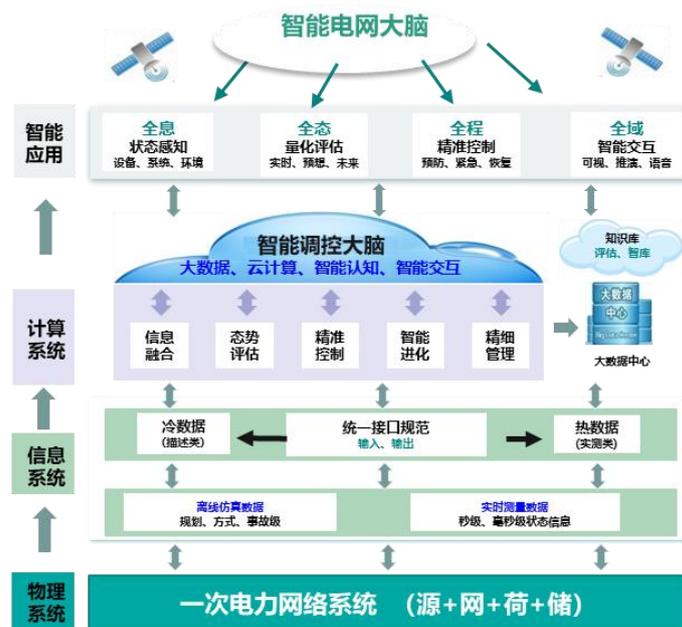


图 5-1 智慧电网调度功能架构

智慧电网调度与安全防御体系软件架构如图 5-2 所示，主要包括多响应信息源数据整合、大数据处理与分析、稳态评估与决策、动态评估与决策、调度运行管理、历史数据管理、人机交互平台、自动控制系统对接等模块。

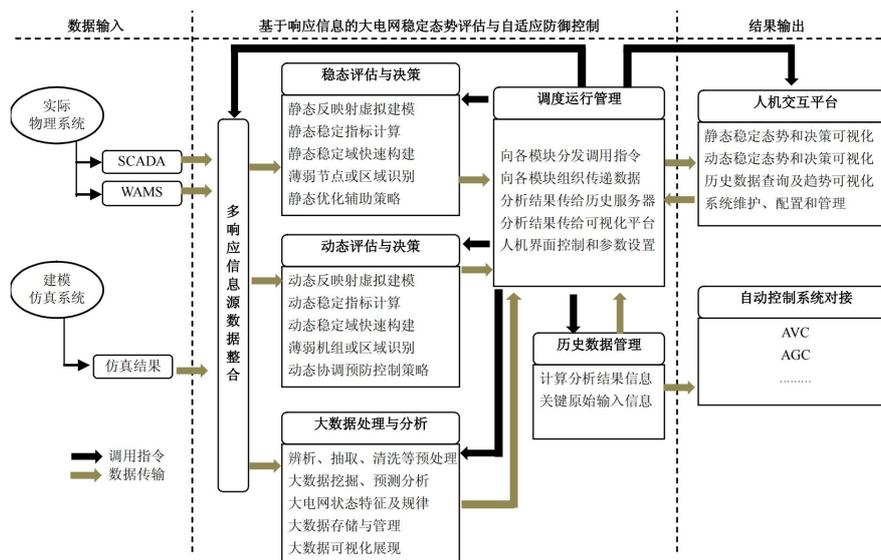


图 5-2 智慧电网调度软件架构

智慧电网调度与安全防御体系，主要针对电网静态和动态信息(仿真或测量)为核心处理对象，主要目标是充分挖掘电网广域时空运行轨迹特征及关联规则，在此基础上实现大电网不同运行场景下的在线稳定态势量化评估，以便快速识别电网薄弱环节及主导因素，并根据电网实际运行轨迹自适应给出广域协调防控策略，将电网自动控制在良好的运行状态，实现大电网的“全景态势感知、广域协调控制、灵活高效服务”，提升超大规模电网的多维度、立体化、全景式安全防御水平。

5.2 智慧电网态势评估与控制技术

5.2.1 静态稳定态势评估与决策

伴随着电网的信息化、自动化以及智能化的水平不断提升，逐渐形成了电网信息物理融合系统。现代的静态稳定分析，在能源互联网

战略的背景下，以高度融合的电网信息物理系统理论作为支撑，利用 WAMS 以及大数据和人工智能技术浪潮的兴起，以机理分析和数据挖掘为主的分析方法逐渐应用于电网稳定分析领域，数据驱动、信息驱动的理论分析框架相继被提出，对于分析电力系统静态稳定方面具有重要的理论意义和工程价值。

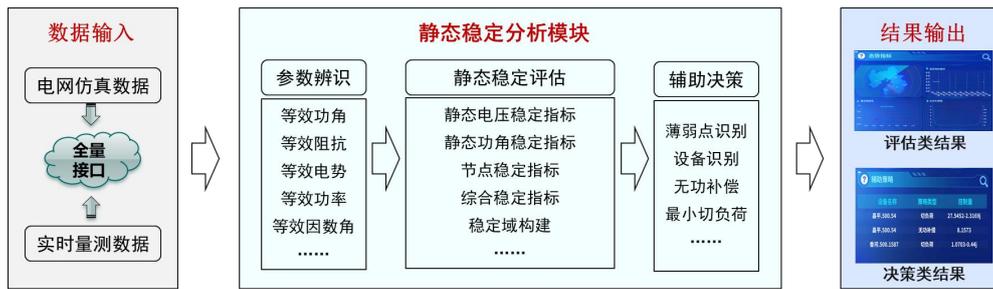


图 5-3 静态稳定态势评估与决策技术

5.2.1.1 等效参数辨识

目前，戴维南等效方法主要应用于静态电压稳定性能态势快速评估，基于它的局部指标法是衡量电网最大输电能力裕度的有效方法之一，该类方法具有直观、简单的特点，其实质是将电网(网络)的稳定问题分解为母线(节点)的稳定问题，通过所有母线(节点)的稳定性能映射电网整体稳定态势。国内外在戴维南等效方法的研究主要分为两个方向：

基于戴维南等效方法的静态电压稳定性能评估；戴维南等效参数辨识。戴维南等效参数的精确辨识是实现静态稳定评估的基础。然而，戴维南等效参数随电网拓扑、运行方式、不可预见的扰动等变化而变化。因此，实时跟踪辨识戴维南等效参数成为能否有效反映电网运行状态的关键。国内外学者在戴维南等效参数辨识方面做了许多研究与实践，如最小二乘法、Z-V 空间供应侧特性曲线法、扩展 PV 曲线比函数法等。

因此，实时跟踪辨识戴维南等效参数是该类方法有效反映电网运

行状态的关键。

5.2.1.2 静态稳定指标

传统意义上的静态电压稳定裕度指标，实质上是电网不同变化模式下的一种最大输电能力量化形式，仍然属于电网静态稳定的范畴。为此，采用静态稳定角度裕度指标、阻抗模裕度指标和最大功率裕度指标共同评估电网静态稳定性能，以上三种典型静态电压稳定裕度指标从不同角度量化了相对静态稳定裕度。

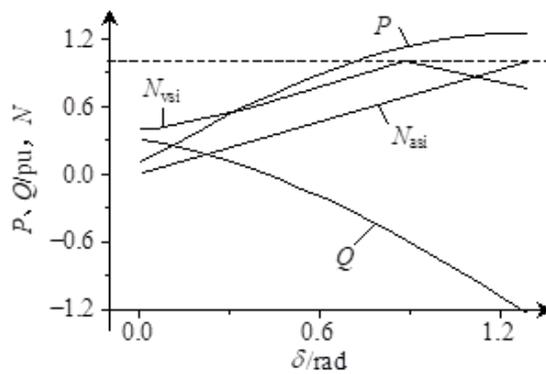


图 5-4 静态稳定评估指标

静态稳定角度裕度指标以电压相角为着手点，通过观察其小扰动下的变化程度，构建静态稳定裕度指标。

阻抗模裕度指标以线路等效参数为着手点，将小扰动情况下的等效阻抗与负荷阻抗进行比较，得到其静态稳定裕度指标。

最大功率裕度指标以线路传输功率为着手点，以线路所能承载的最大传输功率作为边界，将二者进行比较，得到静态稳定裕度指标。

5.2.1.3 静态稳定域

电网安全问题一直是电网调度和运行关注研究的重点，现代电网的复杂性使在线稳定评估及预防控制显得越发重要。预防控制应以最小的控制代价(发电调节、切负荷)保证电网正常运行，且具有足够的稳定裕度和抗扰动能力。就静态电压稳定而言，基于电网潮流的分析方法受电网参数、网络规模和收敛性等问题的影响，不适于在线应用。

静态电压稳定裕度指标可以反映当前运行状态距离临界点的相对程度，但该类指标一般不能在二维坐标下直观展现电网稳定边界，难以得到切负荷、控制等的最佳方向。

如何将电网的运行状态及评判尺度，比较精确、直观、全面地展现，并转换为有价值的决策信息，是电网运行工程师关心的问题，也是在线监控系统亟需的功能。实现在线静态稳定评估及预防控制，处理问题的速度和精度是一对矛盾。静态稳定域是监视电网安全运行状态的有效手段，此类方法能否获得实际应用的关键在于能否准确、快速地获得电网稳定域边界。然而，稳定域边界和电网具体运行方式变化模式直接相关且具有时变性，采用预想注入空间的稳定域边界训练方法无法实时跟踪电网运行状态。因此，需要一种根据实测数据即可在线确定运行态势的稳定域方法。

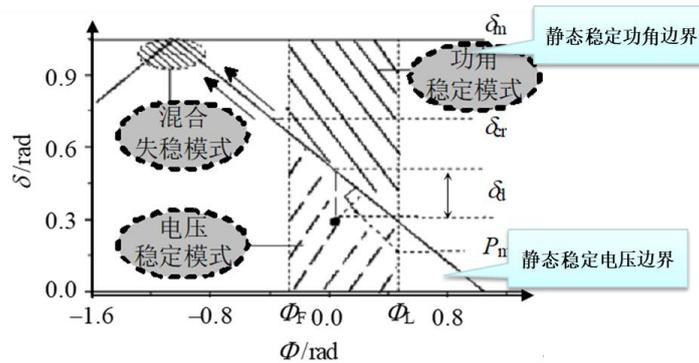


图 5-5 静态稳定运行域

从两节点系统的静态功角稳定极限和电压稳定极限关系出发，推导出电压临界点对应的角度边界表达式。结合此表达式，在相角和功率因数角($\delta-\Phi$)坐标空间上构造出具有线性边界的静态稳定域，该域可在统一坐标下同时展示节点的静态功角稳定裕度和静态电压稳定裕度，便于区分电网所有节点的实时环境下所处的稳定模式。

5.2.1.4 优化控制策略

无功优化是保证电网有功载送安全、经济的重要手段，目前多以

电网有功损耗最小为目标予以实施。近年来，国内外发生的几起电压稳定事故引起了人们对电压稳定问题的重视，无功备用不均衡可能会导致电压崩溃。对此，国内外学者提出一系列计及静态电压稳定的多目标无功优化模型与算法，期望解决这一问题。

实际上，在一定的有功输送方式下，无功补偿对有功损耗的降低和电网稳定性的提高具有协调和矛盾的关系。那么，实时条件下如何直观展现这种关系对电网监控和无功补偿方向决定具有重要的现实意义。基于局部量测信息的戴维南等效方法可近似等效节点在电网中的角色行为，基于戴维南等效模型的局部无功补偿方法可近似兼顾对网络的影响效果。

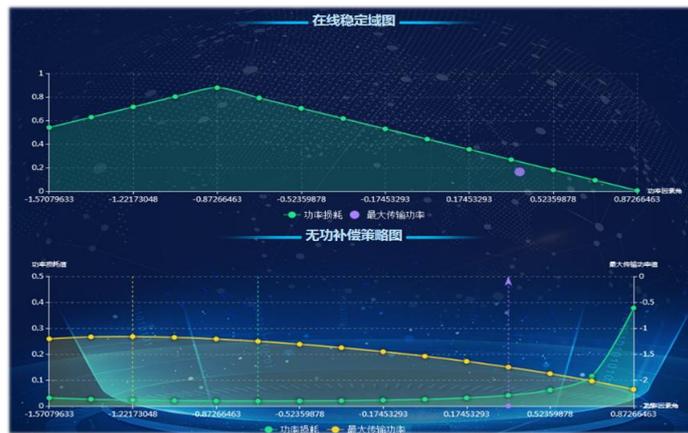


图 5-6 静态稳定优化控制策略

基于静态稳定域、有功损耗和静态稳定裕度与功率因数角的解析表达式得到的切负荷及无功补偿策略。

在线切负荷及在线无功补偿共同构成了大电网静态稳定态势的优化决策，保证电网潮流的稳定性、供电的可靠性，降低线路电能损耗，提高供电效率和电能质量。

5.2.2 暂态稳定态势评估与决策

基于信息驱动的暂态稳定态势评估与决策技术主要针对电网大

扰动工况下的响应信息与网络拓扑特征等，实现电网动态稳定态势快速评估与自适应防控所需要的反映射虚拟建模及其参数辨识，在此基础上实现在线动态稳定裕度指标计算和动态稳定域构建，进而实现薄弱机组或区域的在线识别，并跟踪电网运行轨迹，对薄弱的机组或区域自适应给出广域协调预防控制策略，使电网向良好的平衡点过渡。

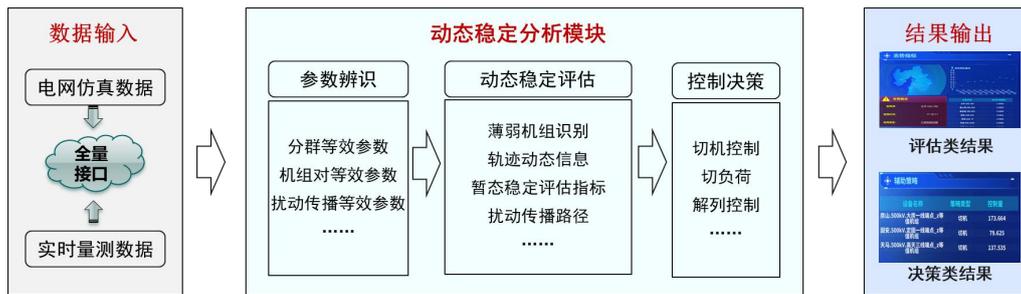


图 5-7 暂态稳定态势评估与决策技术

与传统“离线仿真+预想故障”的暂态分析模式相比，具有模型灵活、响应速度快、分析效率高等特点，更适用于新型电力系统发展趋势下的在线稳定分析场景。

5.2.2.1 虚拟建模及参数辨识

针对不同的运行场景和稳定防控问题，需要抓住电网主要稳定问题和主导因素，最大限度地简化电网结构，满足大电网在线安全防控必备的快速性和有效性要求。

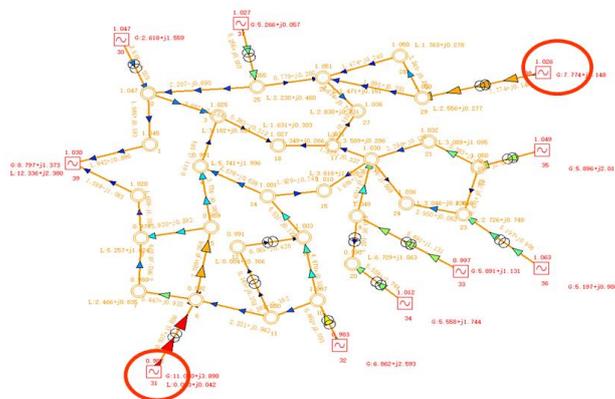


图 5-8 暂态稳定主导机组辨识

目前暂态场景下的虚拟建模和参数辨识方法主要包括以下 3 个方面：

结合图论及数据挖掘算法，进行面向广域时空量测信息的大电网拓扑结构及关联系数在线识别。

从在线稳定态势评估角度，开展适用于不同运行场景的大电网反映射虚拟等效建模及其参数跟踪辨识。

从在线广域协调控制角度，借助广域量测信息的时空关联性分析及大数据预测等技术，完成面向不同运行场景和自适应稳定防控的主导虚拟“源-网-荷”在线识别及其参数并行化跟踪辨识。

以上 3 个方面是基于信息驱动的暂态稳定态势评估与决策得以实施的基础。

5.2.2.2 暂态稳定评估技术

近年来，随着新型电力系统建设的深入推进，传统暂态稳定分析模式逐渐暴露出了参数依赖严重、模型适应性不够以及评估时效性较差等问题，需要建立和发展更具适应性和更高时效性的暂态稳定评估技术。同时，随着广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)在各级电网广泛铺设，基于信息驱动的暂态稳定评估技术，因其具备模型灵活、响应速度快、评估效率高等特点，在电网在线安全稳定分析领域逐渐迸发出了新的活力。

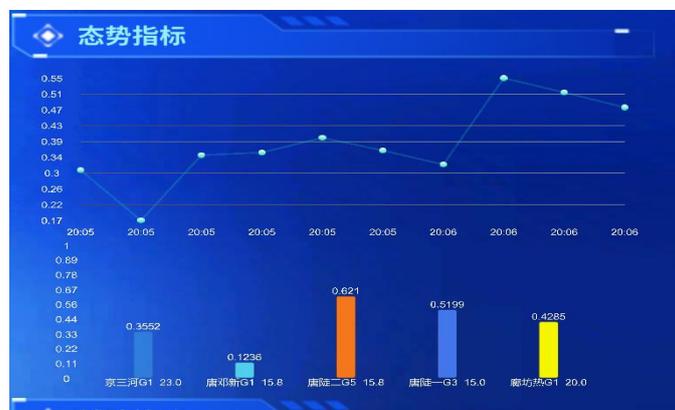


图 5-9 暂态稳定评估指标

目前，基于信息驱动的暂态稳定评估主要归结为 4 类：

1. 基于相量角度差的暂态稳定评估。同步相量测量单元（**phase measurement units, PMU**）可以采集电网关键节点的电压相量信息，在系统的中央终端预设固定的相量角度差作为暂态失步判据，与各终端间的同步相量角度差对比评估系统是否稳定。

2. 基于能量转换的暂态稳定评估。该方法主要依赖于暂态能量函数的构建，关键是系统受扰轨迹的确定，通过采集系统故障前后的受扰轨迹，结合广域量测信息，实现受扰轨迹的预测，进而利用临界能量值计算等传统方法，实现系统暂态稳定评估。

3. 基于人工智能的暂态稳定评估。该方法基本思路是“离线分析、在线应用、实时修正”，主要包括以下步骤：样本获取、特征选择、模型构建、反馈修正等。目前主流的人工智能方法主要分为传统机器学习方法（无监督学习和有监督学习）和高级机器学习方法（深度学习、强化学习和迁移学习），基于 AI 算法的分析模式能够有效综合各种因素对暂态稳定过程的作用，大大减少模型参数准确性对于评估结果的影响，同时具有很强的预测性。

4. 基于响应轨迹特征的暂态稳定评估。电网各设备的响应轨迹蕴藏着丰富的电网运动特性信息和能量互动规律，是反映并预测电网运行状态的重要依据。电力系统失步振荡过程中，联络线传输功率、节点电压、电压电流相角差等电气量均周期性振荡，在响应信息中表现为轨迹特征的变化，目前比较成熟的方法包括基于最大李雅普诺夫指数的评估方法、基于轨迹凹凸性的评估方法、基于相轨迹特征的评估方法等。

5.2.2.3 暂态控制决策技术

为了充分利用电网广域时空轨迹信息及其自身的网络特征，需结合实际运行场景，综合考虑复杂电网的时空关联特性、多时间尺度动态特性及多目标优化等要素，明确大电网“源-网-荷”各环节中的互

动协调防控职责及可操作性评价，进行在线广域协同精准控制。

当前，基于人工智能技术的电网暂态稳定控制决策技术的研究主要集中在两个方面：

当电网处于故障状态时，为防止故障进一步扩大，保证系统稳定，故障后首先需要决策相应策略进行紧急控制；

故障平息后对电网故障元件进行恢复决策，给出恢复策略。

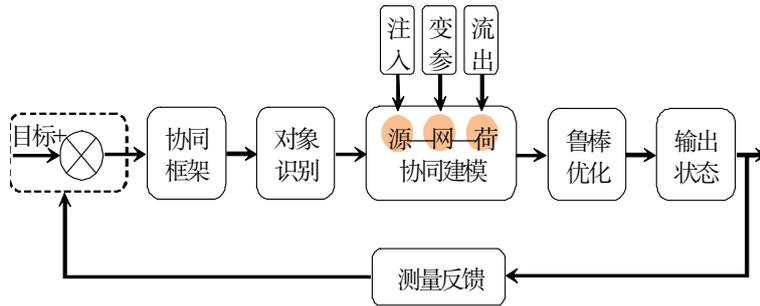


图 5-10 大电网广域协同控制

1. 紧急控制是在电网遭受严重扰动时，为使其继续稳定运行和供电而采取的措施，主要包括：切除发电机、切除负荷、低频减载、低压减载等。强化学习不需要为复杂电力系统建立数学模型，在新环境下能够自动更新知识并根据电网运行目标实时给出最优决策，具有更高的适应性和鲁棒性，非常适用于难以精确建模的电力系统稳控优化问题。实际应用时，由于需要较长的时间进行学习，通常采用“离线训练，在线应用”的流程，并且在离线训练时可由运行经验引导来加快学习。

2. 恢复控制是电力系统不可避免地发生故障，系统局部停电、孤岛运行甚至全网停电后，重新恢复到正常运行状态的过程，主要分为机组恢复、网络重构及负荷恢复等。知识图谱可用于表示知识间的相互关系，能处理和存储海量数据，基于知识图谱的电网稳定智能决策可利用所累积的电网实际运行经验、安全规程等知识构建故障处

置、调度操作等的知识图谱，将电网中的非结构化数据结构化管理，有助于实现相应决策，提升调度或运行人员对电网的把控能力。

综上所述，基于信息驱动的轨迹型“在线评估、实时防控”是未来大电网实时监控的理想目标，人工智能技术将改变传统电网稳定分析与控制研究理念和思维模式，有助于提升大电网广域时空量测信息的挖掘深度和处理速度。

5.2.3 负荷及动态轨迹趋势预测

5.2.3.1 电力系统负荷预测

负荷预测是根据系统的运行特性、增容决策、自然条件与社会影响等诸多因数，在满足一定精度要求的条件下，确定未来某特定时刻的负荷数据，其中负荷是指电力需求量（功率）或用电量。电力系统负荷预测是电力系统调度、实时控制、运行计划和发展规划的前提，是电网调度部门和规划部门所必须具有的基本信息。准确的负荷预测有助于提高系统的安全性和稳定性，能够减少发电成本。随着状态估计信息的广泛使用，短期负荷预测技术已成为电力系统 EMS 系统中必不可少的部分。以秒级、分钟级的数据作为提取量可以提前预报未来几小时、1 天至几天的电力负荷，主要用于安排日开停机计划和发电计划。对一个电力企业而言，提高运行的安全性和经济性，提高发电设备的利用率和经济调度的有效性，都要依赖准确的短期负荷预测结果。

由于负荷预测是根据电力负荷的过去和现在推测它的未来数值，所以，负荷预测工作所研究的对象是不肯定事件。只有不肯定事件、随机事件，才需要人们采用适当的预测技术，推知负荷的发展趋势和可能达到的状况。这就使负荷预测具有以下明显的特点。

1. 不准确性

因为电力负荷未来的发展是不肯定的，它要受到多种多样复杂因素的影响，而且各种影响因素也是发展变化的。人们对于这些发展变

化有些能够预先估计，有些却很难事先预见到，加上一些临时情况发生变化的影响，因此就决定了预测结果的不准确性或不完全准确性。

2. 条件性

各种负荷预测都是在一定条件下作出的。对于条件而言，又可分为必然条件和假设条件两种，如果负荷员真正掌握了电力负荷的本质规律，那么预测条件就是必然条件，所作出的预测往往是比较可靠的。而在很多情况下，由于负荷未来发展的不肯定性，所以就需要一些假设条件。例如，我们经常说，如果天气一直不下雨的话，排灌负荷将保持较高的数值等等。当然，这些假设条件不能毫无根据的凭空假设，而应根据研究分析，综合各种情况而得来。给预测结果加以一定的前提条件，更有利于用电部门使用预测结果。

3. 时间性

各种负荷预测都有一定的时间范围，因为负荷预测属于科学预测的范畴，因此，要求有比较确切的数量概念，往往需要确切地指明预测的时间。

4. 多方案性

由于预测的不准确性和条件性，所以有时要预测负荷在各种情况下可能的发展状况，就会得到各种条件下不同的负荷预测方案。

电力系统负荷预测包括最大负荷功率、负荷电量及负荷曲线的预测。最大负荷功率预测对于确定电力系统发电设备及输变电设备的容量是非常重要的。为了选择适当的机组类型和合理的电源结构以及确定燃料计划等，还必须预测负荷及电量。负荷曲线的预测可为研究电力系统的峰值、抽水蓄能电站的容量以及发输电设备的协调运行提供数据支持。负荷预测根据目的的不同可以分为超短期、短期、中期和长期：

(1) 超短期负荷预测是指未来 1h 以内的负荷预测，在安全监视状态下，需要 5~10s 或 1~5min 的预测值，预防性控制和紧急状态

处理需要 10min 至 1h 的预测值。

(2) 短期负荷预测是指日负荷预测和周负荷预测，分别用于安排日调度计划和周调度计划，包括确定机组起停、水火电协调、联络线交换功率、负荷经济分配、水库调度和设备检修等，对短期预测，需充分研究电网负荷变化规律，分析负荷变化相关因子，特别是天气因素、日类型等和短期负荷变化的关系。

(3) 中期负荷预测是指月至年的负荷预测，主要是确定机组运行方式和设备大修计划等。

(4) 长期负荷预测是指未来 3~5 年甚至更长时间段内的负荷预测，主要是电网规划部门根据国民经济的发展和对电力负荷的需求，所作的电网改造和扩建工作的远景规划。对中、长期负荷预测，要特别研究国民经济发展、国家政策等的影响。

5.2.3.2 电网动态轨迹时空趋势预测方法

暂态稳定预测是电力系统在线动态安全评估的核心内容，对保障系统安全稳定运行、预防潜在不稳定因素破坏具有重要作用。快速精准的暂态稳定预测方法一直是在线动态安全研究的热点之一。近年来广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的推广应用，为满足电网暂态稳定预测的“实时性”要求创造了条件，同时也为脱离系统模型的经验型预测方法奠定了基础。电网暂态过程是指电力系统遭受大扰动后，各发电机从原始稳定运行状态过渡到新的或恢复到原来稳定运行状态的动态振荡过程，具体表现有功角摆开、电压波动、功率振荡等行为。发电机功角等受扰轨迹的精准预测是实现电网暂态稳定性预测的重要途径，通常以未来某时刻的最大功角差数值大于预设阈值判定失稳。因此，本课题重点对发电机功角这一状态信息进行了预测。

传统的卷积神经网络仅能够有效提取式空间数据的局部特征，而图卷积神经网络则可以实现在图结构上的数据进行卷积操作从而处

理非欧空间的数据。在电网领域中，电网结点之间的关联关系是以拓扑图的形式表达的，因此传统的卷积神经网络无法直接处理电网相关问题。目前，图卷积方法主要分为两种：空间方法和谱方法，主要应用于交通预测，自然语言处理、推荐系统等领域。

图卷积神经网络的图可以表示为 $G=(V,A)$ ，其中 V 代表图中所有的节点， $A \in R^{|\mathcal{V}| \times |\mathcal{V}|}$ 代图 G 的邻接矩阵。 L 代表图的拉普拉斯矩阵， D 代表图的度矩阵，图的卷积操作可以表示为：

$$X_{l+1} = \sigma(\sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k L^k X^l) X_{l+1} = \sigma(\sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k L^k X^l) \quad (4-1)$$

其中， x^l 代表第 l 层的特征， α_k 为可训练参数， L^k 代表第 K 阶拉普拉斯矩阵， σ 代表激活函数。

在动态系统的环境下，时空预测具有极为重要的意义，从自动驾驶汽车操作到能源和智能电网优化，再到物流和供应链管理都有广泛的应用。电网的暂态稳定预测是电力系统在线动态安全评估的核心内容，对保障系统安全稳定运行、预防潜在不稳定因素破坏具有重要作用。而功角预测作为电网暂态稳定判断最核心的指标，同时具备时间和空间的变化特性，其非线性变化程度随电网运行特性复杂性的增高而增高，并且在可再生能源迅速发展、能源结构低碳化转型的背景下，电力系统正由确定性系统向强随机性系统转变，使得简单模型难以准确表征系统真实的动态特性。电网作为典型的时空网络，其稳定情况是物理系统运行秩序在时间和空间上共同演化结果，挑战具体表现为：

1. 时间维度：电网遭受扰动冲击后，各个状态量在扰动之后的一段时间内表现出复杂的时序演化规律，且部分状态量分布极为不均衡，并具有一定周期性。例如电网的功角数据范围大、方差大且分布不均匀，在发生暂态失稳前功角激增，导致直接预测功角时模型难以拟合从而在整体预测效果上表现不佳。

2. 空间维度：电网客观存在的拓扑图上的负荷和发电机之间具

有直接或者间接的空间关联性，且这种关联性是随着电网运行状态动态变化的。除了显示可见的物理拓扑关联外，电网结点之间还存在具有动力学的电气距离关联。如何将逻辑上的邻接距离和动力学表征的电气距离结合起来具有很大的挑战。

传统的电网功角预测方法主要分为在以下几个方面：

自回归模型：利用历史时刻输出的线性组合进行表达未来某时刻的输出；

多项式模型：一种基于历史数据的多项式拟合时间序列的方法；

泰勒展开模型：利用泰勒级数展开发电机运动方程，建立未来某时刻的功角和转速的高阶导数表达式；

三角拟合模型：根据受扰过程中发电机功角与时间呈正弦变化趋势而建立三角函数模型预测功角轨迹；

Verhulst 模型：利用符合灰色 Verhulst 模型变化规律的发电机功角“s”型时序变化轨迹，提出灰色 Verhulst 模型的功角轨迹外推预测方法。

上述方法只考虑了发电机功角数据在时间维度上的演化，而忽略了电网本身具有的空间特征，空间结点的相关性会对预测问题具有非常重要的参考价值。除此之外，上述方法需要为每一台发电机单独训练模型，无疑增加计算成本从而影响模型效率。

为解决以上问题，本课题提出一种基于双重时空图卷积神经网络的电网功角预测方法，将电网结点拓扑邻接距离及电气距离结合起来，从而充分融合了电网时间信息和空间信息之间的依赖关系，并通过将预测绝对功角转化为预测周期和周期内偏角的方法，解决了因预测值方差过大、数据不均匀的而导致的预测不准确问题。

时空图卷积由“三明治”的时空卷积模块和 1 个全连接输出层组成，“三明治”的模块由 2 个门控时序卷积层和 1 个空间图卷积层堆叠成，这样可以实现时间序列的动态特征与空间特征快速融合。由于对

于时间特征和空间特征的处理均使用卷积操作，从而减少了参数，提高了训练速度实现并行化，因此可以更高效地处理大规模网络。时空图卷积网络总体框架由两个堆叠的时空图卷积模块和一个全连接输出层组成，最终输出单步预测值。其中，堆叠的时空卷积模块的个数可以依据实际问题的复杂程度决定。时间卷积使用了一个 GLU 线性门控组件和 1 维宽度为 $k_t k_t$ 的卷积核组成的因果卷积层用来捕捉功角预测问题的动态特征，输入表示为时间序列长度 M ，特征数量为 $C_i C_i$ 的矩阵 $X \in R^{M \times C_i} X \in R^{M \times C_i}$ 。经过卷积核 $\Gamma \in R^{k_t \times C_i \times 2C_o} \Gamma \in R^{k_t \times C_i \times 2C_o}$ 后，输出为 $[P Q] \in R^{(M-k_t+1) \times (2C_o)} [P Q] \in R^{(M-k_t+1) \times (2C_o)}$ 。时间门控卷积可以表示为： $\Gamma * X = P \odot \sigma(Q) \in R^{(M-k_t+1) \times C_o} \Gamma * X = P \odot \sigma(Q) \in R^{(M-k_t+1) \times C_o}$ ，中， P, Q 分别是 GLU 门控的输入，代表矩阵的哈达玛积。 $\sigma(Q) \sigma(Q)$ 负责控制 P 中不同状态对于动态时间序列预测问题贡献的权重。

5.2.4 智慧电网调度大数据平台

5.2.4.1 时空大数据平台架构

基于系统核心功能框架，融合静态评估与决策、暂态评估与决策、负荷趋势预测和知识图谱引擎，构建支持多时间尺度的三级时空大数据平台架构。通过突破海量高维时空数据的高性能存储计算方法，对海量电网基础量测与仿真数据进行统一高效管理，并为上层业务应用提供多时间尺度的高效数据查询以及高性能的分布式集成运行环境，支持大电网海量量测数据查询秒级响应。

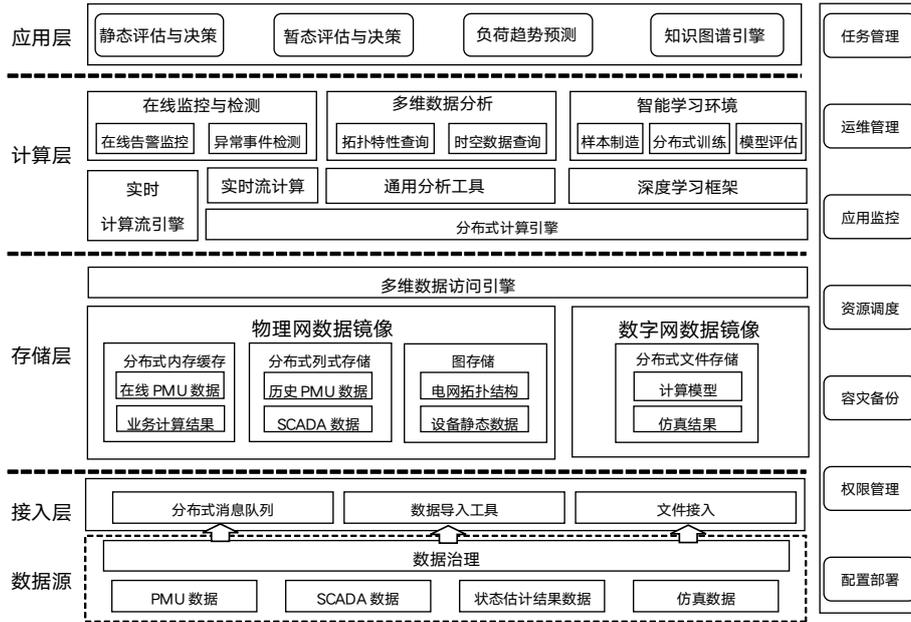


图 5-11 时空大数据平台框架

如图 5-11 所示，高性能时空大数据平台包含了数据接入层、数据存储层与计算层三个层次。

在数据接入层，通过数据治理服务，利用实时数据库、分布式消息队列等从调度自动化、设备管理等各数据源子系统，实时接入 PMU 数据、SCADA 数据、状态估计结果数据、仿真数据等各类电网信息，并通过统一转换接口，转化为大数据平台的统一存储格式。

在数据存储层，针对 PMU 数据、SCADA 数据、状态估计结果数据、仿真数据等各类电网数据的时空特征，建立异构数据模型，并利用分布式内存数据库、分布式列式数据库、关系型数据库、图数据库以及分布式文件系统等对海量多源异构信息进行统一分布式存储，形成业务应用所需的历史数据中心。同时，利用多维数据访问引擎，提供各类电网数据的统一高性能查询接口，从而为上层业务应用提供所需数据。

在计算层，为上层智能应用提供了高性能的集成运行环境与丰富的智能学习与数据分析服务。利用流式、批式等高性能内存计算引擎，

对上层智能应用进行并行处理，满足其运行的实时性；一站式智能学习环境可支持海量样本制造与态势评估和知识图谱的迭代学习，有效支撑大电网稳定态势知识图谱自动化引擎构建。

5.2.4.2 数据接口规范

时空大数据平台为了与上层业务算法、可视化展示、人机交互等模块深度融合，需要提供多维数据访问接口。为了保证数据接口安全可靠，需要制定统一的数据接口规范，便于接口的管理与维护。

数据接口设计应遵循如下原则：

1. 安全可靠原则：系统应提供良好的安全性和可靠性策略，支持多种安全且可靠的技术手段，制定严格的安全可靠的管理措施；
2. 开放性原则：提供开放式标准接口，提供与其他系统的互联互通；
3. 灵活性原则：提供灵活的接口设计，方便接口的变动；
4. 可扩展性原则：支持新业务的扩展以及接口容量与接口性能的提高；
5. 可管理性原则：提供良好的管理机制，保证在运行过程中提供给管理员方便的管理方式以保证能够处理各种情况；
6. 统一性原则：应当保证系统的接口方式、接口形式、使用的协议等标准统一。

5.2.5 运行态势知识图谱可视化引擎

在大电网生产调度中，各环节的厂站空间信息和设备监测时空数据具有信息维度高、复杂性高、层次性差特点，为降低调度人员对电网的运行状态感知难度并提高生产调度数据的时效性，提出运行态势知识图谱可视化引擎。

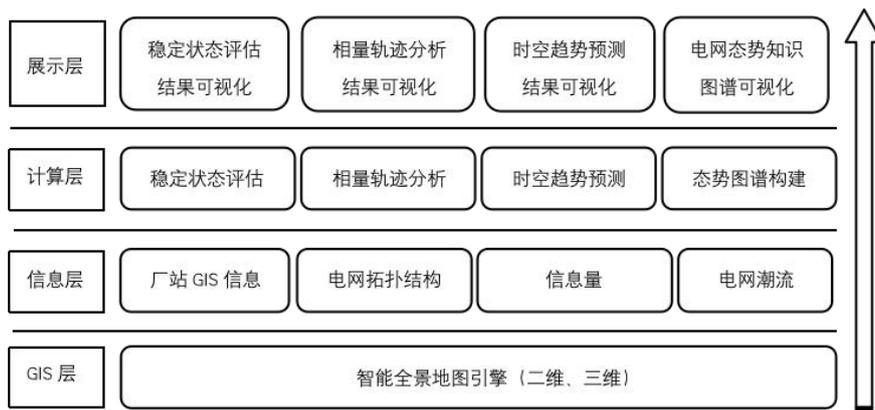


图 5-12 可视化引擎功能框架

可视化引擎功能框架如图 5-12 所示，基础层在三维场景中构建大电网生产调度全景地图引擎作为整个系统的展示基础；信息层通过坐标定位数据映射和视觉通道映射构建基础电网厂站分布；计算层将稳定状态评估结果、相量轨迹分析结果、时空趋势预测结果叠加到态势知识图谱上；展示层利用三维可视化渲染技术将运行态势知识图谱信息分层分级展示。

可视化引擎利用电网厂站空间信息构建全景地图引擎作为可视化框架基础，对各类厂站进行分层分区定位，叠加厂站图形、绘制厂站拓扑网络结构，利用粒子系统展示厂站周边的山火、气象等外部环境信息。通过对图形和拓扑的动态着色和标注体现设备信息量、安全状态、能量流动、重点对象，直观展示运行态势。结合智能交互技术，用户通过语音、触控、手势控制引擎的下钻、移动、旋转、视角切换，实现全网的多方位、多维度、多角度查看；通过高维时空数据可视化方法将健康实时评价、厂站异常分析、风险预警、优化策略、安全指数等关键信息直观展示，向生产调度人员智能推送关键信息，用户也可以通过语音、触控、手势体感自主控制查看较为关注的厂站信息。

5.3 典型应用案例

以智慧电网调度与安全防御思想为指导，研制了智能电网全景调度座舱。以某省级电网为案例，系统根据智能调度系统实时测量稳态

信息、广域动态测量信息及仿真结果等数据，通过图谱自动化引擎的融合、计算与分析，得到了该省级电网不同运行场景下的参数辨识、评估指标、薄弱环节、稳定域、切负荷、无功补偿等核心知识要素，并直接映射到电网真实物理设备对象中。



图 5-13 系统主界面展示图

当电网某处发生大扰动后，通过知识图谱可得出某线路在 2022 年 1 月某日发生三相短路，故障持续 0.3 秒，通过计算得到的评估指标为 0.72，将相关信息推送至图谱展示模块，并采用图数据库技术进行存储，帮助调度员迅速知悉故障影响情况。

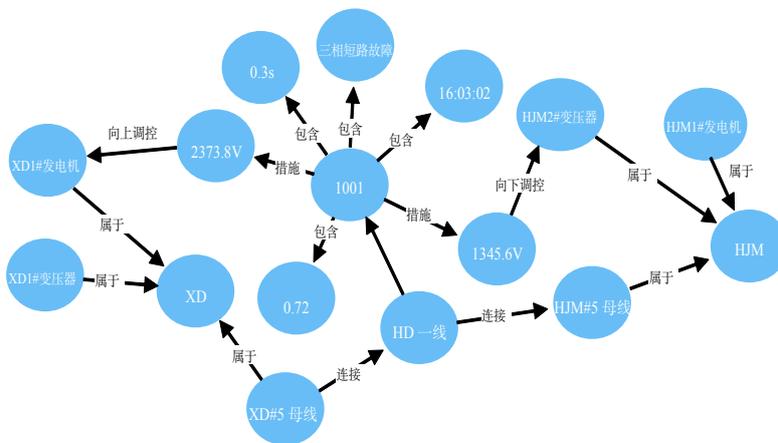


图 5-14 运行态势知识图谱组织结构示意图

系统接收到故障预警提示后，自动切换到暂态分析与控制主题界面，从故障信息概述中，可以直观看到电网某厂站发生了三相短路故障，结合电网时序量测数据分析了电网设备受扰程度，并以冲击波的形式直观展示故障影响范围，帮助调度员迅速知悉故障情况，及时采取控制策略。



图 5-15 故障态系统界面展示图

综上所述，系统从工程实用化角度及调度员视角，利用知识图谱简洁、高效、直观的“图语言”特点，结合地理信息及可视化技术，将加工整合后的电网运行态势核心知识要素进行直观可视化展示，方便调度员实时直观把握电网动态运行特性，洞察电网安全稳定态势及时空分布特征。在一定程度上，达到“一图知全局”、“一图知全态”的电网运行态势知识谱图构建目标。

第6章 智慧电网的数字化应用

6.1 应用案例概况

先进的信息通信技术和物联网技术，对传统电力系统进行智能化改造和升级，实现电力生产、传输、分配和使用的高效、可靠、安全、环保等目标。智慧电网是基于先进技术和信息化手段构建的现代化电力系统，通过智能化、自动化和数字化的方式，实现对电力生产、传输、分配和使用的全面管理和优化。智慧电网的数字化应用案例，包括智慧共享财务、电力征信、电力区块链和电力元宇宙等。

随着智慧电网的推广和发展，电力行业逐渐向市场化方向转变，电力市场的参与主体越来越多样。在这种大规模的电力市场中，参与主体往往面临着复杂的交易环境和复杂的财务问题。智慧共享财务是指通过运用智能化的技术手段，集成和共享电力市场参与主体的财务数据，实现财务信息的共享和协同管理，提高财务决策的效率和准确性。智慧共享财务的主要应用包括财务数据集成与共享、财务分析和决策支持、财务风险防控等方面。具体来说，智慧共享财务可以通过智能化的数据采集技术，将不同参与主体的财务数据实时采集并集成到一个统一的平台中，实现财务数据的共享和协同管理。同时，通过利用大数据分析和人工智能等技术手段，对财务数据进行深度分析，提供全面的财务数据分析和决策支持。此外，智慧共享财务还可以通过风险预警和风险管理等手段，对电力市场参与主体的财务风险进行实时监测和防控，提高财务风险管理的效率和准确性。

电力征信业务作为基于电力数据的输出形式，不仅在电力行业内部有业数融合应用，同时也受到社会各领域的广泛关注。特别是从金融行业的角度来看，电力征信业务在评估信用风险、提高信贷决策的准确性和效率方面具有重要作用。

电力区块链是以区块链技术为基础的电力行业应用。区块链技术是一种去中心化、公开透明、安全可信的分布式账本技术，能够实现数据的可追溯性、不可篡改性及去中介化。在电力领域，区块链技术可以应用于电力交易、能源溯源、源管理等方面，极大地提升了电力行业的效率和可靠性。首先，电力交易是电力行业的基础应用。传统的电力交易通常需要通过第三方机构来进行中介，存在信息不对称、交易成本高、交易效率低等问题。而区块链技术能够通过智能合约实现双方直接交易，去除了中介环节，提高了交易效率，降低了交易成本。同时，区块链的去中心化和不可篡改性使得交易信息更加安全可靠。其次，能源溯源是电力区块链的另一个应用。能源溯源是指追踪电力和能源的来源、产生、传输和使用等全过程，保证能源的可追溯性和真实性。在传统的能源溯源中，由于信息的不透明和被篡改的风险，使得能源交易的真实性和可靠性无法得到保障。而区块链技术能够记录能源从产生到使用的全过程，并通过智能合约验证和保护数据的真实性，确保能源溯源的可信性。最后，能源管理是电力区块链的重要应用领域。传统的能源管理往往依赖于集中式的能源系统，在能源分配和管理上存在着不公平和低效的问题。而区块链技术可以实现能源的去中介化和去中心化管理，使得能源管理更加公平、高效。通过智能合约和分布式账本，可以实现能源的动态优化调度、能源市场的参与和能源互联网的构建等。

能源行业目前正处于数字化转型的关键时期，元宇宙在电网多维数字空间起到关键的桥梁和纽带作用，为解决新型电力系统背景下发展的难题带来了新的思路，将为助力提升电网“气候弹性”“安全韧性”“调节柔性”发挥重要作用。电力元宇宙是指利用虚拟现实、增强现实等技术构建电力系统的虚拟演示环境，用于模拟和分析电力系统各方的行为和决策。通过电力元宇宙，可以更直观地展示和理解电力系统的运行情况，提供决策支持和风险评估，优化电力系统的设计

和运营。电力元宇宙系统中有五大要素：现实电力系统、虚拟电力系统、虚实交互系统、智能分析系统和人机交互系统。电力元宇宙基于虚实交互系统能实现现实电力系统和虚拟电力系统之间的双向数据传输，基于智能分析系统能对来自现实电力系统和虚拟电力系统的数据进行融合和分析，基于人机交互系统能给用户提供现实电力系统和虚拟电力系统的信息。

6.2 智慧共享财务

随着人工智能技术的持续深入发展，其应用领域越来越广泛，对社会各领域和行业都带来了深远的影响，同时也为企业的高效管理和应用创新注入新动力。在财务会计领域也不例外，人工智能技术一方面全面支撑财务业务的数字化、自动化、智能化的业务变革，切实减轻财务人员负担，起到提质增效的作用；另一方面保障信息可溯源、防篡改、合规控制等安全及风险防控需求，为企业的持续健康发展保驾护航。

我国财务信息化发展分为三个阶段：会计电算化阶段、会计信息化阶段、会计智能化阶段。人工智能相关技术在财务领域的深入应用，促使传统财务管理模式发生了颠覆性改变，从信息化走向智能化。

电算化阶段	信息化阶段	智能化阶段
1979-1987 会计电算化实验探索及定点化软件阶段	1998-2004 会计信息化产生及初步应用阶段	2016-至今 会计智能化初级阶段
主要产品应用： 电子计算机会计核算	主要产品应用： ERP软件 C/S结构会计核算系统 基于大型数据库的企业级财务软件 B/S结构和WEB技术的企业管理软件	主要产品应用： 流程自动化平台及应用(RPA) 智慧财务共享 数字化智能管理平台
1988-1997 会计电算化商品化软件阶段	2005-2015 会计信息化推进与发展阶段	
主要产品应用： 通用化、商品化财务软件 基于DOS、windows平台的财务软件	主要产品应用： 财务共享服务 XBRL相关平台 基于SOA架构的企业管理软件 企业云应用平台 财务云	
1979-1997	1998-2015	2016-至今

图 6-1 会计信息化发展历程

在财务信息化的智能化阶段，通过云、大、物、移、智等创新技术构建的智能化应用产品，大幅提升了财务核算的质量和效率，大力推动了企业的数字化转型进程。

6.2.1 智慧财务主要特征

现阶段的智慧财务，已由初级的会计智能化逐渐过渡到了成长期的智能应用阶段，当前的智慧财务总体呈现以下几个特征：

1. 共享中台化

信息化阶段的财务管理模式侧重点在核算环节，而前端的业务环节往往只是作为数据来源，系统表现上则是通过大量的系统集成完成数据的流向，数据、业务、技术在本质上都是割裂的，无法进行很好的共享。而在智能化阶段，智慧财务通过建设共享中台，实现数据、业务和技术的共建和共享：

（1）数据中台：建设业务融合的数据中台，以客户为中心，将业务、财务和管理过程中的公共交集数据进行抽象并沉淀到数据中台，实现数据的统一管理并提供统一的数据服务。

（2）业务中台：将企业人、财、物各关键要素管理过程中的通用业务逻辑，通过管理逻辑组件的形式沉淀为业务中台，为上层的各业务应用提供统一的共享业务服务。

（3）技术中台：智慧财务通过人工智能、大数据、区块链、物联网等关键技术实现各智能应用场景，将这些技术能力沉淀为技术中台，同时将进一步将依赖的算力、存储等资源纳入共享技术中台，为智慧财务的应用提供强大的支撑能力。

2. 流程自动化

传统的财务管理模式，流程环节中存在大量依赖手工处理的繁琐且重复的工作，比如各IT系统间的对账、制证、共享任务派单、发票采集、银行回单挂接等。智慧财务则通过RPA和人工智能相关技术相结合，实现流程的自动化，大幅提高工作效率并减少差错率，并

促使财务人员从业务财务向战略财务转变。

3. 管理数字化

数字化是以建设数据中台为基础，以数据为核心，将企业经营和管理过程中的数据进行标准化，通过云计算、大数据、人工智能、移动互联网、物联网等技术将结构化数据、半结构化数据、非结构化数据进行抽取、清洗、转换和加工，形成可视化的数字管理过程，通过全面的数据分析及应用提升企业运营效率、降低运营成本、升级企业管理方式。

4. 业务智能化

传统的财务业务处理模式，依赖于人的知识水平、专业技能、实践经验等个人能力因素，财务管理过程中的各类问题及风险也更多依靠人为识别，不但存在效率低下、差错率高等问题，财务人员也因长期从事基础的业务财务工作导致职业发展面临天花板。

而在智能化阶段，通过图像识别、数据挖掘、知识图谱、自然语言处理等技术，精准进行数据和业务的比对及转换、精确识别业务处理过程中存在的问题及风险，通过人机协作，进一步提高了业务处理的效率和质量。

6.2.2 智慧财务应用场景

在业财一体化的大趋势下，管理会计几乎涉及企业运营管理过程中的每一个环节，在这些业务环节中，人工智能相关技术涉及的关键场景可以提炼为智能推荐、智能填单、智能审批、智能社交等，为上层的预算、报账、核算、成本、税务、项目、资产等业务应用提供共享服务能力：

1. 智能推荐

传统的财务管理系统，更多是人找事，如通过查找菜单并添加收藏、查找需要预订的航班和酒店、查找待审批的待办等，繁琐又耗费时间和精力。而智慧财务，则通过建设智能推荐系统，在多种业务场

景中实现智能推荐，想用户所想。

(1) 差旅出行过程中的智能推荐：可以通过用户的历史行为、个人信息、个人偏好设置、工作圈等信息，通过人工智能算法预测并推荐适合用户的酒店、航班，并可以为用户提供完整的差旅行程规划，一方面减少了用户选择行程安排的决策成本，为员工提供舒适的差旅体验，另一方面也可以通过智能算法为企业减少差旅成本。

(2) 智能门户中的智能推荐：在业财相关业务的处理过程中，往往面临着需要处理的工作类目、待办事项繁多，需要我们人工不断切换菜单、查找待办等，工作效率低下。智能推荐系统帮助我们像在购物平台一样，能通过一系列算法动态推荐符合我们需要优先处理的工作事项，提供智能的工作指引，传统的待办列表都是通过到达时间、业务类型等要素进行简单的排序，能一眼看到的待办事项往往不是优先级最高的待办，而智能推荐系统则可以根据付款时效、待办停留时间、单据审批效率、历史同类单据审批时间等各种复杂的规则和要素自动进行待办优先级的排序和呈现。

2. 智能填单

智能填单也是财务领域应用人工智能技术较多的场景，财务领域需要发起的业务单据种类繁多，数量也比较多，如果全部靠人工进行填单，不但工作量大，而且容易出错，存在大量的单据在财务审核环节被发现问题并退回，极大降低了单据的处理效率。

智能填单通过使用 OCR、图像识别、自然语言理解等技术，将各种类型的发票、原始凭据等非结构数据、半结构化数据进行精确识别、转换、存储并自动填写到表单上，同时也可以使用语音识别自动将语音信息转换为表单数据，实现方便快捷地填单。同时还可以针对一些如水电费、通讯费等具有周期性的固定支出费用，根据历史数据及规律自动生成表单，业务处理环节只需要填写少量信息或者完全不用修改即实现了业务的填单。

3. 智能审批

低下的审批效率往往是令人比较头痛的，假如我们是出差人，我们垫付了出差过程中的费用，出差回来后再进行报销，但报销需要耗费两周或者更多的时间，钱才能到自己手上。而报销周期效率低下的一个重要原因就是审批环节慢，尤其是大型集团的财务人员每天需要处理大量的单据审核事项，通过人工对比原始凭据、规章制度、填单内容将是一个非常耗时且容易让人视觉疲劳的工作，最终造成效率低，准确率低等问题。

智慧财务中的智能审批系统通过知识图谱等技术将审单过程中需要用到的各种实体融合到一张图中，能直接定义各类实体间的关系，再通过 RPA 或外部系统提供的数据或接口，将实体所对应的个体数据接入，从而形成我们审单所需要的各类知识。再利用知识图谱信息自动对比核验能力，同时结合大数据，机器学习等技术，快速获得审批结果，实现无人干扰的快速自动审批新模式。

4. 智能社交

在业财一体化的业务处理过程中，财务人员经常还存在这样的痛点：报销审核问题多，必须沟通核实，而沟通渠道杂乱，且与业务系统数据未流通，导致工作效率低，服务评价低，费力不讨好。对于报销人员，也同样存在痛点：对报销业务不熟悉，填单出错率高，返单、退单率居高不下。

智慧财务中的智能社交应用基于自然语言处理 NLP、知识图谱等人工智能技术，改变以往财务服务和企业及组织传统的互动与信息共享方式，结合企业知识库提供知识服务，破解业务协同互联等难题，实现管理系统融合创新，助力管理快速社交化、智能化升级。让员工体验“智慧型专家服务”，让财务服务人员“由被动变主动”。



图 6-2 智能社交应用示例

6.2.3 智慧财务典型案例

远光软件股份有限公司依托自主研发的人工智能云平台及相关应用产品，为多个大型电力集团建设智慧财务平台，为人工智能技术赋能财务提供了丰富的典型应用案例。

1. 数智机器人

数智机器人依托于 YG-RPA 云平台，RPA 云平台充分聚合深淀各项能力，具备跨平台、多语言融合能力，为 RPA 机器人应用开发过程中提供多项能力，赋能企业开发者，通过平台快速构建 RPA 机器人。通过云端应用市场运营所有 RPA 机器人组件，通过 RPA 开发者之间场景共享、信息互通的方式打造 RPA 云平台自循环生态体系基础。提供多种运行模式及安全保障措施，充分保护机器人运行数据及业务处理的安全性，同时通过管理中心能实时进行监控管理。



图 6-3 RPA 云平台示例图

基于对机器人全流程的管理需求，通过平台让机器人设计更简单易用，机器人运行集中无感，机器人管理分层分级，机器人运营敏捷智能的规划思路。构建“面向机器人”的流程重塑的 RPA 开发方式，通过 RPA 机器人连接企业内外部资源，为企业打造“员工数字孪生体”；通过建设“RPA 机器人中央管理控制台”，进行机器人运行、运维、运营的可视化管理，从而真正发挥 RPA 对企业运营的优化作用。

RPA 云平台关注企业应用场景的扩展，通过不断地实践和积累，开发出 RPA 机器人的众多能力。场景覆盖到财务、工程、营销、生产、运监、审计等业务领域，机器人数量达数百至上千款。这些机器人代替人工完成了大量的工作事务，针对高重复、标准化、规则明确、工作量大等类型的工作，在完成效率和质量上具有明显优势，为企业节省了大量人力，助力企业智能化转型升级。



图 6-4 RPA 多场景应用示意图

2. 智能审单

基于知识图谱应用平台的图谱构建模块，将审单过程中需要用到的各种实体融合到一张图中，能直接定义各类实体间的关系，再通过

RPA 或外部系统提供的数据或接口，将实体所对应的个体数据接入，从而形成我们审单所需要的各类知识。再利用知识图谱信息自动对比核验能力，同时结合大数据，机器学习等技术，快速获得审批结果，实现无人为干扰的快速自动审批新模式。



图 6-5 智能审单解决思路示例

不一致检测：指从知识图谱实例数据中找出与用户设置的业务逻辑或规则相违背的数据。业务规则描述：职工酒店住宿单价不能超过其职级标准。



图 6-6 知识图谱示例

(1) 释放人力，降低单据审核风险，全量自动审批，提高内部控制制度执行有效性；

(2) 缩短单据审核周期，提升工作效率的同时，提升企业管理自动化、智能化水平。

3. 智能财务助理

基于自然语言处理 NLP、知识图谱等人工智能技术，改变以往财务服务的方式，结合企业知识库提供知识服务。让员工体验“智慧型专家服务”，让财务服务人员“由被动变主动”。



图 6-7 智能财务助理应用示例

(1) 智能优化制度及标准检索：用户通过文字的形式向智能助理进行询问，机器人主动识别为用户意图，从而给出回复以及相关推荐结果，回答用户问题。

(2) 智能推荐：当国家出台新的会计政策时及规范时，应用智能算法，智能客服可以根据用户岗位、搜索历史以及政策变更关键词自动推送给 相关用户。

(3) 一句话直达：与业务系统紧密集成，借助于远光微服务平台，一句话即可直达百种服务，相当高效便捷。

(4) 智能解答会计政策、税务、发文等：业务人员对工资、纳税、发文等信息存有疑虑时，通过咨询财务智能助理，实现政策的智能回复。

(5) 智能查数：与业务系统紧密集成，实现报表、资金等数据的智能查询，高效完成工作。如我要查蒙东电力 2021 年资产负债表。

(6) 智能工单：人工和机器协同处理流程。人工服务和智能客服在后台可以做到无缝对接，对于简单的请求，机器提供自动响应，对于中高复杂度的请求，它增加了案例处理，并将请求自动转到人工处理。

6.3 电力征信

近年来，随着电力行业的快速发展和数字化转型，数据采集场景相互割裂、数据统一征集、数据标准化处理等问题得以高度重视和逐步改善。电力征信业务作为基于电力数据的输出形式，不仅在电力行业内部有业数融合应用，同时也受到社会各领域的广泛关注。特别是从金融行业的角度来看，电力征信业务在评估信用风险、提高信贷决策的准确性和效率方面具有重要作用。而目前国内征信行业仍处于数据源争夺战中，电力数据的商业价值伴随行业细分、场景延伸正逐渐凸显。

6.3.1 服务公司，加速公司数字化转型

近年来，电力信用数据的应用成效为公司业务高度赋能，带动公司营销、物资、财务等诸多业务域的工作效率提升，建立完善实现内强合规、外防风险，促进企业稳健经营。典型案例如下：

一是研究建立电力信用分和电费回收逾期信用评价体系。各供电公司虽通过后付费、分次划拨、购电制、预付费等多种结算方式避免电费回收风险，但由于客户信息不充分、信用体系不健全和风险预测能力不强，难以有效评大客户履约能力，无法科学、全面地对客户进行有效细分，实施差异化的交费模式管理，有效降低电费回收风险。电力信用分对电力客户档案开展证照数据治理工作、完成电费回收信用评价体系构建、系统服务试运行，实现对高压企业、低压非居民、低压居民进行信用评级和预警功能，实现用电客户分级、分类管理，落实“一类一策”风险应对措施，助力电费回收风险防控渠道和能力不断丰富与提升。

二是研究构建电费反洗钱风控体系。2023 上半年，中国人民银行、国家金融监督管理总局等监管机构因违法反洗钱相关规定处罚金额高达 1.48 亿元，充分反映了当前“强监管、严监管”的政策取向。在此背景下，电费反洗钱能力有待提升，既需要优化传统专家规则引擎，也需要参考拥有丰富历史标签的有监督模型，同时加入识别新风险的无监督模型，和更便于操作的可视化工具来增加其效能。电费反洗钱风控平台与国家反诈中心、省公司、交费渠道、银行及第三方支付公司等多方主体建立常态化工作机制，统一对接、联防联控，结合电力用户数据，统一构建反洗钱技术底座，具备全面的事前、事中、事后风险防控体系，积累了 4000 多条关于支付交费相关风险控制规则，实时监控每条交易，有效防范交易风险，遏制银行代收、管家卡等洗钱和“打折电费”等黑产行为。

三是开展征信报告在物资采购、信贷审核、资质申报、电力交易、营销服务等领域的广泛服务。依托国网内部数据，结合工商、司法、公共信用等外部数据，形成的辅助使用方综合考察企业信用水平的报告类产品，为各类信用交易提供决策参考。例如探索形成发电企业、售电企业、批发用户 3 类“电力交易”主体信用评价报告，推动电力交易市场信用风险管理和服务体系建设，为电力交易中心市场服务和管理提供支持。

6.3.2 服务政府，助力国家精准化管理

在国家治理现代化的背景下，“数字政府”是政府应用数字技术履行职能而展现的一种政府运行模式。电力征信助力区域政府经济调控的数字化、智慧化。典型案例如下：

一是协同政府相关部门共同打造中小微企业融资服务平台、探索专精特新企业融资新模式、“信用社会”建设等辅助城市进一步提升金融服务能力的优秀大数据实践，扩大普惠金融服务覆盖面。随着我国经济的快速发展，全国中小微企业数量已达到 4800 万家以上，新

设企业数量还处在快速上升。但是中小企业融资难、贷款难的局面持续存在，构建以信用为核心的新型市场监管体制、营造公平诚信的市场环境正逐步成为市场建设的重中之重。例如，某地电力公司打造深圳数据交易所首个电力数据产品，构建了一套基于电力数据的企业征信指标，包括用电状态、电费缴纳、用电量、违约行为 4 大类征信指标，通过安全可靠的电力数据开放运营平台，为征信机构提供数据服务。该数据产品面世以来，已与市工信局等政府部门签订 82 万数据产品合同。

二是推动政企数据共享联动，通过特色产业相关行业、传统产业相关行业的企业能耗排放数据、绿电数据等变化趋势，构建各类电力经济指数，多维度刻画当地经济运行状态，透视城市发展格局，为政府促进行业整体发展、健全区域协调发展提供更精细的决策参考。例如，国家电网发布政企信电力大数据产品，深挖用电数据，发挥用电数据“温度计”、“晴雨表”作用；南方电网发布制造业税电大数据指数，为政府促进行业整体发展、驱动区域协调发展提供更精细的决策参考。

6.3.3 服务金融，助力经济高质量发展

辅助金融机构风险识别、授信审批、精准营销等工作。通过用电信息和信贷风控业务的关联关系分析，构建电力特色金融风控模型和全方位画像，实现金融机构信贷业务全流程服务，解决金融市场信息不对称、风险识别难等问题。典型案例如下：

一是提供标准化的信贷智能风控产品，依托国家电网公司准确、实时的电力大数据，经数据分析、深度数据挖掘以及科学的数学算法和建模，形成的适用于金融行业需要的企业评价、监测和管理系列产品，为金融行业客户提供贷前、贷中、贷后的全面高效的风险管理服务，通过信用画像及评分卡得分，在授信辅助、贷后预警、空壳企业监测、信贷反欺诈、供应链金融等场景应用，助力金融风险防控，辅

助金融行业数字化转型,解决中小微企业融资难,促进社会经济发展。

二是提供特色企业电力标签,基于企业相关的电力营销数据,通过一系列算法和数据挖掘找到一定规律,从电费水平、交费行为、用电行为、用电容量、用电规范、企业基本信息、互动行为等7个方面构建企业标签模型体系,包含138项标签的用户模型。通过贴标签,对企业精准画像,评估企业的行业地位、开工状态、发展趋势、资金状态、经营稳定性和诚信状态,辅助银行进行金融风控和联合建模,实时监测企业异常经营状况。

三是精准营销和企业增信。根据金融机构的需求,利用电力营销数据、发票数据,以及其他数据资源,识别与客户信用相关的特征标签并构建客户信用评价模型,包括信用等级管理、信用评价及风险分析、数据服务管理等。利用电力、发票数据资源优势,为金融机构提供客户信用相关的查询和分析服务,甄选高信用优质客户,用于发展新增客户及存量客户额度提升。

6.3.4 服务企业,促进产业体系化发展

电力征信依托电力数据实时、准确、连续性等特点,结合区块链、人工智能等技术,在融资保险、碳交易、绿色智慧供应链等多方面为企业提供服务,助力企业智慧经营,支持企业降本增效,不断提升行业赋能效应。典型案例如下:

一是整合电力大数据、银行金融服务资源,构建“电力数据征信画像”,助力企业融资。发布“电e贷”“供货贷”等信贷产品,具有纯信用、易办理、低利率等显著优势,兼具专项专享及自主支用两种额度,专项额度用于电费交纳、货款支付等,自主支用额度可用于企业其他生产经营活动,助力小微企业解决融资难题,节约融资成本。

二是依托碳交易所、电力交易所等信用体系,开展碳金融、绿色金融。在信用管理完备的前提下,探索碳金融增值服务模式,创新性研究碳远期、碳掉期、碳期权、碳租赁、碳债券、碳资产证券化、碳

基金、碳期货等，结合多维度数据以及丰富的业务场景，打造以信用为核心的碳金融产品。尤其是针对钢铁、有色、石化、化工、建材、造纸、电力和航空等重点高耗能行业，基于电力数据判断新能源和化石燃料占比，结合化石燃料碳排放系数，开展绿色企业/项目评价认证，配套开展降息贴息等金融手段，基于“大数据+信用”的金融服务平台，既能有效控制金融风险，又能支持碳交易所快速发展，通过引入金融活水的方式，保障双碳目标的顺利达成。

三是助力企业供应链绿色低碳转型。依据用电规模、电费规模、违约情况、发票额度等情况开展供应商标签化处理，供应商标签体系纳入物资招投标事前（供应商企业征信报告）、事中（供应商信用评级）、事后（供应商黑红名单）全流程信用管理，减少公司供应商管理过程中的人、财、物投入，降低供应商管理成本，提高采购效益，及时发现供应商履约风险，降低供应商违约给公司造成的损失。同时，根据企业招标采购流程，辅助供应商信贷融资、订单融资申请业务，结合企业在银行内外部的多维度信息进行线上客户评价、额度测算和信贷审批，为供应商提供信用贷款业务，用于招投标业务支付、保理工作，深化银电合作、提升客户体验、打造供应商金融生态。

6.4 绿色电力

6.4.1 背景介绍

在国家双碳战略逐步落实的过程中，推进绿色电力相关业务是加快推动落实碳达峰、碳中和目标的重要手段，在绿电各业务场景下存在以下共性需求：一是随着政府关于可再生能源消纳、能耗双控、绿电核算统计等相关政策的下发，为部分绿电场景带来强制考核要求，催生我国绿电生产、消纳、计量等领域对可信监管、有据考核的需求。二是双碳战略为绿电交易市场带来了巨大的发展空间与经济潜力，而市场化的交易机制、公平透明的利益保障机制等方面仍存在薄弱环节，制约了绿电领域经济价值的有效释放。因此，各参与方对加强建

设公平、公正、公开的市场环境存在强烈需求。三是在欧盟为代表的各国家对绿色消费的需求日益高涨，如果商品缺乏可信的绿色证明会导致生产方贸易难度提升，也降低了市场侧的消费欲望。综上所述，在绿电生产侧、消费侧、监管侧都对提供可信权威的绿色、清洁、低碳的证明存在强烈需求。

通过区块链技术固有的数据固化鉴定、信息可追溯、规则公平执行等优势能够有效破除主体间信息壁垒、实现多方公平协同、促进可信监管、强化信任传导。国网公司基于区块链技术面向绿电各场景业务需求打造了可再生能源消纳、冬奥绿电溯源、绿电交易、能源计量等多个典型案例，积极助力新型电力系统构建，树立了区块链技术在绿电领域创新应用典范。

6.4.2 典型应用

6.4.2.1 可再生能源消纳

2019年5月，国家发改委、能源局联合发布《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》，这标志着我国建立了以促进可再生能源电力消纳为目标的强制考核与激励机制。准确把握消纳责任主体消纳情况，构建可信的履约证明与考核机制、营造公平公正的市场交易环境成为可再生能源消纳市场建设的重要工作。

利用区块链多点同步、数据溯源可信等技术特性，通过设计区块链新型电力交易模式和可再生能源电力数字化凭证核发机制，打造了全国首个基于区块链的可再生能源电力消纳平台，实现面向全国百万级市场主体、千亿千瓦时等级消纳量的凭证交易的申报、确认和出清全环节链上运行，确保可再生能源超额消纳量交易的精准核算，营造公平、公开、公正的市场化交易环境。

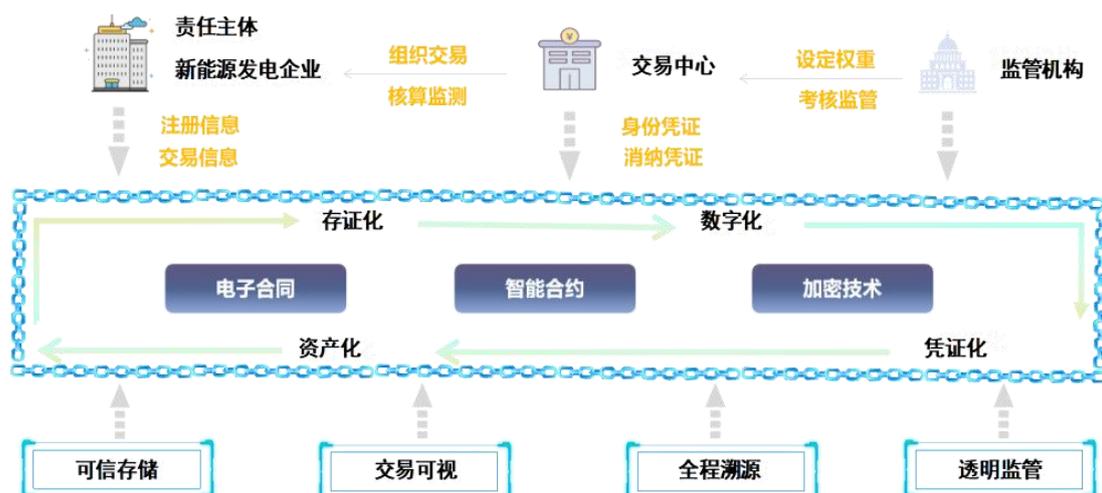


图 6-8 可再生能源消纳

2021 年，该平台成功支撑可再生能源电力超额消纳量省间交易，达成超额消纳凭证转让结果 245.5 万个，相当于可再生能源电量 24.55 亿千瓦时。

6.4.2.2 绿电交易

绿电交易是我国促进绿色能源生产消费，加快推动落实碳达峰、碳中和目标的重要手段。在绿电交易过程中面临数据易造假、难追踪、交易过程不透明，监管难等问题。区块链凭借其多方共治、链上数据难篡改等技术特性能够很好解决绿电交易过程中面临的以上问题。

通过区块链构建绿电交易的生产、交易、传输、消费、结算等各个环节信息链上运作模式，记录绿电交易全环节关键信息，设计绿色电力消费证明链上流通机制，推出二维码绿色电力溯源查询服务，为各类市场主体、交易机构、监管机构提供可信、便捷的数字化服务。

6.4.2.3 冬奥绿电溯源

2019 年 6 月，北京冬奥组委发布了《北京 2022 年冬奥会和冬残奥会低碳管理工作方案》，提出综合实现 100%绿电供应满足冬奥场馆及配套设施常规电力消费需求，这为绿电交易的全过程可信记录、精准溯源和透明监管增加了新的技术需求。

应用区块链技术，建立集绿色电力生产、交易、消费全环节数据收集、管理与查验于一体的绿电溯源方法，通过工业互联网标识解析体系对各环节数据进行唯一编码后上链，实现多维溯源查询以及能源生产、传输、消费全链条动态感知，为每一度绿电的真实消纳提供可视、可信、可靠的有效性证明。

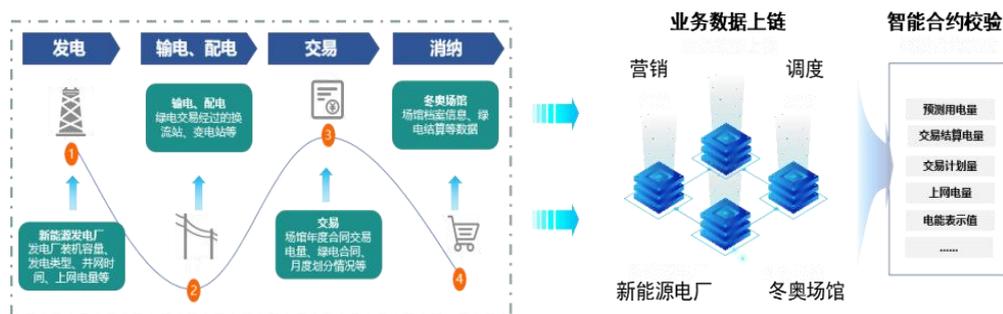


图 6-9 冬奥绿电溯源

2022 年北京冬奥会期间，该平台助力 28 家新能源电厂、26 个冬奥场馆开展绿电交易，成交电量 7.8 亿千瓦时。通过区块链技术实现冬奥绿电发电、输送、交易、消纳 4 类数据上链，支撑开展 10 批次可信溯源服务，有效助力全部场馆 100%绿电供应证明，充分践行“绿色办奥”理念，以科技创新助力冬奥会的成功举办。

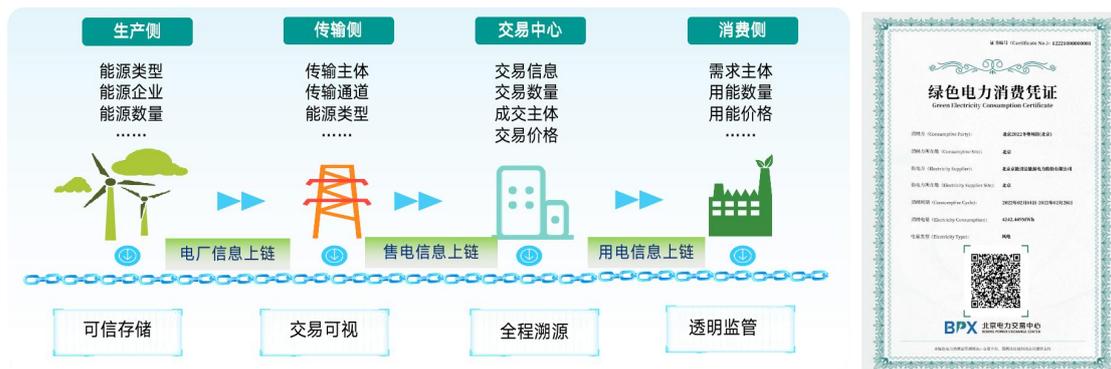


图 6-10 绿色电力交易

截至 2022 年底，绿电交易平台已服务全国 25 个省市 12000 余家市场主体开展绿色电力交易业务，累计交易电量达 448.86 亿千瓦时，核发基于区块链的绿色电力消费证明 34000 余张。

6.5 电力元宇宙

元宇宙作为数字经济发展的未来形态，进一步打开了虚拟世界和真实世界的连接大门，将带动实体经济与数字经济深度融合。国内外产业均加快推进元宇宙技术研究，探索应用场景落地。多部委及省份已出台元宇宙支持政策和专项政策，元宇宙迎来蓬勃发展的新阶段。

能源行业目前正处于数字化转型的关键时期，元宇宙在电网多维数字空间起到关键的桥梁和纽带作用，为解决新型电力系统背景下发展的难题带来了新的思路，将为助力提升电网“气候弹性”“安全韧性”“调节柔性”发挥重要作用。

电力元宇宙系统中有五大要素：现实电力系统、虚拟电力系统、虚实交互系统、智能分析系统和人机交互系统。电力元宇宙基于虚实交互系统能实现现实电力系统和虚拟电力系统之间的双向数据传输，基于智能分析系统能对来自现实电力系统和虚拟电力系统的数据进行融合和分析，基于人机交互系统能给用户提供现实电力系统和虚拟电力系统的信息。

电力元宇宙由设施层和平台层部分组成，设施层包括现实电力系统、虚拟电力系统和虚实交互系统，平台层包括智能分析系统和人机交互系统。在设施层中，现实电力系统是电力元宇宙的物理骨架，为虚拟电力系统提供建模参考。

虚拟电力系统是电力元宇宙的数字骨架，能跟随现实电力系统进行动态更新，其中数字孪生是实现虚拟电力系统的关键技术；虚实交互系统是电力元宇宙的虚实通信媒介，负责现实电力系统和虚拟电力系统的信息获取、交换和存储，其中物联网、通信网络和大数据管理是实现虚实交互系统的关键技术。在平台层中，智能分析系统是元电力的“大脑”，实现元电力运行的智能化，其中计算策略和人工智能是智能分析系统的关键技术；人机交互系统是用户和元电力的通信媒介，其中先进人机交互技术是实现人机交互系统的关键技术。

在电力元宇宙设施层中，现实电力系统、虚拟电力系统和虚实交互系统之间的纽带构成了电力元宇宙四大场景：增强现实、日常记录、镜像世界和虚拟世界。增强现实是虚拟电力系统流经虚实交互系统到现实电力系统的单向信息流，能够为现实电力系统提供虚拟数据分析和虚拟可视化信息；日常记录是现实电力系统和虚拟电力系统到虚实交互系统的双向信息流，能够对现实电力系统和虚拟电力系统的异常事件进行记录和复现；镜像世界是现实电力系统和虚拟电力系统流经虚实交互系统的双向信息流，该场景下的虚拟电力系统相当于一个平行控制器，负责从现实电力系统中获取数据，经过分析后再向现实电力系统发出控制命令；虚拟世界是现实电力系统流经虚实交互系统到虚拟电力系统的单向信息流，基于现实电力系统设计的虚拟电力系统能够为设计人员和实习人员提供一个虚拟的电站环境，辅助电站设计和新人培训。

1. 营销-数字人直播带货

数字人直播带货是一种全新电子商务模式，通过借助先进的人工智能技术，将虚拟数字人与直播相结合，为用户提供真实、互动的购物体验。

传统的直播带货需要真人主播，但由于主播数量有限且成本较高，这种模式无法满足市场需求。而虚拟数字人直播带货则可以通过数字化的形式实现无限制的主播数量。虚拟数字人是人工智能技术所创建的虚拟角色，具备自我学习和表达的能力，可以模拟人类的语音、表情、动作等特征，给观众带来更真实的直播体验。

虚拟数字人直播带货的优势不仅在于量身定制的主播数量，还包括互动性和自动化。观众可以通过弹幕、评论等方式与虚拟数字人进行实时互动，提问或者要求展示商品细节等。虚拟数字人还可以根据用户的个性化需求进行推荐和协助购物，提供更加精准和全面的服务，实现用户与商品之零距离的连接。

虚拟数字人直播带货的另一个亮点是自动化。虚拟数字人可以通过预先设定的程序和算法，自动进行商品展示、售卖和推广等操作，无需人工干预。这不仅可以大幅度提高效率，减少人力成本，还可以确保直播带货的稳定性和一致性，避免主播情绪波动、技术问题等对直播带货产生的不稳定因素。

本应用面向国家重点帮扶县、四县一区等地区商户构建虚拟数字人直播带货场景，依托虚拟数字人、智能语音交互等技术，提供帮扶地区与产品介绍、帮扶产品配置、24小时不间断直播等服务，着力破解帮扶地区产品销售渠道窄、本地市场容量小等难题，促进帮扶地区商户收入、经济发展与产业转型升级。



图6-11 数字人直播带货

2. 职业技能培训

面向电力行业专业技能培训，构建职业技能元宇宙培训空间，应用3D建模、数字渲染、智能感知、数字孪生、虚实交互等技术，提供虚拟空间来完成对电力设备、巡检无人机、配网工程等操作技能辅助培训工作，解决实际设备不足、培训存在安全隐患、现实环境无法覆盖实际环境等问题，全面加强技能培训的真实感与完整度，提升培

训效果。

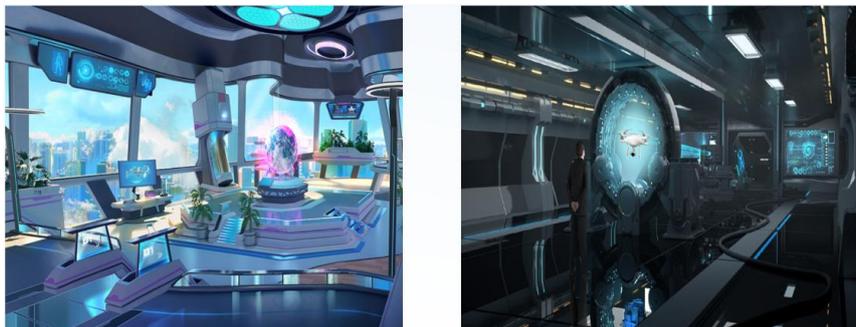


图 6-12 职业技能培训

3. 宣传-园区导览

以园区建筑全专业BIM模型为基础，构建某园区的数字化孪生镜像，建立虚拟人及虚拟园区交互的沉浸式体验虚拟空间，结合VR、AR、全息影像等技术，解决大型园区考察、巡视的便捷、快速、互动等问题，实现全园区的沉浸式游览效果。



图 6-13 园区导览

4. 智慧数字人管家

以虚拟园区为基础，导入数字虚拟人，结合交互技术、AI算法，链接实体园区的楼控、安防、消防、智能化系统的数据平台，解决半

人工半智能的物业管理状态，向园区各类人员提供便捷服务的问题，实现虚拟园区的导览、客户交流、后台监控、优化园区运营管理功能。



图 6-14 园区交互虚拟人

第7章 总结与展望

7.1 总结

电力行业重视人工智能技术与电网业务的融合应用发展，围绕电网生产、设备运维、企业经验、客户服务等领域全方位打造了电力营销、电力调度、智慧配电网、电力市场、智慧共享财务、新能源功率预测、分布式电源接入、电力征信、电力区块链、电力元宇宙等智慧应用，赋能电网业务提质、基层员工减负，为电网稳定运行保驾护航，持续推进人工智能技术与核心专业融合应用，全力推进业务数字化转型升级，助力构建新型电力系统。

在国内外，越来越多的头部企业开始布局生成式人工智能技术，积极抢占人工智能技术创新制高点。这些企业不仅在技术研发和应用创新方面进行投入，还积极开展人才引进和合作，以加速技术的落地和应用。这些举措将为人工智能技术的发展和應用打下坚实的基础。

与此同时，人工智能应用模式也正在发生改变。过去，人工智能应用主要局限于单一的专业领域，如图像识别、语音识别等。而现在，人工智能应用模式正向“通用+专业应用融合”的方向发展，即将通用的人工智能技术与专业领域的应用场景相结合，打造更可靠、更广泛的业务应用。

此外，人工智能技术的发展方向也在发生改变。目前，人工智能技术主要分为感知智能和认知智能两大类。感知智能主要实现目标检测、语音识别等任务，而认知智能则注重知识服务和推理。随着生成式人工智能技术的兴起，生成式智能也成为人工智能技术的新方向。生成式智能能够基于已有的语言和文本信息，自主生成新的语言和文本，具有更高的智能化和创造力。未来，生成式智能有望成为人工智能应用的新突破口。

7.2 展望

电力行业积极顺应新能源革命与数字革命相融并进趋势，聚焦人工智能技术，加大布局传统专用人工智能应用，积极探索通用人工智能技术，构建通用人工智能+专业人工智能应用融合新模式，积极提高电力行业各产业链上下游企业数字化赋能服务。同时，为了更好地应对新型电力系统的发展和变革，电力行业将加大探索人工智能技术赋能电力业务力度，加强组织统筹，深化开展核心场景梳理、模型统一攻关、样本刚性汇聚、机制迭代优化等专项提升工作，助力推动人工智能技术在电力行业的广泛应用，为电力行业的发展和变革做出积极贡献。

一是应用上，电力行业将深化开展核心场景梳理，重点关注电力行业的重要场景和问题，挖掘潜在的应用场景和需求，以提高人工智能技术的应用价值和意义，有助于将人工智能技术应用到实际场景中，解决电力行业的瓶颈问题，推动人工智能等数字技术深度嵌入业务流程，提高电力行业的效率和质量。

二是模型上，电力行业将进行模型统一攻关，建立统一的人工智能模型和算法库，以提高人工智能技术的开发效率和准确性，有助于应对电力行业的多样化需求和复杂性，提高人工智能技术的适应性和灵活性。加快向大模型研发演进，探索电力行业大模型研发应用，逐步构建大模型与专用模型协同的应用模式

三是样本上，电力行业将汇聚刚性样本，结合电力行业大模型建设需求开展样本刚性定向归集，持续推动样本汇聚共享，强化知识沉淀与共享。建立强有力的数据监管机制，确保人工智能技术的应用稳定可靠，有助于提高人工智能技术的准确性和可靠性，避免数据泄露和滥用等问题。

四是算力上，电力行业将深化公司算力资源规划，结合人工智能应用推广、大模型技术探索验证等实际需求，因地制宜开展人工智能

算力规划，统筹算力需求、规模、分布，合理布局行业大模型训练算力和专用模型训练调优算力，为各专业提供高性能、高承载、高可靠算力服务。

五是机制上，电力行业将加强机制迭代优化，建立完善的人工智能技术应用评估机制和安全管理机制，确保人工智能技术的应用合规和安全，强化专业团队支撑力度，健全管理规范要求，有助于提高人工智能技术的应用质量和可持续性，避免不合规和不安全的应用风险。

参考文献

- [1] 李浩澜, 张园, 刘进. 国家电网“互联网+营销服务”的探索与启示. 中国电业, 2019(6):80-81.
- [2] 盛文虎, 汪军, 赵颖, 等. 浅析“互联网+”背景下国家电网营销策略改革方案. 企业科技与发展, 2019(4):38-39,43.
- [3] 刘卫东, 程云祥, 宫池玉, 等. 应用“大云物移”提升营销服务管理平台设计. 电子技术与软件工程, 2019(2):157.
- [4] 《国家电网公司关于坚持以客户为中心进一步提升优质服务水平的意见》(国家电网办【2018】1号)
- [5] 《“网上国网”建设工作方案》
- [6] 《关于构建以客户为中心的现代服务体系的研究报告》
- [7] 《国家电网公司“网上国网”总体技术方案》
- [8] 桑明龙, 汪伟. 光伏发电预测精度对家庭用电管理系统性能影响研究. 中国计量大学学报, 2022, 33(02):173-180.
- [9] 卜祥国. 基于电力大数据的家庭用电模式分析与负荷预测. 工程硕士, 杭州电子科技大学, 2022.
- [10] 孙金朋. 基于灰色模型对上海市电力需求预测分析研究. 上海节能, 2020, 375(03):208-212.
- [11] 何安明, 赵鑫, 吴立刚等. 基于双向长短期记忆网络的区域电网新能源消纳预测算法. 电气技术, 2023, 24(03):23-30.
- [12] Alkhatat G, Mehmood R. A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning. Energy and AI, 2021, (04): 100060.
- [13] 李金洧. 基于强化学习算法的智能电网需求侧响应及优化调度策略研究. 工程硕士, 南京邮电大学, 2021.
- [14] CHENG W Y Y, LIU Yubao, BOURGEOIS A J. et al. Short-term wind

- forecast of a data assimilation/weather forecasting system with wind turbine anemometer measurement assimilation[J]. Renewable Energy,2017,107:340-351.
- [15] 管霖, 赵琦, 周保荣, 等. 基于多尺度聚类分析的光伏功率特性建模及预测应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 24-30.
- [16] 谢小瑜, 周俊煌, 张勇军, 等. 基于 W-BiLSTM 的可再生能源超短期发电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 10.
- [17] ERDEM E, SHI J. ARMA based approaches for forecast-ing the tuple of wind speed and direction[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1405–1414.
- [18] 王彩霞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非参数回归模型的短期风电功率预测[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 78-82.
- [19] 孙乔, 聂玲, 崔伟, 等. 基于功率预测的分布式光伏发电输出功率平滑方法和系统, CN105552969A[P]. 2016.
- [20] 钱政, 裴岩, 曹利宵, 等. 风电功率预测方法综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1047–1060.
- [21] S. R, J. Singh, A. Ali, A. Khan , et. A comparative study of different deep learning models for mid-term solar power prediction. 2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), Greater Noida, India, 2021, pp. 519-524
- [22] 中国人工智能学会, 罗兰贝格. 中国人工智能创新应用白皮书. 2017. <https://caai.cn/index.php?s=/home/article/detail/id/433.html>
- [23] 中国信通院. 人工智能白皮书(2022年). 2022. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202204/t20220412_399752.htm
- [24] 王继业. 人工智能赋能源网荷储协同互动的应用及展望. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7667-7682.
- [25] 刘传洋, 吴一全. 基于深度学习的输电线路视觉检测方法研究进展 中国电机工程学报. 2023.

- [26] 蒲天骄, 谈元鹏, 彭国政, 等. 电力领域知识图谱的构建与应用. 电网技术, 2021, 45(06): 2080-2091.
- [27] 乔骥, 王新迎, 闵睿, 等. 面向电网调度故障处理的知识图谱框架与关键技术初探. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5837-5849.
- [28] 车万翔, 窦志成, 冯岩松, 等. 大模型时代的自然语言处理:挑战、机遇与发展. 中国科学: 信息科学, 2023.
- [29] 李刚, 李银强, 王洪涛, 等. 电力设备健康管理知识图谱: 基本概念、关键技术及研究进展. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 1-13.
- [30] 蒲天骄, 乔骥, 韩笑, 等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用. 高电压技术, 2020, 46(2): 369-383.
- [31] 郝建业, 邵坤, 李凯, 等. 博弈智能的研究与应用. 中国科学: 信息科学, 2023.
- [32] ZHANG D, HAN X, DENG C. Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 362-370.
- [33] ZHANG Z, ZHANG D, QIU R C. Deep reinforcement learning for power system: An overview. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 6(1): 213-225.
- [34] 刘金波, 宋旭日, 杨楠, 等. 深度强化学习在电网实时计划编排中的应用. 电力系统自动化, 2023: 1-12.
- [35] 胡维昊, 曹迪, 黄琦, 等. 深度强化学习在配电网优化运行中的应用. 电力系统自动化, 2023: 1-18.
- [36] 李亦言, 胡荣兴, 宋立冬, 等. 机器学习在智能配用电领域中的应用: 北美工程实践概述. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 99-113.
- [37] CHEN X, QU G, TANG Y, 等. Reinforcement Learning for Selective Key Applications in Power Systems: Recent Advances and Future Challenges. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2935-2958.

- [38] LI F, DU Y. From AlphaGo to Power System AI: What Engineers Can Learn from Solving the Most Complex Board Game. IEEE Power and Energy Magazine, 2018, 16(2): 76-84.
- [39] XIE L, ZHENG X, SUN Y, et al. Massively Digitized Power Grid: Opportunities and Challenges of Use-Inspired AI. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 762-787.
- [40] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet[J]. Proc. the IEEE, 2011, 12(17): 133-148.
- [41] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [42] 刘道伟, 张东霞, 孙华东, 等. 时空大数据环境下的大电网稳定态势量化评估与自适应防控体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 268-276.
- [43] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
- [44] 李柏青, 刘道伟, 秦晓辉, 等. 信息驱动的大电网全景安全防御概念及理论框架[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5796-5805.
- [45] 刘道伟, 韩学山, 王勇, 等. 在线电力系统静态稳定域的研究及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 42-49.
- [46] 刘道伟, 韩学山, 韩力, 等. 实时环境下有功损耗及静态电压稳定裕度与功率因数角的关系[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 38-46.
- [47] 朱存浩, 马世英, 郑超, 等. 基于广域响应的电力系统暂态失步判据综述[J]. 电网技术, 2022, 46(07): 2677-2689.
- [48] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 200-223.
- [49] 李元诚, 方廷健, 于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 55-59.

- [50] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17):1-11.
- [51] 魏伟, 牛东晓. 负荷预测技术的新进展[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2002, 29(1):10-15.
- [52] 萧国泉, 王春, 张福伟. 电力负荷预测[M]. 中国电力出版社, 2001.
- [53] 金国栋, 卞昊穹, 陈跃国, 等. HDFS 存储和优化技术研究综述[J]. 软件学报, 2020, 31(01): 137-161.
- [54] 王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(03): 529-547.
- [55] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理:概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(01): 146-169.
- [56] 杨方滢. 智能电网的调度监控技术应用[J]. 电子技术, 2022, 51(11):256-257.
- [57] 马悦皎. 电网调度的智能化监控分析[J]. 新型工业化, 2021, 11(08):95-96.
- [58] 周桂平, 罗桓桓, 葛维春, 等. 基于智能电网调度控制系统的输变电设备状态监测设计与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(04):59-63.
- [59] 李群山, 徐玮, 叶健辉, 等. 调度运行可视化汇报系统——基于电网调度数据中心[J]. 中国科技信息, 2016, No.537(11):62-64.
- [60] 杨东伟. 能源区块链探索与实践, 北京: 中国电力出版社, 2020. 78-103.
- [61] 王胜寒, 郭创新, 冯斌, 等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路. 电力系统自动化, 2020, 44(11):10-24.
- [62] 裴凤雀, 崔锦瑞, 董晨景, 等. 区块链在分布式电力交易中的研究领域及现状分析. 中国电机工程学报, 2021, 41(05):1752-1771.
- [63] 张显, 谢开, 张圣楠, 等. 基于区块链的可再生能源超额消纳量交易体系. 中国电力, 2020, 53(09):60-70.
- [64] 杨雪, 金孝俊, 王海洋, 等. 基于区块链的绿证和碳交易市场联合激励机制. 电力建设, 2022, 43(06):24-33.
- [65] 王玉萍, 李明莉, 高芳萍, 庄洁玉, 吴希田, 李林. 人工智能在电力市场

- 中的应用分析与构架设计.2021.24（10）
- [66] 张显,冯景丽,常新,王栋,嵇士杰,谢开,等.基于区块链技术的绿色电力交易系统设计及应用.2022.46.(9)
- [67] 苏启超.浙江电网企业现货市场中的现金流智能预测研究.硕士论文.2021.6
- [68] 王吉培.建立电力征信体系的思考.银行家,2020,08:93-95.
- [69] 王智敏,崔维平,李立峰.基于演化博弈的电力征信商业模式研究.华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(05),101-109.
- [70] 辛保江,李德文,王兰兰.企业电力征信大数据价值挖掘与应用.大数据.2021,7(06).138-146.
- [71] 张喜铭,陈彬,徐欢,等.南方电网公司电力数据应用实践白皮书,南方电网公司,2023.
- [72] 李浩澜,张园,刘进.国家电网“互联网+营销服务”的探索与启示.中国电业,2019(6):80-81.[J]
- [73] 盛文虎,汪军,赵颖,等.浅析“互联网+”背景下国家电网营销策略改革方案.企业科技与发展,2019(4):38-39,43.[J]
- [74] 刘卫东,程云祥,官池玉,等.应用“大云物移”提升营销服务管理平台设计.电子技术与软件工程,2019(2):157.[J]
- [75] 《国家电网公司关于坚持以客户为中心进一步提升优质服务水平的意见》(国家电网办[2018]1号),2018,10-20
- [76] 《“网上国网”项目可研性研究报告》,2018,11-18
- [77] 《国家电网公司“网上国网”总体技术方案》,2018,38-78
- [78] 《“网上国网”项目创新支撑专项说明》,2018,9-13
- [79] 中华人民共和国国务院.国务院关于印发《新一代人工智能发展规划》的通知.2017.国发〔2017〕35号 中国政府网.
- [80] 国家能源局.《新型电力系统发展蓝皮书》.2023.中国电力出版社
- [81] 辛保安.《加快建设新型电力系统助力实现双碳》.《经济日报》头刊.2021.

经济日报

- [82] 面向自然语言处理的深度学习. 薛亚非. 电子技术与软件工程, 2018
- [83] 元宇宙发展背景下的新型电力系统配电网建设启示. 刘冠言; 顾媛媛; 高翔. 电气时代, 2023