分类号_____ 密级_____

U D C_____ 编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

基于云边协同的能源互联网价值形态研究

郭 健

工作完成日期 2019 年 4 月—2021 年 4 月

报告提交日期 2021 年 4 月

清 华 大 学

2021 年 5 月

内 容 摘 要

本文在对云计算、边缘计算和能源互联网国内外研究现状进行分析的基础上，分别从物理层、信息层和价值层开展了云边协同下的能源互联网价值形态研究。具体来说：在物理层实现电网络拓扑模型的高效拼接，并能对外提供统一得模型和数据访问服务；在信息层进行数据质量评估方法和高效数值求解方法研究，为开展高级应用提供准确高效得数据断面信息；在价值层开展双高比例下得能源互联网商业模式研究，并对新能云数据要素应用进行详细分析，最后对区域碳排放风险进行评估，并提出应对策略。

本文的主要结论是：

1. 基于图分析理论建立云边协同的计算模型拼接方法，提出了分布式并行的电网络拓扑分析方法，验证了并行拓扑分析服务的计算效率，能够对外提供高效的统一潮流计算服务。
2. 基于能源互联网中的静态模型数据和动态实例数据分析，建立了数据质量分析与评估方法，验证了方法的有效性；并提出了一种获取能源互联网潮流断面数据的高效数值求解排序方法，提高计算效率。
3. 从业务运营、关键因素、价值场景等维度分析了双高比例下的能源互联网商业模式运行形态，以新能源云为研究对象重点对数据要素应用展开分析，包括价值链分析、系统动力学建模及算例分析，发现了新能云供应链的逆牛鞭效应并提供应对策略。
4. 对区域碳排放风险进行分析评估，建立了基于 CVaR 的区域碳排放风险优化控制模型，根据风险、收益等约束条件，得出在碳市场交易和碳减排项目中的最优投资组合比例。

关键词：模型拼接，数据质量，商业模式分析，数据要素分析，碳排放

Abstract

Based on the analysis of the current research status of cloud computing, edge computing and energy internet (EI), this paper carries out research on the value morphology of cloud-edge collaboration based energy internet from the physical layer, information layer and value layer respectively. Specifically: the efficient splicing method of electrical network topology models at the physical layer was realized, which provide unified models and data access services. Data quality assessment method and efficient numerical solutions were conducted at the information layer to provide accurate and efficient development of advanced applications. In the value layer, energy internet business mode under the double-high ratio environment and the application of the renewable energy cloud data elements were studied in detail, and finally evaluate risk of the regional carbon emission and propose countermeasures.
The main conclusions of this article are as follows:

1.Based on the graph analysis theory, a cloud-edge collaborative computing model splicing method is established, and a distributed parallel electrical network topology analysis method is proposed. Their computing efficiency are verified which can provide efficient unified power flow computing services .

2. Based on the analysis of static model data and dynamic instance data in the EI, a data quality analysis and evaluation method is established to verify the effectiveness of the method; and an efficient numerical solution and sorting method for obtaining energy internet tidal flow profile data is proposed to improve calculations effectiveness.

3.The energy internet business mode under the double-high ratio environment were studied from the dimensions of business operations, key factors, value scenarios. Based on the renewable energy cloud, the application of data elements was the key study, including value chain analysis and system dynamics modeling. The inverse bullwhip effect of the supply chain of renewable energy cloud was found and its countermeasures were proposed .

4. Analyze and evaluate regional carbon emission risks, a CVaR-based regional carbon emission risk optimization control model was established, which can obtain the optimal investment portfolio ratio in carbon market transactions and carbon emission reduction projects based on constraints such as risks and returns.

Keywords: Model splicing, data quality, business mode analysis, data factor analysis, carbon emission.

目　　次

第一章 绪论 1
1.1 云计算与边缘计算 2
1.2 能源互联网研究现状 3
1.3 研究内容 7
第二章 云边协同的电网物理模型拼接与计算服务方法 9
2.1 引言 9
2.2 总体架构设计 10
2.3 计算模型拼接方法 12
2.3.1 网络建模 12
2.3.2 分布式并行拓扑分析 15
2.3.3 基于计算模型拼接的广域分布式计算 16
2.4 服务模式 18
2.4.1 模型服务 18
2.4.2 数据服务 20
2.4.3 基于计算模型拼接的分布式调度员潮流软件服务 21
2.5 算例验证 25
2.5.1 并行拓扑分析服务 25
2.5.2 基于分布式拓扑分析的统一潮流计算服务 26
2.6 小结 27
第三章 多维能源数据质量评估与计算方法研究 29
3.1 引言 29
3.2 相关技术 30
3.3.1 数据清洗与预处理 30
3.3.2 数据同步和冲突消解 31
3.3.3 数据安全与融合集成 33
3.3 数据质量分析与评估方法 35

3.3.1 评估框架 35
3.3.2 数据类型分析 37
3.3.3 评估方法与指标 37
3.3.4 评价流程 39
3.3.5 算例分析 41
3.4 电网络数值求解高效排序方法 43
3.4.1 相关定义 43
3.4.2 AMDML 排序方法 44
3.4.2 算例分析 46
3.5 结论 49
第四章 “双高”比例下的能源互联网商业模式研究 50
4.1 引言 50
4.2 “双高”比例下的能源互联网市场运行形态 51
4.2.1 政策分析 51
4.2.2 运行形态 53
4.3 “双高”比例下的能源互联网商业模式分析 57
4.3.1 业务达成 57
4.3.2 关键因素 57
4.3.3 运营模式 58
4.3.4 价值场景 59
4.4 基于新能源云的数据要素应用研究 61
4.4.1 新能源云要素分析 61
4.4.2 基于数据要素的新能源云价值链分析 63
4.4.3 系统动力学建模 65
4.4.4 算例应用分析 67
4.4.5 讨论 68
4.5 小结 69

第五章 计及风险评估的区域碳排放应对策略研究 70
5.1 引言 70
5.2 碳排放风险分析 71
5.2.1 技术风险 71
5.2.2 经济风险 72
5.2.3 环境风险 72
5.2.4 信用风险 73
5.3 碳排放风险评估 74
5.3.1 风险关系建模 74
5.3.2 风险评价 76
5.4 基于 CVaR 的区域碳排放风险优化控制 79
5.5 算例分析 81
5.6 小结 85
第六章 结论与展望 86
参考文献 87
致 谢 91
项目及研究成果 92
个人简介 94

第一章 绪论

气候变化加剧、30.60 碳达峰、碳中和与国家经济高质量发展要求倒逼国内能源革命与发展迫切转型，也将进一步推动能源互联网建设提速[1-3]。一方面，风、光、生物质等可再生新能源发电形式将逐步成为主力供应电源，其自身能源供给间歇性禀赋特点决定了需要配套深加工装备、储能装置以及高精度预测与调度控制系统，来平抑新能源消纳对电网运行可靠性的不利影响；另一方面，越来越多的分布式自治微网系统使得传统能源消费者被动角色向能源产销者主动角色转变，期望未来在电价实时波动下获取额外的经济回报。

得益于分布式新能源、储能的广泛接入以及电力电子、先进信息与互联网技术的不断进步。这些正逐步缓解人类对化石能源的依赖，欧盟、美国和中国相继分别提出到 2050 年实现可再生能源在能源供给中占100%、80%和 60%~70%的目标。互联网融合多种通信模式，为丰富和利用信息提供了极大便捷，正悄然改变人们沟通和信息交流方式，颠覆越来越多传统产业的经营模式，为构建未来能源系统提供了借鉴和信息支撑。信息与新能源技术为构建智能能源系统提供了必要技术储备，它们的融合有望形成以能源互联网形式供给和消费能源，支撑第三次工业革命[4-5]。

在能源互联网的各个环节中，节能及碳资产交易管理是其重要环节。尤其是碳交易环节是能源互联网各环节中唯一没有被市场充分挖掘的板块。碳资产的开发及交易将有力促进低碳社会发展，为能源互联网的发展提供重要支撑。能源互联网将有助于形成一个巨大的碳资产市场，通过这个市场有效整合产业链上下游各方，促进碳资产的流通，形成供需互动和交易[6]。电力行业是我国区域碳排放和碳减排的重要领域。根据2018 年发布的《中国上市公司碳约束报告》，电力、钢铁和化工已经成为中国前三大高耗能行业，并且电力行业的二氧化碳排放量占全国总排放量的 50%。随着我国经济持续发展和“以电代柴、以电代煤、以电代油”的大力推行，未来对电力的需求还将持续增长。而作为发电及碳排放的主力燃煤，用量将会持续走高，因此未来电力行业还将面临着排放持续增加的局面[7]。

碳排放管理还面临外部市场、法律、政治等多方面风险形态，以及内部种种经营管理风险。因此，识别各项碳排放风险来源，进一步找出碳排放风险因子，提出适用于区域能源互联网的碳排放风险评价方法，建立电力系统碳排放风险防控决策支撑体系，是区域能源企业科学合理

的经营管理碳资产、努力控制碳交易风险、实现低成本减排与碳资产保值增值目标的必经之路。

1.1 云计算与边缘计算

网-源-荷-储互动作为区域能源互联网场景下的基本运行模式，需要在综合利用先进的信息通信与控制技术和价值分配理论支撑的基础上，才能实现能量流、信息流和价值流的高效协同。借鉴基础设施即服务、平台即服务的云计算设计理念，将分布式能源微网的物理基础设施网络集成为微网云，并统一在平台层提供能源管理服务，将是能源互联网云调度的基本模式[8-10]。

边缘计算是一种近运算的概念，最早来自于第五代通信技术。它由欧洲电信标准化协会（European TelecomStandards Institute，ETSI）最早给出定义[11]。通过将运算更靠近数据源所在的本地区网内运算，尽可能地不用将数据回传到云端，减少数据往返云端的等待时间和网络成本。边缘计算作为一种分布式信息技术架构，其中客户端数据在网络的外围处理，尽可能靠近始发源。边缘计算的发展是由移动计算驱动，当前物联网中的网络设备数量不断增多，对于设备监视和控制所需要的带宽很难满足，这为边缘计算提供了实际应用的场景。另外，传感器性能的提升以及计算组件成本的下降，也是边缘计算飞速发展的重要支撑。边缘计算将密集型计算任务迁移到附近的网络边缘服务器，降低核心网和传输网的拥塞与负担，减缓网络带宽压力，实现较低时延，带来较高带宽，提高万物互联时代数据处理效率，同时能够快速响应用户请求并提升服务质量。边缘计算本身是化解云计算压力过大、资源利用不高、可靠性不高、可用性差、带宽资源不足等问题的技术手段，把原本集中式的优势在物联网兴起的新形式下转变成分布式的一种有效途径。

边缘计算通过将核心节点的计算任务和功能下发到具有处理能力的边缘侧设备从而形成边缘计算节点（edge computing node，ECN），充分利用边缘侧的处理计算能力，对信息进行初步的处理，甚至完全向用户提供原来在云计算服务器运行的服务。边缘计算 与云计算的概念相似，都是用于处理大数据的处理方式。不同之处在于，对于云平台而言，边缘节点是一个高效的数据采集终端，为云平台过滤冗余的信息，分散了云平台的计算任务，从而提高云平台的服务能力。在边缘计算当中，数据不需要被传送到云端，直接在边缘侧进行处理，数据处理的实时性和安全性远优于云计算[12]。将边缘计算应用在供需领域中，可以有效地提

高数据的存储和处理效率，减少传输数据所占用的带宽，使电力需求响应更加有效和快速地进行[13]。

1.2 能源互联网研究现状

依据马克思政治经济学原理，价值形态是基于价值实体产生的交换关系总和。具体到能源互联网价值形态，则是在物理实体、技术应用、机制运行等价值组成单元上开展能源生产、传输、消费等各类活动时所发生的能源转换、转化、变换、交易关系的统称[14]。能源互联网的发展方兴未艾，很多能源和信息领域的科学家都展开了理论与应用研究[15-17]。不同领域的专家对能源互联网的理解稍有差异，一般来说，能源互联网是面向用户需求，借助技术手段以达到多能互补协调优化运行的目的，通过建立市场主体间的良性博弈机制，能够提供绿色、可靠、经济、高效等多元化用能服务的区域信息物理社会系统；同时，也是一种在服务用户用能过程中实现各方参与主体多赢的价值承载形态。本文分别从物理层、信息层和价值层角度论述区域能源互联网价值形态的研究框架，如图 1-1 所示。

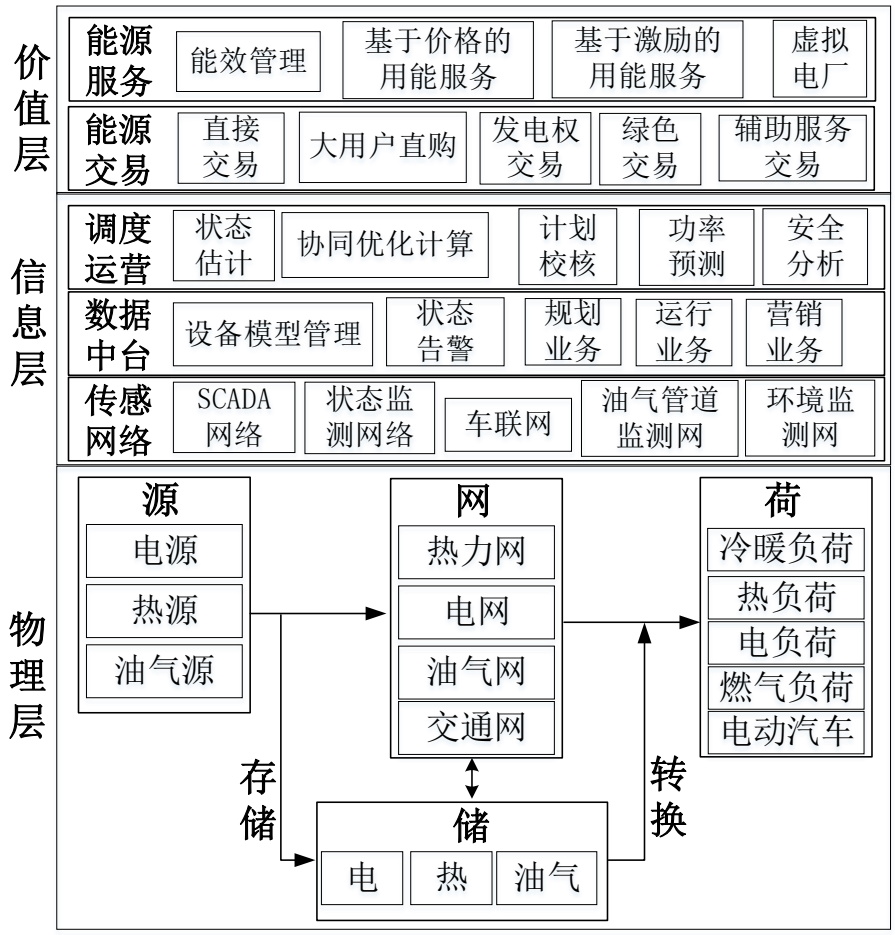


图 1-1 能源互联网价值形态研究框架

从物理连接来看，物理层描述一定区域内“源-网-荷-储”等能源要素单元的能量传输、存储与转换过程。实现风、光、热、电、气、冷等多能源品种在时间和空间维度上的互补共济，提高能源综合利用效率，是能源互联网系统研究的核心内容[18]。其中，涉及能源转换与存储，多能源系统在能源需求侧的统一规划、运行优化及评价等相关技术。具体来说，面向风光等间歇性可再生能源消纳需求，需进一步研究电储能系统的最优充放电方法、电采暖-热储能协同优化调度方法，以及电动汽车时空有序充电策略；针对电/气/热/冷等能源品种之间、多类型用户负荷之间动态响应特性以及能源转换、变换、转化关系，分析多时空尺度下的多能互补特性及耦合机理；计及运行可靠性、经济性、能效提升等多目标、多阶段、多约束条件，建立多时空尺度下的源/网/荷/储协同调度模型；分析日前/日内/现货等不同时间尺度区域级电力市场下，源/网/荷/储资源的调度成本与效益；设计满足市场主体交易互动的收益模型与激励机制；综合考虑负荷/电价预测结果、市场交易信息和系统运维成本，建立综合能源系统优化调度模型，从而实现系统整体效益最优。

瑞士联邦理工学院首次给出了能量枢纽（Energy Hub）的概念[19]，

其概念和模型应用到欧盟示范项目中。作为多种能源和负荷需求的能源转换单元，可为不同场景下的能源输入输出提供接口，并量化表征系统能量转化关系，通过管理多种能源的消费与供应的转化关系，实现能源间的综合优化。综合分析了热／电／气系统的运行与协同调度问题。文献[20]将区域内的燃气锅炉、热电联产技术和电力变压器等元件统一建模为具有固定转化特性的中间元件；文献[21]分析了过量风电转换为热能的调度方法和技术手段，方案促进了风能的消纳能力，提高了风电场的经济效益。英国曼彻斯特大学最先于当地区域综合能源系统开发了电／热／气系统与用户交互平台，该平台整合了用能模式、节能策略和需求响应等。欧盟确立了其 2050 电力生产无碳化发展目标并发布了欧盟电网计划新版路线图，致力于融合各国能源系统构建跨欧洲的能源输配系统[22]。日本早在 2010 年就成立了日本智能社区联盟，致力于智能社区技术的研究与覆盖全国的综合能源系统示范[23]。在国内多能互补的研究实践中，广州明珠工业区结合城市电网未来发展方向和技术需求，通过冷／热／电／气系统优化提高能源综合利用率，积极打造可再生能源大规模就地消纳智能工业示范园。北京市延庆县“城市能源互联网”综合示范工程旨在建设支撑高渗透率新能源充分消纳的区域能源系统[24]。张家口张北风光热储输多能互补示范是国家电网公司建设坚强智能电网首批重点工程，综合运用多种储能和光热发电技术，开创了规模化多能互补发电的先例。雄安新区多能互补工程的特点在于对地热能的梯级利用，以中深层地热为主，浅层地热、再生水余 热、垃圾发电余热为辅，提出了考虑燃气等能源为补充的“地热＋”多能互补方案[25]。

从信息互动层来看，信息层是对物理层能量流动、转换和转化过程的实时监测、数据传输、存储及应用，它包括传感网络、数据中台管理和调度运营三部分内容。信息路由是离散量，网络连通性能够保证数据信息的可达性；而能量调度是连续量，且需要实时满足功率平衡。离散量采集与连续量传输的矛盾，信息可达性与供需实时性的矛盾，是信息路由与能量调度集成面临的两类主要矛盾。通过它们之间的协同优化，实现信息与能量系统的高效融合，是能源互联网要解决的基本运行理论问题[26]。

文献[27]指出，能源互联网是智能化微网与骨干网的的融合，骨干传输通道（包括能源配送网络和信息传输高速公路）是基础，接入单元（包括微网、消费终端、电力生产企业等）通过即插即用方式接入．接入单元通过信息设施实现负荷或能量状况信息的共享，并为调整控制策略提供支撑．尽力实现能源本地化供应、降低能源传输损耗是能源互联网建设的目标之一。互联网成功经验表明：层次化（树形）网络结构是一种

有效方法。针对微网能源管理，文献[28]提出了树形结构，该结构中，簇控制器是核心部件，控制器通过智能电表等信息采集设备获知底层单元能源需求和生产信息，根据计算结果由底至上地完成调度。只有当底层单元无法实现供给平衡时，控制器才向上层控制器发送能源请求信息，并与骨干总线配合实现能源供给平衡．此外，树形结构能较好地隔离失效，在发生故障避免事故蔓延，本质上具有提高网络可生存性。为支撑分布式可再生能源，进一步地，文献[29]给出了覆盖网结构，强调多个控制器控制．与树形结构相比，虽然增加了控制和调度难度，但为实现能源供给平衡灵活调度提供了可能．类似于计算机网络中 的 P2P 网络和无线通信中的自组织网络，网络主体行为受自身价值的影响，参与主体的规模影响该网络结构实施效率，激励合作机制是推广该类结构的关键。为实现消费最小化和能源平稳化，文献[30]基于能源消费调度器给出了一种激励合作机制，探索了该结构的应用前景．

信息是支撑能源互联网智能化和优化运行的关键，信息获取效率和利用程度决定能源互联网性能[31]。传感器、网络计算技术等为信息获取和 处理提供了良好基础，但尚缺乏系统、针对能源网络应用的理论和方法，针对能源互联网设计高效信息获取与处理方法具有重要现实意义。能源互联网承载业务类型的多样化导致信息采集、信息传输、信息处理以及策略分发都要求较高的效率，支持计算密集型业务的处理架构是能源互 联网所必需的技术。云计算能高效整合网络资源、提供强大信息处理能力，应用云计算成果解决能源互联网中的信息处理问题是可行方向[32-33]。

从价值实现来看，价值层包括能源交易与能源服务，通过灵活的交易策略和先进信息技术支撑，提高能源生产/消费效率，降低用能成本。公平的市场机制设计是开展能源交易的前提。垂直一体化的计划管制理念，短期能够带来能源交易效率的提升，长期却会降低社会总体福利水平，最终导致效率低下。目前，技术层面的电力市场化已是大势所趋，这势必带来产权经济的主张、确立与划分。能源产销者作为电力市场中的微观主体，由于所有权、运营权和收益权的分离而带来的价值分配问题，是区域能源电力市场的基本经济理论问题。

在开放售电市场环境下，存在能源供应方、运营方、代理方和用户等多方利益主体。能源供应方是外部能源市场，既是电能、油气等能源价格制定者，也能接收运营方合理报价下的多余能源上网；用户类型多样，既有稳定的电/热用户，也包括新型的电动汽车用户和具备需求响应能力的可控负荷单元；代理方负责优化用户用能策略，降低用能成本，通过提供用能服务获取收益；运营方一方面对区域内的间歇性可再生能

源、多能流耦合设备和储能装置进行管控和优化调度，提高自身发电的就地消纳率，另一方面则负责与能源供应方和用户代理进行能源交易，获取差价利润。其中，能源供应方的报价策略、用户的用能策略、运营方和代理方的控制优化策略，它们之间存在信息的不对称。通过构建激励相容的博弈模型，参与日前计划市场或实时市场，能进一步提高系统协同优化能力和经济运行水平。

德国亚琛大学和德国联邦经济和环境部通过需求管理实现了智能电表项目和 E-Energy 项目[34]，旨在能量流、信息流与资金流的高度融合，推动能量服务的电子商务化，其成果在德国朗根费尔德成功 落地。随着国内电力体制改革的持续推进[35]，通过电价反映能源供需波动和传输阻塞情况，同时根据电价信息共享机制，实现源-网-荷-储的及时响应，这也都是能源互联网开展相关业务的应有之义[36]。文献[37]总结了国外欧美发电国家电力市场放开管制后的进一步发展侧重于分布式绿色能源接入和需求侧响应的市场化运作与监管；文献[38]针对边际价格机制可能带来的信息不对称问题，提出了基于 Vickrey-Clarke-Groves 的日前市场报价机制，以期发现真实成本，更好实现市场主体间的激励相容；文献[39-41]则是以电价波动信息作为自变量，研究微观市场主体参与下的充放电优化策略，实现储能收益最大化或用能成本最小化；文献[42]进一步提出了能源互联网信息经济学的研究框架。

1.3 研究内容

基于以上分析，未来能源供需形态将以集中式和分布式相结合、能源信息深度融合支撑、市场开放互动为主要特征的能源互联网形式存在。借鉴信息技术领域的云计算和边缘计算的本文开展基于混合能源云的能源互联网价值形态研究，包括物理模型层、数据层和价值层的研究，逻辑关系如图 1-2 所示。

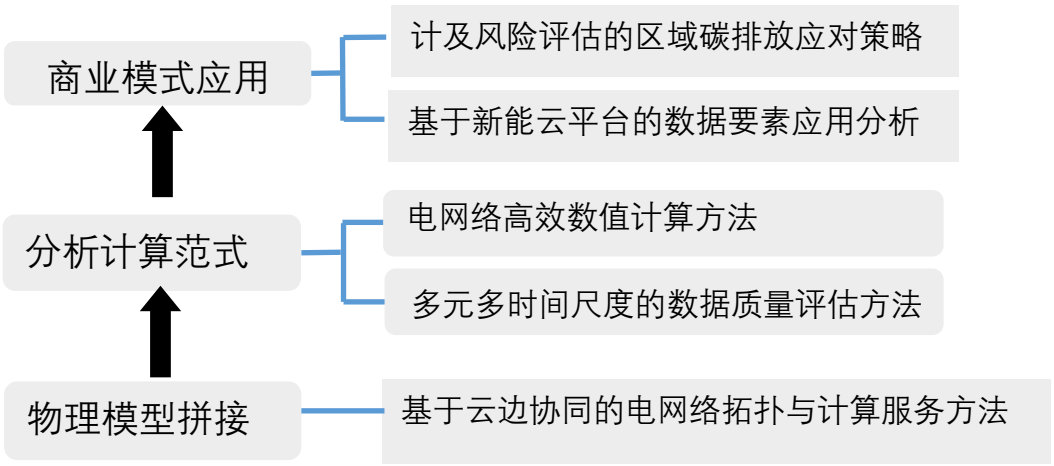


图 1-2　基于云边协同的能源互联网价值形态研究内容

本文以电为核心开展基于云边协同的能源互联网价值形态研究，具体来说：

在物理层，获取完整的电网物理模型是能源互联网价值形态分析基础。基于云边协同的调度分析应用架构，研究分布式并行的电网络拓扑分析方法，保证物理模型拼接效率，并能对外提供统一得模型和数据访问服务和潮流服务；

在数据层，准确高效获取电网络潮流断面数据是能源互联网价值形态研究的要求。首先对静态物理模型和动态实例数据进行分析，建立数据质量评估与修复方法，提出拥有获取潮流断面数据的高效数值求解排序方法，为高级应用提供准确高效的数据断面信息；

最后在价值层，开展双高比例下得能源互联网商业模式研究，包括业务应用、要素与价值场景等方面，并对新能云数据要素应用进行详细分析和系统动力学建模，对区域碳排放风险进行评估并提出应对策略。

第二章 云边协同的电网物理模型拼接与计算服务方法

2.1 引言

微网、分布式能源等能量自治单元可以作为能源互联网中的基本组成元素，通过新能源发电，微能源的采集、汇聚与分享，以及微网内的储能或用电消纳形成“局域网”。能源互联网是在此基础上的广域连接形式，作为分布式能源的接入形式，其是从分布式能源的大型、中型发展到了任意的小型、微型的“广域网”[43]。大电网的形成有其必然性，其将来仍然是能源互联网中的“主干网”。微网或分布式能源接入、互联和调度灵活但存在供电可靠性问题，大电网供电可靠性较高但尚难以适应大量新能源的灵活接入和双向互动，能源互联网则可以起到衔接作用，综合两方面的优势。

云边协同是边缘计算技术和云计算的结合，二者均得到了大量研究。目前对于边缘计算的普遍定义为，边缘计算是在移动网络边缘提供 IT 服务环境和计算能力，强调靠近移动用户，以减少网络操作和服务交付的时延，提高用户体验[44-46]。云计算则被定义为，通过网络“云”将巨大的数据计算处理程序分解成无数个小程序，然后通过多部服务器组成的系统进行处理和分析这些小程序得到结果并返回给用户。根据二者的部署位置和应用场景，其在功能上存在互补性。随着互联电网的扩大及具备更快采集速率的采集装置的出现，系统进行在线分析和控制所需要的计算能力将远远超过目前的实际配置[47]。不断增加的数据量对当前信息系统的数据处理能力也提出了更高的要求，亟待更加快捷的数据处理技术。电网互联为一体，而电网的调度和控制却是分层分区的，两者之间存在矛盾。目前电网控制中心的能量管理系统（EMS）都是采用各自独立的计算模式，缺少彼此之间的协调，不能保证电力系统在线分析应用软件计算结果的正确性[48]。

将云边协同的理念引入到以电为核心的能源互联网调度运行控制系统设计中，保证对电网运行状态的实时高效在线计算与分析。首先设计云边协同的服务体系架构，通过在变电站级和各级调度中心等边缘侧进行必要的数据计算分析，降低上传到调度云中心的数据量；提出适应这种协同架构的分布式拓扑分析服务模式与并行计算方法，验证计算效率；对外提供模型和数据服务，以及基于计算模型拼接的统一潮流计算服务。

2.2 总体架构设计

区域能源互联网主要是对能源消费需求侧的改造升级，它将过去孤立规划建设的电、热、气、冷输送通道打包集成整合，基于先进的能量转换设备、存储装置和多能优化运行技术，实现多能源品类的高效转换、转化和梯级利用。区域能源互联网是能源产销者和消费者的集合体，其中既有包含风电、光伏、燃气冷热电联供等发电单元的微型电网、又有能开展需求侧响应与管理的智能生活社区；它们通过高速通信网络和大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术，为稳定可靠、主动高效地参与能源调度与市场交易提供了技术手段，如图 2-1 所示。

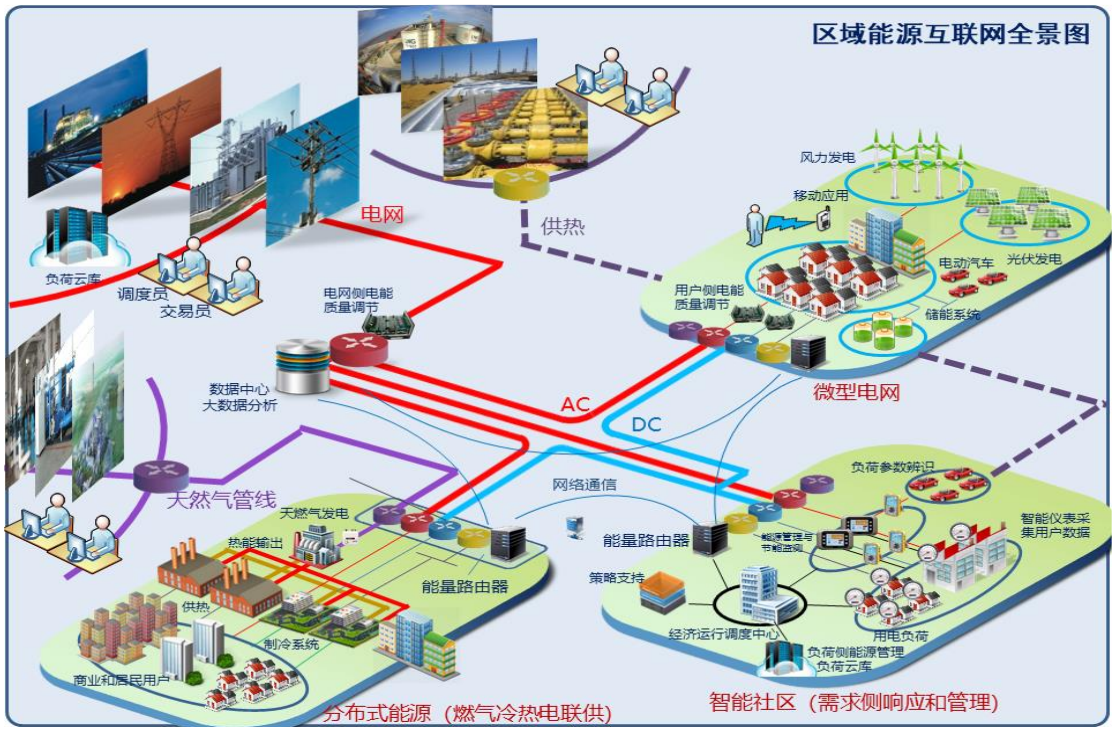


图 2-1 区域能源互联网场景应用

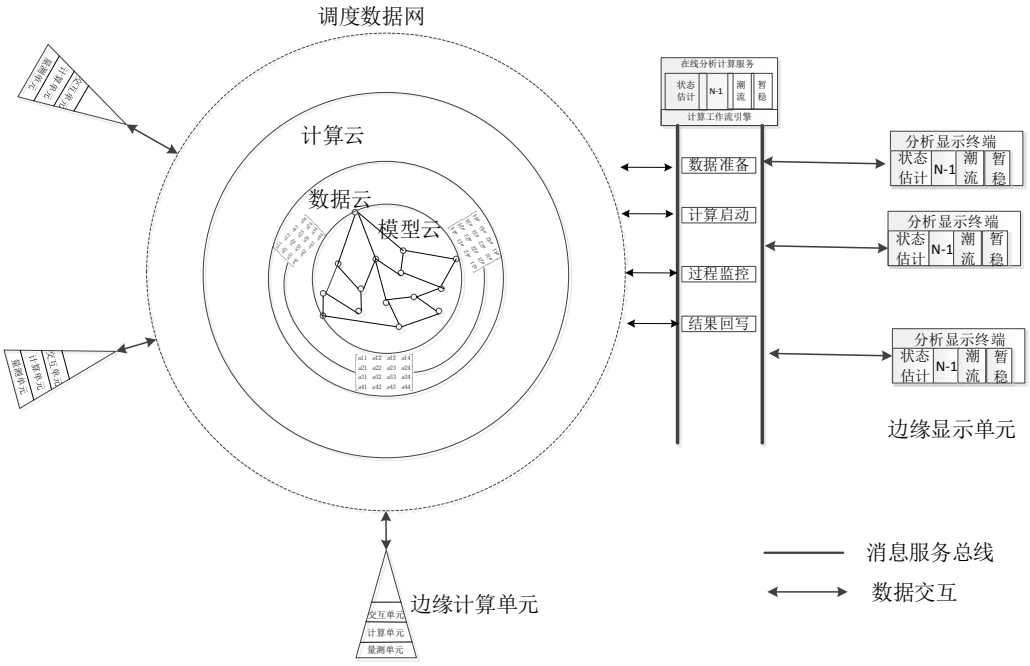


图 2-2 云边协同计算架构

其中：

1）调度云实体

调度云实体主要包括各类调度基础设施——即各类实际物理设备和通信网络，它们是分散在各级调度中心，在调度数据网络上实现对它们的统一管理成为一个逻辑统一的基础设施服务平台，从而屏蔽了各级各地各类调度应用对调度实体层物理资源的直接访问。在此平台上构建电网模型云、量测数据云和计算云，对外提供统一在线计算服务。

2）边缘计算与显示单元

边缘计算单元在逻辑上是变电站监控系统或地区调度中心，接受调度云管理，并能通过调度数据网与其他计算单元协作完成特定应用计算，它主要包括量测单元、本地计算单元和交互单元三部分。其中，量测单元完成本地可控传感设备网络的管理和数据存储功能；本地计算单元，一方面能对管理的数据进行基本的计算获取系统运行状态信息，另一方面也能接受调度云的指令执行必要的计算；交互单元则是负责与调度云和其他单元的数据交互功能。边缘显示单元主要面向用户，提供权限登录、在线计算访问和数据显示统计功能，通过调度数据网或公网实现对在线计算服务的访问和资源获取、

3）在线计算服务引擎

在线计算服务引擎是提供在线计算服务的核心。它采用面向服务的设计理念，将在线计算应用业务打包成作业作为最上层的应用服务，由计算服务驱动引擎生成在线计算作业实例，并驱动其执行，同时管理与

消息服务总线交互的数据结构。通过与电网模型云和量测数据云进行必要的数据实时交互、计算资源与任务的统一组织与调度，进而实现分解协调式的在线计算过程。

混合调度云体系的计算特征以分布式并行为主，在对全电网模型和数据实现分布式存储和集中统一管理的基础上，建立在线分析业务功能计算工作流引擎和分解协调消息服务总线，通过模型云、数据云和计算云深度耦合的协同计算模式，实现一张电网只需一次计算，各调度机构依据管理权限的订阅机制获取各自电网的运行信息。

2.3 计算模型拼接方法

2.3.1 网络建模

电力系统电气元件集合 E 可以分为单端元件集合 S（包括负荷、发电机、并联电容器和电抗器、物理母线等）和多端元件集合 M（包括变压器、交流线路、串联无功补偿装置、直流线路、换流器、直流线路、直流滤波器、直流平波电抗器等），通过结点 N 相连。其中 $E = S \cup M$，$N = \{node_1, node_2, node_3, \cdots, node_i, \cdots, node_n\}$，$node_i$ 为连接设备的结点，n 为系统结点总数。

1）厂站母线建模。将系统内断路器/刀闸和结点的关系 R_{ND} 抽象为图 $G_j(R_{ND})$，多端元件和计算母线的关系 R_{BM} 抽象为图 $G_j(R_{BM})$，分别如式(2-1)和(2-2)所示。

$$G_j(R_{ND}) = (N_j, D_j) \tag{2-1}$$

$$G_j(R_{BM}) = (B_j, M_j) \tag{2-2}$$

式中：

j——参与分布式网络拓扑分析的调控系统编号；

i—厂站内计算母线编号

$s(t)$—为断路器/刀闸状态，根据时间 t 变化；

$D(s(t))$—某一时刻 t 的断路器/刀闸集合

N_j——系统 j 的结点集合；

D_j——系统 j 的断路器/刀闸集合；

B_j——系统 j 的计算母线集合；

M_j——系统 j 的多端元件（交直流线段、变压器、换流器等，系统联络线除外）集合。

图$G_j(R_{ND})$必然为分离图（母线拓扑分析时计算母线总数$k>1$），由 k 个闭合断路器/刀闸集合及其结点构成的连通图组成，每个连通图即为一条计算母线，记为b；若系统电气岛数大于 1，则图$G_j(R_{BM})$为分离图，若系统电气岛数为 1，则为连通图。

厂站母线分析所得计算母线总数$k>1$，可表述为：

$$G_i(R_{ND}) \subset G(R_{ND}) \wedge \bigcup_1^k G_i(R_{ND}) = G(R_{ND}) \tag{2-3}$$

$$G_i(R_{ND}) =< N_i, D_i(s(t)) > \tag{2-4}$$

其中$N_i \in N, D_i(s(t)) \in D$，且当$i \neq j$时$N_i \cap N_j = \varnothing$，$\bigcup_i N_i = N$。

2）联络线建模

调度管辖权限不同的电网通过系统间联络线相连，将参与分布式网络拓扑分析的所有调控系统的联络线记为集合H，所有联络线两端计算母线对应电气岛集合记为I'，将I'和H的连接关系$R_{I'H}$表示为图$G_j(R_{I'H})$，如式所示。

$$G_j(R_{I'H}) = (I', H) \tag{2-5}$$

通过联络线H相连的各系统电气子岛组成全局电气岛I，若存在电气子岛带电，则对应全局电气岛带电，若组成全局电气岛的所有子岛均不带电，则电气岛不带电。

3）系统建模

对共包含 n 个子系统的电网，各系统模型和全网模型的关系可表示为式:

$$N = \bigcup_{j=1}^n N_j \tag{2-6}$$

$$M = H \cup \bigcup_{j=1}^n M_j \tag{2-7}$$

$$B = \bigcup_{j=1}^n B_j \tag{2-8}$$

N——所有调控系统的结点；

M——所有调控系统的多端元件（包括变压器、交流线路、串联无功补偿装置、直流线路、换流器、直流线路、直流滤波器、直流平波电抗器等）；

B——所有调控系统的计算母线。

将参与分布式网络拓扑分析的所有调控系统的断路器/刀闸和结点的关系R_{ND}，以及多端元件和计算母线的关系R_{BM}分别表示为图$G(R_{ND})$和

$G(R_{BM})$，如式(2-9)和(2-10)所示。

$$G(R_{ND})=(N,D) \tag{2-9}$$

$$G(R_{ND})=\bigcup_{j=0}^{n}G_j(R_{ND}) \tag{2-10}$$

式中：

D——所有调控系统的断路器/刀闸集合。

由B_j的物理意义可知，当$x\neq y$时$B_x\cap B_y=\varnothing$，因此可得

$$G_j(R_{BM})=G_{BM}\left[B_j\right] \tag{2-11}$$

式中$G_{BM}\left[B_j\right]$为图$G\left(R_{BM}\right)$的导出子图。

将联络线对应计算母线集合记为$B'B^{'}$，则将图$G\left(R_{BM}\right)_{G(R_{BM})}$的$H$导出子图记为：

$$G_{BM}\left[H\right]=(B',H) \tag{2-12}$$

由$B_j\cap B'\neq\varnothing_{B_j\cap B^{'}\neq\emptyset}$可知，图$G_{BM}\left[B_j\right]_{G_{BM}[B_j]}$和$G_{BM}\left[H\right]_{G_{BM}[H]}$的并即为全网拓扑图$G\left(R_{ND}\right)_{G(R_{ND})}$，如式所示。

$$G_{BM}\left[B_j\right]\cup G_{BM}\left[H\right]=(\bigcup_{j=1}^{n}B_j,H\cup\bigcup_{j=1}^{n}M_j) \tag{2-13}$$

其中图$G_{BM}\left[H\right]$的搜索可用式（2-4）代替，即将顶点b'用其对应的i'替代。同样利用(2-13)可得到局部线路修正下的一体化网络拓扑分析模型。

4) 电气岛建模

多端元件和通过其相连计算母线组成的连通图$G_i(R_{BM})$即为电气岛$island_i$，记电气岛集合为w元集I，w为电气岛个数。系统网络分析所得电气岛总数$w\geq1$，可表述为：

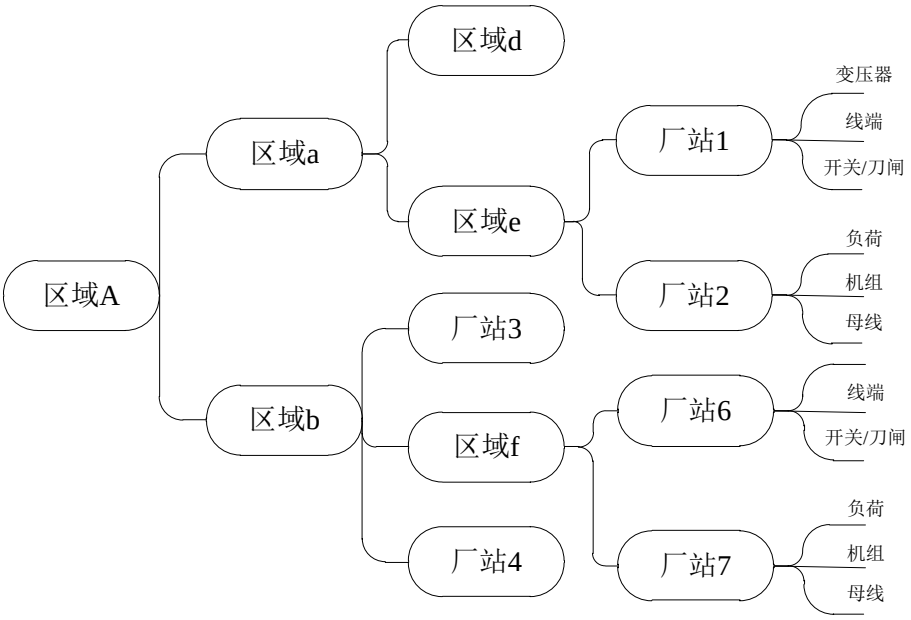
$$\begin{aligned}&G_i\left(R_{BM}\right)\subseteq G\left(R_{BM}\right)\wedge\bigcup_{1}^{w}G_i\left(R_{BM}\right)=G\left(R_{BM}\right)\\&G_i\left(R_{BM}\right)=<B_i,M_i>,B_i\in B,M_i\in M\end{aligned} \tag{2-14}$$

且当$i\neq j$时$B_i\cap B_j=\varnothing$，$\bigcup_i B_i=B$。

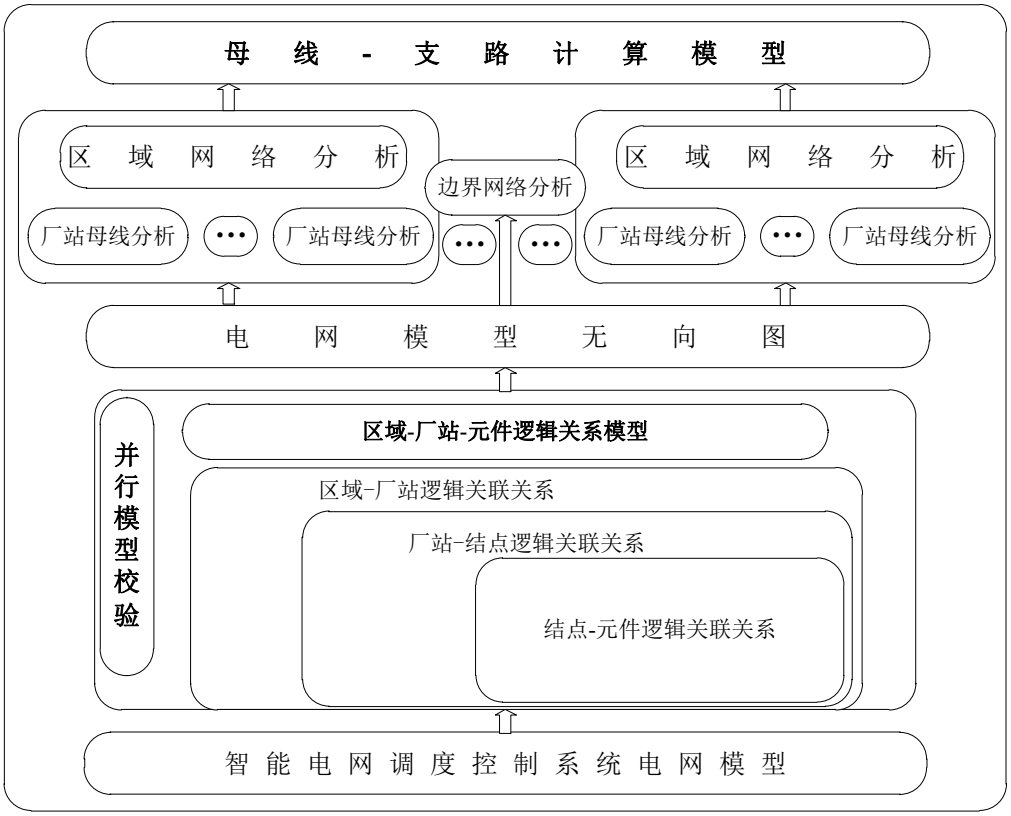
电气岛是否带电判据为：若电气岛$island_i$中$\exists<b_j,s_z>\wedge\exists<b_y,s_x>$，且$s_z$和$s_x$分别为投运状态的机组和负荷，则电气岛$island_i$带电即活岛，否则电气岛不带电即死岛。

2.3.2 分布式并行拓扑分析

分布式并行网络拓扑分析总体框架如图 2-3 所示：



(a) “区域-厂站-元件”关系图



（b）计算模型拼接

图 2-3 分布式并行网络拓扑分析流程

其中，电网模型校验的目的是通过模型数据预处理保证区域-厂站-元件逻辑关系的正确性；厂站母线分析根据开关/刀闸开合状态形成计算母线，结合边界联络线连接拓扑状态分析进行区域网络分析，最终由结点物理模型形成特定时间断面下的统一母线-支路计算模型。具体步骤如下：

Step1 调度子系统获取本地电网物理关系模型，形成“区域-厂站-元件”逻辑关联关系，实现电网模型数据按区域、厂站分块，同时根据该逻辑关系搜索区域联络线，并用无向图的抽象数据结构表示电网逻辑关系模型。分厂站、分对象对电网模型进行并行校验，生成模型对象数组下标关系索引；

Step2 各子网系统执行本地拓扑分析。包括厂站母线分析和本地系统网络分析，具体步骤如下：

Step2.1 读取断路器/刀闸状态，从子系统主线程中派生出并行厂站母线分析线程，对子网络厂站内结点-断路器/刀闸进行并行拓扑搜索，见式（2-1）和（2-2）；

Step2.2 派生分析线程对计算母线进行两级编号，分别赋予厂站内计算母线号和系统内计算母线号 见式（2-3）；

Step2.3 所有派生线程分析结束后，执行拓扑搜索得到子系统网络模型（见式(2-5)和(2-7)），并统一分配计算母线编号；

Step2.4 对子网内计算母线和多段元件继续进行拓扑搜索，生成子网内电气岛(见式(2-8))，并判定电气岛带电状态；

Step3 待所有派生线程结束后，回到主线程，开始进行边界协调。对联络线支路联接的计算母线进行拓扑分析(见式(2-4)和(2-6))，形成区域子岛，同时形成全局电气岛编号和系统内电气岛号的对应关系表。利用拓扑搜索形成由闭合联络线连接的区域子岛，形成全网电气岛（见式(2-13)），并判断电气岛带电状态。

Step4 接收遥信变化状态信息，当遥信变为集中在某子网或数量较少时，进行局部拓扑修正（见式（2-11）和(2-12)）。

Step5 根据在线分析应用计算请求，生成特定断面时刻下的统一节点支路计算模型，并发送给上层在线分析应用。

2.3.3 基于计算模型拼接的广域分布式计算

既考虑到物理模型拼接的困难，又尽量减少对网络带宽的消耗，基于计算模型拼接的广域分布式计算方法采用母线支路计算模型拼接获得全网模型，继而在任务发起端所在局域网内计算机群进行分布式并行计算，其实现机制如图 2-4 所示：

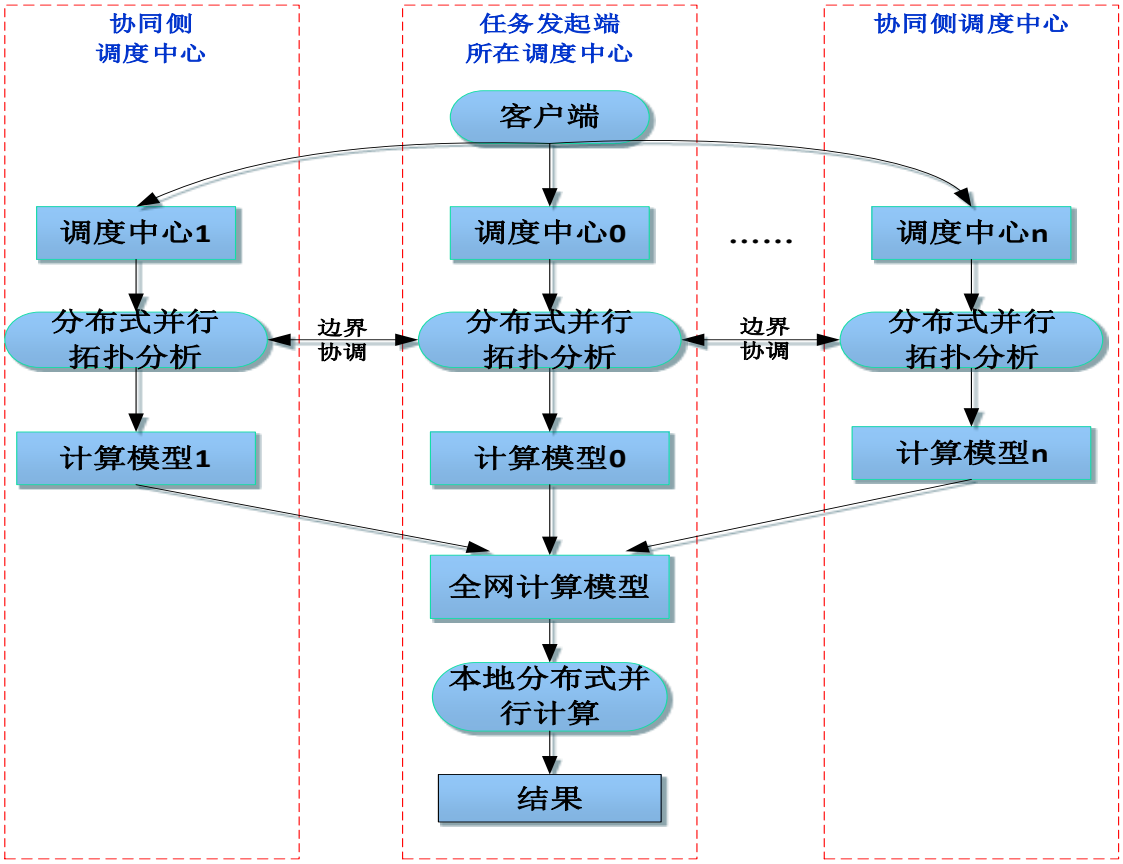


图 2-1 基于计算模型拼接的广域分布式计算

执行过程如下：

（1）客户端发起任务请求，处于对等位置的各调度中心根据本地存储的电网模型，进行本地电网模型的拓扑分析，为提高计算速度，采用集群内的分布式并行计算方式；

（2）边界拓扑分析利用拓扑搜索功能，分析由闭合联络线连接的区域子岛，形成全网电气岛。

（3）各调度中心形成各自的计算模型，即节点-支路模型，然后将各子计算模型传送至任务发起所在调度中心，形成全网计算模型；

（4）基于全网计算模型，在本地采用集群内的分布式并行计算方式执行相应任务，最终将计算结果返回给客户端。

该方法跳过物理模型拼接过程，而是在内存中实现计算模型的拼接，大大减少了人工参与的工作量，且保证了电网模型的实时性和安全性。计算过程中，在不损失计算精度的前提下，仅在边界拓扑分析时存在少量数据的广域交换，减少了网络带宽的消耗。

2.4 服务模式

2.4.1 模型服务

通常情况，电网模型可分为物理模型和计算模型。物理模型是调度所有分析计算、智能告警及自动控制应用的公共模型基础，因此，物理模型提取服务是模型中心的基础服务，面向全部调度业务。另外，在线分析各功能模块以网络拓扑分析后的计算模型为基础，模型中心可集成网络拓扑分析功能，提供计算模型提取服务，面向大电网在线分析业务。

（1）物理模型提取服务

适应于广域在线分布式分析计算模式的全网模型采用分布式存储和备份方案，物理位置对用户透明，用户或应用功能提取物理模型时，将模型提取指令和相关控制参数发送给模型中心，模型中心按照要求向用户或应用程序返回相应模型。控制参数主要包括模型范围、模型时间、模型返回方式（包括返回分布式实时数据库、返回 CIM/E 文件）等。物理模型提取流程如图 2-5 所示。

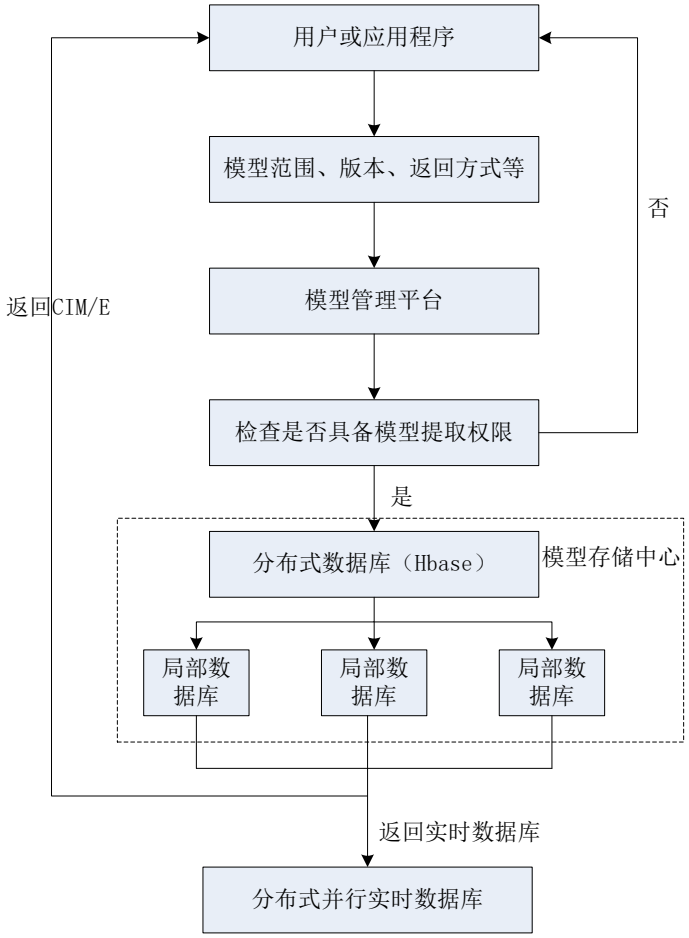


图 2-5 物理模型提取流程

（2）计算模型提取服务

状态估计是智能电网调度控制系统的一个基础应用，为自动控制和分析计算软件提供基础运行方式数据。实时网络拓扑分析结合状态估计网络拓扑辨识功能，向在线分析应用提供一个真实、可靠的计算模型。因此，模型中心可集成大电网分布式拓扑分析和大电网分布式状态估计功能，向大电网在线分析提供丰富、完善的模型服务。

全网状态估计采用大电网广域分布式计算模式，将各调度中心基于调度管辖范围内的分布式状态估计有机整合，实现全网一体化状态估计，国调和国调分中心不单独进行集中式全网状态估计。由于充分利用各级调度的计算资源，全网一体化状态估计计算任务有效分解，可缩短全网状态估计执行周期，提高在线分析应用基态运行方式数据和计算模型的时效性。

在线分析其他软件根据计算任务需求，获取相应范围内的物理模型或计算模型，以及与之对应的状态估计数据，采用合理计算规模，提高分析计算效率。如省电力公司计划检修某 220kV 非区域联络线，利用调度员潮流计算停电潮流转移及分布情况、分析电网安全，用户只需提取省电力公司调度范围内的计算模型和状态估计数据即可满足潮流计算需要。

与物理模型提取服务类似，计算模型提取服务支持用户选择计算模型范围、模型时间和模型返回方式等指令参数。其中计算模型返回方式包括返回分布式实时数据库和返回全数据（QS）文件两种方式。如图 2-6 所示。

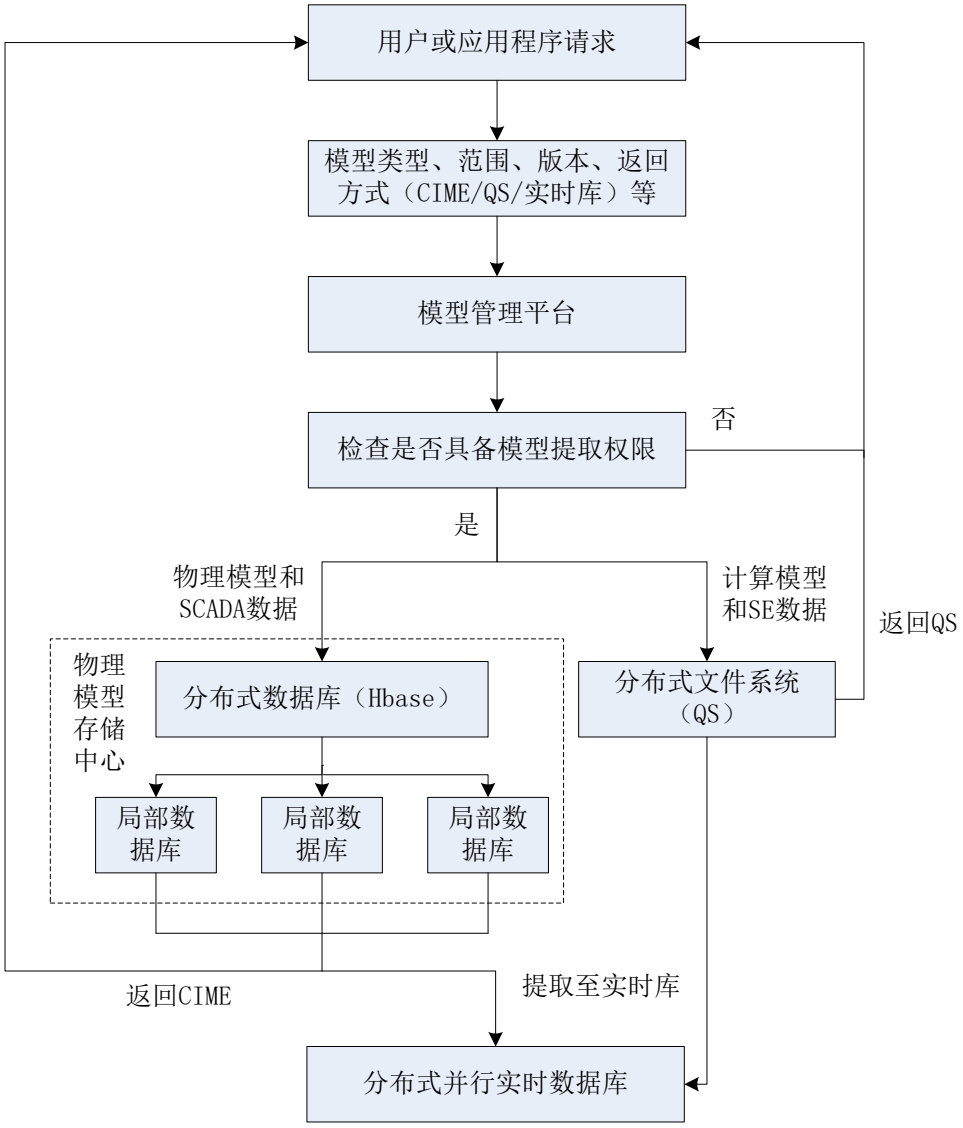


图 2-6 计算模型提取流程

2.4.2 数据服务

按数据来源来分，数据中心提供的数据类型包括来自 SCADA 的电网实时遥测遥信数据和来自状态估计的计算结果数据；按数据时效性来分，数据中心提供的数据类型包括实时数据和历史数据。因此，数据中心至少提供四种数据服务：SCADA 实时数据服务、实时状态估计数据服务、SCADA 历史数据提取服务、历史状态估计数据提取服务，其中历史数据提取服务与历史模型提取服务结合使用。

（1）电网实时遥测遥信数据服务

电网实时遥测遥信数据采用分布式数据进行存储，主要用于调度监视和控制，对不同调度机构设置不同的数据浏览权限与维护权限，满足全网调度监视与控制业务需求。同时，面向大电网状态估计、智能告警等应用，提供分布式实时数据库访问接口 API，满足应用程序对分布式实

时数据库访问需求。

（2）实时状态估计数据服务

大电网分布式状态估计计算结果采用分布式实时数据库按就近原则进行存储。与实时遥测遥信数据服务类似，大电网实时状态估计面向不同调度机构提供不同数据浏览权限和维护权限，面向大电网在线分析软件如调度员潮流、灵敏度分析等应用，提供分布式实时数据库访问接口API，面向在线安全稳定分析、自动电压控制等应用，提供 QS 文件等多种形式的实时状态估计结果提取服务。

（3）SCADA 历史数据提取服务

电网实时数据采用基于 Hbase 的分布式数据库系统进行历史备份，并提供历史数据提取接口 API，支持用户或应用程序将历史数据提取至分布式实时数据库，也支持提取至文件的方式。由于历史数据通常与历史模型匹配使用，因此可在历史数据提取的同时匹配提取历史物理模型，扩展 CIM/E 物理模型描述文件，增加实时数据定义属性，满足历史数据和历史模型的匹配提取和交互需求。

（4）历史状态估计数据提取服务

状态估计历史数据大电网在线分析应用研究模式的数据基础。与SCADA 历史数据不同，状态估计历史数据通常与匹配版本的历史模型同时提取才具有可用性。各调度中心利用局部接口先提取历史版本电网模型，调用 CASE 恢复接口将历史 CASE 恢复至局部实时数据库，在全网范围内实现历史 CASE 提取。也可以直接获取相应计算范围内 QS 文件，直接恢复至实时数据库即可。

2.4.3 基于计算模型拼接的分布式调度员潮流软件服务

基于计算模型拼接的广域分布式调度员潮流软件计算程序设计可分为两大部分：大电网广域计算模型拼接和潮流计算。

P-Q 分解法是从改进和简化的牛顿法潮流程序的基础上提出来的，它的基本思想是：把节点功率表示为电压向量的极坐标形式，以有功功率误差作为修正电压向量角度的依据，以无功功率作为修正电压幅值的依据，把有功功率和无功功率迭代分开进行。

潮流方程的残差形式可以表示为：

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij}) \tag{2-15}$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}) \tag{2-16}$$

P-Q 分解潮流计算修正方程一般可以简写为：

$$\Delta P / U = -B' U \Delta\delta \tag{2-17}$$

$$\Delta Q / U = -B'' \Delta U \tag{2-18}$$

P-Q 分解法潮流的计算步骤为：

[1]形成矩阵 B'并分解为第 1 因子表；形成矩阵 B"并分解为第 2 因子表；

[2]电压初始化：θ = θ_0，V = V_0；

[3]用电压θ和 V，计算有功残差ΔP；

[4]测试$|\Delta P|$和$|\Delta Q|$是否足够小，满足转出口，否则转[5]；

[5]用第 1 因子表解相角修正量$|\Delta\theta|$，进行一步相角修正，转[3']；

[3']用电压θ和 V 按(4)式计算无功动差$|\Delta Q|$；

[4']测试$|\Delta Q|$和$|\Delta P|$是否足够小，满足转出口，否则转[5']；

[5']用第 2 因子表解电压修正量$|\Delta V|$，进行一步电压修正，转[3]。

式（2-17）和式（2-18）可以表示为 $Bx = b$。根据全网拓扑分析结果，按节点分裂法可将修正方程系数矩阵变换成

$$\begin{bmatrix} B_{11} & & & & B_{1t} \\ & B_{22} & & & B_{2t} \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & B_{kk} & B_{kt} \\ B_{t1} & B_{t2} & \cdots & B_{tk} & B_{tt} \end{bmatrix} \tag{2-19}$$

修正方程 $Bx = b$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} B_{11} & & & & B_{1t} \\ & B_{22} & & & B_{2t} \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & B_{kk} & B_{kt} \\ B_{t1} & B_{t2} & \cdots & B_{tk} & B_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \\ b_t \end{bmatrix} \tag{2-20}$$

式中 B_{11}，...， B_{kk} 是子系统的系数矩阵；B_t 是协调矩阵，x_k 表示电压和相角修正量。

式(2-20)中第 i 个系统的修正量 x_i 可以用下式求出：

$$B_{ii} x_i = b_i - B_{it} x_t \quad \text{i=1，2，…，k} \tag{2-21}$$

而协调块矩阵所对应的方程组为

$$\sum_{i=1}^{k} B_{ti} x_i + B_{tt} x_t = b_t \tag{2-22}$$

消去式(2-)中第 1~k 个子系统所对应的网络，只保留分裂点 t 相对应的部分，得到协调系统方程组为

$$\tilde{B}_{tt}\, x_t = \tilde{b}_t \tag{2-23}$$

式中：
$$\begin{cases} \tilde{B}_{tt} = B_{tt} - \sum_{i=1}^{k} B_{ti} B_{ii}^{-1} B_{it} \\ \tilde{b}_t = b_t - \sum_{i=1}^{k} B_{ti} B_{ii}^{-1} b_i \end{cases}$$

用式(2-23)求得分裂节点电压和相角修正量 b_t，各个子网络的节点电压和相角修正量可用式(2-21)求得。由于各子系统被分裂点隔开，所以消去某一系统节点时不会对其他子系统产生影响，只会对边界点的系数矩阵产生影响。

大电网在线分析潮流计算程序按功能划分可以分为以下四大模块：（1）数据读取。获取电网模型及电网运行方式。（2）电网拓扑分析。根据电网结线连接关系和断路器/刀闸的分/合状态，形成状态估计计算中使用的母线-支路计算模型。（3）潮流计算。利用潮流分解协调算法进行分布式并行潮流计算。（4）潮流计算结果输出。存储并展示潮流计算结果。构造如下广域多级分布式并行计算流程：

1）调控中心用户发起全网潮流计算请求，调度云潮流计算服务根据各调控中心电网模型和数据的调度和维护范围进行分解协调计算任务分割，并将分解协调计算子系统的区域或厂站信息发送给各个调控中心的潮流计算服务，由各潮流计算服务负责各子系统的迭代计算。任务发起调控中心负责协调层和所属子系统的计算；

2）各调控中心潮流计算服务接收到计算请求后，向作业管理服务进行服务注册。首先读取所分配子系统的电网模型和电网运行方式，然后进行全网分布式并行网络拓扑分析，确定各子系统计算节点和各系统边界计算节点，完成节点分类排序。分布式并行拓扑分析程序见图 2-3；

3）根据全网分布式并行拓扑分析结果进行潮流分布式并行分解协调计算。根据拓扑分析结果，形成各子系统系数矩阵和协调矩阵，潮流分解协调计算过程如图 2-7 描述。第一步，各个子系统初始化。设置节点类型，给定电压和相角初值，并根据节点排序得到各子系统的系数矩阵 B 的各部分 B_{ii}、B_{it}、B_{tt}、B_{ti}。第二步，根据给定初值，按式（2-15）和式（2-16）求有功无功残差，进一步求得 b_i，b_t。第三步，根据式（2-23）求得 x_t，将 x_t 下发给各个子系统。第四步，子系统接收协调层下发 x_t，按式（2-20）求解 x_i，对电压和相角进行修正后，重新求得 b_i，b_t 值，判断子系统是否收敛。将 b_i，b_t 上传到协调层。第五步，判断是否全局收敛，

收敛则结束迭代，不收敛则返回第三步。该方法由于在计算过程中的通信较为频率，需要调度云提供可靠且高速的通信网络；

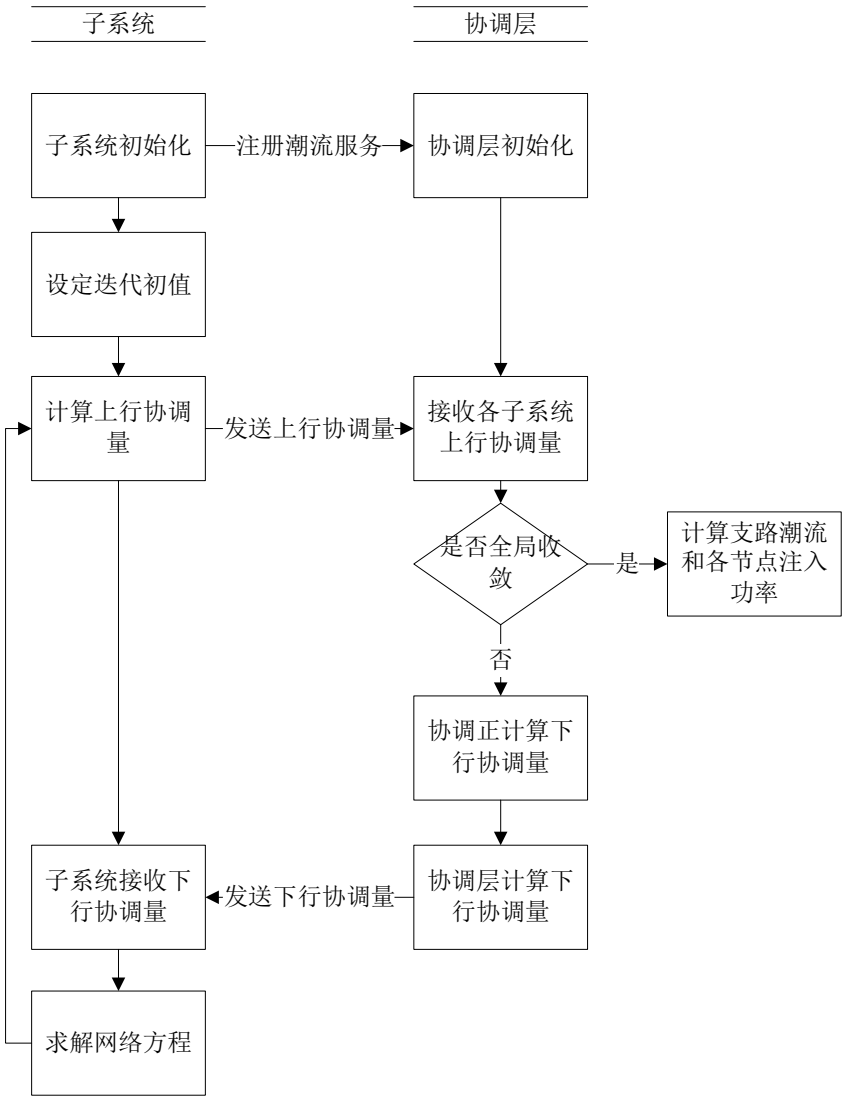


图 2-7 潮流分解协调计算流程图

4）将求得的潮流结果进行保存，用户通过桌面云服务，可方便调阅全网潮流计算结果。

该潮流计算服务方案采用广域分布式并行计算模式，利用多级调度一体化协同的在线分析分布式计算辅助服务，完成大电网全网潮流分析计算。与传统潮流计算方法相比，保证了电网边界潮流计算的准确性，同时分布式计算技术和并行计算技术的应用在一定程度上的确加快了计算速度。

2.5 算例验证

2.5.1 并行拓扑分析服务

在单机多线程运行环境执行并行拓扑分析服务。软硬件测试环境分别如表 2-1、表 2-2 所示。选用电网规模如下：厂站 6978 个，物理母线 20485 条，线路 13387 条，机组 4653 个，负荷 20086 个，变压器 9030 个，并联电容器电抗器 8647 个，串联无功补偿器 124 个，直流换流器 82 个，直流线路 36 条，断路器/刀闸共 268589 个，结点总数 268728 个，网络拓扑分析后得到计算母线总数为 64730 条。采用本文所提并行拓扑分析方法和其它方法的比较见表 2-3，并行计算性能测试如图 2-8 所示。

表 2-1 软件测试环境

序号	软件名称	软件版本
1	Linux 操作系统	凝思 4.2.32
2	商用数据库管理	达梦 6.0
3	智能电网调度控制系统基础平台	智能电网调度控制系统基础平台 V3.0

表 2-2 硬件测试环境

序号	名称	规格型号
1	服务器	ThinkServer RD650
2	CPU	2*E5-2680(2*12 核)
3	内存	16GB*4
4	硬盘	3*500GB SAS

表 2-3 20 次计算平均耗时比较

方法	拓扑分析耗时(s)
文[49]方法 12 子网	0.175478
本文方法单线桯	0.189547
本文方法 12 线桯	0.029006

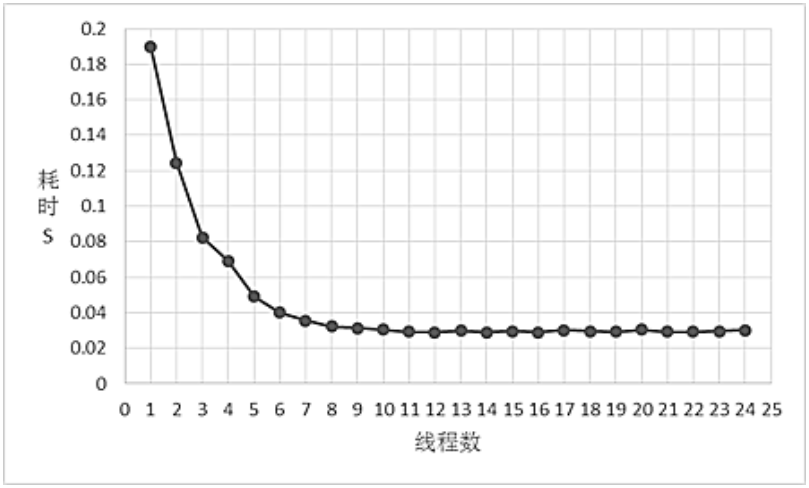


图 2-8 计算耗时和并行进程数关系图

将本文并行网络拓扑分析方法和文献[49]方法进行比较。本方法在计算总耗时上明显优于文献[49]所述方法。根据电网模型对象的二元关系，实现了电网关系模型的快速遍历和检索，通过减少进程间的模型数据交互，缩短了网络拓扑分析计算耗时，提升了并行网络拓扑分析方法的实用性。通过对程序进行性能测试，得到其最大加速比为 6.53。

2.5.2 基于分布式拓扑分析的统一潮流计算服务

进一步测试数据交互对分布式拓扑分析的影响。将 section A 中的真实电网模型分成两部分，系统一为除区域电网模型以外的电网模型数据，系统二是某区域电网模型数据，系统一电网规模大于系统二。系统一和二分别启动潮流计算和数据交互服务程序。

测试算例一：系统一作为潮流计算主进程，系统二执行潮流协同计算进程，通过数据交互服务与系统一进行协同潮流计算。

测试算例二：系统二作为潮流计算主进程，系统一执行潮流协同计算进程，通过数据交互服务与系统二进行协同潮流计算。

分别启动 5 次计算，计算平均耗时测试结果如表 2-4 所示。

表 2-4 基于分布式拓扑分析的潮流计算服务

程序				计算耗时（秒）	备注
串行拓扑分析程序				2.397699	参考文献[49]
并行拓扑分析程序				0.042937	单机四线程并行
各阶段耗时	分布式拓扑分析	一体化模型校验		0.682389	系统一和二
		区域拓扑分析程序	进程一	0.035778	系统一区域拓扑分析
			进程二	0.009313	系统二区域拓扑分析
		生成节点支路计算模型	进程一	0.048326	系统一计算模型
			进程二	0.019085	系统二计算模型
		数据传输总耗时	进程一	1.25921	系统一为协调侧
			进程二	2.35921	系统二为协调侧
		一体化拓扑分析		0.002735	生成全网计算模型
	分布式拓扑分析总耗时		进程一	1.88221	包括全网一体化模型校验、分布式拓扑、数据交互等
			进程二	2.94994	
	分区潮流计算	进程一		2.46474	系统一潮流计算
		进程二		2.55033	系统二潮流计算
统一潮流计算		进程一		4.53368	系统一为协调侧
		进程二		5.27549	系统二为协调侧

系统一作为协调侧时，分布式拓扑分析数据交互总量为 25.1133kB，节点支路计算模型数据交互总量为 11.4166MB；系统二作为协调侧时，分布式拓扑分析数据交互总量为 40.0156kB，节点支路计算模型数据交互总量为 23.331MB。采用分布式并行拓扑分析的统一潮流计算时间在 5 秒左右（其中系统 1 作为主进程，系统 2 作为协同进程模式的计算时间为 4.5 秒，其中系统 2 作为主进程，系统 1 作为协同进程模式的计算时间为 5.3 秒），能够满足电网稳态运行分析计算所需的时间要求。

2.6 小结

云边协同的计算模式是能源互联网调度运行基本形态，统一潮流计

算服务是调度员实时获取电网稳态运行信息的基础服务。基于图分析理论，本文构建了母线拓扑、厂站拓扑、联络线和电气岛模型，基于“区域-厂站-元件”映射关系分析，提出了并行和分布式拓扑分析和计算模型拼接方法，并根据该模型设计并实现了分布式并行网络拓扑分析模块，真实物理电网算例验证了本文方法的高效性，能够满足统一潮流计算服务的时间要求。

第三章 多维能源数据质量评估与计算方法研究

3.1 引言

进入新世纪以来，快速发展的风、光、水等可再生新能源正逐步降低人类对化石能源的依赖程度。世界范围内，欧盟、美国和中国等国家相继提出到 2050 年实现可再生新能源在能源供给结构中占比要达到100%、80%和 50%~70%的激进目标[50]。互联网以多种通信连接模式为依托，采用层次化设计结构屏蔽了底层繁复的组网协议，它为人们获取和利用数据信息提供了极大便捷，改变以往沟通和信息交流手段的同时，也在重塑很多传统产业的生产经营模式[51]。这些技术成就都有助于能源行业实现本世纪中叶的结构调整目标。将以大数据、人工智能为代表的互联网信息技术与可再生新能源发电技术相结合，作为能源互联网的重要组成部分，一方面能够实现能源清洁低碳的目标，另一方面提高了能源利用和公平交易的效率，成为构建未来智慧能源系统的必然途径[52-54]。

在生产运营、设备运维、用电与交易等不同业务流程中产生的各类数据，为新能源安全运行与交易分析发挥着基础支撑作用，因此开展数据质量分析控制很有必要。国内外学者在数据质量分析领域开展了相关研究，并取得了一些成果。一些学者对坏数据分类方法展开研究，将面向气象预测、用电负荷等特定应用场景的数据映射为常见的标准类型[55-57]。基于 Relief 和快速 mRMR 方法的高效预处理模型，结合 MapReduce 计算框架进行分布式并行的大数据质量分析处理[58-59]。 通过建立各种基本模型，将采集数据作为同精度观测值进行平差，通过平差或一般抽样原理方法，对数据质量进行评价和数据纠正，也是数据质量控制的常用手段。不同于火力发电、水力发电等以往传统发电模式，风、光等可再生新能源发电具有间歇性和波动性，它们与天气的相关性也比较大。提高新能源的消纳能力更依赖于先进的功率预测技术，这需要更准确、更全面、更精细的历史数据分析支撑，对数据质量的要求也更高。采用定性和定量相结合的数据质量评估指标体系，发现潜在的数据质量问题，能够进一步提高新能源安全运行与交易的公正性。

本章首先总结数据质量评估涉及的相关技术，然后从数据完整性、准确性、一致性和时效性等方面，构建层次分析定量评价指标和计算修复方法，应用历史负荷时序数据质量评价验证方法的可行性；最后提出一种面向电网络潮流数据的高效排序方法，提高数据处理性能。

3.2 相关技术

3.3.1 数据清洗与预处理

数据清洗是通过检测发现和定位“脏数据”，并对这些数据进行修补或移除以提升数据质量的过程。数据清洗主要关注缺失、不正确、逻辑错误、相似重复记录等“脏数据”的检测和消除。通过定义统一的数据格式对数据进行合并、重组、消除等操作，将“脏数据”有效转化成高质量的干净数据，提升数据质量。数据清洗分为 3 类：属性错误清洗、不完整数据清洗以及相似重复记录的清洗。

(1)属性错误清洗

数据库中很多数据违反最初定义的完整性约束,存在大量不一致的、有冲突的数据和噪声数据,我们应该识别出这些错误数据,然后进行错误清洗。其中属性错误检测有基于定量的方法和基于定性的方法。 定量的误差检测一般在离群点检测的基础上采用统计方法来识别异常行为和误差，离群点检测是找出与其他观察结果偏离太多的点，Aggarwal 将关于离群点检测方法又分为 6 种类型:极值分析、聚类模型、基于距离的模型、基于密度的模型、概率模型、信息理论模型等。定性的误差检测一般依赖于描述性方法指定一个合法的数据实例的模式或约束,因此确定违反这些模式或者约束的就是错误数据。

属性错误清洗包括噪声数据以及不一致的数据清洗。噪声数据的清洗也叫光滑噪声技术,主要方法有分箱以及回归等方法:分箱方法是通过周围邻近的值来光滑有序的数据值但是只是局部光滑,回归方法是使用回归函数拟合数据来光滑噪声; 不一致数据的清洗在某些情况下可以参照其他材料使用人工进行修改,可以借助知识工程工具来找到违反限制的数据,例如:如果知道数据的函数依赖关系,通过函数关系修改属性值。但是大部分的不一致情况都需要进行数据变换,即定义一系列的变换纠正数据,也有很多商业工具提供数据变换的功能,例如数据迁移工具和 ETL 工具等,但是这些功能都是有限的。 在实际应用中,数据缺失是一种不可避免的现象。有很多情况下会造成数据值的缺失,例如填写某些表格时需要填写配偶信息,那没有结婚的人就无法填写此字段,或者在业务处理的稍后步骤提供值,字段也可能缺失。处理缺失值目前有以下几种方法。

1）忽略元组:一般情况下,当此元组缺少多个属性值时常采用此方法,否则该方法不是很有效。当忽略了此条元组之后,元组内剩下的有值的属性也不能被采用,这些数据可能是有用的;

2）人工填写缺失值:这种方法最大的缺点就是需要大量的时间和人力,数据清理技术需要做到最少的人工干预,并且在数据集很大、缺失很多属性值时,这种方法行不通;

3）全局变量填充缺失值:使用同一个常量来填充属性的缺失值.这种方法虽然使用起来较为简单,但是有时不可靠.例如,用统一的常量“NULL”来填写缺失值,在后续的数据挖掘中,可能会认为它们形成了一个有趣的概念;

4）中心度量填充缺失值:使用属性的中心度量来填充缺失值.中心度量是指数据分布的“中间”值,例如均值或者中位数,数据对称分布使用均值、倾斜分布使用中位数;

5）使用最可能的值填充:相当于数值预测的概念.回归分析是数值预测最常用的统计学方法,此外也可以使用贝叶斯形式化方法的基于推理的工具或决策树归纳确定缺失值。

3.3.2 数据同步和冲突消解

根据数据流方向的数据同步方式可划分为四种：一是由源数据主动向目标数提发起同步上传，通过同步服务器完成目标数据的同步响应并同步下载；二是由目标数据主动向源数据发起同步上传，通过同步服务器完成源数据的同步响应并同步下载；三是由源数据和目标数据定时并同时发起同步上传，通过同步服务器完成同步响应并同步下载返回给两端，这种方式要求源数据和目标数据配置定时器；四是由同步服务器发起同步提醒或者请求，然后两端通过同步服务器完成同步数据交换，这种方式对源数据要求较高，源数据必须时刻保持监听地址和监听端口。

数据值冲突在数据集成系统中是非常容易出现的,因为源数据库对每个数据都会有自己的组织描述形式,在系统运行中数据维护情况也不尽相同,这些都会造成数据集成后出现数据值的冲突。很多数据值冲突的解决方法都是基于 SQL 查询的,这种方式利用聚集函数对每个属性单独处理,但是适用范围受到限制,只支持使用 SQL 的关系型数据库,而基于对象的解决方法则不受具体底层数据库的限制。如果针对对象设计解决策略,那么解决策略的大小要根据对象多少设计,处理过程比较麻烦。因此最有效的办法是单独处理冲突对象的每个属性,首先把属性分割成多个属性

组,然后对每个属性组中的属性值单独进行冲突解决,产生一个唯一的值,最后再把解决的属性值组合成对象。

冲突消解按照解决方法的不同,把它们分为五类:

1) 命名冲突

对于这类冲突,解决方法依赖于元数据表中的表映射信息表和属性映射信息表。通过配置两个数据库中表名和属性名的对应关系的方式解决命名冲突,系统在提取和加载数据的时候利用对应关系就能够按照本地的名称进行正确操作。

2) 类型冲突、格式冲突、单位冲突

这三类冲突是数据冲突中最常见的,这三类冲突的解决要用到数据映射、属性信息表和冲突解决函数。发送端使用映射工具把提取的数据按照自己的格式编成 XML,接收端按照自己的属性名提取数据,此时数据的格式是没有类型的,可以先以 String 类型提取,接着需要把 String 强制转换成属性信息表中的类型,通过比较数据的格式和单位判断是否存在这两类冲突,接着调用函数库中的相应解决函数把临时数据转换成最终的格式,例如 Id:varchar → Id:Integer 的转换函数是 toInteger(String),这种类型转换过程中可能存在异常的现象应在转换函数中加以处理,最后把数据存入对象中。

3) 结构冲突

结构冲突可以依靠映射表解决,例如一个数据表对应两个数据表的情况 Students → Student 和 Students → Department,系统在加载 Students 时只需按照映射表从 Student 和 Department 中提取与自己相关的属性即可,但是当 Student 和 Department 有某种依赖关系时,有可能造成数据加载混乱,所以需要查询外键表确定它们之间的依赖关系,从被依赖的表 Department 开始加载,然后在表 Student 对应的对象中设置关联信息。

4) 主键冲突

对于主键冲突,本文将采用简单的对象确认技术,通过对属性集合中除主键以外的某些属性进行分组查询,并对查询结果进行分析,如果存在包含多个对象的分组则表示产生了主键冲突,每个分组只有一个对象时表示不存在主键冲突,这时正常操作即可。主键不同于其它属性,它是对象的唯一标识,通常都有必要的格式限制,例如学生的学号、公民的身份证号码等,如果对它们进行冲突的自动解决很可能会出现严重错误,造成与真实对象表示内容的不一致,因此对于这类冲突需要通知使用人员解决,使用人员从冲突集中选择最终的主键,然后删除其它对象,同时把与删除对象相关联的对象属性设置为未删除对象的值。

5) 属性值冲突

属性值冲突是指同一个现实对象在数据库中有多种不同的表示形式。本文通过使用键的方式来判断数据是否产生属性值冲突,这里所说的键不是指单一的主键,而是能够确定对象唯一性的一个或多个属性,例如上面提到的学生的学号、公民的身份证号码。冲突检测过程与主键冲突检测类似,只是这里的分组查询依据是键,如果存在包含多个对象的分组则说明存在属性值冲突,此时就可以使用上面章节中的数据值冲突解决方法处理,把得到一致的结果保存到数据库中。

3.3.3 数据安全与融合集成

为了防御外来攻击，保证数据的完整性、可靠性和隐私性，数据安全管理工具必不可少。通过相关业务与安全管理的结合，共同建立完善大数据中心数据治理质量平台。为降低冗余，减少冲突、保护隐私和节省数据传输流量，数据集成是非常重要的一环。通过数据集成，不同来源的数据得以统一、标准化存储，这为后续的高效存储和传输以及大数据分析提供了条件。数据集成实现过程中要解决的关键问题主要包括数据不一致、全局完整、系统安全、局部自治等几个方面。

数据不一致性是数据集成要解决的基本问题,在层次上分为模式异构、语义异构和数据值冲突。模式异构是指数据源所依赖的操作系统、数据模式、数据库系统之间的结构不同导致的数据冲突。数据存储模式分为关系模式和非关系模式,以前人们普遍采用的是关系模式,例如Oracle、MySQL、SQL Server、DB2，但是随着近年来 XML 技术的广泛使用,非关系模式的存储方式以其灵活的数据组织结构越来越得到人们的重视。

语义异构是指数据在不同的数据源中具有不同的表示方式。参与集成的数据源是由不同人员设计完成的,由于他们在数据建模时对每个数据概念都有自己独特的理解,构建的数据结构就会有不同的表示方式,例如有时表示同一概念的数据在不同的数据源有不同的名称,同一概念和名称的数据有不同的格式,更为复杂的是数据在一个数据源以一个表的形式存在,而在另一个数据源则是以两个表甚至几个表的形式存在。数据值冲突是指不同数据源在描述具有相同概念的对象时存在不同的数据值。数据值冲突又分为主键冲突、属性冲突和关联属性冲突。

数据库的完整性是指数据的正确性和相容性,是为了防止数据库中存在不符合语义的数据,既不正确的数据。完整性约束包括实体完整性、

参照完整性和用户自定义完整性。为了满足系统对数据的限制,数据集成系统要保证源数据的完整性。

典型数据集成方法包括：数据仓库法、联邦数据库法和中间件法。

（1）数据仓库法

数据仓库是面向主题的、用于数据集中存储管理的、相对稳定的数据集合,通常用来支持企业中的决策制定。数据仓库是在源数据库之外建立的一个中心数据库,数据集成系统存放一个反应所有源数据库和数据仓库结构对应关系的数据模式视图,数据集成时把所有源数据库中数据的副本按照视图中的映射规则转换成数据仓库的数据模式,并全部装载到数据仓库中,数据仓库代替源数据库负责全部数据的管理,并向上层提供统一的数据访问和服务接口。当用户进行数据操作时,不再访问源数据库,所有请求都是对数据仓库中的数据进行的。数据仓库中的数据整合会涉及到一系列的数据过滤、抽取、转换和存储过程。

数据仓库中的数据整合通常是在数据集成的开始阶段完成的,当收到数据请求时不再需要数据的整合处理,因此能够为应用层提供快速的数据访问服务,同时数据仓库还可以提供数据的决策支持。但是数据的集中存放会使用大量的存储空间,维护视图成本也较高,最大的问题是不能提供实时变化的数据。这种方式适合数据不经常更新和数据实时性要求不高的情况。

（2）联邦数据库法

采用数据库联邦法的数据集成系统是由参与联邦的所有独立的数据库系统共同组成的。它不需要增加数据副本,只是在需要共享数据的源数据库中添加用来相互访问关联数据的接口,它独立于源数据库,不会影响原先数据库的数据访问,完成的功能只是某些数据的共享。为了实现数据的共享,需要建立源数据库之间彼此对应的数据映射模式。当参与数据整合的数据库较少时,联邦数据库法能快速的实现集成,但是当数据库较多时,数据库的数据映射模式就会呈指数增长,维护工作将会变得非常复杂。

（3）中间件法

中间件法也叫 Mediator/Wrapper 法,是在数据层和应用层之间的一个独立的服务程序。使用这种方法集成的源数据没有实现真正的集中存储,数据依然保存在源数据库中,数据集成系统只提供一个虚拟的集成视图（即全局模式）和对该集成视图的查询处理机制。中间件有两个重要组成部分：中间件（Medaitors）和包装器（Wrappers）。中间件用于处理用户数据请求,当系统收到上层的数据请求后,会使用数据抽取工具将请求转换成源数据库能够处理的局部请求,得到数据结果后,使用数据清

理工具按照集成视图中的规则对数据进行清理,并解决数据之间存在的冲突,把最终干净的数据进行封装,返回给上层请求。包装器用于分别与中间件和源数据库交互,执行局部请求,把底层数据对象转换成统一的数据模型,将结果返回给中间件。

因为中间件法采用虚拟的数据集成方式,不存放多余的数据信息副本,每次数据访问都是从源数据库中获取数据,因此能够适应源数据的随时变化,使得每次得到的数据都是最新的,很好的保证了数据的实时性。此外还可以对用户权限加以控制,为不同用户提供不同的集成视图。但是经常访问源数据库也造成执行查询要很长时间完成,对于数据不经常变动的情况下,这种数据查询效率偏低。

3.3 数据质量分析与评估方法

3.3.1 评估框架

面向大规模分布式新能源运营的数据质量分析框架如图 3-1 所示。根据地区资源禀赋特点和能源输送通道建设情况，将散布在区域内风电场、光伏电站等新能源子站系统运行过程中产生的数据和文件，实时同步上上传到新能源云平台上，保证数据的可靠传输、存储和全局共享。新能源数据质量控制包括数据源分析、数据预处理、数据质量评估和数据质量分析四部分内容。

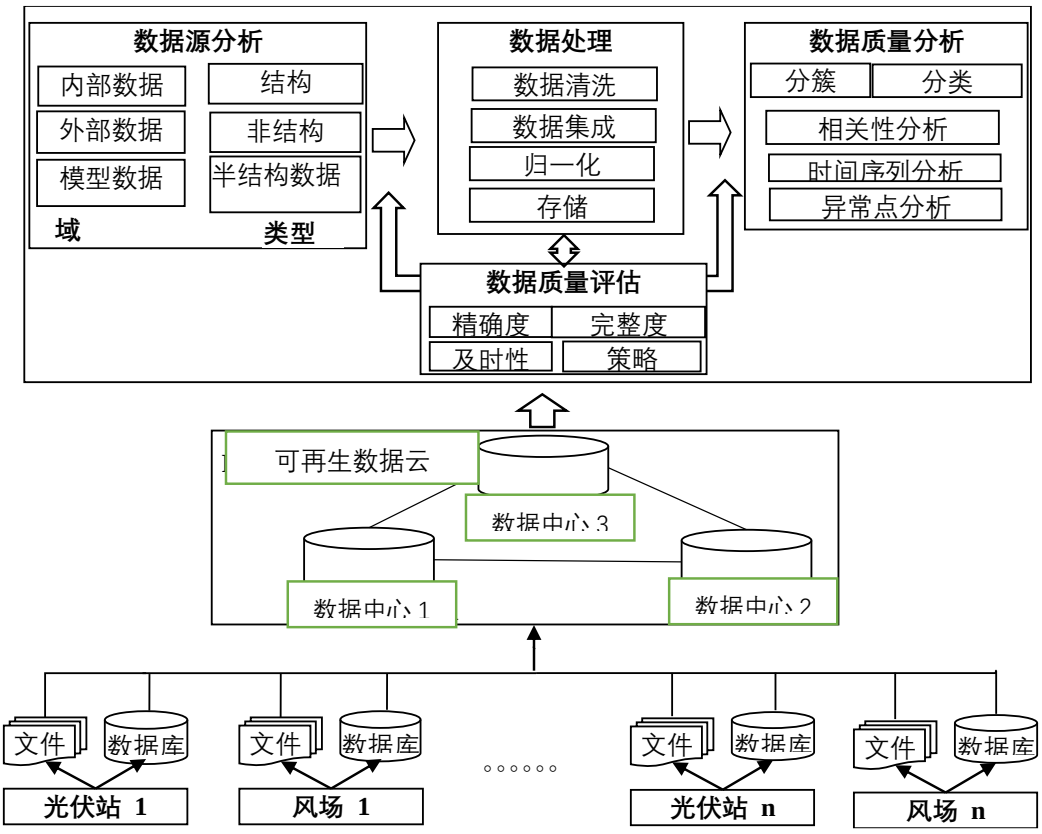


图 3-1. 数据质量分析架构

1）数据源分析

主要是对新能源场站产生的数据源进行分类标识，包括域分析和数据类型分析两部分。其中，域分析部分包括内部数据、外部数据和模型数据三类，内部数据是电站生产运行数据，为调度机构生产决策提供支撑，并接受上级调度机构的权限管理；外部数据是与生产运行密切相关气象环境类数据，为调度计划安排提供高精度天气数据；模型数据包括场站模型和设备模型两类，为站级和区域级在线分析评估应用提供准确参数。数据类型分析包括结构化数据分析、非结构化数据分析和半结构化数据分析，根据数据类型采取不同读取模式获取相应数据，形成数据质量分析实例库。

2）数据预处理

对产生的周期类型数据和事件类型数据，以及设备模型维护数据进行维护修正，它包括数据清洗、数据集成、归一化处理和存储管理等过程。为后续进行新能源运行和交易上层应用分析提供及时准确的数据。

3）数据质量评估

根据数据完整性、准确性和一致性标准特点，基于不同维度为新能源数据建立评价指标，它包括事前评估和事后评估两个过程。事前评估

是对数据修正前的数据质量情况进行的评估，事后评估是对数据修正后进行评估。

4）数据质量分析

包括分类分析和聚类分析两类，涉及关联分析、时间序列分析和孤立点分析等数据挖掘方法。用以发现新能源运行和交易过程中产生的异常数据和不合理数据，为后续针对数据的修复提供分析依据。

3.3.2 数据类型分析

针对新能源运行与交易场景，主要涉及静态模型和动态运行两类数据。其中：

1）模型参数数据

它是指新能源厂站的物理基础信息，主要包括设备参数、地理位置、交易配置等三类数据。其中设备参数包括光伏组件、风电机组组件、逆变器、蓄电池等模型参数数据，地理位置数据包括场站名、位置定位、所属区域、装机容量、站-线-变关系、所属发电集团、并网电压等级、消纳方式、统调/非统调方式等数据；交易记录包括中长期、日前发电计划、交易模式、交易类型、交易方式和考核评价等数据。

2）状态实例数据

它是指新能源场站运行和交易过程中产生的动态运行监控数据，主要涉及时间序列数据。具体包括；风速、光照强度、环境温度、湿度、风力、日照小时数等外部环境序列数据，齿轮转速、组件温度、油温、油压、输出功率、输出电压、输出电流等运行状态序列数据，动作指令、报警编码、投/切等控制状态数据，以及紧急和故障状态下的录波数据，它们都属于内部生产类序列数据；市场交易序列数据包括节点电价、交易电量、交易价格、交易时间、信用评估、以及与新能源相关的设备价格、厂商股价、期货、期权等数据。

3.3.3 评估方法与指标

根据层次分析法评价理论对新能源运行与交易的数据质量进行评估，整体评估体系如图 3-2 所示。

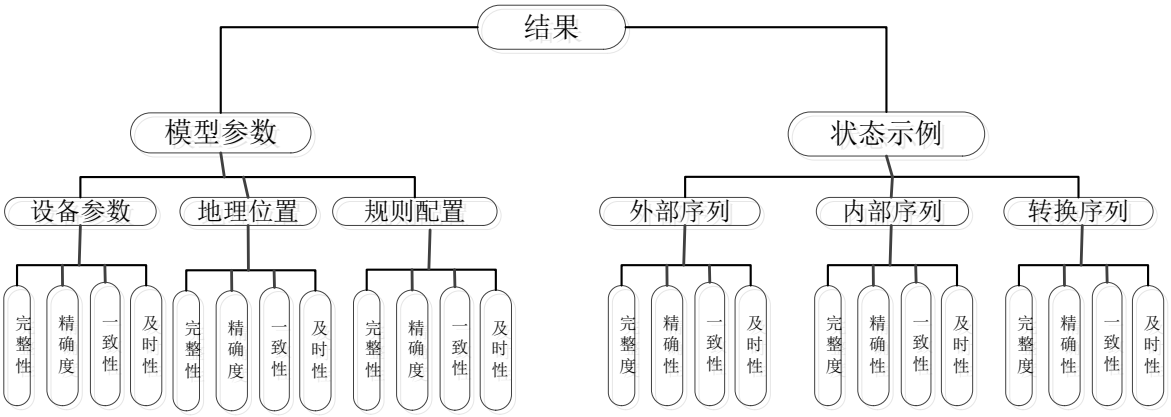


图 3-2.评估指标体系

其中，模型参数类数据和状态实例类数据，作为数据质量评价的根节点，分别侧重于新能源系统静态和动态运行情境，数据耦合关系相对独立，本文采用加权平均的方式求取。模型参数类数据包括设备参数、地理位置和计划配置三类，它们对数据完整性、准确性、一致性、时效性的要求程度不同；状态实例类数据包括外部环境类、内部生产和市场交易三类也有同样的数据质量要求。

根据以上数据类型描述，构建重要程度指标体系，如表 3-1 所示。其中完整性强调相关数据是否被充分记录，且没有遗失；准确性是指数据是否被正确记录且反映真实值；一致性指数据是否符合标准格式和结构，并在属性定义上保持连贯性；时效性指数据记录是否最新，能反映数据变化情况。

表 3-1 新能源数据评价程度分析

数据分类	数据类型	完整性	准确性	一致性	时效性
模型参数数据	设备参数	强烈重要	极端重要	明显重要	稍重要
	地理位置	强烈重要	明显重要	一般重要	一般重要
	计划配置	强烈重要	极端重要	明显重要	稍重要
状态实例数据	外部环境序列数据	明显重要	明显重要	稍重要	强烈重要
	内部生产序列数据	强烈重要	明显重要	强烈重要	明显重要
	市场交易序列数据	明显重要	强烈重要	强烈重要	强烈重要

在新能源数据云存储环境下，模型参数类数据是对新能源厂站的静态描述，它是开展新能源运行与交易分析的物理模型基础，对数据完整性和准确性的要求更高，而对一致性和时效性要求主要体现在模型的拼接

和交互标准上。状态实例类数据是对新能源厂站的动态描述，其数据来源于 CMS、SCADA 等场站级监控系统，用以描述当前新能源场站的运行与交易状态，准确性和完整性要求是数据格式的解析匹配和误差分析，受限于通信和上传频率影响，其对时效性和一致性的要求也较高。

由此针对以上两类数据及评价程度，形成判断矩阵 J_1、J_2。

$$J_1=\begin{bmatrix}1 & 1/2 & 6 & 8\\ 2 & 1 & 3 & 2\\ 1/6 & 1/3 & 1 & 1\\ 1/8 & 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

$$J_2=\begin{bmatrix}1 & 1/2 & 3 & 5\\ 2 & 1 & 3 & 3\\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/2\\ 1/5 & 1/3 & 2 & 1\end{bmatrix}$$

求取 J_1和 J_2的一致性指标 CI_1=0.08<0.1,CI_2=0.09<0.1,满足一致性检验条件。由此得到数据质量评价指标权重值，如表 3-2 所示。

表 3-2 新能源数据质量指标评价权重

数据分类	完整性 w1	准确性 w2	一致性 w3	时效性 w4
模型参数数据	0.41	0.43	0.09	0.07
状态实例数据	0.34	0.42	0.1	0.13

3.3.4 评价流程

为验证所提指标的合理性，本文基于负荷时序数据进行评价，整体评价流程如图 3-3 所示。

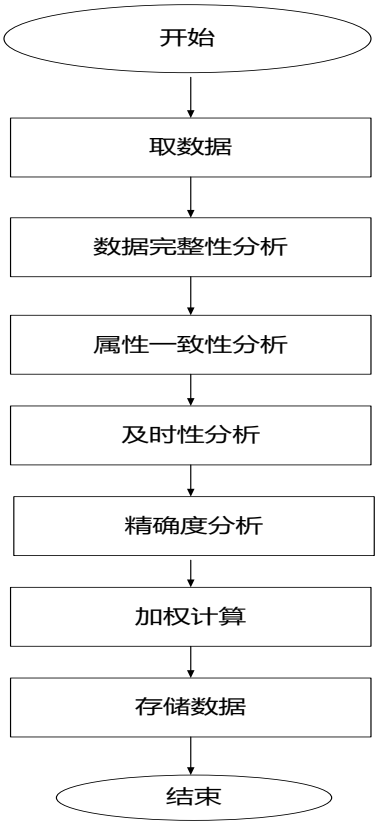


图 3-3 评价流程

其中负荷数据完整性分析是对数据缺失的记录求和，计算完整率的公式如下：

$$Q1 = 1 - \frac{\sum Lines\ of\ LossData}{\sum Lines\ of\ grossData} \tag{3-1}$$

一致性分析是对负荷表结构属性定义与负荷数据记录格式的匹配分析，计算一致率的公式如下：

$$Q2 = \frac{\sum column\ of\ load\ Data\ file}{\sum\ coloum\ of\ load\ atrributes} \tag{3-2}$$

时效性分析是对数据记录更新情况的统计分析，计算时效率的公式如下：

$$Q3 = \frac{\sum lines\ of\ updateData}{\sum\ lines\ of\ grossData} \tag{3-3}$$

准确性分析是对数据记录真实水平的统计分析，其计算过程如下：

（1）获取近期历史数据；

（2）采用 k-means 算法对样本数据进行聚类分析，计算特征曲线

（3）计算准确率；

$$Q4 = 1 - \frac{\sum out\ of\ characteristic\ curve}{\sum\ number\ of\ lineData} \tag{3-4}$$

数据质量计算评价：

$$Q = w1 * Q1 + w2 * Q2 + w3 * Q3 + w4 * Q4 \tag{3-5}$$

（4）异常值修复

得出特征曲线后利用它的平滑性来检查历史数据中的异常数据点。设 Ld 为样本曲线，Lt 为样本特征曲线。用样本曲线 Ld 中的某一点（i 点），设这一点值是 Ld（i），让它与日负荷特征曲线的同一点的值 Lt（i）做比较，再计算这两点的波动变化率 $\delta(i)$ 。

$$\delta(i) = \frac{L_d(i) - X_t(i)}{L_d(i)} \times 100\% \tag{3-6}$$

基于Q，统计历史上一定范围内的数值变化率的正常范围，记作[+D, -D]。然后对比样本数据第 i 点的变化率是否在[+D，-D]的正常范围内，以此来判定该点是否为异常数据点。发现异常数据后，要及时进行修正，可以将特征曲线的相应段平移到被检测的数据上。

设检测出曲线 Ld 的 m 点到 n 点为异常数据，其特征曲线为 Lt，修正后的曲线为 Lr，采用下面的公式对异常数据进行修正：

$$L_r(i) = L_t(i) \times [\frac{L_d(m-1)}{L_t(m-1)} + \frac{L_d(n+1)}{L_t(n+1)}] \Big/ 2 \tag{3-7}$$

其中 i=m, m+1, …, n。

此方法主要针对数据中的异常数据点进行修正，正常数据点不做任何变动，调整完后的曲线具有更好的相似性和平滑性，能为后续预测打好基础。

3.3.5 算例分析

本文选取宁夏某地区 9 月份的负荷时序数据为例进行分析评价，其记录数为 96*30，单位为 kw。如图 3-4 所示。

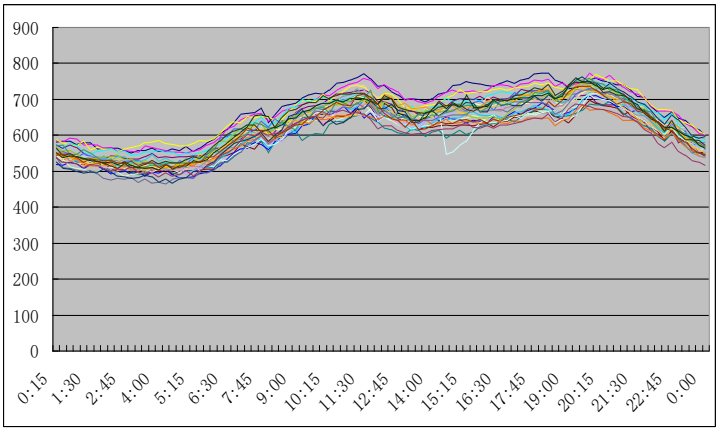


图 3-4　某地一个月负荷值曲线

负荷曲线之间除了负荷值差别比较大外，形状大体相似，其中曲线中负荷值比较大而且比较密集的代表了工作日负荷，负荷值处于下游而且比较小的曲线则代表了休息日负荷。利用 k-means 算法进行 k=2 特征曲线提取，得到两类特征曲线，如图 3-5 所示。

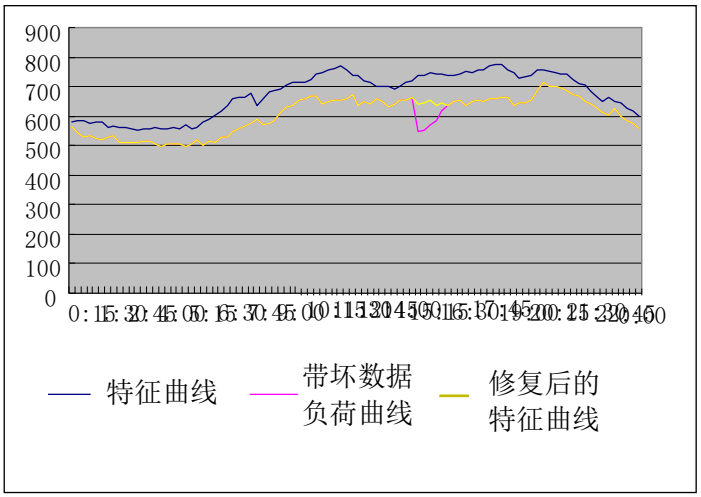


Fig.3-5 负荷特征曲线

图 3-5 提取的特征曲线包括两类，一是未修复的特征曲线，二是采用插值修复的特征曲线，并以不同颜色标识。针对负荷时序数据的质量分析，根据 3.3.4 计算流程和计算公式（3-1）到(3-5)，得到一个月统计时间尺度下负荷时序数据在有坏数据和坏数据得到修复情况下的评价结果见表 3-3。

表 3-3 负荷时序数据质量评价结果

负荷时序数据	完整性	准确性	一致性	时效性	总体评估
无坏数据	0.92	0.98	0.95	0.98	0.95
有坏数据	0.9	0.87	0.92	0.97	0.89

3.4 电网络数值求解高效排序方法

3.4.1 相关定义

定义 1 约简图 $G=(N,E)$，其中 N 代表图 G 的节点集合，E 代表图 G 的边集合。由此可得 G 的子约简图 $G(C)=(C,E(C))$，其中 $C\subseteq N$，$E(C)=\{\{u,v\}$ 属于 $E|u,v$ 分别属于 $C\}$；

定义 2 商图：

$$\begin{aligned} &Q=(P,E(P)),\\ &P=\{\{P_i\}|\bigcup_{i=1}^{q}P_i=N,P_m\cap P_n=\phi\ (m\neq n)\}\\ &E(P)=\{P_m\cap adj(P_n)\neq\phi\,|\,P_m\neq P_n\} \end{aligned} \tag{3-8}$$

其中 Q 表示商图，P 表示商图节点内的约简图节点集合，$E(P)$是商图节点的边集合。

定义 3 由约简图 G 的子集 S 得割集：

$$X(S)=\{P\subset S\,|\,G(P)在G(S)中连通,S\subset N\} \tag{3-9}$$

在 S 上对 N 的划分：

$$\bar{X}(S)=X(S)\cup\{\{x\}\,|\,x\notin S,x\in N\} \tag{3-10}$$

即包括 S 的割集和约简图 G 中不属于 S 的剩余节点。

在商图上对系数矩阵 A 进行因子分解需建立模型商图模型 $Q^k=(N^k,P^k,E^k,E(P)^k)$，其中 k 代表约简步数，$E\subseteq N\times N$，$E(P)\subseteq N\times P$，当 k=0 时，$Q^0=G^0$，$N^0=N$，$P^0=\emptyset$，$E^0=E$，$E(P)^0=\emptyset$。

由此看来约简图可以看作商图的一种特殊情况，即商图节点元素为约简图元素且数量为 1 的情况下的商图。为实现基于商图的消去运算，需规定约简图和商图的对应关系，在商图上做排序分析需建立商图模型 $Q^k=(N^k,P^k,E^k,E(P)^k)$，使其既包括商图集合也包括待约简图集合，其中 k 代

表消去步数，$E \subseteq N \times N, E(P) \subseteq N \times P$ 当 k=0 时，满足 Q^0=G，N^0=N，P^0=Ø，E^0=E，$E(P)^0$=Ø。

3.4.2 AMDML 排序方法

（1）模型方法构建

在商图 Q 上做 AMDML 排序还需建立计算模型 AMDML=(A,M,L,H)，用以表示每步消去后节点连接关系和节点长度值的变化，定义如下：

$$\begin{aligned} A_i &= \{ j \mid (i, j) \in E, i \in N \} \subseteq N \\ M_i &= \{ e \mid (i, e) \in E(P), i \in N \} \subseteq P \\ L_e &= adj_Q(e) = \{ i \mid (i, e) \in E(P), e \in P \} \subseteq N \\ adj_Q(i) &= (A_i \cup M_i) \subseteq N \cup P \end{aligned} \tag{3-11}$$

其中 A_i 表示待约简图中与节点 i 有连接关系的节点集合，M_i 表示商图中与节点 i 有连接关系的节点集合，L_e 表示与商图节点集合 e 有连接关系的待约简图中的节点集合，$adj_Q(i)$表示与商图节点 i 有连接关系的商图和待约简图的节点集合。而其中得节点长度变化关系如下：

$$\begin{aligned} H_i &= \{ H(i) \mid DFS(i, \text{root of } N), \text{记录由节点 } i \text{ 到 } root \text{的支路数} \} \\ adj_G(i) &= (A_i \cup \bigcup_{e \in M_i} L_e) \setminus \{ i \} \end{aligned} \tag{3-12}$$

其中 H_i 代表节点 i 的消去树长度值，采用深度函数 $DFS()$遍历求取 $adj_G(i)$表示在约简图中与节点 i 的有连接关系的约简图集合，由此得消去过程中的 A^k，M^k，L^k 集合的变化如下：

$$\begin{aligned} A^k &= (A^{k-1} \setminus (L_s \times L_s)) \cup (N^k \times N^k) \\ M^k &= (M^{k-1} \setminus \bigcup_{e \in M_s} e) \cup \{ s \} \\ L^k &= (L^{k-1} \setminus \bigcup_{e \in M_s} L_e) \cup L_s \end{aligned} \tag{3-13}$$

构建排序计算模型后，AMD-ML 排序方法的计算流程如图 3-6 所示。

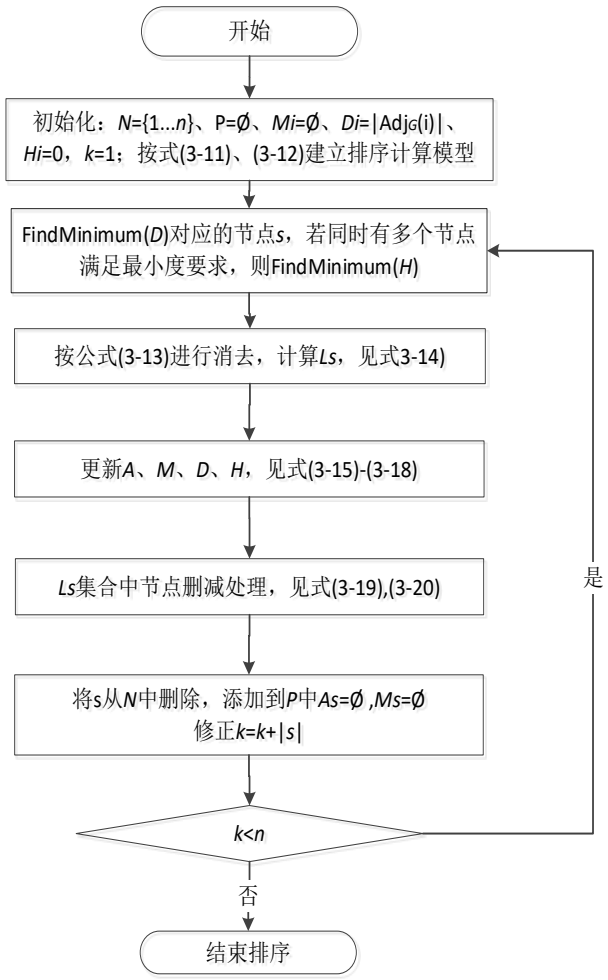


图 3-6　AMDML 排序计算方法

$$L_s = (A_s \cup \bigcup_{e \in M_s} L_e) \setminus s \tag{3-14}$$

$$A_i = (A_i \setminus L_s) \setminus s \tag{3-15}$$

$$M_i = (M_i \setminus M_s) \cup \{s\} \tag{3-16}$$

$$D_i = |A_i \setminus i| + |(\bigcup_{e \in M_i} L_e) \setminus i| \tag{3-17}$$

$$H_i = Max(H(s)+1, H(adj_G(s))) \tag{3-18}$$

其中 D，H 表示执行节点消去后的商图节点外部度值和约简图中各节点消去树长度值的修正函数。当满足最小度数的节点为多个时，依次选取长度值最小的节点作为消去节点，作为生成排序向量的选择判据。其中在对 L_s 集合做删减处理时，引入无特征关系，即若节点 i 与 j 在约简图 G 中满足无特征关系：

$$adj_G(i) \cup \{i\} = adj_G(j) \cup \{j\} \tag{3-19}$$

表示节点 i 和 j 的度数是相等且有直连关系，无特征关系的节点对集

合不影响排序效果，对 L_s 中满足无特征关系的节点对<*i*,*j*>作如下处理：

$$i=i\cup j;\ d_i=d_i-|j|;\ N=N\backslash\{j\};\ A_j=\phi,M_j=\phi \tag{3-20}$$

3.4.2 算例分析

构建符号分析阶段的预排序计算验证流程，如图 3-7 所示。

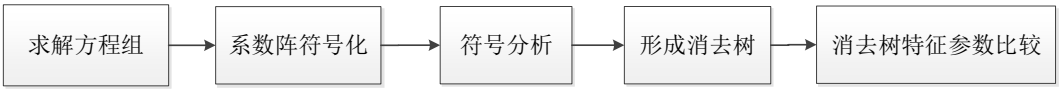


图 3-7　面向符号分析阶段的预排序计算比较

为方便测试，作以下定义：

填充度 *FR*=NonZero(因子阵)/NonZero(系数阵)；

长度 *L*=MaxLength(*Etree*(因子阵))，*Etree* 生成方法参考文献[60]；

平均长度 *AL*=Sum(Length(*Ni* in *Etree* (因子阵)))/节点数。

在机器配置 Intel Corei5 2.6GHz、4G 内存上选用 matpower 中的算例节点包括节点数名称、支路数、雅可比稀疏矩阵维数等，如表 3-4 所示。

表 3-4　算例信息

节点名称	支路数	雅可比阵维数
case300	411	530
case1354	1991	2447
case3120	3693	5991
case9241	16049	17036
case13659	20467	23225

对潮流计算中形成的不同维稀疏系数阵作符号分析，分别进行基于传统约简图的动态最小度（MD）、最小度最小长度（MD-ML）排序和基于商图的近似最小度（AMD）、近似最小度最小长度（AMD-ML）排序，计算加权消去树的填充度 F_r、长度值 *L*、平均长度值 *AL*、排序计算时间 *T*(ms)，见表 3-5。

表 3-5　基于不同排序方法的消去树属性对比

排序方法	属性值	case300	case1354	case3120	case9241	case13659
MD	*L*	54	93	160	300	279
	AL	29.3	48.7	100	183.6	181.5
	F_r	1.48	1.4	1.72	1.73	1.67
	T	0.14	1.4	3	8	10

MD-ML	L	48	73	110	234	220
	AL	30.4	44.9	80.2	166.1	149.3
	F_r	1.49	1.41	1.72	1.74	1.64
	T	0.21	1.8	4	10	13.5
AMD	L	58	83	143	286	301
	AL	31.3	48.3	85.8	197	202.6
	F_r	1.49	1.39	1.68	1.68	1.64
	T	0.1	0.9	1.3	4	5
AMDML	L	54	67	126	260	286
	AL	29.8	41.6	85.8	184.3	198.4
	F_r	1.46	1.38	1.69	1.66	1.64
	T	0.1	1	1.2	4.3	5.2

对潮流计算时形成的维数不等的稀疏系数阵作符号分析与计算，结果表明将消去树长度作为向量选择约束的 MD-ML 和 AMD-ML 排序方法都能在不显著增加因子阵填充度的情况下，进一步降低消去树长度和平均长度，就消去树长度值大小 AMD-ML 相对 AMD 降低了 10%，平均长度值则降低了 5%，最终提高了前推回代的计算速度。

基于约简图的 MD-ML 排序方法形成的消去树长度最低，这是因为在约简图上将消去树长度值作为节点选择属性时确定的是单个行/列节点，而在商图上的运算则只能确定行/列节点集。从因子阵的填充度值大小来看，基于商图的 AMD 和 AMD-ML 排序方法的填充度普遍小于基于约简图的 MD 和 MD-ML 方法，在串行计算模式下三角因子分解时间要远大于前推回代过程，相对于消去树长度和平均长度值，填充度值越小带来的计算效率提升越明显，完成以上排序方法所需时间满足 MD_ML>MD>AMD_ML> AMD。综合分析得出结论，与常用的排序方法相比，本文提出的 AMD_ML 方法在排序性能评价指标上较优。

（2）潮流计算时间比较

不失一般性和通用性，在 win7+matpower 开发环境中，对以上各算例节点形成的雅可比系数阵进行不排序(NaN)、MD-ML、AMD 和 AMDML 排序的符号分析处理，然后作完整的潮流计算，牛拉法和 P-Q 分解法的潮流计算时间分别见表 3-6 与表 3-7。

表 3-6　牛拉法潮流计算时间比较(ms)

算例	Iterations	NaN	MD-ML	AMD	AMDML
case300	5	13	30	20	12
case1354	4	56	45	31	30
case3120	6	600	127	107	100
case9241	6	7900	454	390	340
case13659	5	19820	694	430	370

表 3-7　P-Q 潮流计算时间比较(ms)

算例	Iterations	NaN	MD-ML	AMD	AMDML
case300	9	4	5	4	3
case1354	8	13	10	8	7
case3120	13	64	34	26	21
case9241	14	530	155	80	70
case13659	14	1050	237	110	92

当节点规模较小时，是否作排序预处理分析对潮流计算收敛时间的影响较小，当稀疏矩阵维数较大时（文中系数维数>5000），采用排序预处理分析能带来计算性能提升，且矩阵维数越大，性能提升越明显。与 MD-ML 排序方法相比，同样将消去树长度作为排序向量选择的约束条件，采用 AMD-ML 排序方法的非零元填充度更低，使得因子分解的效率更高，计算时间更短。

与 AMD 排序预处理符号分析的潮流计算相比，AMD-ML 排序方法能进一步减小潮流收敛时间，带来计算效率提升 10%以上，验证了所提方法的有效性和高效性。

3.5 结论

本文构建面向电力系统运行与交易的多源数据质量分析框架，对涉及的数据类型描述进行汇总归类，实现静态模型参数和动态时序数据的解耦。从数据完整性、准确性、一致性和时效性等方面开展对数据质量影响程度的分析，借鉴层次分析理论建立数据质量分析描述的定量指标和计算方法，验证了指标的合理性。通过将约简树长度属性作为约束条件引入 AMD 排序过程中，选择相同外部近似度的节点集合里长度值最小的节点进行排序构造 AMDML 排序方法，实现了在几乎不改变原有矩阵填充度值大小的前提下进一步降低了约简树长度，提高了数值求解效率。

第四章 “双高”比例下的能源互联网商业模式研究

4.1 引言

为实现国家制定的“30·60”碳中和、碳达峰决策战略，构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制化石能源总量，必须着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，进一步深化电力体制改革，从而构建出以新能源为主体的新型电力系统是必有之路。

新能源作为主力供应电量电源的能源互联网也会催生新的商业模式。以用户为中心、以信息为纽带、以数据挖掘价值驱动的互联网思维将在能源互联网经济形态中发挥核心枢纽作用[61]。文献[62]明确了政策因素、市场成熟度和技术发展应用对能源互联网商业模式推广的影响，并进一步提出了基于开放市场交易的 B2C、C2C、第三方代理等商业模式类型。储能在能源互联网运行场景中将发挥类似计算机“缓存”和“内存”机制的能量暂存作用，文献[63]将储能在“源-网-荷”互动各阶段发挥的作用统一以云储能作为研究对象，分析基于云储能的共享经济商业模式。文献[64]将商业模式画布理论引入到综合能源服务商业模式设计中，提高了商业模式设计的科学性。通过对新能源供应链进行分析建模，能在提高系统运行效率的同时获取可观收益也获得了学者的关注[65][66]。数据作为新型生产要素逐渐受到学界和产业界的重视，并在能源大数据应用场景和交易机制设计上展开了相关研究[67-69]，初步解决了能源数据如何使用及交易的方法论问题。但从系统层面考虑数据要素对高比例新能源接入的能源互联网运行价值的影响还鲜有提及。

本章首先对双高比例下的能源互联网市场运行形态进行分析，从业务达成、关键因素、运营模式和价值场景开展能源互联网商业模式应用研究。以数据为核心，从供应链视角解构新能源云要素环节，基于价值链分析理论构建新能云平台价值链。从价值主张、价值实现、用户需求等方面分析新能云价值链上各类市场主体的商业应用模式；设计基于新能云平台的各类市场主体角色间的数据因果关系，建立高比例新能源接入的能源供需经济运行系统动力学模型，验证因负荷数据需求波动存在的逆牛鞭效应，分析其应用价值。

4.2 “双高”比例下的能源互联网市场运行形态

4.2.1 政策分析

2015 年 3 月 15 日出台的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见（中发【2015】9 号》（以下简称“9 号文”）正式驱动了新一轮输配电价改革试点，引起多方利益发生变化。未来会实现输配电分开，电网只收输电费，发电端竞价上网，这对发电端提出了更高的运营水平要求。

“9 号文”确立了“管住中间，放开两边”，大力支持分布式能源发展的宗旨。竞争机制会鼓励所有的电力产业参与方，包括供电公司、工业用户、私人投资者去提升可再生能源在电力市场中的参与度，这会有效减少碳排放量和降低对化石能源的依赖。明确分布式电源采用“自发自用，余量上网，电网调节”的运营模式，积极发展微电网和智能电网，确保依法全额保障性收购可再生能源发电量，创造了新能源汽车和分布式发电未来大规模接入电网的条件。

2016 年 2 月 24 日，国家发改委、能源局、工信部印发《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》（以下简称《指导意见》）。《指导意见》指出，能源互联网是一种能源产业发展新形态，相关技术、模式及业态均处于探索发展阶段。为促进能源互联网健康有序发展，近中期将分为两个阶段推进，先期开展试点示范，后续进行推广应用，确保取得实效。按时间阶段划分：

2016-2018 年，着力推进能源互联网试点示范工作：建成一批不同类型、不同规模的试点示范项目。攻克一批重大关键技术与核心装备，能源互联网技术达到国际先进水平。初步建立能源互联网市场机制和市场体系。初步建成能源互联网技术标准体系，形成一批重点技术规范和标准。催生一批能源金融、第三方综合能源服务等新兴业态。培育一批有竞争力的新兴市场主体。探索一批可持续、可推广的发展模式。积累一批重要的改革试点经验。

2019-2025 年，着力推进能源互联网多元化、规模化发展：初步建成能源互联网产业体系，成为经济增长重要驱动力。建成较为完善的能源互联网市场机制和市场体系。形成较为完备的技术及标准体系并推动实现国际化，引领世界能源互联网发展。形成开放共享的能源互联网生态环境，能源综合效率明显改善，可再生能源比重显著提高，化石能源清洁高效利用取得积极进展，大众参与程度大幅提升，有力支撑能源生产

和消费革命。

《指导意见》要求，要积极推进 10 大重点任务，即：加强能源互联网基础设施建设，建设能源生产消费的智能化体系、多能协同综合能源网络、与能源系统协同的信息通信基础设施。营造开放共享的能源互联网生态体系，建立新型能源市场交易体系和商业运营平台，发展分布式能源、储能和电动汽车应用、智慧用能和增值服务、绿色能源灵活交易、能源大数据服务应用等新模式和新业态。推动能源互联网关键技术攻关、核心设备研发和标准体系建设，促进能源互联网技术、标准和模式的国际应用与合作。随后的一系列相关政策制定实施，见图 4-1 所示。

图 4-1 能源互联网领域相关政策梳理分析

能源互联网技术革新是商业模式实现的重要基础，而相关的政策制度则是商业模式实现的重要保障。商业模式的成功与否需要交由市场检验；同样地，一个成熟的商业模式需要在市场环境中不断实践与历练。商业模式既需要市场中各商业主体的自发创造，也需要相关政策的引导。政府部门有责任支持有潜力的商业模式的发展，鼓励各商业主体对现有商业模式进行改进与创新。

1）持续模式创新。加强对现有成功商业模式如个性化节能服务、新能源开发与投资咨询、分布式新能源一体化服务等的支持；鼓励售电商、负荷聚类商、虚拟电厂、充电桩运营商等模式创新，并鼓励其参与作为新的市场主体参与能源市场；为大数据分析、分布式储能、能量路由器等“技术密集型”商业模式提供良好的创新环境。

2）工程示范应用。鼓励各地区结合自身地方特色开展相关的试点工作。如在高新产业园区、工业园区开展综合能源的建设与运营、区域售电交易等商业模式创新试点工程；在中东部电价较高的地区开展分布式光伏、分布式储能、实时电价、互动需求响应等商业模式创新试点工程；在电动汽车普及率较高的北京、深圳等城市开展电动汽车灵活接入、充

电及其增值服务一体化运营等商业模式创新试点工程；在风、光、水等清洁能源消纳不足，存在“窝电”现象的地区开展综合能源互动交易、能源大数据分析预测等商业模式创新试点。

3）政策支持。选择现有成功的或有潜力的商业模式，加大中央和地方政府预算内资金投入力度，扶持一批具有核心竞争力与机制创新的企业；降低市场与行业准入、推进数据开放、加强能源市场监管。

4.2.2 运行形态

在国家政策鼓励、技术进步和成本不断下降的背景下，新能源在能源供需结构与能源交易中的占比越来越大，也是能源产销者发挥生产作用的重要支撑。但分布式新能源发电容量在空间分布上更加分散，其固有的间歇性和波动性会增加配电网主动消纳调度的技术难度；另一方面，用户对新能源消费成本关注和激励的不确定性所带来的交易风险，都需要完善相应地市场激励机制及配套政策和技术保障。

能源互联网在物理层面上需要实现多种能源形式的耦合与标准化交易，从而满足供热、电力、供气、供冷需求。其能量流动如图 4-1 所示。

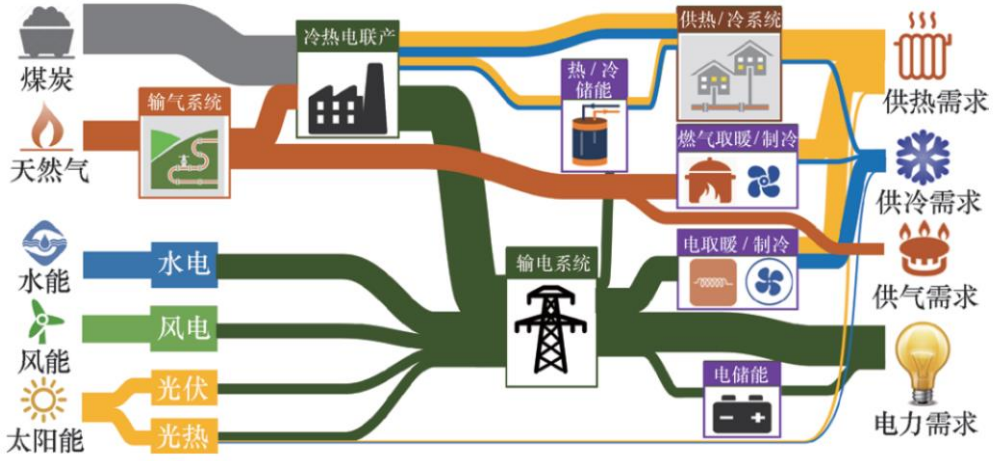


图 4-2 能源互联网能量流分析

实现风、光、热、电、气、冷等多能源品种在时间和空间维度上的互补共济，提高能源综合利用效率，是能源互联网系统的核心内容[40]。其中，涉及能源转换与存储，多能源系统在能源需求侧的统一规划、运行优化及评价等相关技术。具体来说，面向风光等间歇性可再生能源消纳需求，需进一步研究电储能系统的最优充放电方法、电采暖-热储能协同优化调度方法，以及电动汽车时空有序充电策略；针对电/气/热/冷等能源品种之间、多类型用户负荷之间动态响应特性以及能源转换、变换、转化关系，分析多时空尺度下的多能互补特性及耦合机理；计及运行可

靠性、经济性、能效提升等多目标、多阶段、多约束条件，建立多时空尺度下的源/网/荷/储协同调度模型；分析日前/日内/现货等不同时间尺度区域级电力市场下，源/网/荷/储资源的调度成本与效益；设计满足市场主体交易互动的收益模型与激励机制；综合考虑负荷/电价预测结果、市场交易信息和系统运维成本，建立综合能源系统优化调度模型，从而实现系统整体效益最优。

能源互联网在内部开展能源产销者直接交易机制设计；对内能够对用户用能行为进行监控和数据采集，从而实现需求侧管理闭环；基于长、中、短期负荷及新能源出力预测实现风、光、储集成优化，提高综合能源优化经济运行水平；对外则能在一级能源市场参与大用户直购电交易，在二级能源流通市场参与发电权交易，碳排放和绿证交易，并能参与调峰、调频、备用相关辅助服务市场交易。能源互联网市场机制包括能量市场及辅助服务市场、增值服务市场及金融性资本市场。如图 4-3 所示。

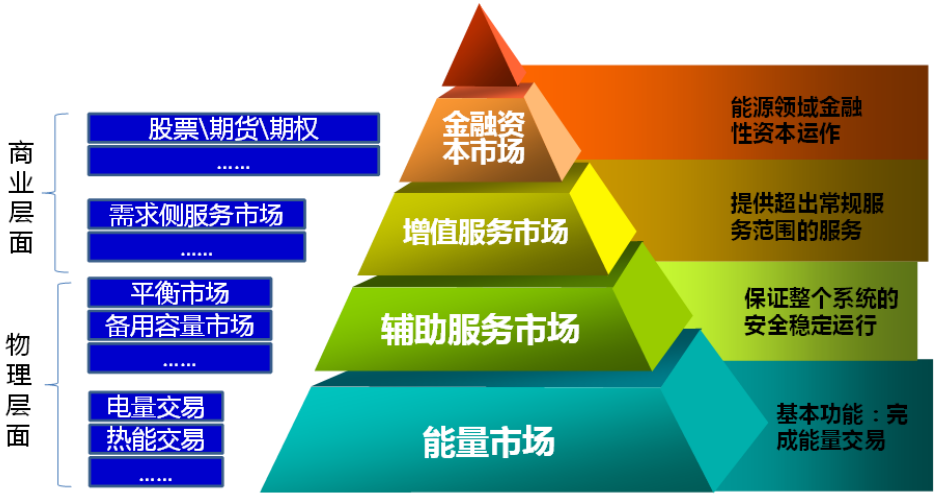


图 4-3 能源互联网市场层级

目前，电力市场化已具备能源互联网的雏形，包括实现了物理电能传输与虚拟市场交易间的等价、电能的跨区域市场交易、发电商与大用户间的双向选择等。与传统电网相比，能源互联网市场最大区别和优势在于：能源互联网允许更多、更分散的用户参与到多种能源的生产与交易之中。基于价值链管理理论，结合能源结构调整和政策实施情况，以电力为核心分析能源互联网形态和传统电网形态的区别，如表 4-1 所示。

表 4-1 基于价值链分析能源互联网与传统电网的区别

价值链	分析领域	能源互联网	传统垂直一体化电网
电能生产	技术领域	清洁替代，清洁发电	先进发电
	市场类型	中长期、短期、现货、碳排放	统购统销
	业务领域	发电权交易，直接售电，碳交易，配额	上网电量
电能传输	技术领域	大规模新能源消纳，特高压交直流运行控制，经济调度	发电计划、大电网运行控制
	市场类型	跨区、省间、省内交易，辅助服务，输电权交易	统一规划下的管制市场
	业务领域	与电网调度安全、运行和电力市场两级交易体制相关及配套的业务	大电网统一调度
电能消费	技术领域	电能替代、微网、综合能源系统、多能互补、虚拟电厂等	先进配用电
	市场类型	分布式能源交易，辅助服务、用电权交易、绿证市场等	集中管制市场
	业务领域	能效管理、售电代理、设备运维等服务	卖电营销

需要指出的是，能源互联网不是简单地对传统电网的颠覆，而是在传统电网基础上的升级换代。相对于垂直一体化、纵向集中管制的封闭思维，它在横向连接上更加开放，更关心市场化竞争理念在电力生产、传输和消费中的落实应用，以期更细化的业务分工能带来更大的行业市场价值。但能源领域重资产、高投入的自然垄断行业属性，使得在能源输送管道侧引入同质竞争的成本巨大，市场效率却很难提升。

价值创造层面上需要创造能源的现货、期货两级市场。与此同时，能源互联网时代还将衍生出除能量市场以外的其他各种市场，如碳交易、绿证、能效、配额交易等。能源互联网市场运行机制框架见下图 4-4 所示。

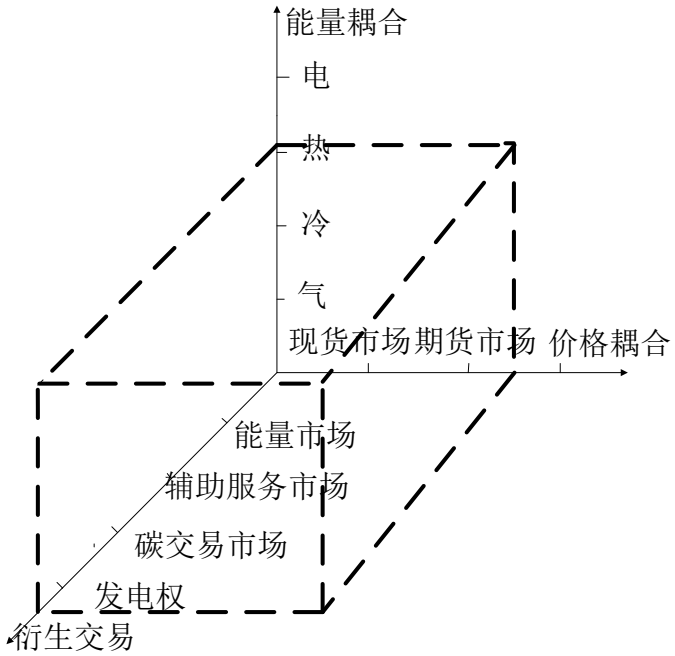


图 4-4 能源互联网市场运行机制

在构架这样一个能量耦合、价格耦合、衍生交易“三位一体”的能源互联网系统之上，能源交易将呈现出立体化、多样化、个性化的特点，在市场结构、交易主体、交易模式、交易商品、市场监管等各方面均产生重要的变化。

1）能量耦合。电、热、冷、气等都是人们日常生产生活中必需的能源，现有各种形式能源的消费与交易都是相互独立的。然而，在能源互联网时代，各种形式能源的耦合程度不断加强，如在能源生产侧，冷热电联产机组在产生电能的同时，也能产生热能和冷能；在能源消费侧，用户能够选择消费不同的能源而达到同样的用能效果如空调用电取暖和暖气直接供暖等。于是，电、热、冷、气等多种形式的能源可以展开自由的交易，甚至可以通过“J(焦耳)”来计量能源的消费，而不是单独的1kWh 电、1m^3燃气等。

2）价格耦合。能源互联网时代将还原能源的商品属性，当然也需要尽可能地实现能源真实价格的发现。所以，需要在能量市场、碳排放市场等各种市场中建立现货交易、期货交易相互支撑和耦合的两级市场体系，以增加市场透明度，提高资源配置水平，真实反映供求双方对供求关系和价格走势的预期，使能源交易变得更加自由活跃。

3）衍生交易。除了电、热、冷、气等的能量市场外，还需要建立辅助服务市场、容量市场、碳交易市场、绿币交易市场、发电权市场、售电权市场等各种其他衍生交易市场。辅助服务市场、容量市场等有利于促进能源系统的安全可靠运行；碳交易市场、绿币交易市场等有利于促进能源系统对新能源的接纳水平，降低碳排放等；发电权市场、售电权

市场等有利于促进能源市场有效竞争和增加市场活跃度。

4.3 “双高”比例下的能源互联网商业模式分析

“双高”比例下的能源互联网商业模式应用涉及业务达成、关键因素、运营模式、市场与机制支撑等方面。

4.3.1 业务达成

业务达成是能源生态系统运行的根本动力。对能量交易达成的匹配和追逐，协调了生产者和消费者的供需要求，促进了输配商和交易商的效率提升，系统在动态平衡中得以运转和完善。

在成熟开放的能量交易市场上，供应和需求信息进行快速的匹配筛选，供应商和消费者根据匹配程度进行供应量、供应质量和供应价格的修订，进而极力促进交易的达成。由于信息交换效率最高而成本较低，多次信息匹配和业务达成的结果，将促使生产者对能量供应的方式和质量进行优化，以企缩短交易时间，抢占市场份额，这就促进了生产端的优化；将促使输配者对能量输送的方式和路径进行优化和进一步建设，以企争取更多的能量流通，这就促进了输送端的优化；将促使消费者对能量使用的方式、质量和效率进行取舍、调整、优化，以企缩短匹配时间，达到用能的最佳性价比，这就促进了消费端的优化。

业务达成过程中，能量供应和需求不能快速匹配时，对供需质量的调节不是即时的，只能以标准控制，但对价格的调节是可以的。实时价格机制，一方面促进了业务的快速达成，使能量得以快速流通，减轻了调配系统的压力；另一方面通过对生产者成本和消费者成本的直接影响，调控生产习惯和消费习惯，进而对整个系统的优化起到一定作用。这也是还原能源商品属性的意义之一。

在传统的集中配送式能量交易中，虽然也有实时电价机制，但常常是消费者基于配电公司划定的波动价格进行用能调节，并不能对输配系统和生产系统起到结构层次的反馈、优化、改进等作用，反而是消费者只能通过牺牲一部分生产能力或调节自身固有的消费行为，为输配和生产系统的低效率买单。因此，传统的能源供需管理是一种被动式的管理，从系统论分析会有一定的资源浪费。

4.3.2 关键因素

影响能源互联网运营的关键因素，包括消费者需求、生产者的压力、政府的导向、业务达成的规则、行业组织的作用和能源技术的进步等。在能源互联网构建之初，政府的引导和规范作用十分关键；随着能源互

联网的发展，业务交易平台和行业组织的作用逐渐凸显；在成熟的能源互联网运营中，生产者的供应和消费者的需求成为主要的影响因素。能源技术的不断创新，推动能源降本、增效、清洁，是不受发展阶段限制的运营正向推动因素。能源互联网构建之初，新的消费习惯尚未养成，规模及业务流量有限，新模式盈利有不确定性，业务交易平台和行业组织的服务能力较弱，政府必须担当引导、规范、裁判之责任。能源互联网能否运作起来的关键因素就是体制是否适合，政策是否得当，制度是否合适，补贴是否到位，奖惩是否可行。这个时候的能量生产方和服务提供方的成本消化有待业务的成长和能源互联网的生长完善。

能源互联网发展过程中，准入、控制和补贴等制度相对稳定，消费者的新习惯渐趋养成和新需求渠道建立，生产者的多元化供给能力和市场化适应能力增强。此时，政府即开始转变主体地位、淡化核心影响，让能量生产方和服务商根据市场需求自我调节，实现利益最大化。但是系统的不成熟和相关方的不完善，投机行为、非正当竞争、隐含性欺骗、无序开发、垄断性经营等都可能出现，法律法规和政府的政策推动、行政监督及中介评估、行业标准规范、消费者联合行为等发挥引导、规范、协调等作用。这个时候的能量生产方和服务提供方，一方面可获得政府的支持，另一方面也能在非完全市场过渡机制下获取利润。

能源互联网运营成熟后，将形成互利共生的多元化从业者群体，基于能量交易达成的消费者需求和生产者供应是系统运转的根本动力，这时候生产者和消费者是关键主体双方，材料和设备供应商、输配商、业务和交易商、投资商、中介服务方等是利益相关方，行业组织和政府等监督方是市场秩序规范方。

4.3.3 运营模式

能源行业的特殊地位，决定了能源互联网运营模式是：能源主干网运营在相当长时间内由政府参与或授权主导，能源微网运营可以选择由社会资本主导。能源互联网建设初始阶段，完全自发的能源生态环境无法满足能源安全和能源自给的需求，由政府主导的能源开发依然会在相当长的时间内占据整个能源生态的主体地位，但随着新能源地位和规模的逐渐提高，将最终实现开放性、安全性并存的以新能源为主体的能源生态系统。全新的能源生态系统中，消费者和社会资本将积极参与能源生态系统建设。但无论何时，能源互联网作为国家能源安全的支撑，其核心网络应当由政府机构主导，社会各方参与运营。无数个区域能源微网通过骨干网连接而共同组成能源互联网，这些区域能源微网具备分散化、多元化、小规模、互补性等特点，其整体运营由一般社会力量进行更为合适。

能量供应与消费具有即时性，能量输送又以集中式、短距离最为经济节约，这就决定了将能量的生产、输配、服务等围绕消费者需求，打造功能标准化、模块集成化的从业方模式，是最为高效率的商业模式。能量生产方是多元的卖方群体，既有进行规模化生产的大卖家，也有进行分布式生产的分散小卖家。他们必须争取其生产的能量在质量上满足消费需求，在区域和时段范围内有充分的买家，在供需规模上匹配，在生产上有合理的利润空间，在输配上不断降低成本，按照市场规则调整其能量供给的质量、方式、规模，实现利润的最大化。能量输配方，是集中式经营的中间商，或称渠道运营商。生产者的能量产品需要根据业务交易平台上的成交指令，通过输配方运营的电力网、油气网、热力网等售卖给消费者，输配方因其对渠道的运营收取一定的“过路费”。由于输配对管网的天然依赖，其运营主体通常在一定区域范围内具有唯一性。这样的能量输配方可以是被授权的企业组织或者政府委托的公共服务主体。为防止漫天要价和僵化低效，必须制定固定的利润率并保证成本核算和运营过程的透明公开，其驱动力在利润最大化之外。

能量服务方是分散的、多元的进行咨询、评估、设计等独立服务的第三方。他们的服务在严格的准入制度和规范体系下进行，所提供的服务有很强的针对性、专业性，对利润最大化的追逐将通过提高专业水平、依靠先进技术和标准系统支撑、遵循市场规则、扩大服务范围、挖掘服务深度、提高服务效率等实现。能量消费者也是分散的、多元的买方群体，既有规模化的能耗大户，也有分布式耗能的商业、居民客户，未来还可能存在能源区域零售商等间接用户。和所有消费者一样，能量消费也不关注生产和经营过程。还原能源的商品属性，本质上是消费者对过程、价格、服务、供给、使用进行最终的评估。能量在消费交易中实现了价值。

未来能源互联网会以开放连接的姿态融入更多行业，将革新整个能源产业模式，这也是整个生态系统生机勃勃的根基。能源互联网对相关行业商业模式的变革，是保持其良好内生机制的必要条件。能源互联网的发展，将引起设备制造、能源生产、金融保险、地产建设、信息科技等相关行业的运营模式产生巨大的变革。

4.3.4 价值场景

构建“阶段-属性-价值”的三维场景，分析区域能源互联网的价值场景。其中，阶段维度包括泛在物联、信息互动和网络智能三个阶段，属性维度包括技术应用、业务类型和商业模式三个层次，价值维度包括售电、交易和生态系统三方面内容。整体构成如图 4-5 所示。

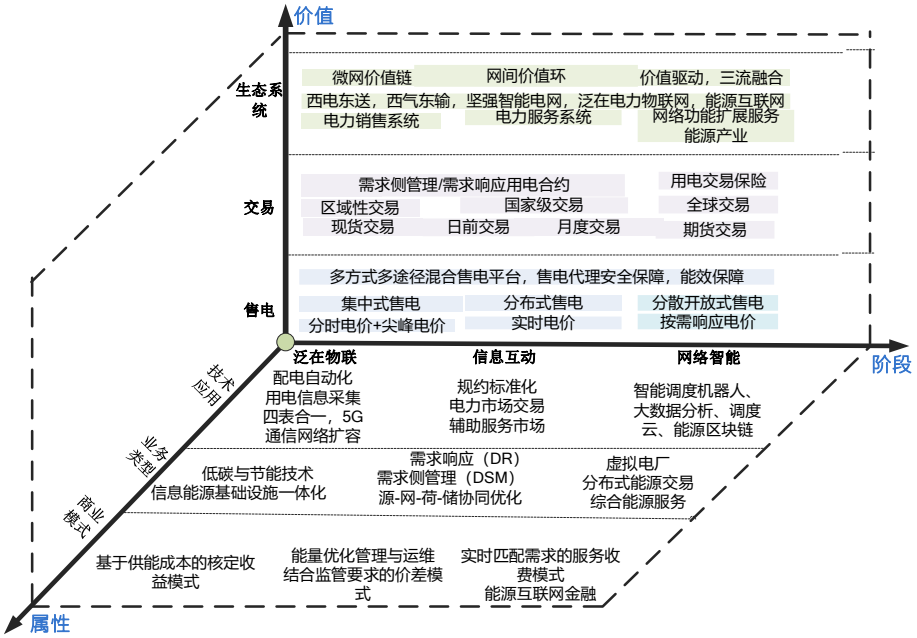


图 4-5　能源互联网阶段-属性-价值场景分析

分阶段分析区域能源互联网的价值应用场景：

（1）以泛在化、物联化连接为特征的第一阶段，解决的是物理系统运行环境数字化问题。在电网管道侧是以数字化变电站、调度自动化、用电信息采集、配电自动化、智能配变台区、输变电设备状态在线监测等数字化应用为特征。过去十多年的数字化投入使电网管道侧基本达到了泛在物联的要求，使得整个电能输送管道处于“可观测”水平，即在虚拟网络世界里实现了物理电网向逻辑电网的抽象和“数字孪生”。但在面向用户能源需求的综合能源侧，泛在物联还处于初级阶段，以园区自动化、用电侧数字化为特点构建能源信息一体化基础设施，目前还存在政策瓶颈和较大的数字化发展缺口。在价值连接阶段，区域能源互联网主要还是以集中式售电为主，采用基于供能成本的核定收益模式和基于“分时电价+尖峰电价”的电力营销系统，实现能源价值链闭环。

（2）以信息互动为特征的融合阶段，它是在第一阶段实现的前提下，解决如何利用这些数据进行高效能源管理的问题，简单来说就是能源管理的信息化、网络化、互动化。在电网管道侧，过去多轮持续性的信息化投资建设，目前基本已经实现了能源管理信息化，比如生产、营销、调度、财务、安监等部门的信息化都处于领先水平。通过新一代调度控制系统的完善建设，也打通了生产和营销信息化系统的数据标准化交互问题，实现了基于电网输送管道的源-网-荷高效协同优化。但在面向用户能源需求的综合能源系统侧的数字化水平较低，其信息互动处于非常初级的阶段，运行的大量小系统处于孤岛状态，加上电、气、热等能源供给归属不同企业，增加了管理难度。由于缺少完整的业务标准和信息模

型交互标准，增加了实现多能流协同互动的难度，甚至连最基本的多能流管理信息化也还没有实现。随着能源供给市场化和专业化水平提高，更多的能源公司在工商业园区、居住社区、乡村地区建设运营综合能源系统，这会加快推动信息互动的标准化步伐。在价值融合阶段，电力市场交易环境下的区域能源互联网除了售电以外，也能根据市场能源价格波动情况开展需求侧响应与管理、辅助服务、能源套餐、能效管理等方式实现其价值链闭环。

（3）网络智能化服务的第三阶段。在电网管道侧，作为自然垄断环节其管理相对封闭，但其网架结构清晰，网络通信相对可靠，模型数据信息标准化程度高。这个环节的智能化服务体现在，一方面基于运行数据的深度学习与智能分析为能源调度控制和交易闭环提供决策信息，最终实现调度和交易机器人的广泛替代应用，降低人工参与成本，进一步减少错误决策损失；另一方面基于开放公平的能源电力市场开展能源金融业务，完善各方参与电网管道投资建设的激励机制；在综合能源服务侧，不断降低技术准入门槛，以价格信号和服务需求串联起能源需求的点、线、面，依靠巨大的用户资源流、能量流和信息流，吸引更多的第三方参与进来，构建起供需实时互动、多能高效互补的能源生态网络平台体系，并能结合互联网金融、虚拟电厂等新的投融资方式和能源代理经济模式，不断丰富区域能源互联网价值链内涵。

4.4 基于新能源云的数据要素应用研究

4.4.1 新能源云要素分析

新能源云是围绕新能源规划设计、建设消纳、运营监测、营销交易等全生命周期业务大数据为核心的云平台管理系统。通过归集生产、运行、交易各环节的海量数据信息形成数据分析中台，从规划环节就切入滚动消纳测算；在建设及后续运营过程中，一方面提供配套电网设计、并网咨询服务，另一方面通过动态实时监测新能源运行情况，为新能源运行消纳和交易管理提供运维服务；从而实现了新能源物理接入消纳与运行控制的“数字孪生”，为高比例新能源接入的能源互联网可靠运行提供技术和管理决策支撑。基于供应链理论构建新能源云要素分析结构，如图4-6所示。

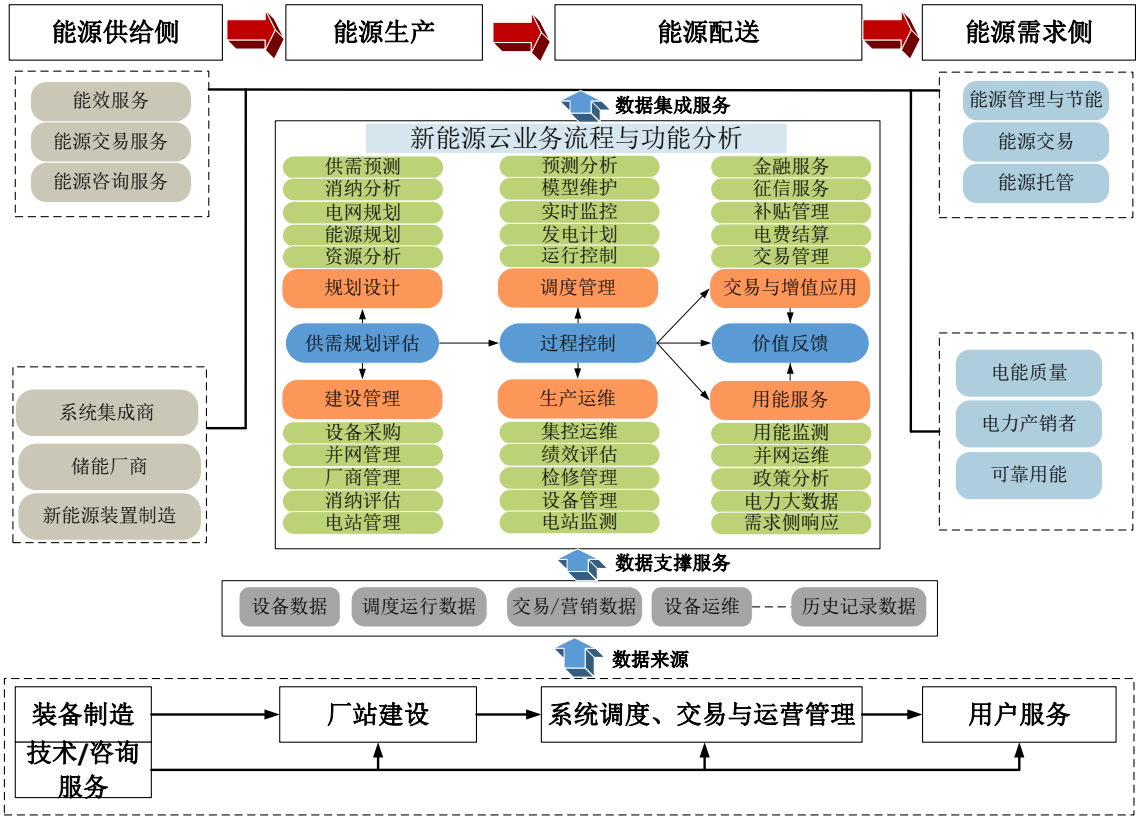


图 4-6 基于供应链视角的新能源云要素结构

高比例新能源接入的能源互联网运行形态下的市场主体除了包含新能源产业链上的各类企业，还存在以分布式微网运行的电力产销者角色，对电能的需求也因人而异。另外，交易带来的潮流时空转移也会更频繁。从能源供给侧来看，高比例新能源接入的能源互联网运行形态下的能源供给包括看得见的物理基础设施和看不见的技术咨询服务。物理设施包括与新能源相关的装备制造企业及上游原材料供应商、储能厂商和系统集成服务商等，技术咨询服务提供能源交易、能源托管、节能等各类专业化咨询服务，这都离不开新能源云数据集成服务的分析支撑业务。

能源生产和配送是保证高比例新能源接入下的能源互联网运行可靠的中心环节，也是新能云在能源供应链中发挥核心作用的平台。首先它在前期新能源规划评估发挥指导作用，对新能源厂站设计、建设管理进行全流程建模分析和数据管理，实现物理厂站的“数字孪生”；然后对能源生产和分配过程进行过程控制，包括能量的调度控制和电气设备的实时运维；最后通过能量套餐选择和能源交易机制满足用户用能需求，达到电能“生产-消费”的动态平衡，实现新能源产业链的价值反馈。

总体来看，高比例新能源接入的能源互联网运行形态与以往传统“重发轻供不管用”的能源生产消费模式完全不同，它是“以需定供”模式，更强调用户需求侧响应和管理。围绕用户能源需求安排能源生产计划，同时要保证系统运行的可靠性和高弹性，这使得数据共享的及时性和数

据服务的可达性成为了新能源供应链决策管理中需要考虑的关键要素。

4.4.2 基于数据要素的新能源云价值链分析

数据要素是指数据作为生产资料不仅能为经济社会提供数据产品或服务，还能与劳动、技术、资本等传统生产要素深度融合，提高社会生产效率，增加经济产出[70]。数据要素的价值在于减少甚至消除信息不确定性，从而降低机会成本。但数据并非天然生产要素，作为生产要素它要具备以下几个属性：一是产权属性，被加工处理形成的数据产品或服务权属关系清晰；二是功能属性，能直接或间接参与物理性生产活动，产生价值；三是交换属性，能用于交易或流通。运用哈佛大学商学院迈克尔 波特的价值链分析理论，基于数据要素构建新能云价值分析链，如图 4-7 所示。

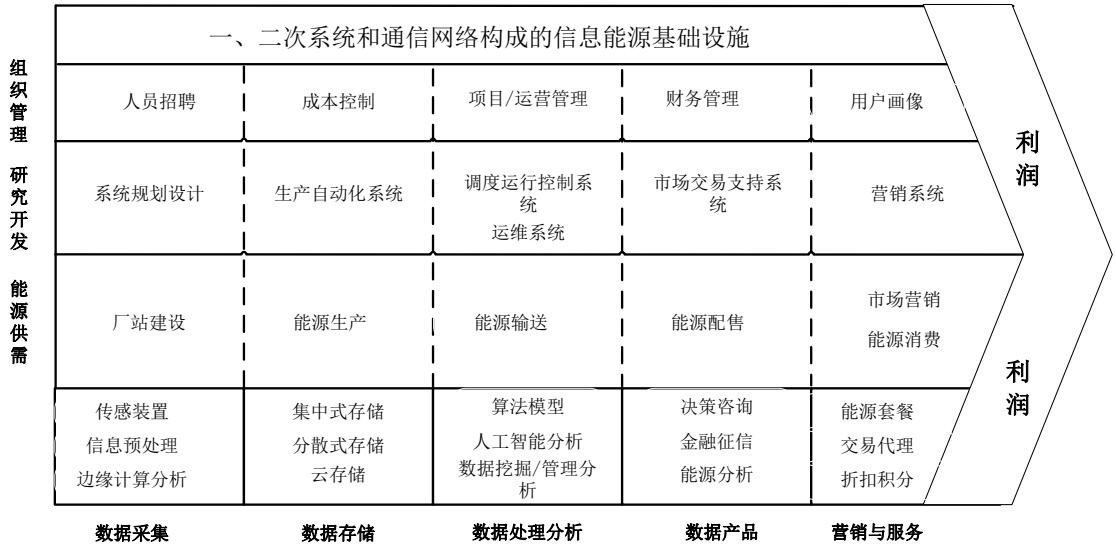


图 4-7 基于数据要素的新能源云价值链

基于数据要素分析的新能源云价值链包括基本业务、基础业务和支撑业务等三类活动。围绕厂站建设、能源生产、能源输送、能源配售和能源消费等新能源供需基础业务活动，新能源云基本业务分为数据采集、数据存储、数据处理分析、数据营销与服务等价值环节，结合新能源云的基础平台属性，为政府监管、用户和产业链上下游企业提供能源分析、决策咨询和金融投资等数据产品，基于数据产品交易支持系统实现新能源数据要素的确权和商品化。支撑业务包括研究开发和组织管理两类活动：其中研究开发活动是对新能源生产自动化系统、系统调度运行控制系统、运维系统、市场交易和营销等业务系统的信息化建设投入，它在提高生产运营效率的同时也会产生海量的业务数据，是新能源云的数据源头；组织管理包括人员、企业和用户等角色管理活动，涉及企业内部

的成本控制、运营和财务管理和外部用户画像管理，它是新能源云数据要素的价值体现。

分别从线上和线下着手，从核心能力建设、关键业务、价值主张、客户关系和成本结构等维度，基于数据要素建立面向新能源云价值链中供应商、厂站运营商、云服务平台、用户和能源产销者等不同角色的商业模式，如表 4-2 所示。

表 4-2 基于数据要素分析的新能源云商业模式

产业链上下游		核心能力建设	关键业务	数据价值主张	客户关系	成本结构
新能源供应商	线上	设备模型数据建设与维护	设备制造及检测，元器件/设备建模	高精度元器件/设备模型	元器件/设备模型参数数据	模型研发
	线下	设备运行可靠性			安装、调试、维护	原材料采购、人工成本
新能源厂站运营商	线上	厂站/模型数据建设与维护	系统集成、调度运行与控制	厂站数字地图	模型和运行状态数据共享	系统研发
	线下	发电、接入并网及可靠性运维			厂站运维托管、调度与交易	设备采购、运维成本
新能源云服务平台	线上	生态体系建设	平台能力建设与品牌推广	数据挖掘分析与高级应用	数据产品与服务	平台研发
	线下	市场与用户营销			营销、咨询服务与交易代理	运营/营销成本
新能源用户/分布式能源产销者	线上	用能信用建设	需求侧响应与管理	用能数据、用能信用数据	评价与反馈数据	时间管理
	线下	用能计划			能源消费/交易	储能、智能传感/控制装置采购、网络建设

作为新能源产业链上游，新能源供应商以提供物理设备运行可靠性和数字设备模型作为核心能力建设和关键业务，因此它在新能源云商业模式中的价值定位和主张是高精度元器件和设备的建模及维护，能够为下一级客户提供准确的模型参数数据。新能源厂站运营商要对上游设备供应商的设备系统集成，以线下发电并网及运维，线上厂站模型数据维护

为核心能力建设内容，对内保证系统运行可靠性，对外接受上级调度系统指令业务，它在新能源云商业模式中的价值主张是厂站数字地图，能为客户提供厂站级模型和实时运行状态数据。新能源云服务平台在新能源云商业模式中发挥着数据共享和价值连接的核心枢纽角色，一方面要做好自身软件平台能力和数据生态体系建设，夯实硬能力，另一方面在市场开放竞争环境下，也要加强用户营销和品牌推广建设，提高软实力。它在新能源云商业模式中的价值主张是以数据挖掘分析为基础面向各类场景应用的数据服务产品。

作为新能源产业链的终端用户，也是新能源云价值链闭环的最终环节。它也在从被动地消费者角色变成更多的“自发自用，余电上网”主动地能源产销者角色。通过开展需求侧响应与管理业务，在线上参与用能信用建设，线下做好用能计划安排，以尽可能减少高比例新能源接入下能源互联网供需形态的不确定性。因此它在新能云商业模式中的价值主张是自身的用能数据及信用数据。

4.4.3 系统动力学建模

“信息-反馈”是系统动力学研究的核心内容，依此对新能源云进行分析建模：

1）建模系统界定。本文对高比例新能源接入的电网运行作为建模对象，建立能源供给与消费的物理系统动力模型，它是新能源云商业模式价值闭环基础；然后以数据要素为纽带进行商业模式分析，涉及新能源供应商、厂站运营商、能源配售商和用户等四类角色，它们在生产运行中产生的各类数据信息统一由新能源云平台集成整合分析并对外提供数据服务产品。

2）因果关系分析。能源物理系统的因果关系需满足以下条件：

$$P_{gen} = P_{consume} \tag{4-1}$$

$$\sum P_{gen} = \sum P_{consume} + \sum P_{loss} \tag{4-2}$$

即保持电力生产与消费功率的实时平衡，又要保证发用电量满足公式(4-2)。围绕四类子系统构建数据存量、数据增量、数据共享量、数据失效量、数据失效率、数据价值转化率、数据价值分配系数、数据保留系数等变量，并建立它们与新能云平台的因果关系，如图 4-8 所示。

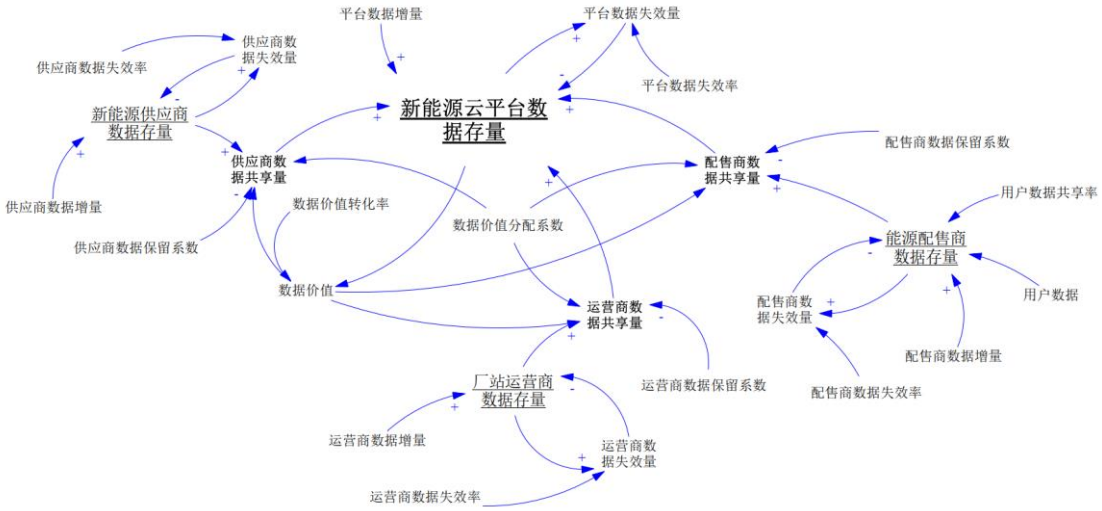


图 4-8 新能源云平台数据要素因果关系

其中，新能源供应商负责管理维护设备模型数据存量，数据更新频率较低；厂站运营商负责管理维护电能生产运营数据，数据更新频率高；配售商负责管理维护用户数据，及时响应用户需求变化。它们通过各自的数据共享机制参与新能源云平台数据价值转化和分配激励过程，实现价值闭环。

3）构建能源供需系统动力学模型，如图 4-9 所示。

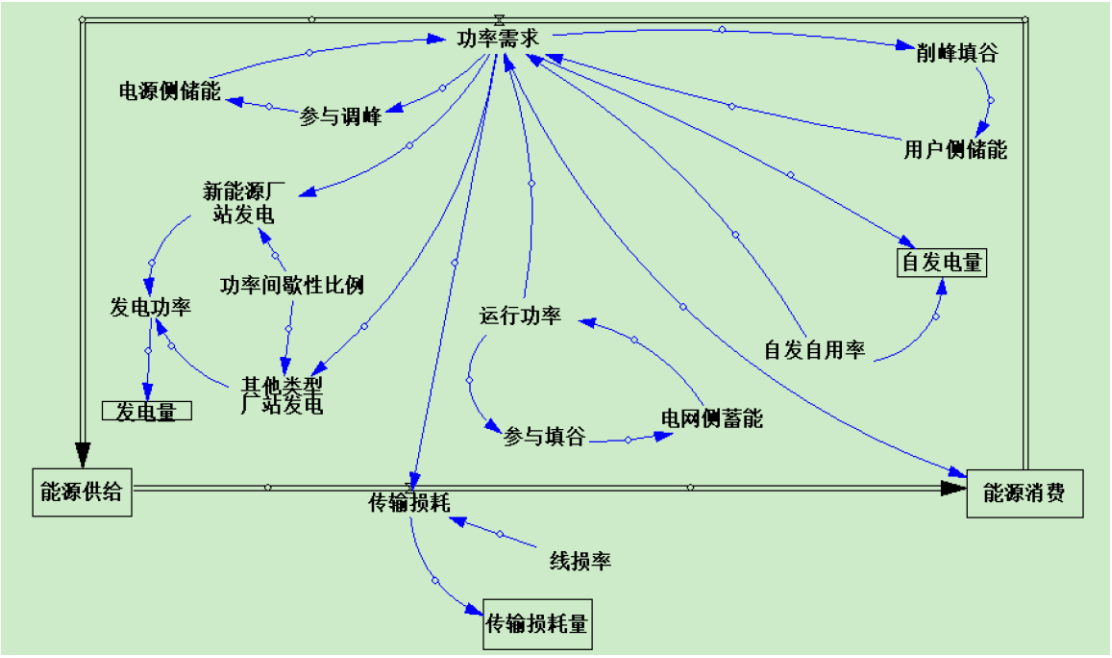


图 4-9 高比例新能源接入的能源供需系统动力学模型

相比传统能源供需形态下的功率需求弹性不足，高比例新能源接入的能源供需形态在用户侧、电源侧和电网侧都接入了储能，增加了系统运行弹性。其中，用户侧储能作用定位于削峰填谷，并期望获取收益；电源侧储能作用在填峰，降低大规模新能源厂站的并网功率波动性，电

网侧蓄能作用定位填谷，并能提供调频功率支撑。以上变量的函数定义如表 4-3 所示。

表 4-3　关键变量函数定义

变量	定义
运行功率 $P_{operation}$	基于历史数据统计的函数分布定义
自发自用率 /	1-$\sum P_{demand}/\sum P_{operation}$
功率需求 P_{demand}	$P_{operation}$ *（1-/ ）
参与调峰	IF THEN ELSE($P_{demand} > P_{peak}, 0, 1$)
参与填谷	IF THEN ELSE($P_{operation} < P_{valley}, 0, 1$)
参与削峰填谷	IF THEN ELSE($P_{demand} > P_{peak}$ or $P_{demand} < P_{valley}, 0, 1$)

4.4.4 算例应用分析

本文选取某地区日功率负荷曲线作为运行功率初始值 见图 5，进行系统动力学仿真模拟。并对运行功率峰谷差比值做如下定义：

$$\eta = (\mathrm{MAX}(P_T) - P_t)/\mathrm{MAX}(P_T) \quad t \in T = \{0,1,2,\dots t, t+1 \dots\} \tag{4-3}$$

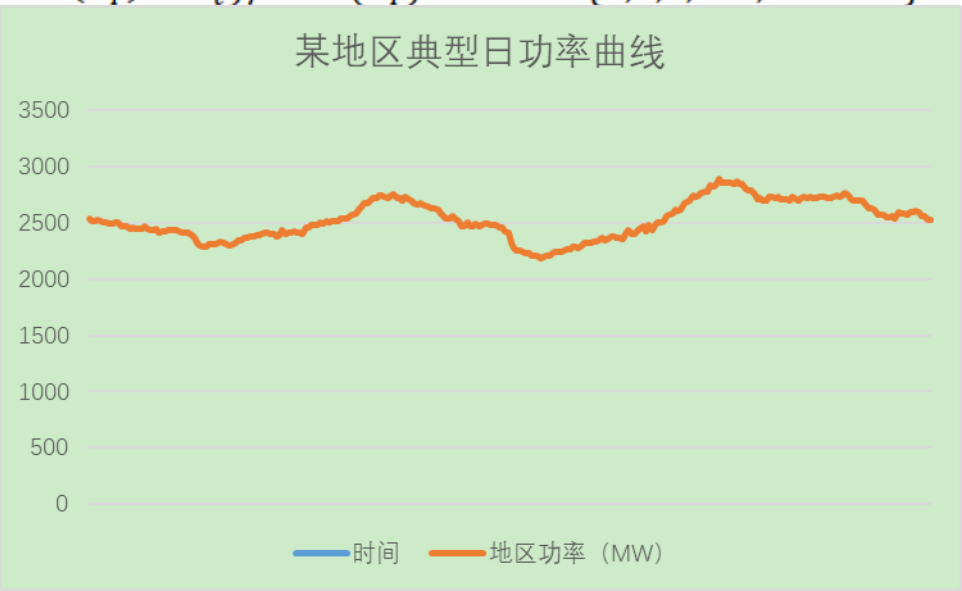


图 4-10 某区域日运行功率曲线

按以上公式计算该地区分时刻的峰谷差比值，同时选择某一 110kv 厂站及其直供 35kv 用电负荷和 10kv 用电负荷，计算得到分时刻峰谷差比值柱状图，见图 4-11 所示。

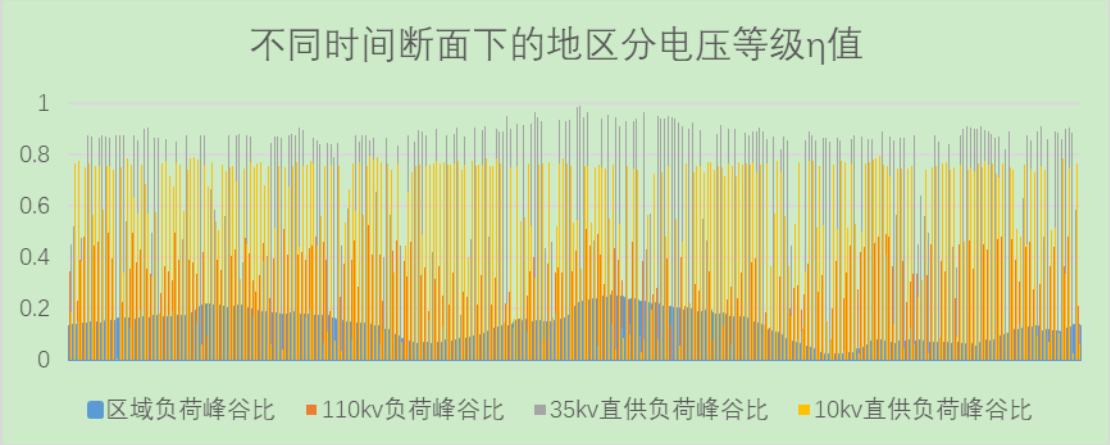


图 4-11 地区分电压等级η值柱状图

考虑能源互联网中用户侧用能主动性增强，本文以储能为例分析用能主动性对η值的影响。在 35kv 和 10kv 直供电用户中配置 10%*峰值功率*2h 的储能容量。为保证储能使用寿命和充放电性能，参考文献[70]每次只执行 50%放电深度,并根据本区域峰谷电价信息每天执行一次充/放电过程，得到的η值如图 7 所示，有无配置储能的平均η值比较如表 3 所示。

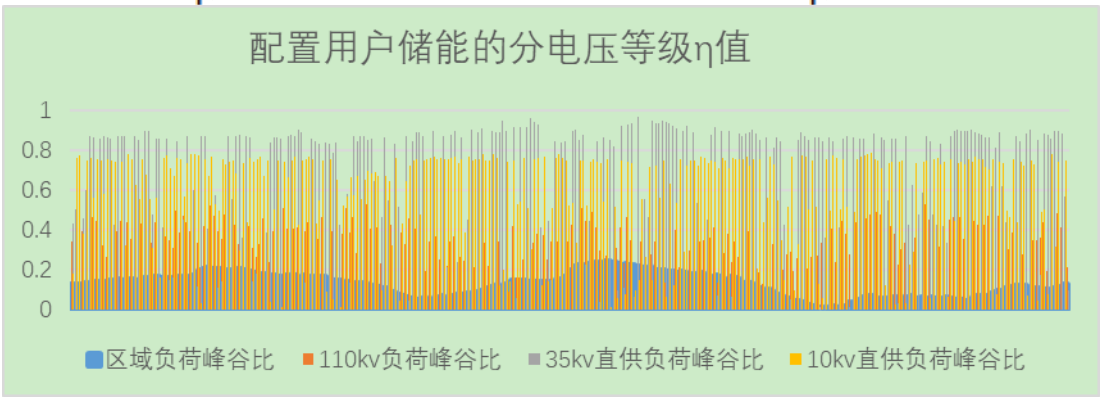


图 4-12 用户侧配置储能的分电压等级η值柱状图

表 4-4 考虑用户侧储能配置的平均η值比较

用户类型	无储能	10%储能容量配置/峰谷差收益(元)
35kv 直供用户	0.64	0.6/167.5
10kv 直供用户	0.62	0.59/156.6

4.4.5 讨论

（1）传统供应链物流系统中广泛存在着牛鞭效应[71]，即由于用户需求不确定导致的对供应链库存量及上下游各企业制造量的放大效应。在电力供需系统动力学建模分析中，用功率负荷峰谷差比值η来代表用户需求波动情况，低电压等级的用户负荷峰谷差比值要远大于上级变压站和

区域负荷峰谷差比值，即在能源功率输送上存在明显的“逆牛鞭效应”。

（2）在用户侧引入储能等灵活性功率资源能够降低逆牛逼效应，结合峰谷时段价格反馈信号，也能够进一步降低用户需求的不确定性。

（3）用户侧储能参与抑制逆牛鞭效应可以根据需求侧功率平抑的机会成本来获取收益。在高比例新能源接入的能源互联网供需形态中，要实现更大时空范围的需求侧响应，离不开新能源云平台相关数据的精准预测与分析控制。

（4）数据只有聚集才能发挥价值。新能源云平台在商业模式应用创新上具有先天优势：一方面要深入挖掘数据价值，在数据要素市场经济价值闭环中占有一席之地；另一方面要建立面向新能源云价值链上各类市场主体的数据共享激励机制，提高平台的用户粘性。

（5）羊毛出在羊身上。新能云价值链内置于高比例新能源接入的能源互联网供需市场运行形态中。其中，新能源云平台数据要素的收益取决于它们在新能源云价值链环节中的价值主张和价值分配，它要通过数据要素确权管理实现数据服务产品所有权、共享权和使用权的可信流转，从而使新能源供应商、运营商、配售商、平台等各类新型市场角色获取的数据增殖收益得到保障。

4.5 小结

本章对双高比例下的能源互联网商业模式进行了系统性分析，尤其对新能源云进行了详细研究。新能源云商业模式创新应以数据要素为核心。从供应链视角解构了新能源云要素环节，建立了新能云平台价值分析链，并对新能云价值链上各类市场主体的商业应用模式进行了初步探讨；基于数据要素设计了新能云平台各类市场主体角色间的数据因果关系，建立了能源供需经济运行系统动力学模型，验证了系统因负荷数据需求波动存在的逆牛鞭效应，验证了储能数据要素信息的共享有助于平抑逆牛鞭效应。

第五章 计及风险评估的区域碳排放应对策略研究

5.1 引言

国际社会为应对气候变化的挑战，采取了一系列减缓和适应行动。自 2005 年《京都议定书》生效以来，全球碳交易市场取得了长足的发展。2005 年 1 月 1 日，欧盟碳交易体系（European Emissions Trading Scheme，EU ETS）启动，其是世界上首个跨国碳排放交易体系，也是全球影响力最大的碳交易体系，目前正处于运行的第三阶段(2013 年—2020 年)。欧盟希望通过碳交易体系实现 2030 年温室气体排放量在 2005 年基础上削减 43%的控排目标。区域温室气体计划（Regional Greenhouse Gas Initiative, RGGI）是美国东北和中大西洋地区 10 个州的联合减排行动，以三年为一个控制期（Control Period），电力企业在每个控制期结束后进行履约核算。美国加州-魁北克的减排计划是区域减排行动——西部气候行动（Western Climate Initiative, WCI）的一部分。加州碳市场与魁北克省碳市场于 2014 年 1 月 1 日起正式互联，两地的抵消额与配额可实现完全互换。新西兰温室气体排放交易机制（New Zealand Emissions Trading Scheme，NZ ETS）开始于 2010 年，其覆盖范围广泛，对不同行业分不同阶段采取逐步纳入的方式。该机制启动至今，已将林业部门、液化化石燃料、固定能源和工业加工部门纳入碳交易体系[72-74]。

积极应对全球气候变化，是中国作为负责任大国的重要体现，也是加快推进生态文明建设的重要内容。中共十九大报告明确指出：启动全国碳排放权交易体系，稳步推进全国碳排放权交易市场建设[75]。2017 年 12 月 19 日，中国率先在发电行业开启全国性的碳市场，标志着全国性的碳排放权交易体系正式开启。电力行业碳市场的启动，将有利于使市场在资源配置中起决定性作用，通过市场化手段调节企业减排行为，实现中国的中长期减排目标。碳排放权交易是将二氧化碳排放权赋予商品属性，允许其在市场上交易的行为，通过市场机制达到减少二氧化碳排放的目的，碳排放权交易已经成为减少二氧化碳排放的重要途径。中国于 2013 年启动上海、北京、广东、深圳、天津、湖北、重庆等七省市的碳排放交易权试点。

碳排放交易市场中存在主体多元化、价格不稳定和碳排放权交易过程中的合同风险等因素，使得碳交易市场建设给电力企业引入了新风险。一方面碳排放权交易市场的主体多元化有利于活跃碳交易市场，另一方

面也会带来个人投机，有可能促使经济泡沫，影响碳交易市场中的价格，成为洗钱等犯罪的温床[76-77]。一个多元化交易主体的市场，是市场成熟的表现，但交易主体的复杂性，也可能会导致交易中出现各种诈骗以及无法履约。碳排放权交易本身的市场风险主要体现在：国际投机性资本的涌入以及国内市场需求的不确定会影响我国碳市场的稳定性，同样国际买家的需求会受到经济和政治的双重影响，波动较大[78]。

本章调研分析电力系统碳排放自身特点，研究碳排放风险评估指标及其计算方法；调研可用的电力系统碳排放风险防控措施，从全生命周期分析防控措施的技术、经济及减排特性。基于已有的碳排放风险评估体系，考虑不同类型的碳排放风险形态、风险评价指标和度量指标，建立电力系统碳排放风险防控的数学模型,并研究电力系统碳排放风险防控措施的优化方法；

5.2 碳排放风险分析

5.2.1 技术风险

（1）碳捕获与封存的风险分析

碳捕获与封存是减少温室气体排放的重要手段之一，但是，碳捕获与封存也存在经济风险、环境风险与技术风险。其中，碳捕获与封存技术和装置的推广应用，资金投入是一个巨大的问题。不同的捕集方法带来的增加设备的形式和能源消耗的性质可能各不相同，但共同的结果是：安装二氧化碳捕获设备的火力发电厂相比，其发电的基本成本更高，发电效率更低。无论是地质封存还是海底封存，但是人们都担心二氧化碳可能会慢慢地泄漏出来，尤其是海洋，会否引起海水酸化、海平面上升，可能导致新一轮的生态恶化。二氧化碳的捕获并不难，困难的程序是封存，其技术风险、成本均比较高。二氧化碳的需要长期埋藏，因此必须达到很多要求。

（2）清洁能源机组并网运行的风险分析

风电、太阳能等新能源对电网安全稳定运行及连续可靠供电的会产生重要的影响，应高度关注新能源大规模发展对电力供需平衡的影响。虽然新能源发电为电力结构调整、节能减排做出了巨大贡献，但同时也对电力供需平衡造成较大影响。风电、太阳能等新能源能量密度低、发电利用小时数少，难以与稳定的用电需求相匹配，不能替代常规电源。

5.2.2 经济风险

绿色电力市场有利于解决能源资源短缺和环境生态恶化问题，有利于培养新能源和节能环保等战略性新兴产业，塑造新的竞争优势，还有利于改善国际形象，支撑和平崛起。但是，绿色电力市场也存在一些风险，具体表现为：（1）绿色电力市场的能源结构、资金技术以及经济发展阶段的风险。作为未来经济增长点，绿色电力市场正越来越受到关注。目前中国低碳经济的发展受制于能源结构、资金技术以及经济发展阶段。（2）绿色电力市场政策机制不完善情况下的市场机制失灵。目前我国的市场秩序问题还比较突出，不规范的交易行为依然存在，信用体系的建设明显滞后 。

（1）引进 CDM(Clean Development Mechanism)机制的风险分析

作为 CDM 项目的第一大供应方，我国如何利用现阶段无减排压力、并更好的利用 CDM 的市场机制，促进我国的技术进步、工业结构优化成为了需要考虑的重点问题。在市场机制中，参与各方都是经济人，以利益最大化为目标。CDM 作为各方博弈的结果，对发展中国家，尤其是对我国来说，在短期内是看似是有益的，而从长期来看，则存在着各种潜在风险。

短期来看，买家单一,交易价格的被动，CERs 的交易价格在我国明显偏低，由于发达资本主义国家在 CDM 项目中式买方市场，具有实际的定价权。长期来看，主动减排动力将下降，发达国家很少提供核心技术，多数只是提供设备或资金，久而久之，市场减排设备的生产将会断层，主动减排的动力将会下降。

（2）碳排放权交易市场的风险分析

碳排放权交易与环境、政治、经济等诸多领域密切相关，这也在一定程度上增加了其风险性，使其不仅具有一般衍生金融工具的市场风险、违约风险、操作风险和法律风险，也有由当前变化莫测的国际经济与政治环境中以及我国的具体国情而引致的政治、经济、法律、市场风险等。

5.2.3 环境风险

（1）大型风电场对气候环境影响的风险分析

风电场建设前期及建设过程中，辅助公路修建、风电设备运输、风机安装等在占用土地、破坏植被、造成水土流失等方面对周围环境产生一定的影响。施工期需新建场内公路、塔架基础、地埋电缆沟等，土方填挖过程中所产生的扬尘会对大气环境产生短时间内的不良影响。工程

施工生产废水主要由混凝土运输车、搅拌机和施工机械的冲洗以及机械修配、汽车保养等产生，由于风电场内施工布置较为分散，所以应做好施工废水收集工作。噪声源主要是运输车辆、施工机械（推土机、搅拌机、吊车等），由于风电场一般布置在偏远地区，距离居民较远，施工期噪声对居民影响非常小。但是，应避免夜晚施工，减少噪声对野生动物栖息影响。施工固体废弃物主要是施工人员产生的生活垃圾，通过定点放置垃圾桶，专人收集，可以减少生活垃圾对环境的影响。风电场建设过程中的场内修路、埋设通信电缆、输电电缆、安装塔架、箱式变电站、架设输电线路、以及施工搭建工棚、仓库等临时性建筑物等，均会对地表植被产生一定的破坏作用，随着地表植被的破坏，容易造成土壤侵蚀及水土流失。

另外，风电场运行中输变电线路产生的电磁辐射会影响电视接收、微波通讯和海事雷达等正常运行；风机噪声、输变电线路电磁场等对周围居民及栖息动物，特别是海陆两栖动物也可能产生一定影响。风机运行还会影响到鸟类、鱼类、以及野生动物的栖息与迁徙。

（2）太阳能发电对气候环境影响的风险分析

衡量太阳能电池板环境影响的一个重要指标就是所谓的能源回收期。它指的是太阳能设备开始投入最大能力发电的时间长度。太阳能电池板可能造成的土地滥用，大型太阳能发电场对生态系统可能造成影响。

5.2.4 信用风险

信用风险是指在信用交易过程中，由于交易的一方不能履行偿付责任（失信）而给另一方造成损失的可能性。信用风险又被称为违约风险、履约能力风险、失信风险。信用风险也可以划分为主观违约信用风险和非主观违约信用风险。

信用风险产生原因主要有：

1）信息不对称性：一般情况下，信用交易双方所掌握的信息资源是不同的。受信者对自己的经营状况及信贷资金的配置风险等真实情况有比较清楚的认识；而授信者则较难获得这方面的真实信息，他们之间的信息是不对称的。

2）法律不健全性：经济主体是否选择违约，主要看违约成本的高低。当违约的预期收益超过失信成本或从事其他正常经营活动所带来的收益时，经营者便会选择违约，给其交易对手带来信用风险。如果没有健全的法律法规，严厉的惩戒机制，加重力度，打击失信行为，就不能对守信者进行保护和激励，违约风险必然加大。

3）信用观念落后性：人们在短期利益的驱动下，各种失信、违约行为屡禁不止。

4）经济运行周期性：信用风险是随着经济波动而变化的，当经济扩张时，总需求上升，企业的盈利水平上升，导致偿还能力增强，违约概率下降，信用风险减小；反之，当经济衰退时，信用风险加大。

5）宏观经济政策性：宏观经济政策，如紧缩货币，增加税收等，市场利率、汇率的波动以及通货膨胀等因素都有可能导致受信者的履约能力下降，信用风险加大。

电力市场信用风险，是指在电力市场信用交易过程中，由于各种不确定因素的作用，交易的一方在一定时间内违约（不能履行承诺、失信）的可能性以及对另一方造成可能损失的程度，它包括违约的概率、可能损失的数量以及损失的易变性（即损失的标准差）三方面的内容，其中可能的损失程度处于最重要的位置。电力市场信用风险可以划分为主观违约信用风险和非主观违约信用风险。

5.3 碳排放风险评估

5.3.1 风险关系建模

本节将模糊系统扩展至解释结构模型中，对区域碳排放风险进行结构分析，构建了风险影响强度分析模型。

（1）解释结构模型

解释结构模型方法(ZSM)是分析复杂的社会经济系统有关问题的一种方法而开发的，是用于分析和揭示复杂关系结构的有效方法。ISM 方法可将营系统中各要素之间的复杂、凌乱关系分解成为若干子系统(要素)，利用人们的实践经验和知识，以及电子计算机的帮助，最终将系统构建成一个多级阶梯的结构模型。ISM 属于概念模型，它可以把模糊不清的思想、看法转化为直观的具有良好结构关系的模型。而且它的应用也十分广泛。从能源问题等国际问题到地区经济开发、企事业复杂问题研究等等，都可以用 ISM 来建立结构模型，并据此进行系统分析。总的来说，ISM 特别适用于变量众多、关系复杂而结构不清晰的系统分析。

ISM 模型化技术的研究步骤如下:

1）搜集和整理系统的构成要素。

设定某种必须考虑的二元关系，形成意识模型，并得到系统要素集，记为：$N=\{e_i \mid i=1,2,...n\}$，其中$e_i$表示第 i 个系统要素。

2）判断要素集中每两个要素之间是否存在直接二元关系。

用邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 表示所有的直接二元关系。

$$a_{ij}=\begin{cases}1,\text{如果要素}e_i\text{对要素}e_j\text{存在直接的二元关系}\\0,\text{如果要素}e_i\text{对要素}e_j\text{没有直接的二元关系}\end{cases}$$

3）利用邻接矩阵 A 建立可达矩阵 M。

设 $B_n=A+A^2+A^3+...+A^n$

再从 B_n 中将不为零的元素改换成 1，而为零的元素不变。这样改换的矩阵，称为可达性矩阵 M。

4）以可达矩阵为基础建立递阶结构模型。用多级递阶有向图来表示模型的结构。

5）将解释结构模型与已有的意识模型进行比较。

如果不相符合，返回步骤(1)对有关要素及其二元关系和解释结构模型进行修正。通过对解释结构模型的研究和学习，原有的意识模型得到修正。经过反馈、比较、修正、学习，最终得到一个令人满意、具有启发性和指导意义的结构分析结果。

（2）模糊解析结构模型

1）模糊矩阵

如果 n 阶矩阵 $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 满足：对 $\forall i,j=1,2,...,n$，有 $0\le a\le 1$，则称 A 为 n 阶模糊矩阵，以 A_i、A_j 记为矩阵 A 的第 i 行，第 j 列，以 A_λ 记为 A 的 λ-截矩阵 $(0\le\lambda\le 1)$。记 i 为单位矩阵。在模糊状态下，解释结构模型定义中涉及的 0、1 二元关系就成为了二元模糊关系，这时的概念模型可用一个赋权有向图表示。按照此赋权有向图所构成的邻接矩阵称为模糊邻接矩阵。

2）邻接矩阵

设 $s=\{e_1,...e_n\}$ 是 n 元集，模糊矩阵 $R=(r_{ij})$ 表示 S 中元素间某种模糊关系。n 阶模糊矩阵 $A=(a_{ij})$ 称为系统（S,R）的模糊邻接矩阵，当且仅当存在正整数 L，使 $(A\cup I)^{L-2}\ne(A\cup I)^{L-1}=(A\cup I)^L=R$，并且 $a_{ij}>0$ 时称 e_i 邻接 e_j，邻接的程度是 a_{ij}，$a_{ij}=0$ 时，称 e_i 不邻接 e_j。

3）可达矩阵

设 $s=\{e_1,...e_n\}$ 是 n 元集，模糊矩阵 $R=(r_{ij})$ 表示 S 中元素间某种模糊关系。

定义 1：n 阶模糊矩阵 R 称为 S 的模糊可达矩阵，当且仅当 $R\cup I=R=R^2$。

定义 2：如果 $R=(r_{ij})$ 是 S 的可达矩阵：若 $r_{ij}>0$，则称 e_i 可达 e_j，可达的程度是 r_{ij}；若 $r_{ij}=0$，则称 e_i 不可达 e_j，（S,R）称作一个系统。

定义 3：如果 $R=(r_{ij})$ 是 S 的可达矩阵，令 $\alpha_{ij}=\min(r_{ij},r_{ij})(i\ne j)$。若 $\alpha_{ij}>0$，

则称e_i和e_j在程度上有强连接关系；若$\alpha_{ij}=0$，则称e_i和e_j无强连接关系。

4）水平截矩阵

给定模糊矩阵$R=(r_{ij})$，对于任意的$\lambda\in[0,1]$，记$R_\lambda=(\lambda r_{ij})$，其中有

$$\lambda r_{ij}=\begin{cases}1(\text{当} r_{ij}\geq\lambda)\\0(\text{当} r_{ij}<\lambda)\end{cases}$$

称$R_\lambda=(r_{ij})$为R的λ水平截矩阵。

（3）模型应用步骤

1）搜集和整理系统的构成要素；

2）建立模糊邻接矩阵A；

3）根据模糊邻接矩阵A求出λ水平下的λ-截矩阵$A\lambda$，再由$A\lambda$求出可达矩阵 M。

4) 对可达矩阵进行层次划分，得到层次分明的加权多级递阶有向图。

5.3.2 风险评价

本节引入网络层次分析法（APN）对风险状况进行综合评价，分别基于风险损失、风险可能性和风险不可控性三种不同的准则构建对区域碳排放风险进行全方位评价的多准则综合评价模型。

（1）构建 ANP 网络结构的超矩阵和加权超矩阵

假定 ANP 网络结构控制层中有准则$B_1,B_2,...,B_N$，网络层中有 N 个元素集$C_1,C_2,...,C_N$，

C_i中有元素$e_{i1},e_{i2},...e_{ini},...(i=1,2,...,N)$，$C_j$中有元素$e_{jl}(l=1,2,...,n_j)$，元素$C_j$中元素$e_{jl}$的影响通过两两比较的方式进行。有特征根法及排序向量$(W_{i1}^{(j1)},W_{i2}^{(j2)},...W_{ini}^{(jnj)})$，则$W_{ij}$表示为

$$W_{ij}=\begin{bmatrix}W_{i1}^{(j1)} & W_{i1}^{(j2)} & ... & W_{i1}^{(jnj)}\\W_{i2}^{(j1)} & W_{i2}^{(j2)} & ... & W_{ini}^{(jnj)}\\\vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\W_{ini}^{(j1)} & W_{ini}^{(j2)} & ... & W_{ini}^{(jnj)}\end{bmatrix} \quad (5\text{-}1)$$

W_{ij}的列向量就是C_i中元素的影响程度排列向量，若为C_i中元素，则$W_{ij}=0$，最终可获得在B_N准则下的超矩阵，如图 3-1 所示。

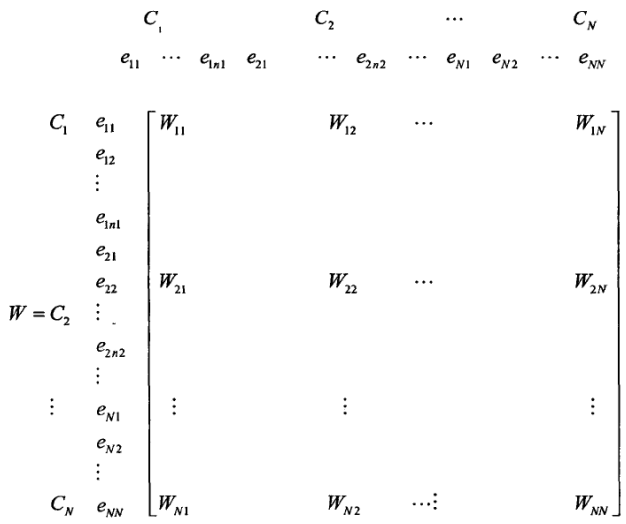


图 3-1 BN 准则下的超矩阵

上述超矩阵中的子块只考虑了元素组内部各元素对某个准则的排序，因此，超矩阵的每一列并不是归一化的。要准确反映排序，必须考虑元素组之间的影响。为此，需要将元素组整体作为元素，在准则下，针对某个元素组的相对重要性进行两两比较。从而得到子准则下其他元素组的归一化的权重向量$\left(a_{1j},a_{2j},...,a_{Nj}\right)^T$。其中，$a_{1j}$表示第 i 个元素组对第 j 个元素组的影响权值，且$\sum_{i=1}^{N}a_{ij}=1$。构造准则P_s下各元素组对C_j的相对重要性判断矩阵，见表 5-1。

表 5-1 判断矩阵及特征向量示意表

C_j	C1,C2,…,CN	归一化特征向量
C_1	$d_{1,1},d_{1,2},...,d_{1,N}$	a_{1j}
C_2	$d_{2,1},d_{2,2},...,d_{2,N}$	a_{2j}
…	…	…
C_N	$d_{N,1},d_{N,2},...,d_{N,N}$	a_{Nj}

对于 j=1，2，…,N 重复上述步骤，得到了一个$N\times N$阶加权矩阵 A：

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & ... & a_{1N} \\ a_{21} & a_{21} & ... & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & ... & a_{NN} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}2)$$

构造加权超矩阵$\overline{W}:\overline{W}=\left[\overline{W}\right]$

式中$\overline{W}=a_{ij}W_{ij}$。$\overline{W}$即为 ANP 结构的加权超矩阵。

对$\overline{W}$的任一列均有$\sum_{i=1}^{N}a_{ij}\sum_{j=1}^{N_j}w_{ij}=\sum_{S=1}^{N}a_{ij}=1$，因此，加权超矩阵$\overline{W}$的任一列都是归一化的。

（2）ANP 法权重的确定

加权超矩阵$\overline{W}$中，元素$\overline{W}_{ij}$反映元素 i 对元素 j 的一步优势度，元素$\overline{W_{ij}^2}$表示元素 i 对元素 j 的二步优势度，依此类推，当$\overline{W_{11}}^{\infty}=\lim_{t\to\infty}\overline{W}^{t}$存在时，$\overline{W}^{\infty}$的第 j 列就是准则 p_s 下网络层中各元素对于 j 的极限权重向量，如下式：

$$\overline{W}^{\infty}=\begin{bmatrix}\overline{W}_{11}^{\infty} & \overline{W}_{12}^{\infty} & \cdots & \overline{W}_{1N}^{\infty}\\ \overline{W}_{21}^{\infty} & \overline{W}_{22}^{\infty} & \cdots & \overline{W}_{2N}^{\infty}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \overline{W}_{N1}^{\infty} & \overline{W}_{N2}^{\infty} & \cdots & \overline{W}_{NN}^{\infty}\end{bmatrix} \tag{5-3}$$

将局部权重按元素顺序排列，即得到局部权重向量：

$$Q=\left(q_{11},\ldots q_{1n_1},q_{21},\ldots,q_{2n_2},\ldots,q_{N1},\ldots,q_{Nn_N}\right)^T$$

用 ANP 确定指标权重的方法如图 5-2 所示。

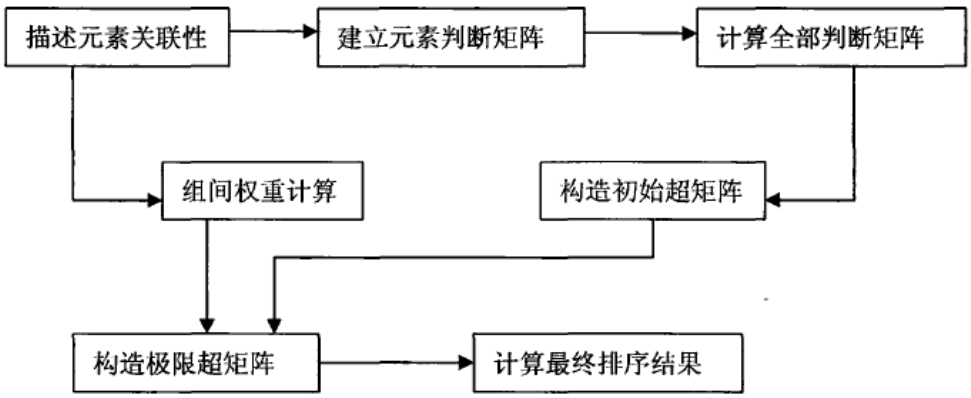


图 5-2 ANP 计算流程图

1）通过加权矩阵和加权超矩阵进行求解。首先建立加权矩阵，以某个元素组为准则，所有的元素组在这个准则下两两比较，建立判断矩阵，采用特征根法求权重，所得的归一化权重作为加权矩阵的一列。然后构造初始超矩阵，其中每个子块都是由多个判断矩阵的权重得到。最后用加权矩阵的每一个元素乘以初始超矩阵的相应元素块就得到加权超矩阵，根据加权超矩阵的类型选用相应求解方法。

2）计算得到各个指标的相对优先度，即权重，如表 5-2 所示。

表 5-2 区域碳排放风险指标

	技术风险	经济风险	环境风险	信用风险
权重	0.2	0.4	0.3	0.1

5.4 基于 CVaR 的区域碳排放风险优化控制

由 Roekafeller 和 uryasev 首次提出基于条件风险价值 CVaR(conditional value at risk)的风险计量技术[79]。VaR 是指一定时间内一定概率下的最大损失，没有考虑超过这一概率后的损失。CVaR 方法衍生于 VaR，正好弥补了 VaR 尾部损失没有顾及的欠缺，是指损失超过 VaR 的条件均值，也称为平均超额损失或平均短缺，它代表了超额损失的平均水平，反映了损失超过 VaR 临界值时可能遭受的平均潜在损失的大小，相比 VaR 更能体现潜在风险的价值。与 VaR一样，CVaR 不要求市场因子必须为正态分布，且仅以减少下方损失作为目标，因而在理论上被认为是优于方差的风险计量指标。同时，它是一致性风险计量，满足次可加性，并且可以通过变换使之具有凸性。这种方法不仅可以用于解决金融问题，也适用于任何有风险的优化问题。

CVaR 的数学表示如下：

$$\begin{aligned} CVaR &= E\left[f(x,r) \mid f(x,r) \geq VaR_\beta \right] \\ &= VaR_\beta + E\left[f(x,r) - VaR_\beta \mid f(x,r) \geq VaR_\beta \right] \end{aligned} \tag{5-4}$$

式中 $x=(x1,x2,\ldots,xN)^{\mathrm{T}}$——投资组合中 N 种资产的投资权重向量；

$r=(r0,r2,\ldots,rN)^{\mathrm{T}}$——投资组合中 N 种资产收益率的随机向量；

$f(x,r)$——投资组合的预期损失函数；

β——置信水平。

设碳排放面临 M 类风险因素，每类风险又由 N 个子风险因素。各子风险的分配比例可以描述为：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{5-5}$$

单位投资组合成本函数可表示为：

$$c(x,a,b,p) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[a_{ij}x_{ij} + \left(\sum_{t=0}^{T_{ij}^{1}} b_{ij}H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t} \right)(1+\theta)^{-T_{ij}^{0}} \right] \tag{5-6}$$

单位投资组合收益函数可表示为：

$$r(x,a,b,p)=$$
$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[\sum_{t=0}^{T_{ij}^{1}}p_{ij}H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t}\right](1+\theta)^{-T_{ij}^{0}}-\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[aijxij+\left(\sum_{t=0}^{T_{ij}^{1}}b_{ij}H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t}\right)(1+\theta)^{-T_{ij}^{0}}\right]$$
$$=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[-a_{ij}x_{ij}+\left(\sum_{t=0}^{T_{ij}^{1}}\left(p_{ij}-b_{ij}\right)H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t}\right)(1+\theta)^{-T_{ij}^{0}}\right] \tag{5-7}$$

单位投资组合损失函数可表示为：

$$f(x,a,b,p)=-r(x,a,b,p)$$
$$=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[a_{ij}x_{ij}+\left(\sum_{t=0}^{T_{ij}^{1}}\left(b_{ij}-p_{ij}\right)H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t}\right)(1+\theta)^{-T_{ij}^{0}}\right] \tag{5-8}$$

以 CVaR 为风险计量指标，通过计算电网企业不同投资组合的 VaR 和 CVaR 值来度量和刻画其所面临的风险大小。根据公式(5-4)，通过 CVaR 的等价函数 $F_{\beta}(x,\alpha)$ 表示的风险值 CVaR 的计算公式为：

$$\overline{F}_{\beta}(x,a,b,H)=\alpha+\frac{1}{(1-\beta)J}\sum_{k=1}^{J}\left[f(x,a_k,b_k,H_k)-\alpha\right] \tag{5-9}$$

式中　$a1,a2,\ldots,aJ$——a 的 J 组样本值；

$b1,b2,\ldots,bJ$——b 的 J 组样本值；

$H1,H2,\ldots,HJ$——H 的 J 组样本值，他们可以是 J 种历史或模拟未来的样本数据；

α ——一定置信水平和风险水平下的 VaR 值，$a\in R$；

通过公式(5-8)和(5-9)可以计算企业在不同市场和不同项目中进行选择时的风险。公式(5-9)给出了企业如何基于 CVaR 风险计量指标计算其在多市场多项目组合条件下的风险。考虑以技术风险，经济风险，环境风险，信用风险为风险因素，计算其所带来的综合风险，分别以风险最小化和收益最大化为决策准则，构建区域碳排放风险控制优化模型。

(1)基于风险最小化的区域碳排放风险控制优化模型

通过使用虚拟变量 $z_k\,(k=1,2,\ldots J)$，可以将公式(5-9)转化为以下问题：

$$\overline{F}_{\beta}(x,a,b,H)=\alpha+\frac{1}{(1-\beta)J}\sum_{k=1}^{J}Z_k$$
$$s.t.=\begin{cases}Z_k\geq 0\\ Z_k\geq f(x,a_k,b_k,H_k)\end{cases}-\alpha \tag{5-10}$$

以此为基础，计算区域发电企业在一定的组合收益期望水平约束下，基于风险最小化的区域发电企业风险控制优化模型为：

$$\min F_\beta(x,a,b,H)=\alpha+\frac{1}{(1-\beta)J}\sum_{k=1}^{J}Z_k$$

$$s.t.\begin{cases} r(x,a_k,b_k,H_k)=R_0 \\ Z_k\geq f(x,a_k,b_k,H_k)-\alpha \\ Z_k\geq 0 \\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}x_{ij}=1 \\ 0\leq x_{IJ}\leq 1 \end{cases} \quad (5\text{-}11)$$

式中：r 为发电项目单位投资组合收益函数，为投资者期望的投资组合收益水平。

(2)基于收益最大化的区域碳排放风险控制优化模型

根据公式(5-7)得到企业单位投资组合收益期望函数为:

$$\mu(x,a,b,H)=E[r(x,a,b,H)]=$$
$$\left\{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[-a_{ij}x_{ij}+\left\langle\sum_{t=0}^{r_e^1}(p_{ij}-b_{ij})H_{ij}x_{ij}(1+\theta)^{-t}\right\rangle\right]\right\}= \quad (5\text{-}12)$$
$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[-E(a_{ij})+H_{ij}\left\langle\sum_{t=0}^{r_e^1}E(p_{ij})-E(b_{ij})(1+\theta)^{-t}\right\rangle(1+\theta)^{-r_e^1}\right]x_{ij}$$

据此可以计算，在一定的 CVaR 风险水平约束下，基于收益最大化的区域风险控制优化模型：

$$\max[\mu(x,a,b,H)]=\max\left\{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[-E(a_{ij})+H_{ij}\left\langle\sum_{t=0}^{r_e^1}E(p_{ij})-E(b_{ij})(1+\theta)^{-t}\right\rangle(1+\theta)^{-r_e^1}\right]x_{ij}\right\}$$

$$s.t.\begin{cases} \alpha+\frac{1}{(1-\beta)J}\sum_{k=1}^{J}Z_k\leq\omega \\ Z_k\geq f(x,a_k,b_k,H_k)-\alpha \\ Z_k\geq 0 \\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}x_{ij}=1 \\ 0\leq x_{IJ}\leq 1 \end{cases} \quad (5\text{-}13)$$

式中 ω 表示允许的风险水平。

5.5 算例分析

针对目前我国碳交易市场发展水平，不同的碳减排方式及碳交易产品往往具有不用的收益率随机变化特性。基于当前的政策环境和市场状况，假设持有期、交易期、交易价格确定，碳减排成本、交易成本为正态分布随机数，估算各个参数方差和均值，按照正态分布随机产生 100

个样本值作为模型输入。假设某地今年碳排放量为 45000 吨二氧化碳，预计未来一年的碳排放量为 50000 吨，履约碳减排量为 5000 吨。为实现履约可通过投资碳减排项目和市场交易购买碳排放权两种途径。具体实施场景包括参与市场交易与投资碳减排项目两种，如表 5-3 所示。

表 5-3　电网公司碳排放风险控制情景分析

场景分析	内容描述
场景一	全部通过市场交易购买履约，购买 5000 吨，成交单价取历史均价。
场景二	全部通过投资项目履约，直接履约 5000 吨碳减排量。

情形一中，通过市场交易购买标的资产为碳配额或 CCER 项目，情形二中通过 CCER 项目履约。以北京碳排放权交易中心公布的作为参数取值依据，如表 5-4 所示。

表 5-4　区域碳排放风险参数取值

参数名称		场景一	场景二
碳资产价格	碳配额	50.5 元/吨	
	CCER	14.4 元/吨	
碳减排成本	碳配额	50.5 元/吨	500 元/吨
	CCER	14.4 元/吨	

采用上述数据，基于收益最大化和风险最小化的两个区域碳排放风险控制优化模型，计算两种场景下碳减排投资成本分配比例及 CVaR 值。

表 5-5 一定风险水平下的投资分配比例及 CVaR 值

β	ω	x_{ij}				$\mu(x)$	$CVaR$
0.90	0.1	0.010	0.990	0.000	0.000	2.281	2.48
		0.000	0.000	0.000	0.000		
		0.000	0.000	0.000	0.000		
	0.2	0.106	0.466	0.000	0.062	2.889	3
		0.153	0.060	0.000	0.002		
		0.037	0.052	0.038	0.024		
	0.4	0.044	0.248	0.025	0.043	4.325	4.5
		0.112	0.000	0.056	0.160		
		0.000	0.000	0.111	0.200		
	0.6	0.000	0.000	0.032	0.000	5.654	6
		0.000	0.000	0.108	0.308		
		0.000	0.000	0.254	0.298		
	0.9	0.000	0.000	0.000	0.000	6.286	7.098
		0.000	0.000	0.000	0.000		
		0.000	0.000	1.000	0.000		
0.95	0.1	0.003	0.997	0.000	0.000	2.578	2.69
		0.000	0.000	0.000	0.000		
		0.000	0.000	0.000	0.000		
	0.2	0.089	0.535	0.000	0.023	2.872	3
		0.123	0.063	0.000	0.000		
		0.023	0.051	0.063	0.030		
	0.4	0.045	0.073	0.071	0.186	4.302	4.5
		0.110	0.149	0.023	0.129		
		0.000	0.000	0.117	0.097		
	0.6	0.000	0.000	0.148	0.044	5.616	6
		0.000	0.000	0.104	0.202		
		0.000	0.000	0.276	0.226		
	0.9	0.000	0.000	0.000	0.000	6.286	7.25
		0.000	0.000	0.000	0.000		
		0.000	0.000	1.000	0.000		

（1）风险水平 ω 反映了所期望控制的最大损失额度。当 ω 取值较低及风险约束水平较低时，电网公司应以市场交易为主进行碳排放风险控制；随着风险水平增加，应通过投资碳减排项目，以使碳减排组合收益最大。

（2）β 是风险厌恶程度指标。从表中可以看出，在其他条件不便的情况下，如果 β 增高则碳减排项目投资比例将增加。这说明对风险的厌恶程度增大，其选择区域收益低但风险也低的投资决策。

表 5-6 一定收益水平下的投资分配比例及 CVaR 值

β	ω	x_{ij}				$CVaR$
0.90	1.9	0.000	1.000	0.000	0.000	2.478
		0.000	0.000	0.000	0.000	
		0.000	0.000	0.000	0.000	
	3	0.104	0.293	0.069	0.046	3.284
		0.068	0.098	0.000	0.000	
		0.069	0.160	0.000	0.000	
	4	0.037	0.066	0.089	0.151	4.336
		0.067	0.048	0.088	0.111	
		0.063	0.131	0.061	0.049	
	5	0.020	0.000	0.166	0.207	5.500
		0.000	0.000	0.049	0.140	
		0.054	0.000	0.152	0.213	
	5.43	0.000	0.000	0.000	0.000	6.401
		0.000	0.000	0.161	0.023	
		0.000	0.000	0.447	0.368	
0.95	1.9	0.003	1.000	0.000	0.000	2.520
		0.000	0.000	0.000	0.000	
		0.000	0.000	0.000	0.000	
	3	0.090	0.288	0.057	0.043	3.305
		0.046	0.127	0.037	0.064	
		0.061	0.177	0.008	0.000	
	4	0.044	0.000	0.057	0.197	4.357
		0.113	0.137	0.057	0.146	
		0.001	0.125	0.047	0.075	
	5	0.019	0.000	0.186	0.169	5.535
		0.000	0.000	0.055	0.162	
		0.065	0.000	0.179	0.165	
	5.43	0.000	0.000	0.000	0.000	6.499
		0.000	0.000	0.161	0.023	
		0.000	0.000	0.447	0.368	

由计算结果可知，随着约束水平增加，发电企业会增加高收益、高风险项目投资，投资组合风险水平也随之上升。置信水平 β 会使投资比例、整体投资风险水平产生变化，但是变化程度很小。总体来看，提高置信水平，投资者会相应减少低风险低收益项目投资，增加高风险高收益项目投资。

5.6 小结

本章调研了区域电力系统碳排放的特点，对区域碳排放风险进行分析，并建立评估指标及其计算方法，讨论了面向电力系统的碳排放风险防控措施。基于已有的碳排放风险评估体系，考虑不同类型的碳排放风险形态、风险评价指标和度量指标，建立了区域碳排放风险防控的数学模型，提出了基于 CVaR 的区域碳排放风险防控优化方法，降低投资风险，提高收益。

第六章　结论与展望

能源互联网是实现能源生产、能源消费、能源体制、能源技术革命的重要技术路线，它得价值体现在信息能源基础设施深度融合运行形态之中。随着大量分布式能源接入，集中和分散式协同是能源互联网的基本运行形态，通过分层信息反馈和价值前馈，保证能源互联网的高效互动。本文首先基于图分析理论建立了云边协同的计算模型拼接方法，提出了分布式并行的电网络拓扑分析方法，验证了并行拓扑分析服务的计算效率，能够对外提供高效的统一潮流计算服务。然后在数据层，对能源互联网中的静态模型数据和动态实例数据分析，建立了数据质量分析与评估方法，验证方法的有效性，并提出了一种获取能源互联网潮流断面数据的高效数值求解排序方法，提高计算效率。在价值层，分别从业务运营、关键因素、价值场景等维度分析了双高比例下的能源互联网商业模式，重点对新能源云数据要素应用展开分析，包括价值链分析、系统动力学建模及算例分析，发现了新能云供应链的逆牛鞭效应并提出其应对策略。最后对区域碳排放风险进行分析评估，建立了基于 CVaR 的区域碳排放风险优化控制模型，根据风险、收益等约束条件，得出在碳市场交易和碳减排项目中的最优投资组合比例。未来课题研究展望包括：

（1）在物理层，网络拓扑分析与计算模型生成与提取作为平台基础服务功能，要保证与上层应用协同计算的高效与安全性，才能对外提供统一的在线应用计算服务；

（2）在数据层，结合不同类型的历史数据，数据质量评价和修复的正确性还需要进一步验证；基于量测数据的机器学习方法而非基于模型计算的数值求解方法，是获取电网络潮流断面数据的研究新思路；

（3）在价值层，除了考虑新能源出力的波动性，电力市场环境下的现货价格波动更大，结合储能充放电策略优化调整，如何基于以上不同类型，不同时间尺度的数据要素开展商业模式应用研究，将会是重要的研究课题。除了电力行业，建筑、交通等相关行业碳排放风险防控也需要在区域碳排放中统一考虑。

参考文献

[1] Jeffrey Rissman, Chris Bataille, Eric Masanet, et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070, Applied Energy, 2020, (266):1-34.

[2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,黄彦浩,马士聪,赵强.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(07):1893-1904+2205.

[3] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,王剑辉.能源互联网:驱动力、评述与展望[J].电网技术,2015,39(11):3005-3013.

[4] 曹军威,孟坤,王继业,杨明博,陈震,李文焯,林闯.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014,44(06):714-727.

[5] 曹军威等. 能源互联网与能源系统[M].中国电力出版社，

[6] 杜丽娟, 张英华, 杜美卿. 企业碳风险评估与管理——以河北钢铁集团为例[J]. 企业经济, 2014(4):12-18

[7] 李肠.我国低碳经济发展路径选择和政策建议[[J].城市发展研究,2010(17):56-67

[8] 曾鸣,武赓,李冉,王昊婧,孙辰军.能源互联网中综合需求侧响应的关键问题及展望[J].电网技术,2016,40(11):3391-3398.

[9] Lei Rao, Xue Liu, Le Xie, Wenyu Liu. Coordinated Energy Cost Management of Distributed Internet Data Centers in Smart Grid[J]. 2012, 3(1): 50-58.

[10] 董朝阳,赵俊华,文福拴,薛禹胜.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.

[11] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, Oct. 2016

[12] J. Pan and J. McElhannon, "Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 1, pp. 439-449, Feb. 2018.

[13] 李彬,贾滨诚,陈宋宋,杨斌,孙毅,祁兵.边缘计算在电力供需领域的应用展望[J].中国电力,2018,51(11):154-162.

[14] 卡尔马克思著.资本论[M]. 人民出版社，北京，2004.

[15]HUANGAQ,CROWML,HEYDTGT,etal.TheFutureRenewableElectricEnergyDeliveryandManagement(FREEDM)System:TheEnergyInternet[J].Proc.theIEEE,2011,12,17.

[16] Randy H，Culer D E，Seth S，et al.An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view [J].Sustainable Computing :Informatics and Systems，2011，1(1):7-22

[17] Mahammad A. Hannan, Mohammad Faisal, Pin Jern Ker, et la. A review of internet of energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations [J]. IEEE Access, 2018, (6): 38997-39014

[18] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(04):2-10+46.

[19] GEIDL M, KOEPPEL G, FAVRE-PERROD P, et al.Energy hubs for the future[J].IEEE Power Energy Magazine,2007,5(1):24-30.

[20] LIU X, WU J, JENKINS N, et al.Combined analysis of electricity and heat networks[J].Applied Energy,2016, 162:1238-1250.

[21] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al.Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6 (5) :2302-2311.

[22]张毅威, 丁超杰, 闵勇, 等.欧洲智能电网项目的发展与经验[J].电网技术, 2014, 38 (7) :1717-1723.
[23]NAKANISHIH.Japan’s approaches to smart community [EB/OL]. [2014-10-09].http://www.ieee-smart gridcomm.org/2010/downloads /Keynotes/nist.pdf.
[24]黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J].电力系统自动化, 2015, 39 (9) :26-33.
[25]庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅,等.雄安新区地热资源与开发利用研究[J].中国科学院院刊, 2017, 32 (11) :1224-1230.
[26]王继业, 孟坤, 曹军威,等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015.
[27] Farhangi H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2010, 8(1):18-28.
[28] Rech D, Harth A. Towards a decentralized hierarchical architecture for smart grids[C] // Proc of the 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops, New York: ACM, 2012:111-115.
[29] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S, Jatskevich J. et al. Optimal and autonomous incentive –based energy consumption scheduling algorithm for smart grid[C] //Proc of IEEE ISGT’10. Piscataway, NJ: IEEE , 2010:1-6.
[30] Erol-Kantaci M, Kantarci B, Moufitah H T. Reliable overlay topology design for the smart microgrid network [J]. IEEE Network, 2011,25(5): 38-45.
[31] 王毅,陈启鑫,张宁,冯成,滕飞,孙铭阳,康重庆.5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J].电网技术,2019,43(05):1575-1585.
[32] Hwang K, Fox G C, Dongara J. Distributed and Cloud Computing [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2011
[33] J. Baek, Q. H. Vu, J. K. Liu, X. Huang and Y. Xiang, "A Secure Cloud Computing Based Framework for Big Data Information Management of Smart Grid," in IEEE Transactions on Cloud Computing, vol. 3, no. 2, pp. 233-244, 1 April-June 2015.
[34]BDI Initiative. Internet of Energy ICT for energy markets of the future: BDI No.439[R]. Berlin, Germany: Federation of German Industries, 2008.
[35]中共中央，国务院．中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见[Z]．北京：中共中央，国务院，2015．
[36] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽.新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.
[37] 马莉,范孟华,郭磊等.国外电力市场最新发展动向及其启示[J].电力系统自动化,2014,38(13):1-9.
[38] 王剑晓,钟海旺,夏清等.基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(02):7-18.
[39] Jingkun Liu, Ning Zhang, Chongqing Kang, et al. Decision-Making Models for the participants in cloud Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):5512-5521.
[40] Chun-Cheng Lin, Der-Jiunn Deng, Chih-Chi Kuo, et al. Optimal Charging Control of Energy Storage and Electric Vehicle of an Individual in the Internet of Energy With Energy Trading[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6):2570-2578.
[41] Chun-Cheng Lin, Der-Jiunn Deng, Wan-Yu Liu. Peak Load Shifting in the Internet of Energy With Energy Trading Among End-Users[J].IEEE Access, 2017, 5(1):1967-1976
[42] 倪琳娜,文福拴,尚金成,何洋.能源互联网环境下的信息经济学初探[J].电网技术,2016,40(06):1612-1619.
[43]H. Hua, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao, “Stochastic optimal control for energy Internet: A

bottom-up energy management approach," IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 15, no. 3, pp. 1788-1797, Mar. 2019.
[44]J. Guo, S. Zhang, J. Cao, J. Yang, Y. Luo and J. Li, "Hybrid Computing Hierarchy Based on-Line Analysis Service for Power Dispatching and Control System," 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), Nanjing, China, 2019, pp. 527-530.
[45]S. Bera, S. Misra and J. J. P. C. Rodrigues, "Cloud Computing Applications for Smart Grid: A Survey," in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 26, no. 5, pp. 1477-1494, 1 May 2015.
[46] MA Feng, LUO Xiaochuan, LITVIONV E. Cloud computation for power system simulations at ISO new England–experiences and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2596-2603.
[47] W. Huo, F. Liu, L. Wang, Y. Jin and L. Wang, "Research on Distributed Power Distribution Fault Detection Based on Edge Computing," in IEEE Access, vol. 8, pp. 24643-24652, 2020
[48]辛耀中,石俊杰,周京阳,高宗和,陶洪铸,尚学伟,翟明玉,郭建成,杨胜春,南贵林,刘金波.智能电网调度控制系统现状与技术展望[J].电力系统自动化,2015,39(01):2-8.
[49]徐得超，赵敏，江涵，等．用于大规模电力系统机电暂态实时仿真的并行网络拓扑算法 [J]．高电压技术，2016，42(1)：296-302.
[50] BP Statistical Review of World Energy[Online]. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html.
[51] W. Richard Stevens, Kevin R. Fall, TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols (2nd edition). Addison-Wesley Professional Press, 2011.
[52] Ikbal T, Rachida D, Mohamed A S. "Big Data Pre-processing: A Quality Framework", IEEE International Congress on Big Data, pp.191-198, 2015.
[53]H. Hua, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao. "Optimal Energy Management Strategies for Energy Internet via Deep Reinforcement Learning Approach". Applied Energy, 23(9), pp.598-609, 2019.
[54] Y. Ming, J. Yang, J. Cao, et al. "Distributed Energy Sharing in Energy Internet through Distributed Averaging". Tsinghua Science and Technology, Special Section on Energy Internet, 23(3), 233-242, 2018.
[55] Nuno L, Seyma N S and J Bernardino. "A Survey on Data Quality: Classifying Poor Data", IEEE 21st Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, pp.179-188, 2015
[56] Ashish J, Nripendra N D. "Big data Quality Framework: Pre-Processing data in Weather Monitoring Application", International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing, pp.559-563, 2019
[57] Wen Chen, Kaile Zhou, Shanlin Yang. "Data quality of electricity consumption data in a smart grid environment", Renewable and Sustainable Energy Reviews, (75), pp.98–105, 2017
[58] Blessy T L, N. S Kumar. "An Enhanced Pre-Processing Model for Big Data Processing: A Quality Framework", IEEE International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies, pp.1-7, 2017
[59] Le Yao, Zhiqiang Ge. "Big data quality prediction in the process industry: A distributed parallel modeling framework", Journal of Process Control, 68 (), pp.1-13, 2018.
[60]Liu W H．The role of elimination trees in sparse factorization [J]．SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications，1990，11(1)：134-172．
[61]陈启鑫，刘敦楠，林今，等．能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]．电网技术，

2015, 39(11): 3050-3056.
[62]刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
[63]康重庆,刘静琨,张宁.未来电力系统储能的新形态:云储能[J].电力系统自动化,2017,41(21):2-8.
[64]闫庆友,米乐乐.综合能源服务商业模式分析——基于商业模式画布[J].技术经济,2019,38(05):126-132.
[65]M. Ricardo Saavedra M., Cristiano Hora de O. Fontes, Francisco Gaudêncio M. Freires, Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 82, Part 1,2018,Pages 247-259.
[66]T. Zhao, J. Zhang and P. Wang, "Closed-loop supply chain based battery swapping and charging system operation: A hierarchy game approach," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 5, no. 1, pp. 35-45, March 2019.
[67]2020 年 4 月,中共中央、国务院印发《关于构建更加完善的要素的要素市场化配置体制机制的意见》
[68]曹军威,袁仲达,明阳阳,张华赢.能源互联网大数据分析技术综述[J].南方电网技术,2015,9(11):1-12.
[69]郭庆来,王博弘,田年丰,孙宏斌,温柏坚.能源互联网数据交易:架构与关键技术[J].电工技术学报,2020,35(11):2285-2295.
[70] 伍俊,鲁宗相,乔颖,杨海晶.考虑储能动态充放电效率特性的风储电站运行优化[J].电力系统自动化,2018,42(11):41-47+101.
[71]Lee, H.L. Padmanabhan, V. Whang, S. The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan Management Review. 1997, pp.93-101.
[72] Koji Shimada, Yoshitaka Tanaka, Kei Gumi. Developing a long tern Local Society Design Methodology towards a Low carbon Economy: An Application to Shiga Prefeture in Japan [J].Energy Policy, 2007(35):3916-3928
[73] Johnston, D.Lowe, R.BELL, M. An exploration of the Technical Possibility of Achieving C02 Emission Reductions in Excess of 60070 Within the UK housing stock by the year 2050[J].Energy Policy,2005(33):1123-1143
[74] Treffers DJ, Faaij APC, Spakman J,Seebregts A. Exploring the possibilities for setting up Sustainable Energy Systems for the long term:Two Visions for the Dutch Energy System in 2050[J].Energy Policy,2005(33):1723-1743
[75] 马忠玉, 翁智雄. 中国碳市场的发展现状, 问题及对策[J]. 环境保护, 2018.
[76] 刘传明,孙喆,张瑾.中国碳排放权交易试点的碳减排政策效应研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(11):49-58.
[77] 隗斌贤,揭筱纹.基于国际碳交易经验的长三角区域碳交易市场构建思路与对策[J]. 管理世界,2012,(02):175-176.
[78] 魏东, 岳杰, 王景珉. 碳排放权交易风险管理的识别、评估与应对[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(8):28-32.
[79]Rockafeller T R，Uryasev S.Optimization of conditional value-at-risk[J].Journal of Risk，2000，2(3)：21-24.

致 谢

时光荏苒，逝者如斯。百年未有大变局之际，能在清华园里度过两年时间，思考时代命题，探索行业价值，深感荣幸。首先感谢有缘接触到的各位老师与工作人员，尤其是曹军威老师，陆超老师；对能源互联网价值形态的研究起于自我个体生命价值的思考，到现在能有初步答案，离不开二位老师的耐心指导和帮助。曹老师开放性思维，严于律己，宽以待人的孺子牛精神，有张有弛的工作态度，给予了自己不断探索的精神与勇气。陆老师的无私帮助，威而不猛的人师风范，也会让自己一直谨存着夕惕若厉的反省批判精神。感谢课题组华昊辰博士、肖泽青博士、艾崧溥博士、梁宏博士、王同贺博士，刘迪博士，郭盛博士；虽然大家专业学习背景不同，人生成长经历更是悬殊，但与大家的交流过程中，让自己理解了博士为何物，它是一段超越自己的人生经历。与天奋斗，与地奋斗，乐趣无穷。感谢组里袁仲达博士、明阳阳博士、杨洁博士、谢挺、张少杰、胡俊峰、陈建会、张艳荣、孙靓等同事们在工作学习生活上的帮助。对其他为我答惑解疑的老师同学们的感谢就不再一一具表。另外，还要感谢哲学系留学生洪孝妊博士，与洪博士在图书馆相识，已过天命之年还在继续努力追求喜爱的学术事业，也给未来的自己树立了榜样。

感谢我的父母亲，过去一直追随我心，自由思考成长到现在，不太顾及双亲的感受，眼看着他们鬓丝日日添白头，以后要更多地回馈报答二老双亲，能让他们安度晚年。最后要感谢的是女朋友张东阳女士，从我攻读博士的后半段陪伴到现在五年有余，酷暑寒秋已过，福禄寿喜将来。期待我们共同人生的下一幕。

明道修心，日新月异。与人奋斗，其乐无穷。未来还是要加油吖！

项目及研究成果

参与项目：

（1）**国家重点研发计划项目：**面向高品质用能需求的清洁能源和储能混合系统关键技术研究；
（2）**国网科技项目：**区块链技术在能源互联网中的应用研究，已结题。
（3）**国网大数据中心项目：**基于人工智能海量分布式新能源数据质量控制；
（4）**2020 年度国网科技项目：**新能源云典型应用场景、商业模式和运营模拟评估；
（5）**丰田-清华联合科技项目：**信息物理融合的城市能源系统综合状态感知、安全评估以及能量管理；
（6）**中车国创中心（青岛）科技项目：**高效能城市轨道交通系统建模与综合智能优化

期刊论文：

（1）**Jian Guo**, Hong Liang,, Songpu Ai,Chao Lu,Haochen Hua,Junwei Cao.Improved AMD Ordering Method and Its Application for Electrical Power Network Analysis and Computation. Tsinghua Science and Technology.（2021 年第 4 期）
（2）**郭健**,曹军威,杨洋,陆超,张东霞,刘敦楠,华昊辰.面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析[J]. 电网技术,2020,44(02):493-504.
（3）**Jian Guo**, Yutong Li, Tonghe Wang， Junwei Cao, Chao Lu.. Collaborative Edge-Cloud based State Estimation Service for Smart Grid Monitoring and Control System, CSEE(under review)
（4）**Jian Guo**, Yadi Luo, Tonghe Wang, Junwei Cao, Chao Lu. Dispatching Cloud based Uniform Steady-State Operation and Analysis Applications for Smart Grid, IEEE Transactions on Industrial Informatics (under review)
（5）**郭健**，曹军威，韦超等。基于供应链视角的新能源云商业模式及数据要素应用研究[J]，电网技术（投稿）
（6）Tonghe Wang, **Guo Jian**, Songpu Ai, Junwei Cao. RBT: A Distributed Reputation System for Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading with Fairness Consideration, Applied Energy (under review)

会议论文：

（1） **Jian Guo**; Shaojie Zhang ; Junwei Cao et al. Hybrid Computing Hierarchy Based on-Line Analysis Service for Power Dispatching and Control System（ICEI2019）

（2）Jiye Wang ; Yang Li ; **Jian Guo*** ; Junwei Cao et al.Data Quality Analysis Framework and Evaluation Methods for Power System Operation with High Proportion of Renewable Energy Penetration（ICIEA2020）

（3）Yutong Li, Haochen Hua, **Jian Guo,** Junwei Cao. Cloud-Edge Collaborative Optimization for Information Layer of Energy Internet(SmartGridComm 2020).

（4）**Jian Guo**，Hong Liang, Xiaobo Wu, et al. Digital-Twin Based Power Supply System Modeling and Analysis for Urban Rail Transportation(ICEI2020)

（5）Songpu Ai, Diankai Hu, **Jian Guo**, Junwei Cao. Distributed Controllable Electricity Transaction Matching System based on Blockchain[C], IEEE Conference on Energy Internet (ICEI 2020), 2020.

申请发明专利：

（1）一种面向智慧城市能源综合利用的多站融合数据质量评估与修复方法；

（2）一种基于绿色权益共识机制的分布式能源上网电量认证与交易方法；

（3）一种用于加权授信服务的电力数据服务产品自动匹配推荐交易方法；

个人简介

郭健，男，汉族，1987 年 7 月生，山东聊城人。
2004-2008 年，本科，就读于太原理工大学计算机科学与技术专业；
2008-2011 年，硕士，就读于华北电力大学（北京）计算机系统结构专业；
2011-2013 年，国家电网公司全职工作，软件研发工程师；
2013-2018 年，博士，就读于中国电力科学研究院电力系统及其自动化专业；
2018-2021 年，清华大学电机系博士后，北京信息科学与技术国家研究中心助理研究员；