



面向两网融合的智能配用电计算架构白皮书

电力行业输配电技术协作网（EPTC）

电力信息通信专家工作委员会

智能配用电应用工作组

2019 年 11 月

编写委员会

主 编：王海林

副主编：陈锦铭

执 笔：焦昊、王传君、陈烨、袁杰、李毅、俞俊、董树锋、
蒋玮、方睿、汤海波、张舒鹏、吴磊

参编单位

国网江苏省电力有限公司

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院

国网江苏省电力有限公司信通分公司

南京南瑞集团公司信息系统集成分公司

浙江大学

东南大学

江苏电力信息技术有限公司

国网扬州供电公司

前 言

配用电系统属于电力系统的末端环节，通常是指从降压配电变电站（高压配电变电站）出口到用户端的这一段系统。它是由多种配电设备（或元件）和配电设施所组成的一个电力网络系统，承担着变换电压和直接向终端用户分配电能的任务。从配电网的发展历程来看，其主要分为三个阶段。第一阶段是配电网架与基础设施建设阶段，在该阶段主要以满足用户用电需求为主要目的，重点在于配电网架规划以及配电线路、变压器等基础设施的投资建设。第二阶段是配电自动化阶段，在该阶段主要以提升配电自动化水平为主要目的，重点在于配电自动化装置（FTU、DTU、TTU、故障指示器等）的配置以及配电自动化系统的建设。第三阶段是智能配用电阶段，在该阶段主要以智能配电物联网为主要建设目标，重点在于融合物理配电网与信息网，利用先进IT技术提升配电网运维管理和用户服务水平。

智能配用电阶段的建设重点在于**物理配电网与信息网的两网融合**，其本质是构建电力领域的工业物联网。在该阶段，配用电网基础设施建设已基本完善，海量、分布式配用电数据的汇聚、计算、挖掘、变现已成为该阶段建设的重点和难点。目前，以先进传感技术、5G通信、边缘计算、云平台等技术为代表的先进技术为智能配用电建设提供了良好技术环境。但对于如何运用这些技术，搭建一套完整的智能配用电计算架构，实现电力设备、信息系统、业务流程、产品与服务、人员之间，电力企业IT网络与工控网络之间的互联互通互操作，实现海量分布式数据有效利用，从而促进配用电向更高级智能化发展，尚缺乏一套系统级的理论方法和架构方案。

本白皮书构建了面向两网融合的智能配用电计算架构，主要包括面向两网融合的配用电多级边缘物理架构、云边互动IT架构以及分布式智能架构。面向两网融合的配用电多级边缘物理架构基于分层分区思想，对传统配用电网架构进行了重新划分与定义。面向两网融合的云边互动信息架构完成了从中心云到边缘云的信息网划分并设计了一套云边互动方案。通过物理电网边缘与信息边缘云的耦合，实现两网融合。在此基础上提出了分布式智能架构，通过先进AI技术，完成轻资产条件下的电网边缘内部状态感知、计算与优化控制等任务，最终实现配用电的分布式智能。

在构建配用电智能化体系架构过程中，主要关注以下六个方面的关键技术：

(1) 配用电多级边缘架构定义与设计

基于配用电网物理特征、电气特征与功能特征，完成对原有复杂配用电架构的重新划分与定义，构建配用电多级边缘架构。建立信息网与物理电网的耦合映射，实现配用电数据传输与业务计算的就近处理与分层分区控制。

(2) 边缘统一模型构建技术

对配用电多级边缘架构中的边缘实体进行抽象，描述其属性和逻辑关系，进而建立边缘统一模型。同时对边缘交互内容与方式进行抽象，建立边缘交互统一模型。

(3) 云边互动平台支撑技术

针对云、边之间的计算、网络、存储等资源的异构性，研究网络虚拟化、边云协调控制等技术，为云边端到端可靠传输和智能应用提供服务漂移、资源配置、安全防护、监警告警等支撑服务。

(4) 云边互动辅助支撑技术

研究电网终端物联管理、云边APP运行管理、云边AI算力模型等辅助支撑技术，支撑电网边缘划分、边缘运行状态智能感知等应用。

(5) 边缘拓扑简化及校验技术

研究从电网联络关系角度出发，以配网联络开关为核心的拓扑简化技术，提升边缘拓扑可视化效果。深度融合图计算等理论知识，实现全地市、全自动拓扑校验。

(6) 边缘运行状态智能感知与计算技术

以边缘计算平台提供的数据、计算资源为基础，设计基于有限量测的配电网拓扑辨识模型，利用人工智能算法实现网络元件参数辨识，实现配电网运行状态智能感知以及少量测情况下的电网边缘状态计算。

本白皮书由国网江苏省电力有限公司组织编写，国网江苏省电力有限公司电力科学研究院负责整体统稿，并牵头编写白皮书中电网边缘架构及业务应用相关内容；国网江苏省电力有限公司信通分公司牵头编写白皮书中IT支撑架构相关内容。参与白皮书编写的单位还包括南京南瑞集团公司信息系统集成分公司、浙江大学、东南大学、江苏电力信息技术有限公司、国网扬州供电公司。

物理电网与信息网的两网融合是当前快速发展的热点研究领域，由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有不足或有待改进之处，殷切希望广大读者批评指正。

目 录

一、配用电网的发展概况	1
1.1 配用电网发展历程	1
1.2 配用电网和主网的差异化分析	3
二、配用电网的智能化计算需求	4
2.1 当前配用电网智能化计算面临的挑战	4
2.2 配用电网智能化计算需求	5
三、架构概述	7
3.1 面向两网融合的配用电多级边缘物理架构	7
3.2 IT 支撑架构	11
3.3 基于两网融合的分布式智能架构	13
四、关键技术	17
4.1 配用电多级边缘物理架构实现关键技术	17
4.2 IT 支撑架构实现关键技术	18
4.3 分布式智能架构实现关键技术	40
五、应用前景	44
5.1 负荷预测	44
5.2 清洁能源消纳	46
5.3 源网荷储多级互动	47
5.4 综合能源平台构建	48
六、总结与展望	49
附录 1：面向两网融合的云边互动 IT 支撑架构	50
1.1 基于 SDN 的网络虚拟化实现技术	50
1.2 基于 NFV 的网络虚拟化实现技术	52
1.3 基于 OpenStack 的分布式云平台实现技术	53
1.4 基于 Kubernetes 的分布式云平台实现技术	53
1.5 物联管理平台	54

1.6 边缘计算框架	54
1.7 AI 支撑平台及工具	55
附录 2：基于两网融合的分布式智能架构	57
2.1 边缘动态拓扑校验技术	57
2.2 边缘动态参数辨识技术	57
2.3 边缘状态计算技术	58
附录 3：边缘智能配用电关键技术典型案例	59
3.1 边缘划分技术典型案例	59
3.2 边缘动态拓扑获取技术典型案例	60
3.3 边缘动态参数辨识技术典型案例	61
3.4 边缘状态计算技术典型案例	63

一、配电网的发展概况

1.1 配电网发展历程

电力是最重要的能源形式之一，从产生到消费包括发电、输电、变电、配电和用电等环节。配电网作为电力传输末端，是保障和改善民生的重要基础设施，是用户对电网服务感受和体验的最直观对象，在助推城市化进程和经济结构转型、服务经济社会发展方面发挥了重要作用。自新中国成立70年来，配电网经历了由弱变强、由落后到领先的发展历程，目前可划分为3个阶段，如图1-1所示。

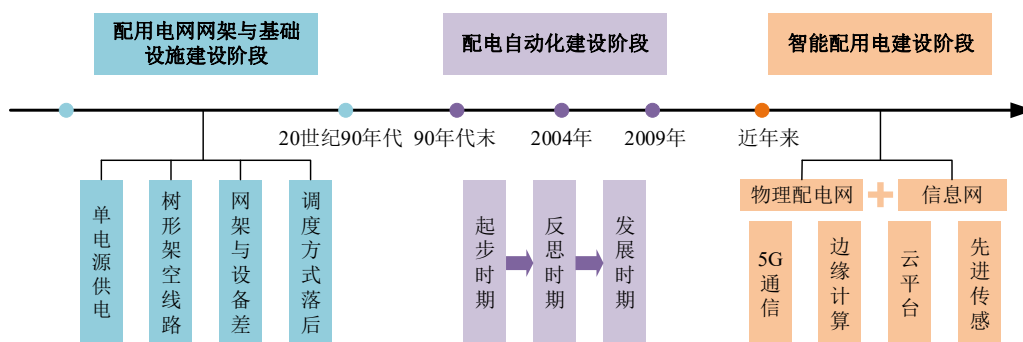


图1-1 配电网发展历程图

（1）第一阶段：配电网网架与基础设施建设阶段

在1949年—1990年期间，配电网主要以建设网架和基础设施为发展目标，让人民群众尽可能用上电，但具有供电可靠性低、覆盖范围小、检修难度大等特征。

1、网架方面：中压配电网普遍采用树形结构的架空线路，大部分没有后备联络开关，供电可靠性低。

2、故障率方面：由于网架简陋和设备差，造成在负荷高峰或极端天气时期，线路、变压器过载问题严重，事故率较高。

3、调度方面：配电网调度、运行管理采用电话和人工方式，配电网故障停电后，用户通过电话告知配电调度，配电调度通知抢修班组，抢修人员赶到现场进行，一个简单的故障，需要检修数小时，才能恢复对用户的供电。

（2）第二阶段：配电自动化建设阶段

在1990-2015年期间，大力建设配电自动化系统，配电网主要以提升用户用电可靠性、安全性为发展目标，让人民群众尽可能用好电，但仅依赖集中控制的手段不具有高效分布式计算的能力。

配电自动化是第二阶段配用电网的技术基础，利用计算机及网络技术与电力设备与系统应用技术等，实现配电网正常及事故情况下的监测、保护、控制以及计量功能，提高供电可靠性和经济性。配电自动化的控制模式主要分为两类：分布式就地控制和远方集中控制。前者仅仅实现故障隔离，不具有扩展性和通用性。后者主站集中统一控制的方式，近年来遇到新的问题与挑战，例如如何应对分布式电源广泛接入配电网等。

从历史上来看，我国的配电自动化建设和改造起步较晚，直至20世纪90年代末才开展配电自动化的试点工作，大致也可分为三个时期：

1、起步时期：我国配电自动化的技术研究起于20世纪90年代初，而真正的开展试点项目和工程化实施是从90年代后期开始。在1998年之后，随着大范围城乡电网建设与改造的开展，在多个省市掀起了技术试点和应用的热潮。然而由于当时对配电自动化的认识不到位、配电网架和设备不完善、技术和产品不成熟、管理措施跟不上等原因，许多早期建设的配电自动化系统没有发挥应有的作用，但也为下一步工作的健康开展打下了基础。

2、反思时期：从2004年开始，国家电网公司在城市、县乡配网自动化建设领域发力，不断推动相关研究。与此同时，相关自动化企业对配电一次设备、配电自动化终端和配电自动化主站系统的制造水平也在快速提高，城乡配电网网架结构趋于合理，为进一步发挥配电自动化系统的作用提供了条件。这一阶段主要对从技术和管理两个方面进行了反思，技术上明确了网架结构尚且薄弱，配电自动化设备以及信息集成相关技术不成熟，管理上对配电自动化的认知不足并且系统规划仍不够科学严谨。

3、发展时期：2009年之后，国家电网公司积极开展试点工程建设。随着通信技术和计算机技术的发展，将多种设备在线连接，实现配网系统的实时在线监控，对配电终端实现统一管理，自动识别并隔离线路故障，对非故障区域快速恢复供电，并通过大数据进行线路损耗分析、电网可靠性分析及配电网规划设计等，现阶段的配电自动化以此为目标进行建设和完善。

（3）第三阶段：智能配用电建设阶段

近年来，智能配用电不断引起国家电网公司和社会各界重视。目前以先进传感

技术、5G通信、边缘计算、云平台等技术为代表的先进技术为智能配用电建设提供了良好的技术环境。在该阶段主要以智能配电物联网为主要建设目标，重点在于融合物理配电网与信息网，利用先进IT技术提升配电网运维管理和用户服务水平，完成轻资产条件下的电网边缘内部状态感知、计算与优化控制等任务，最终实现配用电的分布式智能。

在这一阶段，配用电网基础设施建设已基本完善，在泛在物联网建设大背景下，现有配用电计算架构与海量、分布式数据资源及计算需求之间的不匹配已经成为配用电进一步智能化的主要矛盾。如何利用先进IT、通信、边缘计算等技术，开展适用于配用电网的智能化计算架构研究，进而实现物理配电网与信息网两网融合，成为重点工作目标。

1.2 配用电网和主网的差异化分析

电力系统主网是供电企业输电的主要网络，起到电力系统骨架的作用，一般指110kV及以上的输电线路。在城市电网系统中，主网的作用是连接区域高压电网。配网和主网在运行方面的差异主要体现在以下几个方面：

（1）电压等级不同

输电网是根据输电电压等级的不同分类，一般分为高压输电网(110kV~220kV)，超高压输电网(330kV~750kV)以及特高压输电网(1000kV以上)。配电网具有不同的分类标准，按照电压等级分为高压配电网(35kV~110kV)，中压配电网(6kV~20kV)，低压配电网(380V/220V)，若按照供电区域的用电特性可分为城市配电网、农村配电网和工厂配电网。

（2）接线方式不同

主网的接线与下一级电压网络相协调，有着较大的抗事故干扰能力，满足电力系统安全稳定的要求，同时，接线方式要考虑调度自动化、通信、安全自动、继电保护等控制系统配套建设协调发展。因此，主网的接线方式主要呈网状连接，闭环设计，闭环运行，一般分为无备用开式接线方式、有备用开式接线方式、简单闭式接线方式以及复杂闭式接线方式四种类型，供电可靠性高。

作为对比，配电网网络结构分支多而复杂，呈辐射状。正常运行时，配电网可分解为由多个唯一电源供电的辐射状网络，而在故障处理或符合调度时会出现弱环、

多电源等情况；另外，由于配电网生产运行和故障检修需要，其网络结构变化较为频繁。

（3）感知水平不同

目前，我国主网的SCADA系统发展较为完善，基本满足主网状态估计冗余度的要求。但是配电网沿途通过多个配电变压器向城市中心和居民区供电，节点数量众多，同时由于经济和地理原因，只能在配电网部分重要的变压器、开关以及联络开关处装有量测装置。因此，在配电网层面上的实时监控明显缺乏，造成量测系统冗余度不足而无法进行配电网状态估计，同时也造成涉及调度、保护、优化控制等高级应用的计算无法有效进行。

（4）面向对象不同

主网作为连接发电厂、变电站的载体，主要面向发电企业和电力公司，实现电能在地区间的有效传输。其承载的业务和计算需求也主要是面向发电企业供电、电力公司调度、检修、运维等需求。而配用电网作为连接电网和用户的载体，其不单面向电力公司配电、售电部门，更重要的是要直接面向工厂、园区、居民、电动汽车等广大用户，满足他们的用电需求和业务需求，其面临的计算场景更加广泛和复杂。

总而言之，配用电网与主网在规模、规划运行方式、感知水平、面向对象等方面都存在较大不同，其面临的业务场景、数据、资源和计算需求也有较大差异。这些都决定了配用电对计算架构的需求也与主网存在一定差别。

二、配用电网的智能化计算需求

通过对配用电网的发展历程回顾和分析可以看到，当前阶段，配用电网基础设施包括自动化建设已基本完善。在泛在物联网建设大背景下，现有配用电计算架构与海量、分布式数据资源及计算需求之间的不匹配已经成为配用电进一步智能化的主要矛盾。如何利用先进IT、通信、边缘计算等技术，开展适用于配用电网的智能化计算架构研究，进而实现物理配电网与信息网两网融合，实现数据的充分利用，实现配用电智能化进一步发展，促进三型两网企业建设，已成为配用电智能化的重点工作目标。

2.1 当前配用电网智能化计算面临的挑战

配电网点多面广、数据海量且分布分散，其感知水平和数据质量也和主网存在较大差距，同时大量分布式电源和电动汽车接入、源网荷互动、新型用户需求等各类新业务接入又对其计算、控制提出了新的需求。因此配用电网智能化计算面临较大挑战，主要分为以下几个方面：

（1）海量分布式数据源

配电网面向广大用户，点多面广，这就决定了配电网计算所面临的数据源也是海量且分布式的。尤其是随着泛在电力物联网建设，各类采集监控终端所获取的数据更是迅速增长，如何将这些海量分布式数据接入计算平台，对系统通信和处理都会造成巨大压力。

（2）物联覆盖率和数据质量

如第一章分析所言，当前配电网感知水平和主网还存在一定差距，且数据质量也同样存在问题。在目前的计算技术下，无法利用现有数据对配用电网进行全面有效计算。不对现有计算技术改进情况下，为了进行配用电智能化水平，势必要投入大量人力物力提升物联覆盖率和数据质量，对企业发展造成负担。

（3）智能化终端

以往的配用电终端设备更多承担设备状态采集、监控、传输以及简单的就地控制功能，而现在以及未来的配用电终端设备更加智能化，如智能电表、新型自动化终端等设备，其本身具备一定计算能力，这些设备的计算资源如何统筹、充分利用，以及它们如何与整体配用电网计算相结合，也是配用电网计算的一大挑战。

（4）多元化、新型业务

伴随公司“三型两网”建设深入，配用电领域涌现出越来越多的多元化的新型业务，如大量分布式电源和电动汽车接入、源网荷互动、新型用户需求等等。这些业务一方面对配用电计算能力提出了新的挑战，另一方面也对配用电终端设备提出了新的挑战。传统配用电设备功能单一，而如今各类新型业务需要的终端功能各不相同，甚至同一终端不同时间所需的功能模块也不相同。

2.2 配用电网智能化计算需求

为了应对当前配用电网智能化计算面临的挑战，配用电网亟需一套新的计算框架和相关技术满足配用电网智能化计算需求。主要可归纳为以下几个方面的需求：

（1）边缘计算需求

为应对配用电海量分布式数据接入和计算需求，缓解集中式计算通信和存储压力，需要采取边缘计算架构，将集中式计算转为分布式计算，将计算节点向数据源节点靠近转移。同时为了解决边缘计算收集哪些设备数据、计算哪些业务的问题，还需要对原有配电网进行有效划分，生成电网计算边缘。选取地理位置相近，同时电气联系较为紧密的馈线生成电网计算边缘，从而实现边缘内部各类业务功能的独立计算，实现边缘自治以及边缘与大电网协同互动。

（2）计算资源统一调度需求

在边缘计算架构下，各类分布式的具备感知、存储、计算、通信功能的边缘计算节点和配用电智能化终端如何进行计算资源同一调度，实现边缘计算资源的全局优化配置是配用电智能化计算的基础。通过云边协同平台构建，可提供对中心云和边缘云上的计算、存储、AI资源的集中管理、统一调度、统一部署、统一运维能力。通过云边协同平台，实现资源的统一管理、全局调度、资源漂移，并向电网应用提供统一接口。

（3）安全可靠的网络通信传输需求

配用电智能化和泛在电力物联网建设都对数据交互的及时性、安全性以及计算资源的可扩展性等提出了较高的要求，需要适用于智能配用电建设阶段要求的安全可靠的网络通信传输方法，实现云主站与各边缘之间资源共享、数据共享、智能协同。

（4）人工智能应用需求

当前配用电智能化计算面临感知能力不足和数据质量挑战，传统计算方法无法进行有效计算，而全面铺开感知设施建设有需要大量投资。借助机器学习等先进计算技术，有望实现少量测情况下的配用电智能化计算。同时人工智能技术在配电网运行分析、用户数据挖掘、电力市场等方面都有较为广阔的应用前景。

总而言之，在配用电智能化发展的当前阶段，伴随基础设施建设完善，智能化计算已成为配用电智能化的主要任务。但是配用电智能化计算面临着海量分布式数据源、物联覆盖率和数据质量、智能化终端以及多元化、新型业务等诸多挑战，为了应对这些挑战，亟需一套新的与当前配电网发展相匹配的配用电计算架构。本

白皮书提出采用了面向两网融合的智能配用电计算架构，基于分布式计算框架，通过电网边缘划分生成边缘计算物理实体，通过网络虚拟化保障端到端通信，通过云边协同平台进行资源统一调度管理，并最终通过人工智能进行赋能，从而最终实现配用电分布式智能计算。

三、架构概述

3.1 面向两网融合的配用电多级边缘物理架构

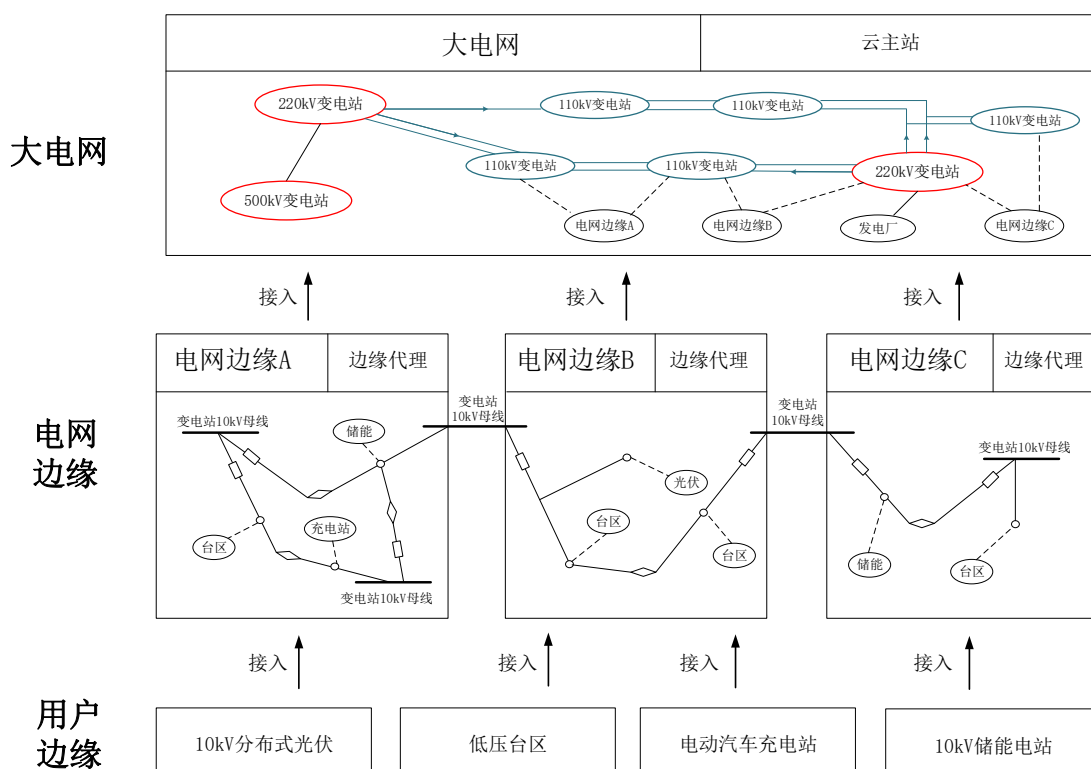


图3-1 配用电多级边缘物理架构

电网具有分层分区结构，纵向可按照电网等级、网架结构分层，横向可按照电气距离、地理距离分区，自上而下可分为大电网、区域配电网和接入配电网的用户。依据电网分层分区结构，可将电网划分为三层边缘架构，每层包含若干边缘，每个边缘即一块电网区域。电网的三层边缘，从上向下分别为大电网、电网边缘以及用户边缘，如图3-1所示。

基于上述架构，通过边缘计算实现边缘内部的监测、计算、故障处理、优化控制等自治功能。下级边缘向上级边缘上报整体状态信息和关键告警信息，上级边缘向下级边缘下达控制指令。通过边缘内部自治和边缘间协同，实现配用电分布式智

能。

3.1.1 边缘类体系标准化

3.1.1.1 大电网

大电网对应的是电力系统发输变配用中的输变电部分，是由变电站和输电线路组成的区域性主干网，如图3-2所示。其对应的电压等级主要有1000kV、500kV、220kV、110kV和35kV。

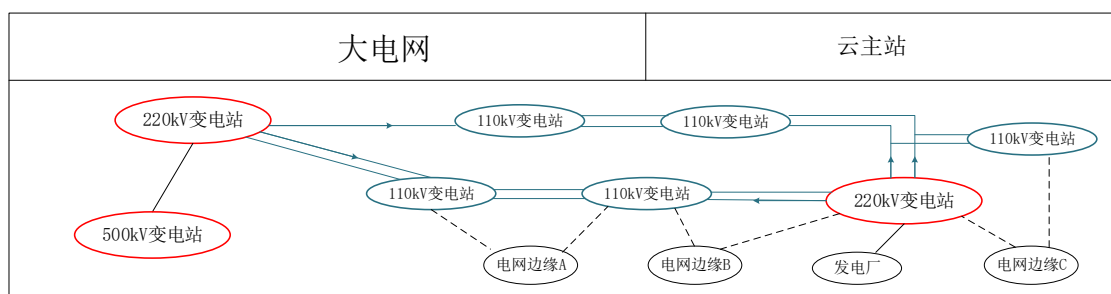


图3-2 大电网示意图

3.1.1.2 电网边缘

电网边缘对应的是电力系统中的配电部分，承接大电网，是指由变电站10kV母线、配电线路（10kV馈线）、配电变压器、开关（环网）柜、柱上开关、电缆分支箱、开闭所等电力设备以及接入配电网的用户、台区、光伏、储能等组成的城市中压配电网区域，如图3-3所示。其通过变电站内10kV母线接入大电网，作为大电网的边缘存在，因此命名为电网边缘。电网边缘与大电网的分界面是220/110/35kV变电站10kV母线和10kV出线开关。

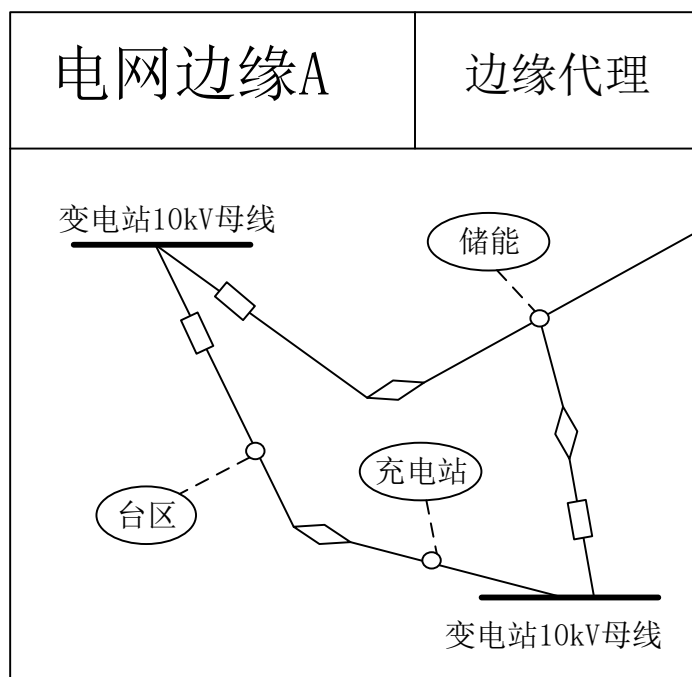


图3-3 电网边缘示意图

3.1.1.3 用户边缘

用户边缘对应的是电力系统中的用电部分，是指经由配电变压器接入配电网的用户，其涵盖了台区、充电站等用电用户，也涵盖了分布式光伏站、储能站等发储用户。用户边缘与电网边缘的分界面是配电变压器。

3.1.2 边缘模型描述

3.1.2.1 边缘容器

为便于智能配用电多级边缘体系的推广实用，需按照电网统一信息模型（CIM模型）对各级边缘进行统一建模。CIM中的设备容器代表了其它容器和/或设备对象的聚集，CIM中已有的设备容器及其关系如图3-4所示，主要包括变电站（Substation）、电压等级（VoltageLevel）、间隔（Bay）等。某一级边缘是下级边缘与本级边缘设备的集合，对应CIM模型中的设备容器概念。

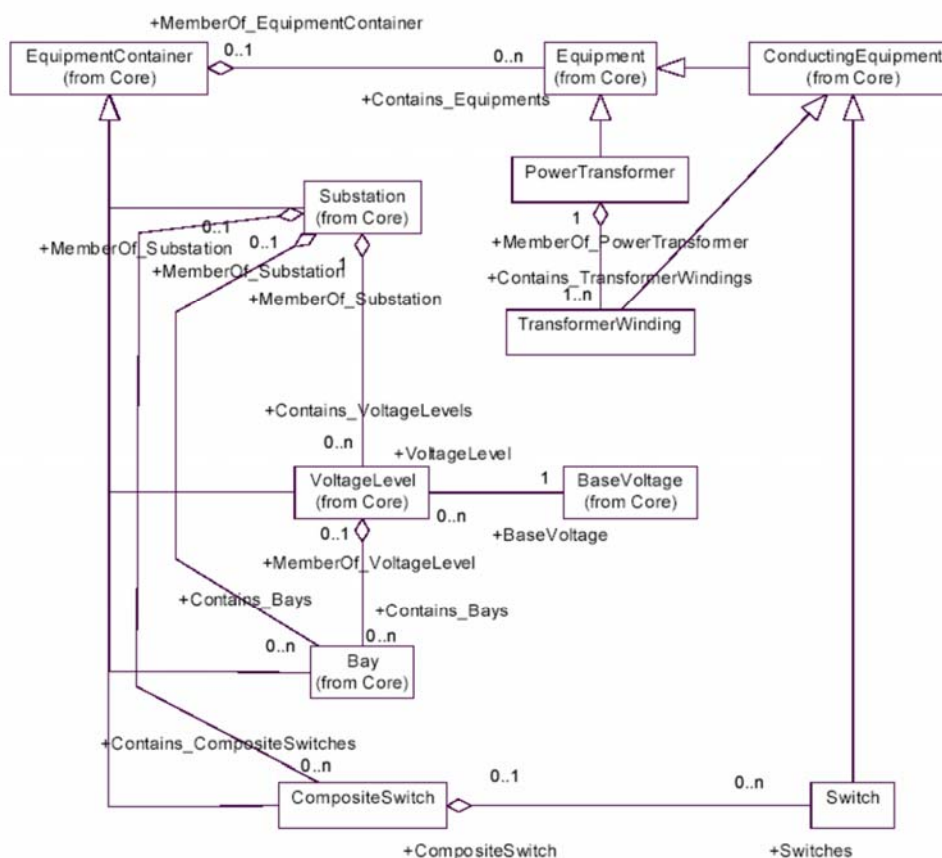


图3-4 CIM模型中已有的设备容器及其关系

因此可继承EquipmentContainer/设备容器类，增加PowerNetworkEdge/电网边缘容器类以及UserEdge/用户边缘容器类，并建立边缘容器类与已有电力设备的关联关系，完成边缘容器的模型建立。

3.1.2.2 边缘版本

边缘的版本一般是固定的，如大电网对应某一区域级主网，用户边缘对应用电末端设备。但电网边缘是由一组馈线组成的，其划分方式受电网拓扑连接关系、电网运行状态影响。针对不同的典型运行方式，设置电网边缘不同版本，在实际电网运行时，根据当前状态选取对应的电网边缘版本。若电网发生较大变动，如新增大负荷台区、联络线改造等，则对应增加新的电网边缘版本。

3.1.3 边缘功能描述

基于边缘物理划分，确认各级边缘代理所负责实现的业务功能。大电网代理（即

云主站)主要负责大电网的状态监控、潮流计算、调度控制等功能。电网边缘代理主要负责电网边缘内部的状态监控、潮流计算以及调度控制等功能,同时负责用户边缘的状态监控、计算和管理功能,通过统筹优化向用户边缘下发控制指令。用户边缘则主要负责终端信息的采集和执行。

3.1.4 边缘交互内容描述

大电网主要与电网边缘进行交互,向电网边缘下发供电能力信息、下达负荷控制目标与指令,并对电网边缘状态进行确认。

电网边缘向大电网上送数据包括电网边缘等效负荷运行数据,电网边缘内部开关变位、故障告警等异常数据、故障定位、隔离与恢复方案、线损优化等计算结果数据;向用户边缘下发用电控制目标,对用户边缘状态进行确认;与同级其它电网边缘之间,交互存在的联络线信息以及两个电网边缘之间的边界调整信息。

用户边缘主要与电网边缘与终端进行交互。采集终端运行和告警信息,并向电网边缘上送配变交流采集、低压分路开关、用户端采集的异常数据,用户停复电、智能配变终端、充电桩异常等告警信息;向终端下发控制指令。

3.1.5 边缘划分

从各级边缘定义来看,各级边缘边界明显,可自动形成各级边缘。但在电网边缘层级,由于现有配电网结构复杂,相互交织,按照给定边界形成的电网边缘往往非常庞大复杂,需要按照一定原则对其进行进一步划分,形成若干较为独立的电网边缘。以地理位置相近为约束,同时电气联系较为紧密,能够实现一定自治功能为原则,基于实际操作和运行数据,通过联络开关分析与定级实现电网边缘的进一步划分。

3.2 IT支撑架构

3.2.1 IT支撑架构和电网边缘对应关系

为支撑智能配用电业务运行,需要对现有的云、边、端的物联网架构体系进行调整和设计,以满足智能配用电业务在计算、存储、网络、边缘管理和AI支撑等方面的需求。为此,设计了如图3-5所示的云、边、端IT支撑架构,支撑电网边缘智能应用运行。

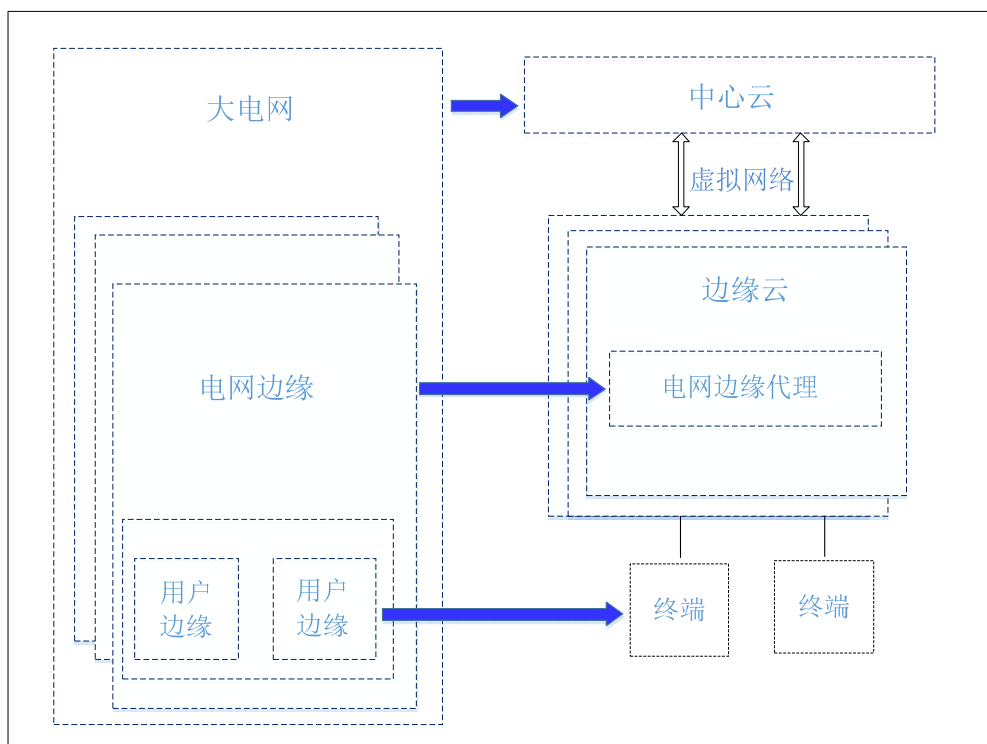


图3-5 云、边、端IT支撑架构

与大电网、电网边缘和用户边缘相对应的IT支撑架构对象为中心云、电网边缘代理和终端。逻辑上，一个大电网由一套IT架构进行支撑，一个电网边缘由一个电网边缘代理进行支撑，电网边缘代理运行于边缘云上。电网用户边缘对应于电力物联终端，它们自行管理业务应用所需IT资源，通过各类配用电终端连接方式与、电网边缘代理开展数据交互通信。

3.2.2 面向两网融合的云边互动IT支撑架构

面向两网融合的云边互动的IT支撑架构由中心云、边缘云、终端及其上运行的各类应用组成，提供中心云、边缘云的计算、存储、网络、AI等各类资源的统一资源调度、统一资源编排、统一部署、统一运维支撑。

在组织结构上，IT支撑总体架构包含网络虚拟化、云边协同平台资源统一管控和云边协同应用服务框架三部分，其架构示意如图3-6所示。

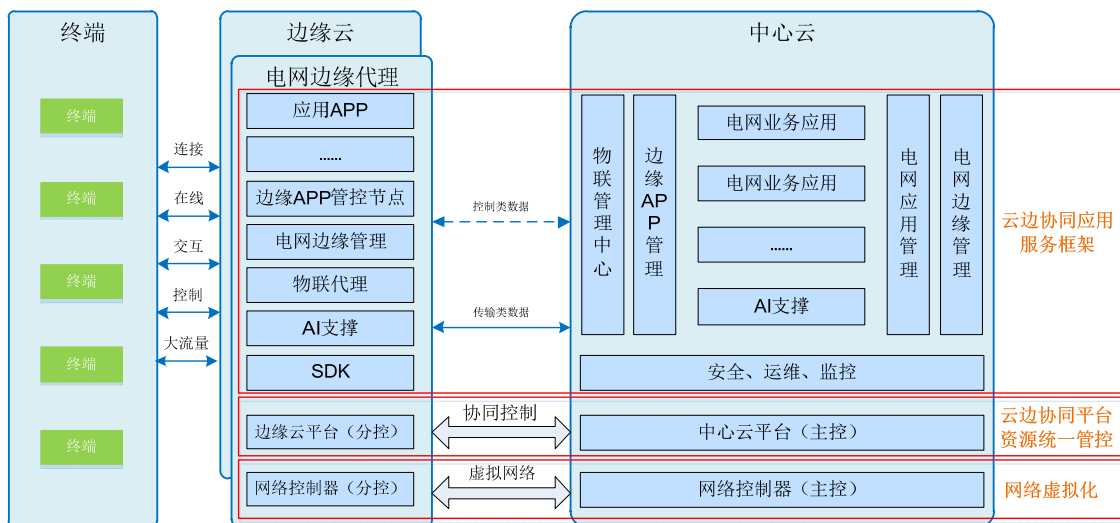


图3-6 IT支撑总体架构示意图

网络虚拟化部分提供涵盖中心云、边缘云及终端的端到端通信能力。通过采用网络虚拟化技术，将物理网络切分为控制类业务平面和传输类业务平面，满足电网各类业务不同的传输需求，并为云计算、存储系统和云边数据应用提供基础网络支撑。

云边协同平台资源统一管控部分提供对中心云和边缘云上的计算、存储、AI资源的集中管理、统一调度、统一部署、统一运维能力。通过部署于中心云与边缘云上的管控平台，实现资源的统一管理、全局调度、资源漂移，并向电网应用提供统一接口。

云边协同应用服务框架提供云边之间的物联管理、AI交互、电网边缘管理、电网应用管理、电网应用开发支撑等能力。通过将基础服务层、支持服务层和应用支持层封装为标准软件开发工具包（SDK），支撑电网业务应用使用和开发、应用运行监控、电网边缘管理等应用。

3.3 基于两网融合的分布式智能架构

3.3.1 边缘协同智能模式

大电网与电网边缘协同模式：电网边缘与大电网互动时，由电网边缘对上级大电网提出电网边缘的供电与业务计算需求，大电网经过统一优化与资源调配，满足电网边缘供电需求，并将相关控制策略指令下发至电网边缘。在**正常运行场景**下，大电网根据接收的电网边缘状态信息以及主干网运行状态进行源网荷协同统筹优化，

并将优化控制策略下发至各电网边缘。电网边缘接收到控制策略后进行内部源网荷协同优化。电网边缘在**故障运行场景**下，由电网边缘自身进行处理计算，得到故障定位结果，并进行内部的故障隔离、负荷转供、发用电调整等操作。在**紧急运行场景**下，电网边缘内部实施切负荷等操作，更严重情况下，应将电网边缘从大电网切除以防止故障扩散。

边缘间协同模式：对于电网边缘之间互动，主要考虑在边缘故障失效情形下，大电网控制指令下发后，通过电网边缘设备信息的采集与控制在电网边缘之间协作完成优化与资源调配功能。在正常运行场景下，每个划分的电网边缘本身是一个相对独立供电区域，其与本级其他电网边缘间一般少有联络，每个边缘内的馈线之间一般都有联络开关，这样在边缘区域内出现故障时，故障处理方案一般也是在本电网边缘内如何隔离故障和转移负荷，无需与本级其他电网边缘间有太多的互动。但是在遇到单个电网边缘无法处理的故障时，电网边缘在大电网的控制指令下需要与本级其他相邻电网边缘实现互动，通过联络开关状态的转换，进行非故障区域的负荷转供。

3.3.2 边缘智能实现方法

3.3.2.1 动态拓扑获取方法

电网边缘动态拓扑获取主要分为边缘拓扑确定和边缘拓扑校验两步。边缘拓扑确定的主要对象为变电站出线开关、馈线上的分段开关与馈线间的联络开关，这些开关会由于电网边缘故障转供、计划检修、弹性负荷投切等原因而动态变化。通过电网边缘代理与配电自动化开关装置进行交互，实时监测电网内各开关的属性。配电自动化开关装置在接收查询命令后，将开关属性返回至电网边缘代理。在上述基础上，边缘拓扑校验旨在基于高级量测体系固定频率采集到的数据，利用软件方式（**Software Based**）完成电网边缘运行态拓扑的反向校验。电网边缘中开关的状态包含闭合、断开两类标签，开关状态校验即为一个二分类问题。可以使用无需先验物理信息和人工现场校验的判别式算法（如神经网络）对拓扑信息进行反向校验，算法需要使用数据清洗、特征提取等技术从历史数据中提取判别式模型的样例，并利用历史样例训练分类模型使其收敛。

3.3.2.2 动态参数辨识方法

电网边缘参数辨识的主要对象为电网边缘内配电线路的三相阻抗与变压器分接头的位置。

电网边缘内的配电线路的三相阻抗辨识是以线路上电气元件连接关系为基础，利用采集电网边缘内配电变压器运行数据样本，通过数据驱动的方法得到线路阻抗参数的计算结果。参数辨识的线路段首末端必须配置量测装置，量测装置采集的数据包括但不限于线路两端配电变压器的三相电压序列、电流序列、有功序列、无功序列、温度、湿度。电网边缘代理需要为这些多源异构数据提供接入、存储和分析的环境，并且需要提供对数据进行有效处理与管理的工具。考虑到在参数辨识过程中存在实践未知，并且获取证据的过程有误差，因此需要解决这些因素带来的不确定性。目前与电力生产管理系统中存储的线路参数多为静态参数，未考虑到极端天气或运行状态下线路参数的变化，基于人工智能的电网边缘参数辨识方法需要考虑综合环境对线路阻抗参数的影响，考虑的环境因素包括但不限于配电网运行状态、外部环境温度、外部环境湿度和线路老化。在运行环境和运行状态可观测的情况下，可以使用动态贝叶斯网络（Dynamic Bayesian Network, DBN）等方法来构建概率图模型，将真实情况转化为概率分布完成不确定性的量化，完成线路动态物理参数的辨识。

电网边缘内的变压器分接头位置辨识应根据电网边缘内各级变压器变比和高压、低压侧实际采集的电压序列对分接头位置进行计算。通过线性回归等数据驱动的方式，依据电网边缘内的各级变压器两侧传感器采集的电压序列对变压器高压、低压侧变比进行修正，从而实现对电网边缘内各变压器分接头位置参数的动态辨识。

3.3.2.3 状态计算方法

在电网边缘中，内部实现区域自治，能够实现边缘内状态估计。但对于区域配电网系统，其量测量配置有限，边缘内部为不可观状态，无法使用传统状态估计器直接进行状态估计。若采用伪量测方法进行状态估计，精度较低无法满足实际运行需求。

配电网状态估计的本质是一个非参数非线性的回归问题，可以采用多元非线性拟合能力较强的神经网络。神经网络用于配电网状态计算既可以在量测量缺失的情况下回归出可观测变量与待求变量间的非线性关系，并且可以通过集成学习的方式

实现在线计算。

3.3.2.4 优化控制方法

电网边缘作为整体而言，应具备执行上级电网即大电网下发指令的能力，如调整电网边缘的整体负荷等。同时，电网边缘应具备控制其内部开关、配变、环网柜等设备的能力，以及控制如台区、储能站、光伏站整体发用电特性的能力。

基于边缘交互得到的状态信息、告警信息以及拓扑辨识、参数辨识与状态估计结果，进行边缘内部的自治控制，主要包括故障自愈与优化控制。边缘内部发生故障时，电网边缘基于告警信息和状态信息，实现自动定位、隔离边缘内部故障、生成转供策略并恢复供电。边缘处于正常运行状态时，电网边缘基于拓扑辨识、参数辨识和状态估计结果，协调控制边缘内部源网荷储，实现边缘优化运行。

3.3.3 边缘智能应用

电网边缘应用可分为基础管理类APP、采集检测类APP、控制执行类APP和应用分析类APP。

基础管理类APP主要完成边缘版本管理、边缘连接通道建立与互操作管理、计算与存储资源管理、边缘APP自动下发与部署管理、APP配置与定值管理、日志管理等功能。其为边缘采集监测与高级电力应用分析提供基础环境，可极大降低数据管理、配置管理、APP间数据交互等基础开发工作量。

采集检测类APP为电网边缘与数据监测设备或下级边缘直接交互，进行电网设备运行数据采集监测的APP，是电网边缘计算数据源头与标准数据规约清洗的功能载体。采集监测类APP通过对各种数据采集规约的实现、数据采集点表个性化配置与标准测点模型接口对接，保证电网设备运行数据以标准化方式实现末端数据融合，为应用分析类APP进行计算分析提供数据基础。

控制执行类APP主要包括保护动作和控制执行类，保护动作类内置保护动作逻辑，当超过阈值时控制开关自动跳开；控制执行类接收上层应用分析类APP指令，控制自动化开关的分合以实现用电终端启停控制、故障隔离、负荷转供等功能。

应用分析类APP包含基础分析和高级分析。基础分析类APP主要进行电网边缘的基础性分析计算，包括电网边缘的拓扑辨识、参数辨识与状态估计。高级应用类APP主要进行电网边缘的故障处理、控制与优化功能，包括负荷预测、清洁能源消纳、源网

荷储优化互动、故障定位隔离、负荷转供、配网重构等应用。

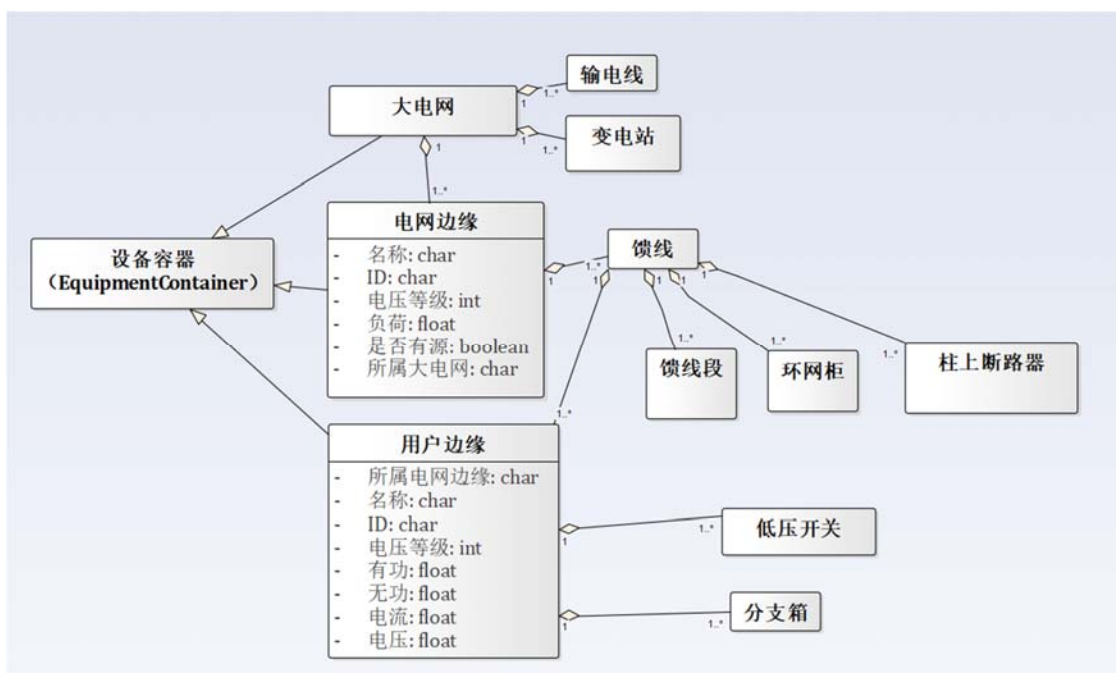
四、关键技术

4.1 配用电多级边缘物理架构实现关键技术

4.1.1 边缘模型标准化技术

边缘标准模型继承自CIM模型中的设备容器类（EquipmentContainer），按照电网三级架构划分，新建大电网容器类（Grid）、电网边缘容器类（PowerNetworkEdge）以及用户边缘容器类（UserEdge），如图4-1所示。

大电网容器类主要由变电站、输电线路以及电网边缘聚集而成。其中变电站和输电线路组成大电网网架，电网边缘相当于大电网负荷节点。电网边缘是若干馈线的集合，馈线是由馈线段、环网柜、柱上开关等聚集而成。其中馈线段、环网柜以及柱上开关组成区域配电网网架。用户边缘由分支箱、低压开关等聚集而成。其中分支箱、低压开关、低压线路段组成用户内部网架，用户边缘是用户的负荷节点。



4.1.2 边缘划分技术

电网边缘的划分须同时兼顾局部自治、与大电网以及用户边缘良好互动的要求，划分出若干在电气距离上相近，地理距离上相近，且能够实现一定自治功能的馈线

簇，使配电网运行于安全、可靠、智能、高效的最佳状态。

配电网点多面广，网架结构复杂，馈线规模巨大，可以看作一个描述馈线之间耦合关系的复杂网络。基于复杂网络社区检测的思想，为了划分出由馈线簇构成的配电网边缘，将配电网抽象为复杂网络无向图模型，通过二元组 (V, E) 定义。其中 V 为节点集，由配电网中的馈线抽象而成； E 为边集，由配电网中的联络开关抽象而成， E 的权重由联络开关动作次数抽象而成。据此将配电网边缘等效为网络中的社区，将配电网边缘划分过程等效为网络社区检测的过程。联络开关动作次数的获取方式：馈线自动化开关装置自动读取、配网运行人员操作开关记录或对实际配网拓扑结构建模之后，分析配网 N-1 安全校验负荷转供情况来确定联络开关动作次数。

在几种电网典型运行方式（如季节性调整）下，确定联络开关动作次数来量化馈线之间的紧密程度。采用 Infomap 等复杂网络社区检测算法，并以地理位置相近为约束，把配电网中联系紧密的馈线划为一个电网边缘，使其在典型运行方式下能实现区域的自治功能。

在电网边缘的初始化划分之后，需要对划分出来的电网边缘进行校验，检验其是否满足稳定可计算区域的要求。校验方法包括：在划分出来的电网边缘内进行 N-1 安全校验，检验该电网边缘的负荷转供能力是否满足边缘自治的要求；或者基于专家、实际运行人员的经验判断该电网边缘的划分是否满足电网安全稳定运行要求。

4.2 IT 支撑架构实现关键技术

4.2.1 网络虚拟化

采用中心主控和边缘分控相结合（1+N）的虚拟网络控制架构，通过在物理网络平面上切分出业务控制平面和业务传输平面，为泛在电力物联网应用提供端到端的通信能力保障支撑。

4.2.1.1 网络总体架构

如图 4-2 所示，分别位于中心云、边缘云上的网络控制器（主控、分控）是网络的控制中心。向上，它们以 RESTFUL 接口、NETCONF 协议等方式，为北向应用提供虚拟网络通信能力；向下，它们使用 OpenFlow 等网络通信协议，将北向应用的网络需求转化为控制转发策略，交付设备执行。

在网络层面，传统通信网络被划分为物理网络和虚拟网络。其中，物理管理平

面直接构建于物理网络之上，负责完成交互数据的实际传输；虚拟网络切分为控制类业务和传输类业务两个平面，分别为业务应用提供控制类数据和传输类数据的端到端通信通道。

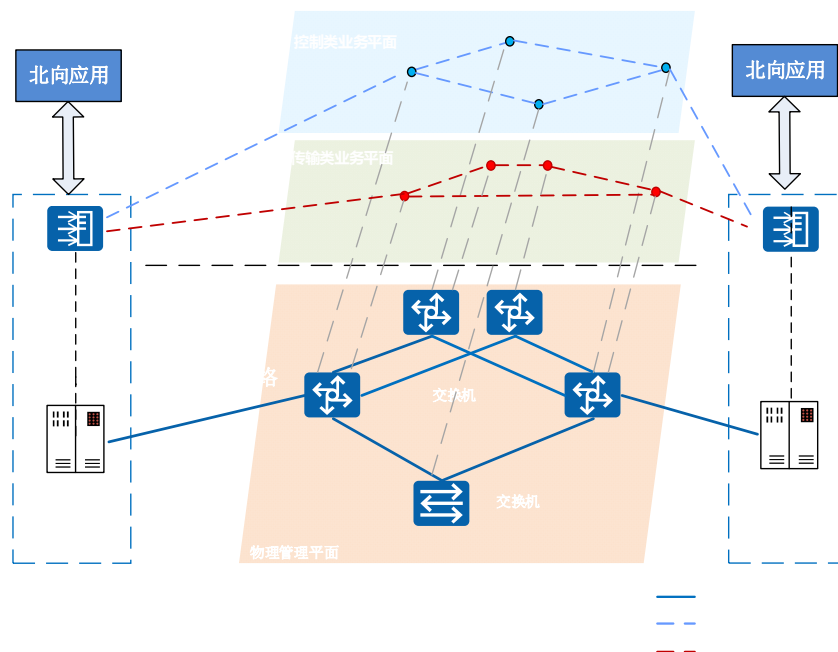


图 4-2 网络总体架构

虚拟网络对北向应用提供的对外服务接口包括网络管理控制前台、云边平台运行支撑接口和业务应用支持接口等三类。

（1）网络管理控制前台：主要负责对整个网络运行进行管理和展示。包括对设备的增删改查运维管理；对虚拟网络组件的生命周期管理；对网络切片、虚拟网络拓扑、虚拟网络组件、网络状态监控、物理网络拓扑等进行管理；在链路异常或链路质量不符合需求时候的手动切换操作等。

（2）云边平台运行支撑接口：主要负责网络对象用户接口，实现云平台与网络虚拟化平台的无缝对接。如利用网络插件 **Neutron plugin**，接管云计算平台 **Openstack** 的网络基础设施，将云平台的网络组件功能替换为 **Neutron plugin** 进行管理。

（3）业务应用端到端通信接口：主要负责提供面向电网业务应用的端到端控制类、传输类业务应用网络通道接口。

4.2.1.2 物理管理平面构建过程

传统网络设备的控制和转发能力都存在于每一台交换机或路由器上，由他们组合在一起完成网络通信能力。与传统网络通信方式不同，虚拟网络的目标是控制与转发的分离。即，将网络控制能力全部集中在控制器，网络设备仅负责转发。这一能力的实现主要通过配置的方式完成，其过程概述如图 4-3 所示。

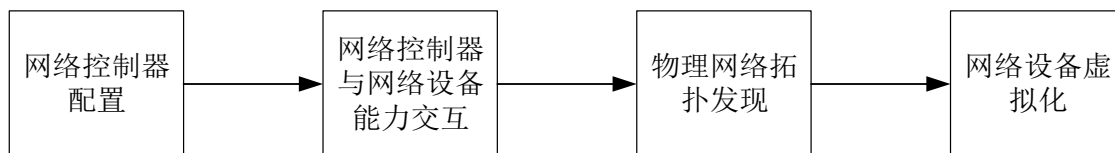


图 4-3 物理管理平面构建过程

(1) 网络控制器配置：完成网络控制器及初始化，网络控制器与网络设备的连接。

(2) 网络控制器与网络设备之间能力交互：网络控制器（主控、分控）使用网络控制协议原语与受管网络设备进行能力交互，获取受管设备的能力信息。后接管网络设备。

(3) 物理拓扑网络发现：网络控制器使用链路发现协议（如 LLDP 等），获取设备连接信息。根据设备连接信息，生成并更新管理网络的物理拓扑。

(4) 网络设备虚拟化：基于物理网络拓扑信息，网络控制器对网络进行虚拟化，生成基于物理网络的虚拟网络、虚拟拓扑、虚拟路由等信息。

在完成物理平面构建后，网络控制器即具备了对物理网络设备及虚拟设备和虚拟网络资源的配置管理和路由转发控制能力。

4.2.1.3 业务应用平面构建

物理平面构建完成后，形成物理网络和虚拟网络。进一步的，根据电网业务应用特性，网络控制器（主控、分控）采用网络切片技术，将虚拟网络切分为控制类业务平面和传输类业务平面，其过程概述如图 4-4 所示。

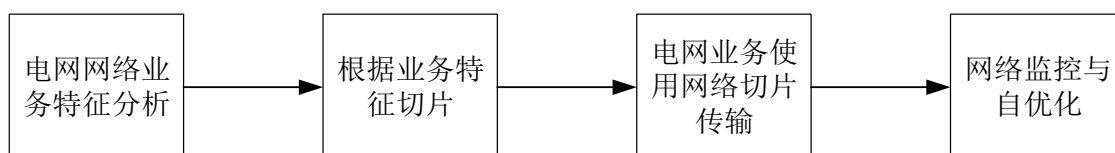


图 4-4 业务应用平面构建过程

(1) 电网业务特征及需求分析：分析配用电应用场景，将电网网络传输需求归

纳为控制类数据和传输类数据。

(2) 链路切分：根据电网业务特征分析，网络控制器根据将物理网络，切分为控制类业务平面和传输类业务平面，将端到端通信涉及的接入、汇聚、核心等资源进行切分，形成逻辑隔离的控制类业务和传输类业务两个通信平面。

(3) 电网业务数据传输：电网业务及控制数据使用不同的网络切片进行传输。

(4) 网络监控与优化：网络控制器（主控、分控）使用网络控制协议监控受控网络设备运行状态，根据网络状态变化情况对切片进行更新调整。

4.2.1.4 端对端的通信过程

业务平面构建完成后，业务传输及控制便可以承载在构建的业务网络平面之上，进行端到端通信。一次具体的端到端通信过程概述如图 4-5 所示。

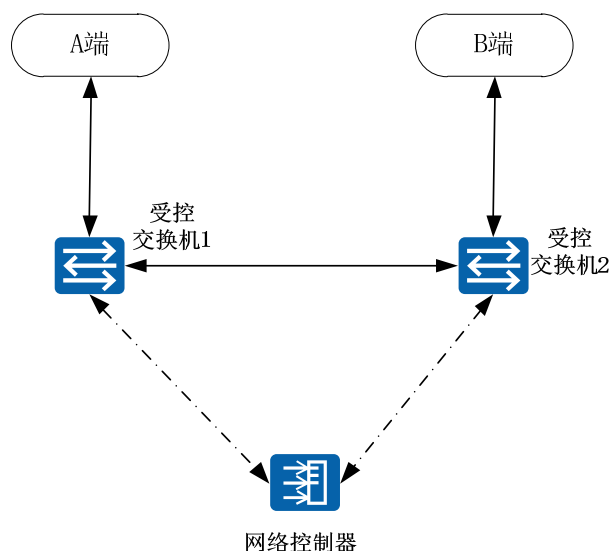


图 4-5 端对端的通信过程

(1) 完成切片的网络控制器：控制器已经完成对物理平面、业务应用平面构建，具备了提供端到端网络通信控制的能力。

(2) 如图所示，假如 A、B 两个应用要进行端到端通信，则 A 调用网络接口，将数据发送至受控交换机 1。网络控制器根据虚拟网络切片控制策略，生成转发控制规则，交付受控交换机 1 执行。

(3) 受控交换机 1 根据转发规则，将数据包转发给受控交换机 2。受控交换机 2 查询转发规则，若存在转发规则则将数据包转发至端 B，若尚未建立转发规则，

则同样向网络控制器申请转发规则。

(4) 以此循环，直至实现 A、B 之间端到端通信。

4.2.1.5 关键技术及工具

SDN 和 NFV 是实现网络虚拟化支撑的两项重要技术。其中，SDN 使用 OpenFlow 解决了如何由控制层把 SDN 交换机所需的用于和数据流做匹配的表项（流表）下发给转发层设备的问题，更好地实现了对分散部署的 SDN 受控交换机的集中化管控。NFV 路由的构建过程仍采用传统网络的路由交换方式进行，网络域之间通过诸如 BGP、RIP、IS-IS 协议进行路由信息交换。即，NFV 除了可以在 SDN 环境（网络设备具备控制与转发能力分离）环境下搭建虚拟网络，也可以在传统网络设备（控制和转发能力都存在于每一台交换机或路由器上）环境下搭建虚拟网络。更多关于 SDN 和 NFV 的内容见附录。

4.2.2 云边协同平台资源统一管控

云边协同平台资源统一管控对中心云与边缘云间、边缘云间的各类资源进行协同管理，实现对计算、存储及 AI 资源的统一资源调度、统一资源编排、统一部署、统一运维能力，并提供统一的各类资源管理接口。

云边协同平台资源统一管控主要由中心云、边缘云以及连接它们之间的虚拟网络组成，如图 4-6 所示。中心云计算管理主控中心通过虚拟网络支撑，将分布于各个边缘云上分散的 CPU、内存、存储等资源构建成为一个统一的平台资源集合，实现对中心云对平台资源的统一管控。边缘云作为分控节点，承担边缘云上计算资源的管理任务。中心云和边缘云在统一通信网络平台的支撑下，以“1+N”的结构，协同联动，使云中心和边缘具备服务漂移、资源配置、控制、安全防护、监控告警等能力，为电网业务应用提供服务支撑。

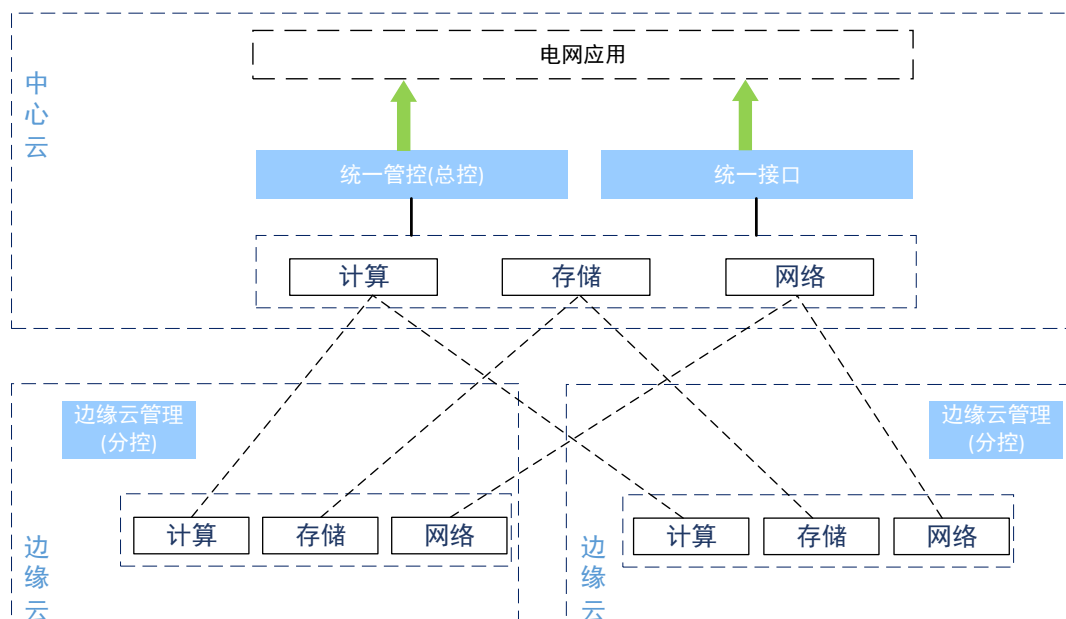


图 4-6 云边协同平台资源统一管控示意图

4.2.2.1 云边协同计算架构初始化过程

中心云通过将云计算的架构、功能、管理、接口等关键能力延伸到边缘云计算平台，实现系统内各类资源的统一管控，实现资源的统一管控。其能力构建过程概述如图 4-7 所示。

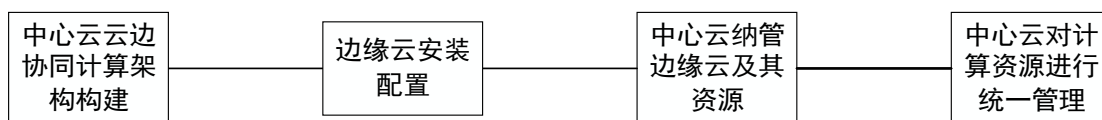


图 4-7 计算架构初始化示意图

(1) 云边协同计算架构首先将中心云、边缘云的 CPU、内存等资源通过配置纳入统一管控，完成云边协同计算架构构建。

(2) 边缘云完成云管系统的安装配置，实现计算结点初始化、计算资源初始化。

(3) 边缘云加入云边协同计算架构，中心云接收边缘云的加入，并纳管边缘云及其资源，将其计算资源加入统一资源池。

(4) 中心云完成边缘云及其资源的纳管后，对资源进行统一管控，进行资源的统一调度、统一编排、统一部署、统一运维。

4.2.2.2 计算资源漂移流程

计算系统在发生网络故障、硬件故障等情况下，为保障业务应用的连续性，边

缘云上承载的计算、存储、应用等资源需要转移到可用的资源上运行，这一过程称为漂移。在中心云上的主控中心控制下，边缘云的漂移过程简述如图 4-8 所示。

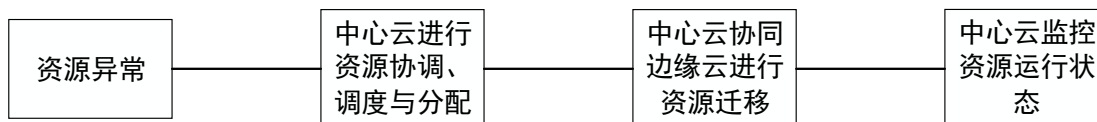


图 4-8 计算资源漂移流程示意图

(1) 中心云和边缘云实时监控资源运行状态在资源异常时决策进行边缘资源漂移。

(2) 中心主控进行资源协调，根据资源的类型数量进行资源的调度与分配。

(3) 中心主控调度相应的资源，并迁移资源的控制、配置、监控、安全管理权限，即与漂移应用适配的资源管理权限。

(4) 中心主控实时监控资源漂移完成后的目的资源运行状态，确认迁移后资源运行状态正常，资源占用在正常阈值范围，结束资源漂移过程。

4.2.2.3 统一数据库存储初始化过程

针对电网的数据特征，将其分为边缘云局部数据和配用电全局数据两类。对边缘云局部数据，使用传统的云、边平台进行存储处置，采用分布式文件存储、块存储、对象存储的现有的存储方法解决。对配用电全局数据，考虑电网的数据特征及广域网络的带宽限制，使用云边统一数据库存储平台进行存储处置，这样既能够满足电网的业务需求，也能减少对广域网络带来的通信压力。统一数据库存储平台架构如图 4-9 所示。

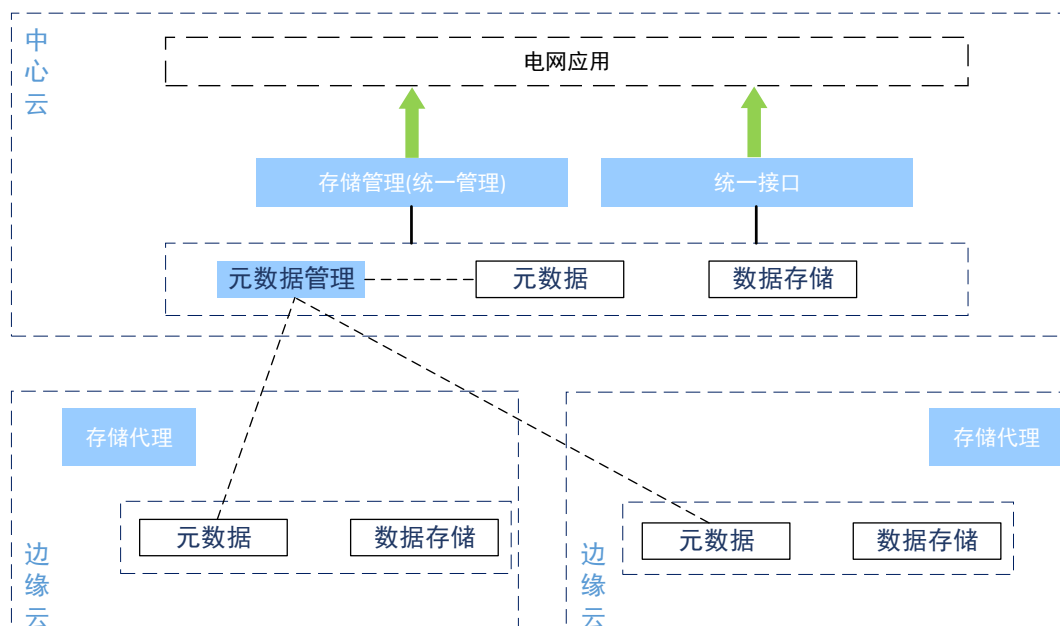


图 4-9 统一数据库存储平台架构

统一数据库存储平台中心云统一管理全局数据，提供统一接口给应用，各个边缘云上的存储代理管理本地数据，并提供接口给边缘云应用，通过本地接口访问任意位置存放的数据，实现访问本地化，数据全局存放。中心云的存储管理模块按照数据的特点进行数据的合理调度与分配，将数据调度到离访问者最近的位置。

用于描述存储数据的位置等信息的信息被称为元数据，为了解决网络拥塞、中断带来的数据不能使用的单点故障，统一数据存储平台在中心云和边缘云上都部署元数据。当发生网络故障时，由于所有边缘云上均保存元数据信息，应用仍能够通过边缘云上的存储代理使用本地元数据访问全局数据。待网络恢复后，与中心云同步更新最新的元数据便可。

统一数据库存储平台构建过程概述如图 4-10 所示。

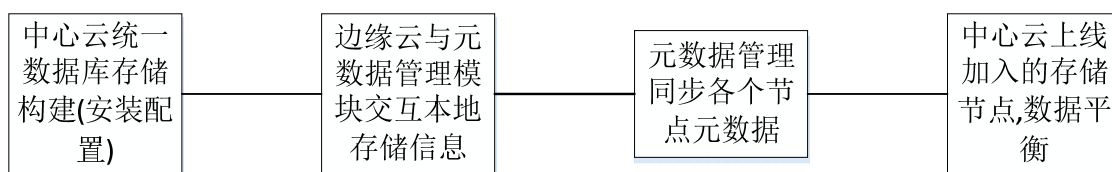


图 4-10 统一数据库存储平台构建过程

(1) 中心云首先构建数据库存储系统，然后进行边缘云数据库存储代理的构建及其初始化。同时，边缘云也可以在本地数据库存储系统构建完成后，加入云边协同计算架构。

(2) 中心云安装配置统一数据库系统并进行存储空间的初始化。在加入统一数据库存储平台前，边缘云需进行数据管理即存储代理的安装，配置元数据存储，配置与初始化本地存储空间等。

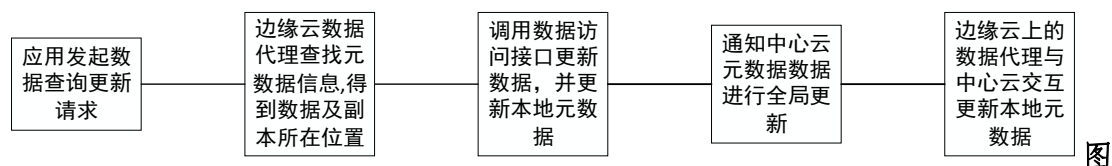
(3) 边缘云安装配置完成后，存储代理管理本地数据库系统，向应用提供本地接口。

(4) 边缘云与中心云元数据管理模块交互元数据信息、本地存储空间及占用信息，实现中心云存储系统获取全系统数据库信息。

(5) 中心云与边缘云同步元数据信息，中心云发布元数据信息，边缘云更新元数据信息至数据存储系统上。

4.2.2.4 统一数据库存储数据更新及元数据同步过程

统一数据库存储平台为应用提供统一接口进行数据的查询、更新、备份、恢复、监控等，为电网业务应用提供分布式数据库系统支撑。中心云数据库管理系统进行元数据的同步，数据备份容灾，全局数据平衡，其实现过程概述如图 4-11 所示。



4-11 统一数据库存储数据更新及同步过程

(1) 电网业务应用需要查询并更新数据时，调用本地的数据存储代理提供的数据库访问接口。

(2) 数据存储代理查询本地元数据，根据应用的数据请求属性，获取数据及其副本的所在位置等相关信息。

(3) 边缘云数据存储代理使用元数据信息，连接相应的边缘云上的数据存储节点，查询并更新数据。根据情况，更新本地元数据信息。

(4) 边缘云数据存储代理与中心云数据存储管理系统交互元数据的更新，中心云数据存储管理根据元数据更新情况在全局范围内发布新的元数据。

(5) 其它边缘云上的数据代理接收中心云发布的元数据更新信息，更新边缘云本地的元数据。

4.2.2.5 关键技术及工具

分布式云平台运行环境构建技术已较为成熟，主要包括基于 OpenStack 的分布式云平台实现技术和基于 Kubernetes 的分布式云平台实现技术，更多详细内容见附录。

4.2.3 云边协同应用服务框架

云边协同应用服务框架由基础服务层、支持服务层和应用支持层组成，这些服务被封装为标准软件开发工具包（SDK），电网业务应用使用软件开发包中封装的标准应用开发接口进行应用开发、应用运行监控、电网边缘管理等。云边协同应用服务框架示意图 4-12 所示。

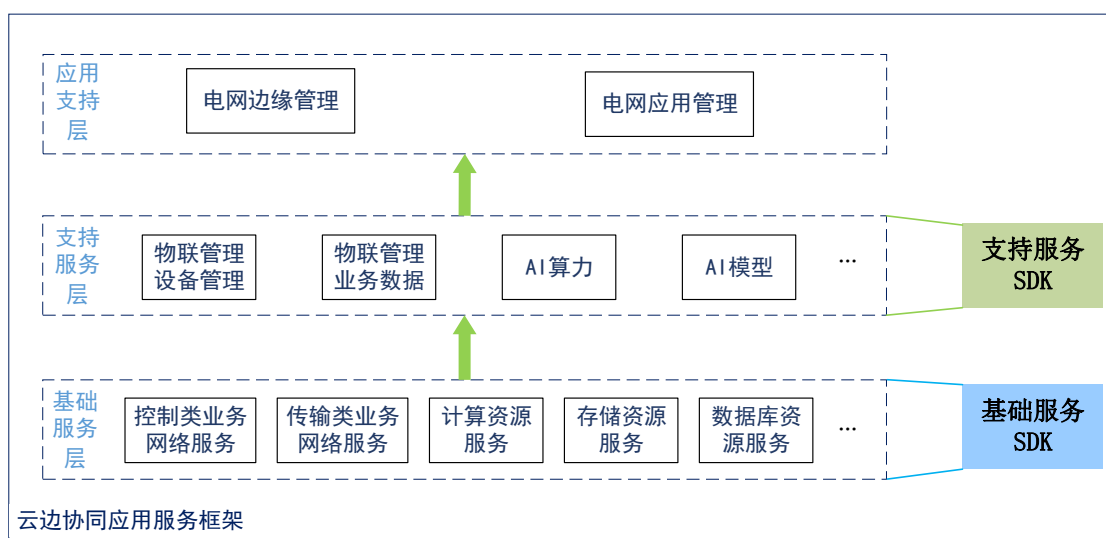


图 4-12 云边协同应用服务框架

基础服务层主要提供控制类业务网络服务、数据传输类业务网络服务、计算资源服务、存储服务、数据库资源服务。网络通信服务通过使用网络虚拟化技术及网络切片技术，向应用提供不同网络需求的数据传输、网络控制、端对端通信服务接口。计算资源服务通过云计算资源统一管控平台，控制和实现云边计算资源统一调控能力。存储服务通过构建的统一数据库存储平台，提供分布式关系数据库资源服务。

支持服务层主要包含物联设备管理服务、物联管理业务数据服务、人工智能算力服务和人工智能模型服务。物联设备管理服务通过物联管理平台，实现对物联终端设备的管理。物联业务数据管理服务通过物联管理平台，实现对终端设备采集的业务数据的管理服务。人工智能算力服务是通过将人工智能模型、算法封装为支持

服务，并对 AI 训练与推理进行中心云与边缘云之间的协同管理。人工智能模型服务是将人工智能算法训练得到的模型，供云边应用进行使用管理。

应用支持层主要包含电网边缘管理和电网应用管理。电网边缘管理主要包含电网边缘模型管理、电网边缘运行态管控和电网边缘异常管理。电网应用管理主要包括对云边应用及 APP 进行安装、配置、运行监控、漂移等管理。

在此基础上，电网业务应用开发支撑将基础服务层和支持服务层的接口及服务集成成为 SDK，为电网业务应用的开发、构建、测试、部署及监控提供 SDK 接口服务，支撑完整的电网业务应用开发部署过程。

4.2.3.1 物联管理能力实现

物联管理模块包含运行于中心云端的物联管理平台 and 运行于边缘云上的边缘物联代理，承担物联终端连接、物联交互等管理任务，提供如下的接口服务。

(1) 设备物模型管理：主要完成对终端、边缘等接入设备的物模型注册、发布、更新等管理；

(2) 设备接入管理：主要完成终端设备接入管理，完成交互协议适配；

(3) 设备管理：完成终端设备的增删改等注册、变更管理；完成设备消息发布；完成终端设备升级等；

(4) 业务数据管理：完成业务数据清洗、转换功能；完成数据向云中心的转发、传送功能；完成数据向本地应用的转发功能；

(5) 安全认证及权限管理：完成终端身份的认证和权限管理。

4.2.3.1.1 物联管理功能能力实现

4.2.3.1.1.1 物联终端注册

物联终端入网前（这里的终端，指能够和物联管理平台或物联代理进行数据交互的对象），通过物联设备管理中心发布的注册接口，向物联管理平台发起注册申请，经验证、审批后，完成物联终端注册，如图 4-13 所示。

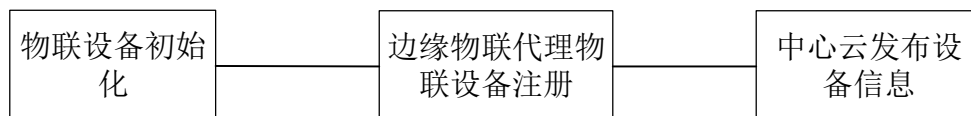


图 4-13 物联终端注册流程

- (1) 物联终端使用之前，向云端物联管理平台发起初始化申请。
- (2) 物联管理平台通过将物联终端的设备名称、型号、标识等信息进行登记录入，完成对物联终端设备注册工作。
- (3) 中心云端物联管理平台发布物联设备信息，供边缘云端查询，用于对物联设备的身份识别、信息更新等交互操作。

4.2.3.1.1.2 物联接入

物联管理平台发布物联设备身份识别等信息后，运行于边缘云、中心云上的电网边缘管理、物联代理 APP 等业务模块即可获知该终端的身份、类型等信息。当终端设备入网连接物联代理时，物联代理首先借助于物联管理平台发布的终端信息完成对物联终端的身份识别、交互协议等接入管理任务，一个典型的物联接入过程简述如图 4-14 所示。

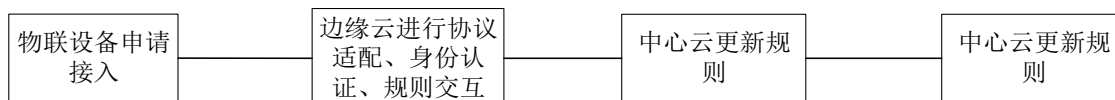


图 4-14 典型物联接入过程

- (1) 物联设备向边缘物联代理申请接入。
- (2) 边缘云与物联设备之间进行协议适配，对终端设备的身份认证。
- (3) 边缘云更新设备管理信息，并进行数据交互规则配置。
- (4) 边缘云将更新的数据交互配置内容同步更新至云端。

4.2.3.1.1.3 数据交互

物联终端成功接入后，物联终端即可通过 MQTT、CoAP、HTTPS 等协议，建立与物联代理、应用 APP 之间的数据交互，开展物联业务应用。物联终端通过物联代理与应用 APP 进行数据交互的过程简述如图 4-15 所示。

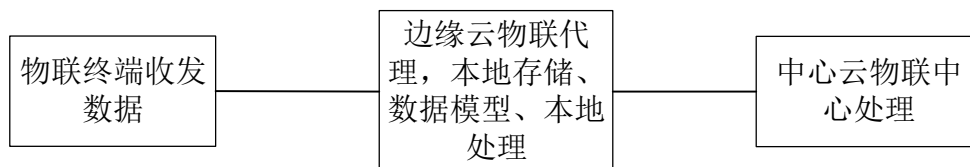


图 4-15 物联终端与应用 APP 进行数据交互

- (1) 边缘代理根据配置的规则收发数据，若为本地处理数据，则直接交由边缘云上的 APP 应用处理；若是需要上报物联管理平台的数据，则上报物联管理平台；

若是需要下发物联终端的数据，则下发给物联终端。

(2) 物联管理平台收到数据后，更新物联状态信息，并根据配置规则进行处理。若是北向应用处理数据，则交由北向应用处理；若是需向边缘代理下发的数据，则下发至边缘代理处理。

(3) 边缘云本地 APP 接收边缘代理转发的数据，解析并开展应用处置。在这个过程中，APP 可能调用边缘云上的电网边缘模型数据信息。数据处理完成后，根据业务应用规则，对数据进行本地存储，或者通过物联代理将处理结果反馈给物联终端或北向应用。

4.2.3.1.2 关键技术及工具

在物联管理平台能力和物联代理实现过程中，涉及的关键技术包括：

(1) 物模型动态配置管理：由于物联终端的类别多样性，不同的物联终端采集的数据在不用的应用中有不同的数据表示模型需求，因此，建议采取通过将物联终端采集数据作为物模型表示，再通过配置文件（Profile）等模型动态配置方法，在特定应用中形成物模型动态配置表示形式供应用处理。

(2) 交互接口标准化：物联数据处理过程中，涉及物联终端、边缘和云中心等多个平台和通信网络，需要面临语义挖掘、人工智能分析等多种数据处理，因此，建议建立数据交互的标准化接口，以便于进行数据的交互和分析处理。

(3) 数据安全：在数据交互、分析处理过程中，需要有灵活的数据访问控制功能，设计数据应用的安全防护机制。

目前，腾讯、阿里、华为等公司都提供了各自的物联网管理平台。但是，由于现有互联网平台与电网行业差异，各互联网成熟平台需要在物模型管理、交互接口标准化、安全管控等方面进行定制化改造，才能适应电网行业应用需求。

4.2.3.2 AI模型管理与能力实现

智能配用电 AI 支撑主要提供 AI 训练与推理运行环境支撑、AI 工具库与算法支撑、AI 模型库的能力。利用分布式云平台与存储平台的能力，在云、边、端协同架构下为部署于中心云与边缘云上的电网业务应用提供人工智能支撑服务。其对外服务接口包括：

(1) AI 运行环境接口：提供 AI 应用运行环境，通过分布式云平台，以虚拟机

或容器的方式将 AI 算力提供给电网业务应用。提供 AI 运行环境的申请、漂移、释放接口。

(2) 工具库与算法接口：利用 AI 的基础框架，将人工智能算法及相关的函数提供给电网业务应用。包含各种主流的深度学习基础算法、调优算法、各类工具的接口。

(3) AI 模型接口：提供预训练模型及训练好的模型给电网应用，包括模型的下发接口或以预安装数据包的形式发布的 AI 模型。

4.2.3.2.1 AI支撑能力实现

通过中心云、边缘云的分布式计算架构，AI 支撑系统对 GPU、CPU、FPGA 等计算资源进行管理，将 AI 算力提供给中心云和边缘云上的电网应用。实际部署时，中心云上部署 AI 基础框架、工具算法库，预训练模型等具有较强的算力要求的模块，边缘云上根据电网应用的实际需要，部署训练好的模型和 AI 计算资源。各 AI 支撑能力实现方案简述如图 4-16 所示。

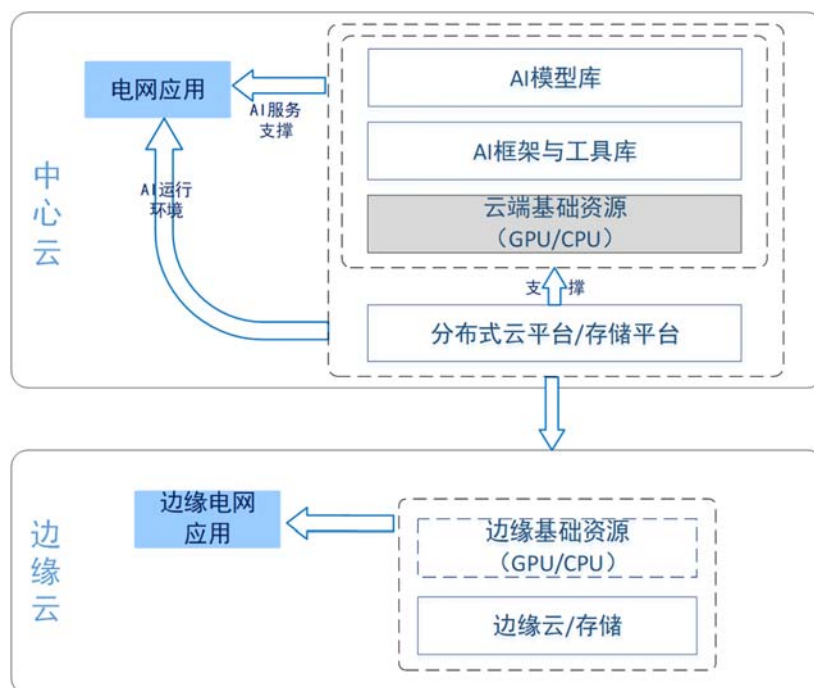


图 4-16 AI 支撑能力实现方案

(1) AI 计算与存储支撑

利用虚拟化技术，将 GPU、CPU、FPGA 等算力资源虚拟化，形成 AI 算力资

源池，交付云平台统一管理，并以虚拟化的方式（虚拟机、容器等）按需分配给电网应用。

利用分布式云平台的分布式存储架构，针对性的将基础数据存储分为边缘云上的本地存储、云边结合存储、云存储等多种数据存储方式，将这些数据存储方式的功能接口提供给业务应用开展 AI 计算进行调用。

（2）AI 框架、工具库与算法服务支撑

AI 工具库、算法库部署在中心云上的，以软件即服务的方式提供给电网应用。这些工具库包含主流的 AI 框架及算法，如 Tensorflow、PyTorch、Scikit-Learn、Keras 等。中心云上的电网应用可以直接使用这些工具，边缘云上的电网应用通过虚拟化的运行环境安装使用，也可以通过中心云端的能力分发到边缘上使用。

（3）AI 模型支撑

对于计算机视觉、自然语言处理、语音识别等各类型应用，用户可以直接使用 Tensorflow、Kares 等模型框架进行进一步的调优，并且结合电网应用的 AI 实际需求，将系统将训练好的模型进行统一管理，实现协调训练和模型共享。

（4）云边 AI 协同能力

利用分布式计算环境、存储系统、算法库及模型库支撑，将在中心云上训练好的模型下发到各个边缘云上，支撑边缘云上数据本地化处理和边缘智能计算。

4.2.3.2.2 关键技术及工具

目前英伟达百度、阿里、腾讯、谷歌等国内外企业都开发出了各具特色的人工智能平台及工具。一些使用较为广泛的人工智能 GPU 云开源产品及 AI 开源框架见附录。

4.2.3.3 电网边缘管理能力实现

4.2.3.3.1 电网边缘模型和应用初始化

电网边缘模型指使用 SG-CIM 模型的方法，对电网边缘中的物理对象进行信息化的表示。中心云端电网边缘管理应用维护大电网所有电网边缘及其下属的电网设备和电网运行状态信息，根据边缘生成算法生成对应的电网边缘模型表示信息，并进行统一管理；电网边缘代理上的电网边缘管理 APP 同步更新其所管理电网边缘模型信息，支撑边缘云上的电网边缘应用。电网边缘管理模块对外服务接口包括：

(1) 电网边缘信息查询：在云端维护大电网设备运行状态信息，在电网边缘代理上维护电网边缘设备状态信息，供其它业务应用查询使用。

(2) 电网边缘模型及数据维护：在云端维护全网边缘版本、模型和数据信息，在电网边缘代理侧维护电网边缘版本、模型和数据信息，供其它业务应用查询使用。

4.2.3.3.1.1 云、边、端能力分布

中心云端电网边缘管理应用维护所有的电网边缘版本，系统初始化时载入所有的电网版本，版本信息中包括电网边缘的所有设备信息、网架信息、设备状态信息等内容。

用户选取指定的版本后，边缘云获得该版本信息，并将电网边缘下属的电网边缘设备、配网设备等信息纳入本电网边缘进行管理，同时，电网边缘管理 APP 监测电网边缘的状态信息，并上报给云端电网边缘管理应用，如图 4-17 所示。

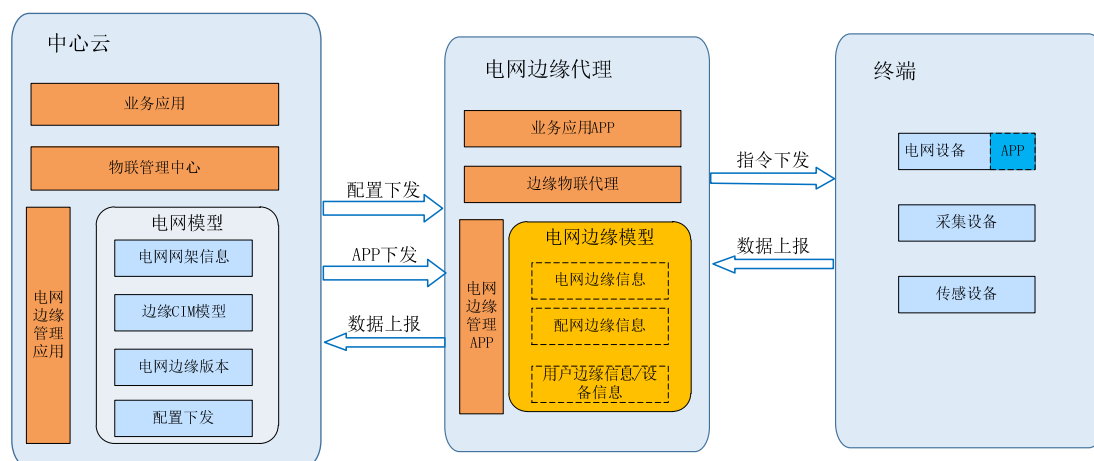


图 4-17 云、边、端能力分布

4.2.3.3.1.2 电网边缘应用初始化

应用初始化过程主要包括将电网边缘管理 APP 下发至电网边缘代理、将电网边缘的信息化表示内容下发给电网边缘代理、电网边缘所属电网终端对象纳管等三个任务，其基本流程如图 4-18 所示：

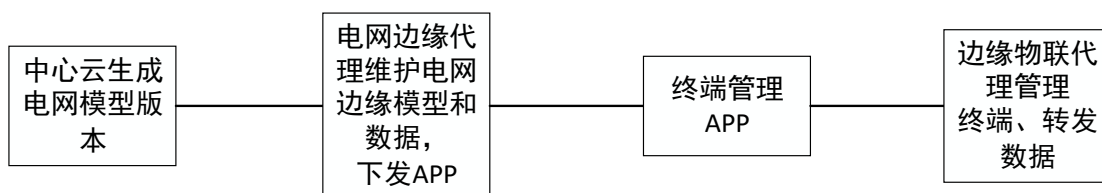


图 4-18 电网边缘应用初始化流程图

(1) 中心云电网边缘管理应用根据电网运行特点，生成电网边缘版本，载入电网边缘模型和数据，并将模型和数据信息下发给相应的电网边缘代理。

(2) 电网边缘代理上的电网边缘管理 APP 接收电网边缘模型和数据，根据需要下发更新 APP 或物模型给终端设备。

(3) 终端设备接受 APP 或物模型更新后，配置终端与电网边缘的物联代理之间的对应关系，建立与电网边缘代理上的业务应用 APP 之间对应关系。

(4) 边缘物联代理接受终端接入，对终端进行管理。电网边缘代理上的电网边缘管理 APP 启动对电网边缘设备的监控，纳管相应的电网设备。

4.2.3.3.2 电网边缘运行态管控（管理）

4.2.3.3.2.1 电网边缘设备运行态监测

电网边缘设备运行状态由边缘物联代理、电网边缘管理 APP、物联管理平台等分布于电网边缘代理和中心云上的多个 APP 和应用进行管理和维护，其运行维护过程简述如图 4-19 所示。



图 4-19 电网边缘设备运行状态维护过程

(1) 电网设备(终端)与边缘物联代理连接，上报测点状态和运行状态等信息；

(2) 边缘物联代理将电网设备(终端)分发给电网边缘管理、业务应用等订阅了该信息的 APP，同时，将该信息上报物联管理平台；

(3) 物联管理平台分发该信息至电网边缘管理应用，中心云整合所有的电网边缘状态，由此获得得到整个电网的运行信息；

(4) 这个过程往复循环运行，实现对电网边缘设备运行状态管理。

4.2.3.3.2.2 电网边缘版本的切换

在发生故障、负荷调整、方式变更等电网边缘版本切换需要时，首先由中心云电网边缘管理应用决策、生成并发布新版电网边缘信息。边缘云根据新版电网边缘

信息，更新新版电网边缘运行所需资源、权限信息、终端路由等信息，重启电网边缘管理应用，完成版本切换，如图 4-20 所示。

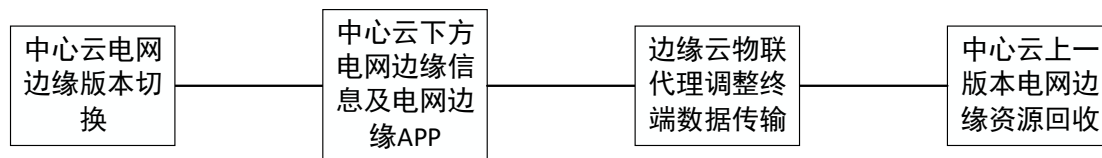


图 4-20 电网边缘版本的切换

- (1) 中心云端决策进行电网边缘版本切换，生成新版电网边缘。
- (2) 中心云确定电网边缘与边缘云间的管理关系，将电网边缘信息、电网边缘 APP、相关的应用下发至相应的边缘云。
- (3) 边缘云上的物联代理根据电网边缘与终端关系及物联代理所管理的电网终端信息，对终端的数据传输路径进行调整，将数据上送及下发路径调整至指定的电网边缘应用。
- (4) 中心云协调对上一版本电网边缘所使用的资源进行回收，回收边缘云上的电网边缘使用的各类资源。

4.2.3.3.3 电网边缘异常处理流程

边缘云检测本地电网设备运行状态，中心云检测全局电网设备运行状态，在一般异常情况下，按负荷转供方式进行处理；在发生大面积异常时，由中心云决策电网边缘按保障状态运行，如图 4-21 所示。

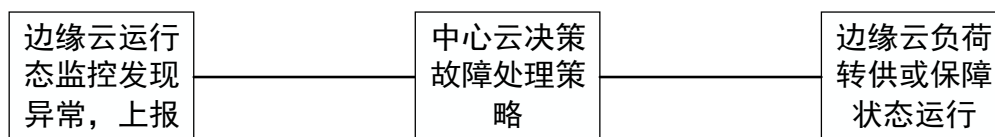


图 4-21 电网边缘异常处理流程

- (1) 中心云和边缘云实时监控电网边缘的运行状态，边缘云监控其承载的电网边缘，中心云监控全部电网边缘。当监控发现电网运行异常时，进行故障定位及上报。
- (2) 中心云根据监控的异常信息确定异常的处理策略。
- (3) 如果是大面积异常，在电网边缘在保障状态运行；如果是普通故障，则电网边缘代理进行负荷转供，转供后，电网边缘正常运行。

4.2.3.4 电网业务应用管理能力实现

在分布式云平台运行环境构建的基础上，电网业务应用管理模块在中心云端实现对业务应用服务器端程序的安装、配置、运行监控、漂移等管理，在边缘端实现对边缘云上运行 APP 的配置、运行、监控和漂移的管理。其对外服务接口包括：

- (1) 业务应用商店：提供边缘云上各类 APP 应用上下架、版本、代码管理。
- (2) 配置管理：提供边缘云上各类 APP 应用下发、补丁、升级、配置等管理。
- (3) 远程管理：提供对边缘云上各类 APP 的资源分配、启动、运行状态监控、停止等管理。

4.2.3.4.1 电网业务应用安装、配置、运行管理

电网业务应用管理包含运行于中心云端的电网业务应用管理、边缘 APP 管理和运行于电网边缘代理上的边缘 APP 管理管控节点共同实现。

电网业务应用管理中心在中心云端对电网业务应用的可执行代码进行集中管理，负责电网业务应用的下发、启动停止、运行状态监控和注销，对业务应用进行全生命周期管理。边缘 APP 管理和边缘 APP 管控节点分别运行在中心云和电网边缘代理上，配合完成业务应用 APP 的安装、配置、运行状态监控等任务，其业务能力和业务过程概述如图 4-22 和图 4-23 所示。

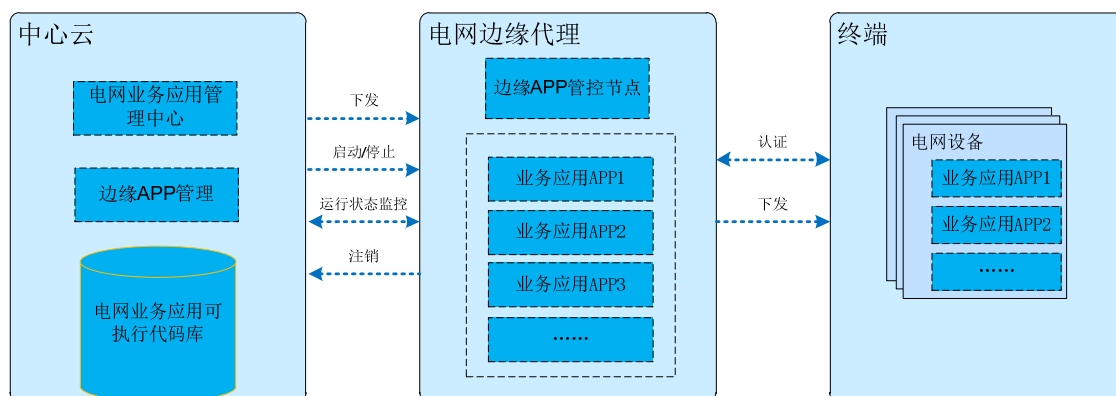


图 4-22 电网业务应用管理中心业务能力

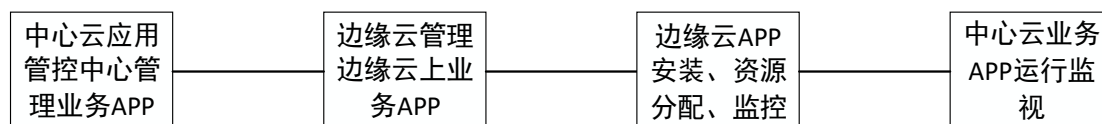


图 4-23 电网业务应用管理中心业务过程

(1) 中心云上的电网业务应用管理中心构建统一管理所有的各类电网业务应用。根据需要由应用管控中心下发应用，或电网边缘代理根据业务需要向中心云请求电网业务应用下发。

(2) 电网 APP 管控节点安装相应的应用，并申请业务应用运行需要的资源，包括网络资源、计算资源、存储资源等，云平台系统分配相应的资源。

(3) 中心云对电网 APP 管控节点将 APP 纳入统一调度、监控管理。

(4) 如果监控发现电网 APP 运行异常，则进行异常处理，如启动备份应用、停止服务等。

4.2.3.4.2 电网业务应用监控流程

为实现对边缘云上业务应用运行状态监控，边缘云上运行的电网业务应用边缘管控节点实时采集应用运行状态，并将其发送给中心云端的电网业务应用管理中心进行集中监控、统一展示和汇总分析，如图 4-24 所示。

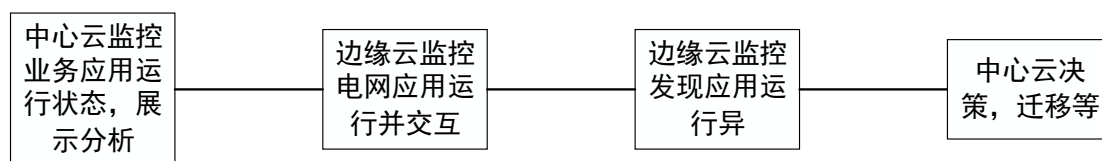


图 4-24 电网业务应用监控流程

(1) 中心云对电网业务应用的运行状态进行监控，并进行业务应用运行状态的展示分析等业务。

(2) 边缘云上的电网业务应用运行监控模块搜集边缘上的业务应用运行信息，包括运行状态、告警信息、日志信息等，与中心云应用管控中心进行运行状态交互。

(3) 如果边缘云上的应用监控模块监控到业务应用运行异常，则进行异常处理，如重启、扩容等，并向中心云交互异常信息。

(4) 如果应用异常处理成功，则继续运行；如果异常处理失败，则边缘云上的应用监控模块将异常信息交互给中心云端应用管理中心，中心云端决定进行资源漂移等操作。

4.2.3.4.3 电网业务应用漂移流程

运行于边缘云上的电网业务应用在资源耗尽、网络连接中断、设备故障等等情

形下，需要进行迁移，另外云中心也需要根据信息系统运行情况对资源进行迁移，业务应用漂移的流程简述如图 4-25 所示。

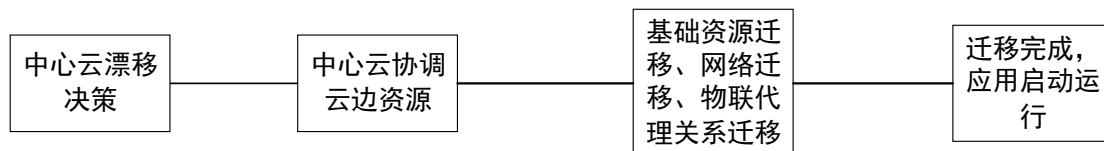


图 4-25 电网业务应用漂移流程

(1) 中心云对业务应用漂移进行决策及协同控制，根据漂移的具体需求，在中心云与边缘云间进行资源协调，查询可用的资源。

(2) 边缘云接收到迁移目的地及相关信息后，先对基础资源进行迁移，如计算资源也就是虚拟机镜像容器镜像、存储资源、网络资源等，将基础资源迁移过去。然后进行配置迁移，将应用相关的配置信息迁移到目的地。

(3) 然后进行终端相关的物联代理迁移，调整终端与物联代理间的管理关系。

(4) 边缘云确认所有的迁移工作完成后在目的地启动电网应用，启动成功后，迁移完成。

4.2.3.4.4 关键技术及工具

目前，边缘计算及管理领域涌现了大量的产品及应用，如百度智能边缘 BIE(Baidu IntelliEdge)、开源边缘计算产品 KubeEdge、阿里物联网边缘计算 LinkEdge 等。但是，由于现有互联网平台与电网行业差异，各互联网成熟边缘计算机管理工具需进行定制化改造，才能适应电网行业应用需求。

4.2.3.5 电网业务应用开发支撑能力实现

IT 支撑架构为电网业务应用的开发、构建、测试、部署及监控提供接口及 SDK 集成服务，支撑完整的电网业务应用开发部署过程。

4.2.3.5.1 对应用开发的支撑

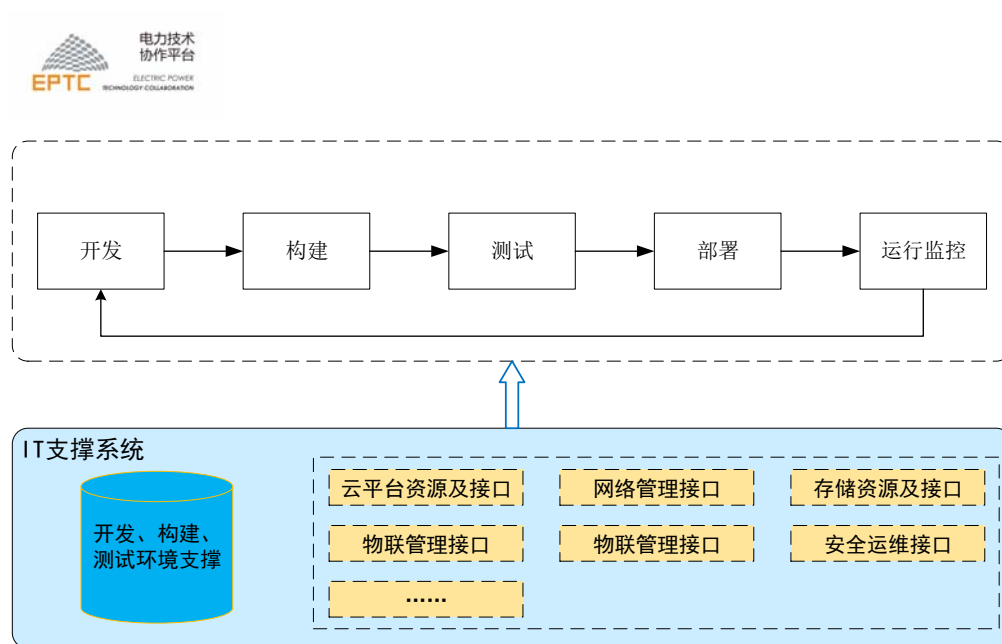


图 4-26 IT 支撑系统支撑电网业务应用

IT 支撑架构为电网应用开发提供基础资源，各种应用开发接口及应用管理可以直接使用这些接口及环境进行应用开发及构建部署配置，如图 4-26 所示。各类业务应用可以调用以下六类功能接口，各功能接口的能力实现见各具体章节。

- (1) 云平台资源及接口：提供计算资源分配管理能力。
- (2) 网络管理接口：提供端到端的控制平面、传输平面的网络通信通道。
- (3) 存储资源接口：提供进行边缘云本地存储、云边存储和资源分配管理能力。
- (4) 物联管理接口：提供物联终端的接入、安全、协议适配、数据清洗、数据预处理、物联终端管理等能力。
- (5) 电网应用管理接口：电网应用管理向电网应用提供下发、配置、启动停止、状态监控和销毁的应用全过程管理与支撑，支撑电网应用的运行管理。
- (6) 安全运维接口：提供应用运行状态查询、监控能力。

4.2.3.5.2 基于 OPCUA 电网业务交互能力实现

为支撑电网控制数据之间的交互，使用 OPC UA 模型作为电网控制数据传输架构，实现电网的跨平台、跨语言、面向服务的电网业务过程控制，如图 4-27 所示。

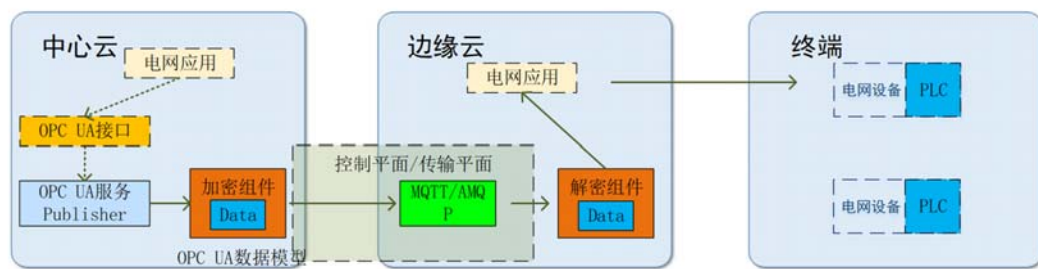


图 4-27 基于 OPCUA 电网业务交互能力实现

系统提供 OPCUA 开发接口给电网应用的开发，电网应用通过调用 OPC UA 应用接口实现基于 OPCUA 的过程控制。其能力实现流程描述如下。

- (1) OPC UA 服务部署在中心云上，负责向边、端发布电网控制数据交互接口。
- (2) 电网应用将电网控制指令或者需要收集的数据告知 OPCUA 服务，OPCUA 服务通过 MQTT 等协议，以 JSON 或 XML 格式，经加密后进行发布。
- (3) 边缘云上的应用 APP 调用 OPC UA 解密组件，获得原有指令格式后发送给电网设备。
- (4) 终端电网设备接受指令后，执行指令，完成控制数据交互。

4.3 分布式智能架构实现关键技术

4.3.1 边缘拓扑简化技术

配电网设备众多，拓扑结构往往也十分复杂，运行方式复杂。信息的冗杂性和不确定性对调度及运行人员影响较大，因此从系统角度分析配网联络开关的重要性极为关键。基于该思想，考虑对拓扑进行简化，按照拓扑抽象程度，将拓扑分为详细拓扑、关键拓扑和核心拓扑。

详细拓扑是拓扑原始版本，包含了馈线、配电变压器、配电箱、环网柜、母线、开关等设备。详细拓扑一般用于现场班组人员检修操作时进行查看，如图4-28所示。

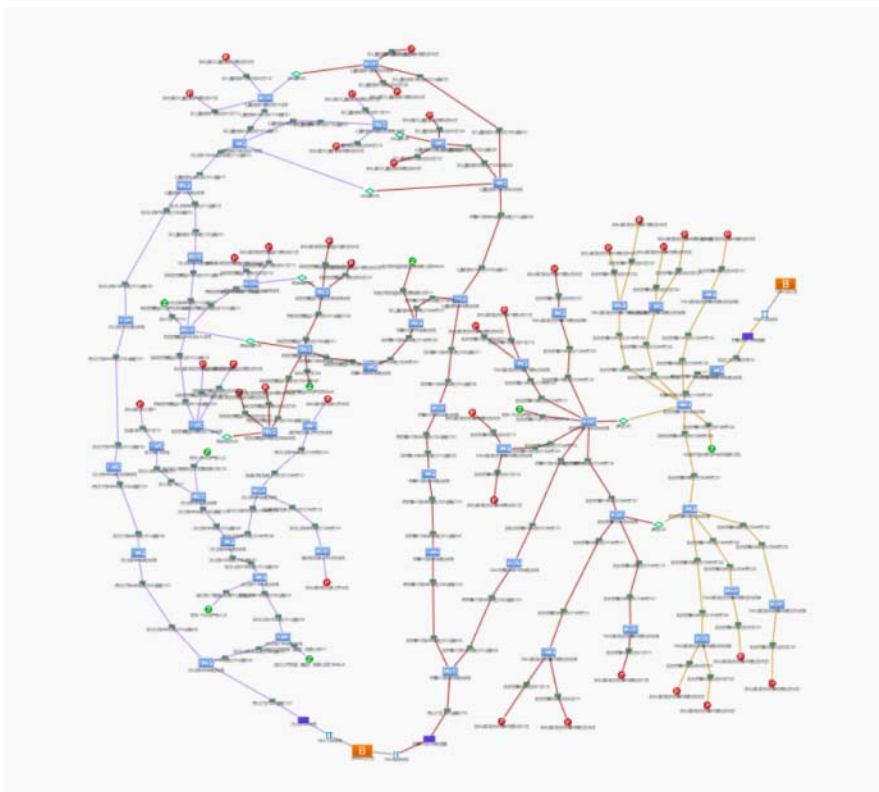


图4-28 配网联络单元详细拓扑图

关键拓扑是指对原始拓扑进行抽象，保留馈线与其它馈线的联络通道，而对路径上的负荷分支进行归并。关键拓扑一般可用于配网调控辅助分析，如图4-29所示。

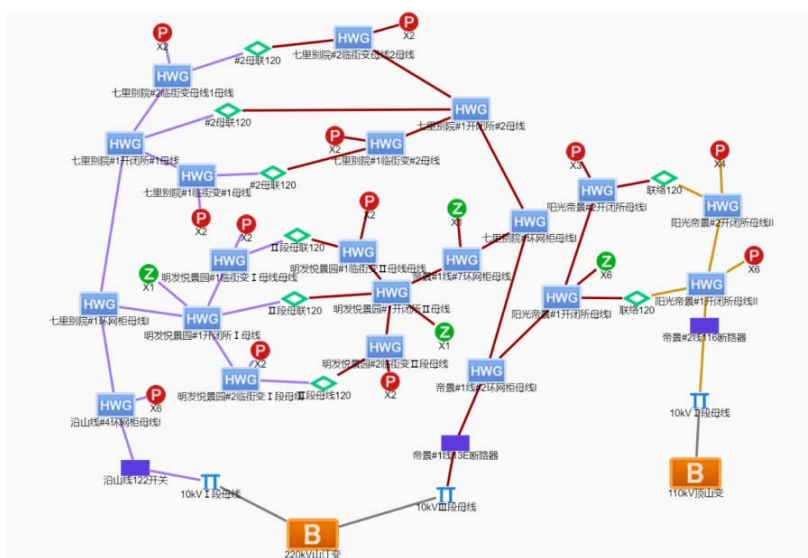


图4-29 配网联络单元关键拓扑图

核心拓扑是指在关键拓扑基础上，仅保留关键拓扑上的分岔节点，而把其它中

间节点和负荷全部简化掉的结果。核心拓扑是抽象程度最高的拓扑版本，一般供调度或规划人员了解配电网全貌时使用，如图4-30所示。

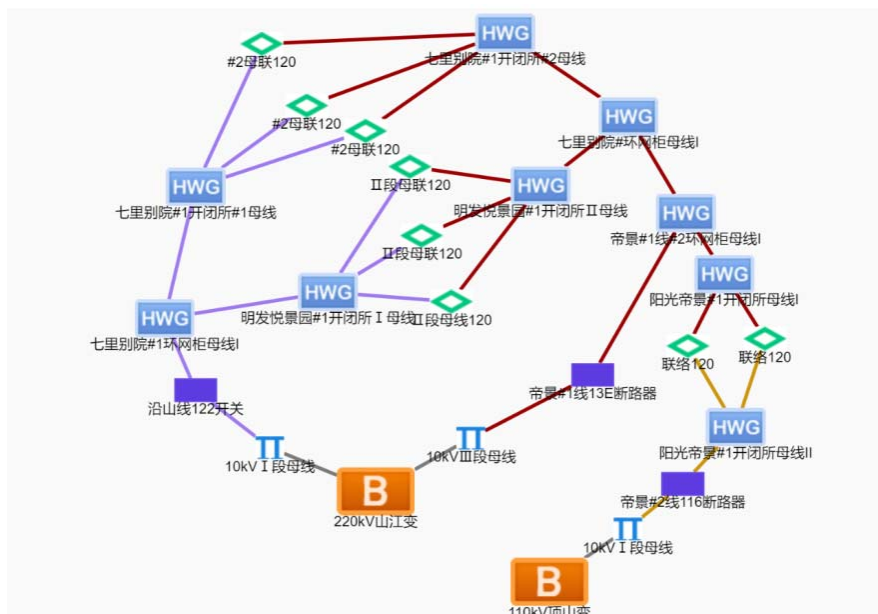


图4-30 配网联络单元核心拓扑图

4.3.2 边缘动态拓扑校验技术

边缘动态拓扑校验的目的是依托边缘代理提供的电网采集数据和计算能力，对时变的边缘区域配电网拓扑进行精确辨识，实现由通过边缘代理与开关上配电自动化装置交互获取拓扑的反向校验，并为边缘区域内部状态感知提供基础。配电网拓扑变动较主网频繁，边缘动态拓扑校验技术需要在边缘静态拓扑的基础上，从智能电表或配电自动化装置采集的数据中提取关键信息，完成对边缘静态拓扑的纠错。边缘动态拓扑校验技术首先需要以批处理或流处理的方式对采集到的多源异构数据进行合并、清洗、去噪。在此基础上，利用数学模型来反映边缘区域中网络的电气信息量，将各种电气元件进行抽象化，利用简化模型表示实际的网络。从多时空尺度的边缘区域配电网量测数据中提取潜在特征，分析这些特征与边缘动态之间的关联性，使用特征工程技术从量测数据中挖掘出能够反映边缘拓扑变动规律的信息。深度融合图计算、机器学习算法等领域理论知识，选择适合的模型对提取特征与边缘动态拓扑的关系构建拓扑辨识模型，利用历史量测数据训练模型，不断修正优化拓扑辨识模型的参数，提高拓扑辨识模型的精确度。训练好的模型在收到当前电网量

测数据的情况下，结合先验网络信息完成边缘动态拓扑的反向校验。

边缘动态拓扑校验技术还需要考虑人工智能算法的训练速度，并且具备对边缘区域配电网不同运行状态的学习能力。因此边缘动态拓扑反向校验技术要与集成学习相结合，通过集成学习的方式减小辨识模型的训练数据和存储空间，提高边缘拓扑在线校验的效率。

4.3.3 边缘动态参数辨识技术

边缘动态参数辨识主要包含线路阻抗参数辨识与变压器分接头位置辨识。前者根据运行态电网拓扑辨识的结果，将图模型中的各连接节点两两组合，对电网各支路进行解耦，生成各节点间支路的电压降推导公式，构建基于人工智能算法的电网物理参数辨识机器学习模型，以数据驱动的方式实现边缘区域运行态网络元件参数的可观测。后者依据电网运行数据修正各变压器原始变比，以变压器两侧实际运行数据估计出变压器分接头位置。边缘参数辨识机器学习模型在辨识任务中，不断从运行数据中学习变量之间的潜在关系，利用学习到的经验改善边缘参数辨识的精度。随着数据的增加，辨识的效果也随之增加，机器学习模型需要具备不断逼近于数据间潜在规律（真相）的能力。

4.3.4 边缘状态计算技术

在电网边缘中，由于区域配电网系统，其量测量配置有限，边缘内部为不可观状态，无法使用传统状态估计器直接进行状态估计。

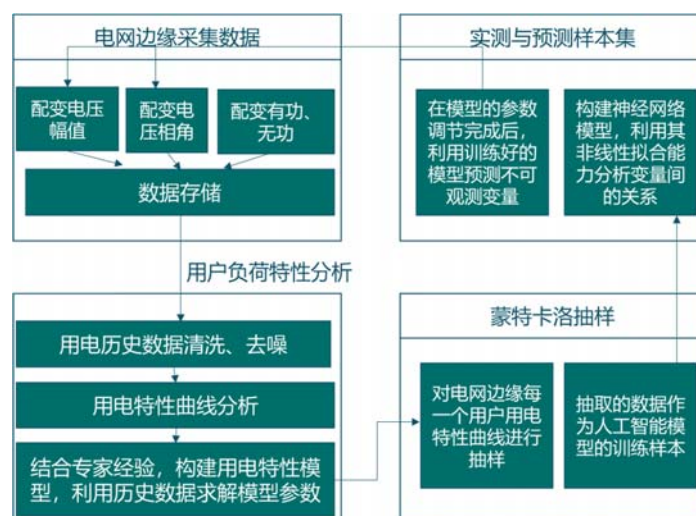


图4-31 基于AI的边缘状态估计

如图4-31所示，充分利用配电网中含有的大量智能电表历史数据，采用数据挖掘理论和机器学习技术，能够对配电网状态进行精确预测。利用大量智能电表历史数据进行预测，主要可分为两种方法。一种是采用数据挖掘和机器学习算法，预训练电网边缘内部伪量测预测模型，通过该模型预测出当前运行状态下的伪量测信息，使边缘内部达到可观性条件，再采用传统状态估计器进行边缘状态估计。另一种是采用数据挖掘和机器学习算法，直接训练出边缘内量测数据和状态变量之间的映射关系，在实际运行过程中通过预训练的模型直接预测出系统状态变量值，从而实现边缘状态估计。

五、应用前景

5.1 负荷预测

5.1.1 用户侧负荷预测

用户侧负荷预测模型需要考虑除时间序列外影响负荷的因素包括：气候因素（如寒潮、热波）、季节因素、节假日等特殊日、天气因素（如气温、湿度）、用户类型、历史负荷等影响因素。传统短期负荷预测方法无法计及气象等因素的影响，缺乏自主学习的能力。根据不同类型负荷在较短的周期内就存在较大的差异性这一特点，使用人工智能算法对负荷进行分类并预测，可以提高预测的精确度。

使用人工智能算法对用户侧负荷分类并预测的技术方案如图5-1所示。

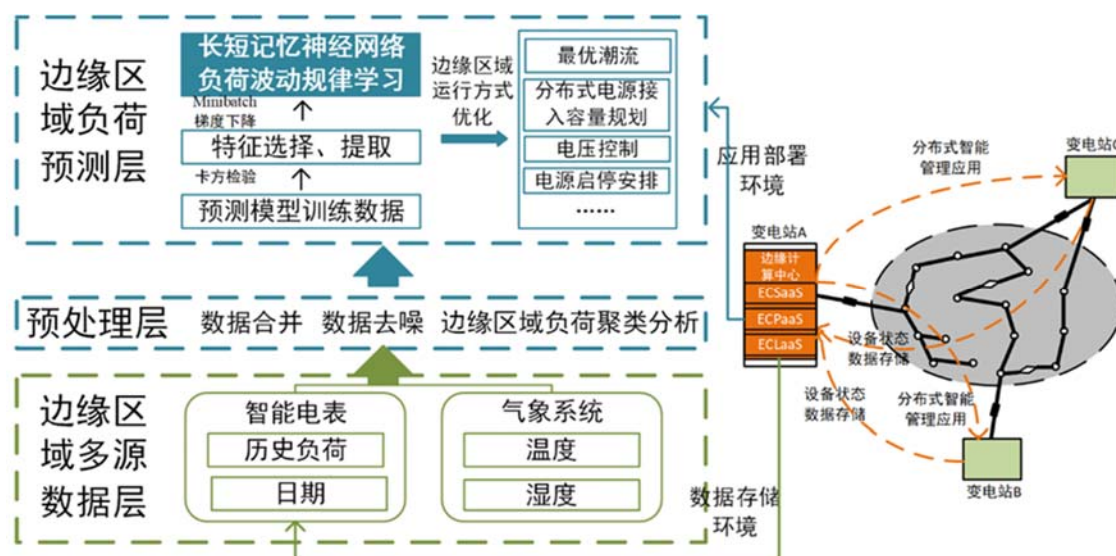


图5-1 用户侧负荷预测技术方案图

如图所示，在边缘代理提供的数据资源基础上，利用边缘代理的计算能力对智能电表采集数据，气象数据等多源数据进行融合、预处理、去噪，降低随机波动或传感器误差对机器学习模型预测精度的影响，为机器学习模型提供数据基础。综合考虑GIS信息，依据聚类评价指标，从当下前沿聚类技术中选择最实用的聚类分析方法，根据海量负荷数据建立自适应的负荷聚类模型，对配电网中各配变负荷按照其波动规律进行聚类，依据聚类结果计算出每一类负荷的典型曲线，从负荷曲线中解构出负荷差异性较大的用电成分（商业负荷、工业负荷、居民负荷、农业负荷、牧业负荷等）。综合考虑不同类别负荷的波动规律与对应类别负荷所在区域的配电自动化装置的覆盖密度，制定不同类型的负荷短期负荷精准预测方案。

5.1.2 大电网负荷预测

大电网精准负荷预测是电力系统规划、运行、调度的基础性工作，能够为电力系统短期调度以及长期规划提供有力的决策支持。大电网负荷预测旨在使用机器学习算法挖掘负荷发展的内在规律，完成负荷影响因素与负荷值之间非线性关系的拟合，实现对省级以上规模的电网负荷精确预测。由于大电网覆盖的区域面积很大，因此区域内温度、湿度、风速、天气类型等负荷影响因素具有较大的差异，虽然负荷受到多种因素的影响，但是某一种因素难以起到主导作用。大电网的负荷基数较大，负荷曲线的日变化规律相对于用户侧具有更强的波动规律。因此可以采用诸如时间递归神经网络（Long-Short Term Memory,LSTM）这类适用于提取时间序列信息的模型，以历史负荷数据作为模型输入，对大电网负荷进行直接预测。通过理论分析调节机器学习模型的参数，使机器学习模型不仅能够学习各相关因素间的关联性，并且能够学习负荷自然增长与负荷爬坡的规律。在预测过程中，可以选择多个机器学习算法对大电网负荷进行预测，利用大电网负荷的历史数据进行对各个预测模型的收敛性进行校验，从多个机器学习算法中选择两种或几种方法结合，保证预测模型的鲁棒性和可靠性。

同时，大电网的短期负荷预测结果为各个电网边缘短期负荷预测结果的累加，每一个区域根据自身负荷类别和外部影响因素选取具有针对性的预测方法，最后汇总各区域负荷预测结果可以得到大电网负荷预测结果。通过边缘区域的划分解决了大电网与各边缘区域之间的统计口径问题，因此大电网负荷预测结果可由多级边缘

负荷由下而上层层叠加的结果进行校验。

5.2 清洁能源消纳

5.2.1 消纳比例的确定准则

根据电网边缘发用电预测的结果,优化电源布局,有序安排清洁能源投产进度,合理安排电网边缘内发电机启停,解决清洁能源消纳问题。清洁能源消纳具体指标:电网边缘内平均风电利用率高于88%,弃风率低于12%;电网边缘内平均光伏发电利用率高于95%,弃光率低于5%;电网边缘内平均水能利用率高于5%;电网边缘内核电基本实现安全保障性消纳。

5.2.2 消纳与边缘互动

以电网边缘代理提供的上层应用为电网边缘资源配置平台辅助决策,可以实现清洁能源外送与电网边缘联合调度的闭环控制。电网边缘代理收集本级边缘内各可再生能源发电厂发电数据,利用电网边缘代理提供的边缘区域发用电预测能力,判定本级边缘内清洁能源是否具备外送条件以及外送清洁能源的裕度,滚动修正送电曲线。接受清洁能源的电网边缘从输电通道中获得清洁能源并使用智能电子装置(IED)及智能设备对电量进行检测,依据接受的清洁能源电量对电网边缘内部火电站发出调度指令。火电站内部调度单元接受调度指令后,以本级边缘源网协调为约束、提高清洁能源利用率为目标安排站内发电机的启停,以此充分发挥送受两端煤电机组的调频和调峰能力。

5.2.3 储能参与的分布式发电清洁消纳

电网边缘代理通过智能设备对清洁能源电站发电量以及用户负荷的峰谷差进行检测,依据边缘区域内分布式电源发电、用户负荷曲线制定适当的**储能充放电策略**。针对电网边缘内包含清洁能源的特点,利用电网边缘代理提供的数据库,从设计、施工、业主等各方实际情况角度,依托边缘代理计算能力为电源组的优化配置提供辅助决策。在用电与清洁能源发电错峰的情况下,利用储能设备投切的灵活性以丰补欠,使电网边缘用电低谷时的剩余电能通过水蓄能、热蓄能、冷蓄能等设备对电网边缘进行调峰,完成储存转化、循环再生。

5.2.4 电动汽车参与的分布式发电清洁消纳

用户边缘的电动汽车用户通过安置储能装置,能够实现充电和放电功能特性,

衔接发电侧和用户侧协同促进清洁能源发电调度优化。考虑并网电动汽车数量的流动性和清洁能源发电的不确定性，依托电网边缘代理与用户边缘代理的实时通信能力对电动汽车的充放电行为进行控制。在充放电状态切换过程中，用户边缘代理需要统计当前并网电动汽车数量并结合各类电动汽车充放电负荷模型对电动汽车消纳清洁能源占比或电动放电功率进行综合评估，并反馈给电网边缘代理，电网边缘向储能装置、其他类别用户发出控制指令，计算出的多余电量由它们进行补充。

5.3 源网荷储多级互动

5.3.1 电网边缘等效源-荷参数模型

实现对用户边缘内部中的光伏系统、电动汽车、储能系统、负荷等源-荷的动态建模和运行特性分析，确定分布式电源、储能的额定发电功率和负荷的用电需求等动态参数，为上层电网边缘的分析应用提供准确的数据基础。

传统的两级负荷模型或基于日负荷曲线的负荷模型不能完全表征负荷的多样性、随机性，以及负荷控制或供电中断恢复后的响应特性。因此可以使用一种计及负荷反弹效应的多状态负荷模型，它由三部分相加组成：第一部分是某类负荷多状态序列具体时段的功率水平，该序列由典型日负荷曲线按固定步长或变步长划分而成，表示负荷用电趋势；第二部分为负荷波动分量，可利用正态分布随机抽样来模拟；第三部分为负荷控制或供电中断恢复后引起的负荷反弹量。负荷反弹系数可由负荷日常运行数据及供电中断后运行数据的回归估计获得；当缺乏运行数据时，可通过典型负荷在总体负荷容量的所占比例进行典型负荷反弹系数的归算叠加来获得。

5.3.2 电网边缘源网荷储多目标优化协同

源网荷互动优化调度是在满足提供持续可靠安全 and 质量符合要求的电能前提下，通过对配电电源、网络和负荷进行资源优化配置，在调度业务以及时间尺度、空间尺度上进行多维源网荷的协调互动，以实现电网边缘高效运行。

电网边缘分为无源电网边缘和有源电网边缘。从物理特征来看，无源电网边缘是以传统变电站为电源的电网边缘，有源电网边缘是分布式电源高度渗透、功率双向流动的电网边缘。从实时调度来看，若有源电网边缘内的分布式电源可调容量不满足调度需求，则可将其视为无源电网边缘。在进行电网边缘源网荷优化调度时，有源电网边缘应优先考虑边缘内分布式电源的就地消纳，充分利用边缘的自治能力；

无源电网边缘则将业务需求上报给大电网，大电网下发负荷控制指令。

在空间尺度上，根据配电电源、电动汽车、储能装置、可控负荷等调度对象的分布，构建“用户边缘功率平滑—电网边缘能量优化”的配电网源网荷优化调度结构模型，建立“局部平衡—分区协调—整体吸纳”的调度机制。在时间尺度上，配电网的调度包括月度计划、日前调度和实时调度多个阶段。各个时间阶段具有不同的调度目标，通过协调配电网规划、改造计划、检修计划、运行方式、设备运行状态、配电电源出力和负荷的变化趋势，实现**电力电量、供电质量和调度操作**三类调度目标。

5.3.3 电网边缘源网荷储二次协调优化

用户边缘内部管理着大量地理位置分散、类型各异、响应特性不同的分布式电源或负荷，用户边缘通过边缘区域内分布式电源、储能的供电能力和负荷的用电需求分析，参考电网边缘下发的最优功率目标曲线，满足电源出力约束、储能约束、用户负荷充电需求等条件下，以与上层的调度计划尽可能一致为目标，在边缘内部进行源网荷二次协调优化调度。

以电动汽车充放电调度为例，用户边缘的电动汽车代理商根据车主的申报情况，以代理商实际调度结果与上层的电网边缘所确定的调度计划的偏差最小化为目标，优化各电动汽车集的充放电时间，并把各时段的总负荷 / 出力偏差发送给上层的电网边缘。

5.4 综合能源平台构建

5.4.1 综合能源平台的功能模块

(1) 能源监测

通过全景数据平台实现边缘内各类海量能源数据的存储，并支撑Web形式多维度提供实时监控、数据分析、预警信息等，实现能源数据的采集、传输、统计分析、信息发布等各阶段进行全程监测、管理，以完成能源数据采集分析信息化、自动化、智能化的要求，通过需求分析建立能源考核制度，进而提高管理效率，节约能源消耗，提高边缘的经济效益。

(2) 态势感知

综合能源系统边缘态势感知，是综合能源系统运行的基础。边缘态势感知通过

先进的数据通信采集技术、电源/负荷特性辨识与预测技术、状态估计技术、风险预警技术，实现对分布式能源、各种类型负荷等的监测与调控能力评估，准确进行边缘风险评估。

（3）优化调度

根据数据预测结果，结合配电网的运行约束条件和市场信息，制定满足经济、环境、技术要求的调度计划。包含经济调度、削峰响应、倒送消纳、优化控制等引擎。制定优化策略时，需要考虑的约束包括：电负荷和冷热负荷的功率平衡约束；锅炉、储能、制冷机可用容量的上下限约束；内燃机的热电可行域约束等。

（4）能源交易

交易业务包含结算以及收费等工作，交易系统具备交易组织管理、合同管理、结算管理、信息发布等基本功能。该系统与能量管理系统、生产管理系统以及外网的交易系统进行信息交换与电网公司以终端计量电量、需求侧响应信息为基础完成能源公司与电网公司的结算业务。优化微电网经济利益，实现用户利益的最大化。

5.4.2 综合能源平台的作用

对电网而言，通过平台开展边缘内电能质量监测，通过对能源数据的监测、采集和处理，并生成各种电能及电能质量报表、分析曲线、图形等，便于电能质量分析、研究和预警。通过平台对区域内分布式能源、可控负荷、储能等主体进行聚合和协调优化，配置相应的市场机制，建设虚拟电厂体系，通过调节特定的虚拟电厂出力，实现区域电力削峰填谷，减少城市用电对电网投资的依赖，实现区域能源优化调度、平衡负荷、多能互补，体现智慧能源调度的特点。

六、总结与展望

本白皮书构建了面向两网融合的配用电智能化体系架构，主要包括面向两网融合的配用电多级边缘物理架构、面向两网融合的云边互动信息架构以及基于两网融合的分布式智能架构。面向两网融合的配用电多级边缘物理架构基于分层分区思想，对传统配电网架构进行了重新划分与定义。面向两网融合的云边互动信息架构完成了从中心云到边缘云的信息网划分并设计了一套云边互动方案。通过物理电网边缘与信息边缘云的耦合，实现两网融合。在此基础上提出了分布式智能架构，通过先进 AI 技术，完成轻资产条件下的电网边缘内部状态感知、计算与优化控制等任

务，最终实现配用电的分布式智能。

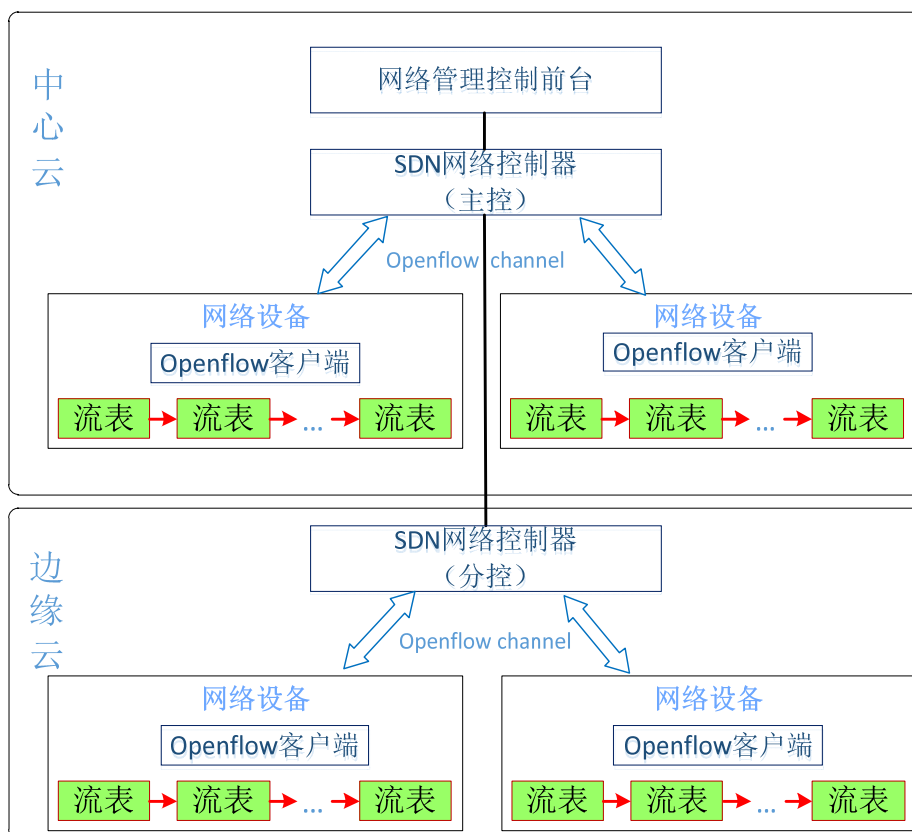
白皮书对体系架构实现中所涉及到的边缘模型设计、边缘划分、边缘动态多普获取、边缘动态参数辨识以及边缘状态计算等关键技术提出了可行的解决方案。并对该体系架构在精准负荷预测、清洁消纳、源网荷储多级互动以及综合能源平台构建等领域的应用进行了展望。

基于本书所构建的配用电多级边缘架构及所提关键技术，将实现配用电边缘侧智能，实现区域配电网的状态自感知、优化控制以及大电网、区域配电网与用户的协同互动。未来可基于该架构及其对应的分布式云平台，实现配用电电力与信息的深度融合及共享，支撑用户、电网的深度互动以及新业务的接入。

进一步，在实际应用控制层面，各级边缘与配电自动化系统相辅相成，配电自动化系统可以接受各级边缘状态的指令，并执行相关操作。在电网规划层面，当前配网划分网格仍以地理位置相近为约束，因此在边缘划分时应重点权衡地理空间紧密度和电气联系紧密度。在模型验证方面，未来将结合各地市不同的特点，按照本白皮书配用电体系架构思路 and 原则，在故障保护、优化控制等方面进行实地测试。

附录1：面向两网融合的云边互动IT支撑架构

1.1 基于SDN的网络虚拟化实现技术



附图1-1 基于SDN的网络虚拟化实现技术

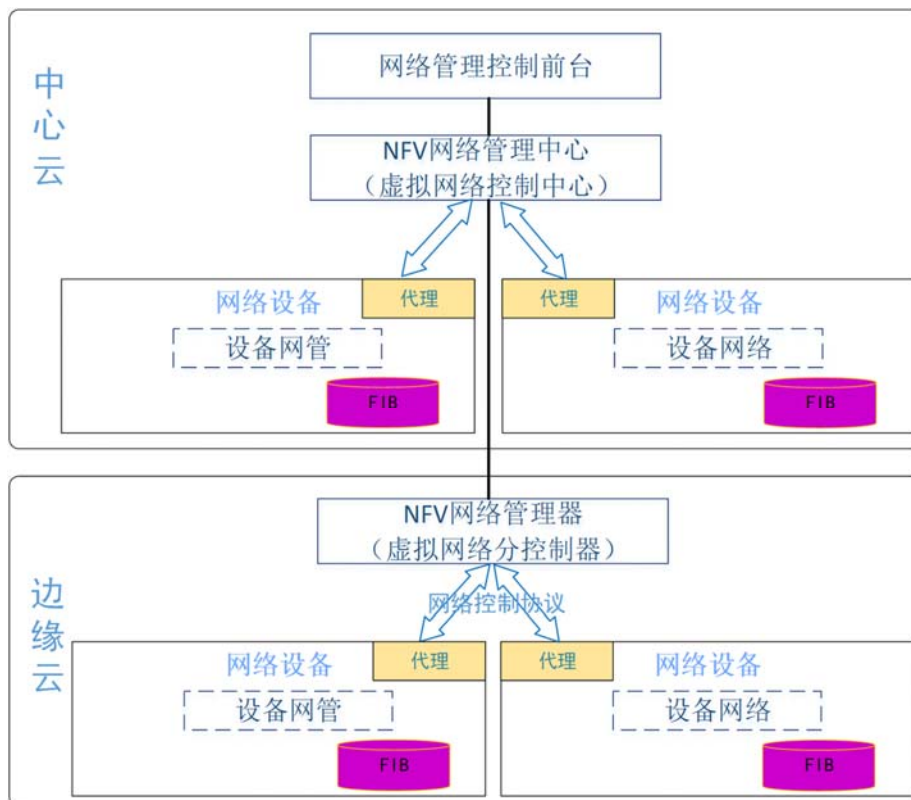
采用Openflow协议控制的SDN网络控制方式中主要包含SDN网络主控制器、SDN分控制器、Openflow客户端等对象，如附图1-1所示。其中，SDN网络主控制器、SDN分控制器对应于网络控制器（主控）和网络控制器（分控），受控网络设备安装Openflow客户端，采用Openflow控制协议与控制器进行信息交互，交互信息通过Openflow控制通道Chanel进行安全传输，接受主、分控制器管理。

SDN控制器向上层业务应用提供北向接口，供业务应用调用。通过北向接口，网络应用可以调用网络资源实现端到端通信能力，也可以通过北向接口管控网络资源状态。与南向接口方面已有OpenFlow等标准不同，北向接口目前还缺少业界标准，不同的参与者和用户提出了多种接口交互方案，但是充分的开放性、便捷性、灵活性是衡量接口优劣的重要标准。目前比较突出的接口形式包括RESTFUL API、NETCONF协议等形式。

SDN南向接口以OpenFlow协议最为突出。作为一个开放的协议，OpenFlow解决了如何由控制层把SDN交换机所需的用于和数据流做匹配的表项（流表）下发给转

发层设备的问题，更好地实现了对分散部署的SDN受控交换机的集中化管控。

1.2 基于NFV的网络虚拟化实现技术



附图1-2 基于NFV网络虚拟化实现技术

与Openflow网络控制方式相似，NFV网络控制方式在中心云设置NFV网络管理器作为虚拟网络总控，在边缘云上设置NFV网络管理器作为虚拟网络分控制器，如附图1-2所示。网络总控管理全网物理拓扑、路由、虚拟网络构建、转发规则下发等，并负责管理中心云的网络虚拟化。网络总控管理所有虚拟网络分控制器，将网络切片控制等控制策略下发到各个分控制器，并与分控制器交互网络拓扑信息以形成全局网络拓扑。边缘云上的网络分控仅管理其管理区域内的网络设备，并接受网络控制中心的管理，与网络控制中心交互其管理区域内的网络信息。

NFV网络控制方式在受控网络设备上安装NFV网络代理，网络代理接受网络控制器的管理，与网络控制器交互，将网络管理器的转发指令转化为设备的转发控制操作（控制信息存放于转发信息库FIB中）。NFV网络设备与控制器的交互一般采用通用网络控制协议如Netconf、SNMP、RESTFUL接口等。

与SDN不同，NFV控制器的物理拓扑是通过网络控制协议从网络设备中（如路由器）的路由信息表中获取的，无需控制网络设备发送链路探测报文进行链路探测。NFV路由的构建过程仍采用传统网络的路由交换方式进行，网络域之间通过诸如BGP、RIP、IS-IS协议进行路由信息交换。即，NFV除了可以在SDN环境（网络设备具备控制与转发能力分离）环境下搭建虚拟网络，也可以在传统网络设备（控制和转发能力都存在于每一台交换机或路由器上）环境下搭建虚拟网络。

1.3 基于OpenStack的分布式云平台实现技术

（1）虚拟机技术

虚拟机(Virtual Machine)技术提供了一种将中心云、边缘云上的各种实体资源，如服务器、网络、内存及存储等进行抽象，使用软件的方法重新定义划分的方法。经过这样的划分后，虚拟机作为中心云、边缘云上相对独立计算、存储资源管理单元，提供IT支撑服务。目前主要的虚拟机化技术有XEN、KVM、VMWare、Hyper-V等。

（2）Openstack云主机管理系统

OpenStack提供包括计算资源管理（为Nova）、存储资源管理（Swift）、镜像资源管理（Glance）等工具集合，支撑开展具备可扩展、标准统一的云平台建设。

OpenStack可以采取主、从架构。在虚拟网络的支撑下，通过分别在中心云和边缘云实现对XEN、KVM、VMWare、Hyper-V等虚拟机的管理，承担对计算、存储和镜像等资源的调度管理任务。

1.4 基于Kubernetes的分布式云平台实现技术

（1）容器技术与容器管理系统

容器技术(Container)是一种新虚拟化技术，容器是操作系统中一组受到资源限制，彼此间相互隔离的进程。相对于物理机和虚拟机而言，在同等量资源的基础上能创建出更多的容器实例出来。一旦面对着分布在多台主机上且拥有数百套容器的大规模应用程序时，传统的或单机的容器管理解决方案就会变得力不从心。另一方面，由于为微服务提供了越来越完善的原生支持，在一个容器集群中的容器粒度越来越小、数量越来越多。在这种情况下，容器或微服务都需要接受管理并有序接入外部环境，从而实现调度、负载均衡以及分配等任务。

容器管理系统提供在一组服务器上管理多容器组合成应用的能力。在容器管理系统看来，每个应用是一个部署或管理实体，为全方位实现应用自动化部署提供支撑，其能力包括应用实例部署、应用更新、健康检查、弹性伸缩、自动容错等等。

(2) Kubernetes 容器管理工具

Kubernetes是一个开源的容器管理工具，它支持自动化部署、大规模可伸缩、应用容器化管理。在Kubernetes中，每个应用可以被打包成一个容器镜像，每个容器之间互相隔离，每个容器有自己的文件系统，容器之间进程不会相互影响，能区分计算资源。同时，因为每个应用不需要与其余的应用堆栈组合，也不依赖于生产环境基础结构，这使得从研发到测试、生产能提供一致环境，比虚拟机轻量、更“透明”。

1.5 物联管理平台

目前，腾讯、阿里、华为等公司都提供了各自的物联网管理平台。其中，华为IoT联接管理平台解决方案依托IoT平台，面向行业整合大颗粒业务，通过APIs开放、业务编排以及数据开放技术，提供面向人与物系列化的SDK，提供丰富的通信能力，数据采集能力，设备控制能力以及实时交互能力。

腾讯云面向不同行业推出的物联网开发平台，为全球海量传感设备，以及跨平台跨行业的解决方案提供全栈式物联网能力的开发，包括稳定的云连接平台，快捷的跨平台设备移植，可靠的存储网络计算，可视化的管理运营后台以及大数据统计分析等。

阿里物联网管理平台与阿里云平台进行绑定，提供丰富的设备管理功能、稳定可靠的数据存储能力，以及规则引擎。使用规则引擎，仅需在Web上配置简单规则，即可将设备数据转发至阿里云其他产品，获得数据采集、数据计算、数据存储的全栈服务。

1.6 边缘计算框架

目前，边缘计算及管理领域涌现了大量的产品及应用，其中比较常见的边缘计算框架包括百度智能边缘BIE(BaiduIntelliEdge)、开源边缘计算产品KubeEdge、阿里物联网边缘计算LinkEdge等。

BIE: 百度智能边缘产品BIE(BaiduIntelliEdge)推行“端云一体”解决方案，它由智能边缘本地运行包、智能边缘云端管理套件组成。智能边缘本地运行包基于百

度开放边缘框架开发，可将云计算能力拓展至用户现场，提供临时离线、低延时的计算服务。智能边缘云端管理套件与智能边缘本地运行包配合使用，提供边缘节点管理、边缘应用管理、应用工厂对接等功能，帮助用户更轻松的管理海量边缘，更高效的开发边缘应用。

KubeEdge: 开源边缘计算产品 KubeEdge 提供了一个容器化的边缘计算平台，具有固有的可扩展性。由于它是模块化和优化的，因此它重量轻，可以部署在资源不多的设备上。类似地，边缘节点可以具有不同的硬件架构并且具有不同的硬件配置。对于设备连接，它可以支持多种协议，并使用基于标准 MQTT 的通信。

LinkEdge: 阿里物联网边缘计算（Link Edge）是一种可以在设备上运行本地计算、消息通信、数据缓存等功能的软件，它可部署于不同量级的智能设备和计算节点中，让其具备阿里云安全、存储、计算、人工智能等能力。借助物联网平台定义的物模型，Link Edge可以连接不同协议、不同数据格式的设备；借助物联网平台提供的IoT Hub，Link Edge可以将边缘设备的数据同步到物联网平台进行云端分析，并能实现接收物联网平台下发的指令进行控制设备；借助IoT Edge，设备可以运行规则或者函数代码，可以在无需联网的情况实现设备的本地联动以及数据处理分析。

1.7 AI支撑平台及工具

目前英伟达百度、阿里、腾讯、谷歌等国内外企业都开发出了各具特色的 AI 支撑平台及工具。下面分别列出使用较为广泛的人工智能 GPU 云开源产品及 AI 开源框架。

Nvida-docker: Nvida-docker 是英伟达公司推出的基于 Docker 的 GPU 虚拟化平台。它借助于 Docker 实现 GPU 的云化，提供容器化 GPU 加速的应用程序，具有可支持应用程序容器化和隔离加速的能力，具有可部署到任何受支持的、可使用 GPU 的基础架构上的能力。

Openstack AI 平台: 浪潮的 OpenStack AI 云平台可帮助用户快速构建 CPU+GPU 的弹性异构云环境，并实现对异构计算资源池的动态调度与分配。通过对 GPU 虚拟机的支持，OpenStack AI 云平台能够以多租户的形式，按需分配异构计算资源，具备支持 AI 敏捷开发的能力。

ESCould AI: 易捷思达推出的开源云计算平台 ESCould AI 在底层支持 GPU 和 FPGA 两种最常用的异构计算架构，从而具备在芯片核心底层释放人工智能潜力的能力。同时，它在上层整合 Caffe、TensorFlow 等多种流行的深度学习开源框架，从而具备支持快速构建基于 CNN、RNN 模型的图像识别、语音语义识别、时间序列预测等多种人工智能应用的能力。

Tensorflow: TensorFlow 是谷歌开发的用于深度学习或人工神经网络的开源软件库，它提供了非常灵活的体系结构，可以轻松部署在各种平台（CPU，GPU，TPU）之上。

Keras: Keras 是一个用 Python 编写的开放源码库，可以在 TensorFlow、Microsoft Cognitive Toolkit、Theano 或 MXNet 等深度学习框架上运行，提供了快速使用深度神经网络进行实验的能力。

Theano: Theano 是一个专为深度学习而设计的 Python 库。它具有允许用户定义、优化和评估涉及高效率的多维数组的能力，具有与 NumPy 集成、动态 C 代码生成和符号区分等功能。

附录2：基于两网融合的分布式智能架构

2.1 边缘动态拓扑校验技术

边缘拓扑确定：电网边缘代理首先判断各位置上的开关是否符合信息交互条件，若有开关不具备信息交互条件，则电网边缘代理不启动查询，判定电网拓扑无法确定；若电网内开关均满足信息交互条件，则通过电网边缘代理向开关上的配电自动化装置发出查询命令。电网边缘内开关上的配电自动化装置在接收查询命令后，将开关属性返回至电网边缘代理。返回的开关属性包括但不限于：开关的自身属性，开关的类别：变电站出线开关、馈线上分段开关和馈线间联络开关，开关的状态：断开、闭合；开关的位置属性，即该开关在电网边缘中两端所连接的电气元件信息。电网边缘代理将接受到的信息融合PMS中存储的静态拓扑信息，并结合系统反向校验手段确定电网边缘的动态拓扑，为电网边缘的状态估计、故障定位等上层应用提供基础。

边缘拓扑系统校验：输入数据包括但不限于：互联配电变压器电压时间序列的相关性，互联配电变压器间电压降落与线路注入有功、无功之间的关系，配电变压器之间的电压降之间的关系。将采集到的数据输入到训练好的模型中，通过判别式算法的输出结果判断遥信量错误的区段，即可完成电网边缘拓扑反向校验。电网边缘代理对运行态拓扑的系统校验时间在电网边缘运行态拓扑正向获取之后，频率与拓扑正向获取相同，拓扑的系统校验时间必须低于两次拓扑正向获取的时间间隔。如果正向拓扑与反向检验的结果存在冲突，以校正后的拓扑作为最终结果，电网边缘代理对运行态拓扑按照一定时间间隔存储于关系型数据库中，完成对电网边缘动态拓扑的追踪。

2.2 边缘动态参数辨识技术

动态参数辨识方法：使用动态贝叶斯网络进行线路物理参数的具体实现步骤包括：分析线路物理参数的影响因素，构建线路物理参数与影响因素的贝叶斯模型；依托大量历史数据训练出变量的初始概率分布、同一时间断面下变量间的条件概率分布和不同时间断面下变量间的转移概率分布；最终通过置信度传播算法依据观测到的温度、湿度、运行参数推断出线路物理参数。依据线路物理参数辨识的结果校

正静态参数，通过制定、使用合理统一的数据标准，使接入、存储的数据具备完整性和规范性，确保电网边缘参数辨识的高效性和可靠性。以规避由于极端天气下线路参数出现偏差而导致的线路状态估计不准确的问题。

2.3 边缘状态计算技术

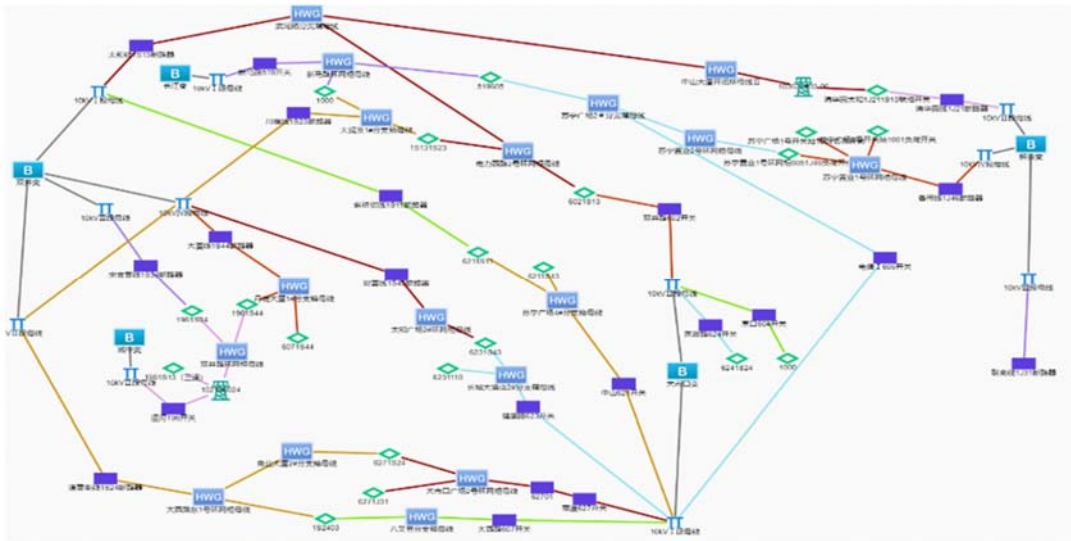
电力系统状态估计作为电网态势感知的一个重要组成部分，是现代能量管理系统的基础，为EMS中的高级应用提供底层支持。状态估计的目标是根据可获取的量测数据进行计算，估算动态系统的内部状态，得到最接近于系统真实状态的最佳估计值。

由于配电网中含有大量的智能电表历史数据，边缘代理应充分利用大量的配电网历史数据。使用神经网络进行配电网状态估计的步骤包括：首先通过非参数估计的方法求解真实世界中各变量的概率密度函数；在此基础上，通过蒙特卡洛抽样法得到神经网络的训练样本；以可量测变量为神经网络的输入，待估计变量为神经网络的输出，构建并利用样本训练神经网络，并利用交叉熵函数作为神经网络的损失函数，提高模型的训练速度和泛化能力，最后在电网边缘参数辨识的基础上，根据当前状态下电网边缘的拓扑状态、参数状态和量测数据，结合训练好的神经网络模型可以实现配电网状态的精确估计。

附录3：边缘智能配用电关键技术典型案例

3.1 边缘划分技术典型案例

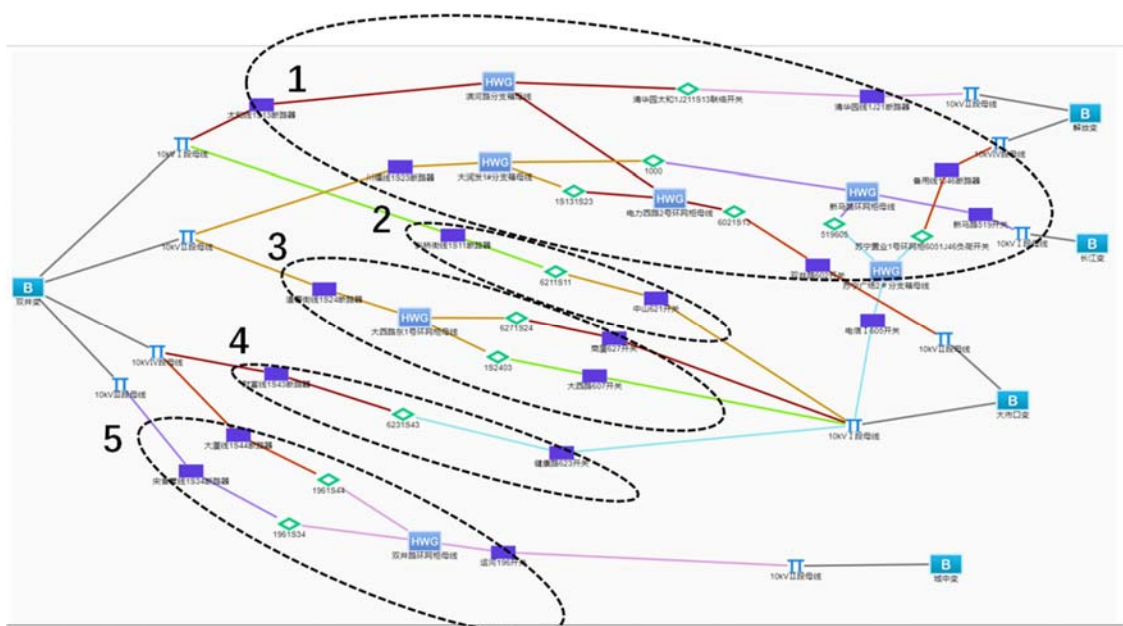
如下是按照所述技术对江苏某地区实际配电网的划分结果，对于附图3-1所示包含20条馈线的实际配网区域，根据附表3-1所示的联络开关实际操作次数对图中各联络开关进行定级，最后Infomap复杂网络社区检测算法，将该区域配电网划分为如附图3-2所示的8个电网边缘。



附图3-1 含20条馈线的实际配网拓扑图

附表3-1 联络开关动作次数

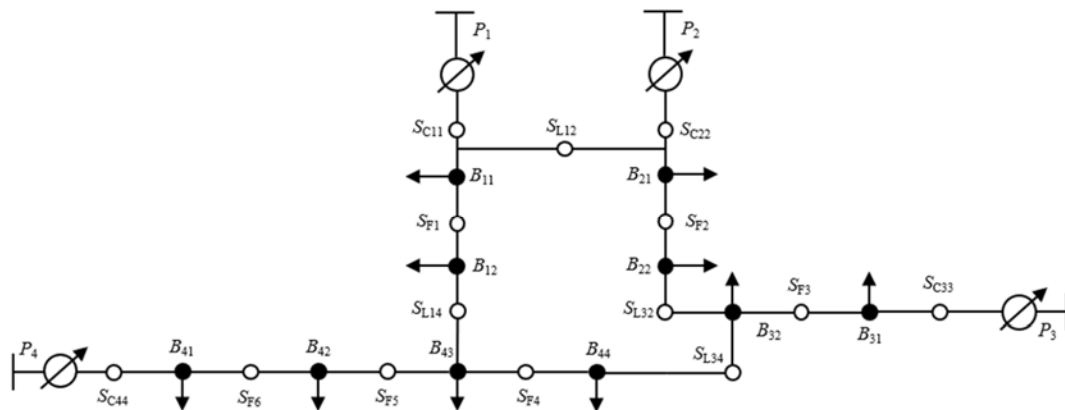
KG_NAME	操作次数	左端馈线	右端馈线	KG_NAME	操作次数	左端馈线	右端馈线
6271181	0	南康627线	城南1181线	中市二广场2号环网柜断路器1	0	南康627线	通富街1524线
152403	0	大西路607线	通富街1524线	中市西太和12211513联络开关	2	太和1513线	清华园1221线
1901513	0	太和1513线	3541105线	6211343	0	通富街1524线	中山621线
6231513	0	太和1513线	城南路623线	中市二广场2号环网柜断路器2	0	通富街1524线	南康627线
6231543	4	城南路623线	通富街1543线	11951334	1	通富街1524线	宋官营1534线
中市二广场2号环网柜断路器1	2	城南1181线	通富街1524线	中市二广场2号环网柜断路器2	5	通富街1524线	南康627线
613905	1	3541105线	新马路610线	苏宁置业1号环网柜B05148负荷开关	7	通富街1524线	通富街1524线
6211511	8	太和1513线	3541105线	中市广场1号开关站1001负荷开关	0	通富街1524线	通富街1524线
中市二广场2号环网柜断路器1	0	城南1181线	通富街1524线	15131623	5	太和1513线	川蜀1623线
中市二广场2号环网柜断路器1	0	南康627线	通富街1524线	6241524	0	通富街1524线	通富街1524线
中市二广场2号环网柜断路器2	2	城南1181线	南康627线	6021313	4	太和1513线	通富街1524线
1000	0	太和1513线	京门604线	6271324	7	南康627线	通富街1524线
6071544	0	大西路607线	大康1544线	1051544	6	通富街1524线	大康1544线
1000	12	川蜀1623线	新马路610线	中市二广场2号开关站1001负荷开关	0	通富街1524线	通富街1524线



附图 3-2 电网边缘划分结果

3.2 边缘动态拓扑获取技术典型案例

以真实世界多分段四路联络配网拓扑为例，将中间无任何开关的配变等效为一个负荷点，简化后的配网模型如附图3-3所示。



附图3-3 10kV环状建设配电网简化模型

为了验证利用判别式算法进行配变联络关系校验的性能，下面从分类精确度与计算速度两个角度进行实验。采用F1-分数评价模型的准确率，其表达式为准确率和召回率的调和平均。

$$F_1 = 2 \cdot \frac{F_{precision} \cdot F_{recall}}{F_{precision} + F_{recall}}$$

其中准确率 ($F_{precision}$) 度量的是被预测为正类的样本中有多少是真正的正类, 召回率 (F_{recall}) 度量的是正类样本中有多少被预测为反类。

附表3-2 深度神经网络进行配网拓扑校验结果

样本数量	深度神经网络模型 F1 分数/%	预测时间/s
5000	94.14	0.783
8000	94.82	0.985
11000	94.97	1.346
14000	95.56	1.639
17000	95.78	1.991
20000	95.93	2.347
23000	96.10	2.582
26000	96.34	2.908

附表3-2表明, 在样本规模不断扩大的情况下, 采用深度神经网络模型不仅可以高精度的完成拓扑反向校验, 并且反向校验所需的时间较短, 采用深度神经网络进行配电网拓扑校验对边缘区域的拓扑感知具有实用价值。

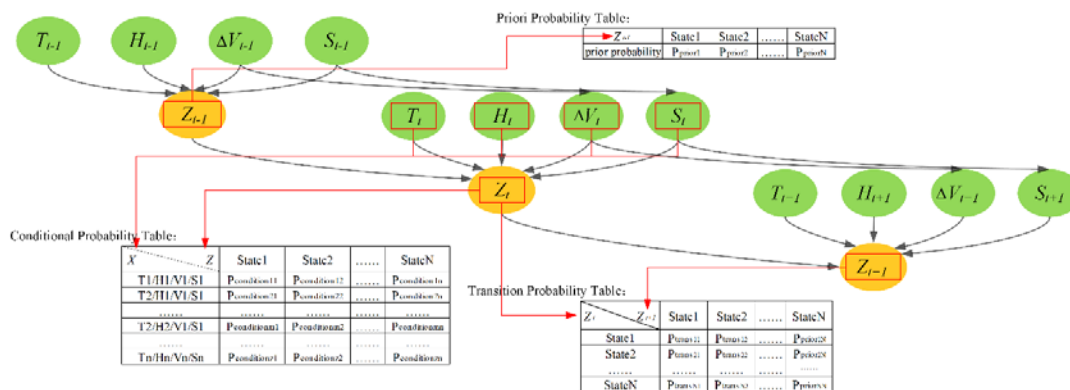
3.3 边缘动态参数辨识技术典型案例

以10kV金轮1线为例, 概率图模型使用的数据分为电网运行数据和气象数据, 其中电网运行数据来自国网营销系统数据库, 气象数据来自58238(南京)气象台数据库, 考虑到气象数据的采集频率与国网营销系统数据的采集频率不同, 利用样条插值法计算补全气象历史数据, 以匹配两种数据来源的频率。考虑到中压配电网线路的集中参数是随时间演进的, 在实际运行中, 配电网线路集中参数与环境、时间密切相关:

- 1、导线中流过电流时, 导线的温升会升高, 进而导致导线的电阻增大, 且不同材质(铝、铜、镀锡铜和镀银铜)的电阻温度系数与综合散热系数不同;
- 2、架空线路周围环境的湿度与天气变化有关, 湿度增加可以导致绝缘电阻降低而表面泄露电流增加。
- 3、配电网线路老化, 导致导线导电性能降低, 电阻增大。

线路物理参数的估计存在实践未知, 为了突破目前存储或计算的线路参数不能满足配电网运行态参数估计要求的瓶颈, 算例提出一种基于动态贝叶斯网络的配电网线路运行态参数辨识的方案, 采用概率的方式来表示和计算不确定性(不确定性量化)。分析配电网线路参数的主要影响因素有: 时间, 温度, 湿度, 馈线段电压

降，馈线段传输功率，依据各变量的依赖关系构建的动态贝叶斯模型（有向无环图）如附图3-4所示：



附图3-4 配电网线路物理参数辨识动态贝叶斯模型的有向无环图

图中绿色圆圈、黄色圆圈分别代表观测(observed)变量 $\{T, H, \Delta V, S\}$ （{温度，湿度，线路电压降，线路流动功率}）和隐(latent)变量 $\{Z\}$ （{线路阻抗}）。将变量划分为观测变量和隐变量只是一种习惯，并不是贝叶斯网络以及动态贝叶斯网络的一种必要策略，实际上，在贝叶斯网络或者DBN的推理和学习中，贝叶斯网络能在任意方向做推理，一个变量是什么类型无关紧要。本算例未涉及预测方面的功能性需求，因此推理的对象为有向无环图中的前两个时间片的贝叶斯网络，即一个2TDBN模型。构建的DBN模型中，电气方面的影响参数为线路电压降、线路传输功率，以原始数据提供的有功、无功功率，结合该馈线的拓扑，经过潮流计算可以获得需要的电气参数，气象方面的影响参数可以直接从原始数据中获得。电气参数与气象参数按照时间合并，构成了 DBN模型的样本，每个样本包含4个属性，样本的标签（线路运行态物理参数）通过仿真得到。本算例中观测变量Z的运行态数据由静态参数依据影响因素经过合理修正获得，通过查阅铝绞线产品手册与相关文献，确定线路参数与温度、湿度、时间的关系：

1) 一般导线的产品手册中查得的电阻值均为温度为 20°C 时的值，国内50HZ电力系统实际运行中一般采用包含电阻温度系数的一元线性方程对电阻值进行修正：

$$r_t = r_{20}[1 + \alpha(t - 20^{\circ}\text{C})]$$

式中 r_t 与 r_{20} 均为单位长度电阻（ Ω/km ）， t 为实际运行下的温度，为电阻温度系统，对于铝导线，对于铜导线。

2) 依据《The variation of resistances with atmospheric humidity》文献中的电阻湿度特性曲线，读取图中的数据点作为样本，对样本进行2阶B样条插值获得电阻湿度特性函数；

3) 采用修正系数法反映线路电阻参数随时间的老化效果。

构建贝叶斯网络的样例数据均为连续型，而贝叶斯网络推断的对象是离散型的。因此需要将原来的连续值离散化（discretization）后使用动态贝叶斯网络对其进行建模。离散化边界的确定采用最大熵的方式（每个类别样本数据相同），离散化的粒度暂定为样本数量的10%。将离散化后的历史样例划分为训练集与测试集，训练集用来学习动态贝叶斯模型的参数，即各变量的初始概率表（PPT）、同一变量不同time slice的转移概率表（TPT）和不同变量间的条件概率表（CPT），测试集用来评估模型的精确度。一般情况下，所有的历史样本并不是总能全部观测到，通常的做法是借助EM算法学习各概率表的参数，但本算例为仿真模型，概率表的计算为历史样本经过统计的结果。

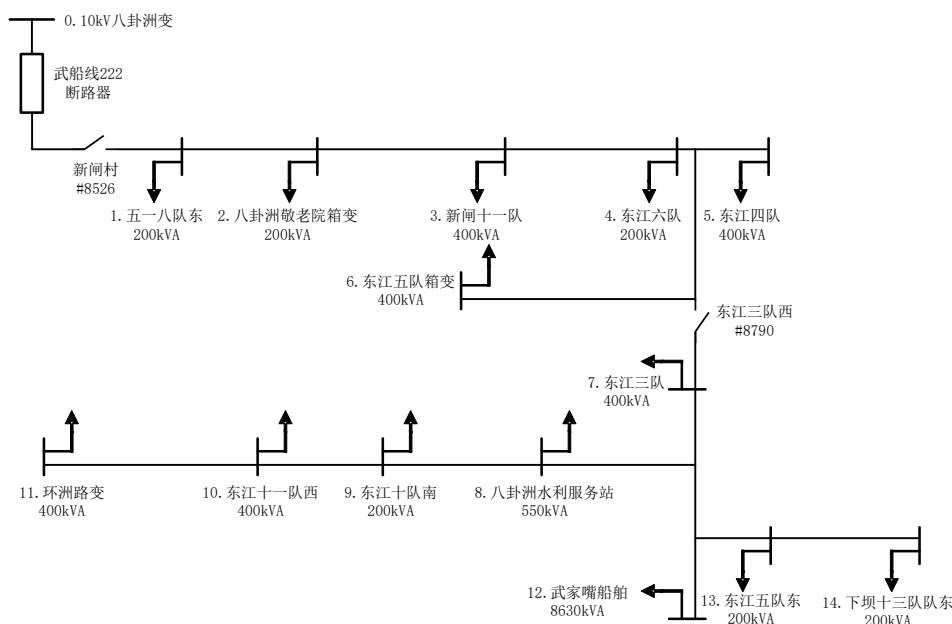
原始样例共33625条，选择样例的90%作为训练数据，剩余10%作为测试数据。添加从训练数据中学习的概率表至DBN模型，并对DBN模型中概率分布的合理性进行check（DBN模型中各变量的所有状态概率之和是否为1，节点的条件概率分布是否与有向图中的父节点一致）。在模型通过检验之后，以{Resistancet-1, Temperaturet, Humidityt, Pt, V_Losst}为证据变量，{Resistancet}为查询变量，通过Pgmpy模块包提供的DBNInference函数依据证据变量对DBN模型的查询变量进行推理。推理利用的算法为基于Belief Propagation的后向算法。推理的结果为一个长度等于隐变量状态数的一维数组，数组中的每一个值代表在目前观测变量下隐变量处于对应状态的概率，选择概率最大的状态作为推断的状态结果。将查询变量状态推断结果与测试集中查询变量的真实结果进行对比，DBN模型推理结果的精确度通过sklearn.metrics中的accuracy_score（准确率）衡量，准确率的表达式如下。

$$accuracy_score = \frac{\text{number of (predict = true value)}}{\text{sample size}}$$

经计算，提出的DBN模型在配电网线路物理参数状态预测的精确度为0.9423。

3.4 边缘状态计算技术典型案例

以真实世界中10kV武船线为例，边缘状态估计的输入数据主要包括：SCADA量测数据、电网边缘拓扑状态、电网边缘参数估计结果、智能电表历史数据。边缘状态估计的输出数据主要包括：边缘内部节点电压和相角、支路功率和电流、根节点注入功率。真实世界的配电网大都由变电站、电力线路、开闭所、环网柜和配电变压器等组成，元件数目庞大，结构复杂。并且由于配电自动化水平的限制，配电网包含很大一部分无法直接量测的元件，但是并不需要对所有元件逐一分析。基于此，按照目前配电网状态估计的数据需求，对静态中压配电网（10kV武船线）拓扑进行简化，简化后拓扑模型如附图3-5所示：



附图3-5 10kV武船线简化拓扑图

通过蒙特卡洛抽样法得到该条馈线的样本后，依据国网目前配电自动化部署FTU测点的实际情况，选择该条馈线下30%的节点的有功、无功序列以及母线电压序列作为神经网络的输入，该条馈线所有配变的电压相角、幅值序列作为神经网络的输出，采用4层前馈全连接神经网络，进行配电网状态估计的结果如附表3-3所示：

附表3-3 配电网状态估计结果

节点 编号	电压幅值 真实值 (Pu)	神经网络 预测结果 (Pu)	相对误差 (%)	电压相角 真实值 (°)	神经网络 预测结果 (°)	相对误差 (%)
1	1.032516	1.032540	0.0527	-0.001266	-0.001261	2.5383
2	1.032108	1.032114	0.0396	-0.001266	-0.026244	3.8123

3	1.028287	1.028240	0.0539	-0.224513	-0.223256	5.7039
4	1.024707	1.024767	0.0352	-0.575312	-0.566922	3.4101
5	1.024693	1.024787	0.0368	-0.576684	-0.566922	2.9793
6	1.024462	1.024543	0.0314	-0.596130	-0.584569	3.3303
7	1.023934	1.024048	0.0341	-0.651443	-0.639255	2.7655
8	1.023924	1.023937	0.0322	-0.652335	-0.640667	2.8832
9	1.023904	1.023911	0.0396	-0.654015	-0.642508	2.8899
10	1.023897	1.023958	0.0310	-0.654367	-0.642570	2.6324
11	1.023881	1.023938	0.0454	-0.654898	-0.642702	2.5988
12	1.023934	1.024026	0.0272	-0.651524	-0.639079	2.8837
13	1.023780	1.023902	0.0510	-0.663533	-0.650260	2.7221
14	1.023686	1.023742	0.0386	-0.671851	-0.661114	2.8693

实验结果证明，在 FTU 布点不全的情况下，用神经网络的方法进行配电网状态估计来弥补传统状态估计的不足是可行的。