DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0156-05

基于云原生微服务架构设计的智慧电厂管理系统研究

吴志刚, 杨 勇

(国能河北定州发电有限责任公司,河北 定州 073000)

摘 要:为应对电力行业降本增效与数字化转型挑战,解决传统电厂管理系统存在的信息孤岛、扩展性差以及微服务架构通信延迟与资源调度不足等问题,研究提出基于云原生微服务架构设计的智慧电厂管理系统的设计思路。研究首先借助 Spring Cloud 技术架构搭建微服务架构,构建了数据中心、应用服务和系统展示三层结构,以实现服务信息传达和容器化部署。同时针对微服务治理需求,设计了一种可感知通信和资源的 Kube-MSRM 调度适配机制,通过将高通信量服务部署于同一节点并引入全局资源平衡器,旨在优化调度响应延迟和资源利用率。结果表明,研究提出的系统在处理负荷管理信息和设备管理信息的最大运行效率分别达到 89.23%和 93.16%,且对不同设备故障的检测精度较高,微服务负载响应远低于 30 ms,最大资源利用效率可达到 96.12%,明显优于其他比较方法。研究提出的方法能有效推动电力行业的智能化转型,提高电厂运行效率和管理能力。

关键词:云原生;微服务架构;智慧电厂;Spring Cloud;管理;Kubernetes

中图分类号: TP311;TM621 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0156-05

Research on smart power plant management system based on cloud native microservice architecture design

Wu Zhigang, Yang Yong

(Hebei Guohua Dingzhou Power Generation Co., Ltd., Dingzhou 073000, Hebei, China)

Abstract: To address the challenges of cost reduction, efficiency improvement, and digital transformation in the power industry, and to solve the problems of information silos, poor scalability, communication delays, and insufficient resource scheduling in traditional power plant management systems, a design concept for a smart power plant management system based on cloud native microservice architecture is proposed. The research first utilizes Spring Cloud technology architecture to build a microservice architecture, constructing a three-tier structure of data center, application services, and system display to achieve service information communication and containerized deployment. At the same time, a Kube-MSRM scheduling adaptation mechanism that perceives communication and resources is designed to meet the governance needs of microservices. By deploying high-throughput services on the same node and introducing a global resource balancer, the mechanism aims to optimize scheduling response latency and resource utilization. The results show that the system proposed in the study has a maximum operating efficiency of 89.23% and 93.16% in processing load management information and device management information, respectively, and has high detection accuracy for different device failures. The microservice load response is much lower than 30 ms, and the maximum resource utilization efficiency can reach 96.12%, which is significantly better than other comparison methods. The proposed method can effectively promote the intelligent transformation of the power industry, improve the operational efficiency and management capabilities of power plants.

Keywords: loud native; icroservice architecture; mart power plant; Spring Cloud; administration; Kubernetes

信息技术的飞速发展使得工业生产方式呈现出智能化、数字化特点,信息获取的便捷程度和管理模式的高效性都有不同程度的提升[1]。工业变革技术正在深刻影响着电力系统的管理和能源生产,但电力行业正面临着降本增效、保障供电安全等多重挑战。加强智慧电厂建设对于提升运营管理水平、实现智能化监控具有重要作用,且智慧电厂这一信息智能发展形态能有效推动产业新业态形成[2-3]。电力企业管理体制的革新以及信息技术的发展要求电厂在满足自身经营目标和市场需求的情况下,改变传统管理方式和思路,提高自动化水平。当前电厂管理系统中的业务设计流程相对复杂,不可避免存在信息孤岛情况,且生产数据标准的不统一以及数据库连通性差等问题也一定程度上加大了集中管理难度,加强对智慧管理系统平台的开发迫在眉睫[4-5]。不同学者对智慧电厂的发展也提出了自己的见解,郝俊伟等[6]对虚拟储能调度响应问题进行分析,提出了结合分布式电源和激励响应的虚拟电

收稿日期:2025-03-15;**录用日期**:2025-04-18

基金项目:国家电网科技项目资助(SGGSPX00HLWJS2200097)

作者简介:吴志刚(1974—),男,高级工程师,研究方向为智能电站建设。

引用本文:吴志刚,杨勇.基于云原生微服务架构设计的智慧电厂管理系统研究[J].自动化技术与应用,2026,45(8):156-160.(Wu Zhigang, Yang Yong. Research on smart power plant management system based on cloud native microservice architecture design [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 156-160.)

厂优化调度方法。结果表明,该方法能有效引导电力调度,具有较好的应用性和有效性。单一可再生能源难以负载电力需求,Fakhar 等[7] 对当前云计算、物联网和区块链技术在智慧能源控制中的应用进行研究,认为将智能电网的驱动机制与技术相融合是未来可再生发展的重要内容。传统单体架构的部署方式往往需要较高的人力成本资源,为满足业务需求和提高管理系统的技术扩展性,云原生微服务架构概念应运而生,其以“容器化、服务化和自动化”为特征,具有灵活性、可扩展性和高可用性等特点,能较好地满足智慧电厂对资源调配和系统扩展的需求。且微服务架构这一思路对管理系统的层次细分有助于管理人员掌握不同信息动态,并及时作出管理决策。因此为满足电网管理需求,研究提出基于云原生技术(loud ative)实现管理系统设计。同时考虑到微服务架构在负载均衡、限流等方面的治理需求,研究还对元原生技术的通信部署进行改进,以减少不必要的资源消耗。研究智慧电厂管理系统,旨在为满足业务需求、提高管理的高效性和自动化水平,为电力行业的数字化转型提供借鉴参考。

1 智慧电厂管理系统与服务调度

1.1 智慧电厂管理系统设计

云原生技术是以云计算为基础且支持动态环境开发部署和解决方案的应用程序,具有灵活性、可扩展性等特点,其核心思想是将应用程序拆分为多个服务单元并将其放置在容器中运行,借助自动化方式实现管理调度[8]。研究在进行智慧电厂管理系统设计时,借助 Spring Cloud 框架实现微服务架构以完成各服务消息传达和应用扩展,并借助容器化部署技术管理系统进行设计,将系统划分为数据中心层、应用服务层以及系统展示层。图 1 为系统总体架构示意图。

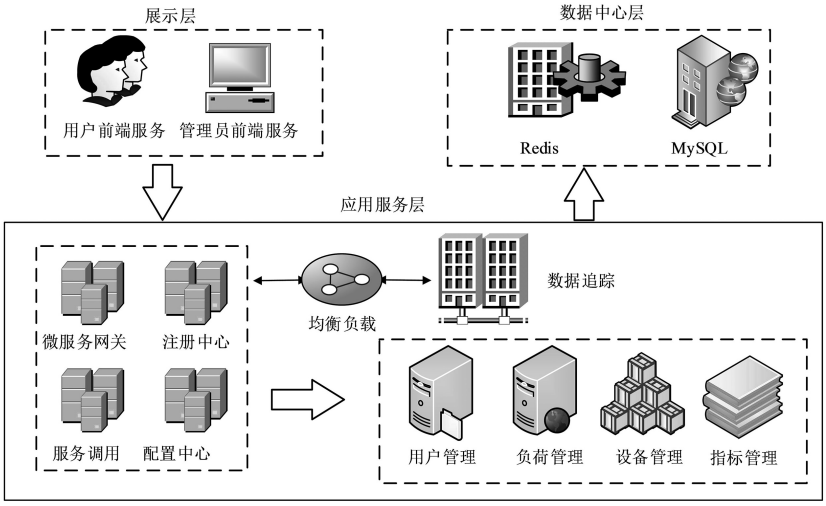


图 1 系统总体架构

Fig. 1 All system architecture

其中数据中心层主要用于为数据管理提供服务,应用服务层包括多个业务需求模块和支持微服务治理的相关组件,系统展示层主要为可视化操作页面,管理者可借助自身的权限管理来为用户提供服务。其中 Nacos 管理平台作为一个基础设施组件,可提供服务注册、动态配置管理等服务,随后研究网关服务(API ateway,API),即借助 Gateway 来为微服务架构提供统一路由管理方式。其中核心库在程序运行环境中不依赖任何框架且其具有较好的兼容性,同时考虑到数据采集的实现,研究在数据采集部分设计了监控系统(upervisory nformation ystem in lant evel,SIS),并借助 Java Servlet 完成接口层设计。SIS 系统首先对代理服务器进行配置,并初始化连接数,之后借助 SDK 软件开发接口实现数据采集,并通过批量历史值读取、快照值读取、注册连接池以及批量插值读取等步骤来完成操作。研究在数据库设计部分主要借助 MySQL 数据库来实现存储管理,该数据库具有访问便捷、安全性高等特点,且能支持多种格式的数据存储。

数据库包括不同类型的功能表格,数据指标信息在进行字段描述后以 JSON 格式存储,其中电厂经济技术指标能有效反映生产数据内容,也是模型构建的重要来源,包括生产在线数据和完成后的离线数据[9]。研究进行技术经济指标计算模型构建时,选取基本物性数据、机组参数、锅炉热效率等指标进行输入分析,各指标数据的动态变化情况作为结果输出可为后续数据分析提供支持[10]。其中煤耗率、锅炉热效率、发电效率是评估技术经济的重要指标,考虑到热损失物理参数难以通过在线测量准确获取,因此研究改进的热损失效率 η 公式为

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6} \times 100\% \tag{1}$$

式中,Q_1 表示锅炉有效利用热量,Q_2 为排烟热损失,Q_3 为气体燃料未完全燃烧的热损失,Q_4 为固体燃料未完全燃烧的热损失,Q_5 为散热热损失,Q_6 为残渣热损失。耗煤率为单位时间内所消耗的标准煤的数量。

在系统应用服务层部分,研究选择 MQTT 代理服务器

来加速系统开发,后端服务器部分则以 Web 完成架构设计,后端服务器的架构设计包括数据访问层、业务逻辑层以及控制层。Web 前端服务器能有效响应用户需求,并实现可视化操作,同时研究借助基于 Vue. js 的桌面 UI 组件库来实现应用程序的构建,提高服务器开发效率的同时也能降低系统的耦合度。面对前端服务器与其他网页交互时的跨域访问问题,研究提出跨域资源共享机制来解决,即将脚手架自带的服务器配置为代理服务器。

1.2 管理系统服务通信优化设计

Spring Cloud 具有丰富的组件和功能,可借助技术和框架集成来实现微服务应用的快速设计,能较好支持微服务的可用性和可恢复性,但其在实际应用中仍存在一定的集群管理和资源调度难度[11]。Kubernetes 可在分布式环境下实现容器管理和编排的开源框架并多被应用于微服务调度中。Kubernetes 集群主要是借助控制节点和工作节点与 MySQL 服务实现服务调度,其核心是借助控制循环来实现节点信息的获取和调度,面对频繁请求时,调度器缓存机制可对信息进行 Cache 化以提高算法执行效率[12]。但其在面对延迟敏感或边缘计算时,不可避免存在通信延迟情况,其主要原因在于其并未考虑到微服务之间的依赖关系[13]。因此需设计与缓存机制有适配性的微服务调度,见图 2。

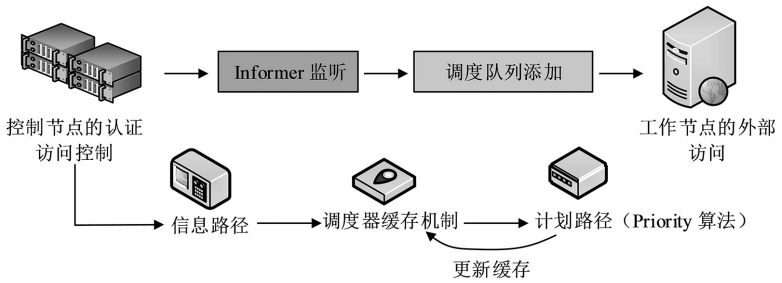


图 2 适配性微服务调度机制

Fig. 2 Adaptive microservice scheduling mechanism

微服务架构所涉及的细粒度数量较多,导致其在负载均衡、限流等方面的治理需求有明显提高[14]。由于属性处理和代理控制器之间的交互过程会产生较高的通信延迟,因此需设计控制规则用以处理请求,包括不缓存情况、代理缓存情况以及控制器缓存情况。为减少数据延迟,提高网络质量,研究提出对技术架构进行优化,提出可感知通信和资源的调度框架,即将 Kubernetes 中的高通信量部署到同一节点上,并设计全局资源平衡器来优化资源。微服务被放置在同一节点后可有效避免数据在跨节点传输所产生的响应延迟情况。过往微服务调度算法难以同时解决资源浪费和响应延迟问题,研究 Kube-MSRM 调度来平衡边缘节点的资源消耗。图 3 为 Kube-MSRM 调度架构示意图。

微服务调度器可降低交互过程中的通信开销,平衡器则在收集资源请求量和边缘节点资源盈余后,对资源进行调度平衡,减少单一情况的浪费。微服务复杂的拓扑结构使得具有频繁交互性的微服务调度到同一节点上且保证较低的通信开销具有较大困难[15-16]。因此,研究考虑借助无向图来表示拓扑结构,计算微服务在运行时的通信量,见式(2)。

$$\mathrm{ComVol}_{i,j}=\sum_{t\in T}\left(\mathrm{Vol}_{i,j,t}^{\mathrm{req}}+\mathrm{Vol}_{i,j,t}^{\mathrm{resp}}\right) \tag{2}$$

式中,i,j 表示微服务,t 为时间,$\mathrm{Vol}_{i,j,t}^{\mathrm{req}}$ 为微服务请求字节数,$\mathrm{Vol}_{i,j,t}^{\mathrm{resp}}$ 为微服务响应字节数。

调度器会对服务器进行打分,并选择分数最高的节点作为最终调度结果。

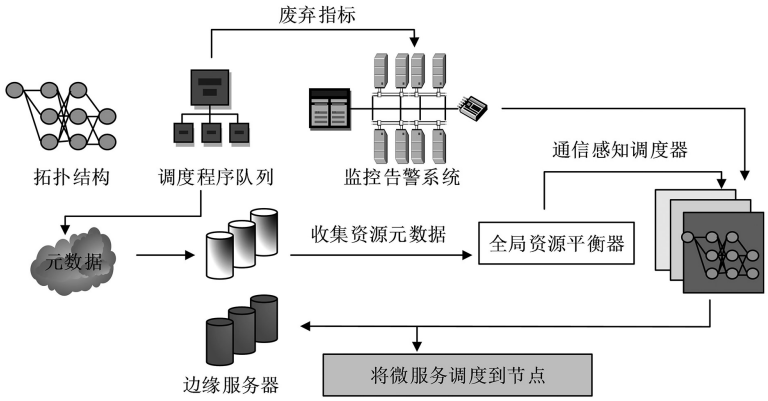


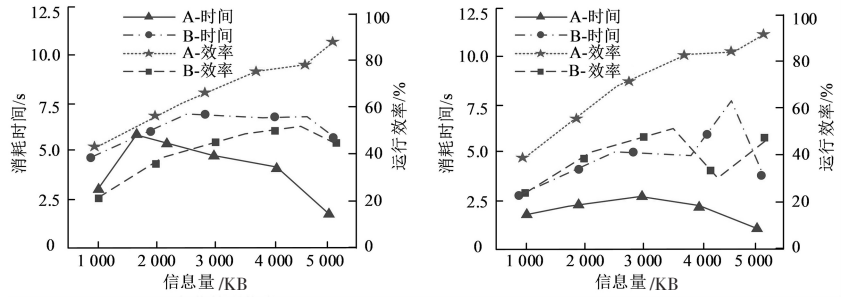
图 3 Kube-MSRM 调度架构

Fig. 3 Kube-MSRM scheduling architecture

2 智慧电厂管理应用效果评价

研究对设计的管理系统进行测试分析,实验环境中的处理器为 Intel (R) Core(TM)i7-2600K CPU @3.40 GHz,内存大小为 8 GB,操作系统为 Ubuntu16.04 64 位。实验系统环境为 Ubuntu20.04,开发工具为 IntelliJ IDEA,微服

务开发架构为 Spring Cloud,同时借助 Spring Boot 来开发和部署组件服务,选择以 Kubernetes 微服务编排框架。借助 Jaeger 收集性能统计数据,Skywalking 监控微服务调用链。用户可通过登录访问进入系统,对研究提出的管理系统进行信息管理分析,对电厂负荷管理和设备管理信息质量进行监控处理,结果如图 4 所示。

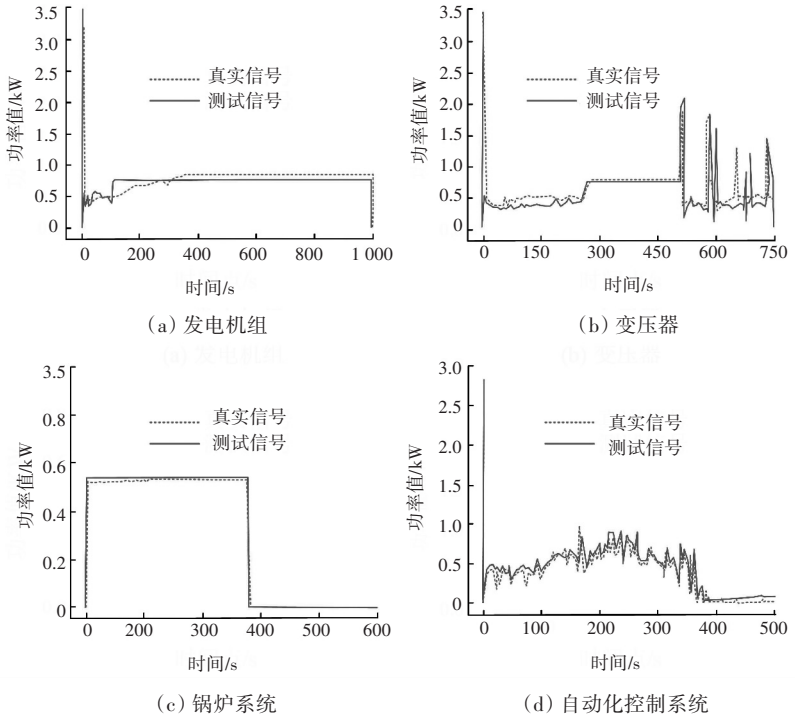


(a) 负荷管理信息　　(b) 设备管理信息

图 4　系统应用前后的信息处理结果

Fig. 4　Information processing results before and after system application

图 4 中的“A”和“B”分别表示系统应用后和应用前的信息处理结果。在负荷管理信息中,研究提出的系统的最大处理消耗时间不超过 5 s,最大运行效率可达到 89.23%。而在应用前的最大运行效率不超过 60%。在设备管理信息中,研究提出的系统表现出较低的处理时间和较大的运行效率,其对应的曲线存在较少的节点波动情况,最大运行效率可达到 93.16%,与应用前存在至少超过 40%的差幅。研究提出的系统在两种信息处理上的最大时间节省率均超过了 10%,具有较好的应用效果。随后对智慧电厂设备进行故障信息检测,并将其与真实检测结果进行比较,结果如图 5 所示。



(a) 发电机组　　(b) 变压器

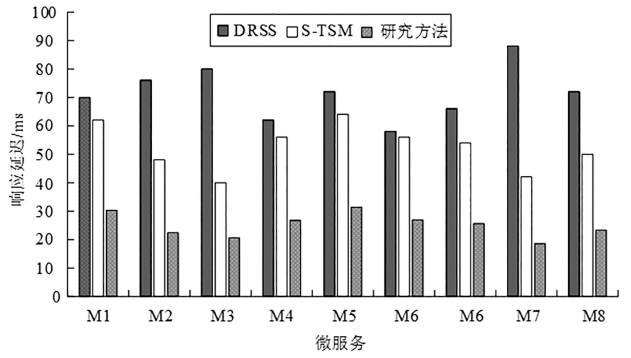
(c) 锅炉系统　　(d) 自动化控制系统

图 5　电厂设备故障诊断结果

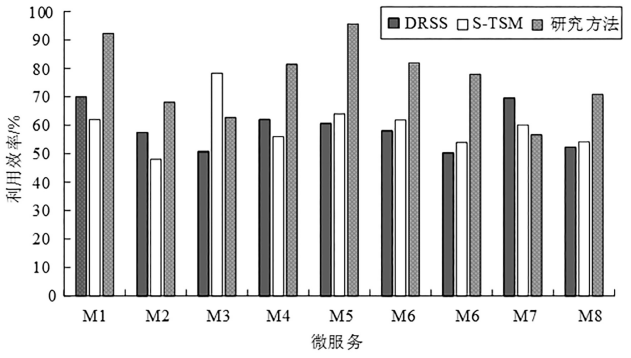
Fig. 5　Power plant equipment fault diagnosis results

图 5(a)~图 5(d)分别为发电机组、变压器、锅炉系统和自动化控制系统四种故障类型。图 5(a)结果表明,此时测试数据仅在时间点为 300 s 前的数据与真实信号存在一定的差异,但其整体所表现出的功率差幅不超过 4%。图 5(b)中,测试结果与真实结果走向大致相同,且其在后期的功率变化曲线趋势也基本相同。图 5(c)中,研究提出的智慧管理系统能较好地对锅炉系统故障情况进行诊断,其与真实信号所表现出的最大差幅不超过 0.5%。图 5(d)中,在时间范围为(20 s,380 s)时,测试结果下的自动化控制系统设备的功率呈现出起伏情况,与真实结果存在一定的误差情况,误差变化幅度小于 1%。综上结果显示,研究提出的管理系统能较好地对不同设备的故障信号检测,且检测结果与真实值之间的偏差较小,能有效为设备故障预警提供参考。随后设置通信和资源的权重系数为 0.50,将研究提出的优化结构进行微服务负载响应及资源利用率分析,并将其与动态资源选择策略

(ynamic esource election trategy, DRSS)、任务调度微服务(ask cheduling icroservice for imulation,S-TSM)进行比较,结果见图6。



(a) 不同调度策略的响应延迟



(b) 不同调度策略的利用效率

图6 不同微服务调度策略的负载响应及资源利用率

Fig. 6 Load response and resource utilization of different microservice scheduling strategies

图6(a)结果表明,在低负载情况下,研究提出的Kube-MSRM具有较低的响应延迟,其数值基本低于30 ms,整体表现较为平衡,且其最小响应时间延迟可小于20 ms。而DRSS、S-TSM两种比较算法的响应延迟情况都大于40 ms,其中DRSS调度方法表现较差,最大时间延迟可达到89 ms,与同等条件下的研究方法存在50 ms的差幅。资源利用率能评估系统架构管理的有效性,图6(b)结果表明,DRSS、S-TSM虽表现出较为均衡的通信利用效率,但其最大值仍不超过80%,且难以适应工作负载的动态变化。研究提出的方法在不同微服务上的利用效率均大于50%,且与其他比较方法存在较为明显的差幅情况。

综合上述结果,研究提出的管理系统能较好地对信息数据进行处理,微服务负载响应及资源利用率较好,该方法处理负荷管理信息的最大处理消耗时间不超过5 s,最大运行效率可达到89.23%。该系统的调度响应延迟较低,能适应工作负载的动态变化,其在设备管理信息中的最大运行效率可达到93.16%,与应用前存在至少超过40%的差幅,最大时间节省率均超过了10%。微服务负载响应延迟基本低于30 ms,资源利用效率均大于50%。而DRSS、S-TSM两种比较算法的响应延迟都大于40 ms,通信利用效率最大值仍不超过80%。

3 结论

智慧电厂建设是实现发电厂高效率高质量发展的关键,其信息化管理系统的设计在竞争激烈的市场环境下尤为重要。研究基于云原生微服务架构进行管理系统设计,从框架设计和服务通信优化两部分进行分析,并对其进行性能测试及应用效果检验。结果表明,研究的智慧电厂管理系统具有较好的应用有效性,能有效提升电厂管理能力,推动其智能信息化发展。丰富电厂管理系统功能模块并引入新技术框架或集成设计思路来提高系统微服务系统应用效果是今后需关注的重要内容。

参考文献

[1]宋天琦,吕志鹏,宋振浩,等.虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考[J].中国电力,2024,57(1):2-8.
[2]何肖嵘,夏增武,杨戊,等.基于容器化5G消息微服务应用架构的研究[J].电信科学,2023,39(1):104-109.
[3]孙永辉,孟雲帆,葛磊蛟,等.人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J].高电压技术,2023,49(6):2239-2252.
[4]申赞伟,刘彦博,郭子康,等.基于树莓派4B的云原生Kubernetes计算集群实验设计[J].实验技术与管理,2023,40(11):64-70.
[5]李知艺,袁涔,杨福,等.云计算环境下配电网调度决策模型诱骗式隐私保护方法[J].电力系统自动化,2023,47(8):80-88.
[6]郝俊伟,樊艳芳.考虑需求响应优先级的配电终端虚拟电厂优化调度研究[J].可再生能源,2024,42(5):647-654.
[7]Fakhar A,Haidar A M A,Abdullah M O,et al. Smart grid mechanism for green energy management: a comprehensive review[J]. International Journal of Green Energy,2023,20(3):284-308.
[8]翁东雷,王露民,莫建国,等.基于云计算关联分析的电力设备故障识别模型[J].电网与清洁能源,2023,39(10):38-44.
[9]于秋玲,梁锦照,陈康平.基于云边协同的交直流混联电网线路过负荷协调控制方法[J].沈阳工业大学学报,2024,46(3):241-247.
[10]包英捷,郝杰勇,余长开,等.新型电力系统中火电机组运营智慧决策系统[J].热力发电,2024,53(1):183-187.
[11]Chen B, Ge W. Design and optimization strategy of electricity marketing information system supported by cloud computing platform[J]. Energy Informatics,2024,7(1):1-20.
[12]崔昊杨,李星棪,冯天波,等.基于容器放置优化的云数据中心节能技术[J].计算机工程与设计,2023,44(11):3504-3512.
[13]吴崛起,安凤栓,王全康.发电厂设备运行状态的在线数字孪生仿真系统[J].自动化技术与应用,2024,43(1):148-152.
[14]张世旭,李姚旺,刘伟生,等.面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J].电力系统自动化,2024,48(1):21-30.
[15]张鑫鑫,黄宇,雷美炼,等.电力系统关键业务指标管控平台研究[J].环境技术,2024,42(6):22-28.
[16]沈广,庄晓丹,孙瑜.基于需求侧响应的虚拟电厂自动优化调度系统[J].自动化技术与应用,2024,43(5):158-162.