DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190965

一种面向电力调控云的高效运维方法

陈振宇[1,2]，刘 东[1]，高兴宇[3]，狄方春[1]，黄运豪[1]，李大鹏[1]，张 杰[4]

(1. 电力调度自动化技术研究与系统评价北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京 100192；
2. 国家电网有限公司大数据中心，北京 100031；3. 中国科学院微电子研究所，北京 100029；
4. 国网天津市电力公司，天津 300010)

摘要：随着云计算、大数据、人工智能等 IT 新技术的不断发展，依托其构建的电力调控云规模不断扩大，相应的电力调控云应用服务数量也随之成倍增加，使得它们电力调控云的运维复杂度加大，运维任务量加重，基于人工的运维模式效率低下、出错率较高。持续集成、持续部署(CI/CD)平台可对电力调控云进行高效、精准的自动化维护。通过引入一种面向电力调控云的高效运维方法，执行完成电力调控云产品的自动化构建、版本控制、批量部署等运维任务。最后通过对电力调控云平台的仿真实验，验证了该方法可以减轻运维任务量，提升工作效率。

关键词：调控云；CI/CD；Jenkins+Gitlab+Ansible 一体化；自动化运维

An efficient operation and maintenance method for power dispatching and control cloud

CHEN Zhenyu[1, 2], LIU Dong[1], GAO Xingyu[3], DI Fangchun[1], HUANG Yunhao[1], LI Dapeng[1], ZHANG Jie[4]

(1. Beijing Key Laboratory of Research and System Evaluation of Power Dispatching Automation Technology (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. Big Data Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: With the continuous development of new IT technologies, such as cloud computing, big data, artificial intelligence and so on, the scale of the dispatching and control cloud they build is expanding continuously. At the same time, the number of the services of the dispatching and control cloud are also increasing greatly. This all makes the man-made operation and maintenance mode of the dispatching and control cloud inefficient and of high error rate. It is difficult to guarantee the safe and high-quality operation of a power grid and the lean and efficient operation of the dispatching management. A Continuous Integration and Continuous Deployment (CI/CD) platform can achieve efficient and accurate maintenance of the dispatching and control cloud. In this paper, the CI/CD platform, which consists of the Jenkins, Gitlab and Ansible, is introduced to complete the operation and maintenance tasks of the dispatching and control cloud, such as automatic build, version control, and batch deployment. Finally, through the simulation of the dispatching and control cloud, it is verified that this scheme can reduce operation and maintenance workloads and improve work efficiency.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5442DZ170012) “Research on Key Technologies of the Dispatching and Control Cloud Platform”.

Key words: dispatching and control cloud; continuous integration and continuous deployment (CI/CD); Jenkins+Gitlab+Ansible integration; automated operation and maintenance

0 引言

随着我国特高压互联电网建设的不断深入，电网规模迅速发展，电网结构日益复杂，对大电网一体化运行水平提出了更高要求，需进一步加强调控系统的支撑能力和集中分析决策能力，持续提升调控信息即时共享水平和调控应用的服务管理水平，增强数据处理、数据计算和应用共享能力。电力调控云的建设打破了数据分散、应用覆盖面窄、数据

基金项目：国家电网公司总部科技项目(5442DZ170012)“调控云平台支撑关键技术研究”

应用间缺乏共享的模式，为推进调控数据处理、计算及应用共享的深入，亟需研究面向电力调控云的自动化运维技术，提升电网调度自动化系统的工作效率。当前电力应用产品数量及服务器的规模，随着电力调控云建设的持续推进而成倍增长，运维任务量也随之加大。传统的基于人工的运维方式效率低下、出错率较高，这成为电力调控云建设持续推进过程中的一道障碍。

电力调控云的建设对我国智能电网调度自动化的发展至关重要，如何高效、精准地维护电力调控云已成为其建设发展过程中的一大热点。越来越多的科研工作者开始专注于复杂电网中云平台的自动化运维技术。文献[1]对电力调度自动化网络运维平台进行了设计与研究，不仅可以实时地掌握电力调度自动化系统的运行情况，同时还能及时地发现与预测故障问题，显著地提升了电力调度自动化系统运维工作效率与质量。文献[2]对 IT 运维自动化现状和问题进行了深入的探讨，确立了高效 IT 运维自动化能力的优势和应用场景。文献[3]通过建立自动化系统数据采集和汇集机制，对其进行实时监视与告警。目前整个电力调控云主要由基础设施层(Infrastructure as a Service, IaaS)、平台服务层(Platform as a Service, PaaS)、软件服务层(Software as a Service, SaaS)构成。其中电力调控云基础设施层关键技术主要包括资源池化技术、虚拟化资源管理和调度技术等。立足于电力调控云平台资源整合要求，研究“资源池化”技术，将电力调控云平台内部的服务器、存储和网络资源整合形成具有抽象、虚拟特征、可动态扩展的资源池，构建服务器、存储、网络资源池，形成硬件支撑环境，为电力调控云平台和应用建设提供高可靠、高可用的 IT 基础资源池。每层的每一个模块又由数量众多、功能不同的电力应用服务构成。而上述提及的研究与探索虽各具特点，但面对如此众多的电力应用部署任务和规模庞大的服务器数量，目前无法做到安全、稳定、高效的运行与维护[4-5]，存在的问题如下：

(1) 手动频繁地对电力应用产品进行构建、部署，出错率较高；

(2) 构建、部署、测试的环境配置变更也较为频繁，致使其运维效率低下；

(3) 无法自动化实现多版本的回滚控制；

(4) 频繁地在多台服务器上部署同一种应用或进行同一种操作；

(5) 缺少对电力产品的及时反馈机制。

在现有的自动化运维工具中：Jenkins 可以很好地作为电力调控云产品的持续集成、持续部署平台；Gitlab 可以完成电力调控云产品部署的版本控制，根据需要回滚到指定版的电力产品，确保电力调控云系统运行的稳定性；Ansible 则可以实现电力调控云产品的批量自动化部署，节省时间，提高效率。这三者的技术结合具有很多独特的优势：

(1) 减少人工操作的重复性，降低运维成本，提升持续集成效率。

(2) 在任何时间都能成功完成持续集成过程。

(3) 此三者的技术结合适用于需求模糊或者需求变更频繁的项目，研发进度更容易被掌控。

针对以上问题，本文提出了基于 Jenkins+Gitlab+Ansible 一体化的 CI/CD 平台在电力调控云自动化运维中应用的方法，并对自动化构建、自动化部署的各个环节做了详细设计。最后以实际项目为例，验证了本文提出的持续集成、持续发布方法的优势及可行性。

1 CI/CD 相关理论分析

CI/CD 是指能够实现电力产品的频繁集成与迭代测试，通过频繁构建发现缺陷、及时改进，保证电力产品质量，进而将合格的电力产品部署到远程服务器上，更好地服务电网调度[6-7]业务。CI/CD 的自动化过程主要分为两个阶段，即自动化构建和自动化部署。自动化运维作为电力调控云建设工作中的必要环节，其提供了高效可行的集成部署方法，利用 Jenkins 持续构建并及时定位问题；Gitlab 则会在应用部署的前期保存写好的部署脚本，并在后期使用它的版本控制机制完成预发布电力产品的版本控制；在预部署及发布产品时，利用 Ansible 将电力产品批量交付到电力调度机构的目标机中。CI/CD 的整体架构设计如图 1 所示。

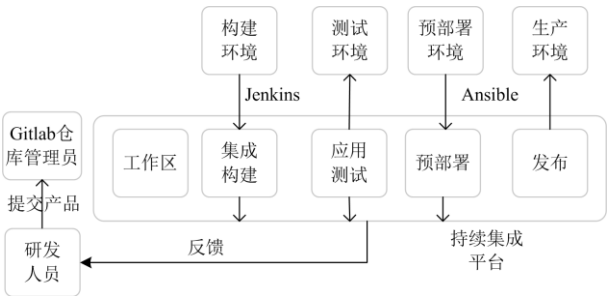


图 1 CI/CD 整体架构设计

Fig. 1 CI/CD overall architecture design

1.1 Jenkins 理论技术

Jenkins 是一个具有可扩展性的持续集成引擎，旨在提供一个开放易用、安全可靠的电力调控云产品构建平台，使持续集成变成现实[8-9]。它支持多种

插件，通过插件使其能够支持更多的功能。

目前主流的电力产品部署方法，主要依靠 Jenkins 工具实现“集成构建+全自动化测试+自动化部署”。在电力调控云产品的架构设计完成后，开展研发各模块的电力产品并提交更新，Jenkins 通过钩子监听源码管理工具，获取最新电力产品。根据创建好的 Jenkins 任务及编写好的脚本，依次完成电力产品构建、打包、集成测试、部署等过程，最后在产品质量合格及预部署都没有问题的情况下进行生产环境发布[10-12]。

1.2 版本控制(Gitlab)理论技术

Gitlab 是一个开源的、主流的版本管理系统，实现一个自托管的 Git 项目仓库，具有非常完善和方便的分支管理机制，可以简单便捷地合并多个分支。Gitlab 使得电力产品版本的统一管理变得十分容易，Jenkins 可以通过 Git 插件完成电力产品的获取。Gitlab 成为目前主流的版本控制系统，具有如下优势：

(1) 差异化的版本管理，离线同步以及强大的分支管理功能；

(2) 便捷的 GUI 操作界面以及强大的账户权限管理功能；

(3) 集成度很高，能够集成绝大多数的开发工具；

(4) 支持内置 HA，保证在高并发下仍旧实现高可用性。

Gitlab 管理项目的机制为：在本地完成电力产品各模块的研发后，先通过 Git 工具提交到其所属的分支上，然后将其提交给项目主管审核，审核通过的产品经由项目主管合并到主分支上，然后以标签的方式作为版本控制的依据，最后通过 Jenkins 进行构建、部署与发布。

1.3 Ansible 理论技术

Ansible 是一种简单的自动化 IT 工具，集合了众多运维工具的优点，可以远程同时发送命令给多台目标机进行配置管理和应用部署，也可以通过各种编程语言进行模块扩展，实现系统配置、运行命令、程序部署等一键式批量化的功能。Ansible 具有如下优点：

(1) 轻量级，客户端无需安装代理；

(2) 可以在本机以脚本的形式完成批量任务；

(3) 强大的稳定性和兼容性。

2 调控云 CI/CD 构建方案设计

本文 CI/CD 的方案设计为：通过 Jenkins+Gitlab+Ansible 一体化 CI/CD 平台，实现电力调控云产品从提交到构建、测试、预部署以及最后发布的整个过程的完全自动化[13-14]。最终，要通过此集成、发布平台达到以下目标：

(1) 减少重复操作过程，降低人工干预的失误率，提高工作效率；

(2) 通过版本控制功能，完成对电力应用产品的统一管理；

(3) 实现产品的编译、打包、部署的自动化；

(4) 通过频繁构建尽早发现电力调控云产品缺陷并及时处理。

2.1 电力调控云概述

电力调控云是以电网调度为核心业务的服务平台，其整体的架构设计综合考虑了电网调控业务需求和云计算技术特点[15-17]。电力调控云主要由基础设施层(IaaS)、平台服务层(PaaS)、软件服务层(SaaS)三部分组成。IaaS 层以虚拟化的方式将物理资源虚拟化，构建资源池即计算资源池、存储资源池、网络资源池，并以接口调用的方式完成对这些资源的统一管理。为有效支撑调控云未来业务的发展，调控云硬件架构建设将立足于规范化、统一化、标准化的设计原则，采用业界标准的硬件设备，建设形成资源池，实现对各类资源的按需分配，方便业务的快速部署和弹性扩容；同时弱化硬件、软件、数据、网络、存储等 IT 系统不同层面资源之间的物理依赖，实现高可靠、高可用、高弹性，实现集约化和透明化管理。利用虚拟化资源管理和调度技术，构建深度契合调度业务的虚拟化资源管理和调度平台，实现支撑调度业务的资源的统一管理、灵活调度、按需交付，从而快速响应调度业务对资源的需求，提高实体资源的利用效率，提升调度的整理管理水平[18-20]。PaaS 层集成了数据存储与监视、公共服务，权限、日志、告警等众多平台资源管理应用。考虑到电网业务的发展规划，电力调控云的 PaaS 层主要由 5 个业务支撑平台组成，即模型数据云平台、运行数据云平台、公共资源管理、实时数据云平台、大数据平台。SaaS 层为调控云应用服务提供部署、获取、运行一体化的资源，并具有管理资源的权限。电力调控云“主导节点+协同节点”的两级架构如图 2 所示。

2.2 自动化构建模块设计

自动化构建是 CI/CD 的第一个环节，构建过程包括：产品获取、编译、单元测试、版本控制等。电力产品更新后，先在 Gitlab 中以标签的方式确定此次更新产品的版本号，再通过触发 Jenkins 拉取最新电力产品，然后调用脚本依次执行构建步骤。自动化构建插件如表 1 所示。

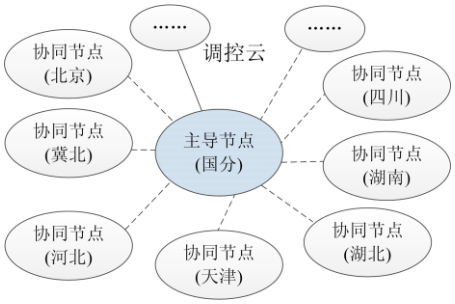


图 2 电力调控云架构图

Fig. 2 Architecture of "Dispatching and Control Cloud"

表 1 插件模块说明

Table 1 Plug-in module description

插件类型	含义
Checkstyle	电力产品规范检查
FindBugs	电力产品 bug 检查
TestNG	电力产品单元测试
Git parameter	电力产品版本控制变量
Ansible	电力产品的批量部署

2.3 自动化部署方案设计

在经过一系列的构建后，要对产品执行自动化预部署和生产环境的发布。具体的部署流程如下：

(1) 利用 Git 获取指定版本的电力产品，并进行打包；

(2) 利用 Ansible 脚本命令通过集成平台将 war 包先后部署到预部署和生产环境中；

(3) 调用启停服务脚本启动应用。

自动化部署中的“自动化”具体体现在：向版本库提交新的电力产品后，用户可以通过版本控制指定具体版本的电力产品，完成自动部署[21-22]。自动部署流程如图 3 所示。

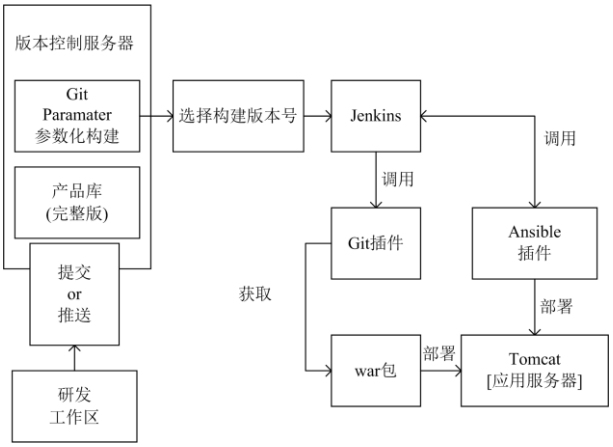


图 3 电力产品的自动化部署流程

Fig. 3 Automated deployment process of electric power products

3 电力调控云平台实验仿真

由于整个电力调控云系统中应用产品较多，本仿真实验以电力调控云系统中典型的电力产品集成部署为例。搭建 CI/CD 的自动化运维平台后，验证本文设计的平台是否可以实现自动化构建、批量部署等功能[23-24]。此次仿真的环境配置表如表 2 所示。

表 2 实验环境设备配置表

Table 2 Equipment configuration table for laboratory environment

设备	项目	配置
服务器	设备	华为服务器
	数量	1 台
	硬件	CPU：4 核　内存：8 G
	软件	tomcat、Git 、JDK
客户端	设备	虚拟机
	数量	40 台
	硬件	CPU：4 核 内存：8 G

3.1 自动化持续集成构建验证

Jenkins 中创建电力产品构建任务，执行持续集成构建。如图 4 所示，一个序号代表一次构建任务，蓝色表示构建成功的任务，红色表示构建失败的任务。通过构建时间趋势图可以看出经过多次的持续集成构建，云平台下的电力产品每次完成集成部署的时间越来越短，且连续集成部署成功的次数也越来越多，这可表明电力产品采用本文提出的方法，经过长时间的频繁集成，产品质量逐渐趋于完善、成熟和稳定。

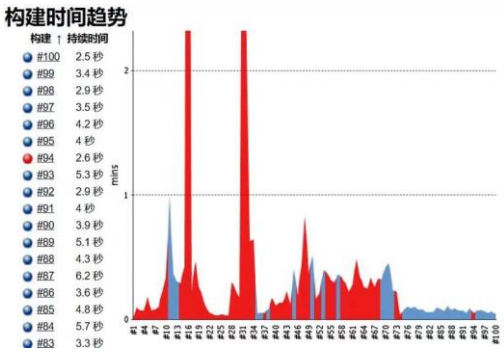


图 4 持续集成构建 Job 图

Fig. 4 Building Job diagram by the means of continuous integration

3.2 自动化批量部署验证

批量部署在数据监控服务中应用最为典型，以电力调控云状态监视应用服务部署最为突出。其实施应用需要集成、部署的主要电力产品包括：云监控代理(cloudmonitoragent)、云监控服务(cloudmonitor-server)、云监控 web 访问(cloudmonitor-web)、搜索

服务(elasticsearch)等众多服务产品。其中云监控代理需要部署到整个电力调控云系统的所有服务器中，本实验电力调控云系统共 40 台服务器，日志服务需要部署一个集群。首先需要将云监控代理服务和日志服务安装到服务器中，表 3 为基于人工部署与 Ansible 批量部署这 2 种电力产品的耗时对比。人工部署上述 2 种电力产品需要登录每台远程主机，其中云监控代理(cloudmonitoragent)需重复操作 40 次，搜索服务(elasticsearch)需重复操作 3 次，而利用 Ansible 批量部署则各自只需操作 1 次。通过对比分析可以发现利用 Ansible 批量部署耗时较少，效率较高[25-26]。

表 3 人工部署与 Ansible 批量部署的耗时对比

Table 3 Time-consuming comparison between manual deployment and Ansible batch deployment

电力产品类型	部署台数/台	人工部署耗时/s	Ansible 批量部署耗时/s
云监控(Ag)	40 台	120×40	3
搜索服务(Es)	3 台	180×3	2

3.3 自动化运维效果分析

电力调控云自动化运维平台在实际运行过程中，保障了电力调控云的运维工作便利、高效。如图 5 所示，本文持续记录了电力调控云应用采用此运维平台进行维护的前后 3 个月内，应用出现问题的频数统计图。可以看出，通过采用此自动化运维平台，使得运维管理模式由被动转变为主动，整体上运维水平、质量和效果有显著提升[27-28]。因此运维平台能够有针对性地对电力调控云应用服务进行监视，在没有使用该平台之前，调控云上的一些应用在出现问题后才能发现，无法做到及时处理，而使用该平台后，则能够有针对性地对一些故障问题进行预测，在问题出现之前就能及时处理，保障了系统的安全与稳定运行。

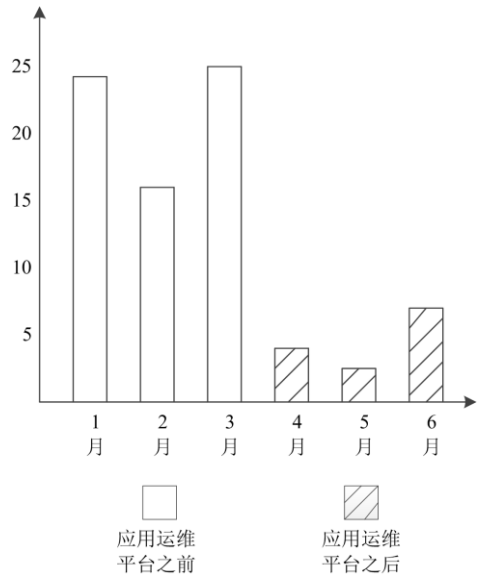


图 5 平台故障次数统计图

Fig. 5 Statistical chart of platform failure number

经过长时间的跟踪测试，证明了采用此运维平台进行 CI/CD 发布电力产品，在电力调控云系统中应用是实际可行的，而且经过集成、构建等一系列的步骤，最终发布的电力产品功能稳定、运行可靠。

4 结论

本文通过 CI/CD 平台自动化构建任务、自动化批量部署电力调控云状态监视、运行数据查询、仿真控制等主要云平台产品，并进行了仿真验证，验证结果表明本文提出的基于 Jenkins+Gitlab+Ansible 一体化的持续集成、持续发布平台在电力调控云运维中应用是可行的。该 CI/CD 平台可以实现自动化构建、批量部署、版本控制等功能，较大地提高了电力调控云系统的维护效率和运维质量，同时也减轻了运维人员的工作压力，节省了大量的运维工作时间。

参考文献

[1] 李红. 电力调度自动化网络运维平台的设计与应用[J]. 机电工程技术, 2019(6): 205-206, 259.
LI Hong. Design and application of operation and maintenance platform for electric power dispatching automation network[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2019(6): 205-206, 259.

[2] 吕华辉, 林志达, 徐欢. IT 运维自动化能力提升探析[J]. 电子测试, 2019(10): 137-138, 134.
LÜ Huahui, LIN Zhida, XU Huan. Analysis on the improvement of IT operation and maintenance automation ability[J]. Electronic Testing, 2019(10): 137-138, 134.

[3] 沙一川, 季惠英. 调度自动化系统及设备统一运维技术[J]. 电子技术与软件工程, 2019(5): 125.
SHA Yichuan, JI Huiying. Dispatching automation system and equipment unified operation and maintenance technology[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(5): 125.

[4] 蒲天骄, 王晓辉, 李志宏, 等. 基于云计算的电网培训仿真系统架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2533-2540.
PU Tianjiao, WANG Xiaohui, LI Zhihong, et al. Architecture and key technology of power grid dispatch training simulation based on cloud computing[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2533-2540.

[5] 曹阳, 高志远, 杨胜春, 等. 云计算模式在电力调度系

统中的应用[J]. 中国电力, 2012, 45(6): 14-17.
CAO Yang, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun, et al. Application of cloud computing in power dispatching systems[J]. Electric Power, 2012, 45(6): 14-17.

[6] 艾艳可. 基于 OpenStack 的数据中心自动化综合运维平台[J]. 信息技术与标准化, 2017(3): 73-76.
AI Yanke. Data center automation integrated operation and maintenance platform based on OpenStack[J]. Information Technology and Standardization, 2017(3): 73-76.

[7] 赵新, 于滨, 唐素珍, 等. 自动化运维工具 SaltStack 的研究与自动化运维平台建设[J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 73-77, 84.
ZHAO Xin, YU Bin, TANG Suzhen, et al. Research on automated operation and maintenance tool SaltStack and construction of automated operation and maintenance platform[J]. Information and Communication Technology, 2017, 11(1): 73-77, 84.

[8] LI Dapeng, CHEN Zhenyu, DENG Zhaoyun, et al. A wide area service oriented architecture design for plug and play of power grid equipment[J]. Procedia Computer Science, 2018, 129: 353-357.

[9] CHEN Zhenyu, LI Dapeng, DENG Zhaoyun, et al. The application of power grid equipment plug and play based on wide area SOA[C] // Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Energy Internet, May 21-25, 2018, Beijing, China: 19-23.

[10] 信斌, 王桂花. 基于 Python 和 Jenkins 的设备异常诊断系统设计与实现[J]. 软件导刊, 2017, 16(11): 110-113.
XIN Bin, WANG Guihua. Design and implementation of equipment exception diagnosis system based on Python and Jenkins[J]. Software Guide, 2017, 16(11): 110-113.

[11] 周莹, 欧中红, 李俊. 基于 Jenkins 的持续集成自动部署研究[J]. 计算机与数字工程, 2016(2): 267-270.
ZHOU Ying, OU Zhonghong, LI Jun. Research on continuous integration automatic deployment based on Jenkins[J]. Computer and Digital Engineering, 2016(2): 267-270.

[12] 孙大雁, 丁杰, 彭林, 等. 面向多级调度管理的云搜索体系架构研究[J]. 电力工程技术, 2013, 32(6): 5-7.
SUN Dayan, DING Jie, PENG Lin, et al. Research on cloud search architecture for multilevel scheduling management[J]. Electric Power Engineering Technology, 2013, 32(6): 5-7.

[13] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.

[14] 李巍, 王鸥, 郑善奇, 等. 基于资源限制的融合网络 QoS 模型优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 144-149.
LI Wei, WANG Ou, ZHENG Shanqi, et al. Optimization of QoS model of integrated network based on resource constraints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 144-149.

[15] 许洪强. 调控云架构及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3104-3111.
XU Hongqiang. The architecture of dispatching and control cloud and its application prospect[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3104-3111.

[16] 韩笑, 狄方春, 刘广一, 等. 应用智能电网统一数据模型的大数据应用架构及其实践[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3206-3212.
HAN Xiao, DI Fangchun, LIU Guangyi, et al. A big data application structure based on smart grid data model and its practice[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3206-3212.

[17] 陈好杰, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于云理论的风电场群长期出力区间预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 110-117.
CHEN Haojie, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. Interval prediction for long-term wind power of wind farm clusters based on cloud theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 110-117.

[18] 梁寿愚, 胡荣, 周华锋, 等. 基于云计算架构的新一代调度自动化系统[J]. 南方电网技术, 2016, 10(6): 8-14.
LIANG Shouyu, HU Rong, ZHOU Huafeng, et al. A new generation of power dispatching automation system based on cloud computing architecture[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 8-14.

[19] 徐春雷, 余璟. 基于云技术的区域调控技术支撑系统[J]. 电力工程技术, 2015, 34(3): 5-9.
XU Chunlei, YU Jing. The regional dispatching and control technology support system based on cloud technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2015, 34(3): 5-9.

[20] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 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(1): 2-8.
XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Present situation and technical prospect of smart grid dispatching control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.

[21] 李新鹏, 邬小波, 高欣, 等. 业务与硬件融合的智能电

网调度控制系统健康度综合评价[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 78-83.
LI Xinpeng, WU Xiaobo, GAO Xin, et al. Overall evaluation of health degree for smart grid dispatch and control systems based on integration of business and hardware[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 78-83.

[22] 刘纯, 黄越辉, 张楠, 等. 基于智能电网调度控制系统基础平台的新能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 159-163.
LIU Chun, HUANG Yuehui, ZHANG Nan, et al. Renewable energy dispatching based on smart grid dispatching and control system platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 159-163.

[23] ABAPOUR S, NOJAVAN S, ABAPOUR M. Multiobjective short-term scheduling of active distribution networks for benefit maximization of DisCos and DG owners considering demand response programs and energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 95-106.

[24] 杜家兵. 基于 ITIL 的电力信息自动化运维体系研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(7): 178-181.
DU Jiabing. Research on power information automation operation and maintenance system based on ITIL[J]. Automation & Instrumentation, 2019(7): 178-181.

[25] 朱轶伦, 陈新建, 高强, 等. 一种基于深度强化学习的电网潮流特征提取方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 7-12.
ZHU Yilun, CHEN Xinjian, GAO Qiang, et al. A power flow feature extraction method based on deep reinforcement learning[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 7-12.

[26] 杨晓萍, 吕图园, 胡杨, 等. 基于改进 GP-GWO 算法的电力负荷自动建模[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 60-65.
YANG Xiaoping, LÜ Tuyuan, HU Yang, et al. Power load automatic modeling based on improved GP-GWO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 60-65.

[27] 冯健, 牛海明. 空气质量监测数据驱动的光伏发电多尺度功率预测方法[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 69-76.
FENG Jian, NIU Haiming. Multi scale power prediction method of photovoltaic power generation driven by air quality monitoring data[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 69-76.

[28] 周湘杰, 袁小芳, 阳领. 光伏电站自适应光伏支架设计及仿真分析[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 84-89.
ZHOU Xiangjie, YUAN Xiaofang, YANG Ling. Design and simulation analysis of adaptive photovoltaic support for photovoltaic power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 84-89.

收稿日期：2019-08-09；　修回日期：2019-10-25

作者简介：

陈振宇(1985—)，男，博士，高级工程师，研究方向为大数据与云计算技术、电力系统自动化; E-mail: chenzhenyu@epri.sgcc.com.cn

刘　东(1990—)，男，硕士，工程师，研究方向为电力系统分析; E-mail: liudong@epri.sgcc.com.cn

高兴宇(1985—)，男，通信作者，博士，副研究员，研究方向为人工智能及应用。E-mail: gaoxingyu@ime.ac.cn

(编辑　姜新丽)