

DOI: 10.7667/PSPC171554

# 含微服务的调度自动化系统分布式实时数据库

冯显力, 韦化, 韦洪波, 章勇

(广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

**摘要:** 提出一种含微服务的调度自动化系统分布式实时数据库总体构架, 解决了传统调度自动化系统中实时数据库数据处理慢、灵活性差和不易扩展等问题。根据实时数据库对数据时效性的要求, 定义了遥测类、遥信类的简化数据模型, 规避了复杂数据关系的搜索, 并运用数据分片技术对数据进行有效划分。采用微服务架构模式, 将数据读写过程虚拟化为细粒度的数据服务, 以云计算技术为核心, 实现对微服务、分布式技术的深度整合。利用该构架实现的分布式实时数据库管理系统已在某实际电网中得到应用。实际运行效果表明, 该构架下的实时数据库具有实时性高、扩展性强、运行稳定可靠等优点, 为坚强智能电网的建设和发展提供技术支撑。

**关键词:** 调度自动化系统; 分布式实时数据库; 数据分片; 微服务; 云计算

## Distributed real-time database for dispatching automation system with micro-services

FENG Xianli, WEI Hua, WEI Hongbo, ZHANG Yong

(Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving  
Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

**Abstract:** This paper proposes a new Distributed Real-Time Database (RTDB) architecture for a dispatch automation system with micro-services, which solves the problems of slow data processing, poor flexibility and difficult expansion in the RTDB of the traditional dispatching automation system. According to the requirement of RTDB for data timeliness, the simplified data model of telemetering class and remote signal class is defined, which avoids the search of complex data relation. Meanwhile, the data fragmentation technology is used to divide the data effectively. Utilizing micro-services architecture pattern, the data read and write process is virtualized into fine-grained data services, and the core of cloud computing technology is used to realize the deep integration of micro service and distributed technology. On this basis, the distributed real-time database management system has been applied in an actual power grid. The actual operation results show that the RTDB under this method has the advantages of high real-time, strong scalability, stable and reliable operation, and provides technical support for the construction and development of strong smart grid.

This work is supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205) and National Natural Science Foundation of China (No. 51167003).

**Key words:** dispatching automation system; distributed RTDB; data fragmentation; micro-services; cloud-computing

## 0 引言

电力调度自动化系统是用于实时监控的分布式、异构性复杂集成系统, 实时数据库管理系统是其中数据采集与监视控制(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统和能量管理系统(Energy

Management System, EMS)的核心支撑平台, 其实时性、可靠性、稳定性和开放性直接决定了整个调度自动化系统的性能。

关系型数据库以其稳定、灵活、功能强大的特点和诸多优良品质在商务和管理等事务型的应用领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>, 但由于其使用磁盘读写数据, 响应时间和处理速度远远达不到实时数据库的要求<sup>[2]</sup>。其中, SCADA系统<sup>[3]</sup>中的数据采集、数据监测、实时报警等应用需要实时反映电力系统的运行状态, 尤其是当电力系统运行状态发生变化时,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB228205); 国家自然科学基金资助项目(51167003)

要求在短时间内接收、记录、报警并处理相应事件,这就需要高频访问数据库;EMS系统中大量的高级应用软件服务(如在线潮流、状态估计、无功优化等)一方面对数据的实时性要求较高,另一方面对数据的访问量和计算量都比较大,需要尽可能减少访问数据库的时间。随着EMS系统的日趋庞大和功能的不断完善,利用关系型数据库集中管理实时数据的弊端日益凸显。

在分布式数据存储技术<sup>[4-6]</sup>不断发展的背景下,目前国内电力系统领域对分布式实时数据库已有研究。文献[7]实现了分布式架构的实时数据库,但其主要运用在时序数据库的存储管理上,实时性达不到要求。文献[8]介绍了一种分布式的面向对象实时数据库管理系统,以面向对象模型来替代传统实时数据库中的关系模型和层次模型,但本质上依然采用关系数据建模思想,无法支持高并发访问。文献[9]研究了SCADA系统中的分布式实时数据管理技术,对实时数据进行分片处理,但采用相对复杂key-value结构实现主键到分片的映射,只能通过减少索引表的访问频率来提高数据的定位效率。

微服务<sup>[10]</sup>具有模块化开发、分布式部署的特性,适用于海量数据单体应用的解耦,目前在电力系统中的应用刚处于起步阶段。文献[11]探索了微服务架构下的电力云平台,并对其关键组件进行了分析,但未经过实际电网运行的验证。

基于上述分析,本文以精简化的数据结构及分片方式为基础提出一种高效的含微服务的分布式实时数据库总体框架。依托云计算技术,将微服务架构和分布式技术深度整合,在云平台上实现对实时数据的分布式处理,建立了以云服务平台中心、云服务提供者和云端用户构成的微服务架构模式,开发了一套应用于某实际电网的分布式实时数据库管理系统,有效提升实时数据库的实时性、可扩展性和稳定可靠性。

## 1 分布式实时数据库数据结构

### 1.1 数据结构模型

数据的时效性、一致性和完整性是实时数据库的典型特征和首要要求。不同于关系数据库,实时数据库适用于业务逻辑简单、数据实时性要求高的领域,同时还应具备事务吞吐量高、接口丰富、易于扩展等特性<sup>[12]</sup>,传统的电网实时数据库应用框架如图1所示。

随着电网智能化与信息化水平的逐步提高,电力系统与用户的实时互动逐渐增强,在数据体量大、读写频率高以及响应速度快的多重要求下,实时数

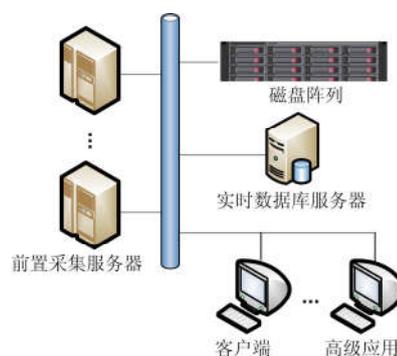


图1 传统实时数据库应用框架

Fig. 1 Application framework of traditional real-time database

据库需要满足对更大规模实时数据处理与共享的需求<sup>[13-14]</sup>。传统的关系型实时数据库受本地磁盘的限制,不能存储大规模数据,无法支持高并发访问,很难适应具有数据类型复杂、毫秒级更新及快速响应的调度自动化系统。鉴于此,本文结合调度自动化系统实时数据库的业务特点,提出解耦的数据结构模型,以弱化数据间的逻辑关系,提高数据的时效性。

根据调度自动化系统中前置采集数据源的类型,实时数据可以分为遥测信息和遥信信息。其中,遥测信息是指数据源中包含当前电网运行参数的信息,遥信信息是指包含当前电网各种电气信号的信息。因此,该解耦的数据结构模型定义为遥测类、遥信类两个结构体,分别用于存储实时数据中的遥测信息和遥信信息。同时,原关系数据模型中的关联数据也存储于对应的结构体数组中,数据模型的存储结构如图2所示。

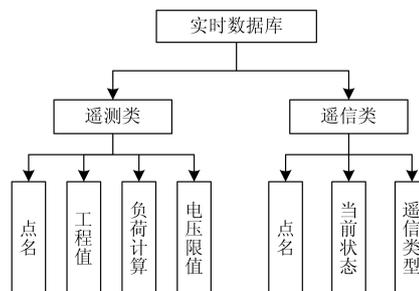


图2 数据模型结构

Fig. 2 Structure of data model

在结构体数组中为每一个元素分配一个内存地址,数据实时更新和实时读写操作都在内存中执行,避免磁盘访问,优化了响应时间和处理速度。数组之间通过索引号建立简单的映射关系,当需要获取实时数据时,不需要建立复杂的搜索规则,通过数组的索引即可直接获取对应的数据,避免关系数据

的查询，减少数据搜索的时间，从而提高了数据访问的效率。

### 1.2 数据分片技术

传统的集中式存储架构将数据集中存储在特定的服务器上，随着数据规模和复杂度的增加，存储服务器的处理能力将成为系统性能的瓶颈。因此，需要采用分布式存储技术将海量数据分散存储在多个数据存储服务器中，并对其进行统一管理。

在分布式实时数据库管理系统中，为了实现数据的分布式存储，需要对实时数据进行分片处理。数据分片技术可以将全局数据按一定规则进行划分，满足完备性、可重构性和不相交性原则，主要分为水平分片和垂直分片<sup>[15]</sup>。如图3所示，本系统采用垂直分片的方式对遥测类和遥信类的实时数据进行划分，即选取厂站名称为关键字，按照厂站进行数据分片。

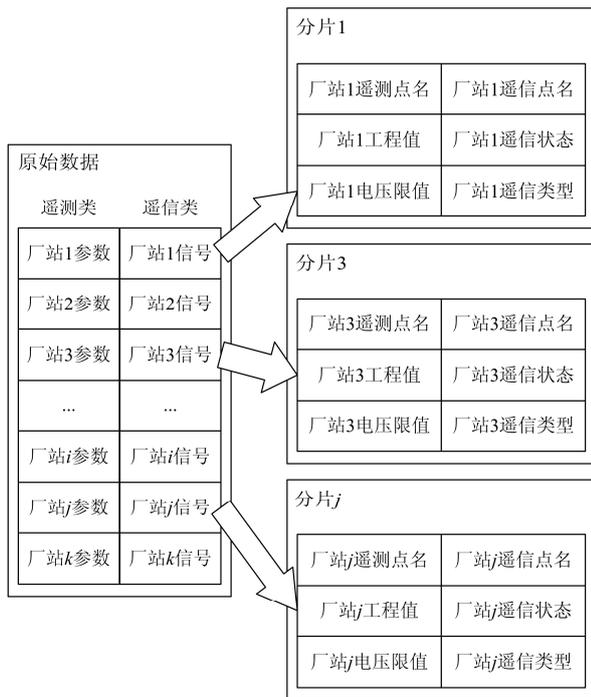


图3 实时数据分片示例

Fig. 3 Example of real-time data fragmentation

分布式实时数据库管理系统根据数据分片的结果，将数据存储在不同的服务器节点上，同时提供各个分片的服务接口。当产生访问实时数据库的行为时，只需要根据请求访问的内容调用对应分片的服务接口获取数据，缓解了数据集中处理的压力，提高了数据处理的实时性。同时，对数据分片进行交叉冗余存储，实现数据的动态容错，相较于传统集中式存储架构而言，大大提高了系统的可靠性、可用性和扩展性。

## 2 总体架构

### 2.1 微服务架构

面向服务架构(Service-Oriented Architecture, SOA)是一个组件模型，它将应用程序的不同功能单元(称为服务)通过这些服务之间定义良好的接口和契约联系起来<sup>[16]</sup>。

微服务概念由 Martin Fowler 与 James Lewis 于 2014 年提出，是一种以 SOA 为基础的轻量级架构模式，旨在通过将功能分解到各个离散的服务中以实现了解决方案的解耦<sup>[17]</sup>。其核心理念在于，将复杂应用系统以独立业务单元的形式分解成多个服务，每个服务紧密围绕特定具体业务，运行于独立的进程中，形成高度内聚的自治单元<sup>[11]</sup>。

微服务架构继承于 SOA，但又有所不同，两者之间最大的区别在于服务粒度。其中，SOA 注重于企业服务总线(ESB)的全方位架构，适用于粗粒度的企业级开发；而微服务架构进一步强调解耦合、去中心化的思想，在分布式的环境下，使业务逻辑拆分为粒度较小的服务，适用于细粒度的应用级开发。与 SOA 相比，微服务架构模式减少了传统企业服务总线开发所带来的高复杂性，更具有灵活性、易扩展性、易于维护的特点。

实时数据库属于调度自动化系统中具有特定业务功能的应用，其最主要的功能是为系统的其他高级应用软件提供高速的实时数据访问接口。不同的高级应用软件由自身功能需求决定所需的实时数据类型。因此，采用微服务架构模式，将数据读写过程虚拟化细粒度的数据服务，高级应用软件在获取数据时只需根据自身需求直接调用相应的服务接口，不再需要对整个实时数据库进行查询，可以减少数据的访问量，具有较高的灵活性。

### 2.2 云计算与微服务架构结合

云计算是一种大规模分布式计算模式，通过云计算可以形成一个抽象的、虚拟的、可动态扩展的资源池<sup>[18]</sup>。它利用虚拟化技术将各种不同类型的计算资源抽象成服务的形式向用户提供<sup>[19-20]</sup>，与传统的计算模式相比，具有分布式存储、异地灾备、弹性服务和负载均衡的优势。如果把微服务架构下的数据服务通过云平台发布，则每一个独立的服务单元都能够共享云平台提供的软件开发环境和计算资源。

在分布式实时数据库管理系统中，采用数据分片技术对实时数据进行分片处理，借助于微服务架构的设计思想，将每一个数据分片设计为一个微服务，独立形成一个微型实时库，通过云服务器进行

发布。在这个过程中, 实时数据库虚拟化为云平台上的微服务, 根据负载均衡策略, 分散存储在云服务器各个节点上, 实现了数据即服务的功能。云计算强大的灾备能力也保证了微服务架构下各数据片的冗余储存, 保障了数据的完备性。融合云计算技术与微服务, 实时数据库的应用框架如图 4 所示。

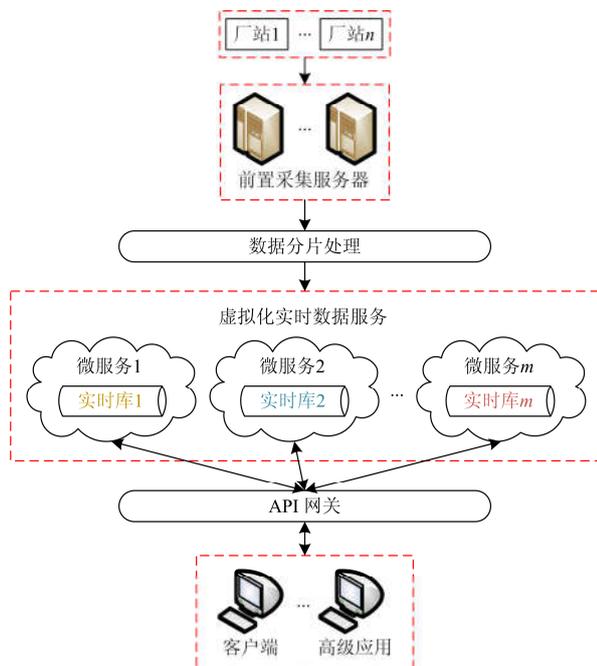


图 4 含微服务的实时数据库应用框架

Fig. 4 Application framework of distributed real-time database

系统采用虚拟私有云, 不仅继承了云计算技术的大规模、高可靠、低成本、弹性计算等优点, 而且还可为实时数据库构建一个虚拟隔离的网络环境, 使其免受黑客、病毒和恶意代码等网络攻击。将云计算技术与微服务架构模式紧密结合起来, 可以充分利用二者优势, 相互补充。

### 2.3 含微服务的实时数据库

以云计算技术为支撑, 实现分布式实时数据库系统和微服务应用架构。如图 5 所示: 将物理资源层、云服务管理层与云计算应用程序接口层作为整个架构的服务提供者; 云服务平台作为架构的服务注册中心; 图形用户界面和 EMS 高级应用软件作为架构的服务消费者。服务提供者在服务注册中心发布其服务, 通过云计算应用程序接口为服务消费者提供云服务。服务消费者通过服务提供者提供的服务进行绑定, 通过该服务实现业务解决方案。服务注册中心存储了各种服务的描述, 服务消费者通过云服务平台查找所需的服务。

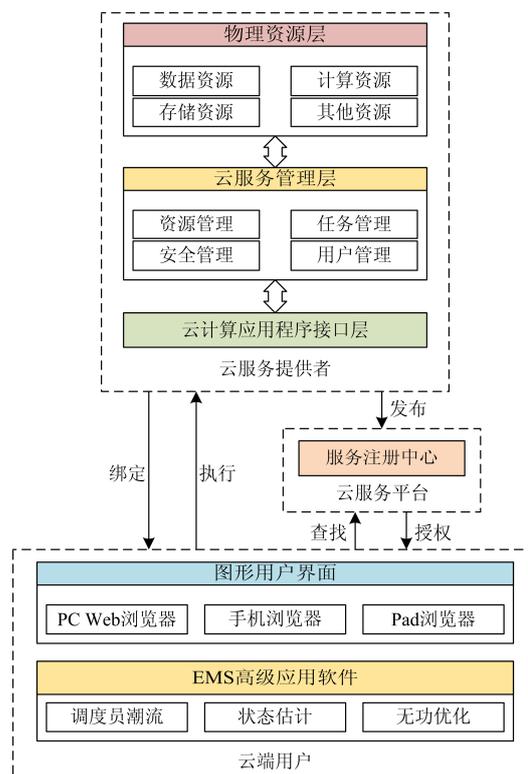


图 5 实时数据库系统架构

Fig. 5 System architecture of real-time database

## 3 系统设计

### 3.1 系统开发环境

综合考虑云服务器供应商数据安全性、运行稳定性、弹性计算服务、产品扩展和升级等多因素, 本系统选择阿里云作为系统的开发平台。以 Visual Studio 2015 作为开发工具, C#和 JavaScript 作为开发语言, 利用 Windows 通信平台(WCF)技术实现系统的微服务架构, 采用 ASP.NET 技术实现系统的网页客户端。所有应用程序和服务均部署于阿里云服务器上, 采用 IIS8.0 对服务进行发布。

### 3.2 实时数据库实现方法和功能结构

本文提出一种新的实时数据库实现方法。该方法摒弃了传统调度自动化系统中的关系数据模型, 建立了遥测类和遥信类的结构体模型, 通过数据分片技术对类中的实时数据进行分片, 分散存储在云服务器的各个节点上, 实现实时数据库的分布式处理和虚拟化处理。在云服务器上提供基于应用程序编程接口(API)和电网运行服务总线(OSB)的标准访问服务接口, 达到调用服务即访问实时数据库的目的。

在结构上将实时数据库分为数据库服务、图形用户界面和后台处理三部分, 其功能结构图如图 6 所示。

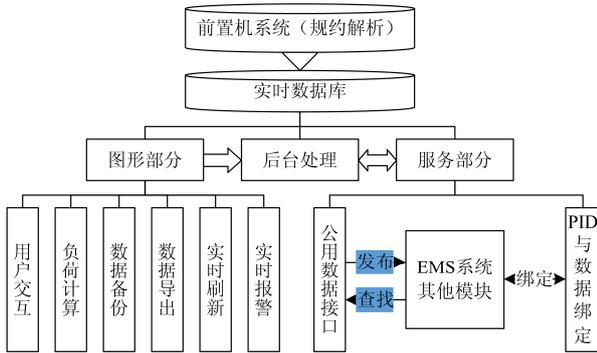


图 6 实时数据库管理系统的功能结构

Fig. 6 Function structure of real-time database management system

实时数据库的数据库服务、图形用户界面、后台处理程序均部署于云服务器上。其中，实时数据库服务部分以云服务的形式对外提供访问接口；图形部分用于分站实时显示系统内各厂站的遥测参数、遥信参数及数据状态，并为调度员提供良好的人机交互界面进行数据管理；后台处理程序是连接前置机系统、数据库图形用户界面和数据库服务的桥梁。后台处理程序一方面接收前置机系统中规约解析的数据，通过转换系统计算实时数据的工程值，并完成数据的分片处理；另一方面接收由用户在图形用户界面设置后形成的配置文档，完成数据的更新和同步，最后通过云服务接口将实时调度数据写入数据库服务部分。

### 3.3 实时数据服务

实时数据服务是虚拟化实时数据库的核心功能，由服务接口、接口实现类和服务配置文件构成。一个服务可以包含多个服务接口，每个服务接口唯一对应一个接口实现类，通过一段特定的 C#程序代码实现接口功能。服务配置文件对服务的契约(Contract)、绑定(Binding)、地址(Address)和终结点(Endpoint)进行了配置。

所提系统的实时数据服务 API 网关定义为 RTDBServices。在 API 网关中封装了读写实时遥测、遥信数据和返回实时数据分片等微服务接口，如图 7 所示。

EMS 系统中高级应用软件等服务消费者通过服务注册中心与 RTDBServices 建立连接关系，即可发现该网关下的各项微服务，RTDBServices 将客户端请求分配到相应的微服务接口以获取实时数据，完成实时数据库的访问功能。在 Visual Studio 2015 开发平台下创建实时数据服务引用如图 8 所示。



图 7 实时数据服务接口

Fig. 7 Service interface of real-time data

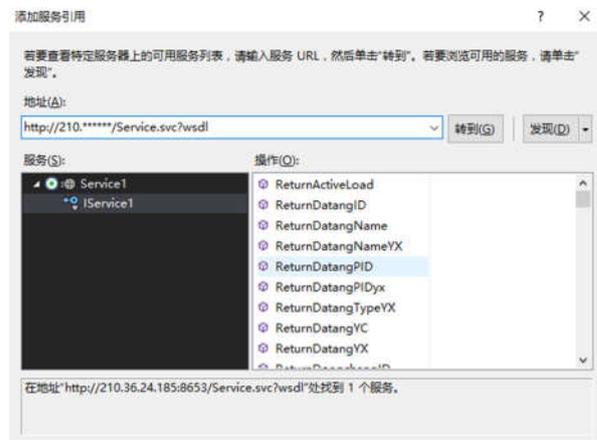


图 8 创建实时数据服务引用

Fig. 8 Creation of real-time data service reference

由于在 API 网关下的微服务接口众多，不同服务消费者所访问的数据接口和刷新数据的频率不尽相同，所以该系统的实时数据服务部署于云服务器上。根据服务消费者的需求，可以利用云计算弹性服务的特性，合理分配云服务器上的计算机资源，达到资源利用效率最大化。通过这种方式，数据的访问速度和响应时间得到进一步优化。

## 4 测试情况

本实时数据库管理系以阿里云服务器作为测试平台，系统配置为单机 CPU(4 核, 2.5 GHz, 内存 16 G), 8 M 带宽, 包含 15 个厂站, 共约 3 000 个测点。对系统进行了负载压力测试, 起始用户设为 20 个, 上限用户设为 400 个, 分阶段逐渐增加用户数量。测试结果如下:

- 1) 平均响应时间为 301 ms, 无响应超时, 数据访问效率高, 保证了数据的时效性;
- 2) 事务总量超过 270 000, 每秒处理事务数 (TPS) 356, 数据处理性能提升 6~10 倍;
- 3) 吞吐量 243 M, 发送成功率 100%, 可支持

高并发访问。

目前, 基于本实时数据库已成功开发了 EMS 系统中的高级应用, 每次调度员潮流计算时间约 60 ms, 状态估计时间约 300 ms, 无功优化时间约 1 400 ms。由此可见, 本系统可实现数据的高速访问和高并发访问。

## 5 结论

本文提出一种含微服务的调度自动化系统分布式实时数据库的实现方法。该方法建立了新的数据模型, 将传统的实时数据库虚拟化, 以微服务的模式将实时数据分散存储在云服务器的各个节点上, 实现数据即服务的功能, 有效解决了电网大数据背景下实时数据库所面临的数据实时性、可靠性、扩展性、吞吐能力和并发访问上的诸多问题。利用云计算的优势, 开发了一套应用于某实际电网的实时数据库管理系统。实际运行效果表明, 该方法实现的实时数据库管理系统实时性高、扩展性强、运行稳定可靠。

随着智能电网的快速发展, 电力系统高级应用软件对实时数据的获取效率提出了更高的要求。本文提出的实时数据库构建方法借鉴于微服务的思想, 充分利用了云计算在数据处理、资源分配、异地灾备方面的优势, 能够满足未来电力系统高级应用软件发展的需要, 同时也为新型电力调度自动化系统的发展提供了思路。

## 参考文献

- [1] 吴文传, 张伯明, 徐春晖. 调度自动化系统实时数据库模型的研究与实现[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 28-32.  
WU Wenchuan, ZHANG Boming, XU Chunhui. Study and implementation of real time database management system (RTDBMS) model applied in EMS[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 28-32.
- [2] 陆杏全. 能量管理系统的实时数据库技术[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 1-4.  
LU Xingquan. Real-time database technique in energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 1-4.
- [3] 胡春潮, 侯艾君, 马凯, 等. 基于 OPNET 的电网 SCADA 系统通信建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 54-59.  
HU Chunchao, HOU Aijun, MA Kai, et al. Communication modeling and simulation of SCADA system of power grid based on OPNET[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 54-59.
- [4] 张少敏, 李晓强, 王保义. 基于 Hadoop 的智能电网数据安全存储设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 136-140.  
ZHANG Shaomin, LI Xiaoqiang, WANG Baoyi. Design of data security storage in smart grid based on Hadoop[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 136-140.
- [5] 金小明, 吴鸿亮, 周保荣, 等. 电网规划运行数据库与集成管理平台的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 126-131.  
JIN Xiaoming, WU Hongliang, ZHOU Baorong, et al. Design and implementation of integrated database management platform for power grid planning and operation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 126-131.
- [6] 黄彦, 黄劫, 陈凌, 等. 基于多数据源校验的电网 EMS 数据质量在线监控方法及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 130-135.  
HUANG Yan, HUANG Jie, CHEN Ling, et al. Research of EMS data quality control based on multiple data source calibration[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 130-135.
- [7] 喻宜, 吕志来, 齐国印. 分布式海量时序数据管理平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 165-170.  
YU Yi, LÜ Zhilai, QI Guoyin. Research on distributed large-scale time series data management platform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 165-170.
- [8] 姚阳春, 柴世友, 吕行, 等. 新一代分布式面向对象实时数据库管理系统[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 2): 284-287.  
YAO Yangchun, CHAI Shiyu, LÜ Xing, et al. New generation of distributed object-oriented real-time database management system[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 284-287.
- [9] 郑宗强, 翟明玉, 彭晖, 等. 电网调控分布式 SCADA 系统体系架构与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 71-77.  
ZHENG Zongqiang, ZHAI Mingyu, PENG Hui, et al. Architecture and key technologies of distributed SCADA system for power dispatching and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 71-77.
- [10] 王纪军, 张斌, 顾永生, 等. 云环境中 Web 应用的微服务架构评估[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(5): 9-15.  
WANG Jijun, ZHANG Bin, GU Yongsheng, et al. Evaluation of micro-service architecture for web application in the cloud[J]. Application of Computer System, 2017, 26(5): 9-15.

- [11] 杨俊伟, 纪鑫, 胡强新. 基于微服务架构的电力云服务平台[J]. 电力信息与通信技术, 2017(1): 8-12.  
YANG Junwei, JI Xin, HU Qiangxin. Electric power cloud service platform based on micro service architecture[J]. Electric Power ICT, 2017(1): 8-12.
- [12] 唐磊. 电网实时数据库选型研究[J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(6): 18-21.  
TANG Lei. Research of RTDB selection in power grid[J]. Electric Power ICT, 2013, 11(6): 18-21.
- [13] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [14] 王昊, 夏慧, 陈威, 等. 基于分治策略的分布式调度自动化系统稳态监控网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 101-107.  
WANG Hao, XIA Hui, CHEN Wei, et al. Analysis of distributed dispatching automation system stability monitoring of topology based on divide-and-conquer strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 101-107.
- [15] 邵佩英. 分布式数据库系统及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [16] 梁爽. 基于 SOA 的云计算框架模型的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(35): 92-94.  
LIANG Shuang. Design and realization of cloud computing framework model based on SOA[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(35): 92-94.
- [17] 崔蔚, 李春阳, 刘迪, 等. 面向微服务的统一应用开发平台[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(9): 12-17.  
CUI Wei, LI Chunyang, LIU Di, et al. Microservices oriented unified application development platform[J]. Electric Power ICT, 2016, 14(9): 12-17.
- [18] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 云计算:构建未来电力系统的核心计算平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 1-8.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cloud computing: implementing an essential computing platform for future power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 1-8.
- [19] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [20] 林静怀. 基于云计算的电网调度控制培训仿真系统设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 164-170.  
LING Jinghui. Cloud computing based system design for power grid dispatching and control training simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 164-170.

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-12-14

作者简介:

冯显力(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划; E-mail: fxl5314@qq.com

韦化(1954—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为最优化理论及其在电力系统中的应用、最优潮流、电压稳定、状态估计; E-mail: weihua@gxu.edu.cn

韦洪波(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划。E-mail: weihbgxu@outlook.com

(编辑 葛艳娜)