

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201423

# 电网调控系统通信总线调用链监视与分布式追踪方法研究

王恒<sup>1,2</sup>, 马云龙<sup>1,2</sup>, 武杨<sup>1,2</sup>, 赵林<sup>1,2</sup>, 刘涛<sup>3</sup>, 李西太<sup>1,2</sup>, 王跃<sup>1,2</sup>, 张博维<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 北京科东电力控制系统  
有限责任公司, 北京 100085; 3. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 电网的快速发展和大规模互联电网的形成, 使电网特性由区域模式转向全局模式。电网运行和调度控制均呈现数据密集、通信密集和计算密集的特征, 从而形成了复杂的网状服务调用关系以及多层次的消息传输流程, 给电网运行态势变化预测和运行风险管控带来了新挑战, 亟需对通信总线数据交互过程进行有效监视。首先提出了通信总线的全链路监视与分布式追踪技术框架。然后研究了服务调用链监视和消息分布式追踪的关键技术。最后介绍了工程应用情况。该技术的应用为电网调控系统数据传输和交互提供了全面、直观的状态信息, 实现了系统隐患及时发现、故障原因精准追溯, 增强了新一代调控系统通信总线运行状态监视和风险控制能力。

**关键词:** 电网调控系统; 通信总线; 服务调用; 消息传输; 调用链监视; 分布式追踪

## Call chain monitoring and distributed tracking method for the communication bus of a power grid control system

WANG Heng<sup>1,2</sup>, MA Yunlong<sup>1,2</sup>, WU Yang<sup>1,2</sup>, ZHAO Lin<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>, LI Xitai<sup>1,2</sup>, WANG Yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Bowei<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;  
2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100085, China;  
3. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** With the rapid development of the power grid and the formation of a large-scale interconnected power grid, power grid characteristics have changed from a regional to a global mode. Power grid operation and dispatching control are data, communication and computing intensive. As a result, a complex network service call relationship and multi-level message transmission process are formed. This brings great challenges to prediction of power grid operational change and operational risk control. The new challenge calls for effective monitoring of the communication bus data interaction process. In this paper, the whole link monitoring and distributed tracing technology framework of the communication bus is proposed. Then the key technologies of service call chain monitoring and message distributed tracing are studied. Finally, the engineering application is introduced. The application of this technology provides comprehensive and intuitive status information for data transmission and interaction with the power grid control system, realizes timely detection of system hidden dangers and accurate tracing of fault causes, and enhances the operational status monitoring and risk control ability of the communication bus of a new generation control system.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China "Key Techniques Research on Improving Data Quality and Monitoring Reliability of Dispatch Automation Master Station System from Multi Perspectives" (No. 5108-202040021A).

**Key words:** power grid control system; communication bus; service call; message transmission; call chain monitoring; distributed tracking

## 0 引言

随着特高压交直流混联电网的快速建设, 大范

围资源优化配置的能力显著提升<sup>[1-3]</sup>, 各级电网间耦合关系更加紧密, 由电网运行特性的局部分析和多级协调方式提升为全局分析模式, 电网运行风险的局部防控和区域协调方式提升为全局防控模式, 导致电网运行特性复杂化、运行状态一体化<sup>[4-7]</sup>。为了适应这样的变化, 新一代调控系统采用“物理分布、逻辑统一”体系架构<sup>[8]</sup>, 该架构下各级调度控制中

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助“多角度提升调度自动化主站系统数据质量和监控可靠性关键技术研究”(5108-202040021A)

心构建监视控制分布、共享集中的分析决策业务,并根据各级调度控制中心的个性化需求,灵活组合业务功能。电网调控系统复杂的网状服务调用关系和多层次的消息交互流程给电网运行态势变化预测和运行风险管控带来了新挑战,迫切需要对电网数据交互过程进行有效监视和跟踪统计,增强电网运行异常状态预测和感知能力。

当前电网调控系统通信总线为应用屏蔽了繁琐复杂的底层通信细节,实现应用的快速集成和即插即用,由服务总线和消息总线构成。服务总线承担系统内和系统间高并发服务访问任务,消息总线承担系统内和系统间实时消息传输任务<sup>[9]</sup>。现有通信总线提供了一些后台工具,能够获取简单服务调用和短程消息传输的一些状态指标,但适用场景相对单一,监视手段比较薄弱,缺乏有力的监管与可视化展示。随着新一代调控系统的不断推进,这一问题更加突出,主要表现在以下几个方面:

1) 新一代调控系统中将复杂应用分解为若干小的功能,并封装成多个微服务<sup>[10]</sup>,导致调用关系比较复杂,通信总线难以对业务调用全过程进行全面监视,调用耗时、调用关系不清晰。

2) 新一代调控系统松耦合的交互方式使得消息传输过程复杂、流转环节繁多,全流程消息交互的实时监视尚属空白,缺乏对关键指标的统计、整合与分析功能,也没有完善的日志记录,难以对历史运行状态进行排查与追溯,给故障分析定位带来了困难。

3) 新一代调控系统中调控运行人员在掌控当前电网实时运行业务状态基础上,更迫切希望了解调度业务的全过程从而及时发现存在的运行风险。

因此,在新一代调控系统中如何及时发现数据交互异常、排查追溯系统故障原因,保证调度自动化主站系统数据稳定传输,成为了保障电网安全稳定运行需要迫切解决的问题。

目前 IT 行业对服务/消息的调用监视与追踪已有相关研究。文献[11]描述了一个大规模集群的跟踪理论,在全球首次提出了全链路跟踪系统的思想。文献[12]介绍了蚂蚁金服的分布式链路跟踪系统——云图,利用 Google Dapper 原理实现了基于 Filebeat、Kafka 的调用链监视。上述文献主要针对互联网 Web 服务监视技术进行了探讨,由于电网调控领域特殊的网络物理架构和“安全分区、横向隔离、纵向认证”的安全防护要求,无法满足通信总线监视与追踪的需要,因而需要研究适应新一代调控系统通信总线的调用链监视与分布式追踪方法。

本文首先提出了电网调控系统通信总线调用链

监视与分布式追踪体系架构,然后分别从服务调用链监视和消息分布式追踪两方面入手对关键技术进行了研究,最后介绍了工程应用情况。

## 1 总体架构

### 1.1 通信总线简介

通信总线是新一代电网调控系统的重要组成部分,为调控业务提供了数据交互及服务集成应用体系,建立了覆盖各级调控系统的信息交互框架,支撑了高并发服务访问和大规模实时数据传输,促进了调控系统中实时数据、历史数据、模型数据及各类应用计算结果在广域范围的共享<sup>[13]</sup>,提升了智能电网调度控制系统的一体化协同调度能力。

其中,服务总线为应用服务的集成、运行和管理建立了通用机制,支撑了调控系统内部、调控机构间的信息共享和业务协同<sup>[14-15]</sup>;消息总线突破了单一系统的局限,能够在广域范围完成消息传输任务,承担调控系统内部和调度机构间实时消息传输功能,有效支持了数据采集、状态估计、自动发电控制、自动电压控制等应用的实时消息传输<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 通信总线调用链监视与分布式追踪体系

针对通信总线分布式多层调用的监视与跟踪能力不足的问题,本文提出了电网调控系统通信总线调用链监视与分布式追踪的架构,如图 1 所示。

该架构由服务总线的调用链监视和消息总线的分布式追踪组成。服务总线调用链监视主要包括调用链管理中心、调用链收集器、调用链存储和调用链检索等模块。调用链管理中心在电网调控应用业务访问服务时负责服务调用链标识 `traceID` 和环节 `ID` 的生成;调用链收集器通过定时汇集各个节点服务调用日志的所有探针信息,按照调用关系截取调用链全量监视信息快照,并将该信息存储到本地;调用链存储是将收集到的调用链按照轻重缓急的不同存储到不同的载体上,对于关键的服务调用信息存储到关系数据库中,对于不是特别重要的偶发服务调用信息存储到磁盘文件中。调用链检索将存储的服务调用链全量信息碎片进行二次统计分析归类,形成访问频次、访问耗时、调用关系等监控指标,为应用服务的健康评估和人机界面展示提供数据支持。消息总线的分布式追踪包括消息追踪管理中心、消息追踪信息收集器、消息追踪信息存储和消息追踪信息检索等。消息追踪管理中心为电网调控系统消息应用业务流提供唯一消息追踪标识 `messageID`。消息追踪信息收集器将消息业务传递过程的上下游串联起来,形成完整的全景交互链。消息追踪信息存储将 `messageID`、`frontID`、`appID` 等消

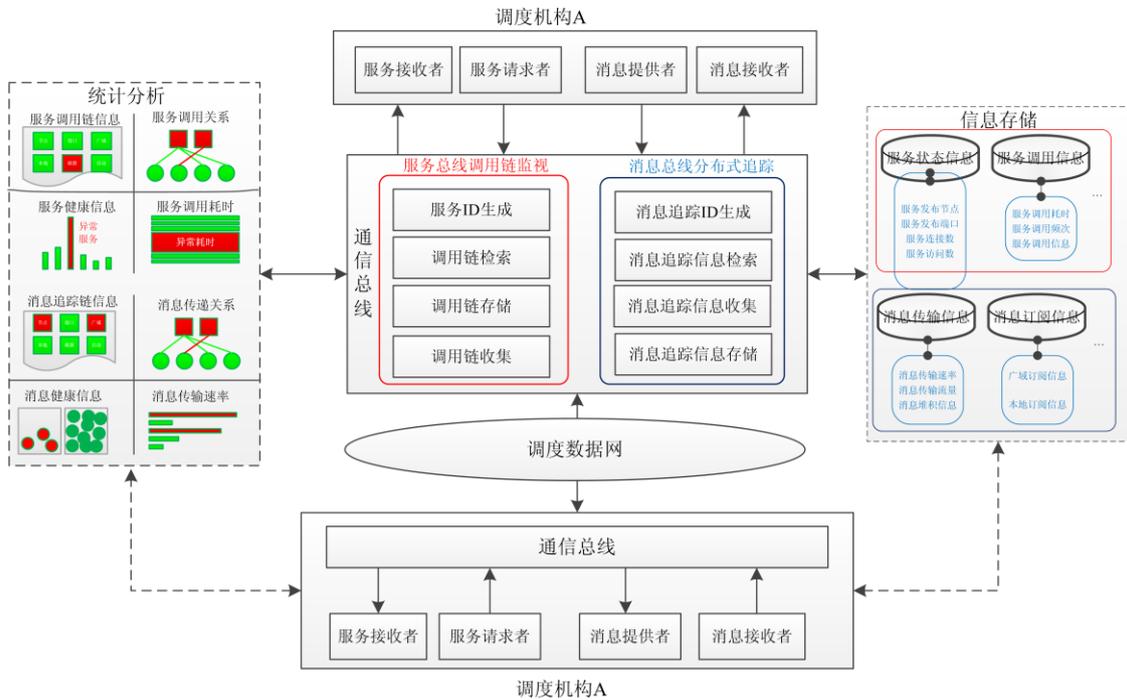


图 1 通信总线监视追踪体系架构

Fig. 1 Communication bus monitoring and tracking architecture

息标识持久化到日志文件中。消息追踪信息检索通过对日志文件进行深度解析刻画出消息交互状态，并按照不同应用、不同类型的消息重要程度提供深度定制功能。

## 2 服务调用链监视技术

### 2.1 服务调用链和探针生成策略

由于电网调控系统中存在大规模、高并发的服务调用，并且调用关系错综复杂<sup>[18]</sup>，因此生成全网唯一调用标识和服务探针就成为服务调用链形成的关键环节。

为了保证服务调用链标识的唯一性，按照电网调控系统中调度机构层级关系、业务划分特性<sup>[19]</sup>和服务调用顺序构建调用链标识规则，由时间戳、调度机构标识、防止时间回拨标志和序列号组成，如图 2 所示。

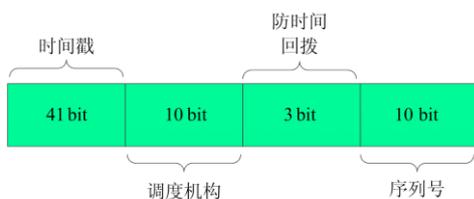


图 2 调用链标识

Fig. 2 Call chain ID

其中，41 bit 的时间戳(毫秒级)存储当前服务器时间和生成器启动时间的差值，可连续运行 69 年不重复。10 bit 的调度机构标识，用于划定各层级的电网调度机构。3 bit 的防止时间回拨位在 ID 生成器服务器时间被回拨时进行自增，用于区别回拨之前生成的 ID，允许回拨的最大次数为 8 次。10 位序列号，支持每个节点每毫秒(同一服务器、同一时间戳)产生 1 024 个序号而不重复。

在服务调用开始阶段由调用链管理中心生成全网唯一的调用链标识 traceID，透传在服务调用的每个环节，将所有服务调用串成清晰可见的调用链。为了获得服务调用次序及其亲缘关系，在每个调用环节均由调用链管理中心生成唯一属于本环节的标识，即调用环节 ID，作为下层的 parentID 来标明服务调用的父子关系。服务调用的每个环节与标识 ID 环节的关系如图 3 所示。

服务调用链由每个环节的服务探针组合而成，通过服务探针对关键信息进行采集。服务探针主要记录本环节的起始时间、业务关键信息规模、数据处理结果、数据处理结束时间和业务处理耗时等信息碎片。由于服务调用过程完全透明，因此可以精准地将服务探针埋点到服务基础框架的关键部位，快速高效地获取服务调用信息碎片。

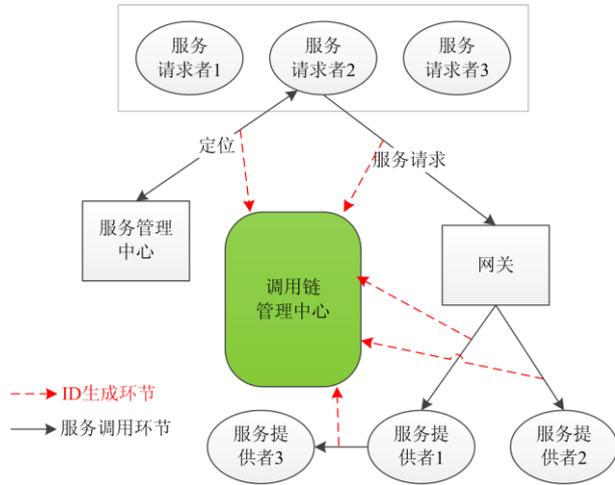


图3 服务调用环节与标识关系

Fig. 3 Service call link and identity relation

## 2.2 服务探针采集技术

服务调用链管理中心为每次服务调用分配唯一标签，准确绘制每次应用的调用轨迹，并记录应用查询定位所需访问的服务IP和端口。在此基础上，服务监视软件访问对应服务器的文件系统，获取应用到服务的调用轨迹及探针所收集的服务调用信息碎片。服务探针采集流程如图4所示。

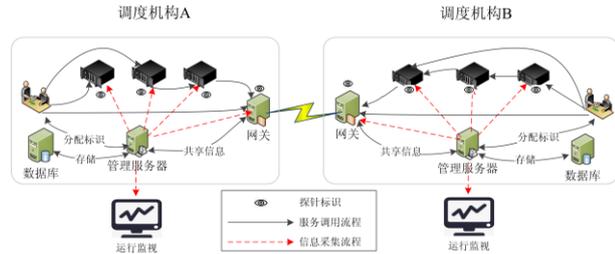


图4 服务探针采集

Fig. 4 Service probe acquisition

服务监视软件定时汇集服务调用链管理中心采集的调用链全量监视信息，根据服务调用链 traceID 对监视信息碎片进行分类整理。进而通过 parentID 梳理出服务调用的层次关系，存入文件系统，对于关键的服务调用信息和异常报错信息则存入关系数据库中，为事故反演提供支撑。针对跨调度机构的广域服务调用，采取调用链信息同步技术，实时共享两个调控系统中涉及广域服务访问的所有调用链信息，方便电网调控主站系统自动化值班人员及时发现调用链异常，高效排查服务访问安全隐患。

## 2.3 调用链检索分析技术

为保证在复杂的服务调用环境下，对服务健康状况进行准确探测，及时开展风险预警和故障诊断<sup>[20]</sup>，迫切需要对服务调用过程进行分类溯源，制

定服务健康状况辨识机制。

检索分析器对收集到的服务调用链全量信息碎片进行二次分析归类，形成访问频次、访问耗时、调用关系等统计类信息，在构建调用链的过程中生成一份详细的服务调用监控报表，作为底层服务工作状态的衡量指标。

为了对应用服务的健康状况开展智能评估，通过拓扑形态建立模型分析，重点判别服务访问的来源与去向，识别不合理来源，定位易故障点和性能瓶颈点，基于依赖关系实施服务容量估算，从链路调用比例、服务调用频次等维度出发进行全息排查。根据以上基础数据，通过应用服务健康评估，生成应用服务健康指数。为了使服务健康指数更精准地反映应用服务运行实际情况，使用如下的服务调用频次(TPS)统计算法进行计算：设测量周期为  $T$ ，在一个测量周期内统计服务调用次数为  $N_i$ ，在每个周期获取一个测量值  $TPS_i = N_i / T$ ，进而计算出指数移动加权平均  $ATPS_i$ 。假定当前的测量值的权重系数为  $\alpha$ ，历史平均值  $ATPS_i$  的权重系数则为  $1 - \alpha$ ， $ATPS_i$  的指数加权移动计算公式为

$$ATPS_i = \frac{TPS_i + (1 - \alpha) \times ATPS_{i-1} + (1 - \alpha)^2 \times ATPS_{i-2} + \dots}{1 + (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2 + \dots} \quad (1)$$

当  $i$  足够大时，则分母无限趋近于  $1/\alpha$ ，可得到递推公式：

$$ATPS_i = \alpha \times TPS_i + (1 - \alpha) \times ATPS_{i-1} = ATPS_i + \alpha \times (TPS_i - ATPS_{i-1}) \quad (2)$$

根据式(2)，可以用  $O(1)$  的时间复杂度计算出当前的  $ATPS_i$ ，对于单次服务请求增加的额外处理时间则可以忽略不计。

设测量周期为  $T = 30\text{ s}$ ，针对  $10\text{ min}$ 、 $0.5\text{ h}$ 、 $1\text{ h}$  的  $ATPS_i$ ，采用不同的  $\alpha$ ，分别使用式(3)一式(5)。

$$\alpha_{10} = 1 - e^{-\frac{30}{60 \times 10}} \quad (3)$$

$$\alpha_{30} = 1 - e^{-\frac{30}{60 \times 30}} \quad (4)$$

$$\alpha_{60} = 1 - e^{-\frac{30}{60 \times 60}} \quad (5)$$

由此可见测量值的权重随时间不断衰减，即越久远的的数据权重越小，从而使服务健康指数更接近系统运行的实时状态。

通过服务健康指数能够及时发现异常的服务调用，对该异常进行全息排查，根据应用服务名及服务开始时间反查调用链，顺藤摸瓜获取到更多的上下游业务调用信息，从而及时掌握服务调用问题及调控业务运行情况，为自动化业务决策和维护提供

支撑, 助力电网调控系统安全稳定运行。

### 3 消息分布式追踪方法

#### 3.1 电力系统消息追踪 ID 生成策略

消息分布式追踪的原理是将完成一次调控业务交互的消息使用 `messageID` 作为标识(如图 5 所示), 途径的消息生产者和消费者使用 `appID` 作为标识, 消息的上游应用使用 `frontID` 作为标识(即距离最近的上游组件的 `appID`)。通过 `messageID` 将整个消息传输流程串联起来, 综合利用 `appID`、`frontID` 刻画出上下游应用的完整消息交互关系。

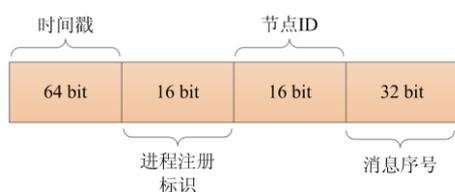


图 5 消息追踪 ID

Fig. 5 Message tracking ID

`messageID` 标识一次电力系统消息业务流。由于业务的独立性决定了不允许出现 2 个相同的 `messageID`, 因此在 `messageID` 中引入 64 位的时间戳, 其时间精度可根据需要设定为微秒或纳秒。在其中添加 16 位的节点 ID 和 16 位的进程注册标识用于记录消息发送端的关键信息, 帮助后期的消息溯源。32 位的消息序号则用于消息唯一性核验。

考虑到如果在应用调用消息发送接口时添加时间戳, 可能会有极低的概率出现两个应用生成相同 `messageID` 的情况, 因此将时间戳的生成位置选定在消息中间件内部, 具体时机是在从消息缓冲区单线程读取消息的过程中, 单次读取流程的耗时超过一个时间戳精度, 从而保证时间戳的唯一性。

使用 `appID` 标记途径的消息生产者或消费者, 考虑到存在应用多实例、多进程的情形, 故将进程 PID 纳入其中, 其格式为 `<appName>-<PID>` 构成的字符串。为了在消息追踪过程中保证零侵入原则, `appID` 无需由应用进行设置, 而是在应用注册消息总线时由中间件自动将 `appID` 写入消息头, 增加监控功能时应用不会感知到变化, 为消息总线的高效迭代与监控功能的无缝升级奠定基础。

目前电网调控系统基于北斗卫星导航系统/GPS 等提供全网高精度授时, 从而确保了节点间时钟精确同步, 避免了节点对时误差的风险。

#### 3.2 消息分布式追踪流程

电网调控系统消息中间件采用发布/订阅模式,

消息生产者将消息发送到特定事件集中, 消息消费者进行订阅, 消息中间件负责将对应的事件集推送给消费者<sup>[21-23]</sup>。作为前置数据采集、状态估计、自动发电控制、自动电压控制、综合智能告警等重要调度应用间的“信息高速公路”, 其传输范围覆盖局域和广域, 应用交互场景多, 如何串联起完整的数据通信链路, 准确、高效地实现消息的实时追踪成为了关键<sup>[24-26]</sup>。消息分布式追踪技术将 `messageID`、`frontID`、`appID` 作为追踪标签在消息传递交互过程中传递, 并由分布式部署的各应用持久化到日志中, 如图 6 所示。

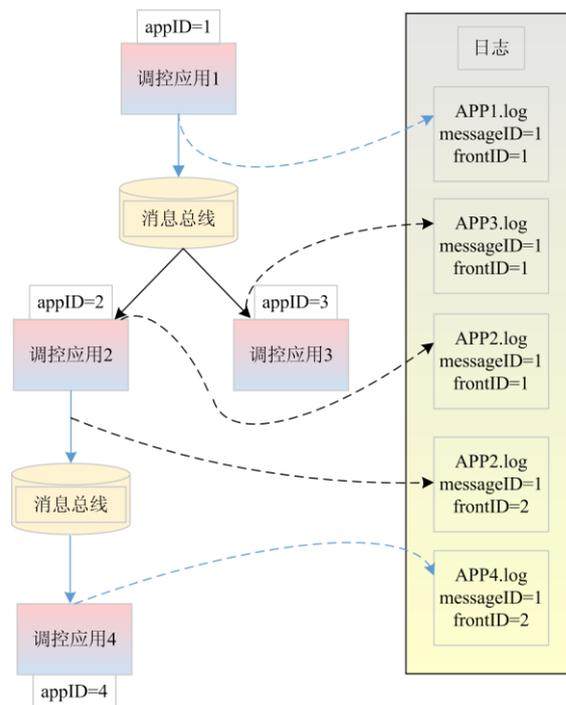


图 6 消息追踪流程

Fig. 6 Message tracking process

1) 调控应用 1 是调控业务流的发起者, 假定生成的消息 `messageID` 为 1, `frontID` 等于自身 `appID` 也为 1, 两个 ID 携带在发布的消息头中, 同时持久化到日志里。

2) 调控应用 2 订阅该通道消息, 接收到消息后通过解析消息头, 将 `messageID=1` 和 `frontID=1` 持久化到日志中, 该应用完成消息处理后生成新的消息, 新消息的 `messageID` 继承自己处理消息也为 1, 其 `frontID` 等于自身 `appID` 为 2。

3) 调控应用 4 订阅该通道消息, 接收到消息后将 `messageID=1`、`frontID=2` 持久化到日志中。

4) 调控应用 3 订阅该通道消息, 接收到消息后将 `messageID=1`、`frontID=1` 持久化到日志中。

messageID 在调控应用消息处理过程上下文中未改变，日志文件的命名与 appID 保持一致，通过 messageID 和 frontID 的组合信息可以将业务流消息交互链提取出来，进而计算出业务流完整耗时、业务各阶段耗时和应用耗时占比，分析出热点应用，帮助调度中心自动化值班员实时掌握调控系统内消息交互现状，为调度决策提供支撑。

### 3.3 动态开关、深度定制与日志分析

消息分布式追踪功能在提升调控系统管控水平的同时，也带来了一些挑战，一是增加了落盘的时间开销，给一些对性能敏感应用的正常业务功能造成不利影响，二是生成大量日志，可能对磁盘空间造成了较大压力，这两个因素都会导致系统资源紧张。为此一方面采用冗余独立磁盘阵列(RAID)技术提供设备级数据存储容错机制<sup>[27]</sup>，另一方面为消息追踪功能设置了动态开关。考虑到消息中间件很难提前获知一次完整的消息交互业务流涉及的所有应用，而业务流发起应用(消息生产者)则很容易知晓，因此动态开关的操作权由业务流发起应用行使，其通过特定信号通知中间件该条消息需要跟踪监视，中间件识别后生成新的 messageID 并由消息头携带，下游应用解析出携带 ID 的消息则认为功能开启，通过这种链式传递使业务流上下游应用保持同步行动。

调控系统中不同应用、不同类型的消息重要程度不尽相同，如 scada(电网运行稳态监控)、fes(前置采集)、agc(自动发电控制)、avc(自动电压控制)等应用的消息以及人工置数、挂摘牌操作、综合智能告警等类型的消息对系统安全运行至关重要，需要开启分布式追踪进行全流程监控；而 wams(电网广域监测系统)、dts(调度员培训仿真)、report\_srv(报表服务)等应用的消息相对重要性较低、其中有些消息交互却很频繁，不适合开启分布式追踪。因此，消息分布式追踪设计了面向应用、通道的深度定制功能，支持针对指定应用、通道打开监控开关。

为支持机器分析日志，要求日志信息支持规格化，XML/JSON 是常用的规格化方式，单条日志包含如下信息：messageID 标识本条日志属于哪条追踪链；currentAPP 标识本条日志属于哪个应用；parentAPP 标识本条日志的上游应用；servID 标识消息通道号；eventID 标识消息事件号；msgLEN 标识消息体长度。追踪日志具有固定的格式，因而能够使用正则表达式解析出相应的信息，通过 currentAPP、parentAPP 找出消息交互父子关系，进而构造出消息交互链树形图，并从时间戳信息中计

算出传输耗时。

## 4 工程应用

新一代调控系统通信总线的调用链监视与分布式追踪子系统已经在国家电网华中电力调控分中心试点应用，运行效果良好。

### 1) 服务总线调用链监视

首先收集电网调控系统中所有服务调用链的详细信息，从调用链全量信息中提取数据吞吐量监测指标，加以分析，形成以时间轴为横坐标、服务数据流量为纵坐标的网络流量曲线图，从而监视电网调控服务访问的数据通信状态，如图 7 所示。



图 7 服务数据流量分析图

Fig. 7 Service data flow analysis figure

服务数据流量分析图每隔 12 min 采集一个数据点，由图 7 可知在 08:00—11:00、14:00—17:00 两个时段内访问流量较大，其余时间段相对较少，由此可以获得全天候调度业务服务交互热点趋势。

其次从调用链全量信息中提取请求次数，使用服务调用频次(TPS)统计算法进行分析处理，形成以时间轴为横坐标、服务访问频率为纵坐标的访问频次时效柱状图，从而记录电网调控服务访问频率的实时信息和历史信息，如图 8 所示。



图 8 访问频次分析图

Fig. 8 Visit frequency analysis figure

访问频次分析图每 1 h 采集一个数据点, 对本地工作站所有调用 ftpserv 服务的调用链进行统计分析, 由图 8 可知 14:00—15:00、18:00—19:00 两个时段内访问频繁, 而 03:00—04:00、05:00—06:00、08:00—09:00 三个时段内的 ftpserv 服务访问负载较低, 由此可以科学设定正常服务访问上下阈值, 为服务访问越限告警提供数据支撑。

最后从调用链全量信息中提取正常/异常访问信息, 在状态鉴识基础上形成服务健康报表, 支持直观展示全网服务运行状态, 并可通过调用链 ID 提取异常访问详细信息, 用于分析排查调用链异常

原因, 如图 9 所示。

服务调用链全流程信息展示图的左侧部分为某时段内所有调用结果信息汇总, 可以直观地监测服务调用执行结果, 其中红色条目为异常调用链; 右侧部分为每个完整调用链的详细信息, 包括调用开始时间、调用消费者节点名、调用消费者端口、调用模式、服务节点 IP、调用服务基本信息、传输数据大小、全流程调用耗时、调用层级关系等关键指标, 对于异常调用链会在该处生成详细错误报告, 实现系统隐患及时发现、故障原因精准追溯。

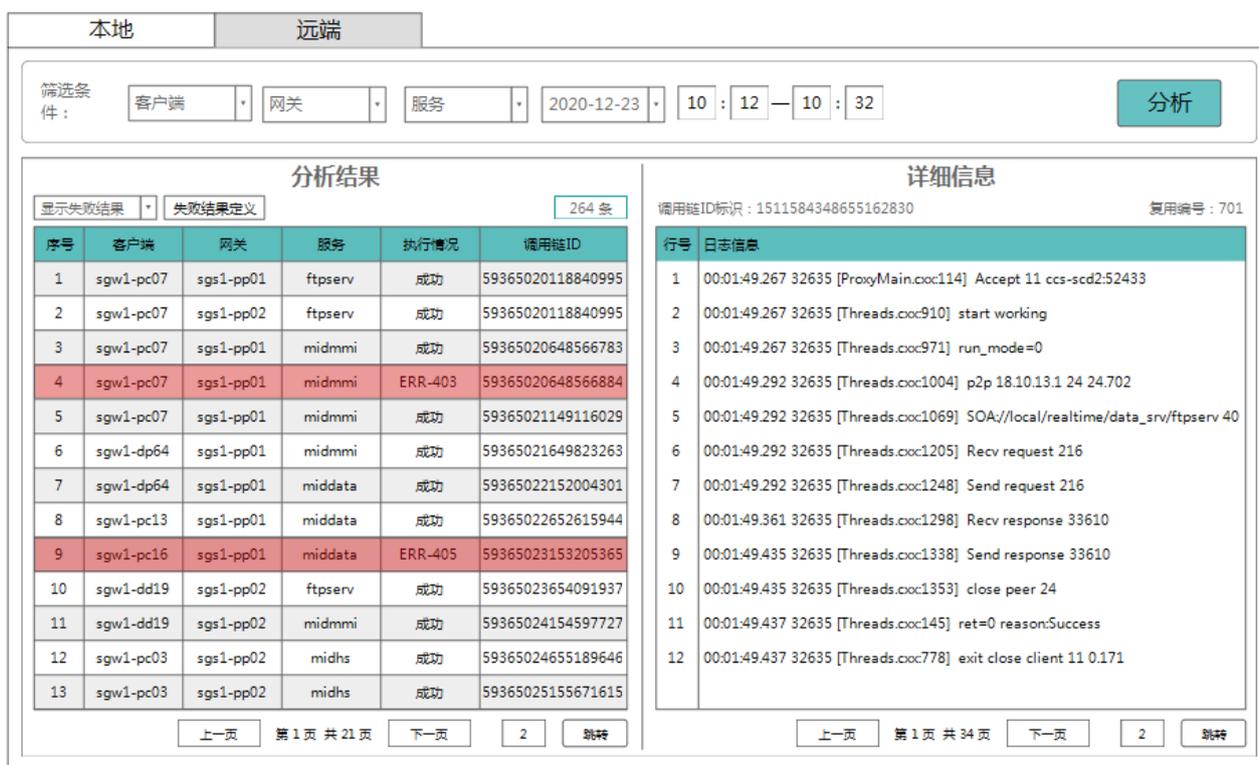


图 9 调用链全量信息展示图

Fig. 9 Call chain full information display figure

## 2) 消息总线分布式追踪

消息总线分布式追踪结果如图 10 所示, 电网调控系统中一次业务流消息传输流向图、上下游应用消息交互关系、消息通道号 servID、消息事件号 eventID、业务流完整耗时、业务各阶段耗时及占比均可直观地显示, 消息追踪构建了覆盖消息订阅信息、消息传输速率、消息数据流量、节点运行状态的全景式监控体系, 整合运行状态与统计结果相关信息, 提供全局展示与查询检索两类功能, 实现了电网调控应用之间消息交互关系的全面跟踪。

由图 10 可知, sca\_cal 数据处理耗时 9 538  $\mu$ s,

时延占比达 72.8%, 而前置采集和数据处理之间的消息传输耗时 84  $\mu$ s, 时延占比仅 0.6%, 由此可知 SCADA 应用的处理效率决定了消息交互的时效性, 是消息通信全流程的瓶颈所在, 而消息传输的时间开销可以忽略不计, 据此可以开展业务全周期时延分析, 准确定位性能瓶颈, 进而对耗时较长的阶段进行重点优化。当出现消息丢失时, 可以快速定位到丢消息的应用, 有针对性地加以排查。总之, 消息分布式追踪器实现了对消息传输过程的精准“解剖”, 提升了消息管控水平, 达到了系统设计预期。

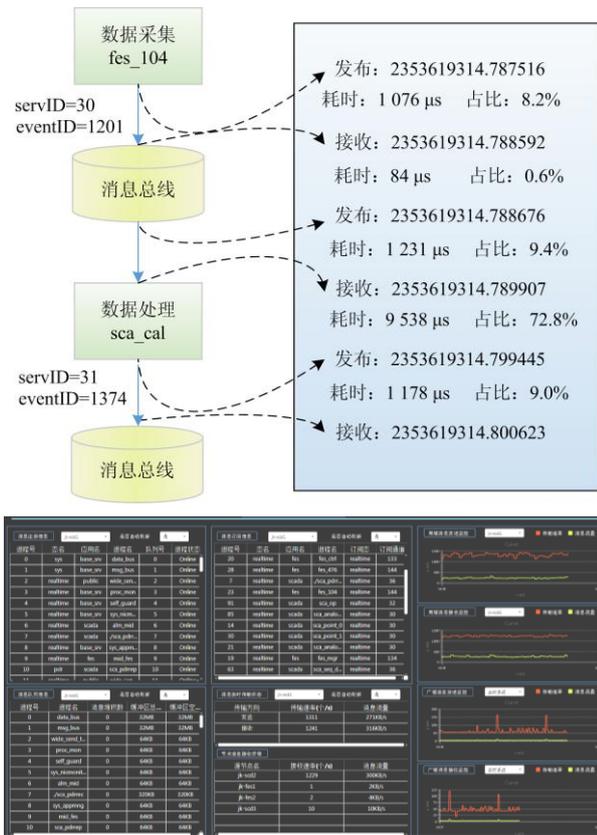


图 10 消息追踪展示图

Fig. 10 Message tracking display figure

### 5 结语

本文在分析新一代调控系统服务调用和消息传输流程及交互特点的基础上，提出了通信总线服务全链路监视与消息分布式追踪方法，实现了复杂网络条件下服务健康问题探查和消息传输过程全景式监视，通过对业务请求调用链和数据传递关系的精准还原和逐级下探分析，解决了分布式系统中应用之间数据通信难于跟踪定位的问题。工程应用实践表明，通信总线调用链监视与分布式追踪满足了新一代调控系统对“正常状态下的自动巡航，故障状态下的自动导航”的智能监视要求，为电网调控系统安全稳定运行提供了技术支持。

### 参考文献

[1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 985-991.  
 LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHVAC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 985-991.

[2] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调度控制系统应用功能的新特征[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 1-7.

XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7.

[3] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.

[4] 方静, 彭小圣, 刘泰蔚, 等. 电力设备状态监测大数据发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 176-185.  
 FANG Jing, PENG Xiaosheng, LIU Taiwei, et al. Development trend and application prospects of big data-based condition monitoring of power apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 176-185.

[5] 刘喜梅, 马俊杰. 泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 69-75.  
 LIU Ximei, MA Junjie. Application of the ubiquitous power internet of things in state monitoring of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 69-75.

[6] 彭志强, 刘翌, 罗俊, 等. 智能变电站监控信息自动验收体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 174-181.  
 PENG Zhiqiang, LIU Yi, LUO Jun, et al. Architecture and key technologies of smart substation's monitoring and control information automatic acceptance system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 174-181.

[7] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.

[8] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 1-8.  
 XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8.

[9] 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. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.

[10] 万书鹏, 易强, 张凯, 等. 基于微服务架构的新一代调控系统服务编排技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 116-121.

- WAN Shupeng, YI Qiang, ZHANG Kai, et al. Microservice architecture based service choreography technology for new generation dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 116-120.
- [11] SIGELMAN B H, BARROSO L A, BURROWS M, et al. Dapper, a large-scale distributed systems tracing infrastructure[R]. Google Technical Report Dapper-2010-1, 2010.
- [12] 陆龙龙. 分布式链路跟踪系统的设计与实现[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
LU Longlong. The design and implementation of distributed tracing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [13] 武杨, 王恒, 梅峥, 等. 爆发式数据处理模型在电力调度系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 86-92.  
WU Yang, WANG Heng, MEI Zheng, et al. Application of erupt data processing model to electric power dispatching system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(1): 86-92.
- [14] 尹项根, 徐彪, 张哲, 等. 面向调控运行的电网安全预警辅助支持系统[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 1-6, 14.  
YIN Xianggen, XU Biao, ZHANG Zhe, et al. Security early warning auxiliary system for power system dispatching and operation[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 1-6, 14.
- [15] 彭志强, 徐春雷, 张琦兵, 等. 电力系统通用服务协议一致性测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 84-91.  
PENG Zhiqiang, XU Chunlei, ZHANG Qibing, et al. Conformance testing technology of general service protocol for electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 84-91.
- [16] 王鹏, 从波, 李国杰, 等. 基于 ActiveMQ 消息总线的性能测试方法[J]. 测试技术学报, 2019, 33(2): 147-152.  
WANG Peng, CONG Bo, LI Guojie, et al. Method of message bus based on activemq performance testing [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(2): 147-152.
- [17] 孙宏宇, 张沛超, 陈永华. 基于消息总线的综合能源系统时间序列潮流的协同仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 76-83.  
SUN Hongyu, ZHANG Peichao, CHEN Yonghua. A co-simulation method for time series energy flow of integrated energy system based on message bus[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 76-83.
- [18] 尚学伟, 赵林, 范泽龙, 等. 基于调度数据网的广域数据总线体系架构和关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 109-114.  
SHANG Xuewei, ZHAO Lin, FAN Zelong, et al. Architecture and key technologies of wide-area data bus based on dispatching data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 109-114.
- [19] 马云龙, 梅峥, 郭子明, 等. 电力调度系统广域分布式代理关键技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 62-68.  
MA Yunlong, MEI Zheng, GUO Ziming, et al. Research on key techniques of wide-area distributed proxy in the power dispatching system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(3): 62-68.
- [20] 田方媛, 张岩, 徐兵, 等. 多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 19-26.  
TIAN Fangyuan, ZHANG Yan, XU Bing, et al. Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 19-26.
- [21] 赵林, 卓峻峰, 王恒, 等. 基于广域云总线的电网调度综合智能告警[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 55-57.  
ZHAO Lin, ZHUO Junfeng, WANG Heng, et al. Integrated intelligent alarm for power grid dispatching based on wide area cloud bus[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 55-57.
- [22] CAMPISANO A, CITTADINI L, BATTISTA G D, et al. Tracking back the root cause of a path change in interdomain routing[C] // NOMS 2008 - 2008 IEEE Network Operations and Management Symposium, April 7-11, 2008, Salvador, Brazil: 441-448.
- [23] HINTJENS P. ZeroMQ: messaging for many applications[J]. Oreilly Media, 2013.
- [24] KUMAR A, XU J, WANG J. Space-code bloom filter for efficient per-flow traffic measurement[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 24(12): 2327-2339.
- [25] CLINTON G, TONG Z. Elasticsearch: the definitive guide: a distributed real-time search and analytics engine[M]. O'Reilly Media, Inc, 2015.
- [26] CORDRAY C, LINK D, CHART R, et al. Self configuring network management system: U.S., US9077611B2[P]. 2015-07-07.
- [27] WANG Tianyu, ZHANG Zhiyong, ZHAO Mengying, et al. H2-RAID: a novel hybrid RAID architecture towards high reliability[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2018: 617-627.

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-02-18

作者简介:

王恒(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: wangheng@sgepri.sgcc.com.cn

马云龙(1988—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 18612380147@163.com

武杨(1992—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: sgepri.sgcc@qq.com

(编辑 周金梅)