



文章编号: 1671-251X(2025)03-0096-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024110036

基于工业互联网平台的煤矿跨系统统一 数据服务研究与应用

弯茂全^{1,2}, 李昊^{1,2}, 王浩^{2,3}

(1. 煤炭科学研究总院有限公司 矿山软件研究院, 北京 100013;

2. 天地科技股份有限公司, 北京 100013;

3. 煤炭科学研究总院有限公司 矿山人工智能研究院, 北京 100013)

摘要: 目前工业互联网平台在煤矿应用中存在无法充分发挥数据的价值, 数据在不同系统间的流通受限制, 在处理跨系统数据交互时, 不同子系统之间缺乏统一的权限管理机制, 增加了数据被篡改和非授权访问的风险等问题。基于工业互联网平台提出了一种煤矿跨系统统一数据服务体系。通过涵盖监测监控级、生产管理级与运营管理级 5 层跨系统数据模型(主题域分组-主题域-业务对象-逻辑实体-属性), 构建“接口层-服务层-存储层”协同架构, 集成协议动态适配引擎、容器化微服务部署及低代码接口配置工具, 设计动态分级鉴权机制和全链路行为监控体系, 实现多源异构数据的标准化接入、安全流转与精准交互。测试结果表明, 与传统的分布式接口模式相比, 基于工业互联网平台的煤矿跨系统统一数据服务体系的数据平均响应时间从 270 ms 优化至 148 ms, 数据加工准确率提升至 99.57%。实际应用结果表明, 在持续 12 000 h 的运行中, 服务可用性达到 99.6%, 数据一致性误差低于 0.1%。

关键词: 工业互联网平台; 煤矿跨系统统一数据服务; 多源异构数据; 统一数据交互规则; 容器化微服务
中图分类号: TD67 文献标志码: A

Research and application of unified cross-system data services for coal mines
based on industrial internet platforms

WAN Maoquan^{1,2}, LI Hao^{1,2}, WANG Hao^{2,3}

(1. Research Institute of Mine Software, China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Research Institute of Mine Artificial

Intelligence, China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Currently, the application of industrial internet platforms in coal mines faces issues such as the inability to fully utilize the value of data, limited data flow between different systems, and a lack of a unified permission management mechanism for cross-system data interactions. These issues increase the risks of data tampering and unauthorized access. A unified cross-system data service system for coal mines was proposed based on an industrial internet platform. The system comprised a five-layer cross-system data model (thematic domain grouping-thematic domain-business object-logical entity-attribute), which covered the monitoring and control level, production management level, and operation management level. It established an "Interface Layer-

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-03-18; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304169); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2024-TD-ZD014-01)。

作者简介: 弯茂全(1994—), 男, 河南舞阳人, 硕士, 主要从事煤矿智能化、矿山人工智能及矿山软件平台的研究与应用工作,

E-mail: wamq1121@hotmail.com。通信作者: 李昊(1983—), 男, 北京人, 博士, 主要从事煤矿无人化开采及智能控制方面的研究工作, E-mail: lihao@ccteg-bigdata.com。

引用格式: 弯茂全, 李昊, 王浩. 基于工业互联网平台的煤矿跨系统统一数据服务研究与应用[J]. 工矿自动化, 2025, 51(3): 96-104.

WAN Maoquan, LI Hao, WANG Hao. Research and application of unified cross-system data services for coal mines based on industrial internet platforms[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(3): 96-104.



扫码移动阅读

Service Layer-Storage Layer" collaborative architecture. The system integrated a dynamic protocol adaptation engine, containerized microservice deployment, and low-code interface configuration tools. Additionally, it employed a dynamic hierarchical authentication mechanism and an end-to-end behavior monitoring system. These features together enabled standardized access, secure transfer, and precise interaction of multi-source heterogeneous data. Test results showed that, compared to the traditional distributed interface model, the proposed system optimized average data response time from 270 ms to 148 ms and improved data processing accuracy to 99.57%. Practical application results indicated that over 12,000 hours of continuous operation, the service availability reached 99.6%, and data consistency errors were below 0.1%.

Key words: industrial internet platform; unified cross-system data services for coal mines; multi-source heterogeneous data; unified data interaction rules; containerized microservices

0 引言

煤矿生产是一项涉及掘进、采矿、机电、运输、通风、地质、测量等多业务协同的复杂系统工程^[1-3]。近年来,煤炭行业大力推进智能化建设,通过“机械化换人、自动化减人、智能化无人”实现煤矿的安全高效生产。在智能化建设过程中,井下感知、通信、控制和分析能力显著提高,煤矿各项子系统均实现了由人工向机械化、由经验向数据化的转变^[4-6]。这些子系统的智能化建设极大减轻了人员劳动强度,将大量一线生产人员从作业面的繁重劳动中解放出来^[7-8]。

《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》中明确指出应为煤矿主要业务系统提供数据服务。尽管众多学者和企业 在煤矿数字化建设之初即提出了煤矿数据融合的思路^[9-11],但由于各子系统供应商采用私有化数据标准(自定义编码、非标通信协议等),导致系统间缺乏符合 MT/T 1202.1—2023《煤矿数据采集与传输技术要求》等行业标准的统一数据共享桥梁,人为制造的跨系统数据割裂屡见不鲜。后建系统向先建系统提出跨系统数据需求时,需要采用增补开发数据接口的方式。这一现象不仅造成了人力物力的浪费,也增加了运维部门对数据接口及数据一致性的管理成本。因此,在提升智能化软硬件水平的同时,煤矿亟需一种规范化的跨系统数据共享方法,实现智能矿山框架下数据全局流通和高效利用。

以工业互联网^[12-14]平台为代表的新一代信息技术为这一问题提供了新的可行思路。工业互联网平台在电力^[15]、航空^[16]、农业^[17]、制造^[18-19]等领域已经有诸多成熟应用,提升了一体化管理水平。针对煤炭行业特征和智能化建设进展,许多学者开展了工业互联网在煤矿领域的研究与应用^[20-24],强调了数据标准化、互联互通、共享协同、跨域贯通等理念和方法。通过统一对接数据源和业务应用,实现业

务前台与数据后台的有机连接,打通数据孤岛和数据烟囱,有效解决数据与管理业务的脱节问题。

然而,当前工业互联网平台在煤矿实际应用中仍面临多重技术瓶颈与系统性挑战:①在处理实时数据时,面临数据延迟和处理速度不足的问题,导致在快速响应和决策的场景中,无法充分发挥数据价值。②各子系统通常更聚焦于自身内部的数据流程管理,缺乏对跨系统数据流动的宏观认知,使得数据在不同系统间的流通受到限制,影响了整体效能。③在处理跨系统数据交互时,对于数据权限的管理和鉴权复杂度较高,不同子系统之间缺乏统一的权限管理机制,增加了数据被篡改和非授权访问的风险。

在现有煤矿工业互联网平台的研究与应用基础上,本文提出了一种煤矿跨系统统一数据服务体系,通过构建涵盖监测监控级、生产管理级与运营管理级的5层数据模型,建立实时通信机制,设计分级鉴权策略,实现了多源异构数据的标准化接入与安全流转,提升了实时性与安全性方面的性能,为煤矿智能化转型提供了可复用的技术范式。

1 煤矿跨系统数据体系

1.1 煤矿数据跨系统特征分析

煤矿生产涉及到大量的生产技术、安全管理、机电控制、地质资源、测量、财务、人力资源、物资后勤等多源异构数据,这些数据由部署于不同平台的异构系统生成。各子系统在概念术语体系、数据格式规范、数学模型及分析推理方法等方面存在显著差异,既涉及结构化数据库(MySQL, Oracle等)与非结构化数据存储(Hadoop, MongoDB等),又涉及视频流、语音信号、文本日志等。这些数据在支撑各子业务运行的同时,因生产流程的强耦合性,产生跨系统的数据互联互通需求,例如环境监测数据需同步至安全管理系统,设备状态数据需传输至生产调度系统。

煤矿数据的跨系统传输与子系统内部传输有一定的差异性。子系统内部传输通常采用封闭式架构与一体化数据库设计,其数据流遵循统一标准完成生成、加工和存储。然而,跨系统传输因子系统建设的离散性,面临协议异构(如 Modbus 与 HTTP 并存)、语义冲突(如“产量”字段在采煤与运输系统的定义差异)及安全隔离需求等挑战,需重点解决多协议兼容性、实时性及安全隔离性问题。

1) 系统交互规则的规范性。煤矿子系统间多采用点对点接口开发模式,即两系统通过协商定制私有通信协议实现数据交互,这种碎片化的接口开发方式导致煤矿信息系统形成多种非标交互协议。系统交互规则的规范性要求建立全矿级数据交互标准,在不同管理层级、不同平台架构和不同应用主题下的跨系统数据交互采用统一的规范和约束。通过“统一流入、统一流出、统一规范”的方式,基于跨系统统一数据服务对煤矿各业务部门的离散系统涉及的数据交互进行分析、规范与优化。

2) 数据传输共享的时效。煤矿生产具有高度协同性,因此必须保证跨系统数据传输共享的时效性,以及及时为后续业务提供可靠的前序系统数据。对毫秒级的监测监控数据、小时级的产量监控数据和日月级的运营管理数据采用一致性的数据传输共享策略,保证细时间粒度数据向上汇总的及时有效和粗时间粒度数据向下同步的准确可靠。

3) 数据应用范围的安全性。煤矿生产系统是一种开放式可扩展系统,各类不同功能的子系统随着生产进度的推进和生产阶段的改变而变化。如何保证数据在复杂多变的子系统间频繁互通的安全性,是煤矿跨系统数据交互管理的难点之一。在数据跨

系统访问和流转过程中,不仅要保证数据来源的可信性,也要保证数据对非授权系统的隔离性,因此,需要对数据访问和流转中的不安全行为进行跟踪、记录和限制。通过统一的安全认证和系统隔离,实现数据的分级管理、脱敏传输和溯源管理,保证数据的隐私合规、可审计、可回溯。

1.2 跨系统数据模型

煤矿跨系统数据模型以主数据为核心,遵循 KSSJ/ZL14—2023《智能化矿山数据融合共享规范》的主数据管理要求,通过统一编码、标准化定义及全生命周期管理,将煤矿生产过程中涉及的各子系统划分为监测监控级系统、生产过程管理级系统和运营管理级系统 3 个主要类别,见表 1。监测监控级系统主要包括煤矿机电设备监测(振动、温度传感器)、环境监测(温湿度、粉尘浓度)、音视频系统(工业视频、语音对讲)及人员定位(超宽带、射频识别),其特征是数据生成频率极高,数据量大。煤矿生产过程管理级系统主要包括制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)、安全风险管控系统等,主要服务于日常生产,数据周期通常为小时、班次或日,是煤矿生产最直接、核心的管理系统,涉及监测监控级系统数据的汇总分析及运营管理级系统的数据接收与指令下发。运营管理级系统以财务、人力、物资、后勤等数据为主,数据周期通常为周或月,是覆盖煤矿运营中的“人财物产供销”协同的关键环节,大量数据需要由生产过程管理级系统汇总加工而来。各子系统表现出极强的数据多源、异构、海量和交互特征,需要梳理和组织业务流程与数据结构,构建结构统一、层次分明的跨系统数据模型。

表 1 煤矿生产子系统分类

Table 1 Classification of coal mine production subsystem

系统层级	数据来源	数据通信特征	数据结构	数据存储方式
监测监控级	以设备、环境监测传感器和音视频采集装置为主	Modbus协议、串口协议、OPC UA协议等	主要为半结构化数据、非结构化文本、音视频等	JSON, XML等半结构化数据,主要采用非关系型数据库
生产过程管理级	以MES、安全管理等生产过程管控系统为主	消息中间件、流媒体、MQTT等	包括结构化数据、半结构化数据、非结构化数据	关系型/非关系型数据库并存
运营管理级	以财务、人力、物资、后勤等管理信息系统为主	HTTP协议、FTP协议、SMTP协议等	以结构化数据表为主,辅以少量文本、图片、语音、视频	关系型数据库为主

依据煤矿生产子系统分类对跨系统数据进行抽象,分解重构并明确抽象实体的属性与关联,采用 5 层架构进行分层规划,形成跨系统数据模型,如图 1 所示。顶级为主题域分组,通过数据视角体现最高层面关注的业务领域。每个主题域分组下设多个主题域,作为互不重叠的高层面分类,用于管理下一级的业务对象。每个主题域下设多个业务对象,将业

务领域重要的人、事、物等物理对象实体抽象化,用于承载业务运作和管理涉及的重要信息。每个业务对象下设多个逻辑数据实体,用于表示具有一定逻辑关系的业务属性集合。每个逻辑数据实体下设多个属性,描述所属业务对象的性质和特征,反映信息管理的最小粒度。

主题域分组包括监测监控级系统、生产过程管

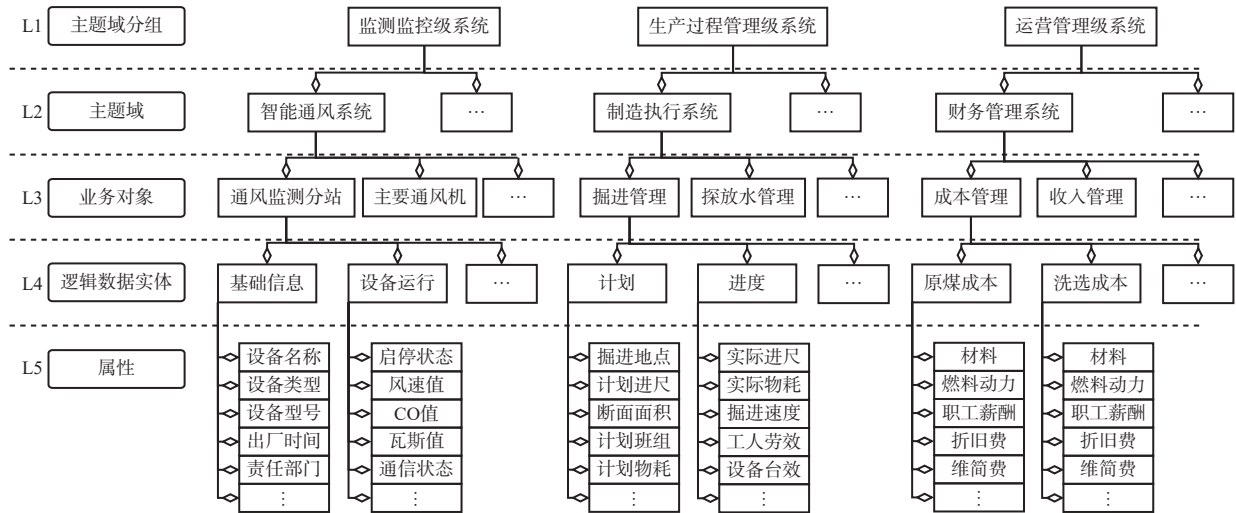


图1 煤矿跨系统数据模型

Fig. 1 Cross-system data model for coal mines

理级系统和运营管理级系统。主题域细分为各煤矿生产子系统。以智能通风系统为例,其下属的业务对象包括通风监测分站、主要通风机、局部通风机等实体对象。其中通风监测分站的逻辑数据实体包括基础信息、设备运行信息、设备运维信息等数据属性集合,包含了设备名称、启停状态等具体的数据字段属性。

煤矿跨系统数据模型为数据的树形结构模型,在应对跨系统数据服务需求时,可通过向上遍历树形结构,构建最短数据流,简化跨系统数据服务逻辑。

2 跨系统统一数据服务架构

跨系统统一数据服务架构以工业互联网平台为核心支撑,通过分层解耦与动态适配机制,构建覆盖数据接入、处理、服务与安全的全流程管理体系。该框架以标准化数据交互规则为基础,通过接口层、服务层与存储层的协同设计,实现异构子系统的无缝集成;依托身份鉴权与行为监控模块保障数据交互的安全性,并通过容器化微服务架构提升系统的灵活性与可扩展性。

2.1 整体框架

基于工业互联网平台将分散子系统的数​​据流抽象为服务接口,通过分层解耦与动态适配机制,构建“接口层-服务层-存储层”协同框架,支撑煤矿跨系统数据的即插即用与高效协同。跨系统统一数据服务整体架构如图2所示。由工业互联网平台统一完成各子系统数据的实时汇集、处理和加工。存储层负责以标准化格式写入存储引擎。服务层提供数据行为的鉴权、审计、多级缓存等安全和效率管理工具。接口层用于向子系统用户提供 SDK, RESTful, MQTT 等通用协议的数据服务。

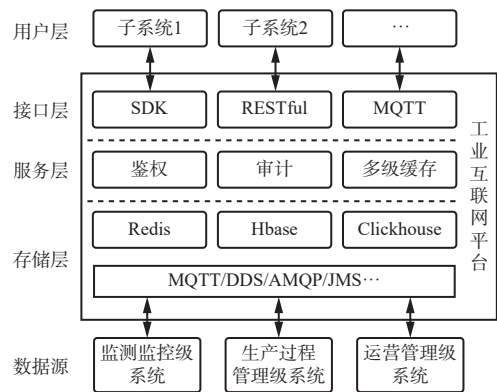


图2 跨系统统一数据服务整体架构

Fig. 2 Overall architecture of unified across-system data services

通过工业互联网平台技术特性与煤矿业务需求的深度融合,为多源异构数据的规范化流通提供基础能力。

1) 协议标准化与动态适配。基于 OPC UA, MQTT 等工业协议兼容 Modbus, CAN 等传统协议,消除子系统间的通信壁垒,解决煤矿数据交互中“一系统一接口”的冗余问题。

2) 边缘-云协同计算。在数据源头部署边缘节点,对高频监测数据(如振动传感器 10 kHz 采样)进行实时预处理,降低云端负载,确保毫秒级场景(瓦斯预警、设备故障诊断)的即时响应。

3) 安全可信架构。通过统一身份认证(AK/SK)、动态熔断机制及分级鉴权策略,实现数据从采集、传输到应用的全生命周期安全管控。

2.2 统一数据交互规则

建立统一的煤矿数据交互规则,以满足生产设备、安全监控等异构子系统的通信规范要求,在此基础上构建低代码接口配置工具,实现煤矿生产子系统的即插即用和灵活变更。通过自动化生成接口的

方式,达到配置即开发的目的,从而提升跨系统数据管理效率。

统一数据交互规则包括接口信息配置、接口生成和接口调用规则配置,用于实现跨系统数据接口的信息录入、自动生成和快速应用,整体流程如图 3 所示。

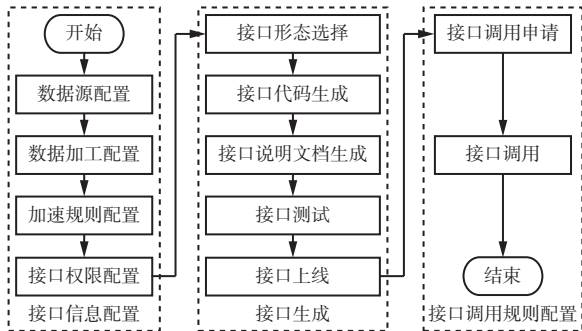


图 3 统一数据交互规则流程

Fig. 3 Unified data interaction rules and process

接口信息配置通过可视化界面进行数据接口的基础信息和功能权限开发。首先确定目标数据源,选择相应的主题数据仓库和详细字段。其次在此基础上,配置数据的加工逻辑,包括指标间的计算、数据的汇聚等,并设置指标解释。然后进行接口加速规则配置,采用内存加速、定时调度等方法提升复杂逻辑的处理效率。最后进行接口的权限配置,根据《煤矿数据采集与传输技术要求 第 4 部分:信息安全》(MT/T 1202.4—2023)对数据的授权范围(读写权限、访问频次、敏感字段脱敏级别等)和行为操作(数据下载、转发、删除等)进行分级管控。

接口生成用于自动生成接口代码和预部署,实现接口开发的低代码化。通过可视化界面选择接口的生成形态,包括 SDK, RESTful, MQTT 等形式,以便不同类型应用进行调用。根据已配置的接口信息,基于工业互联网平台的分布式服务框架,利用平台内置的接口模板一键生成接口代码,并据此生成接口说明文档。信息管理人员仅需完成接口测试即可将接口上线,完成接口部署。

采用接口调用规则配置为子系统开通接口权限。子系统向平台提交接口调用申请后,平台基于角色访问控制(Role-Based Access Control, RBAC)模型进行权限分配,确保接口调用行为符合最小授权原则。在接口使用过程中,平台采用动态熔断机制(阈值触发、异常流量监测)防止资源过载,当检测到异常请求流量时自动启动限流保护,并由平台记录数据行为。

2.3 身份识别与鉴权

煤矿涉及大量机电、环境、安全、生产等多口径数据,各部门均具备特定的数据授权范围和读写权

限,为保障煤矿的数据安全,防止数据的篡改和非授权扩散,需要对跨系统数据服务进行身份识别与鉴权。各业务应用子系统依据 MT/T 1202.4—2023 框架,安全地访问和操作其授权范围内的数据资源。跨系统统一数据服务框架内的全部数据访问均采用请求签名机制和分级鉴权策略,核心生产数据被列为一级管控对象,其访问需要经过严格的身份验证,任何非法签名下的访问和数据行为均予以拒绝。子系统通过唯一标识的 AK 密钥 ID 发起请求,平台端利用 SK 密钥对请求参数进行签名验证,具体流程如图 4 所示。

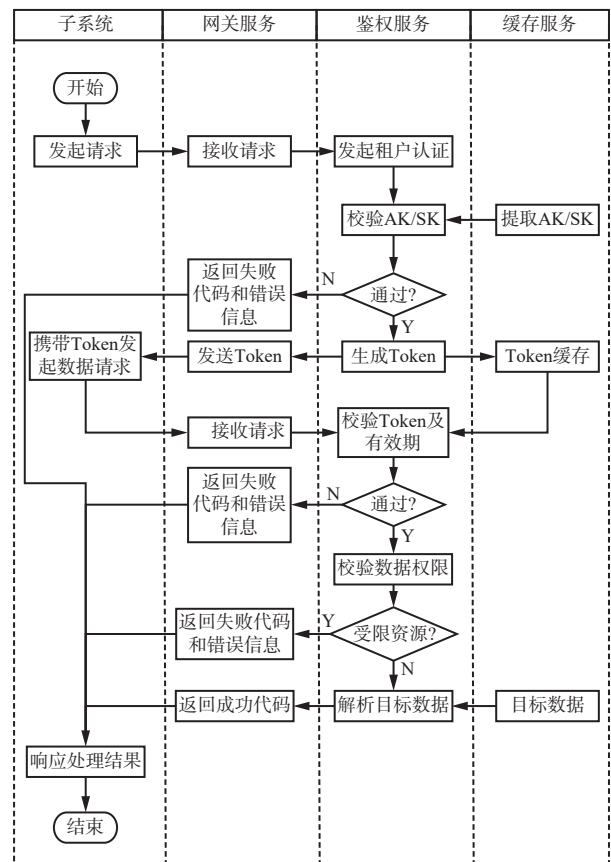


图 4 身份识别与鉴权流程

Fig. 4 Identity identification and authentication process

1) 通过对现有子系统接口进行标准化改造,子系统能够以统一的协议和身份认证机制向工业互联网平台发起数据资源访问请求。

2) 网关服务接收请求并转发至鉴权服务,通过与缓存服务比对,对 AK 和 SK 的有效性和合法性进行校验,校验通过后生成 Token,否则返回失败代码和错误信息。

3) 调用方携带 Token 发起数据请求,鉴权服务校验 Token 有效性,校验成功继续执行,否则返回失败代码和错误信息。

4) 鉴权服务判定是否为受限资源,如果不是受限资源则继续执行,否则返回失败代码和错误信息。

5) 向数据存储提取目标数据并根据请求解析至响应格式。

6) 封装结果信息, 将处理结果返回给调用方。

2.4 数据行为监控

跨系统数据的安全性是保障整体生产系统稳定性的关键, 为降低数据异常行为带来的风险并实现快速溯源, 依托工业互联网平台构建了全链路数据行为监控体系, 覆盖从数据调用到业务协同的全生命周期。首先, 调用行为审计模块通过分布式日志采集系统, 追踪子系统间的数据调用时序、内容有效性及鉴权合规性。其次, 流量态势感知模块采用滑动时间窗算法, 实时监测各子系统的调用频率、数据流量峰谷比。然后, 服务健康度评估模块持续分析服务延迟、可用性及错误率等关键指标。最后, 业务一致性校验模块运用数据版本控制与哈希链技术, 确保跨系统数据副本的一致性。

2.5 容器化微服务部署

采用 Kubernetes 和 Micro 框架部署 4 个微服务, 分别承担警报(Alert)、接收(Receive)、查询(Query)和统计算法(Statistical Algorithm)功能。微服务之间的通信通过服务注册表的服务发现与分发机制实现。警报微服务负责将平台生成的警报信息传递给上层应用; 接收微服务负责将接入设备采集到的传感数据持久化存储至数据库; 查询微服务负责从数据库中检索观测数据, 并将其传递给上层应用; 统计算法微服务负责响应上层应用的统计计算请求。

采用 Docker 容器技术实现平台的快速、简便和准确部署, 在维护各模块之间依赖关系和配置的同时, 保证系统的分布式可扩展性和可重用性。此外, 通过负载均衡和统一调度机制, 减少操作工作负担, 实现应用之间的弱耦合和高可配置性。

3 案例研究

3.1 环境部署

采用云服务方式, 构建 7 台虚拟机服务器, 采用 CentOS 6.8 操作系统, 各服务器的配置及功能见表 2。

表 2 服务器的配置及功能

Table 2 Configuration and functions of servers

序号	用途	操作系统	CPU/核	内存/G	硬盘	数量/个
1	数据存储服务	CentOS 6.8	64	128	16T HDD	3
2	数据接入服务	CentOS 6.8	32	64	1T SSD	1
3	数据输出服务	CentOS 6.8	32	64	1T SSD	1
4	数据缓存服务	CentOS 6.8	32	64	1T SSD	1
5	数据鉴权服务	CentOS 6.8	32	64	1T SSD	1

3.2 数据集和验证方法

通过负载模拟进行压力测试, 并利用来自 12 个井工煤矿子系统的 1 h 历史离线数据来分析整体性能。测试场景中的系统类型和数据特性见表 3。

表 3 测试场景中的系统类型和数据特性

Table 3 System types and data characteristics in test scenario

序号	子系统名称	数据频率	数据类型	数据尺寸/KiB	平均速度/(B·s ⁻¹)
1	掘进	ms	时序	130	3 787
2	综采	ms	时序	110	3 204
3	主煤流	ms	时序	50	1 456
4	辅助运输	ms	时序	40	1 165
5	人员定位	s	时序	70	2 039
6	环境监测	s	时序	80	2 330
7	工业视频	实时	流	84 100	250 838 021
8	通信联络	实时	流	1 500	4 473 924
9	双预控	min	结构化/非结构化	930	27 088
10	生产执行	min	结构化	384	109
11	财务管理	min	结构化	257	73
12	物资管理	min	结构化	367	104

通过多线程模拟数据请求, 对统一数据服务进行压力测试。对比方案采用传统分布式接口模式, 即子系统间通过独立开发的双向接口实现数据交互。

采用云服务器模拟子系统运行, 每个子系统的虚拟机规格为 Intel Core i5-8400 2.8 GHz CPU, 4 GiB-RAM。子系统间存在 84 个跨系统数据交互规则, 验证组设置 12 个统一数据接入和 12 个统一数据输出服务, 对照组按照数据交互规则在子系统间设置 84 个独立数据交互服务。

3.3 试验及结果分析

为验证跨系统统一数据服务框架的工程有效性, 本研究通过构建验证组(工业互联网平台架构)与对照组(传统分布式接口模式)开展对比试验。

针对异构设备通信协议转换效率低下引发的数据传输瓶颈问题, 基于协议抽象层与多级缓存的协同优化实现端到端传输路径重构, 性能对比如图 5 所示。可看出验证组数据平均响应时间为 148 ms, 较对照组降低 45.19%, 性能提升主要源于协议动态适配机制消除协议间的中间转换环节, 以及多级缓存策略对数据命中效率的提升。

在数据服务中, 由于数据链断裂, 会因为缺少上游数据导致下游的加工数据错误。此外, 同一数据由于传输数据类型(如字符串、整数或浮点数)和精

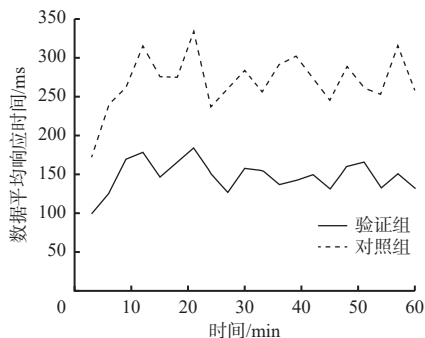


图 5 平均数据响应时间

Fig. 5 Average data response time

度不同,也会导致差异,引发数据错误。为此,检查了所有处理过的数据,将测试结果与真实值对比,记录正确数据的比例,如图 6 所示。可看出验证组加工数据的准确率达 99.57%,较对照组提升 0.51%。这一改进归因于统一数据模型消除了跨系统字段的语义冲突,同时数据类型自动转换引擎将精度损失控制在 0.001% 以内,数据血缘追踪技术实时检测断链风险并触发补偿重传,保障业务逻辑的完整性。

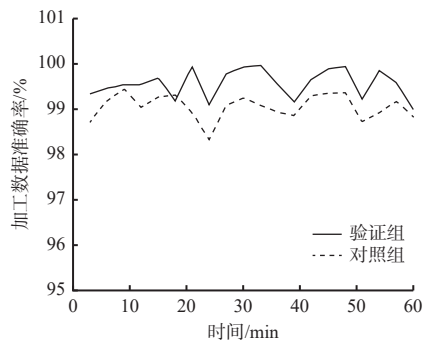


图 6 加工数据的准确率

Fig. 6 Accuracy of data processing

采用虚拟机对子系统进行模拟,记录虚拟机的 CPU 消耗和内存消耗,以反映数据服务对子系统性能的影响,结果如图 7 和图 8 所示。可看出,验证组平均 CPU 与内存占用率分别为 52.81% 和 52.67%,较对照组分别减少了 19.03% 和 19.87%。容器化微服务架构通过 Kubernetes 动态调度实现负载均衡,将峰值时段 CPU 波动范围从±11% 收窄至±6%。流水线式数据处理减少中间态数据冗余存储,使得内存占用显著下降。

3.4 煤矿应用

跨系统统一数据服务已成功在某井工煤矿中得到应用,性能测试结果如图 9 所示,在数据压缩率、数据查询速率和数据写入速率方面表现优异。数据写入速率从传统的 8 000 条/s 提升至 12 000 条/s,历史数据查询延迟降低 60%,支持井下工业视频流数据的高效检索与分析。负载峰值时的平均 CPU 与内

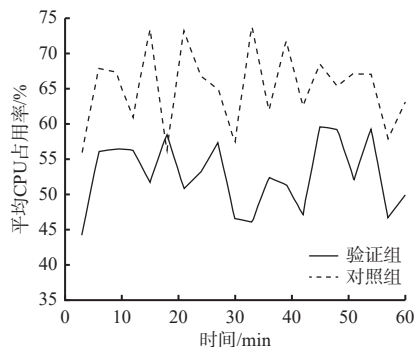


图 7 平均 CPU 利用率

Fig. 7 Average CPU utilization

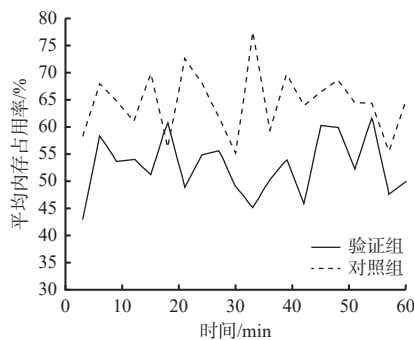


图 8 平均内存利用率

Fig. 8 Average memory utilization

存占用率分别稳定在 52.81% 和 52.67%,较传统分布式接口模式降低 19%。在持续 12 000 h 的运行中,服务可用性达到 99.6%,数据一致性误差低于 0.1%,验证了框架的可靠性。基于统一数据模型与分级鉴权机制(RBAC+AK/SK),实现了 MES、物资管理系统与财务系统的无缝对接。例如,生产数据自动同步至物资管理系统后,备件调度周期可显著缩短,减少了因数据割裂导致的管理滞后。

4 结论

1) 基于工业互联网平台的煤矿跨系统统一数据服务提供了一种煤矿系统间数据交互的解决方案。研究表明,与传统方案相比,数据平均响应时间降低了 45.19%,加工数据的准确率提高了 0.51%,且平均 CPU 和内存占用率分别减少了 19.03% 和 19.87%,有效提高了煤矿生产系统的效率和可靠性。

2) 跨系统统一数据服务具有可操作性和可落地性。在井工煤矿的应用增强了生产、安全和运营管理系统间的数据流通,支持超过 20 个子系统和 50 多套设备的高效协作。在系统运行超过 12 000 h 的实证中,累计完成 60 亿次的数据交换服务,数据压缩率、查询速率和写入速率都得到了显著提升。

3) 工业互联网平台在煤矿的应用潜力巨大,尤其是在复杂、多变的生产环境中。未来的研究将聚

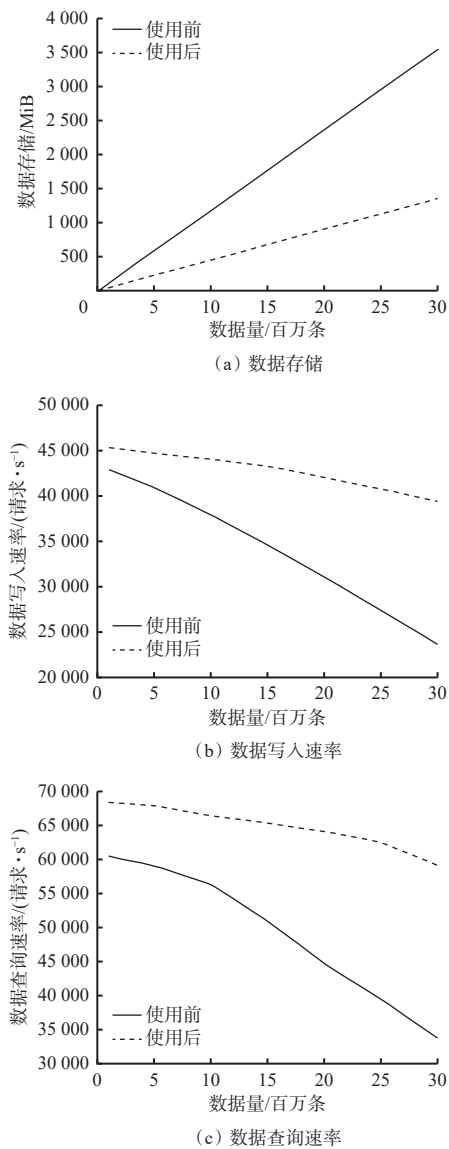


图9 性能测试比较

Fig. 9 Performance test comparison

焦于平台的进一步优化,以应对更大规模和更多样化的数据交互需求。随着煤矿智能化建设的推进,工业互联网平台有望在更广泛的场景中发挥更大的作用,支持煤炭行业的全面智能化转型。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181-202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 181-202.
- [2] 顾清华, 江松, 李学现, 等. 人工智能背景下采矿系统工程发展现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(5): 10-25.
GU Qinghua, JIANG Song, LI Xuexian, et al. Development status and prospect of mining system engineering under the background of artificial

intelligence[J]. Metal Mine, 2022(5): 10-25.

- [3] 王家臣, 刘云熹, 李杨, 等. 矿业系统工程60年发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 261-279.
WANG Jiachen, LIU Yunxi, LI Yang, et al. 60 years development and prospect of mining systems engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 261-279.
- [4] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 161-169.
- [5] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3181-3189.
HAN Jianguo. Key technology research and demonstration of intelligent mines in Shenhua Group[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3181-3189.
- [6] 鲍久圣, 张可琨, 王茂森, 等. 矿山数字孪生MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 166-177.
BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: model architecture, key technologies and research prospects[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 166-177.
- [7] LI Jianguo, ZHAN Kai. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering, 2018, 4(3): 381-391.
- [8] 张帆, 葛世荣. 矿山数字孪生构建方法与演化机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 510-522.
ZHANG Fan, GE Shirong. Construction method and evolution mechanism of mine digital twins[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 510-522.
- [9] 王立兵, 任予鑫, 马昆, 等. 多源数据融合智能识别煤矿场景特征AI模型[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4617-4631.
WANG Libing, REN Yuxin, MA Kun, et al. AI model for intelligent recognition of coal mine scene features through multi-source data fusion[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4617-4631.
- [10] 贺耀宜, 陈晓晶, 郝振宇, 等. 智能矿山低代码工业物联网平台设计[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 141-148, 174.
HE Yaoyi, CHEN Xiaojing, HAO Zhenyu, et al. Design of intelligent mine low code industrial IoT platform[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 141-148, 174.
- [11] 李荟, 韩晓飞, 朱万成, 等. 基于多源信息融合的矿山边坡滑坡灾害研究现状与展望[J]. 工矿自动化, 2024, 50(6): 6-15.
LI Hui, HAN Xiaofei, ZHU Wancheng, et al. Current status and prospects of research on landslide disasters in mine slopes based on multi-source information fusion[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(6): 6-15.

- [12] MENON K, KÄRKKÄINEN H, WUEST T, et al. Industrial Internet platforms: a conceptual evaluation from a product lifecycle management perspective[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 233(5): 1390-1401.
- [13] AGARWAL N, BREM A. Strategic business transformation through technology convergence: implications from General Electric's industrial Internet initiative[J]. *International Journal of Technology Management*, 2015, 67(2/3/4): 196-214.
- [14] ZHANG Xianyu, MING Xinguo. A comprehensive industrial practice for industrial Internet platform (IIP): general model, reference architecture, and industrial verification[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 158. DOI: [10.1016/j.cie.2021.107426](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107426).
- [15] 肖祥武, 王丰, 王晓辉, 等. 面向工业互联网的智慧电厂仿生体系架构及信息物理系统[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(23): 4898-4911.
XIAO Xiangwu, WANG Feng, WANG Xiaohui, et al. Bionic structure and cyber-physical system for intelligent power plant oriented to the industrial internet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(23): 4898-4911.
- [16] 蒋敏, 郑力. 面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(1): 3-13.
JIANG Min, ZHENG Li. Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(1): 3-13.
- [17] 许继平, 孔德政, 王昭洋, 等. 基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统构建[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 372-381.
XU Jiping, KONG Dezheng, WANG Zhaoyang, et al. Construction of digital twin system of rice supply chain based on industrial internet[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 372-381.
- [18] XU Chi, YU Haibin, JIN Xi, et al. Industrial Internet for intelligent manufacturing: past, present, and future[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2024, 25(9): 1173-1192.
- [19] 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(1): 14-25.
CHAI Tianyou, LIU Qiang, DING Jinliang, et al. Perspectives on industrial-internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(1): 14-25.
- [20] 李首滨. 煤炭工业互联网及其关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 98-108.
LI Shoubin. Coal industry internet and its key technologies[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 98-108.
- [21] 申斌学. 基于矿山工业互联网的选煤厂智能管控体系设计与关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(9): 210-219.
SHEN Binxue. Design and key technology of intelligent management and control system for coal preparation plant based on mining industry internet[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(9): 210-219.
- [22] 张建中, 郭军. 智慧矿山工业互联网技术架构探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(5): 238-246.
ZHANG Jianzhong, GUO Jun. Discussion on industrial internet technology framework of smart mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 238-246.
- [23] 谢嘉成, 王学文, 郝尚清, 等. 工业互联网驱动的透明综采工作面运行系统及关键技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(12): 3160-3169.
XIE Jiacheng, WANG Xuewen, HAO Shangqing, et al. Operating system and key technologies of transparent fully mechanized mining face driven by industrial Internet[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(12): 3160-3169.
- [24] 周鑫, 周云成, 金树军, 等. 煤炭工业互联网标识解析二级节点系统架构研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(3): 140-145.
ZHOU Xin, ZHOU Yuncheng, JIN Shujun, et al. Research on secondary node system architecture of coal industry internet identity resolution[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(3): 140-145.