

区块链技术在全国地质灾害风险预警系统建设中的应用探索

张鸣之, 杨 飞, 马 娟, 付 正, 黄 , 李俊峰

Exploration of blockchain technology application in the construction of National Risk Warning System on Landslides

ZHANG Mingzhi, YANG Fei, MA Juan, FU Zheng, HUANG Zhe, and LI Junfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究

A study of the risk ranking method of landslides and collapses

解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 刘秀伟, 赵伟华, 张成强 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 184–192

基于LoRa的地质灾害分布式实时监测系统设计

Design of the distributed real-time monitoring system for geological hazards based on LoRa

郭伟, 王晨辉, 李鹏, 孟庆佳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 107–113

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

刘德玉, 贾贵义, 李松, 丛凯, 张伟 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 33–33

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135–146

基于广播RTK边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析

The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis

朱真, 江思义, 刘小明, 李志宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 176–183

地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展

Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology

李文鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 1–1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302012

张鸣之, 杨飞, 马娟, 等. 区块链技术在全国地质灾害风险预警系统建设中的应用探索 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 168-174.

ZHANG Mingzhi, YANG Fei, MA Juan, *et al.* Exploration of blockchain technology application in the construction of National Risk Warning System on Landslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 168-174.

区块链技术在全国地质灾害风险预警系统 建设中的应用探索

张鸣之^{1,2,3,4}, 杨飞^{2,3}, 马娟^{2,3}, 付正⁵, 黄喆^{2,3}, 李俊峰^{2,3,4}

(1. 清华大学工程物理系/公共安全研究院, 北京 100084; 2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081; 3. 自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心, 北京 100081; 4. 自然资源部四川雅安地质灾害野外科学观测研究站, 四川雅安 625099; 5. 新晨科技股份有限公司, 北京 100097)

摘要: 2019 年以来, 自然资源部全面推进普适型设备研发与地质灾害自动化监测预警工作, 截至 2023 年 6 月, 已在 17 个地质灾害重点防治省份的 5.5 万处隐患点推广应用, 全国地质灾害风险预警系统也进入了快速发展阶段。目前, 系统每日接收监测数据超千万, 在海量数据存储管理、时序数据并行处理、大数据智能分析和多参数风险预警等方面取得积极进展。然而, 系统在数据安全方面仍存在诸多挑战, 尤其是在数据一致性、数据防篡改和系统可靠性等方面有较大提升空间。文章在系统研究区块链技术特点及其在相关领域典型应用的基础上, 提出基于分布式账本技术和共识机制的“可信数据流”建立方法, 依此形成“区块链+全国地质灾害风险预警系统”总体框架, 同时建立了原型系统。实验数据显示改进系统可以解决省-部数据不一致问题, 识别并阻止非法数据篡改, 多节点故障情况下仍可保障系统稳定运行, 系统总体性能损耗低于 20%。研究成果可为区块链技术在各级地质灾害风险预警系统中的应用提供顶层设计思路与技术方法, 对于提升全国地质灾害自动化监测网安全运行能力具有重要借鉴意义。

关键词: 区块链; 地质灾害; 监测预警; 数据安全

中图分类号: P642.2; X84

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0168-07

Exploration of blockchain technology application in the construction of National Risk Warning System on Landslides

ZHANG Mingzhi^{1,2,3,4}, YANG Fei^{2,3}, MA Juan^{2,3}, FU Zheng⁵, HUANG Zhe^{2,3}, LI Junfeng^{2,3,4}

(1. *Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR), Beijing 100081, China*; 3. *Technology Innovation Center for Geohazard Monitoring and Risk Early Warning, MNR, Beijing 100081, China*; 4. *Observation and*

收稿日期: 2023-02-06; 修订日期: 2023-07-08

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211364); 自然资源部科技人才项目(121106000000180039-2201); 国家自然科学基金项目(72293571)

第一作者: 张鸣之(1981-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事地质灾害监测预警技术方法研究工作。

E-mail: zhangmz22@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 杨飞(1983-), 男, 硕士, 电子工程专业, 高级工程师, 主要从事地质环境信息基础设施建设和网络信息保护方法研究工作。

E-mail: yangf@cigem.cn

Research Station of Geological Hazard in Yaan, Sichuan, MNR, Yaan, Sichuan 625099, China;

5. Brilliance Technology Co. Ltd., Beijing 100097, China)

Abstract: Since 2019, the Ministry of Natural Resources has comprehensively promoted the research and development of universal equipment and the automatic monitoring and forewarning of geological hazard. As of June 2023, it has been applied to 55 000 potential points of geological hazard in 17 key geological hazard prevention provinces, and the national geological hazard monitoring and forewarning system has entered a rapid development stage. At present, the system receives more than 10 million monitoring data every day, and has made positive progress in massive data storage management, parallel processing of time series data, intelligent analysis of big data and multi-parameter risk early warning. However, there are many challenges in data security of the system, especially in data consistency, data tamper resistance and system reliability. On the basis of systematic research on the characteristics of the blockchain technology and its typical application in related fields, this paper proposes a “trusted data flow” technology based on distributed ledger and consensus mechanism, according to which the overall framework of “blockchain + NRWSL” is formed, and a prototype system is established. The test data show that the improved system can solve the problem of data inconsistency between provinces and Ministry of Natural Resources, identify and prevent illegal data tampering, ensure the stable operation of the system under multi-node failure conditions, and the overall performance loss of the system is less than 20%. The research results provide technical methods for the application of blockchain technology to geological hazard risk early warning systems at all levels in China, and also provide top-level design ideas for improving the security of geological hazard monitoring data and the early warning system.

Keywords: blockchain; geological hazard; landslide warning system; data security

我国约 70% 的国土面积都是山区,是全球地质灾害最发育的国家之一。新中国成立以来,我国地质灾害防治工作取得了长足进步,目前已经初步建成集调查评价、监测预警、综合治理、应急防治为一体的综合防灾体系^[1]。在监测预警方面,我国实行双轨运行机制,即科学技术专业预警研究与依靠各级政府部门组织的群测群防预警工作相结合,共同建立地质灾害预警工程的技术工作体系和组织工作体系^[2]。2021 年,我国地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数与前 5 年同期平均值相比分别减少 30.3% 和 63.2%,在全国 14 余亿人口、30 余万处地质灾害隐患点的背景下,地质灾害防治工作取得的成效来之不易^[1]。

近年来,我国地质灾害防治科技水平快速提升,特别是在监测预警关键技术研发方面取得了一批丰硕成果。2019 年以来,普适型设备在四川、云南、贵州、重庆、山西、甘肃等 17 个重点防治省份规模实验应用,近 5.5 万处地质灾害隐患点安装了 25 万台套监测设备,主要测项包括地表位移、裂缝、倾角、加速度、雨量、土壤含水率等^[2]。依托物联网、人工智能、大数据等技术,全国地质灾害智能监测预警系统实现了“1+17”部-省秒级联动,每日更新监测数据超过 1 000

万条,大数据样本库、预测算法与预警模型研究等工作不断深化,初步构建了地质灾害自动化监测“一张网”。截至 2023 年 6 月,共成功预报灾情 90 起,涉及可能伤亡人员 2 424 人;有效预警险情 387 起,及时撤离 9 143 人,避免潜在经济损失近 9 亿元,科技防灾效果初步显现。

根据《全国地质灾害防治“十四五”规划》,至“十四五”末,我国将建设覆盖 6 万处突发性地质灾害隐患的自动化监测网络,承担科学数据观测与预警信息发送等职责。海量监测数据的采集、传输与存储管理安全对全国地质灾害风险预警系统提出了巨大挑战。

区块链技术不断成熟,正逐渐延伸至社会经济的各个领域,成为发展信任经济、推动行业数字化转型的重要技术力量^[3]。同时,区块链技术具有高度透明、去第三方信任、去中心化、匿名、可追溯等特性,为解决中心化机构普遍存在的高成本、低效率和数据存储不安全等问题提供了解决途径^[4]。因此,探索将区块链技术引入全国地质灾害智能监测预警系统,提升数据一致性、不可篡改性及系统整体可靠性势在必行。本文梳理了当前系统存在的问题与挑战,结合区块链技术的特性,重点阐述“区块链+全国地质灾害风险预

警系统”总体框架与应用探索。

1 全国地质灾害风险预警系统架构及现存问题

1.1 全国地质灾害风险预警系统架构

全国地质灾害风险预警系统通过部署于地质灾害隐患点的传感器对变形、物理场、影响因素、宏观现象等类型数据进行自动化采集,经现场自组网、4G/5G 运营商网络、卫星通信等方式进行数据传输,基于 HTTP、MQTT、COAP 等协议将数据上传至省级平台,并最终汇集到国家级平台。全国地质灾害风险预警系统架构如图 1 所示。

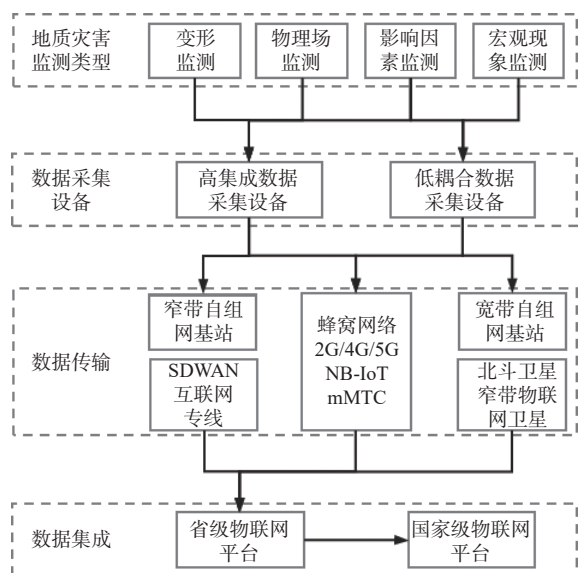


图 1 全国地质灾害风险预警系统架构图

Fig. 1 Framework of the national geological hazard monitoring and forewarning system

1.2 现存问题

1.2.1 多级同步机制影响数据一致性

地质灾害监测类型多样,系统采用“自下而上”的同步方式,通常为传感器-遥测终端-数据解算平台(仅地表位移监测)-市/县级平台(部分)-省级平台-国家级平台,系统间定时对账,较长的同步链条导致各级平台数据不一致现象时有发生。同时面临以下挑战:首先是频繁的多系统间对账,软件接口复杂且开发难度大,占用网络和计算资源多;其次,当发生数据不一致时,分析原因与查找位置难度大。

1.2.2 多级传输链路存在数据被篡改隐患

目前全国地质灾害风险预警系统共管理监测设备 25 万台套,测项 46 万个。根据《地质灾害监测通讯技术要求》规定,数据传输时应支持信息完整性校验

机制,实现管理数据、鉴别信息、隐私数据、业务数据等重要数据的传输完整性保护,但目前的多级传输链路仍然存在数据被篡改的安全隐患。例如,部分厂商为了提升其设备的在线率,可能擅自对数据进行修改、添加、删除等操作,此类未经授权的原始数据修改或解算算法调整都对数据安全性和可信性带来挑战。

1.2.3 中心式架构影响系统可靠性

在数据传输过程中,设备采集的监测数据先发送至省级平台,再同步至国家级平台,部分还存在先发送至市(县)级平台再逐级同步的情况,就近的一级平台就形成了一个中心式的系统。如果这一级平台不可用,系统中没有其他冗余节点承担接收功能,监测数据就会面临丢失风险,系统可靠性将受到影响。

2 “区块链+全国地质灾害风险预警系统”架构设计与实现

2.1 总体思路

区块链作为去中心化和去信任方式维护数据的可靠性技术,被列入国家发展规划。目前,区块链技术已在环境监测^[5]、金融^[6]、数据安全^[7-8]、传染病^[9]、教育^[10]、公共服务^[11]等领域展现出巨大应用价值,并在高速铁路监测^[12]、大坝监测^[13]、环境监测^[14]等多个物联网专业监测方向进行应用。同时,在区块链背景下,应用非对称加密技术和数字身份认证,可解决传统中心化方式带来的信息安全问题^[15]。结合全国地质灾害风险预警系统目前存在的 3 个问题,本文提出基于分布式账本技术与共识机制实现“可信数据流”,确保数据防篡改并保障其在同步对账过程中的数据一致性;通过区块链与物联网融合高可用架构设计,有效提升系统鲁棒性和可靠性。

2.2 系统设计

2.2.1 系统架构

如图 2 所示,在传统物联网架构中,传感器将所采集的数据同步到省级平台,然后再将数据同步到国家级平台,这个过程涉及到多个平台及环节,平台间需要定时或实时进行数据同步。

改进架构中,传感器将数据直接发送到物联网智能化边缘计算设备客户端中,客户端按计划自动将数据打包上传到区块链网络。在区块链网络中,同时存在省级节点和国家级节点,通过分布式账本技术保证各节点间完全同步,其他节点数据库可以将区块链作为数据唯一参考,降低对账成本。任一节点与区块链数据不一致,都可以在自身通讯链路中排查问题,减

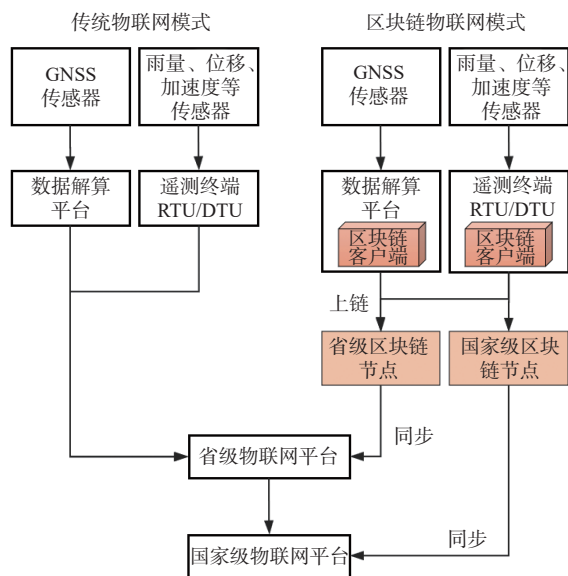


图 2 基于区块链的物联网实现方法和传统实现模式

Fig. 2 Realizing methods of networking based on the blockchain technology

少节点间对账、排查的效率损失。

2.2.2 可信数据流设计

基于分布式账本技术与共识机制建立“可信数据流”，采用区块链方式进行数据同步，对数据解算平台、遥测终端(RTU/DTU)等设备进行区块链客户端改造，将其数据直接提交到区块链中。数据流转分为 10 个步骤，具体过程如图 3 所示。

在本设计中，区块链数据上链和下链流程如下：

1)准备提案: 由客户端发起并生成交易提案，交易提案主要包括上链的业务数据，客户端使用私钥对提案进行签名；

2)提交提案: 客户端将准备好的提案通过区块链 SDK 发送给对应的一组账本节点，根据业务需要，客户端可以选择任意数量节点进行提案提交；

3)执行合约: 执行智能合约，在得出结果后对计算结果进行签名背书，得到执行结果；

4)结果返回: 账本节点将背书后的结果传回客户端 SDK 模块；

5)结果确认: SDK 模块收集来自各个节点的执行结果并进行比对，如果发现不一致，则交易失败；

6)提案提交: 客户端将通过验证的交易执行结果传入共识集群；

7)排序交易提案并打包为交易区块: Raft 共识集群将提交的交易按定义好的顺序安排成批次，并将它们打包成区块；

8)同步广播: 共识集群将打包好的区块同步到各个账本节点；

9)提交账本: 各个节点验证所得区块，验证通过后记入账本；

10)事件通知: 账本更新后会以事件的形式通知客户端有新的区块生成。

2.2.3 系统高可用设计

在传统区块链网络中，各省将数据优先传递到本省节点进行智能合约计算，当本省节点全部宕机后，业务就会中断。本文探索区块链客户端设计故障转移策略，将国家级节点作为备份节点，当本省节点宕机时，自动选择备份节点上链，当省级节点恢复后，会自动从备份节点同步数据，从而实现节点间备份与自动同步。通过这一优化，可以最大程度避免系统故障

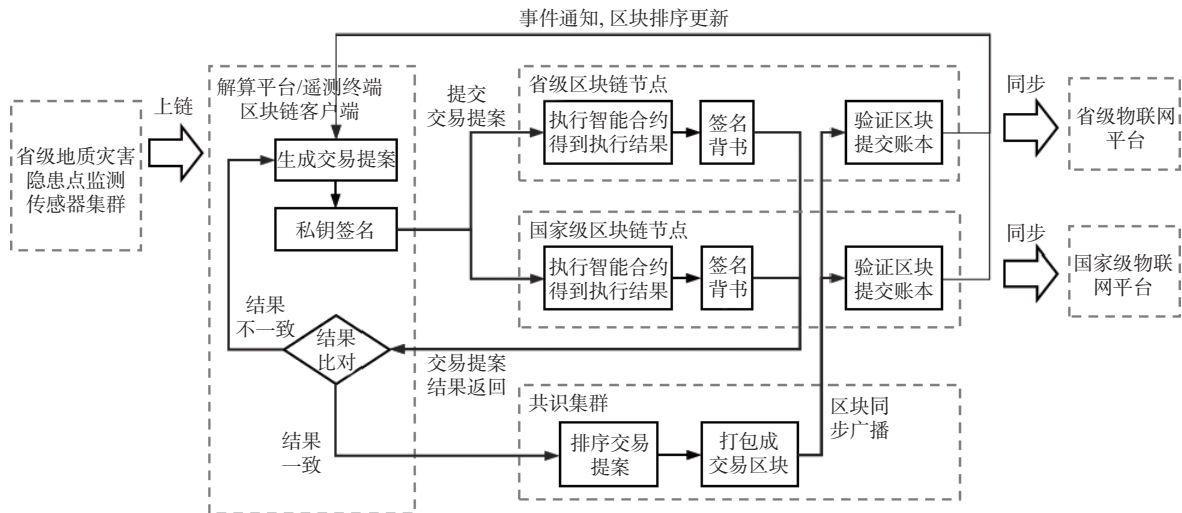


图 3 “可信数据流”业务流程图

Fig. 3 Business flow chart for the “trusted data flow”

恢复时间长对业务造成的冲击,在传统区块链网络中,系统故障恢复时间(T_f)为:

$$T_f = T_d + T_r + T_v \quad (1)$$

式中: T_d ——系统故障诊断时间;

T_r ——系统修复时间;

T_v ——系统验证时间。

优化后,系统故障恢复时间主要为故障转移时间,计算公式为:

$$T_f = F_{\text{delta}}(\text{Cluster}-\text{Node}) \cdot T_{\text{timeout}} + T_c \quad (2)$$

式中: $F_{\text{delta}}(\text{Cluster}-\text{Node})$ ——主节点与备份节点之间编号差函数;

Cluster——主节点的编号;

Node——备份节点的编号;

T_{timeout} ——2 个节点之间的超时时间;

T_c ——节点开始接收新请求的平均反应时间,业务连续性得以保障。

3 实验与分析

本文基于地质云构建了“区块链+全国地质灾害风险预警系统”的实验原型,验证改进后系统的数据一致性、数据防篡改、系统可靠性以及性能影响。其中数据一致性用来测试多方之间数据自动同步功能;数据防篡改用来验证数据链路的安全性,即能否有效降低恶意篡改可能性;系统可靠性用来验证在多种极端条件下系统的健壮性和可用性,确定能否保证业务的连续性;性能测试用于评估对现有系统的影响,以及改进系统所需的资源量。

3.1 实验环境部署

实验环境部署在地质云上,详细构架如图 4。

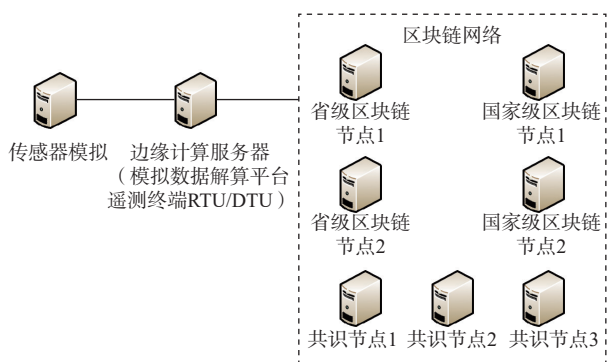


图 4 测试环境部署架构图

Fig. 4 Framework of test environment arrangement

图中每个设备部署在一台云服务器上,单服务器硬件配置包括 4 核 2.0 GHz CPU, 8 GB 内存, 100 GB

硬盘, 10 Gbps 局域网带宽。共包括 3 个采用 Raft 共识机制的共识节点, 省级和国家级共 4 个账本节点, 1 台边缘计算服务器用于区块链数据转发, 1 台传感设备用于模拟裂缝、GNSS 位移、倾角、加速度、雨量和土壤含水率等多个传感器产生的监测数据。

3.2 实验结果及分析

3.2.1 数据一致性

实验用例: 分别停止所有的省级节点和所有的国家级节点, 测试账本能否自动同步。

实验结果: 当省级节点全部停止后, 业务客户端可以使用国家级活动节点持续进行数据上链操作, 业务不受影响。当停止的省级节点再次启动后, 节点将从国家级活动节点自动拉取最新账本数据, 通过对日志分析得出其同步时间与区块数量差相关, 新生成的区块越多, 需要同步的区块越多, 时间就越长。反之, 将国家级区块链节点全部停止并重启, 得到相同的测试结果。

实验结论: 利用区块链节点账本自动同步的特性, 可以解决多节点数据不一致和对账问题。

3.2.2 数据防篡改

设计 2 个实验场景测试篡改数据的可能, 并验证能否被区块链网络有效侦测到。

实验用例一及结果: 客户端同时提交提案到省级账本节点和国家级账本节点的智能合约进行计算后, 客户端将收集到的计算结果篡改后提交到共识节点进行上链操作。结果表明, 客户端应用程序尝试提交的交易的签注结果不一致, 在出块验证时所有同级节点都将检测到该交易, 并且该交易将无效。

实验用例二及结果: 直接修改省级账本节点 1 上的账本文件数据。结果表明, 省级节点会侦测到账本数据已损坏, 并且省级节点 2 和国家级节点将发现并找出“不良”节点, 该节点后续将无法参与网络直到其本地账本被改正。

实验结论: 在区块链中, 客户端企图篡改智能合约中计算的结果再进行上链操作, 将被账本节点侦测出来是无效交易; 另一方面, 当服务器端的账本节点直接篡改本地账本数据时, 会被其他账本节点侦测出数据的有效性, 从而保障数据的可信度和安全性。

3.2.3 系统可靠性

可靠性实验主要是测试系统鲁棒性, 一个健壮的系统可以保证业务数据请求被正确处理而不丢失, 主要体现在当其中部分服务处于不可用状态时, 系统整体对业务支持的能力是否受到影响, 影响有多大。实验方法包括停止部分账本集群节点服务、停止部分共

织集群节点以及增加共识集群节点数量 3 种方式,结果如下:

实验用例一及结果:设计 4 个账本节点,当活动的账本节点数量大于 1 个时,整体系统运行可不受影响,交易正常进行;并且重新启动已停止的账本节点,该类节点将自动从正常活动账本节点获取最新数据进行同步。

实验用例二及结果:当活动共识节点数量减少到 2 个,系统整体可正常运行,业务不受影响;当活动共识节点数量减少到 1 个,共识集群无法工作,业务不能运行。

实验用例三及结果:当把共识集群节点数量调整到 5 个时,系统需要保证至少 3 个活动共识节点,业务才能继续正常进行;结果表明,使用 Raft 共识集群模式的区块链网络,必须保证共识集群节点数量大于 3 且为奇数个,同时保证活动节点数量大于一半。

实验结论:基于区块链解决方案的系统鲁棒性表现优于传统的中心化系统解决方案,能够有效提升系统可靠性。

3.2.4 性能测试结果及分析

性能测试主要测试系统每秒吞吐量 (throughput per second, TPS),对相同环境下原有架构和优化后区块链架构进行对比测试,结果如图 5 所示。

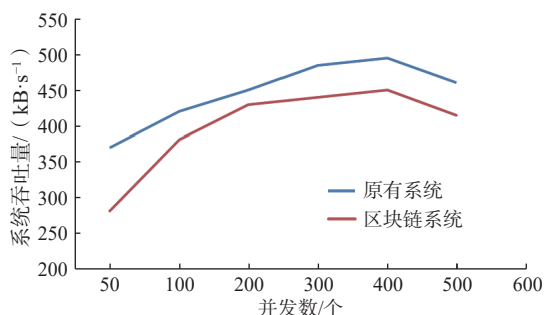


图 5 区块链系统与原有系统数据吞吐量比较图

Fig. 5 Comparison of throughput between the blockchain system and the original system data

结果显示,对比原有系统,区块链系统的总体性能损耗低于 20%,在并发数 400 时达到最优 TPS,可以满足业务运行需求,在实际生产系统中适当提高资源配置即可保持原有性能。

4 讨论

随着智能传感、物联网、区块链等技术的快速发展,未来会有更多设备接入地质灾害自动化监测网络,监测数据的可信性和预警信息的及时性将会受到更高程度重视。本文提出的框架思路与技术方法对

于提高系统安全运行能力具有很好借鉴意义,同时区块链在数据溯源、隐私保护等方面具有潜力,本文给出未来可能的 3 个研究方向。

1)通过区块链技术推进可见数据溯源,研发基于 Hyperledger Fabric 等框架的可追溯模型^[6],实现监测数据从采集传输、处理分析、共享应用等环节的全程安全监控、追溯和管理。

2)通过区块链技术强化可靠隐私保护,开发智能合约加密算法,通过公私钥方式保护公共隐私文件、安全共享和隐私保护^[7],实现各参与方的隐私保护与高效安全的多方数据共享协同。

3)通过区块链技术探索可信边缘预警,设计适用于边缘认证信息传递的签密方案^[8],实现野外现场多源数据汇聚、自动分析与预警信息发布过程安全可控。

5 结语

本文在分析系统研究全国地质灾害动态监测系统数据安全方面存在问题的基础上,提出了一种基于分布式账本技术与共识机制的可信数据流建立方法,将区块链技术与地质灾害监测物联网系统相结合,通过对数据解算平台和遥测终端等设备进行区块链客户端化改造,构建“区块链+全国地质灾害风险预警系统”总体框架,实验模拟与分析表明本方案可以解决多节点数据异常和对账问题,提高数据一致性、数据防篡改与系统可靠性,同时具有较低的性能开销。为提升全国地质灾害风险预警系统数据安全能力提供了顶层思路与技术方法。

参考文献 (References):

- [1] 殷跃平. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): I - II. [YIN Yueping. Geological hazard risk investigation and evaluation method and its application practice [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): I - II. (in Chinese)]
- [2] 刘传正. 突发性地质灾害的监测预警问题 [J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(2): 1 - 4. [LIU Chuanzheng. Study on the early warning of the abrupt geo-hazards [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(2): 1 - 4. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 赛迪(青岛)区块链研究院. 2021 年中国区块链发展分析 [J]. 软件和集成电路, 2022(7): 78 - 90. [Saidi (Qingdao) Blockchain Research Institute. Analysis on the development of blockchain in China in 2021 [J]. Software and integrated circuit, 2022(7): 78 - 90. (in Chinese)]

- [4] AZARIA A, EKBLAW A, VIEIRA T, et al. MedRec: Using blockchain for medical data access and permission management[C]//2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD). Vienna, Austria: IEEE, 2016: 25 – 30.
- [5] 张鸣之, 湛兵, 赵文祎, 等. 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 54 – 59. [ZHANG Mingzhi, ZHAN Bing, ZHAO Wenyi, et al. Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 54 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张荣. 区块链金融: 结构分析与前景展望 [J]. *南方金融*, 2017(2): 57 – 63. [ZHANG Rong. Blockchain finance: Structural analysis and prospect[J]. *South China Finance*, 2017(2): 57 – 63. (in Chinese)]
- [7] 周万锴, 龙敏. 基于区块链的环境监测数据安全传输方案 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(1): 315 – 320. [ZHOU Wankai, LONG Min. Secure transmission scheme for environmental monitoring data based on blockchain[J]. *Computer Science*, 2020, 47(1): 315 – 320. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 白翔, 许从方, 柳兴, 等. 区块链物联网安全技术综述及关键技术分析 [J]. *信息技术*, 2022, 46(10): 24 – 30. [BAI Xiang, XU Congfang, LIU Xing, et al. Overview of blockchain Internet of Things security technology and analysis of key technologies[J]. *Information Technology*, 2022, 46(10): 24 – 30. (in Chinese)]
- [9] 欧阳丽炜, 袁勇, 郑心湖, 等. 基于区块链的传染病监测与预警技术 [J]. *智能科学与技术学报*, 2020, 2(2): 135 – 143. [OUYANG Liwei, YUAN Yong, ZHENG Xinhui, et al. A novel blockchain-based surveillance and early-warning technology for infectious diseases[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, 2(2): 135 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘光星. “区块链+教育”: 耦合机理、风险挑战及法律规制 [J]. *电化教育研究*, 2021, 42(3): 27 – 33. [LIU Guangxing. “blockchain + education”: Coupling mechanism, risk challenges and legal regulation[J]. *e-Education Research*, 2021, 42(3): 27 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 薛庆香, 于英香. 区块链技术在突发公共卫生事件档案管理中的应用研究 [J]. *山西档案*, 2021(2): 62 – 70. [XUE Qingxiang, YU Yingxiang. Research on the application of blockchain technology in the archives management of public health emergencies[J]. *Shanxi Archives*, 2021(2): 62 – 70. (in Chinese)]
- [12] 张利华, 蒋腾飞, 姜攀攀, 等. 基于区块链的高速铁路监测数据安全存储方案 [J]. *计算机工程与设计*, 2020, 41(4): 933 – 938. [ZHANG Lihua, JIANG Tengfei, JIANG Panpan, et al. Secure storage scheme for high speed railway monitoring data based on blockchain[J]. *Computer Engineering and Design*, 2020, 41(4): 933 – 938. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 胡忠启, 赵锋, 李雪强, 等. 基于区块链的物联网大坝监测系统架构 [J]. *计算机系统应用*, 2021, 30(2): 89 – 96. [HU Zhongqi, ZHAO Feng, LI Xueqiang, et al. Blockchain-based Internet of Things Dam monitoring system architecture[J]. *Computer Systems & Applications*, 2021, 30(2): 89 – 96. (in Chinese)]
- [14] 吴家龙, 苏梦园, 邓婷, 等. 区块链技术在国土空间生态修复中的应用构想 [J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(10): 67 – 74. [WU Jialong, SU Mengyuan, DENG Ting, et al. Application conception of blockchain technology in ecological restoration of land space[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(10): 67 – 74. (in Chinese)]
- [15] 王利朋, 关志, 李青山, 等. 区块链数据安全服务综述 [J]. *软件学报*, 2023, 34(1): 1 – 32. [WANG Lipeng, GUAN Zhi, LI Qingshan, et al. Overview of blockchain data security services[J]. *Journal of Software*, 2023, 34(1): 1 – 32. (in Chinese)]
- [16] 李天明, 严翔, 张增年, 等. 区块链+物联网在农产品溯源中的应用研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(23): 50 – 60. [LI Tianming, YAN Xiang, ZHANG Zengnian, et al. Application research of blockchain + Internet of Things in agricultural product traceability[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(23): 50 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 翁晓泳. 基于区块链的云计算数据共享系统研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(3): 120 – 124. [WENG Xiaoyong. Research on blockchain based cloud computing data sharing system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(3): 120 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 冯景瑜, 于婷婷, 王梓莹, 等. 电力物联场景下抗失陷终端威胁的边缘零信任模型 [J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(5): 1120 – 1132. [FENG Jingyu, YU Tingting, WANG Ziyang, et al. An edge zero-trust model against compromised terminals threats in power IoT environments[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(5): 1120 – 1132. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真