

超高可用 MEC 跨域协同技术

Research and Practice on Ultra-High Availability
MEC Cross-Domain Collaboration Technology


研究及实践

宋光敏¹,金相意²,程远³,管立军³,和杉杉²,郑思源²,张思繁⁴(1. 浙江理工大学,浙江 杭州 310018;2. 联通(浙江)产业互联网有限公司,浙江 杭州 311199;3. 中讯邮电咨询设计有限公司,北京 100048;4. 中国联通浙江分公司,浙江 杭州 310051)
Song Guangmin¹,Jin Xiangyi²,Cheng Yuan³,Guan Lijun³,He Shanshan²,Zheng Siyuan²,Zhang Sifan⁴(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Unicom [Zhejiang] Industrial Internet Co., Ltd., Hangzhou 311199, China; 3. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 4. China Unicom Zhejiang Branch, Hangzhou 310051, China)

摘要:

针对传统边缘计算在工业复杂场景中可用性不足的问题,提出超高可用架构的 MEC 算力协同方案。该方案基于容器编排智能化调度分布式数据节点,利用分布式条带卷存储提升系统读写和并发性能,同时采用同步多主机集群来保障数据安全和系统高可用。实验表明,基于本方案打通跨域 MEC 节点互联,可实现业务无缝低时延和稳定大带宽,任意节点宕机时都能保障业务连续性 & 数据完整性,实现了高性能的 MEC 跨域协同,证实了其在工业复杂场景下的实用价值。

关键词:

算力协同;边缘计算;跨域协同;智能化调度;超高可用
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.04.013
文章编号:1007-3043(2026)04-0076-06
中图分类号:TN919
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Abstract:

In order to solve the problem of insufficient availability of traditional edge computing in complex industrial scenarios, it proposes a MEC computing power collaboration scheme with ultra-high availability architecture. This solution is based on intelligent scheduling of distributed data nodes through container orchestration, and utilizes distributed stripe volume storage to improve system read/write and concurrency performance. At the same time, synchronous multi host clusters are used to ensure data security and high system availability. The experiment shows that based on this scheme, cross domain MEC node interconnection can be achieved, which can achieve seamless low latency and stable large bandwidth for business. In the event of any node failure, business continuity and data integrity can be guaranteed, achieving high-performance MEC cross domain collaboration and proving its practical value in complex industrial scenarios.

Keywords:

Computing power collaboration; Edge computing; Cross-domain collaboration; Intelligent scheduling; Ultra-high availability

引用格式:宋光敏,金相意,程远,等. 超高可用 MEC 跨域协同技术研究及实践[J]. 邮电设计技术,2026(4): 76-81.

1 概述

在工业复杂场景下,传统的技术在并发性和扩展性等方面存在难以逾越的瓶颈。传统的算力调度依赖中心化平台,虽然能够在一定程度上实现资源匹配,但面临单点故障、数据可信度不足和调度瓶颈等问题^[1]。目前算力网络倾向于将算力资源分配给单一任务或用户,这种独占模式虽然能够满足特定需求,

但限制了算力资源的灵活性^[2]。当算力资源的使用、分配和调度存在问题时,将限制研发效率并引发业务中断。例如,现场设备网络和上层网络中断将造成制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)中的生产数据无法实时报工,进而导致MES中的数据不准确,可能在短时间内造成巨大的生产损失。此外,在远程控制室外运行的作业车辆、设备时,若发生服务器故障^[3]、机房断电、物理网络短路、黑客攻击等引起的数据传输中断,将严重影响敏感业务的正常访问。

收稿日期:2026-03-07

为避免发生类似情况,本文提出工业复杂场景下超高可用架构算力协同技术方案,解决系统中计算节点故障问题,提高数据的计算和存储冗余能力,实现高可用计算能力。与传统意义上的高可用(如异地容灾^[4])不同,超高可用算力协同采用算力资源的智能化调度和智能化编排,设计分布式条带卷存储,同时采用同步多主机集群保障数据安全和应用程序的高可用。通过云网边协同,实现各多接入边缘计算(Multi-access Edge Computing, MEC)节点与控制面的互联以及 MEC 节点间的互联,从而实现无缝低时延和稳定大带宽。

2 超高可用MEC跨域协同关键技术

2.1 基于容器编排技术的智能化调度和编排

在面临自动化和管理任务的需求时,如资源调配和部署、跨基础架构根据负载压力扩展或移除容器、监控容器运行状况等场景,容器编排技术具备智能化调度的能力。通过采用多个 Master 和多个 Node 节点组建一个集群,在多地数据中心、多个 MEC 机房分别设置多个虚拟机,每个虚拟机都采用 POD 容器编排,打造多活数据中心^[5],同一个多活的 I/O 路径可同时被访问,由业务负载均衡(load balance)系统负责分发路径,发生故障时可实现无缝切换。

容器编排是指在大量机器集群上管理容器化应用程序的过程,一般涉及自动化应用管理工具。通过容器编排技术可以轻松完成部署容器、部署服务、扩展和调度^[6]。在工业复杂场景中,容器编排技术能够有效解决资源管理、负载均衡和故障恢复等问题。例如,在多地数据中心部署中,通过容器编排技术可以实现资源的动态分配和优化,确保每个节点的资源利用率最大化。同时,可通过 gRPC^[7]协议实现 POD 之间的高效通信,进一步提升系统的整体性能和可靠性。

如图 1 所示,编排架构由 Master 节点和多个 Node 节点组成,实现了容器化应用的高效管理和调度。Master 节点负责全局的资源调度、应用部署和状态监控,而 Node 节点通过 kubelet 和 kube-proxy 组件与 Master 协同工作,确保 POD 容器的正常运行。etcd 作为分布式键值存储,为集群提供一致性和高可用性的数据支持。此外,cAdvisor 和 Docker 的集成实现了容器资源的实时监控,而防火墙和互联网的隔离保障了系统的安全性。

这一编排架构不仅解决了资源管理、负载均衡和

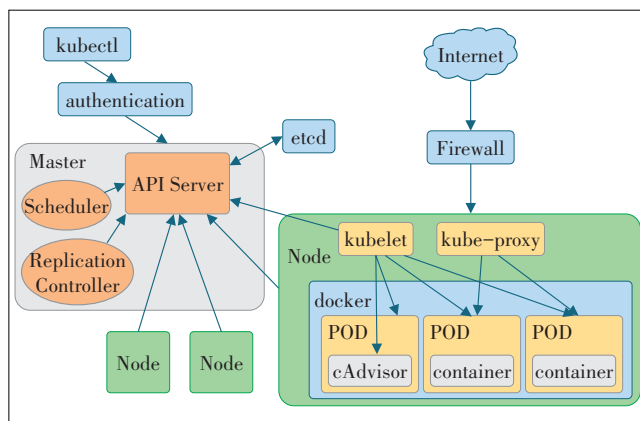


图 1 MEC 跨平台容器编排架构

故障恢复等核心问题,还为多活数据中心的实现提供了技术保障,充分体现了容器编排技术在工业场景中的实践价值,具体有以下几个方面。

a) 智能化调度与高可用性。通过多 Master 和多个 Node 的集群设计,结合跨数据中心的部署,实现了资源的动态分配和故障时的无缝切换,确保关键业务的稳定运行,显著提升了系统的可靠性和容错能力。

b) 高效通信与性能优化。借助 gRPC 协议实现 POD 间的高效通信,降低了延迟,同时通过负载均衡技术优化了资源利用率,确保关键业务在高负载下的稳定运行。

c) 统一管理与跨平台扩展。支持多 MEC 节点的统一资源调度和任务迁移,为工业复杂场景提供了灵活可扩展的技术基础,满足了高可用架构的需求。

2.2 基于 Docker 的分布式条带卷存储

分布式存储作为大规模数据管理的核心基础设施,通过将数据分散存储在多个网络互联的节点上,实现了数据的分布式管理和访问^[8]。本文采用的分布式条带卷存储由多个集群节点组成,以 Distributed striped volumes 创建存储的格式,通过创建 1 正 2 副的基于 Docker 的分布式存储^[9],实现一份文件存储 3 份,分别落地在 3 个不同的节点上。基于 Docker 的分布式存储如图 2 所示,具体实现如下。

a) 客户端或应用程序基于 Distributed striped volumes 的挂载点访问数据。

b) Linux 系统内核通过 VFS API 收到请求并进行处理。

c) 虚拟文件系统(Virtual File Systems, VFS)将请求递交给用户空间文件系统(Filesystem in Userspace, FUSE)的内核文件系统,FUSE 文件系统将数据通过/

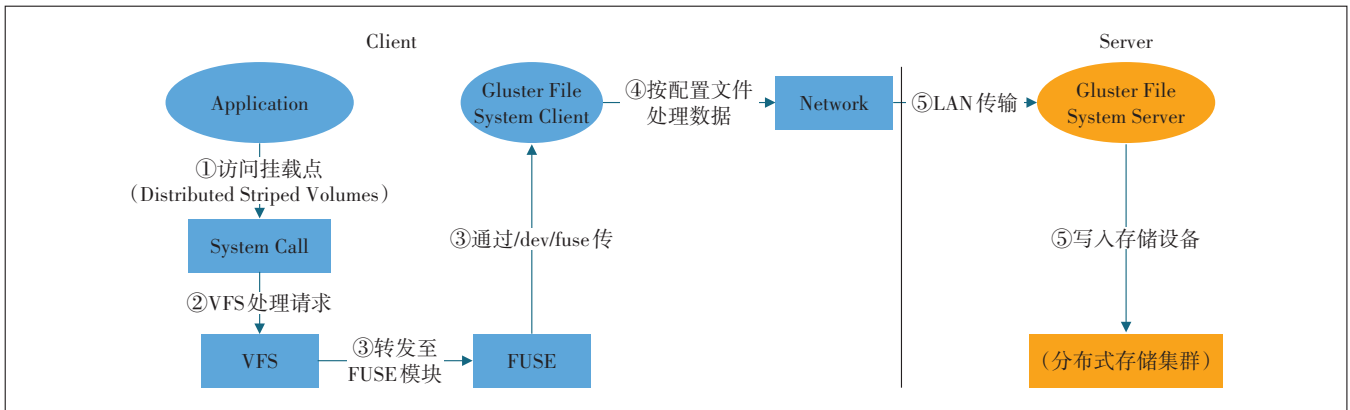


图2 基于 Docker 的分布式存储

dev/fuse 设备文件递交给 Client 端。

d) 收到数据后, Client 根据配置文件的配置对数据进行处理。

e) 通过网络将数据传递至 LAN 网的 Server, 并且将数据写入到服务器存储设备上。

分布式条带卷存储设计要求 BrickServer 数量是条带数(数据块分布的 Brick 数量)的倍数, 兼具了分布式卷和条带卷的特点, 主要面向大文件访问处理, 创建一个分布式条带卷需要 4 台服务器级联。在创建卷时, 如果存储服务器的数量等于条带或复制数, 那么创建的是条带卷或者复制卷; 如果存储服务器的数量是条带或复制数的 2 倍甚至更多, 创建的是分布式条带卷。

在国密哈希算法^[10]的基础上, 将 Distributed striped volumes 存储改进为以文件夹为单位的数据分布式存储方法。提高集群存储中包含数个相关文件的数据文件夹的可靠性, 大幅降低节点故障时数据的丢失率, 对整个系统的可靠性和稳定性有重要意义。

分布式条带卷存储的优势在于其高可用性和高性能。通过数据的多副本存储^[11], 即使某个节点发生故障, 数据仍然可以从其他节点恢复, 确保了数据的完整性和可用性。此外, 条带化存储能够将大文件分割成多个小块并分布存储在不同的节点上, 从而提高数据的读写速度和并发性能。这种存储架构特别适用于工业复杂场景中的大规模数据存储, 例如工厂生产线上的实时数据采集和分析。

2.3 基于同步多主机集群的数据实时计算存储

基于 XtraDB/InnoDB 存储引擎平台, Galera Cluster multi-master 在 MySQL InnoDB 存储引擎的基础上部署虚拟全同步复制(wrep), 通过 Xtrabackup 协议实

现数据同步, 通过状态快照传输(State Snapshot Transfers, SST)和 Xtrabackup 协议实现对 InnoDB 的数据实时计算存储和在线热备份^[12](备份时不影响数据读写)。在备份时, 基于 Xtrabackup 协议将 Master 的信息记录在 Xtrabackup_slave_info 文件中, 实现 Multify master 服务器节点间的数据同步。同时, 实现 MyISAM 和 InnoDB 备份, XtraBackup 协议可在事务系统上执行联机非阻塞、紧密压缩、高度安全的完整备份, 保障在计算节点的恢复时间内, 应用程序仍保持完全可用(见图 3)。

同步多主机集群的核心在于通过多节点的协同工作实现数据的实时计算和存储。在工业复杂场景中, 数据的实时性和一致性尤为重要。例如, 在远程控制场景中, 任何数据的丢失或延迟都可能导致严重的后果。系统对于数据同步的时效性要求比较高, 其中一个系统修改的数据应尽快反映至其他系统^[13]。通过同步多主机集群, 系统能够确保数据在多个节点之间的实时同步, 从而提高数据的可靠性和可用性。

此外, XtraBackup 协议的非阻塞性能确保在备份过程中不会影响数据的读写操作, 这对需要 24×7 不间断运行的工业应用来说尤为重要。通过状态快照传输(SST), 系统能够在新节点加入时快速同步数据, 从而减少集群恢复时间, 提高整体系统的可用性。

2.4 工业复杂场景超高可用 MEC 算力协同技术方案

MEC 具备算力、时延、成本等综合优势, 可以实现业务应用近距离部署在网络边缘, 降低数据传输时延, 提高安全性, 减少带宽占用, 减轻核心网络负载, 并降低功耗^[14]。通过 MEC 动态调整网络资源, 实现对超高可用网络传输质量的保障。MEC 在网络边缘提供计算和数据处理能力的同时, 其虚拟化架构以及弹

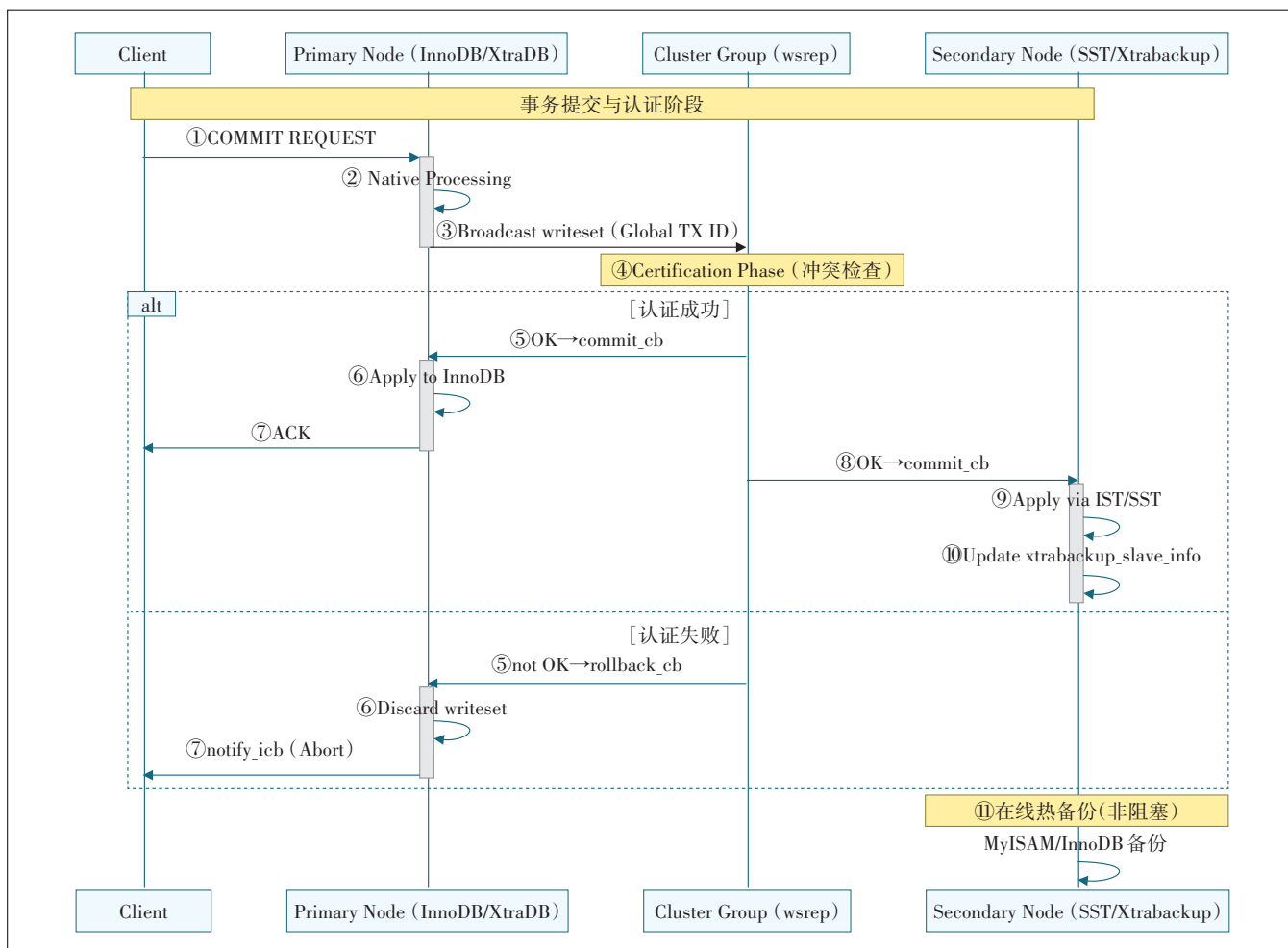


图3 多主机集群实时计算数据同步流程

性扩充能力能够将服务算力、应用部署从云端下沉到网络边缘,极大缩减处理时延,节省回传带宽,提供更好的本地化应用感知,具备实时交互等特性,是IT与CT业务结合的载体。

在工业复杂场景中,MEC的应用能够显著提升系统的响应速度和可靠性。例如,在工厂自动化控制中,MEC可以将计算任务从云端转移到工厂内部的边缘节点,从而减少数据传输时延,提高控制系统的实时性。通过本地业务分流可以降低回传带宽消耗和业务访问时延,提升业务体验^[15]。同时,MEC的虚拟化架构允许动态调整资源的分配,根据实时需求灵活扩展或缩减计算资源,确保系统的高效运行。跨域多MEC虚拟化超高可用平台架构如图4所示。

此外,MEC的弹性扩充能力使得系统能够快速适应业务负载的变化。在高峰期,系统可以动态增加计算资源以满足需求;在低谷期,系统可以释放闲置资

源以降低成本。这种灵活性和可扩展性为工业复杂场景下的超高可用架构提供了强有力的支持。

3 实验设计及结果分析

为验证 MEC 跨域协同技术在工业复杂场景中的性能,基于某省联通在 A 市、B 市、C 市建设的行业 MEC,并在每套 MEC 上部署联通服装行业云数字能力底座实验环境,针对容器编排调度效率、分布式存储可靠性、多主机集群数据同步性能等核心指标开展测试,对比传统架构与 MEC 跨域协同架构的差异。

3.1 容器编排调度性能测试

该测试模拟了 10 个工业 APP 容器在 3 个 MEC 节点(A 市、B 市、C 市)间的动态调度,包含资源扩容、故障迁移、负载均衡 3 类典型场景。测试指标为容器启动时延、跨节点迁移时间和资源利用率,具体测试结果如表 1 所示。

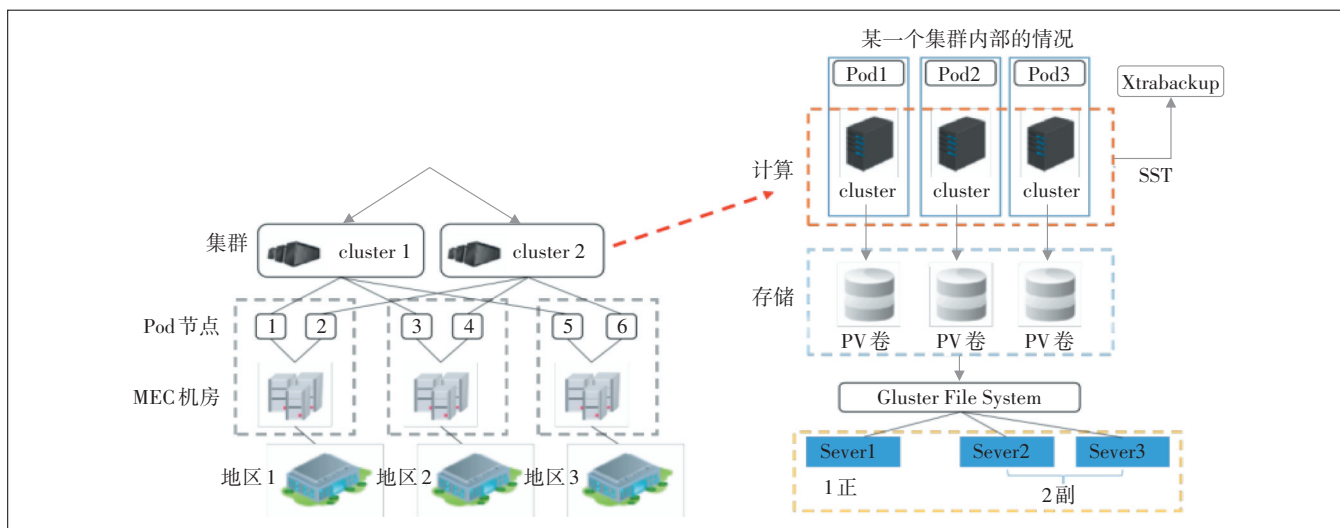


表1 容器编排调度性能测试结果

指标	传统 Kubernetes 架构	MEC跨域协同架构	性能提升效果
容器平均启动时延/ms	82	55	降低 27
跨节点迁移时间/ms	120	45	降低 75
CPU 资源利用率	68%	89%	提升了 21 个百分点
内存资源利用率	72%	91%	提升了 19 个百分点

MEC 跨域协同架构通过智能化调度算法(如基于深度强化学习的负载均衡策略),分别将容器启动与迁移时延降低了 27 ms 和 75 ms,CPU 和内存资源利用率分别提升 21 及 19 个百分点,显著优化了工业 APP 的部署效率与资源利用效率。

3.2 分布式条带卷存储可靠性测试

在 3 节点集群中存储 10 GB 工业日志文件,模拟单节点故障(断电)、双节点故障场景,测试数据恢复时间、吞吐量及数据丢失率。测试指标包括读写吞吐量、故障恢复时间、数据完整性,具体测试结果如表 2 所示。

基于 Docker 的分布式条带卷存储通过数据分片(1 正 2 副)与国密哈希算法优化,将读写吞吐量分别提

表2 分布式条带卷存储可靠性测试结果

场景	传统分布式存储	Docker 分布式条带卷	性能提升效果
顺序读吞吐量(MB/s)	1 200	1 800	提升 600
顺序写吞吐量(MB/s)	800	1 500	提升 700
单节点故障恢复时间/s	120	60	降低 60
双节点故障数据丢失率	50%	0%	完全可靠

升了 600 MB/s 和 700 MB/s。在故障恢复时,条带化存储既可以只恢复故障数据条带,也可实现多节点并行恢复,这使得单节点故障恢复时间缩短 60 s,且双节点故障时数据零丢失,满足工业级高可靠性需求。

3.3 多主机集群数据同步性能测试

在 3 节点 Galera Cluster 集群中模拟实时计算任务,测试数据同步时延、事务处理成功率及抗网络抖动能力。测试指标包括同步时延、事务处理成功率和抖动容忍度,具体测试结果如表 3 所示。

表3 多主机集群数据同步性能测试结果

指标	传统主从复制	同步多主机集群	性能提升效果
数据同步时延/ms	120	25	降低 95
事务处理成功率/%	95	99.99	提升 4.99 个百分点
网络抖动容忍度/ms	50	200	提升 150

通过 XtraDB 存储引擎与 wrep 全同步复制技术,MEC 跨域协同架构将数据同步时延降低至 25 ms,事务处理成功率提升至 99.99%。通过设置心跳检测周期、超时重传周期、缓冲区等策略,同时在网络抖动时不触发主从切换,多主机集群能够容忍 200 ms 的网络抖动而不中断,显著优于传统主从复制架构。

3.4 工业场景业务连续性测试

在服装车间 POD 产品中部署 MES 系统,模拟 300 台缝制设备并发接入,测试订单下发时延、设备状态采集成功率及节点宕机影响。测试指标为端到端时延、采集成功率、故障恢复时间,具体测试结果如表 4

所示。

表4 工业场景业务连续性测试结果

指标	传统云端架构	MEC跨域协同架构	性能提升效果
订单下发时延/ms	450	85	降低365
设备状态采集成功率/%	92	99.99	提升7.99个百分点
节点宕机恢复时间	3 min	10 s	缩短170 s

MEC边缘部署与跨域协同机制使订单下发时延降低了365 ms,设备状态采集成功率接近100%,节点宕机后,业务可通过跨域流量网关自动路由至其他域的同服务节点,用户无感知,恢复时间从3 min缩短至10 s内,有效保障了工业生产的连续性与实时性。

3.5 实验结论总结

a) 资源调度效率突破:容器编排技术将容器启动与迁移时延分别降低了27 ms和75 ms,资源利用率提升了约20个百分点,适配柔性生产的动态资源需求。

b) 存储可靠性跃升:分布式条带卷存储实现双节点数据零丢失与高速读写,单节点故障恢复时间缩短了50%,满足工业数据的高可靠存储需求。

c) 实时计算能力增强:多主机集群同步时延压缩至25 ms,事务处理成功率达99.99%,支撑毫秒级响应的工业控制与实时决策。

d) 业务连续性保障:端到端时延降至85 ms,宕机恢复时间缩短至10 s,为工业现场的无人化、远程化作业提供稳定支撑。

实验结果表明,MEC跨域协同技术在算力调度、数据存储、实时计算等核心环节均显著优于传统架构,尤其在复杂工业场景下展现出卓越的高可用性与低时延特性,为产业集群数字化转型提供了可靠的技术支撑。

4 结束语

本文提出工业复杂场景下超高可用架构的算力协同技术方案,该方案基于MEC边缘部署、动态调整、硬件加速的特性,实现应用程序对无线网络信息的实时访问;基于容器编排技术实现分布式数据存储节点的智能化调度,进而实现服务器节点间的数据同步,为存储在多个节点上的数据提供安全保障,在任意节点宕机的情形下,都能保障服务器节点独立运行并且数据不丢失。

通过引入MEC技术,系统能够有效解决传统架构

中的时延和可靠性问题,为工业复杂场景提供高效、稳定、可靠的计算和存储服务。容器编排技术的智能化调度和分布式条带卷存储的高可用性进一步增强了系统的整体性能和可靠性。同步多主机集群的数据实时计算存储技术则确保了数据的完整性和一致性,为工业应用提供了坚实的数据支持。

参考文献:

- [1] 王斌,马重阳,彭博,等.基于区块链的分布式算力资源调度机制[J].中国宽带,2024,20(5):139-141.
- [2] 陈斐,梁琰,张海君.云边缘网协同赋能无线算力下的资源适配技术[J].移动通信,2025,49(3):46-54.
- [3] 李文斌,戴新发,徐新羽.基于孤立森林和决策树的服务器故障检测[J].计算机与数字工程,2024,52(11):3386-3389,3397.
- [4] 王维民,周耀明,盛鸿文.企业信息数据异地容灾的探讨与应用[J].电脑知识与技术,2012,8(29):6890-6893,6900.
- [5] 谢建灵.多活数据中心建设探索[J].金融电子化,2016(5):61-62.
- [6] 谢兆贤,张文静,徐娅,等.容器编排工具中部署工作节点的资源优化[J].计算机系统应用,2023,32(7):226-239.
- [7] 刘小磊,程伟华,戚林成.基于gRPC协议的监控调用链中组件性能指标研究[J].自动化技术与应用,2021,40(8):81-84,108.
- [8] 胡登奎.云计算技术在分布式存储系统中的实现与优化[J].信息记录材料,2025,26(4):171-173.
- [9] 赛迪顾问.中国分布式存储市场研究[J].软件和集成电路,2023(10):70-80.
- [10] 胡贵宾,常清,胡玉海.基于国密算法区块链技术的智慧金农应用[J].江苏通信,2024,40(5):49-54.
- [11] 穆飞,薛巍,舒继武,等.一种面向大规模副本存储系统的可靠性模型[J].计算机研究与发展,2009,46(5):756-761.
- [12] 郭建忠,赵昶宇.基于DDS中间件实现分布式系统的热备份技术[J].科技与创新,2024(14):130-132.
- [13] 金紫衡.多级系统间数据同步的解决方案[J].指挥信息系统与技术,2011,2(4):48-51.
- [14] 谢晖.5G典型业务场景MEC部署方案研究及应用[J].电信快报,2024(1):22-25.
- [15] 李福昌,李一喆,唐雄燕,等.MEC关键解决方案与应用思考[J].邮电设计技术,2016(11):81-86.

作者简介:

宋光敏,毕业于浙江理工大学,高级工程师,主要从事5G网络赋能工业领域的关键技术及场景研究等工作;金相意,工程师,主要从事5G确定性网络、面向垂直行业的5G创新应用研究等工作;程远,主要从事5G行业创新应用研究等工作;管立军,主要从事5G行业创新应用研究等工作;和杉杉,高级工程师,主要从事制造业与通信技术和人工智能技术融合研究等工作;郑思源,主要从事基于云原生架构的工业领域5G创新应用研究等工作;张思繁,主要从事5G创新网络和差异化业务的端到端解决方案、5G专网及MEC研究等工作。